Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (http://www.ub.tuwien.ac.at).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/).

DIPLOMARBEIT
Master's Thesis

Vergleichende Untersuchungen zu Buhnen an der Donau östlich von Wien

Comparative study of groynes on the Danube to the East of Vienna

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Norbert Krouzecky

E 222

Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Michael Hämmerle
E610 / 95 26 387

Johann-Strauß-Gasse 19/27
1040 Wien

Wien, im Februar 2013 (Michael Hämmerle)

Danksagung

Ich bedanke mich bei allen meinen Freunden für die meist motivierende Aufforderung mein Studium endlich abzuschließen.

Ich bedanke mich bei meinem Freund Barrie Davies für die Korrektur des Abstracts.

Ich bedanke mich besonders bei meinem ehemaligen Studienkollegen und guten Freund DI André Puntigam dafür, dass er mir bei der Auswertung der Versuche mit Rat und Tat zur Seite stand.

Ich bedanke mich selbstverständlich auch bei meinen Eltern Hans und Ortrun dafür, dass sie mich immer unterstützt, aber nie unter Druck gesetzt haben, mein Studium abzuschließen.

Ich bedanke mich von Herzen bei meiner Lebensgefährtin, Mag. Petra Lichtenwallner, dafür, dass sie in letzter Zeit sehr oft die Betreuung unserer Tochter übernommen hat, um mir die Zeit zum Schreiben zu verschaffen, für die Korrektur meiner Diplomarbeitsrohfassung und für ihre Unterstützung.

Ich bedanke mich von Herzen bei meiner Tochter Paula für die Ablenkungen, und dafür, dass sie mir immer wieder zeigt, was wirklich wichtig ist.

Ich bedanke mich außerdem ganz herzlich bei meinem Chef Dipl.-Ing. Dimitrios Stefanoudakis dafür, dass er mir ganz selbstverständlich die Zeit gegeben hat, diese Arbeit zu vollenden.

Ich bedanke mich auch bei Andreas Leopoldseder, Harald Kornherr, Andreas Kothmayer, Amtsdir. Ing. Karl Fuchs und Dipl.-Ing. Dr. techn. Boris Huber für die tatkräftige Unterstützung im Wasserbaulabor.

Mein größter Dank gilt zuletzt Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Norbert Krouzecky. Ich danke ihm für die engagierte Betreuung während der Durchführung der Modellversuche im Labor und für die unterstützende Begleitung beim Verfassen dieser Diplomarbeit einige Jahre später.

Kurzfassung

Die Donau ist östlich von Wien ein ungestauter Fluss. Durch die Regulierungen und die Errichtung von Flusskraftwerken stromaufwärts dieses Flussabschnittes tieft sich die Sohle der Donau aktuell um etwa 2 – 3,5 cm pro Jahr ein. Die Donausohle liegt in diesem Bereich um etwa 1 m tiefer als noch vor 50 Jahren. Diese Sohlerosion beeinträchtigt das ökologische Gleichgewicht des Nationalparks Donauauen nachhaltig. Zudem stellt die Donaustrecke zwischen Wien und der österreichisch-slowakischen Staatsgrenze derzeit eine wesentliche Schwachstelle für die Binnenschifffahrt dar. Um die Probleme in diesem Donauabschnitt zu lösen, hat das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) sowie die *via-donau – österreichische Wasserstraßen Gesellschaft mbH* das *„Flussbauliche Gesamtprojekt Donau östlich von Wien“* ins Leben gerufen. Dieses Projekt soll sowohl die Fahrwasserverhältnisse als auch die ökologischen Defizite im Bereich östlich von Wien verbessern.

Ein Teil dieses Gesamtprojektes bildet die Adaptierung bzw. Erneuerung bereits bestehender Querbauwerke – sogenannter Buhnen – innerhalb dieses Flussabschnittes.

Dazu wurden im Wasserbaulabor der TU Wien mehrere Versuchsserien durchgeführt, um mithilfe physikalischer Modelle unterschiedliche Buhnenformen und Buhnenabstände zu untersuchen.

DI André Puntigam hat im Rahmen seiner Diplomarbeit in einer ersten Modellversuchsreihe die geeignete Buhnenform ermittelt. Darauf aufbauend werden nun in dieser Arbeit zuerst verschiedene Buhnenabstände untersucht, sodann werden in einer weiteren Modellreihe verschiedene Ausführungen der Einbindung der Buhnen in das Ufer (Buhnenwurzel) getestet. Hier werden diese Modellversuche beschrieben und entsprechend den Zielen des *Flussbaulichen Gesamtprojektes* qualitativ ausgewertet und einander gegenübergestellt. Somit soll eine optimale Buhne für dieses Projekt ermittelt werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind inzwischen in Pilotprojekten an der Donau praktisch umgesetzt worden.

Abstract

The Danube East of Vienna is a free-flowing river. As a result of the regulation work and the river power plants upstream, the river bed has deepened 2 – 3.5 cm per year at this stretch of the Danube. Today the river bed is around 1m deeper than it was 50 years ago. This erosion of the river bed has had a negative and sustained effect on the ecological footprint of the Danube Floodplain National Park. Furthermore the stretch of the Danube between Vienna and the Austrian/Slovakian border is a known bottleneck for shipping. To resolve these problems the *Integrated River Engineering Project on the Danube to the East of Vienna* was implemented by the *Federal Ministry for Transport, Innovation and Technology (BMVIT)* and *via-donau - österreichische Wasserstraßen Gesellschaft mbH*

A part of this project is the adaptation and renewal of existing stream structures transverse to the flow direction, known as groynes. At the Vienna University of Technology's laboratory of Hydraulic Engineering, several physical models were developed to investigate suitable groyne shapes and groyne spacings.

In the first series of experiments, DI André Puntigam has determined the appropriate groynes configuration in his master thesis. This dissertation firstly builds on that research by analyzing varying groynes distances in a simulation test. As a second step, another series of testing researches variances of the groynes integration within the bank (groynes root). These model tests are described, qualitatively evaluated and compared in relation to the objectives of the *Integrated River Engineering Project*. The target is to find an optimal groyne for the project.

In the meantime the outputs of this thesis have already been implemented in a pilot project on the river Danube.

Inhalt

1 Einleitung 1

1.1 Zielsetzung der Arbeit 2

1.2 Gliederung der Arbeit 2

2 Flussbauliches Gesamtprojekt Donau östlich von Wien 5

3 Buhnen 9

3.1 Anwendungsgebiete 10

3.2 Bauweisen 13

3.3 Wirkungsweise 14

3.3.1 Nicht überströmte Buhnen 14

3.3.2 Überströmte Buhnen 16

3.4 Buhnengeometrie 16

4 Modellvorgaben für das physikalische Modell 21

4.1 Allgemeines 21

4.2 Vergleichsparameter 22

4.3 Übersicht der durchgeführten Versuche 23

4.4 Beschreibung des Versuchsstandes 24

4.4.1 Flussbaurinne 24

4.4.2 Wasserversorgung 25

4.4.3 Messtechnik 25

4.5 Modellparameter 28

4.5.1 Modellbau 31

4.5.2 zeitlicher Ablauf 32

4.5.3 Normalabfluss 33

4.6 Auswertung der Versuche - Vorgehensweise 35

4.6.1 Morphologische Veränderungen 35

4.6.2 Geschwindigkeitsprofile 36

5 Modellversuchsreihe 1: Variation der Buhnenform 39
6 Modellversuchsreihe 2: Variation des Buhnenabstandes....47
6.1 Durchführung der Versuche 47
6.1.1 Buhnenabstände 2 und 4 (Versuchsserie 5)....47
6.1.2 Buhnenabstände 2,5 und 3 (Versuchsserie 6)....55
6.2 Auswertung der Versuchsserien 5 und 6....61
6.2.1 Buhnenabstände 2 und 4 (Versuchsserie 5)....62
6.2.2 Buhnenabstände 2,5 und 3 (Versuchsserie 6)....74
6.2.3 Gegenüberstellung der Buhnenabstände 81
7 Modellversuchsreihe 3: Variation der Buhnenwurzelausführung....89
7.1 Durchführung der Versuche 89
7.1.1 Versuchsserie 7 - abgesenkte Buhnenwurzel....89
7.1.2 Versuchsserie 8 - „ohne“ Buhnenwurzel....93
7.2 Auswertung der Versuchsserien 7 und 8....95
7.2.1 Versuchsserie 7 (abgesenkte Buhnenwurzel) 95
7.2.2 Versuchsserie 8 („ohne“ Buhnenwurzel) 99
7.2.3 Gegenüberstellung der verschiedenen Buhnenwurzelausführungen....104
8 Pilotprojekt Witzelsdorf....111
9 Zusammenfassung....115
Literaturverzeichnis 119
Abbildungsverzeichnis:....121
10 Anhang 127
10.1 Versuchsserie 5 127
10.1.1 Buhnenabstand 2 Sohlaufnahmen 127
10.1.2 Buhnenabstand 4 Sohlaufnahmen 128
10.1.3 Buhnenabstand 4 Geschwindigkeitsdiagramme....129
10.2 Versuchsserie 6 132
10.2.1 Buhnenabstand 2,5 Sohlaufnahmen 132
10.2.2 Buhnenabstand 2,5 Geschwindigkeitsdiagramme....133

10.2.3 Buhnenabstand 3 Sohlaufnahmen 136
10.2.4 Buhnenabstand 3 Geschwindigkeitsdiagramme 137
10.3 Versuchsserie 7 140
10.3.1 Sohlaufnahmen 140
10.3.2 Geschwindigkeitsdiagramme 141
10.4 Versuchsserie 8 144
10.4.1 Sohlaufnahmen 144
10.4.2 Geschwindigkeitsdiagramme 145

Kapitel 1

1 Einleitung

Die Donau ist mit 2880 km Gesamtlänge nach der Wolga der zweitlängste Fluss Europas. Sie entspringt mit den Quellbächen Brigach und Breg im Schwarzwald und mündet mit einem fünfarmigen Delta ins Schwarze Meer. Sie durchfließt sechs Staaten: Deutschland, Österreich, die Slowakei, Ungarn, Serbien und Rumänien. Für weitere vier Staaten - Kroatien, Bulgarien, Moldawien und die Ukraine - ist sie ein Grenzfluss. Ihr Einzugsgebiet erstreckt sich über nahezu 800.000 km². Mit 96% zählt beinahe das gesamte österreichische Staatsgebiete zu ihrem Einzugsgebiet. Die Donau ist mit einer schiffbaren Länge von 2415 km eine der wichtigsten Wasserstraßen Europas; durch den Rhein-Main-Donau-Kanal wurde eine direkte Verbindung von der Nordsee bis zum Schwarzen Meer geschaffen.

Vom Schwarzwald bis zum Schwarzen Meer durchfließt die Donau vielerlei Landschaften und Klimazonen, entsprechend unterschiedlich ist ihre Flora und Fauna. Trotz zahlreicher menschlicher Eingriffe - nur noch etwa die Hälfte des gesamten Flusslaufes kann noch als zumindest naturnah bezeichnet werden – zeichnet sich die Donau in manchen Abschnitten noch immer durch außerordentlichen Artenreichtum aus. Dazu hat auch beigetragen, dass viele sensible Gebiete als Naturparks und Reservate besonderen Schutz genießen.

Die Donaustrecke zwischen Wien und der österreichisch-slowakischen Staatsgrenze stellt derzeit eine wesentliche Schwachstelle für die Binnenschifffahrt dar. Zu geringe und zeitlich schwankende Fahrwassertiefen im Jahresverlauf schränken die Zuverlässigkeit der Wasserstraße stark ein. Zudem beeinträchtigt eine anhaltende Sohlerosion von 2 bis 3,5 cm pro Jahr das ökologische Gleichgewicht des Nationalparks Donauauen nachhaltig. Als Folge dieser Erosion sinkt der Wasserspiegel, die Auen werden seltener überflutet und mit dem Wasserspiegel der Donau sinkt auch der Grundwasserspiegel, sodass der Auwald auszutrocknen droht. Durch diese Eintiefung wird außerdem die Verbindung der Donau mit ihren Altarmen unterbrochen.

Um diese Probleme im besagten Donauabschnitt zu lösen, hat das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), sowie die *via-donau - österreichische Wasserstraßen Gesellschaft mbH* im Jahr 2002 das *„Flussbauliche Gesamtprojekt Donau östlich von Wien“* (*FGP*) ins Leben gerufen. Dieses Projekt soll sowohl die

Fahrwasserverhältnisse als auch die ökologischen Defizite im Bereich östlich von Wien verbessern.

1.1 Zielsetzung der Arbeit

Ein Teil dieses Gesamtprojektes ist die Adaptierung bzw. Erneuerung bereits bestehender Querbauwerke - der Buhnen - innerhalb dieses Flussabschnitts. Ziel der vorliegenden Arbeit war es, durch vergleichende Versuche geeignete Buhnenformen zu finden, die den Anforderungen des *FGP* gerecht werden. Mittels mehrerer Versuchsreihen wurden in der Flussbaurinne des Wasserbaulabors der TU Wien verschiedene Buhneneinbauwinkel, Buhnenabstände und verschiedene Ausführungen der Buhnenwurzel unter gleichen Bedingungen miteinander verglichen. Die aus diesen Modellversuchen ermittelten Ergebnisse bildeten die Grundlage für ein im Wasserbaulabor der TU Wien betriebenes Flächenmodell im Maßstab 1:33 1/3 und in weiterer Folge für Pilotprojekte an der Donau.

1.2 Gliederung der Arbeit

Zu Beginn dieser Arbeit wird in Kapitel 2 das *„Flussbauliche Gesamtprojekt Donau östlich von Wien“* vorgestellt. Anschließend folgt eine allgemeine Beschreibung von Buhnen in Kapitel 3.

Der Hauptteil, bestehend aus den Kapiteln 4 bis 7, beginnt mit einer Beschreibung der Modellvorgaben für das physikalische Modell. Nachdem sämtliche Versuchsserien und die dafür definierten Auswertungsparameter vorgestellt wurden, folgt der Versuchsstand mit Wasserversorgung und Messtechnik. Im Anschluss daran folgen die Beschreibung der Modellparameter, des Modellbaus und die Vorgehensweise bei der Auswertung.

Der erste Teil der Versuche zur Bestimmung der geeigneten Buhnengeometrien ist die Bestimmung des geeigneten Buhnenwinkels. Die Durchführung dieser Versuche, sowie deren Ergebnisse sind in der Diplomarbeit von DI André Puntigam – *„Vergleichende Untersuchungen zu Buhnenformen an der Donau östlich von Wien“* (PUNTIGAM, 2007) genau beschrieben. In Kapitel 5 der vorliegenden Arbeit werden diese Versuche und deren Ergebnisse kurz zusammengefasst.

Auf den Ergebnissen Puntigams aufbauend, folgt im Hauptteil dieser Arbeit die Fortsetzung der Versuche. Sie haben die Ermittlung des für das *Gesamtprojekt* geeigneten

Buhnenabstandes sowie in einem weiteren Schritt die Auswahl der passenden Buhnenwurzelausführung zum Ziel (Kapitel 6 bzw. 7). Am Ende dieser beiden Kapitel werden die Versuchsergebnisse präsentiert und die daraus gewonnenen Erkenntnisse diskutiert.

In Kapitel 8 wird schließlich das bereits umgesetzte Pilotprojekt Witzelsdorf vorgestellt. Die Baumaßnahmen erfolgten im Anschluss an diese Versuche und deren Auswertung, und waren bei Fertigstellung dieser Arbeit bereits umgesetzt.

Kapitel 2

2 Flussbauliches Gesamtprojekt Donau östlich von Wien

Für die Donau östlich von Wien wurde ein integratives Gesamtprojekt entwickelt – das *„Flussbauliche Gesamtprojekt Donau östlich von Wien (FGP)“*. Dieses Projekt soll im genannten Donauabschnitt der Sohleintiefung nachhaltig entgegenwirken, umfangreiche Renaturierungsmaßnahmen umsetzen sowie für zuverlässige Fahrwasserbedingungen für die Donauschifffahrt sorgen (VIA DONAU, Zugriff im Oktober 2012).

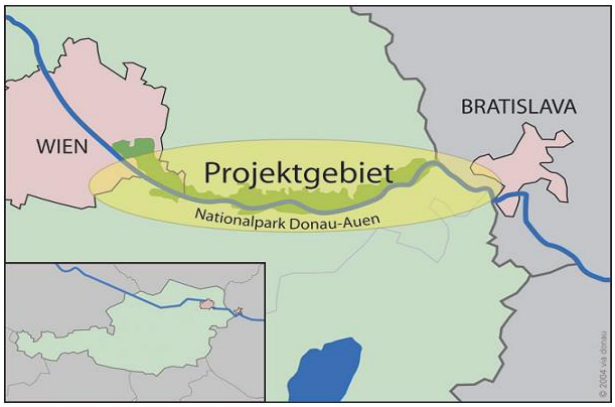


Abbildung 2.1 - Projektgebiet "Flussbauliches Gesamtprojekt Donau östlich von Wien" (VIA DONAU, Zugriff im Oktober 2012)

Das Projektgebiet erstreckt sich vom Kraftwerk Freudenau (Strom km 1921,0) bis zur österreichisch-slowakischen Staatsgrenze (Strom km 1872,7).

Im gesamten Flussabschnitt bestehen Defizite im Bereich der Ökologie, der Schifffahrt und des Wasserbaus. Die Donau ist in diesem Bereich als Folge der Donauregulierung im 19. Jahrhundert ein regulierter Fluss. Die Ufer sind mit Blockwurf gesichert und zwängen so die Donau in ein enges Korsett. Zwar handelt es sich um eine freie Fließstrecke ohne Stauhaltungen, aber durch die Kraftwerke oberhalb des Projektgebietes fehlt es dem Fluss an Geschiebe. Dadurch wird die Flusssohle eingetieft und zwar derzeit etwa 2 bis 3,5 cm pro Jahr. Dies führt zu einer Absenkung des Wasserspiegels, wodurch die bestehenden Buhnen und Leitwerke bereits bei Mittelwasser aus dem Wasser ragen und teilweise an Funktionalität eingebüßt haben. Auch die in den letzten Jahren durchgeführten Gewässervernetzungen bei Orth / Schönau, Haslau / Regelsbrunn und Stopfenreuth werden zunehmend unwirksam, da die Einströmöffnungen mehr und mehr aus dem Wasser

„wachsen“. Mit der anhaltenden Sohlerosion sinkt auch der Grundwasserspiegel, was für die Donau-Auen gravierende Folgen hat, weil die Verbindung zwischen Fluss und Auen immer mehr unterbrochen wird.

Auch die Schifffahrt wird durch den besagten Flussabschnitt vor Probleme gestellt. Im Rahmen des Wasserstraßennetzes wurde der Donauabschnitt östlich von Wien aufgrund der saisonal schwankenden Fahrwassertiefen durch die EU als Engpass eingestuft. Die Wirtschaftlichkeit der Binnenschifffahrt wird durch die daraus resultierende geringere Abladetiefe sowie Einschränkungen in der Planbarkeit erheblich dezimiert. Zur Sicherung der schifffahrtstechnischen Mindestanforderungen finden derzeit kontinuierlich Baggerungen statt, die jedoch zu keinen nachhaltigen Verbesserungen führen.

Durch das FGP sollen diese Defizite im Projektgebiet behoben werden, ohne jedoch den bestehenden Hochwasserschutz zu verschlechtern.

Abbildung 2.2 - Donauabschnitt bei Witzelsdorf (Quelle: google maps, Zugriff im Oktober 2012)

Die Planung dieses Gesamtprojektes ist das Ergebnis eines mehrjährigen, integrativen Prozesses. Von Anfang an wurde versucht, sowohl die Anforderungen des sensiblen Ökosystems, als auch die der Schifffahrt sowie wasserwirtschaftliche Aspekte im selben Maß zu berücksichtigen. In einem Moderationsverfahren wurden die von Experten aus Ökologie, Schifffahrt und Wasserbau erarbeiteten Konzepte mit Umweltschutzorganisationen, Wirtschaft, Politik und den Anrainergemeinden diskutiert. Die daraus hervorgegangenen Planungsgrundsätze wurden wiederum von einem interdisziplinär zusammengesetzten Planungsteam verwendet, um das Gesamtprojekt zu entwickeln.

Durch diese interdisziplinäre Planung können die Entwicklungsziele erreicht werden, ohne dabei den Hochwasserschutz zu beeinträchtigen. Die nachhaltige Verbesserung der Fahrwasserbedingungen für die Schifffahrt unter Niederwasserbedingungen wird durch die Neugestaltung der Regulierungsbauwerke erreicht. Die Ausformung und Positionierung der Buhnen und Leitwerke wird nach nautischen und ökologischen Gesichtspunkten optimiert. Um den Verbauungsgrad zu reduzieren, sollen Buhnen und Leitwerke nur dort errichtet werden, wo sie unbedingt erforderlich sind. Durch die Buhnen wird der Niederwasserspiegel nur dort gehoben, wo es für die Schifffahrt notwendig ist. Aus dem Blickwinkel der Schifffahrt ist das Ziel des *Flussbaulichen Gesamtprojektes* eine ganzjährige gesicherte Abladetiefe für wirtschaftliche Transporte. Die durchschnittliche Auslastung der Schifffahrt soll dadurch von ca. 60% auf annähernd 80% gesteigert werden (VIA DONAU, Zugriff im Oktober 2012).

In den Bereichen, in denen sich die Sohle aufgrund des fehlenden Geschiebes eintieft, wird mittels der granulometrischen Sohlstabilisierung entgegengesteuert. Dabei wird in besonders strömungsexponierten Bereichen die Stromsohle mit gröberem Donaukies belegt. Dieser zugefügte Kies ist mit 40 bis 70 mm etwas gröber als der größte Teil des derzeit natürlich vorkommenden Geschiebes, aber kleiner als das natürlich vorkommende Größtkorn. Die genaue Körnung und die Belagstärke werden durch Versuche ermittelt. Mit der Zeit wird diese aufgebrachte Deckschicht aufgrund von zeitweise höheren Sohlschubspannungen (z.B. bei Hochwasser) mit dem bestehenden feineren Sohlmaterial durchmischt. Es bildet sich eine vergröberte dynamische Deckschicht aus. Mit dieser Methode wird keine absolute Sohlstabilisierung erreicht, allerdings wird der Austrag auf etwa 10 bis 15% des derzeitigen Geschiebeaustrags reduziert. Die verbleibende Eintiefung kann dann im Zuge der flussbaulichen Instandhaltung durch Zugabe von Geschiebe erfolgen. In einem ersten Schritt werden diese Kieszugaben nur in tieferen Abschnitten erfolgen. Die morphologische Entwicklung wird im Rahmen der interdisziplinären Begleitforschung sehr genau beobachtet und dokumentiert. Im Falle stärkerer Eintiefungen in anderen Bereichen können in einem weiteren Schritt auch dort Sohlstabilisierungen vorgenommen werden.

Neben der Verbesserung der Bedingungen für die Schifffahrt ist die Optimierung der ökologischen Verhältnisse der Donau-Auen und eine Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit der Nebenarmsysteme das zentrale Anliegen des *FGP*. Dabei soll eine weitgehende Annäherung der hydrologischen und morphologischen Faktoren an den ursprünglichen Zustand des Gewässersystems erfolgen. Ein wichtiger Punkt dabei ist die Erhöhung der Dauer und Frequenz der Durchflüsse der Nebenarme, wobei eine ganzjährige Durchströmung angestrebt wird. Dazu werden die Einströmöffnungen der Nebenarme etwa auf Niederwasserniveau abgesenkt, wodurch ein ganzjähriger Durchfluss von zumindest

einigen Kubikmetern pro Sekunde sichergestellt werden kann. Damit soll erreicht werden, dass das angelandete Feinmaterial auch wieder abtransportiert wird, und somit wird der Verlandungstendenz in den Nebenarmen entgegengesteuert, was die gestalterische Kraft des Flusses wieder weiter in die Au hineinreichen lässt.

Das *Flussbauliche Gesamtprojekt* sieht des Weiteren den Rückbau der Uferbefestigung vor. In Summe wird die Donau auf etwa 30 km Länge aus ihrem engen Korsett befreit. Dieser Uferrückbau betrifft vor allem Gleitufer und Uferzonen, die durch Buhnen und flussbaulich fixierte Kiesbänke weitgehend geschützt sind. Um in Zonen mit ohnehin geringen Wassertiefen eine Aufweitung des Durchflussquerschnittes bei Niederwasser zu vermeiden, ist geplant, die Uferverbauung in diesen Bereichen nur bis auf Niederwasserniveau zu entfernen und den Böschungsfuß zu sichern (siehe Abbildung 2.3). Damit wird angestrebt, dem Fluss wieder mehr Eigendynamik in der Umformung der Uferbereiche zu ermöglichen, während aber der Lauf des Stromes selbst nicht verändert wird.

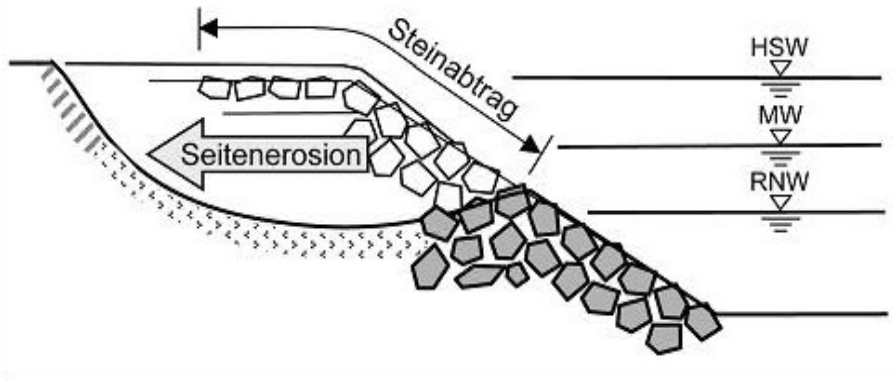


Abbildung 2.3 - Prinzipskizze zum Uferrückbau mit Fußsicherung (VIA DONAU, Zugriff im Oktober 2012)

Kapitel 3

3 Buhnen

Buhnen sind wasserbauliche Regulierungsbauwerke, die - im Gegensatz zu Leitwerken - vom Ufer aus quer zur Fließrichtung in den Fluss eingebaut werden. Dadurch verringern sie den Abflussquerschnitt und erhöhen im verbleibenden Restquerschnitt die Fließgeschwindigkeit.

Abbildung 3.1 - Buhnen an der Elbe (WSV.de, Zugriff im Oktober 2012)

Die ältesten Aufzeichnungen über Buhnen gehen an der preußischen Elbe im Magdeburger Bereich bis auf 1500 zurück (NEGER, 1932). Im Gegensatz zu den später ausgeführten Buhnen bestand die Hauptaufgabe der seinerzeit größtenteils stromabwärts gerichteten und als Einzelbauwerk oder in Kleingruppen errichteten Buhnen darin, den Deichkörper, besonders bei Eisgang, vor dem Angriff des Hochwassers zu schützen und die Abwicklung des Zollverkehrs zu erleichtern (PUDELKO, 1981). Der systematische Buhneneinbau bei vielen großen europäischen Flüssen setzte Mitte des 19. Jahrhunderts mit dem Ziel einer ganzjährigen Schiffbarmachung ein.

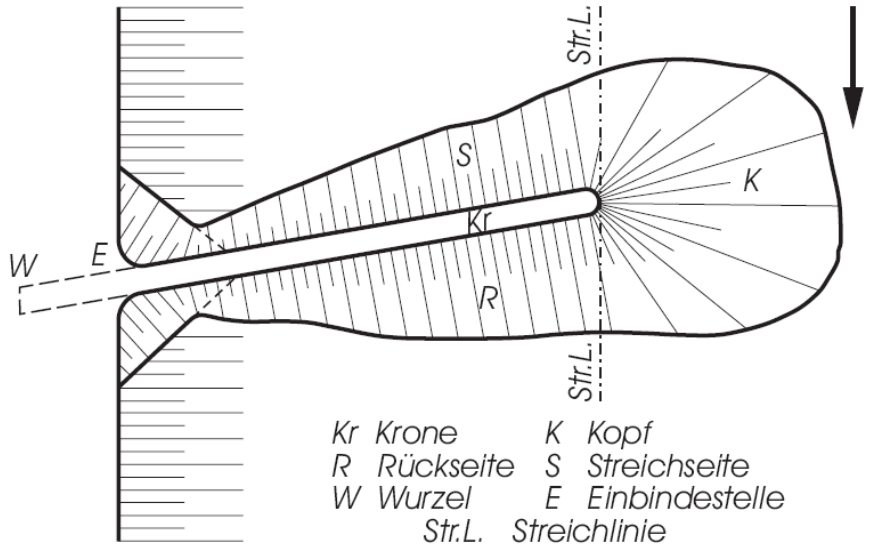


Abbildung 3.2 - Bezeichnung einer Buhne (NEGER, 1932)

3.1 Anwendungsgebiete

Die ursprünglich wichtigste Funktion der Buhnen war der Uferschutz. Richtig angeordnet, vermögen Buhnen, den Abbruch der Ufer zu hemmen und, wenn versenkt, die Ausnagung der Sohle zu beschränken (KREUTER, 1907). Bei der Sanierung und Renaturierung von kanalisierten Flussabschnitten kommen Buhnen nach der Entfernung der seitlichen Ufersicherung (Leitwerk, Dämme) zur Begrenzung der seitlichen Ufererosion in jüngster Zeit wieder vermehrt zum Einsatz.

Die wohl häufigste Anwendung finden Buhnen als Regulierungsbauwerke, um Flussquerschnitte auf eine gewünschte Regelungsbreite zu reduzieren. Da bei geschiebeführenden Flüssen eine exakte Vorgabe der flussbautechnisch gewünschten Breite oft nicht möglich ist, bietet die Buhnenbauweise gegenüber Leit- oder Parallelwerken den großen Vorteil, dass die Buhnen jederzeit ohne allzu großen Aufwand verlängert oder verkürzt werden können (KROUZECKY, 2004). Sie können aber auch eingesetzt werden, um den Verlauf eines Flussabschnittes zu verändern, was oft in Verbindung mit Leitwerken und Durchstichen realisiert wird.

Auch um nutzbare Fläche zu gewinnen, wurden früher Buhnen eingebaut. Innerhalb der Buhnenfelder wird durch die Zirkulationsströmung das vom Fluss mitgeführte Geschiebe abgelagert. Dabei handelt es sich hauptsächlich um kleine Korndurchmesser, Sande und Schwebstoffe. Die Buhnen wurden damals so optimiert, dass es in den Buhnenfeldern zu einer Verlandung kam. Die verlandeten Buhnenfelder wurden dann zum Teil auch künstlich aufgefüllt, um daraufhin mit Blockwurf zum Hauptstrom hin gesichert zu werden. Eine

Sonderausführung der Buhnen zur Anregung der Verlandung kam 1884 am Tiroler Inn bei Terfens zum Einsatz. Dort wurde jede dritte bis vierte Buhne voll ausgebildet, während von den hochwasserfreien Zwischenbuhnen lediglich die Buhnenköpfe errichtet wurden (KROUZECKY, 2004).

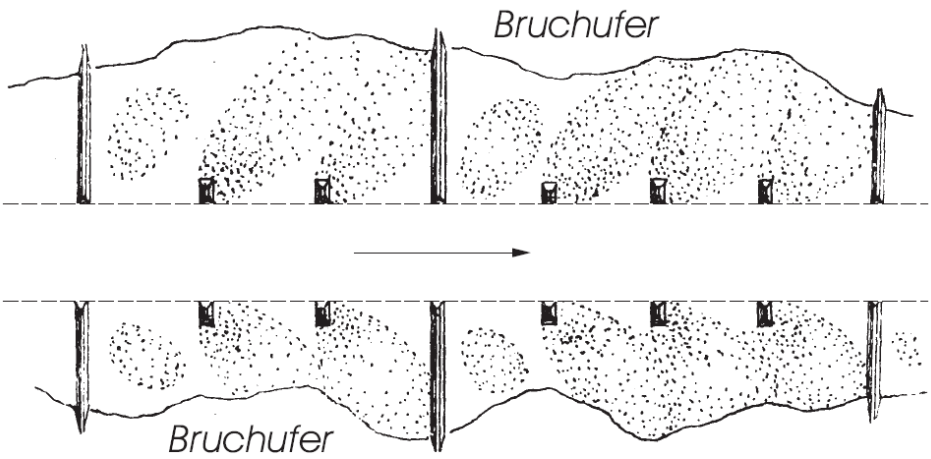


Abbildung 3.3 - Anordnung der Buhnen am Inn bei Terfens, 1890 (KREUTER, 1907)

Abbildung 3.4 - Luftbild des Tiroler Inn bei Terfens nach der Regulierung (Quelle: google maps, Zugriff im Oktober 2012)

Durch den Einbau von Buhnen wird der Abflussquerschnitt vermindert, wodurch die Schleppspannung im Restquerschnitt erhöht, und somit die Gewässersohle eingetieft wird. Diese Sohleintiefung ist heutzutage meistens unerwünscht, besonders in ökologisch sensiblen Gebieten wie z.B. den Donau-Auen. Sie wurde früher allerdings benutzt, um eine einheitliche Fahrrinne für die Schifffahrt zu erhalten und um bei Hochwasser die Wasserspiegellagen abzusenken.

In vielen Fällen bildeten die Anliegen der Schifffahrt den Anlass zum Ausbau eines Flusses. Die vordergründigen Ziele dabei sind: eine möglichst störungsfreie Führung des Wassers, eventuell erwünschte Verflachungen von Krümmungen und vor allem die Herstellung und Aufrechterhaltung bestimmter Fahrwassertiefen (NEGER, 1932).

Weil Buhnen quer in den Fluss gebaut sind, ergeben sich für den Schiffsverkehr auch Nachteile. Zum einen sind die überströmten Buhnen für den Schiffsführer nicht sichtbar, zum anderen beeinflussen die Buhnen auch die Strömung, vor allem im Buhnenkopfbereich, wodurch die Schiffe gezwungen sind, einen größeren Abstand zu halten als zu Leitwerken. Deshalb bevorzugt die Schifffahrt bei einem Gewässerausbau eher die Leitwerke. Demgegenüber steht allerdings die Flexibilität des Ausbaus durch Buhnen, weswegen sie oft bevorzugt zum Einsatz kommen.

In letzter Zeit hat sich beim Ausbau nicht staugeregelter Flüsse vor allem an der deutschen und österreichischen Donau eine Kombination von Buhnenfeldern mit sohlstabilisierenden Maßnahmen etabliert. Der Vorteil der Verwendung von Buhnen liegt darin, dass sich bei gleicher Regelungsbreite aufgrund der Interaktionswirkung zwischen Buhnenfeld und Hauptstrom teilweise erheblich höhere Wasserspiegelanstiege als mit Leitwerken erzielen lassen. Diese Kombination, welche eine Erhöhung des Wasserspiegels bei Niederwasserabfluss ohne gleichzeitige Eintiefung der Flusssohle mit sich bringt, ist allerdings aufgrund einiger noch ungeklärter Fragen vor allem bezüglich der Auswirkung auf die Schifffahrt, die Ökologie und die Wirtschaftlichkeit, noch Gegenstand zahlreicher Diskussionen (KROUZECKY, 2004).

Je nach Bauart, Form und Lage haben Buhnen unterschiedliche Wirkungen auf die Uferbereiche. Buhnen können in ausgebauten Flüssen dazu dienen, Uferbereiche mit Hilfe der Wasserkraft umzuformen und zu redynamisieren. Das kann sich positiv auf die Entwicklung des Gewässers auswirken. Vergleicht man historische mit aktuellen Karten wird aber auch deutlich, dass durch die zunehmende Verlandung von Buhnenfeldern die Ausdehnung subhydrischer und semiterrestrischer Wechselzonen erheblich zurückgegangen ist. Deshalb wird aus Sicht der Ökologie entweder die Freibaggerung stark verlandeter Buhnenfelder oder auch der Entwurf von neuen Buhnengeometrien, die mittels eines modifizierten Strömungsbildes allzu starker Verlandung entgegenwirken, angeregt (SCHWARZ, R., KOZERSKY, H. P., 2001).

3.2 Bauweisen

Wie im Flussbau üblich, werden auch für den Bau von Buhnen aus wirtschaftlichen Gründen Materialien verwendet, die für die Art und Größe der Beanspruchung geeignet und möglichst leicht zu beschaffen sind. Daraus hat sich eine Vielzahl von Buhnenbauweisen entwickelt. Der Buhnenkörper besteht oft aus einem Packwerk, das auch mit Pfählen gesichert sein kann. Der Buhnenkörper sollte so beschaffen sein, dass er bei Sohlenveränderungen nachsinken und sich an die Sohle anschmiegen kann, um Unterwaschungen zu vermeiden. Besondere Sorgfalt - sowohl bei der Planung als auch bei der Ausführung - gilt immer den Buhnenwurzeln und dem Buhnenkopfbereich sowie der ersten Buhne eines Buhnenfeldes, welche dem stärksten Angriff ausgesetzt ist (KROUZECKY, 2004).

An großen Flüssen werden Buhnen aufgrund der höheren Stabilität meist aus Steinschüttungen von Bruchsteinen hergestellt. Bei großen Buhnen wird oft der Kern aus Kies oder Sand mit einem Buhnenkopf aus Bruchsteinen und eventuell einer Pflasterung an der Oberfläche hergestellt. Wenn das zur Verfügung stehende Material allerdings zu weich ist, können bei stark beanspruchten Bauwerken auch Fertigteile aus Beton verwendet werden.

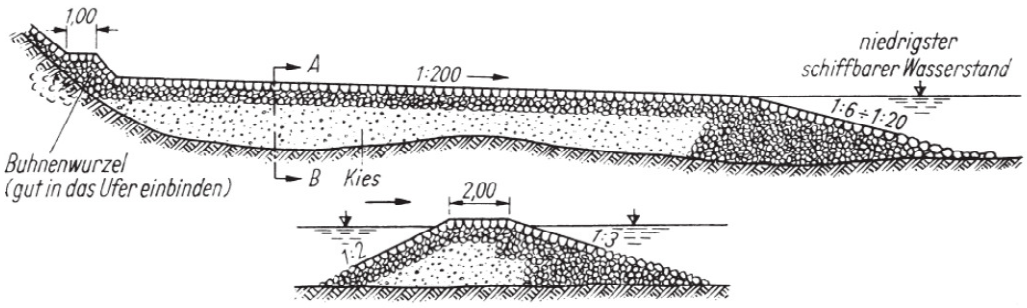


Abbildung 3.5 – Beispiel einer Steinbuhne (PÜRSCHEL, 1967)

In kleineren Fließgewässern kommen andere Buhnenbauweisen zum Einsatz. Da Buhnen durch die Bildung zusätzlicher Lebensräume die Strukturvielfalt der Fließgewässer erhöhen können, werden sie auch im naturnahen Wasserbau gerne als Gestaltungsmittel eingesetzt. Es werden sowohl Buhnen aus Wasserbausteinen, als auch Buhnen in Lebendbauweisen eingesetzt. Bei dieser Buhnenart aus Lebendholz ist bei der Bemessung zu berücksichtigen, dass nach dem Ausschlagen ein reduzierter Abflussquerschnitt zur Verfügung steht. Als Beispiele für Bauweisen aus Wasserbausteinen seien hier Steinsporne und

Steinkastenbuhnen genannt. Bei letzteren handelt es sich um eine schwere Ausführung: Holzkästen in Krainerbauweise werden hier mit Wasserbausteinen aufgefüllt.

3.3 Wirkungsweise

Durch den Einbau von Buhnen kommt es zu einer Einengung des Abflussquerschnittes, was zu einer Erhöhung der Schleppspannung und zu einer Wasserspiegelanhebung im Restquerschnitt führt.

Grundsätzlich ist zwischen nicht überströmten und überströmten Buhnen zu unterscheiden.

3.3.1 Nicht überströmte Buhnen

Im Buhnenfeld bildet sich eine walzenförmige Strömung mit lotrechter Achse aus. Der durch die Buhnen reduzierte Abflussquerschnitt weitet sich unterhalb der Buhne aus. Dieser Ablösungsstrahl trifft die nächst Buhne landseitig vom Buhnenkopf. Damit wird ein Teil des Wassers in das Buhnenfeld gedrückt, was zur Walzenbildung führt (NACHTNEBEL, 2003). Neben der eigentlichen Einschnürung des Abflussquerschnitts durch die gedachte Verbindungslinie der Buhnenköpfe einer Buhnenreihe entsteht durch die Interaktion zwischen Hauptstrom und der Strömung im Buhnenfeld eine zusätzliche Wirbelbildung, welche den Abfluss durch den sogenannten Buhneneffekt zur Gerinnemitte hin konzentriert. Nach der Umströmung des Buhnenkopfes kommt es zur Bildung von Ablösewirbeln, die im Verlauf des Buhnenfeldes an Größe zunehmen, und an der nächsten Buhne ihr Maximum erreichen. Durch die Geschwindigkeitsunterschiede der beiden Strömungen bilden diese Ablösewirbel an der Grenze zwischen Buhnenfeld und Hauptströmung einen turbulenten Übergangsbereich. Durch diese Scherschicht erfolgt ein ständiger Massen- und Impulsaustausch zwischen Buhnenfeld und Hauptströmung. Der Hauptströmung wird kontinuierlich kinetische Energie entzogen. Man spricht daher auch von der Bremskammerwirkung der Buhnenfelder.

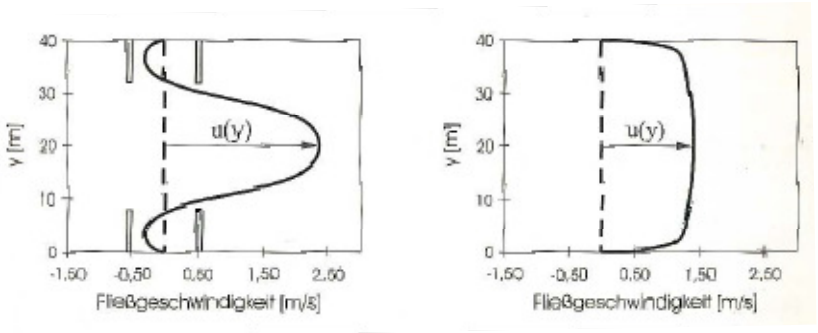


Abbildung 3.6 - Typische Geschwindigkeitsprofile in Querschnitten von Gewässern mit Buhnen (links) und ohne Buhnen (rechts) (KROUZECKY, 2004)

Die Anzahl und Lage dieser Zirkulationsströmungen im Buhnenfeld ist abhängig von der Buhnenfeldgeometrie. Ist das Verhältnis zwischen Buhnenabstand und Buhnenlänge kleiner als 0,5, bilden sich zwei nebeneinanderliegende Wirbel quer zur Strömungsrichtung aus. Beträgt dieses Seitenverhältnis 0,5 bis 2, so bildet sich ein durch einen großen Wirbel dominiertes Strömungsmuster aus. Für Verhältnisse größer 2 sind schließlich Zwischenwirbelsysteme charakteristisch (SUKHODOLOV, 2001).

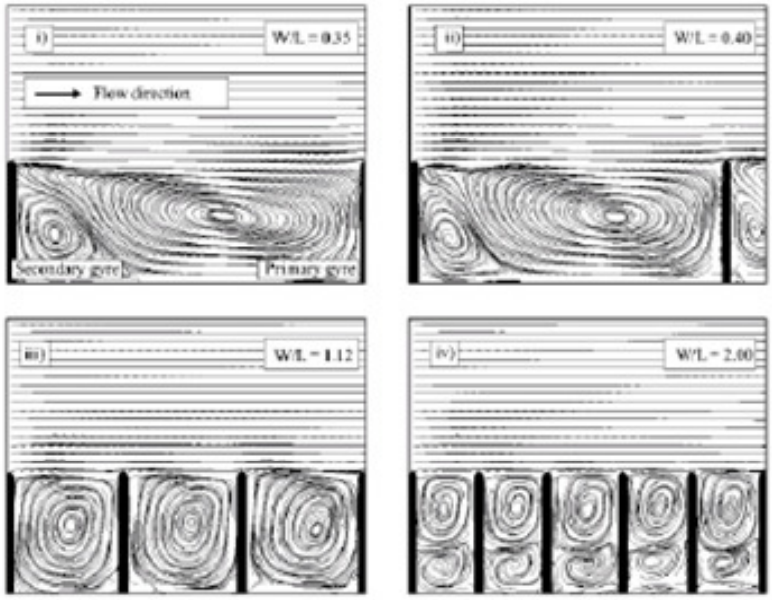


Abbildung 3.7 - Einfluss des Verhältnisses Buhnenfeldbreite zu -länge (W/L) auf die Strömungsverhältnisse im Buhnenfeld (WEITBRECHT, 2004)

Durch die erzwungene Richtungsänderung der Strömung am Buhnenkopf kommt es zu einem Stau, woraus ein Quergefälle entsteht. Durch lokale Beschleunigungsvorgänge kann das am Buhnenkopf zu Auskolkungen führen.

3.3.2 Überströmte Buhnen

Werden die Buhnen überströmt, kommt es für gewöhnlich nicht mehr zu den zuvor beschriebenen Strömungsmustern. Lediglich bei knapp überströmten Buhnen werden einige dieser Strömungsvorgänge zu beobachten sein. Diese werden jedoch von der zum Hauptstrom parallelen Strömung über die Buhnen überlagert. Durch die Einengung des zur Verfügung stehenden Abflussquerschnittes kann es zu starken Verlusten kommen. Wird die Buhnenkrone nur knapp überströmt kommt es oberwasserseitig zu einem Aufstau und über der Buhnenkrone zu einem Fließwechsel. Vor und hinter den Buhnen verursacht die Änderung des Querschnitts Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge. Abhängig von der Böschungsneigung und der Überströmungshöhe kann es an der unterwasserseitigen Böschung zu Ablösungserscheinungen kommen. Dadurch bilden sich Walzen mit horizontaler Achse quer zur Strömung aus. Bei zunehmender Überströmungshöhe nehmen die Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge bei jeder Buhne ab. Das führt einerseits zu einer Verminderung der Interaktion zwischen Buhnenfeld und Hauptstrom und andererseits zu einer Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit im Buhnenfeld.

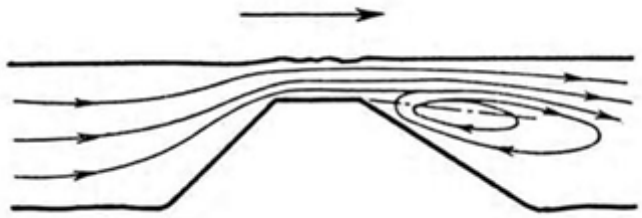


Abbildung 3.8 - Horizontale Walze an der Unterstromböschung (NEGER, 1932)

3.4 Buhnengeometrie

Der Einbauwinkel, der Abstand der einzelnen Buhnen zueinander sowie die Gestaltung der Buhnen selbst, hängen von der Zielsetzung ab, die mit dem Einbau verfolgt wird.

Je nach Einbauwinkel - der Lage der Buhnen gegen den Stromstrich - wird zwischen inklinanten (stromaufwärts gerichteten), deklinanten (stromabwärts gerichteten) und orthogonalen (senkrecht zum Ufer ausgerichteten) Buhnen unterschieden. In den großen europäischen Flüssen wurden bisher meist inklinante Buhnenformen mit einem Einbauwinkel von 75 – 85° zum Ufer verbaut. Diese haben die Eigenschaft, dass die Strömung beim Überströmen der Buhnenkrone (bei Mittel- und Hochwasser) Richtung Stromstrich geleitet wird, wodurch das Ufer vor starkem Angriff geschützt wird.

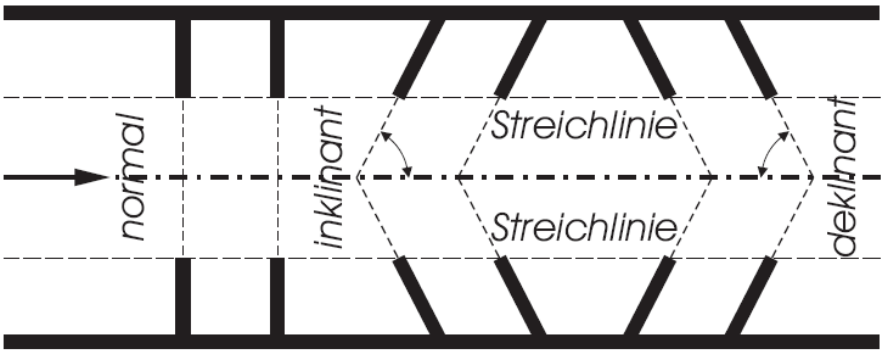


Abbildung 3.9 - Lage der Buhne zum Stromstrich (KROUZECKY, 2004)

Deklinant angeordnete Buhnen wirken bei Niederwasser hinsichtlich des Uferschutzes recht gut, bewirken aber im überströmten Zustand, wenn das Wasser über die Krone senkrecht zum Buhnenrücken abströmt und gegen das Ufer fließt, genau das Gegenteil und führen zu einer starken Erosion am Ufer.

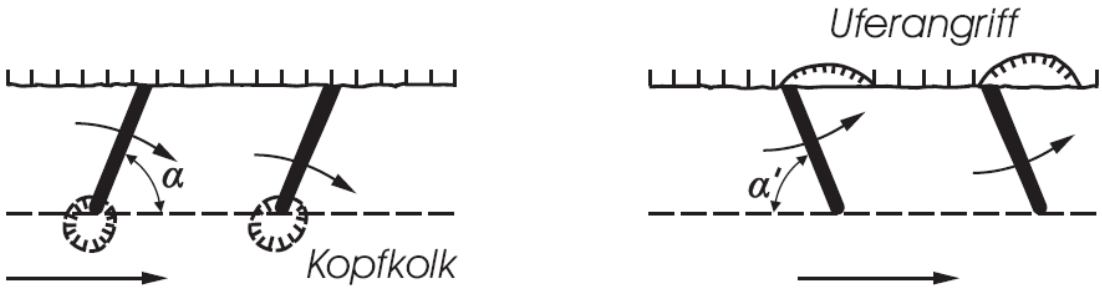


Abbildung 3.10 - Kolkbildung und Uferangriff bei geneigten und überströmten Buhnen (PRESS, 1956)

Die Auskolkungen im Bereich des Buhnenkopfes sind bei deklinant angeordneten Buhnen wesentlich geringer als bei der inklinanten Bauweise. Bezüglich der Verlandung im Buhnenfeld zeigten Versuche von Hager (KREUTER, 1907), dass sie bei deklinant angeordneten Buhnen am geringsten ausfällt. Die Verlandungstendenz im Buhnenfeld ist bei inklinanten Buhnen am stärksten.

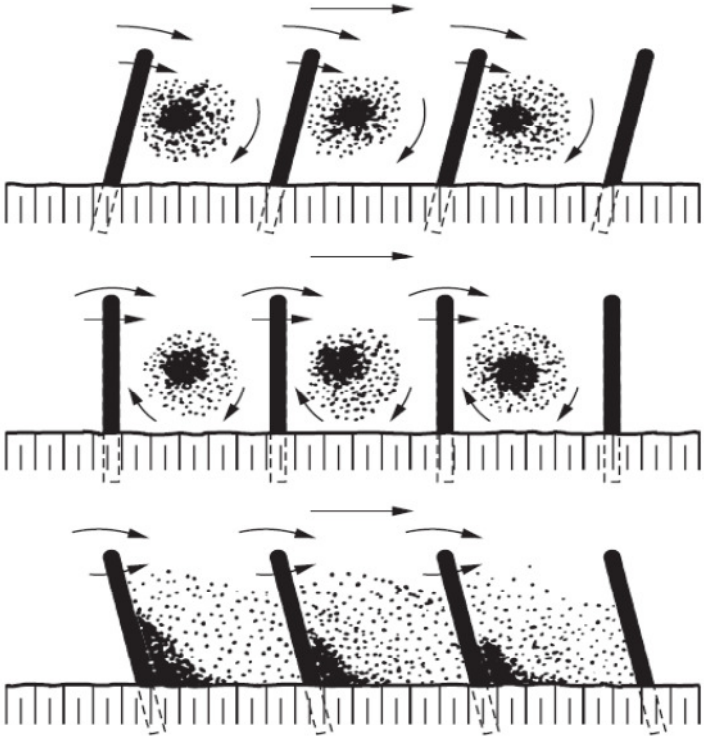


Abbildung 3.11 - Verlandungen im Buhnenfeld bei unterschiedlichen Buhnenrichtungen (PÜRSCHEL, 1967)

Die Länge der einzelnen Buhnenfelder - also der Abstand der Buhnen zueinander - wird heute oftmals noch nach einem Verfahren von Winkel abgeschätzt (WINKEL, 1934). Er hat beobachtet, dass die Stromlinie stromab des Buhnenkopfes um einen Winkel von 6° abgelenkt wird. Damit erreicht wird, dass der Ablösestrahl die nachfolgende Buhne in der Mitte zwischen Buhnenkopf und Ufer trifft, und sich eine ungehinderte Zirkulationsströmung ausbilden kann, ergibt sich ein Buhnenabstand vom etwa 4,5-fachen der Buhnenlänge. Die Erfahrung hat allerdings gezeigt, dass der so ermittelte Buhnenabstand zu groß ist. So wird oftmals als obere Grenze für den Buhnenabstand die zweifache Buhnenlänge angenommen (MALCHEREK, 2004).

Auch die Gestaltung der Buhnen selbst, die Höhenlage der Buhnenkrone sowie die Böschungsneigungen haben Einfluss auf die Strömungsverhältnisse und die morphologischen Veränderungen. So führen die am Buhnenkopf – er ist wohl der am stärksten beanspruchte Teil der Buhne - entstehenden Strömungsverhältnisse zur Ausbildung eines Kolkes. Je flacher die Kopfböschung ausgebildet wird, desto kleiner und flacher wird der stromab entstehende Kolk, und umso weiter stromabwärts vom Buhnenkopf entsteht er (UIJTTEWAAL, 2001). Eine flache Buhnenkopfböschung führt zu einer geringeren Verlandung des Buhnenfeldes. Das bedeutet aber auch eine Verringerung der

schiffbaren Breite bei gleicher hydraulisch wirksamer Länge der Buhnen und höhere Ausführungskosten.

Auch die zuvor bereits erwähnte Grundwalze mit horizontaler Achse stromab der Buhnen kann durch die Neigung der unterwasserseitigen Buhnenböschung beeinflusst werden. Durch eine flache Böschung kann eine Verflachung der Walze und dadurch auch eine Verringerung der Kolkwirkung erzielt werden.

Eher wenig Auswirkung hat die Neigung der Buhnenkrone. Diese kann zwar waagrecht sein, wird aber meist mit einer geringen Neigung in Richtung Hauptstrom ausgeführt.

Die Höhenlage der Buhnenkrone bestimmt, bis zu welchem Abfluss die Buhne nicht überströmt wird und sie dadurch zur Einschnürung des Abflussquerschnittes führt. Buhnen können von versenkten Buhnen (Buhnenkrone wird selbst bei dem niedrigsten Wasserstand überströmt) bis hin zu hochwasserfreien Buhnen (Buhnenkrone wird auch bei Hochwasser nicht überströmt) ausgeführt werden. Am häufigsten wird die Buhnenkrone auf eine Höhe im Bereich Niederwasser bis Mittelwasser ausgelegt.

Kapitel 4

4 Modellvorgaben für das physikalische Modell

4.1 Allgemeines

Durch ein physikalisches Modell wird das Untersuchungsgebiet im Labor mit reduziertem Maßstab nachgebildet. Unter vorab definierten Rahmenbedingungen können daran Strömungsvorgänge und deren Auswirkungen beobachtet werden. Man unterscheidet zwei Gruppen von Modellen. Zum einen ähnliche Modelle, in denen alle Größen im Modell einen vorgegebenen Bezug zu den korrespondierenden Größen in der Natur aufweisen, was durch einen oder mehrere Modellmaßstäbe festgelegt sein kann. Zum anderen benutzt man unähnliche Modelle, die bezüglich der Maßstabswahl keinen Vorgaben unterliegen und deshalb auch beschreibende oder qualitative Modelle genannt werden (WURMS, 2004).

Bei einem hydraulischen Flussmodell wird zur Nachbildung der Ähnlichkeit mit der Natur das Modellgesetz von Froude angewendet. Es kommt bei Strömungen zum Einsatz, die unter dem Einfluss der Schwerkraft stehen (turbulente Strömungen mit freier Wasseroberfläche). Froudesche Ähnlichkeit bedeutet, dass das Verhältnis der Trägheits- und Schwerkräfte in der Natur und im Modell übereinstimmen. Nach diesem Gesetz muss neben der geometrischen Ähnlichkeit auch die Froudezahl im Modell gleich der Froudezahl in der Natur sein.

Bei den in dieser Arbeit beschriebenen Versuchen handelt es sich um Modelle mit beweglicher Sohle. Demnach müsste – nach dem Modellgesetz nach Froude – zur richtigen Abbildung der Natur auch der Korndurchmesser des verwendeten Sohlsubstrates entsprechend verkleinert werden. Die Modellkörnung ist aber nicht beliebig verkleinerbar, da sich ansonsten das physikalische Verhalten ändert.

Da es bei diesen Versuchen aber nur um qualitative Vergleichsversuche mit relativ kleinem Modellmaßstab von etwa 1:100 handelt, wurde ein Modellsand verwendet, der nicht dem Modellgesetz von Froude entspricht. Demnach handelt es sich bei den hier beschriebenen Versuchen um unähnliche Modelle.

4.2 Vergleichsparameter

Die in dieser Arbeit beschriebenen Versuche wurden etwa im Maßstab 1:100 ausgeführt und dienen der Ermittlung geeigneter Buhnenformen, die den Vorgaben für das *„Flussbauliche Gesamtprojekt Donau östlich von Wien (FGP)“* entsprechen. Dabei wurden verschiedene Buhnenformen unter gleichen Bedingungen miteinander verglichen. Im ersten Versuch wurde die derzeit im Projektgebiet verbaute Buhnenform (leicht inklinant, Buhnenabstand a/b = 1,5) im Modell verbaut. Die Ergebnisse aus diesem Versuch dienen als Referenzergebnisse.

Im Sinne des *FGP* sind die durchgeführten Versuche nach folgenden Parametern zu untersuchen:

- **Buhnenkopfkolk**

Für die Stabilität des Buhnenkopfes ist es wichtig, dass der Buhnenkopfkolk möglichst gering ist. In allen Versuchen werden die Volumina der Kolke bestimmt und mit dem Referenzmodell verglichen.

- **Seitenerosion am Ufer**

Um eine morphologische Dynamik in den Uferzonen zu erhöhen, soll die Erosion im Uferbereich möglichst stark sein. Dazu werden wieder in allen Versuchen die Volumina des erodierten Materials bestimmt und einander gegenübergestellt.

- **Buhnenfeldverlandung**

Die Verlandung im Buhnenfeld soll so gering wie möglich sein, um die Wirkung der Buhnen auf die dynamische Gestaltung des Uferbereichs zu erhalten. Auch im Buhnenfeld werden bei allen Versuchen die Volumina ermittelt und miteinander verglichen.

- **Querströmung entlang der Streichlinie**

Damit für die Schifffahrt keine Verschlechterung der Situation entsteht, dürfen die störenden Querströmungen entlang der Streichlinie – die gedachte Verbindungslinie der Buhnenköpfe – nicht größer werden. Während der Versuche werden in mehreren Querprofilen die Querströmungsgeschwindigkeiten gemessen und miteinander verglichen.

4.3 Übersicht der durchgeführten Versuche

In einer ersten Reihe von Versuchsserien wurde der Buhneneinbauwinkel variiert:

Versuchsserie 1: schwach inklinante Buhnenanordnung, Buhnenabstand a/b = 1,5 (traditionelle Bauart, derzeit im Projektgebiet eingebaut, Referenzmodell)

Versuchsserie 2: mäßig deklinante Buhnenanordnung, Buhnenabstand a/b = 1,5

Versuchsserie 3: stark deklinante Buhnenanordnung, Buhnenabstand a/b = 1,5

Versuchsserie 4: sichelförmige Buhnenanordnung, Buhnenabstand a/b = 1,5

Diese vier Versuchsserien sind in der Diplomarbeit *„Vergleichende Untersuchungen zu Buhnenformen an der Donau östlich von Wien“* von DI André Puntigam (PUNTIGAM, 2007) genau beschrieben. Der Vollständigkeit halber folgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse in Kapitel 5.

In einer weiteren Reihe von Versuchsserien wurde der Abstand der Buhnen variiert:

Versuchsserie 5: Buhnenabstand a/b = 2 und a/b = 4

Versuchsserie 6: Buhnenabstand a/b = 2,5 und a/b = 3

Die Durchführung dieser Versuche und deren Auswertung ist in Kapitel 6 beschrieben. Bei diesen zwei Versuchsserien wurden Buhnen mit verschiedenen Abständen miteinander verglichen. Aus Kosten- und vor allem aus Zeitgründen wurden in diesem Schritt zwei verschiedene Abstände in einem Modell verbaut. Das hat den Nachteil, dass innerhalb der Messstrecke nur wenige Buhnenfelder zur Beurteilung der Situation herangezogen werden konnten (siehe Abbildung 6.1).

In einer dritten und letzten Reihe von Versuchsserien wurden noch verschiedene Buhnenwurzelausführungen untersucht:

Versuchsserie 7: abgesenkete Buhnenwurzel

Versuchsserie 8: „ohne“ Buhnenwurzel

Die Beschreibung dieser Versuche und deren Auswertung ist in Kapitel 7 beschrieben. In diesen zwei Versuchsserien wurde nahe am Ufer die Buhnenkrone derart abgesenkt, dass selbst bei Niederwasser eine Verbindung zwischen den Buhnenfeldern bestehen blieb. In der Versuchsserie 7 wurde die Buhnenwurzel etwa auf 2/3 der Buhnenkronenhöhe abgesenkt, in Versuchsserie 8 wurde die Buhnenwurzel bis auf Sohlniveau abgeböscht.

4.4 Beschreibung des Versuchsstandes

4.4.1 Flussbaurinne

Sämtliche Versuchsserien wurden in der Flussbaurinne des Wasserbaulabors des Instituts für Wasserbau und Ingenieurhydrologie der TU Wien durchgeführt. Die Flussbaurinne ist eine offene Rinne mit einem Querschnitt von 1731 mm Breite, 500 mm Höhe und einer Gesamtlänge von 20,85 m. Abzüglich des Oberwasserbehälters mit der Wasserzuführung und des Unterwasserbehälters, welcher in diesen Versuchen als Sandfang diente, stand für den Versuchsaufbau eine Länge von 17,55 m zur Verfügung.

Abbildung 4.1 - Flussbaurinne

Die Rinne besteht aus zwei Fachwerkträgern, die durch Querträger verbunden sind. Auf diesen Querträgern liegt das Rinnenblech auf. Die gesamte Konstruktion kann über zwei Hydraulikzylinder im Bereich zwischen 0 und ca. 6% geneigt werden. Für die folgenden

Versuche wurde eine Neigung von 1‰ in einem Vorversuch ermittelt und für alle Serien eingestellt.

4.4.2 Wasserversorgung

Für die Wasserversorgung der Versuche im Wasserbaulabor steht eine fix installierte und vollautomatisch steuerbare Pumpenanlage zur Verfügung. Gespeist wird die Anlage durch einen Wassertank im Kellergeschoß mit einem Fassungsvermögen von etwa 1000 m³. Drei Pumpen fördern das Wasser über eine Rohrleitung zu einer Reglerbatterie, die sich aus drei parallel geführten Rohrleitungen unterschiedlichen Durchmessers mit induktiven Durchflussmessern und Regelklappen zusammensetzt. Die Förderleistung kann so von wenigen Litern pro Sekunde bis zu etwa 1000 Litern pro Sekunde variiert werden. Die Regelung der Wasserzufuhr erfolgt digital und vollautomatisch und wird zentral an einem Schaltschrank der Firma *Schubert* gesteuert. Schließlich wird das Wasser über ein Fallrohr DN400 in den Oberwasserbehälter der Flussbaurinne geleitet. Das einstürzende Wasser wird über eine Reihe von Hohlblockziegeln mit den Löchern in Fließrichtung beruhigt und gleichgerichtet. Bei den beschriebenen Versuchen kamen folgende Durchflüsse zur Anwendung:

- Regulierungsniederwasser (RNW) - mit 7,1l/s (Pumpe 1, Drehzahl 1)
- Mittelwasser (MW) - mit 15l/s (Pumpe 1, Drehzahl 2)
- Hochwasser (HW) - mit 28l/s (Pumpe 2, Drehzahl 1)

4.4.3 Messtechnik

An der Tragkonstruktion der Flussbaurinne sind zwei verzinkte Formrohre als Laufschienen montiert. Auf diesen befindet sich auf vier Hartkunststoffrollen der Messwagen. Dieser lässt sich über die gesamte Länge der Rinne mittels umlaufenden Drahtseils und mit einem Gleichstrommotor verfahren, dessen Geschwindigkeit mit einer Potentiometerschaltung eingestellt werden kann. Die Messeinrichtung befindet sich auf einem Querwagen, der auf einer Präzisionsschiene gelagert ist und sich mittels Handkurbel über die gesamte Breite der Flussbaurinne verfahren lässt. Somit kann jeder Punkt des Versuchsmodells mit den Messeinrichtungen angefahren werden.

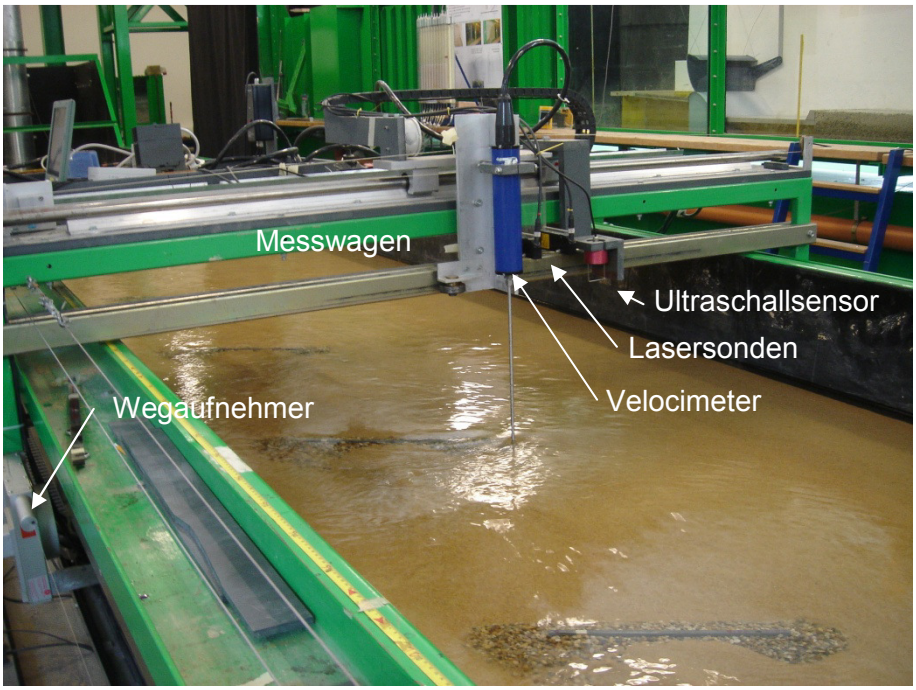


Abbildung 4.2 – Messwagen mit Messgeräten

Wegaufnehmer:

Sowohl in Längs- als auch in Querrichtung werden zur exakten Bestimmung der Position im Versuchsmodell Wegaufnehmer des Typs WS17KT der Firma *ASM* eingesetzt. Bei diesen ist die Seiltrommel mit dem aufgewickelten Messdraht mit einem 1kOhm-Präzision-Potentiometer verbunden. Die Position wird von 0 bis zur maximalen Messlänge von 15000 mm über eine Potentiometerschaltung in ein analoges Ausgangssignal von 0 bis 10 V DC umgewandelt.

Ultraschallsensor:

Zur Bestimmung der Wasserspiegellage wird ein Ultraschallsensor eingesetzt. Die Ultraschall-Abstandsmessung erfolgt nach der Impulsechomethode. Dabei wird die Entfernung aus der Laufzeit eines Schallimpulses ermittelt, der vom Sensor bis zum reflektierenden Objekt (in diesem Fall die Wasseroberfläche) und zurück gemessen wird. Es wird ein Ultraschallabstandsmesssystem (UAS) der Firma *Dr. Wehrhahn Messsysteme* verwendet. Der Messbereich beträgt etwa 70 bis 2000 mm. Am Analogausgang kann die dem gemessenen Abstand proportionale Spannung zwischen 0 und 10 V, oder ein Stromsignal zwischen 0 und 20 mA abgenommen und dem Messverstärker zugeführt werden. Die Messgenauigkeit liegt bei diesem Sensor bei +/-0,1 mm. Da die

Umgebungstemperatur Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit hat, wurde das Messsystem vor Beginn der Versuche am Einsatzort der Flussbaurinne kalibriert.

Lasersonden:

Für die Vermessung der Sandsohle werden Lasersonden eingesetzt. Mit diesen wird jeweils die gesamte Sohle des Modells rasterförmig vermessen.

Es werden die Lasersonden vom Typ OADM 21I6481/S14F des Herstellers *Baumer electric* verwendet. Das Messprinzip basiert auf dem Triangulationsprinzip. Der Laserstrahl trifft als sichtbarer Punkt auf das Messobjekt auf und wird dort diffus reflektiert. Der Empfänger des Sensors, eine Fotodiodenzeile, registriert die Position dieses Punktes. Der Sensor misst den Einfallswinkel und berechnet die Distanz. Je nach Entfernung des Messobjektes ändert sich dieser Einfallswinkel und somit die Position auf der hochauflösenden Photozelle. Am Analogausgang kann die dem gemessenen Abstand proportionale Spannung zwischen 0 und 10 V, oder ein Stromsignal zwischen 0 und 20 mA abgenommen und dem Messverstärker zugeführt werden. Der Messbereich der verwendeten Sonden liegt zwischen 200 und 1000 mm, die Auflösung von 0,02 bis 0,5 mm.

Acoustic Doppler Velocimeter:

Für die Messung der Strömungsgeschwindigkeiten wird ein *Acoustic Doppler Velocimeter* Typ N-371 der Firma *Nortek* verwendet, ein Messgerät zur Geschwindigkeitsmessung einer Flüssigkeit beliebiger Trübung. Der Sender in der Mitte eines klauenartigen Messkopfes sendet Schallwellenimpulse im Megaherzbereich aus, welche an vorbeischwimmenden Schwebteilchen in der Flüssigkeit in einem Abtastvolumen bis 5 cm Entfernung reflektiert werden. Bei den drei Empfängern wird die Frequenz dieses Echosignals gemessen. Über die durch den Dopplereffekt erzeugte Frequenzverschiebung kann aus diesen Messgrößen ein dreidimensionaler Geschwindigkeitsvektor ermittelt werden.

Ein Nachteil dieser Methode ist, dass der Messkopf in die Flüssigkeit eingetaucht werden muss, und dadurch den gemessenen Geschwindigkeitsvektor selbst beeinflusst. Dies führt besonders bei kleinen Modellen zu unerwünschten Fehlern.

Ein weiteres Problem wurde während der Messungen festgestellt: Bei kleinen Durchflüssen (in diesem Fall bei einem Durchfluss von 7,1 l/s und zum Teil auch noch bei 15 l/s) sind zu

wenige Schwebstoffe im Wasser vorhanden. In diesen Fällen brachten die Messung mit dem *Acoustic Doppler Velocimeter* keine Ergebnisse. Abhilfe schaffte die Zugabe von in Wasser aufgelöstem Löskaffee knapp vor der Messstelle, wodurch die Anzahl der Schwebteilchen erhöht wurde. Die zugeführte Menge war dabei so gering, dass dadurch die Messergebnisse nicht verfälscht wurden.

Datenerfassung:

Die erhaltenen Messdaten der Wegaufnehmer, der Ultraschallsonde und der Lasersonden werden mit einem Analog-Digitalwandler des Typs *Spider 8* der Firma *HBM* digitalisiert und danach online im Messprogramm *Catman*, ebenfalls von *HBM*, erfasst, gespeichert und auf einem zuvor für alle Versuchsserien erstellten sogenannten Online-Dokument dargestellt.

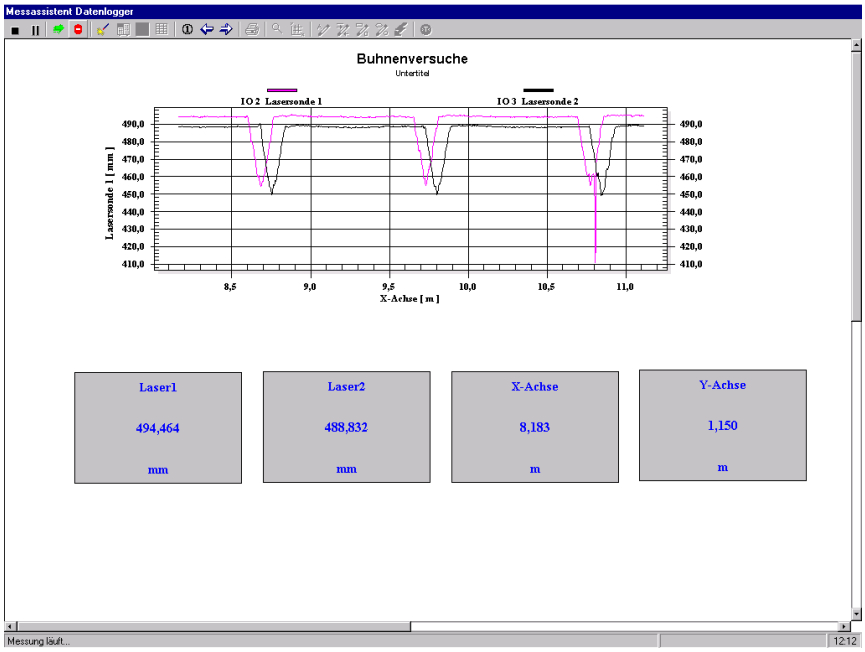


Abbildung 4.3 - Beispiel eines Online Dokumentes "catman"

4.5 Modellparameter

Da es sich bei den hier beschriebenen Versuchen um unähnliche Modelle handelt, wurden die geometrischen Abmessungen, die Sohlneigung, die Korngröße des Sohlmaterials und

der Durchfluss nicht nach Modellgesetzten berechnet, sondern in davor durchgeführten Versuchen nach folgenden Kriterien ermittelt:

- Bei Niederwasser sollen bereits vereinzelte Kornbewegungen erkennbar sein
- Bei Hochwasser ist ein großer Geschiebetransport erwünscht, ohne dass jedoch die gesamte Sohle ausgespült wird

Die Kornzusammensetzung des verwendeten Modellsandes kann der Sieblinie in Abbildung 4.4 entnommen werden.

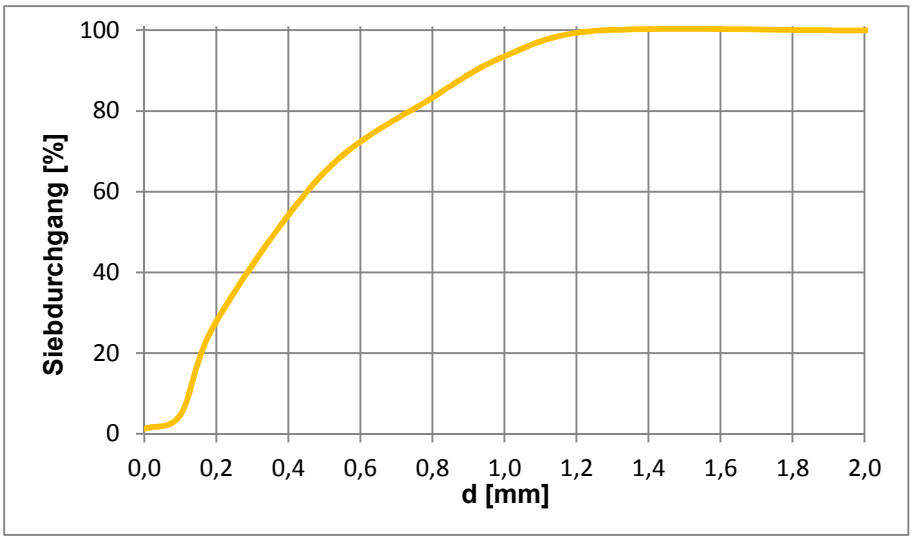


Abbildung 4.4 - Sieblinie des Modellsandes

Nach mehreren Versuchen mit verschiedenen Einstellungen wurde das Sohlgefälle mit 1‰ gewählt (zum Vergleich: das mittlere Sohlgefälle der Donau beträgt im Projektgebiet 0,43‰).

Um die Ergebnisse der einzelnen Versuche miteinander vergleichen zu können, wurden folgende Parameter für alle Versuche im Vorfeld festgelegt und exakt eingehalten:

- Aufbau der Buhnen
- Böschungsneigungen der Buhnen
- Aufbau der Gewässersohle
- die Einbindung der Buhnen in das Ufer
- Böschungsneigung des Ufers
- hydraulisch wirksame Länge der Buhnen
- Sohlgefälle
- Durchfluss
- Versuchsdauer

Die Abmessungen der Buhnengeometrie im Querschnitt durch die Flussbaurinne für alle Versuchsserien sind in der folgenden Abbildung ersichtlich.

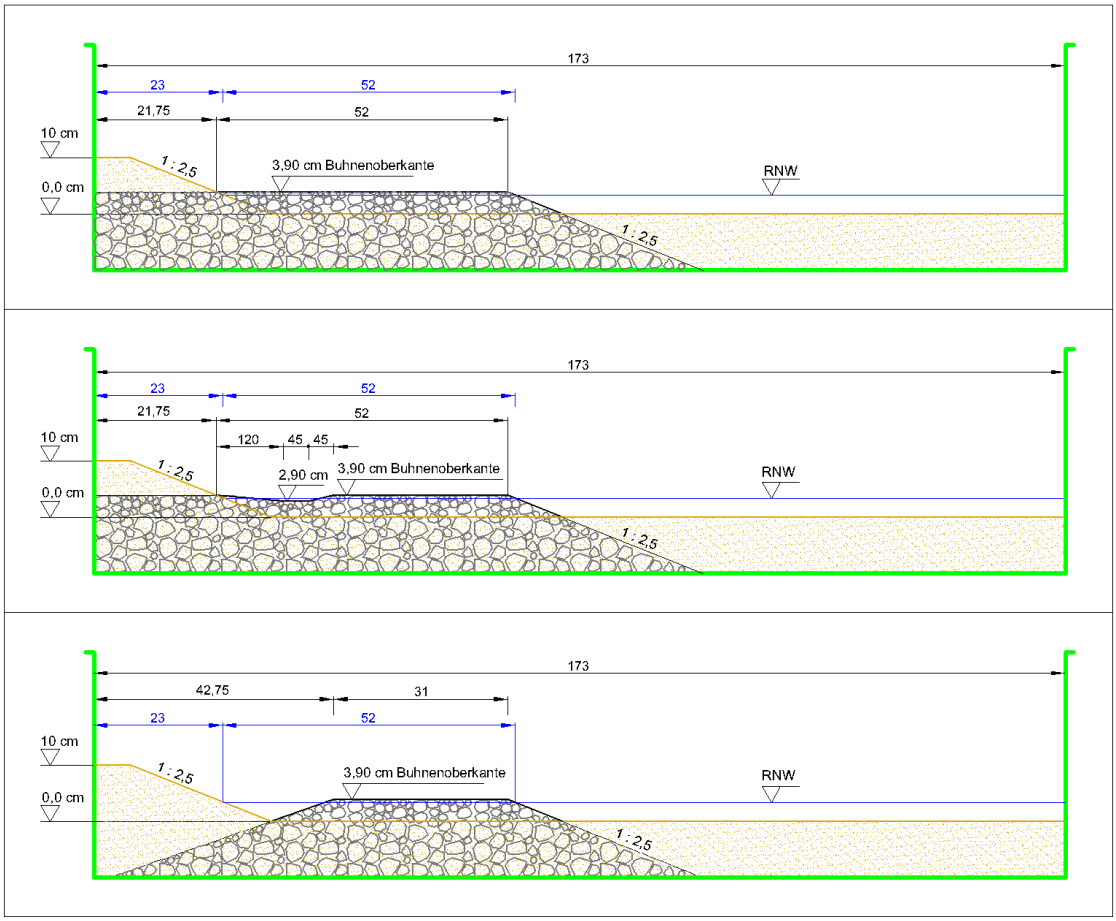


Abbildung 4.5 - Modellabmessungen für Versuchsserien 1-6 (oben), Serie 7 (Mitte) und Serie 8 (unten)

Die Buhnenwurzel wurde in den Serien 1 bis 7 bis zur Wand der Flussbaurinne, bis unter die Uferböschung gezogen, in der Serie 8 wurde dann entsprechend abgeböscht. Die Buhnenoberkante wurde knapp über Regulierungsniederwasser auf 3,9 cm festgelegt. In der Serie 7 wurde die Buhnenkrone unmittelbar vor dem Ufer derart abgesenkt, dass bei Regulierungsniederwasser bereits eine schwache Verbindung der Buhnenfelder bestand. Die Buhnenkrone wurde im hinteren Buhnenbereich um 1 cm abgesenkt (das entspricht etwa 1/3 der Buhnenkronenhöhe). In der Serie 8 wurde die Buhnenwurzel bis zur Kante Uferböschung - Sohlniveau abgeböscht. Die Uferböschung wurde bei allen Versuchsserien so weit nach oben gezogen, dass sie auch bei Hochwasser nicht überströmt werden konnte.

4.5.1 Modellbau

Abbildung 4.6 - Aufbau der Buhnen

In Abbildung 4.6 ist das verwendete Aufbauschema der Buhnen ersichtlich. Das „Grundgerüst“ der Buhnen wurde aus PVC-Platten gefertigt, um nach Fertigstellung der Sohle des gesamten Modells die Höhe der Buhnenkrone mittels Stellschrauben exakt einstellen zu können. Danach wurden die Buhnen mit Kies (Korndurchmesser ca. 4-8 mm) modelliert. Anschließend wurde die Sohle aus Sand hergestellt, wobei die Dicke der Sandschicht etwa 10 cm betrug, um sicherzustellen, dass auch bei tiefen Auskolkungen die Gerinnesohle nicht freigelegt werden konnte. Diese Sandschicht wurde nach mehrmaligem Wassern (um eine gleichmäßig feste Sohle zu erreichen) mit einem Blech abgezogen, das am Messwagen befestigt und an den Buhnenkronen ausgerichtet war (siehe Abbildung 4.7). Am Ende wurden die Buhnenkörper mit Schablonen nachgebessert und die Sohle mittels Reibbrett geglättet.

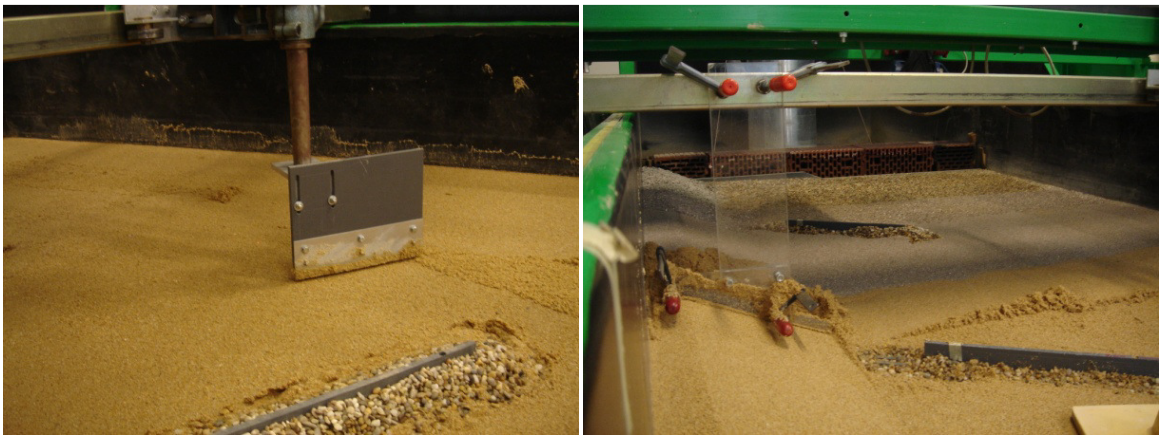


Abbildung 4.7 - Abziehen der Sohle und der Uferböschung

In der folgenden Abbildung ist ein fertiges Modell vor Versuchsstart zu sehen.

Abbildung 4.8 - fertiges Modell (Versuchsserie 5) vor dem Versuch

4.5.2 zeitlicher Ablauf

Alle Versuchsserien wurden in drei Phasen durchgeführt:

Phase Niederwasser:

In der ersten Phase wurde ein Normalabfluss von 7,1 l/s eingestellt. Dies entspricht einem Regulierungsniederwasser (RNW), wobei die Buhnenkronen knapp nicht überströmt werden.

Phase Mittelwasser:

In der zweiten Phase wurde ein Normalabfluss von 15 l/s eingestellt. Dies entspricht einem Mittelwasserstand (MW), wobei die Buhnenkronen knapp überströmt werden.

Phase Hochwasser:

In der dritten und letzten Phase wurde ein Normalabfluss von 28 l/s eingestellt. Dies entspricht einem Hochwasserstand (HW), dem höchsten Schifffahrtswasserstand. Hier werden die Buhnen stark überströmt.

In allen Phasen und in allen Serien war die Durchflussdauer mit 6 Stunden vorgegeben. Vor der ersten Phase (als Referenz) und jeweils nach jeder weiteren Phase wurde das Modell trockengelegt und anschließend die Sohle mit den Lasersonden rasterförmig vermessen, um eine morphologische Aufnahme der Gewässersohle zu erhalten.

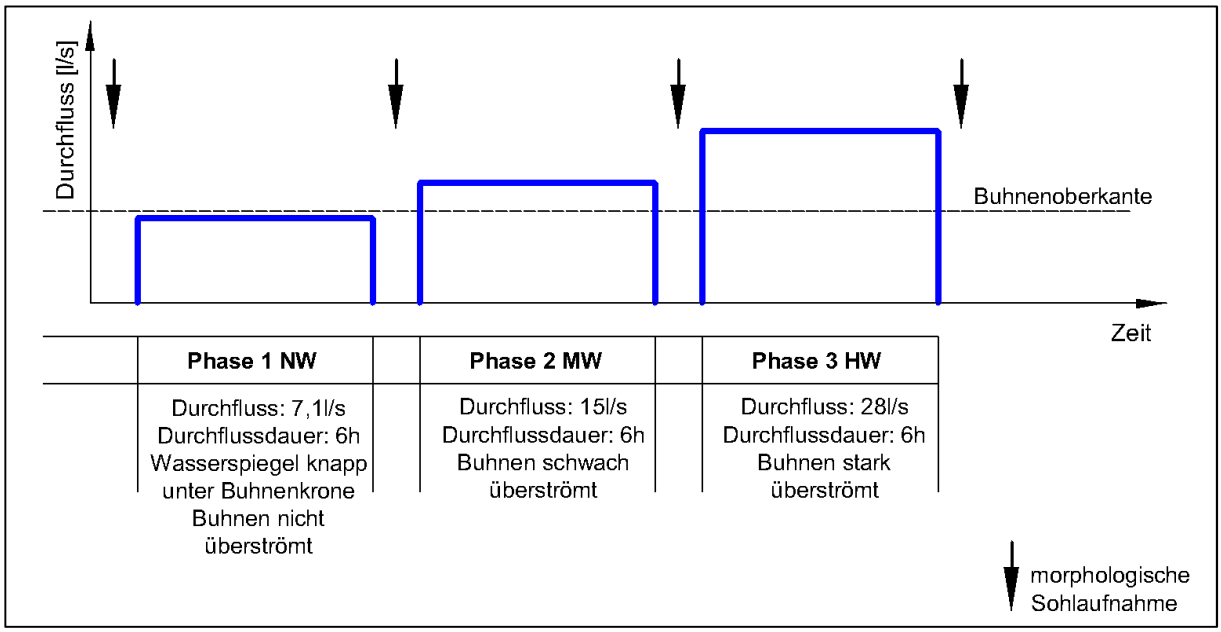


Abbildung 4.9 - Schema der Versuchsabläufe

4.5.3 Normalabfluss

Am Referenzmodell mit den schwach inklinanten Buhnen mit einem Buhnenabstand von 1,5 wurden Vorversuche durchgeführt, um bei allen drei Durchflüssen eine Einstellung des Unterwasserschiebers zu erhalten, die dem Normalabfluss (Sohlgefälle J_S = Wasserspiegelgefälle J_W = Energieliniengefälle J_E) entspricht. Bei verschiedenen Abflüssen wurden die Wasserspiegellagen mit dem Ultraschallsensor in 10 cm Abstand vom uferfreien Rand der Flussbaurinne entlang eines Längsprofils abgefahren und vermessen. Die auf diese Weise ermittelten Wasserspiegellinien entlang des Längsprofils wurden mittels Excel linearisiert und der sohlparallelen Vergleichsebene gegenübergestellt. Diese Vergleichsebene wurde unter Berücksichtigung einer Korrekturfunktion für die Abweichung der Laufschienen des Messwagens von der exakt horizontalen Lage mittels Ruhewasserspiegel bei horizontaler Flussbaurinne ermittelt. War das so errechnete und zur Sohle gesehen relative Wasserspiegelgefälle größer als Δs_{max}=0,025‰, was bezogen auf die

absolute Sohlneigung von 1,0‰ einer verhältnismäßigen Abweichung von 2,5% entspricht, so wurde die Höhe des Unterwasserschiebers nachjustiert. Erst wenn bei mehreren Messungen (mindestens drei) das relative Wasserspiegelgefälle abwechselnd in positiver und negativer Abweichung weniger als die oben genannten 0,025‰ betrug, wurde der Abflusszustand als Normalabfluss angesehen. Ergebnisse mit einer Abweichung in eine Richtung ohne Vorzeichenwechsel des relativen Wasserspiegelgefälles waren nicht zulässig (PUNTIGAM, 2007).

Mit den aus diesen Vorversuchen erhaltenen Werten konnte dann ein Normalabfluss – Unterwasserschieber-Schlüssel erstellt werden. Mit diesem Diagramm wurde in allen Versuchen die Unterwasserschieberstellung in Abhängigkeit des Durchflusses bei Versuchsstart voreingestellt. Zu Beginn jedes Versuchs wurde die Wasserspiegellage mit dem Ultraschallsensor neu vermessen. Wenn die Messungen eine Abweichung größer als Δs_{max} ergaben, wurde die Unterwasserschieberstellung nachjustiert. Diese Stellung des Schiebers wurde dann für die gesamte Dauer der jeweiligen Phase des Versuchs beibehalten, auch wenn ein Normalabfluss aufgrund der Sohlveränderung nicht mehr gegeben war.

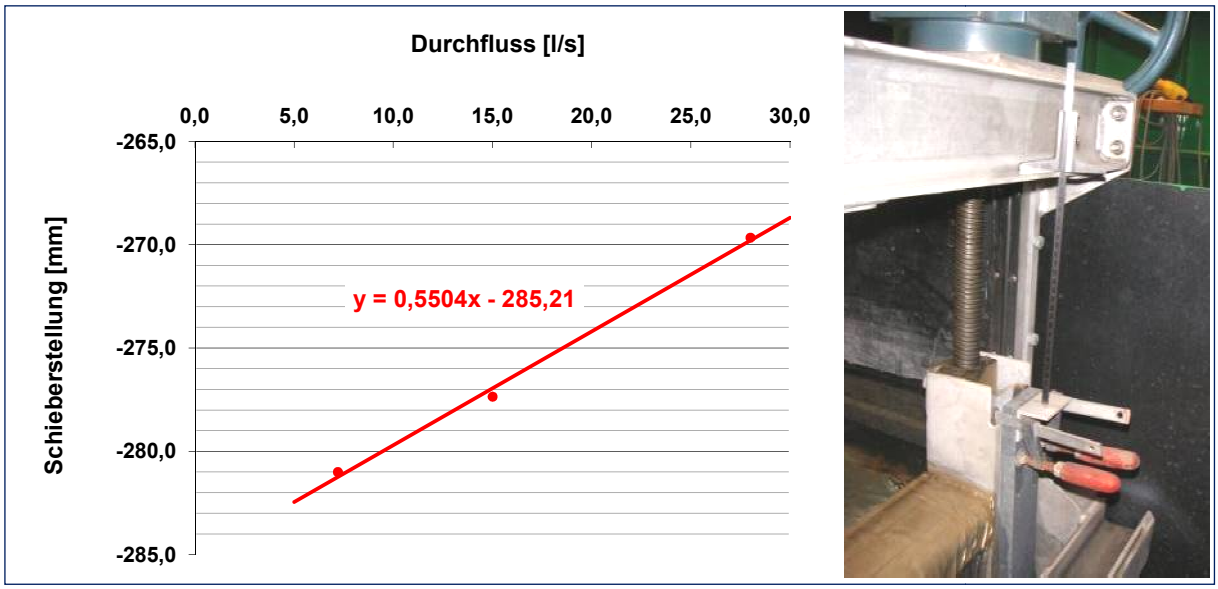


Abbildung 4.10 – Stellung des Unterwasserschiebers für Normalabfluss (PUNTIGAM, 2007)

4.6 Auswertung der Versuche - Vorgehensweise

Wie bereits erwähnt, können bei den hier beschriebenen Versuchen keine quantitativen Aussagen über die Veränderung der Gewässersohle und die zu erwartenden Längs- und Quergeschwindigkeiten der Strömung gemacht werden, da die Modellgesetze nach Froude nicht eingehalten wurden. Die Aussagen über die zu erwartenden Auswirkungen der untersuchten Buhnenformen sind rein qualitativ. Im Rahmen dieser Versuche ist dies völlig ausreichend, da verschiedene Modelle miteinander verglichen werden und in der Folge noch ein Flächenmodell im Maßstab 1:33 1/3 zum Einsatz kam. Dieses Flächenmodell wurde als ähnliches Modell geplant, weshalb auch quantitative Aussagen über die in der Natur zu erwartenden Veränderungen der Sohle getätigt werden können. Auf dieses Flächenmodell, das im Anschluss an diese Versuchsserien im Wasserbaulabor der TU Wien aufgebaut wurde, wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen.

4.6.1 Morphologische Veränderungen

Bei allen beschriebenen Versuchsserien werden die morphologischen Veränderungen der Gewässersohle berechnet. Dazu wird die Sohle vor Versuchsstart und jeweils nach den 6-stündigen Belastungen der Sohle mit Niederwasser, Mittelwasser und Hochwasser mit den zuvor beschriebenen Lasersonden rasterförmig vermessen. Für alle Versuchsreihen wird derselbe Messabstand in Gerinnequerrichtung eingehalten, in den für diese Arbeit relevanten Bereichen (Buhnenkopf- und Buhnenwurzelbereich) 2,5 cm, und im Bereich des Stromstriches 10 cm.

Zur Darstellung werden die mit den Lasersonden ermittelten Daten mit einer Visualisierungssoftware zur Aufbereitung wissenschaftlicher Daten (*Tecplot*) graphisch dargestellt. Dazu werden die einzelnen Messpunkte in ein Raster umgerechnet. Diese Umrechnung, bei der jedem Rasterpunkt mehrere umliegende Messpunkte zugeordnet werden, erfolgt mit der „inverse Distance Methode“. Der einzelne Rasterpunkt errechnet sich wie folgt:

$$F(x,y) = \frac{\sum_{k=1}^{n} w_k * f_k(x,y)}{\sum_{k=1}^{n} w_k} \quad (1)$$

Wobei gilt:

$$w_k(x,y) = \frac{1}{{d_k}^m} \quad (2)$$

$$d_k = \sqrt{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2} \quad (3)$$

Mit: d_k ……Distanz des Messpunktes *k* zum Rasterpunkt

w_k ……...Gewichtungsfaktor für den Messpunkt *k*

$f_k(x, y)$……..Messwert an der Stelle x_k, y_k

$F_k(x,y)$…….Rasterwert an der Stelle *x, y*

Mit dem Parameter n kann die Anzahl der Messpunkte, die für die Berechnung eines Rasterpunktes verwendet wird, eingestellt werden. Diese n zum Rasterpunkt am nächsten liegenden Messpunkte ergeben mit dem zur Distanz umgekehrt proportional gewichteten Mittelwert den gesuchten Rasterpunkt *F(x,y)*. Der Wert der umgekehrt proportionalen Gewichtung kann mit dem Exponenten m eingestellt werden. Je höher der Exponent, desto höher ist die Gewichtung des nächstliegenden Messpunktes. Für die Parameter n und m wurde die im Programm standardmäßige Einstellung (n=8 und m=3,5) beibehalten.

Bei der Auswertung der Versuche (Kapitel 5, bzw. Abschnitt 6.2 und 7.2) finden sich Darstellungen jeder Versuchsreihe, die Ausschnitte der Modellsohle vor dem Versuch und nach der Hochwasserbelastung zeigen. Die Darstellungen der Modellsohlen nach der Niederwasserbelastung sowie nach der Mittelwasserbelastung finden sich im Anhang dieser Arbeit.

Um die Größe des Buhnenkopfkolkes und die Veränderung im Uferbereich zu erhalten, wird die berechnete Sohle nach der Hochwasserbelastung von der auf dieselbe Weise gerasterten Sohle vor Versuchsstart abgezogen. Nach der Auswahl eines repräsentativen Buhnenfeldes werden die Differenzen der einzelnen Rasterpunkte im Bereich des Buhnenkopfkolkes bzw. des Uferbereichs mit der Fläche des Einzelelementes multipliziert und aufsummiert. Somit wird das Volumen des Buhnenkopfkolkes bzw. der Anlandung im Uferbereich bestimmt. Diese Volumina werden danach einander gegenübergestellt.

4.6.2 Geschwindigkeitsprofile

Während den Versuchen werden in allen Phasen die Längs- und Quergeschwindigkeit zwischen zwei Buhnen über die gesamte Rinnenbreite mit dem *Ultraschall Doppler Velocimeter* gemessen. Bei den kleineren Buhnenabständen (1:1,5; 1:2 und 1:2,5) werden jeweils drei Messreihen durchgeführt; bei größeren Abständen (1:3 und 1:4) wird eine vierte Reihe eingefügt. Bei Nieder- und Mittelwasser wird die Längs- und Querströmung knapp

unter dem Wasserspiegel bestimmt, bei Hochwasser wird zusätzlich knapp über der Sohle gemessen. Die Messpunkte sind in folgender Abbildung ersichtlich.

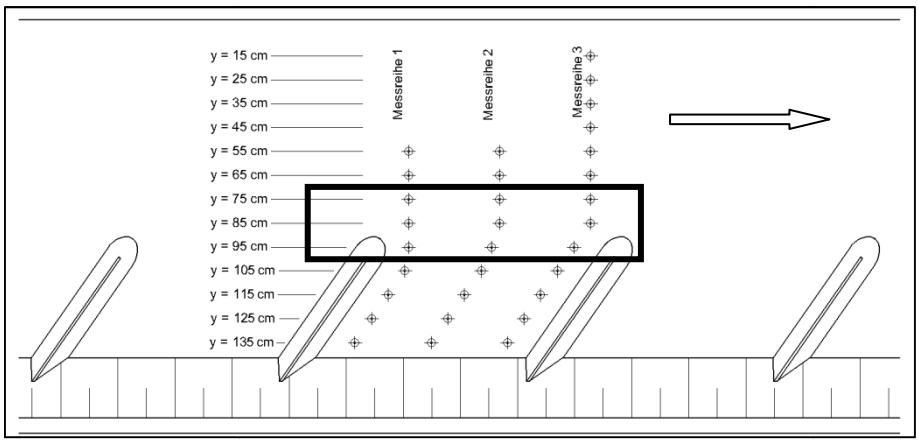


Abbildung 4.11 - Quergeschwindigkeit im Bereich der Streichlinie

Bei der Beurteilung der Querströmung der einzelnen Versuche im Sinne des *FGP* (siehe Abschnitt 4.2) werden dann nur noch die für die Schifffahrt relevanten Quergeschwindigkeiten im Bereich der Streichlinie betrachtet (Abbildung 4.11, eingerahmte Messpunkte). Aus diesen wird der größte (Strömung Richtung Buhnenfeld) und der kleinste Messwert (Strömung Richtung Stromstrich) für den Vergleich der einzelnen Versuche herangezogen.

Bei den Geschwindigkeitsmessungen wird ein Mittelwert über die Messdauer von 15 Sekunden für die Beurteilung der Geschwindigkeit herangezogen. In Abbildung 4.12 ist eine Echtzeitmessung der Querströmung dargestellt.

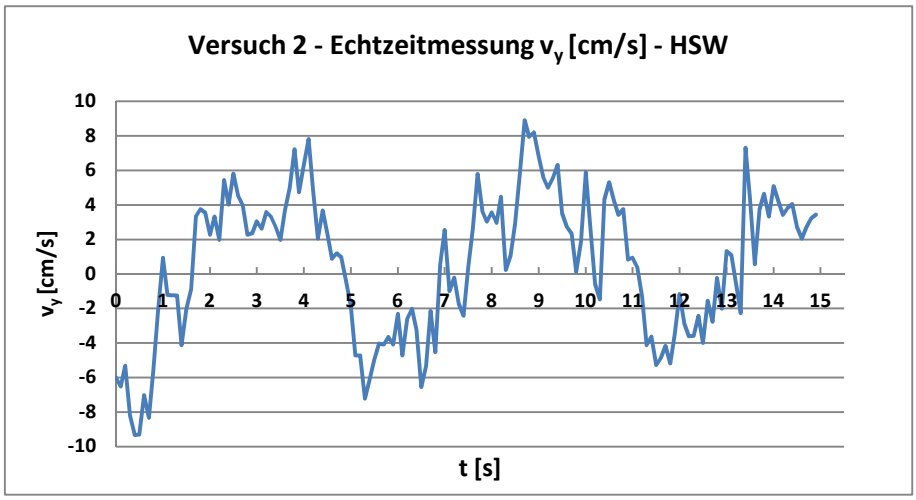


Abbildung 4.12 - Echtzeitmessung an einem Buhnenkopf (PUNTIGAM, 2007)

Kapitel 5

5 Modellversuchsreihe 1: Variation der Buhnenform

Die genaue Durchführung und die komplette Auswertung der vier Versuchsserien dieser Versuchsreihe sind in der Diplomarbeit *„Vergleichende Untersuchungen zu Buhnenformen an der Donau östlich von Wien“* von DI André Puntigam beschrieben (PUNTIGAM, 2007).

An dieser Stelle wird der Vollständigkeit halber eine kurze Zusammenfassung wiedergegeben.

Der Grundriss des Versuchsaufbaus für diese vier Serien ist in der folgenden Abbildung ersichtlich.

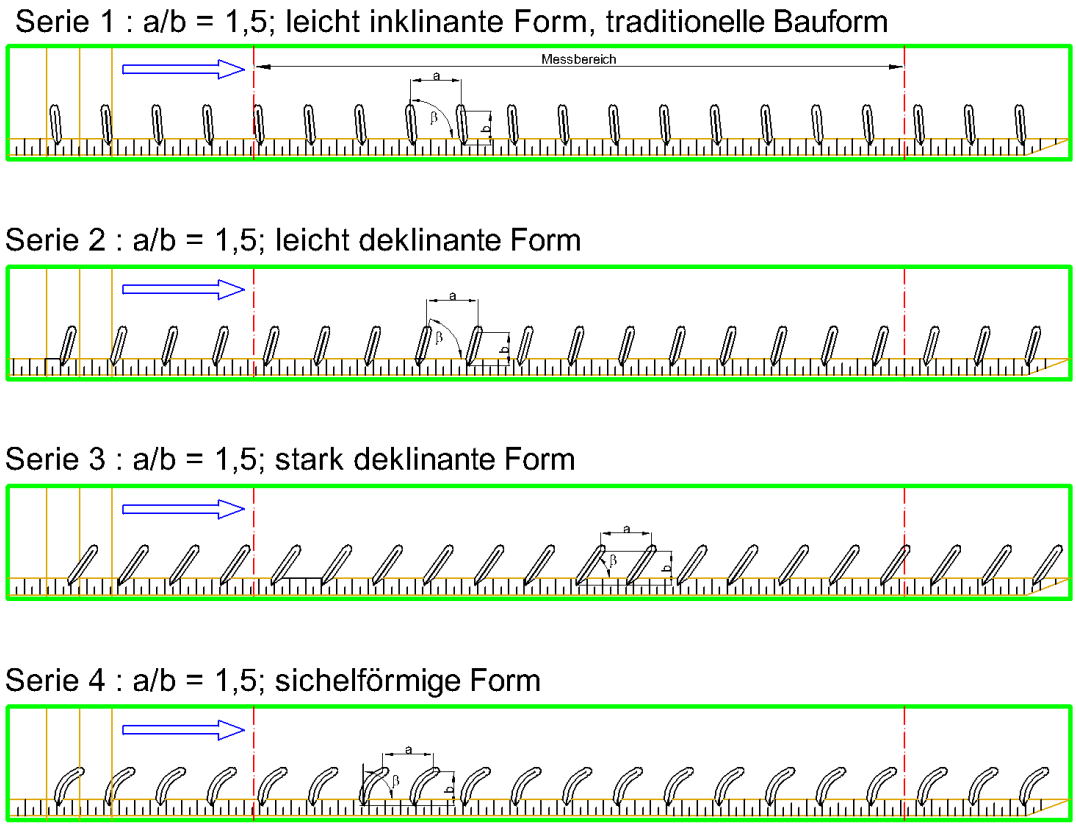


Abbildung 5.1 - Aufbauschema der Versuchsserien 1 bis 4 im Grundriss

Der folgenden Tabelle können die zur Abbildung 5.1 passenden Parameter entnommen werden.

Versuch	Verbauungsgrad a / b	Buhneneinbauwinkel β
VS1 (traditionelle Form)	1,5	95° (mäßig inklinant)
VS2	1,5	75° (mäßig deklinant)
VS3	1,5	55° (stark deklinant)
VS4	1,5	0° (sichelförmig)

Tabelle 5.1 - Buhnenparameter der Versuchsserien 1 bis 4

Die derzeit im Projektgebiet eingebaute, schwach inklinante Buhne entspricht einer traditionellen Anordnung. Die leicht stromauf gerichtete Buhne wird dann eingebaut, wenn es darum geht, das Ufer vor Erosion zu schützen. Diese in der Versuchsreihe 1 eingebaute Buhnenform diente für diese Arbeit als Referenzmodell.

Bei allen vier Versuchsserien kam es bei der ersten Durchflussstufe von 7,1 Litern pro Sekunde (Niederwasser, Buhnen gerade noch nicht überströmt) zu keinen sichtbaren Veränderungen der Modellmorphologie. Aufgrund der geringen Schleppkraft des Wassers konnte auch im Stromstrich keine Kornbewegung beobachtet werden.

Bei der zweiten Durchflussstufe mit 15 Litern pro Sekunde (Mittelwasser, Buhnen bereits leicht überströmt) über einen Zeitraum von sechs Stunden konnte nur bei der leicht inklinanten Buhnenanordnung (VS1) eine Kolkentwicklung bei den Buhnenköpfen beobachtet werden. Bei der leicht deklinanten, stark deklinanten und sichelförmigen Buhnenanordnung konnte diese Kolkentwicklung an den Buhnenköpfen nicht festgestellt werden. Es kam lediglich zu einer leichten Kornbewegung. Die Uferböschung in den Buhnenfeldern blieb in allen vier Serien nahezu unverändert. Nur bei der stark deklinanten Buhnenanordnung kam es im unmittelbaren Bereich der Buhnenwurzel zu einer leichten aber anhaltenden Sandkornbewegung. Im Stromstrich konnte in allen vier Serien ein leichter Geschiebetransport beobachtet werden.

Während der dritten Durchflussstufe mit 28 Litern pro Sekunde (Hochwasser, Buhnen stark überströmt) kam es im Stromstrich in allen vier Versuchsserien zu starkem und anhaltendem Geschiebetransport. Im Bereich des Buhnenfeldes kam es bei der ersten Serie mit der leicht

inklinanten Buhnenanordnung (Referenzserie) zu einer ausgeprägten morphologischen Veränderung des Flussmodells (Abbildung 5.2).

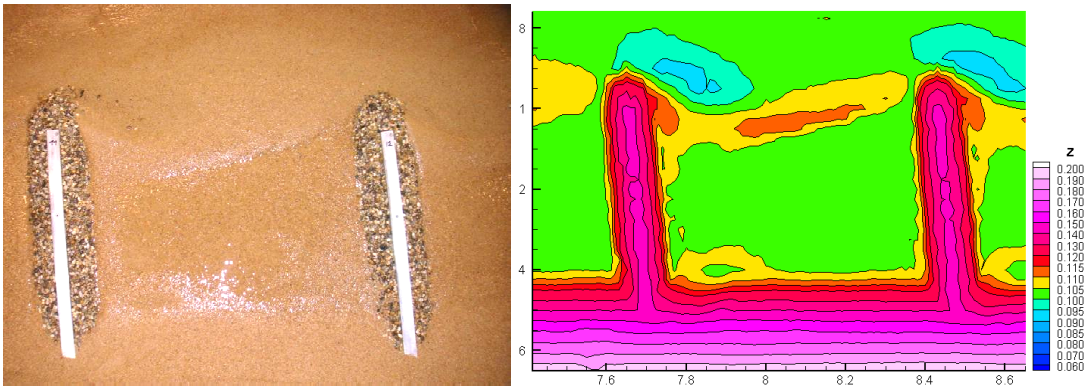


Abbildung 5.2 - Aufnahmen der Sohle nach HW

Bei den Buhnenköpfen konnte eine starke Kolkentwicklung beobachtet werden. Auch die bei der Mittelwasserbelastung bereits beginnende Anlandung im Buhnenkopfkolkschatten hinter den Buhnenköpfen bildete sich weiter aus. Im Bereich der Buhnenwurzel kam es erwartungsgemäß nur zu einer geringen Erosion des Uferbereichs.

In der zweiten Versuchsserie mit der leicht deklinanten Buhnenanordnung waren die Buhnenkopfkolke und die Anlandung dahinter etwas geringer als in Serie 1, im Bereich der Uferböschung kam es dagegen zu einer stärkeren Erosion.

Die dritte Belastungsstufe mit 28 Litern pro Sekunde über einen Zeitraum von sechs Stunden brachte bei der 3. Serie mit der stark deklinanten Buhnenanordnung vor allem im Uferbereich stark ausgeprägte morphologische Veränderungen mit sich (Abbildung 5.3).

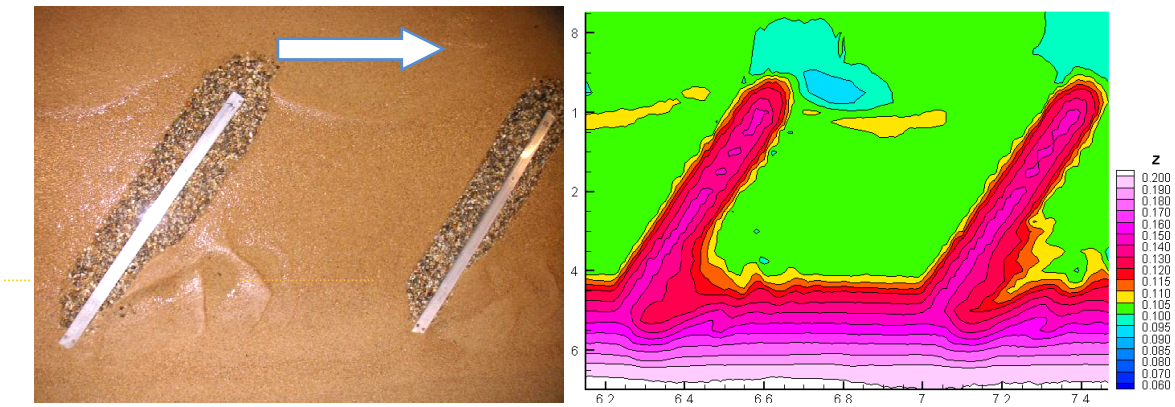


Abbildung 5.3 - Aufnahmen der Sohle nach HW

Die Veränderungen im Uferbereich waren erwartungsgemäß größer als in den ersten beiden Serien mit der leicht inklinanten, bzw. leicht deklinanten Buhnenanordnung. An den Buhnenköpfen konnte eine leichte Kolkbildung und im Strömungsschatten dieser Kolke eine Anlandung in Form einer kleinen Sandbank beobachtet werden. Jedoch waren weder die Kolke noch die Anlandung dahinter so ausgeprägt wie in den Versuchsserien VS1 und VS2.

In der vierten Versuchsserie mit der sichelförmigen Buhnenanordnung kam es während der dritten Durchflussstufe ebenfalls zu ausgeprägten morphologischen Veränderungen der Sohle. Allerdings war der Uferangriff etwas geringer als bei der dritten Versuchsserie mit den stark deklinanten Buhnen. Zudem war dieser Uferangriff im Messbereich bei den einzelnen Buhnen sehr unterschiedlich, sodass nur schwer eine Aussage über die Wirkung dieser Buhnenform auf die Erosion im Uferbereich getroffen werden kann. Die Kolkbildung hinter den Buhnenköpfen und die Anlandung im Kolkschatten waren bei dieser Buhnenanordnung auch bei Hochwasserbelastung gering.

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der morphologischen Veränderung der Modellsohle aller vier Versuchsserien zusammengefasst. Die Werte entsprechen der jeweiligen durch die Hochwasserbelastung entstandenen Auskolkung bzw. Anlandung in einem repräsentativen Buhnenfeld. Dabei bedeuten negative Werte erodiertes Sohlmaterial.

Versuchsserie Buhnenform		VS1 leicht inklinant	VS2 leicht deklinant	VS3 stark deklinant	VS4 sichelförmig
Buhnenkopfkolk	[cm²]	-179,18	-146,39	-94,91	-57,26
	[Vol.-%]	100%	82%	53%	32%
Anlandung beim Buhnenkopf	[cm²]	309,01	204,84	42,91	33,54
	[Vol.-%]	100%	66%	14%	11%
Uferangriff	[cm²]	-16,73	-134,74	-191,16	-158,3
	[Vol.-%]	100%	805%	1142%	946%
Anlandung im Buhnen- feld (Wurzelnähe)	[cm²]	98,12	112,78	190,13	138,5
	[Vol.-%]	100%	115%	194%	141%

Tabelle 5.2 - morphologische Veränderungen der Sohle VS1 bis VS4

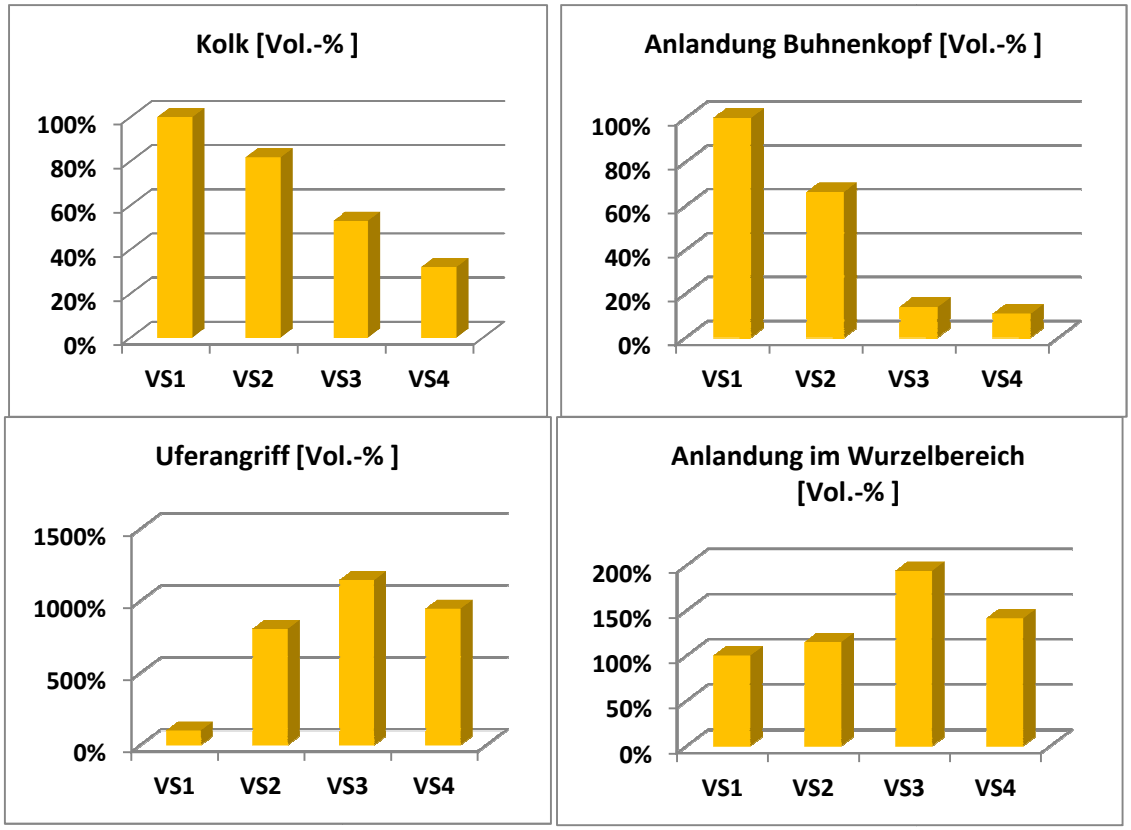


Abbildung 5.4- Vergleich der morphologischen Veränderung VS1 bis VS4

In der Referenzserie mit den schwach inklinant angeordneten Buhnen wurde wie erwartet das Ufer weitgehend vor Erosionen geschützt. In den Versuchsserien 2 bis 4 kam es hauptsächlich bei der Hochwasserbelastung zu unterschiedlich stark ausgeprägten Uferangriffen. Besonders die deklinanten Buhnenanordnungen ließen gut einen direkten Zusammenhang zwischen dem Buhnenneigungswinkel und der Stärke des Uferangriffes erkennen. Am meisten wurde das Ufer bei der dritten Serie mit den stark deklinanten Buhnen angegriffen (PUNTIGAM 2007).

Auch die Ergebnisse der Kolkentwicklung in den jeweiligen Versuchsserien waren wenig überraschend. Während beim ersten Modell mit den schwach inklinanten Buhnen die stärkste Kolkentwicklung zu beobachten war, wurde diese bei den folgenden Versuchsserien von Modell zu Modell geringer. Ausschlaggebend für die Größenordnung der Kolkentstehung scheint daher die abnehmende Neigung der Buhnenköpfe der jeweiligen Modelle zur Stromachse zu sein. Es kann gesagt werden, dass bei den Modellen 2 bis 4 weniger starke Kolke entstanden und diese Bauformen in dieser Hinsicht auf jeden Fall eine Verbesserung im Sinne der Zielsetzung gegenüber den schwach inklinanten Buhnen darstellen (PUNTIGAM, 2007).

Der zweite wichtige Aspekt dieser Versuche ist die qualitative Beurteilung der Querströmung. Dazu wurden an mehreren Querprofilen die Längs- und Quergeschwindigkeiten gemessen. Für die Versuchsserien VS1 bis VS4 seien hier die für dieses Projekt wesentlichen Querströmungsgeschwindigkeiten im Bereich der Buhnenköpfe angeführt.

Querströmungsgeschwindigkeit im Buhnenkopfbereich NW, MW und HW					
		VS1	VS2	VS3	VS4
max. v_y Ri. Buhne	NW	0,5	0,9	1,3	1,7
	MW	2,3	2,2	2,4	0,9
	HW	2,7	2,4	2,1	2,7
max. v_y Ri. Strom	NW	-4,0	-1,0	-1,7	-1,3
	MW	-1,7	-0,5	-0,2	-0,8
	HW	-1,3	0,0	0,0	0,0

Tabelle 5.3 - Querströmungsgeschwindigkeiten im Stromstrich VS1 bis S4

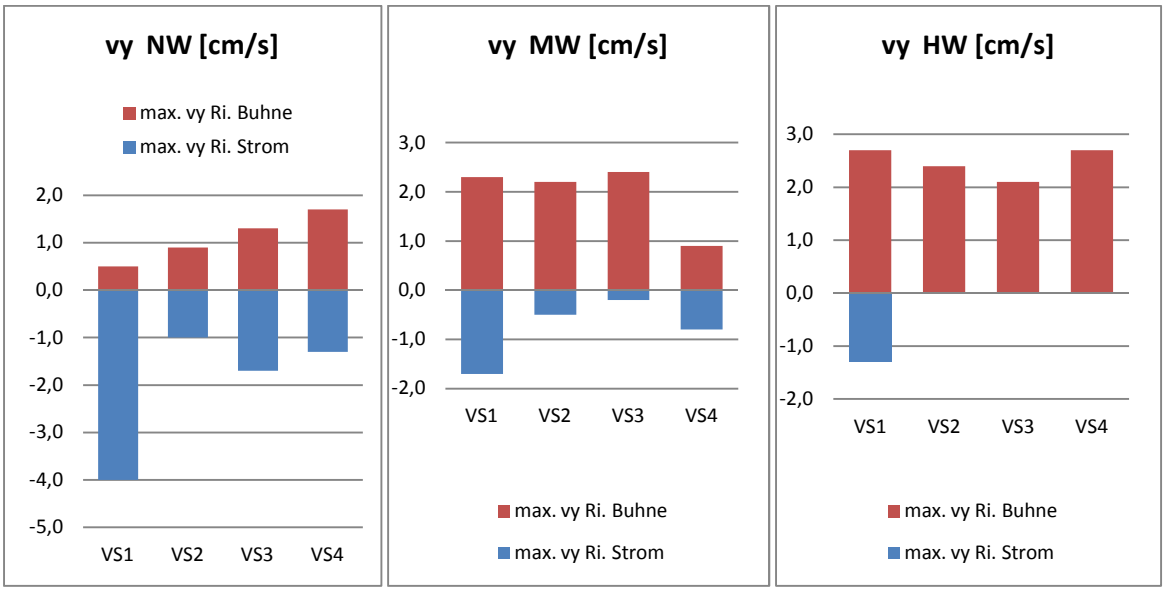


Abbildung 5.5 - Querströmungsgeschwindigkeit entlang der Streichlinie VS1 bis VS4

Beim Niederwasserdurchfluss konnte in der Interaktionszone der Buhnenköpfe bei allen vier Buhnengeometrien eine Querströmung beobachtet werden, die sowohl örtlich (entlang der Streichlinie) als auch zeitlich (zum Teil nahezu periodisch) die Richtung wechselt. Dabei war nur bei der schwach inklinanten Buhnenanordnung mit einer stärkeren Querströmung zur Streichlinie eine einheitliche Strömungsrichtung zu beobachten. Zu beachten ist, dass die Querströmungen hier teilweise so gering waren, dass die Messergebnisse im Bereich der

Messungenauigkeit lagen. Eine Verschlechterung der Querströmungssituation in den Versuchsserien 2 bis 4 war gegenüber der ersten Serie nicht erkennbar.

Beim Mittel- und Hochwasserdurchfluss hat sich bei den zu vergleichenden Buhnengeometrien der Serien 2 bis 4 in der Buhnenkopfinteraktionszone eine Querströmung zum Ufer hin ausgebildet. Die Fließrichtung änderte sich in diesen Fällen nicht mehr, obwohl die 15-Sekunden-Mittelwerte der Querströmung unterschiedlich waren. Die kurzzeitigen Richtungswechsel der Oberflächenquerströmung spielten nur noch eine untergeordnete Rolle. Bei der schwach inklinanten Buhnenbauform lag die Querströmung größenordnungsmäßig im selben Bereich wie in den anderen drei Serien, allerdings wiesen die 15-Sekunden-Mittelwerte nach wie vor starke Richtungswechsel auf. Um von einer Verbesserung der Querströmungsverhältnisse sprechen zu können, wären ausführlichere Untersuchungen in einem größeren Modellmaßstab notwendig. Die Ergebnisse aus VS1 – 4 weisen darauf hin, dass durch die Anwendung von deklinanten bzw. sichelförmigen Buhnenformen zumindest keine Verschlechterungen gegenüber der inklinanten Buhnen hinsichtlich der Strömungssituation für die Schifffahrt in der Nähe der Buhnenköpfe zu erwarten sind (PUNTIGAM 2007).

Aufbauend auf Puntigams Ergebnissen wurde für die weiterführenden Versuche die stark deklinante Buhnenanordnung ausgewählt.

Kapitel 6

6 Modellversuchsreihe 2: Variation des Buhnenabstandes

In diesem Kapitel werden die Versuchsserien 5 und 6 beschrieben. In diesem zweiten Schritt der Versuche werden die Buhnenabstände variiert und unter gleichen Bedingungen miteinander verglichen. Dabei kommen für alle folgenden Versuche die im ersten Schritt, in der Versuchsreihe 1 ermittelten stark deklinanten Buhnen zum Einsatz. Ziel dieser Untersuchungen ist es einen optimalen Buhnenabstand im Sinne der Anforderungen des *FGP* zu ermitteln. In jeder dieser zwei folgenden Versuchsserien werden jeweils zwei Buhnenabstände untersucht.

6.1 Durchführung der Versuche

6.1.1 Buhnenabstände 2 und 4 (Versuchsserie 5)

Parameter:

Verhältnis Buhnenabstand zu Buhnenlänge (a/b):

im oberen Modellbereich: 2
im unteren Modellbereich: 4

Buhneneinbauwinkel β : 55° (stark deklinant)

Die Anordnung der Buhnen im Modell ist in folgender Abbildung dargestellt.

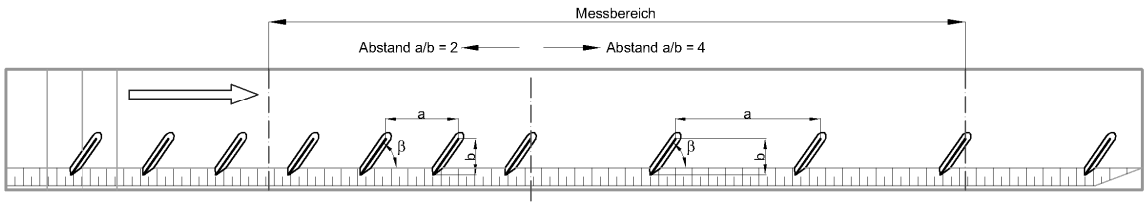


Abbildung 6.1 - Buhnenanordnung Versuchsserie 5

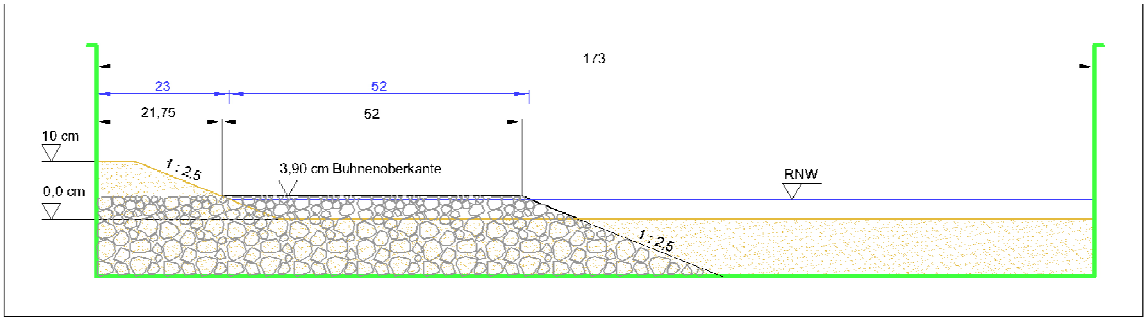


Abbildung 6.2 - Buhnenlängsschnitt für Versuchsserie 5

Abbildung 6.3: Buhnengeometrie und gesamtes Modell der Versuchsserie 5 vor dem Versuch

Um die hergestellte veränderliche Sandsohle nicht schon beim Start des Versuchs zu zerstören, wurde das Modell vom Unterwasserbehälter her langsam geflutet. Erst anschließend wurde das Wasser vom Oberwasserbehälter langsam auf die zur jeweiligen Versuchsphase ermittelte Durchflussmenge gesteigert und der Schieber am Unterwasserbehälter auf die berechnete Stellung für den Normalabfluss gestellt. Dieser vorberechnete Normalabfluss wurde anschließend mittels mehrerer Messungen mit dem Ultraschallsensor überprüft und bei Bedarf nachjustiert (siehe 4.5.3 Normalabfluss).

Niederwasser, Buhnenabstand 2:

Am Beginn jeder Serie wurde für die Dauer von 6 Stunden ein Niederwasserdurchfluss von 7,1 l/s durchgeführt. In dieser Phase wurden die Buhnen nicht überströmt. Dieser Durchfluss soll dem Regulierungsniederwasser in der Natur entsprechen.

Nach der Einstellung des Normalabflusses wurden, wie in 4.6.2 beschrieben, die Geschwindigkeiten punktweise nach einem gleichbleibenden Raster gemessen. Das auf diese Weise erhaltene Geschwindigkeitsdiagramm bei Niederwasser ist in Abbildung 6.5 zu sehen. Die Ergebnisse dieser Messungen werden im Abschnitt 6.2.1 noch eingehend

beschrieben. Zusätzlich zur Geschwindigkeitsmessung wurden die Strömungsverhältnisse während der Versuche beobachtet, mittels Foto- und Videoaufzeichnungen dokumentiert und qualitativ ausgewertet. Um die Strömung während des Versuchs sichtbar zu machen wurde punktuell Kaliumpermanganat zugegeben.

Im Hauptgerinne verhielt sich die Strömung weitgehend parallel zur Stromachse. In der Interaktionszone zwischen Hauptströmung und Buhnenfeld kam es nach der Umströmung des Buhnenkopfes zu Wirbelablösungen, die im Verlauf des Buhnenfeldes an Größe zunahmen (siehe Abbildung 6.4a). Diese Ablösewirbel bildeten einen turbulenten Übergangsbereich, der durch die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Hauptströmung und dem Buhnenfeld begünstigt wurde.

Durch diese Interaktionswirkung zwischen der Hauptströmung und dem Buhnenfeld kam es zu einer Drehströmung mit vertikaler Achse (Abbildung 6.4b). Diese Drehströmung entspricht völlig den bisherigen Erfahrungen mit der Strömung in Buhnenfeldern.

Die unterschiedliche Abströmrichtung der sich am Buhnenkopf lösenden Wirbel führt dazu, dass manche Turbulenzballen direkt von der Hauptströmung mitgenommen werden, während andere teilweise gegen den stromabwärts liegenden Buhnenkopf treiben, um sich dort in einen Hauptstromanteil und einen Buhnenfeldanteil aufzuteilen. Einige Wirbel strömen auch komplett gegen die untere Buhne und speisen dann die Rückstromwalze des Buhnenfeldes (KROUZECKY, 2004).

Durch die stark deklinante Anordnung der Buhnen entstand im oberen Bereich des Buhnenfeldes in Ufernähe eine Zone mit sehr niedrigen Geschwindigkeiten (Stillwasserzone).

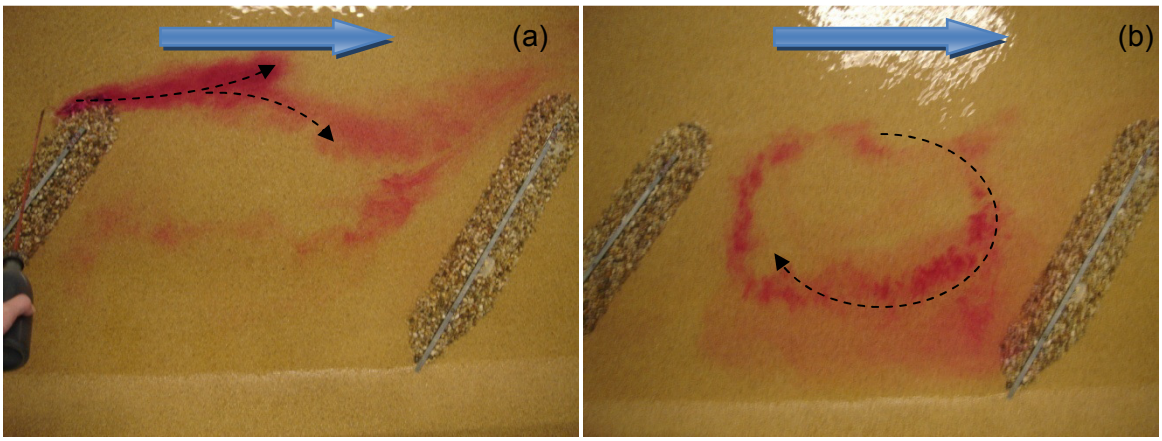


Abbildung 6.4 - VS 5: Strömungen im Buhnenfeld (Buhnen nicht überströmt, Buhnenabstand 2)

In Abbildung 6.5 ist die gemessene Geschwindigkeit in Längsrichtung dargestellt. Im linken Teil des Diagramms ist die Geschwindigkeit im Hauptstrom ersichtlich. Im rechten Teil des Diagramms sind die Geschwindigkeiten im Buhnenfeld zu erkennen. Aus Messreihe 3 (grün dargestellt) ist die Rückströmung (negative Geschwindigkeit) vor der stromabliegenden Buhne ablesbar.

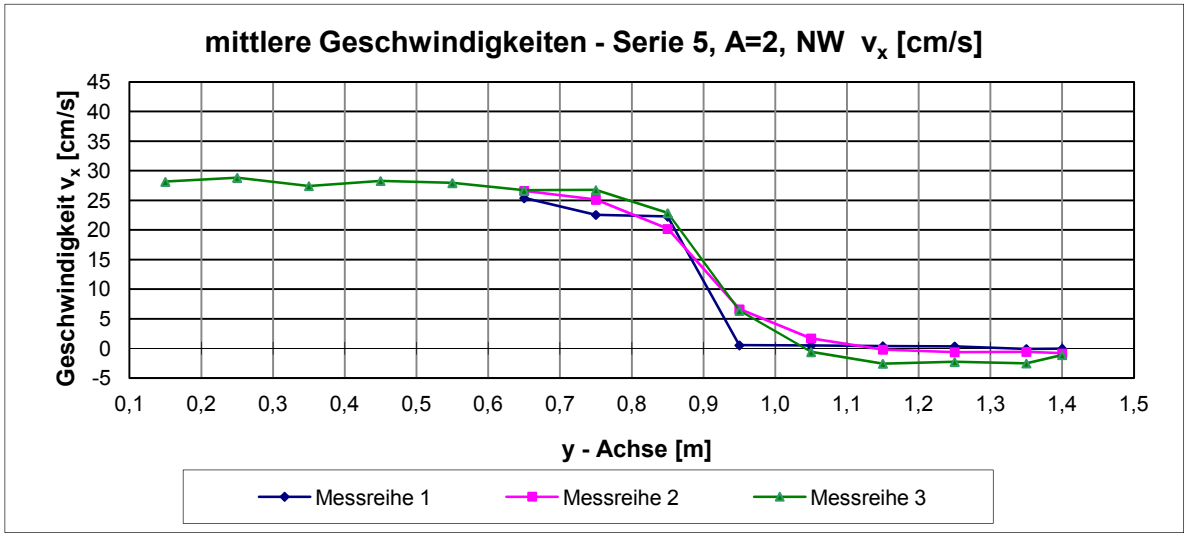


Abbildung 6.5 - Geschwindigkeitsprofile VS 5 NW - vx

Niederwasser Buhnenabstand 4:

Bei diesem großen Buhnenabstand war im unteren Teil des Buhnenfeldes eine schwache Drehströmung zu erkennen, die dann etwa zwei Drittel des Buhnenfeldes eingenommen hat. Die Interaktionsfläche zwischen Buhnenfeld und Hauptstrom reichte hier viel weiter ins Buhnenfeld hinein, weshalb die Zirkulationsströmung immer wieder durch die Interaktionsströmungen gestört wurde (Abbildung 6.6 rechts).

Die zu erwartende Sekundärströmung im oberen Bereich des Buhnenfeldes war dagegen nur schwach zu erkennen (vgl. Abbildung 3.7).

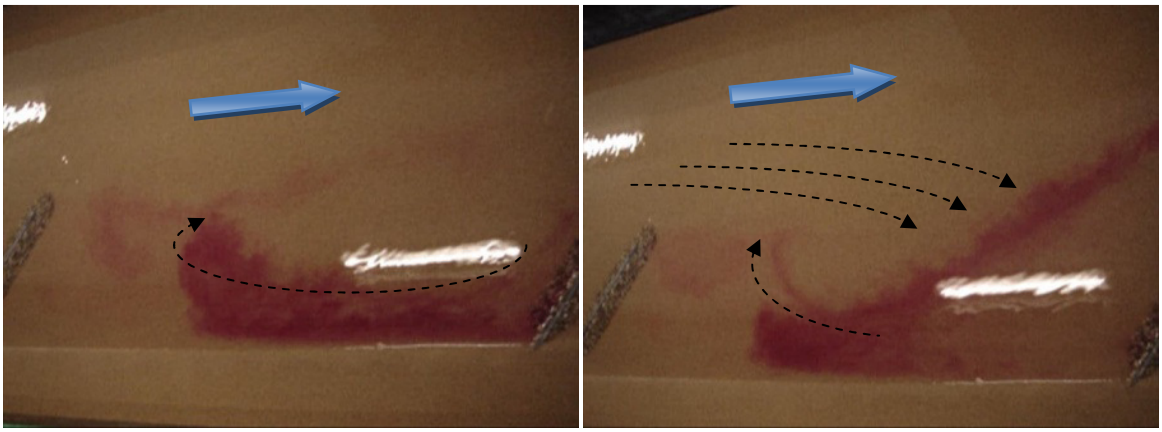


Abbildung 6.6 - VS 5: Strömungen im Buhnenfeld (Buhnen nicht überströmt, Buhnenabstand 4)

Mittelwasser – Buhnenabstand 2:

In dieser 2. Phase mit einem Durchfluss von 15 l/s wurden die Buhnen knapp überströmt. Im Buhnenfeld war bereits bei Mittelwasser keine Zirkulationsströmung mehr erkennbar; sie wurde von der Strömung über die Buhnen überlagert. Im Buhnenfeld war die Strömung annähernd parallel zu jener im Hauptstrom. In der Interaktionszone entlang der Streichlinie waren wie bei Niederwasser turbulente Austauschströmungen zwischen Buhnenfeld und Hauptstrom erkennbar. Naturgemäß waren die Geschwindigkeiten im Buhnenfeld geringer als im Hauptstrom.

Über der Buhnenkrone verlief die Strömung orthogonal zur Buhnenachse. Dabei war eine Beschleunigung des Wassers über der Buhnenoberkante zu beobachten, und es kam zeitweise zu einer stehenden Welle, einem Übergang vom Strömen zum Schießen (Abbildung 6.7).

Abbildung 6.7 – VS 5: stehende Welle über der Buhnenkrone

Im Buhnenfeld floss das Wasser an der Oberfläche parallel zum Hauptstrom (Abbildung 6.8a, schwarzer Pfeil). An der Sohle hingegen bildete sich eine Strömung Richtung Hauptstrom, unmittelbar hinter der Buhne verlief die Strömung sogar parallel zur Buhnenachse (Abbildung 6.8b, weiße Pfeile).

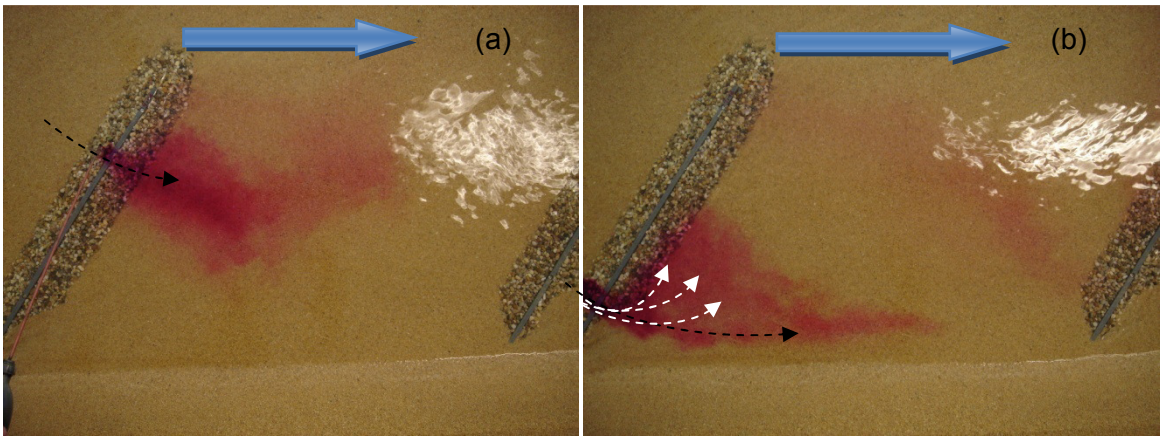


Abbildung 6.8 - VS 5: Strömungen über die Buhnenkrone (Buhnen leicht überströmt, Buhnenabstand 2)

An der Sohle in der Hauptströmung fand bereits eine leichte Kornbewegung statt. An den Buhnenköpfen traten leichte Kolke auf und ein leichter Uferangriff konnte festgestellt werden.

Mittelwasser – Buhnenabstand 4

Bei diesem Buhnenabstand konnte die Zirkulationsströmung im Buhnenfeld zeitweise noch erkannt werden, wurde aber- wie auch schon bei Niederwasser - durch die Interaktionszone gestört und von der Strömung über die Buhnenkronen überlagert. Die Strömungsvorgänge über den Buhnenkörpern waren ähnlich wie beim Buhnenabstand 2.

Die Buhnenkopfkolke und die Uferangriffe waren aber im Vergleich zum Buhnenabstand 2 wesentlich größer.

Hochwasser – Buhnenabstand 2

In der dritten und letzten Phase mit 28 l/s Durchfluss wurden die Buhnen stark überströmt. Eine Zirkulationsströmung im Buhnenfeld konnte - wie schon in der letzten Phase - nicht beobachtet werden. Hinter dem Buhnenkopf kam es auch bei diesem Durchfluss zu Wirbelablösungen (siehe Abbildung 6.9 a). Über der Buhnenkrone verlief die Strömung orthogonal zur Buhnenachse, im Buhnenfeld parallel zur Hauptströmung. An der Gerinnesohle kam es jedoch nach dem Überfließen der Buhnenkrone in Ufernähe zu einer Sohlströmung in Richtung Hauptstrom, wie in Abbildung 6.9b (weißer Pfeil) ersichtlich ist.

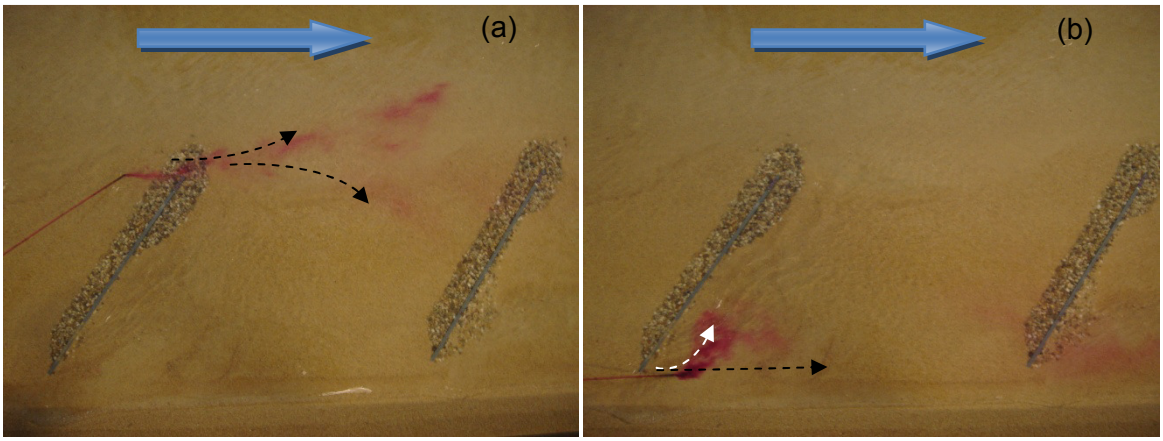


Abbildung 6.9 - VS 5: Strömungen im Buhnenfeld (Buhnen stark überströmt, Buhnenabstand 2)

Hochwasser – Buhnenabstand 4

Beim Buhnenabstand 4 kam es gegen Ende der Versuchsdauer von 6 Stunden durch den starken Uferangriff zu einer Zirkulationsströmung direkt hinter der Buhnenwurzel (Abbildung 6.10).

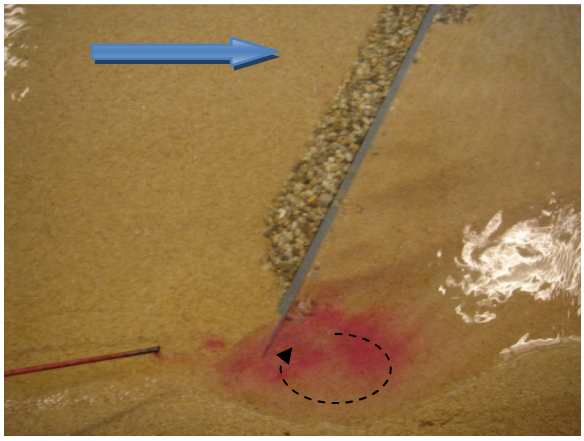


Abbildung 6.10 – VS 5: Zirkulationsströmung im Buhnenwurzelbereich (Buhnen stark überströmt, Buhnenabstand 4)

An der stromabwärtsgerichteten Böschung der Buhne konnten bei Hochwasser zeitweise Wirbel mit horizontaler Achse beobachtet werden.

Anmerkung:

Vor dieser Versuchsserie wurde aufgrund von Umbauarbeiten im Wasserbaulabor die Wasserversorgung geändert. Die Durchflussmengen bei den einzelnen Durchflussstufen wurden dabei aber nicht verändert. Im Oberwasserbehälter war das einströmende Wasser aber wesentlich unruhiger, und wurde auch durch die bereits bestehende Ziegelschar (Lochung in Fließrichtung) nicht derart beruhigt wie in den vorhergehenden Versuchsserien. Dadurch kam es im oberen Modellbereich bis hinein in die Messstrecke zu einem offensichtlich stärkeren Angriff auf das Ufer sowie die Modellsohle insgesamt. Dieser zusätzliche Angriff auf die Modellmorphologie wurde mit zunehmender Fließstrecke geringer. Da in dieser Serie aber zwei Buhnenabstände eingebaut wurden, die Messstrecke für einen untersuchten Buhnenabstand also ohnehin bereits halbiert wurde, blieb für eine Bewertung des Buhnenabstandes 2 nur noch ein Buhnenfeld übrig, und es konnten keine Vergleiche angestellt werden (Anordnung der Buhnen im Modell siehe Abbildung 6.1).

6.1.2 Buhnenabstände 2,5 und 3 (Versuchsserie 6)

Parameter:

Verhältnis Buhnenabstand zu Buhnenlänge (a/b):

im oberen Modellbereich: 2,5
im unteren Modellbereich: 3

Buhneneinbauwinkel β : 55° (stark deklinant)

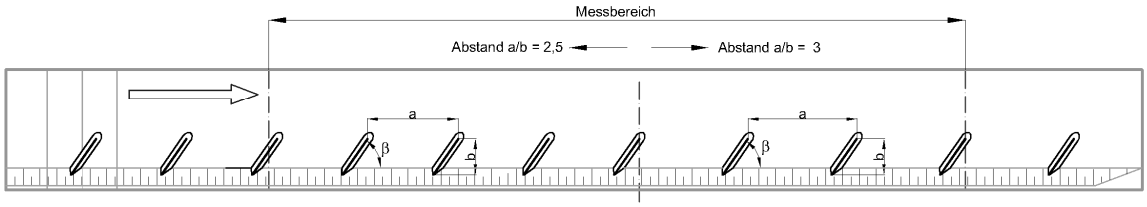


Abbildung 6.11 - Buhnenanordnung Versuchsserie 6

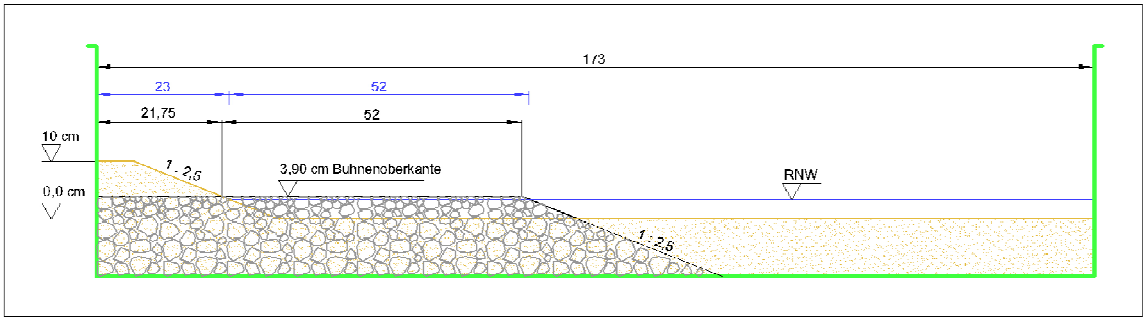


Abbildung 6.12 - Buhnenlängsschnitt für Versuchsserie 6

Die in dieser Serie eingebauten Buhnen entsprechen jenen der Versuchsserie 5. In dieser Serie wurden wieder zwei verschiedene Abstände in einem Modell eingebaut: im oberen Bereich des Modells der Buhnenabstand 2,5, und im unteren Bereich der Buhnenabstand 3.

Anmerkung:

Vor dem Start dieser Versuchsserie 6 wurde im Oberwasserbehälter eine „Beruhigungsplatte“ installiert. Dabei wurde eine Styroporplatte mit einer Schaltafel beschwert und auf die Wasseroberfläche im Oberwasserbehälter gelegt, sodass sie die gesamte Breite des Oberwasserbehälters abdeckte. Somit wurde bereits im Oberwasserbehälter ein ruhigerer Wasserspiegel erreicht, was zu einem wesentlich ruhigeren Einströmen des Wassers in die Modellrinne führte.

Abbildung 6.13 - Buhnengeometrie und gesamtes Modell der Versuchsserie 6 vor dem Versuch

Niederwasser – Buhnenabstand 2,5

Auch diese Versuchsserie wurde wieder mit der Phase 1 bei Niederwasser mit 7,1 l/s gestartet.

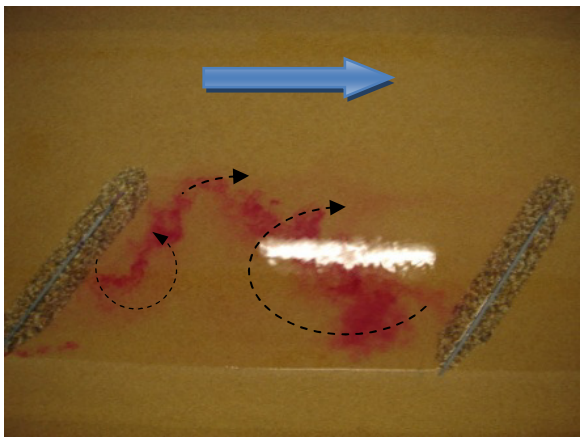


Abbildung 6.14 - VS 6: Strömungen im Buhnenfeld (Buhnen nicht überströmt, Buhnenabstand 2,5)

Wie in der obigen Abbildung dargestellt, war bei nichtüberströmten Buhnen im Buhnenfeld eine Primärströmung im unteren Bereich des Buhnenfeldes deutlich erkennbar. Im oberen Bereich war eine, wenn auch sehr schwache, Sekundärströmung auszumachen. Unterhalb der Buhne in Ufernähe, bildete sich, wie auch schon in der letzten Versuchsserie, eine Stillwasserzone.

Niederwasser – Buhnenabstand 3

Auch bei Buhnenabstand 3 waren bei Niederwasser die Primärströmung im unteren und die Sekundärströmung im oberen Bereich der Buhnenfelder gut zu erkennen. In der folgenden Abbildung sind diese Drehströmungen zu sehen. Die zwei Fotos wurden knapp nacheinander aufgenommen. Die Drehströmungen sind deutlich an der „Verformung“ der roten Linie aus Kaliumpermanganat zu erkennen.

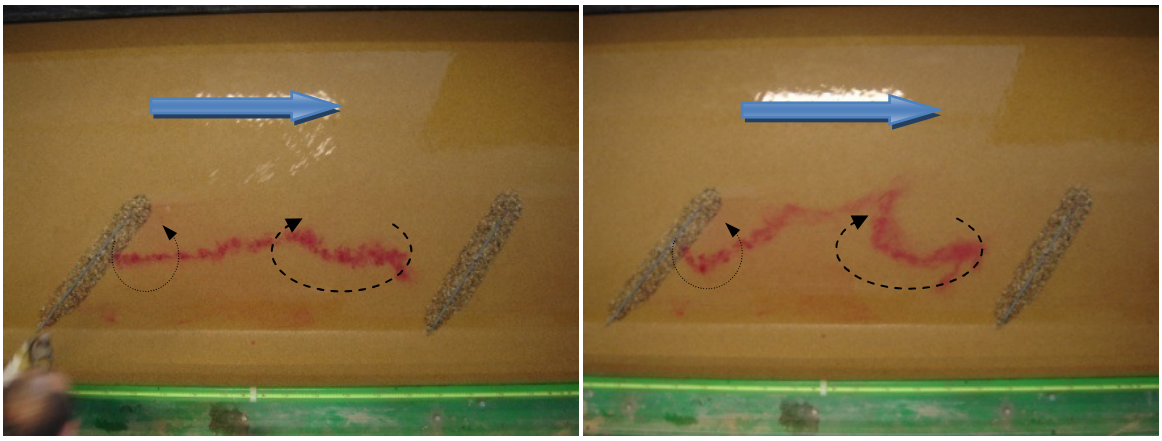


Abbildung 6.15 - VS 6: Strömungen im Buhnenfeld (Buhnen nicht überströmt, Buhnenabstand 3)

Es kam hier ebenfalls in der Interaktionszone nach dem Umströmen des Buhnenkopfes zu Wirbelablösungen. In der folgenden Abbildung ist diese Wirbelablösung (am Buhnenkopf) gut zu erkennen.

Abbildung 6.16 – VS 6: Wirbelablösung am Buhnenkopf

Mittelwasser – Buhnenabstand 2,5

Bei einem Durchfluss von 15 l/s, d.h. bei leicht überströmten Buhnenkronen, war in Ansätzen eine Zirkulationsströmung im Buhnenfeld zu erkennen, die aber von der Strömung über die Buhnen meist überlagert wurde.

An der Gewässersohle strömte das Wasser im oberen Bereich des Buhnenfeldes nahezu konstant Richtung Hauptströmung (von orthogonal zur Hauptströmung bis etwa parallel zur Buhnenachse wechselnd), während weiter stromabwärts im Buhnenfeld die Sohlströmung zwischen orthogonal Richtung Hauptströmung und orthogonal zur stromab liegenden Buhnenachse Richtung Ufer wechselte (Abbildung 6.17).

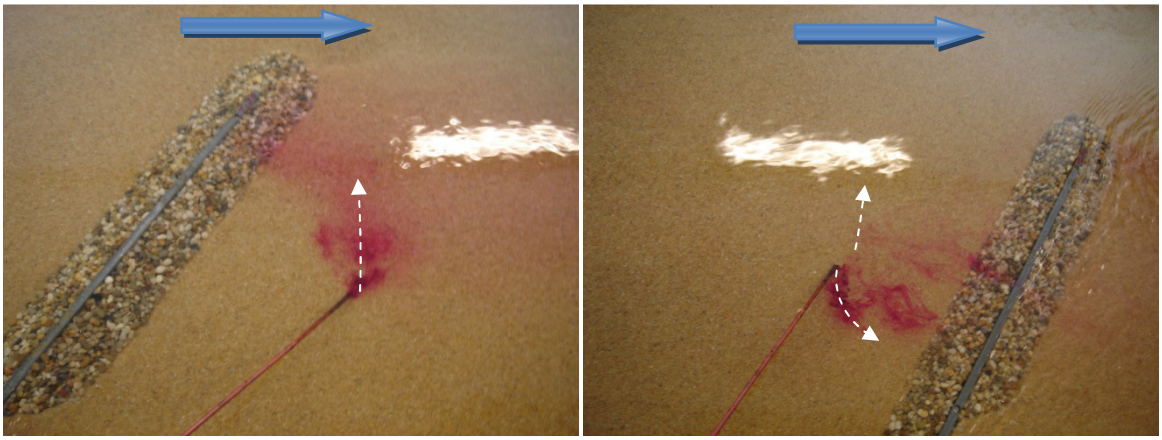


Abbildung 6.17 - VS 6: Sohlströmung im Buhnenfeld (Buhnen leicht überströmt, Buhnenabstand 2,5)

Abbildung 6.18 – VS 6: Interaktionszone zwischen Buhnenfeld und Hauptstrom (Buhnen leicht überströmt, Buhnenabstand 2,5)

Mittelwasser – Buhnenabstand 3

Die in dieser Phase beobachteten Strömungen entsprachen in etwa jenen des Buhnenabstandes 2,5. In der folgenden Abbildung 6.19 ist die in Ansätzen beobachtete Zirkulationsströmung im Buhnenfeld zu sehen.

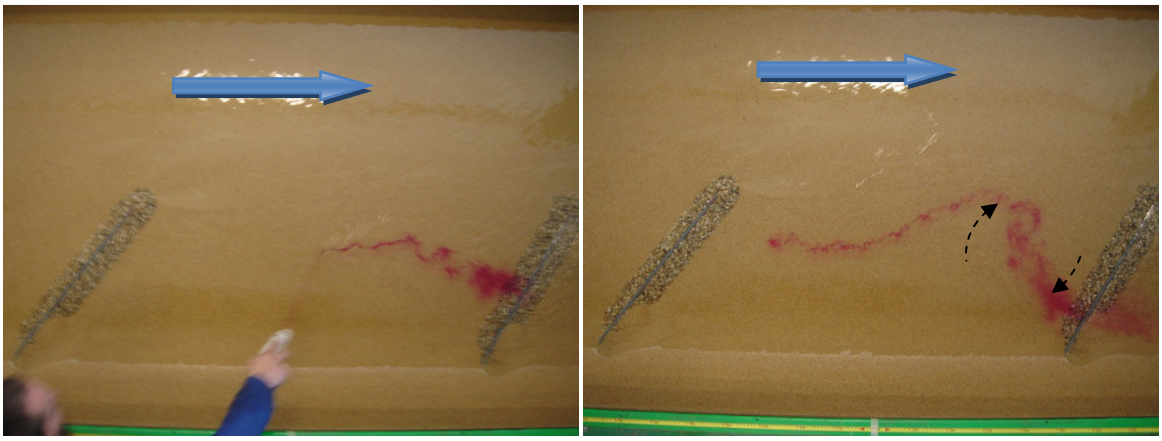


Abbildung 6.19 - VS 6: Zirkulationsströmung im Buhnenfeld (Buhnen leicht überströmt, Buhnenabstand 3)

Hochwasser – Buhnenabstand 2,5

Im Buhnenfeld war bei einem Durchfluss von 28 l/s keine Zirkulationsströmung mehr zu erkennen. Auch hier traten wieder stark dreidimensionale Strömungen auf. An der Oberfläche verlief die Strömung im Buhnenfeld parallel zur Hauptströmung, über den Buhnenkronen dagegen orthogonal zur Buhnenachse in Richtung Ufer. An der Sohle bewegte sich die Strömung Richtung Hauptstrom (Abbildung 6.20b, weiße Pfeile).

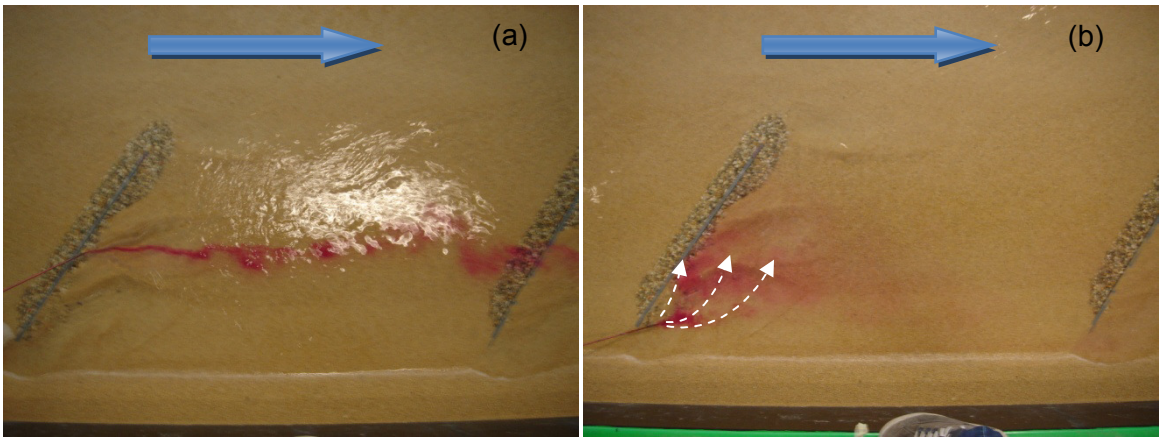


Abbildung 6.20 - VS 6: Strömung im Buhnenfeld (Buhnen stark überströmt, Buhnenabstand 2,5)

Auch bei Buhnenabstand 2,5 kam es gegen Ende der Versuchsdauer durch den Uferangriff zu einer Zirkulationsströmung direkt hinter der Buhnenwurzel (Abbildung 6.21).

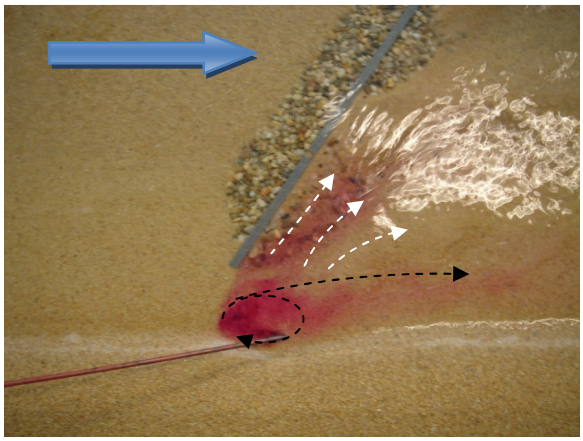


Abbildung 6.21 - VS 6: Zirkulationsströmung im Buhnenwurzelbereich (Buhnen stark überströmt, Buhnenabstand 2,5)

Hochwasser – Buhnenabstand 3

Über die Buhnenkrone verlief die Strömung nun orthogonal zur Buhnenachse, im Verlauf des Buhnenfeldes sodann wieder parallel zur Hauptströmung. An der Buhnenrückseite, direkt nach der Buhnenkrone, wurde wieder eine schwache Wasserwalze beobachtet.

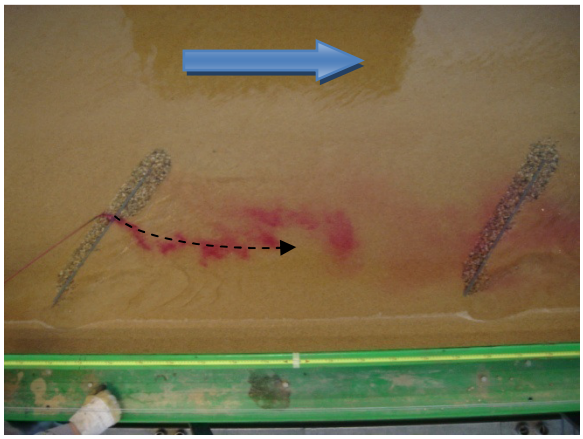


Abbildung 6.22 - VS 6: Strömung im Buhnenfeld (stark überströmte Buhnen, Buhnenabstand 3)

6.2 Auswertung der Versuchsserien 5 und 6

Im Folgenden sind die Auswertungen mittels der Visualisierungssoftware *Tecplot* dargestellt. Das Verfahren zur Darstellung ist in Abschnitt 4.6.1 genau beschrieben. In Abbildung 6.23 ist je ein Buhnenfeld aus dieser Versuchsserie als Ausschnitt dieser morphologischen Gesamtaufnahme zu sehen und zwar vor Versuchsstart. Die planmäßig eben eingebaute Sohle ist in allen folgenden Grafiken grün, Vertiefungen sind durch Blautöne und Erhöhungen mittels gelber, roter bis hin zu violetter Farbgebung dargestellt (siehe Legende in Abbildung 6.23). In der folgenden Auswertung ist bei jedem untersuchten Buhnenabstand die vermessene und visualisierte Darstellung eines ausgewählten Buhnenfeldes vor Versuchsstart und nach Hochwasserabfluss zu sehen. Zusätzlich dazu ist auch zu jedem untersuchten Buhnenabstand ein Foto des Modells nach der Belastung mit Hochwasser abgebildet. Die visualisierten Darstellungen der Modellsohle (ebenfalls die ausgewählten Buhnenfelder) nach Niederwasser und nach Mittelwasser sind im Anhang dieser Arbeit angefügt.

Bei der Berechnung der Volumina der Auskolkungen und der Anlandungen ist schließlich auch die berechnete Differenz der Sohle vor dem Versuch und der Sohlvermessung nach Hochwasser grafisch dargestellt. Dabei sind jene Bereiche, in denen kein Sohlmaterial abgelagert bzw. abgetragen wurde, wieder grün dargestellt. Bereiche, in denen Material abgetragen wurde, z.B. im Buhnenkopfbereich, sind blau dargestellt. Dabei ist der Blauton umso dunkler je tiefer die Auskolkung ist. Bereiche, in denen Geschiebe abgelagert wurde, z.B. Anlandungen im Kolkschatten des Buhnenkopfes werden, je nach Mächtigkeit der Ablagerungen, wieder gelb, rot bis violett dargestellt,.

6.2.1 Buhnenabstände 2 und 4 (Versuchsserie 5)

Morphologie:

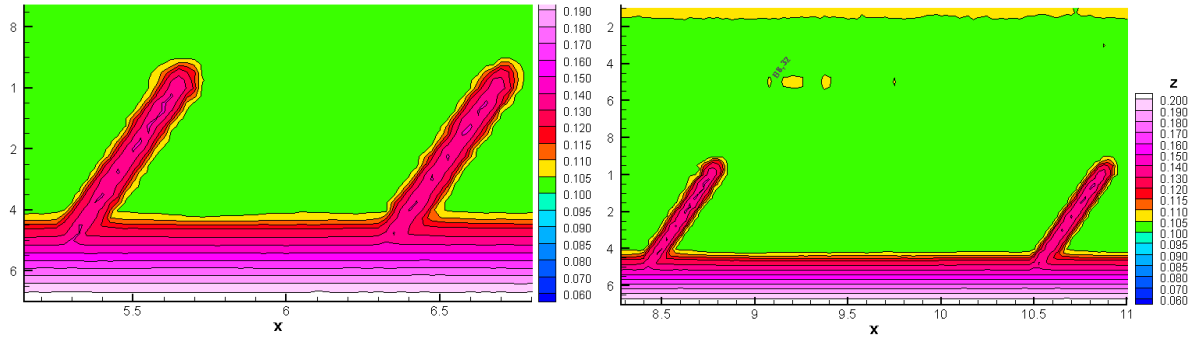


Abbildung 6.23 - morphologische Aufnahmen der Sohle VS5 vor dem Versuch, Buhnenabstand 2 und 4

Niederwasser:

In der ersten Belastungsstufe mit 7,1 l/s (Niederwasser - Buhnen gerade noch nicht überströmt) über einen Zeitraum von sechs Stunden kam es bei beiden eingebauten Buhnenabständen zu praktisch keiner Kornbewegung im Stromstrich. In den Buhnenfeldern konnte bei beiden Buhnenabständen keine Veränderung der Sohle beobachtet werden. Lediglich im unteren Teil des Messbereiches (Buhnenabstand 4) kam es zu Beginn des Versuches an den Buhnenköpfen zu leichten Kolken. Nach der Feineinstellung des Normalabflusses konnte allerdings keine Kornbewegung mehr festgestellt werden.

Mittelwasser:

In der zweiten Durchflussstufe mit 15 l/s (Mittelwasser – Buhnen bereits leicht überströmt) über einen Zeitraum von sechs Stunden konnte im Bereich der Buhnenköpfe über den gesamten Modellbereich die Entwicklung von Kolken sowie in deren Strömungsschatten die Anlandung des ausgetragenen Sohlmaterials beobachtet werden. Im unteren Bereich des Modells, in dem die Buhnen mit einem Abstand von 4 eingebaut wurden, waren diese Buhnenkopfkolke deutlich größer als im oberen Bereich (Buhnenabstand 2). Auch in Ufernähe konnte eine Bewegung festgestellt werden, wobei diese bei Buhnenabstand 4 wiederum ausgeprägter war. Die deutlichste Veränderung der Sohle konnte im Bereich unmittelbar bei der Buhnenwurzel beobachtet werden. Im Stromstrich wurde über den gesamten Modellbereich keine Veränderung der Sohle beobachtet; es kam lediglich zu leichten Kornbewegungen.

Hochwasser:

Während der dritten Durchflussstufe mit 28 l/s (Hochwasser – Buhnen stark überströmt), erneut über einen Zeitraum von sechs Stunden, kam es zu ausgeprägten Veränderungen der Sohle. Im Stromstrich konnte über den gesamten Modellbereich eine starke Geschiebebewegung beobachtet werden. Die Buhnenkopfkolke und die Anlandungen dahinter bildeten sich erheblich stärker aus als noch bei Mittelwasser. Die Veränderung im Uferbereich war stärker als bei allen vorangegangenen Versuchsserien, wobei wiederum bei Buhnenabstand 4 die Veränderung größer war als bei Buhnenabstand 2 (siehe Abbildung 6.24 und Abbildung 6.25).

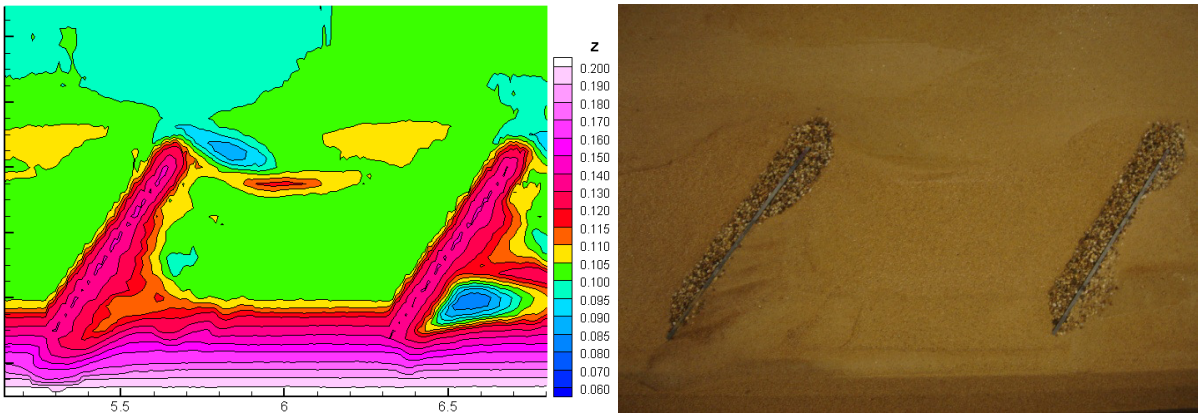


Abbildung 6.24 – VS 5: Aufnahmen der Sohle nach HW, Buhnenabstand 2

Vergleicht man Abbildung 6.24 mit der morphologischen Sohlaufnahme vor dem Versuch (Abbildung 6.23), so erkennt man deutlich die Veränderung der Modellsohle. Der Buhnenkopfkolk und die Anlandung dahinter sind deutlich zu sehen. Im Uferbereich ist der Angriff auf die Böschung bei dieser stark deklinanten Buhnenanordnung direkt nach der Buhnenwurzel, wie erwartet, sehr groß. Auch im Stromstrich ist die Veränderung der Modellsohle erkennbar. Im oberen Bereich des Modells (hier wurden die Buhnen mit dem Abstand 2 eingebaut) wurde Sohlmaterial abgetragen (hellblaue Färbung in Abbildung 6.24), während im unteren Modellbereich (Buhnenabstand 4, Abbildung 6.25) Sohlmaterial vom oberen Teil des Modells abgelagert wurde (gelbe bis rote Färbung).

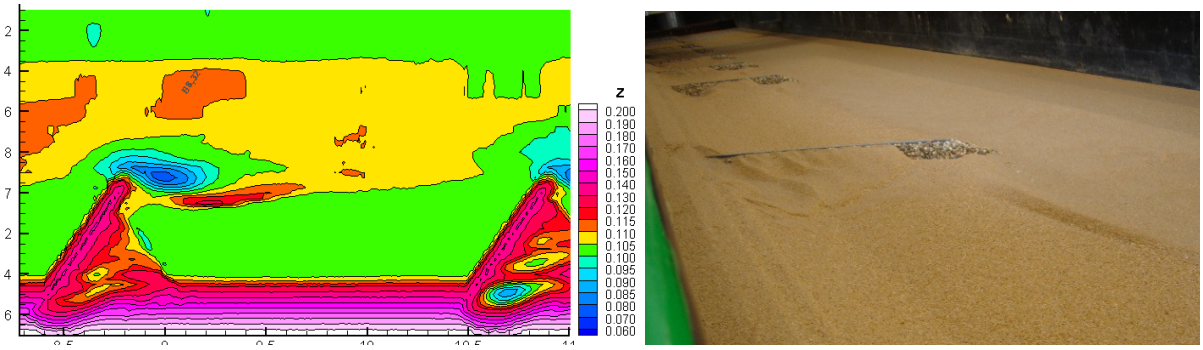


Abbildung 6.25 – VS 5: Aufnahmen der Sohle nach HW, Buhnenabstand 4

Für die Beurteilung der morphologischen Veränderungen wurden, wie auch schon bei den Versuchsserien VS1 bis VS4, das Volumen der Kolke, der Uferangriff, sowie die Anlandungen berechnet. Dabei wurde, wie in Abschnitt 4.6.1 beschrieben, von der gerasterten Sohle nach der Hochwasserbelastung die Sohle vor Versuchsstart abgezogen und mittels *Tecplot* grafisch dargestellt (Abbildung 6.26 und Abbildung 6.27).

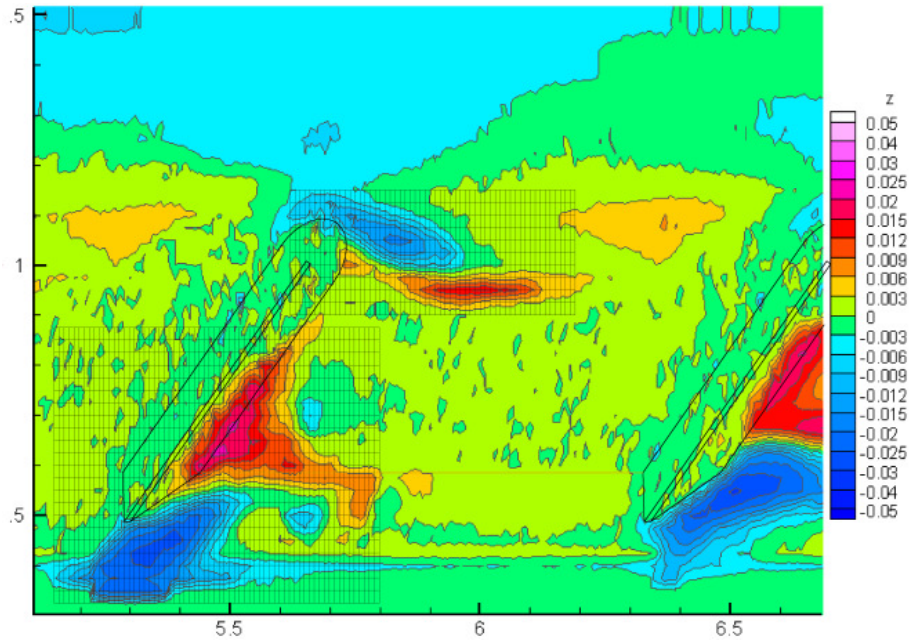


Abbildung 6.26 – VS 5: Differenz der Sohle nach HW und der Sohle vor Versuchsstart – Buhnenabstand 2

Die Position der Buhnen wurde in diesen Darstellungen nachträglich eingezeichnet, um deutlich zu machen, in welchen Bereichen Material abgetragen und wo dieses Material wieder abgelagert wurde. Dies ist für Buhnenabstand 2 in Abbildung 6.26 und für Buhnenabstand 4 in Abbildung 6.27 ersichtlich.

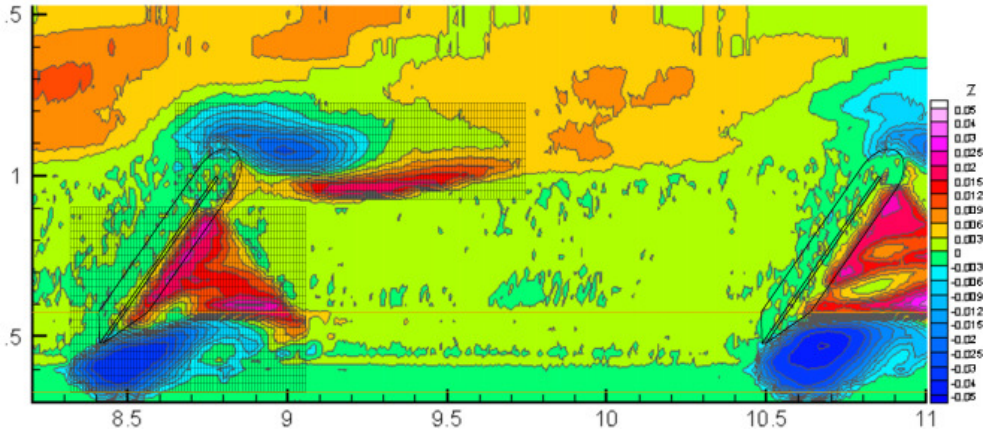


Abbildung 6.27 – VS5: Differenz der Sohle nach HW und der Sohle vor Versuchsstart – Buhnenabstand 4

Zur Berechnung wurden dann im Bereich des Buhnenkopfes bzw. der Buhnenwurzel die in beiden Abbildungen dargestellten Bereiche aufsummiert. Für das Volumen der Kolke wurden dafür die negativen Werte und für das Volumen der Anlandungen die positiven Werte im jeweiligen Bereich aufsummiert. In der folgenden Tabelle sind die so ermittelten Werte für die Versuchsserie 5 dargestellt.

Vergleich der morphologischen Veränderung (nach der Versuchsserie 5)						
Versuchs serie	Buhnen abstand	Einbauwinkel	Buhnen kopfkolk	Anlandung Buhnenkopf	Ufer angriff	Anlandung im Wurzel bereich
			[cm³]	[cm³]	[cm³]	[cm³]
1	1,5	leicht inklinant	-209,3	340,0	-37,0	111,3
3	1,5	stark deklinant	-166,7	68,7	-280,9	252,5
5	2	stark deklinant	-183,7	134,2	-856,6	619,3
5	4	stark deklinant	-886,0	799,9	-1707,0	1376,2

Tabelle 6.1 – VS 5: morphologische Veränderungen

Zum Vergleich wurden in diese Tabelle auch Werte aus früheren Versuchsserien mit aufgenommen. So sind in der dunkelgrau unterlegten Zeile die Zahlen aus Versuchsserie 1 (traditionelle Buhnenform mit Buhnenabstand 1,5 und leicht inklinanten Buhnen), und in der hellgrau unterlegten Zeile die Werte aus Versuchsserie 3 (stark deklinante Buhnenanordnung mit einem Buhnenabstand von 1,5) als Referenzmessungen mit angeführt.

Wie in der Tabelle 6.1 zu erkennen ist, liegt der Wert für den Buhnenkopfkolk bei Buhnenabstand 2 etwa zwischen der traditionellen Anordnung (aus der Versuchsserie 1) und dem Wert aus der Versuchsserie 3 (stark deklinant und Abstand 1,5). Der Buhnenkopfkolk ist bei Buhnenabstand 4 um ein Vielfaches größer als bei Abstand 1,5 oder 2. Ähnlich verhält es sich auch mit der Anlandung im Buhnenkopfbereich. Dies erklärt sich eindeutig aus dem großen Abstand der Buhnen: jede einzelne Buhne wird hier wie eine erste Buhne in einem Buhnenfeld belastet.

Für die morphologische Veränderung im Uferbereich ergibt sich ein etwas anderes Bild. Hier ist im Vergleich zu Buhnenabstand 1,5 (stark deklinante Buhnenanordnung) bereits bei einem Buhnenabstand 2 eine deutliche Steigerung ersichtlich. So sind der Uferangriff und auch die Anlandung im Uferbereich hier bereits etwa um den Faktor 3 größer. Dies lässt sich teilweise auch mit den oben beschriebenen Änderungen der Pumpeneinstellung und der damit einhergehenden größeren „Unruhe“ des ins Modell einströmenden Wassers erklären. Der Unterschied im Uferbereich zwischen Buhnenabstand 4 und Buhnenabstand 2 ist nicht mehr so groß wie noch im Buhnenkopfbereich, nämlich nur noch etwa Faktor 2.

Geschwindigkeitsprofile Buhnenabstand 2:

Wie in Abschnitt 4.6.2 beschrieben, wurden während der Versuche in mehreren Querprofilen die Längs- und Quergeschwindigkeiten gemessen. Die Messreihe 1 entspricht jeweils dem Messprofil knapp nach der Buhne, die Messreihe 2 dem Profil in der Mitte zweier Buhnen und Messreihe 3 dem Messprofil knapp vor der nachfolgenden Buhne (siehe Abbildung 4.11, Abschnitt 4.6.2). Im Gegensatz zu den Versuchsserien 1 bis 4 wurden bei den folgenden Versuchen nur noch in einer Messreihe die Geschwindigkeiten über die gesamte Breite der Versuchsrinne gemessen. In den anderen Messreihen wurde auf die Messpunkte im Hauptstrom verzichtet, da sich die Geschwindigkeiten in der Hauptströmung außerhalb des Einflussbereiches der Buhnen ohnehin kaum ändern. Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Geschwindigkeitsmessungen aus Versuchsserie 5 erläutert.

<u>Niederwasser:</u>

In der folgenden Abbildung sind die Geschwindigkeitsverteilungen v_x und v_y aus Versuchsserie 5 (stark deklinante Buhnenanordnung mit Buhnenabstand 2) bei Niederwasser (7,1 l/s, Buhnenkrone gerade nicht überströmt) ersichtlich.

Die Längsgeschwindigkeit v_x liegt im Hauptstrom bei etwas über 25 cm/s und die Quergeschwindigkeit v_y maximal bei ±0,5 cm/s, v_x sinkt dann im Einflussbereich des Buhnenkopfes ab und ist direkt hinter dem Buhnenkopf nahezu 0 (Messreihe 1 y = 1,0m). Im Buhnenfeld ist die in Abschnitt 6.1.1, Abbildung 6.4 beschriebene Drehströmung gut zu erkennen. Während in Messreihe 3 (knapp vor der Buhne) v_x negativ ist, ist v_y deutlich positiv, also Richtung Ufer gerichtet. Im Bereich der Streichlinie der Buhnenköpfe liegt der 15-Sekunden-Mittelwert der Querströmung zwischen v_y = -1,86 cm/s (Richtung Stromstrich) und v_y = 1,1 cm/s (Richtung Buhnenfeld).

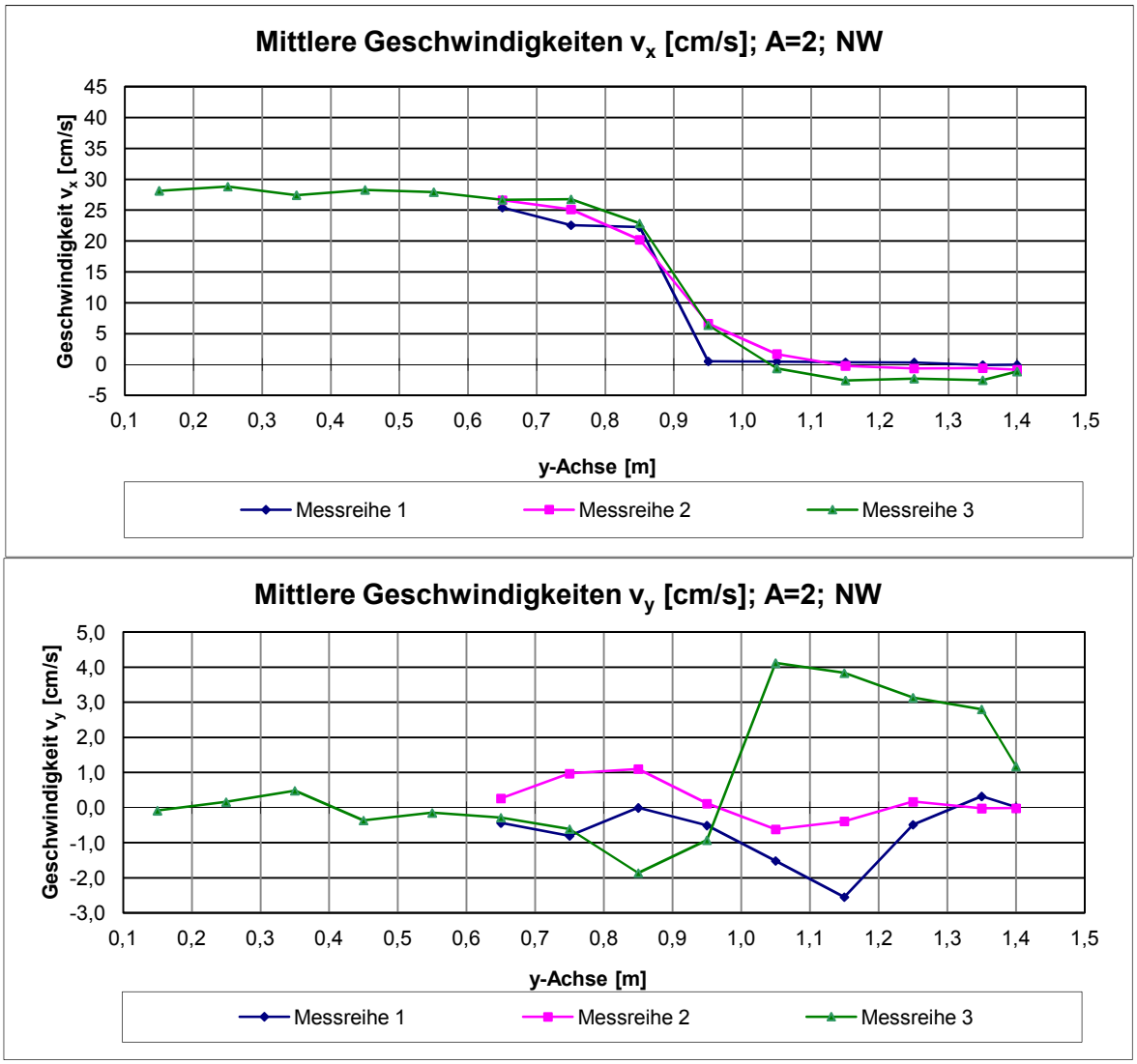


Abbildung 6.28 - VS5: Geschwindigkeitsprofile - Buhnenabstand 2 – NW

In der folgenden Abbildung sind die Geschwindigkeitsvektoren der 15-Sekunden-Mittelwerte grafisch dargestellt. Die Länge und die Richtung der dargestellten Vektoren entsprechen den gemessenen Werten. Dabei ist die Drehströmung innerhalb dieses Buhnenfeldes gut zu erkennen.

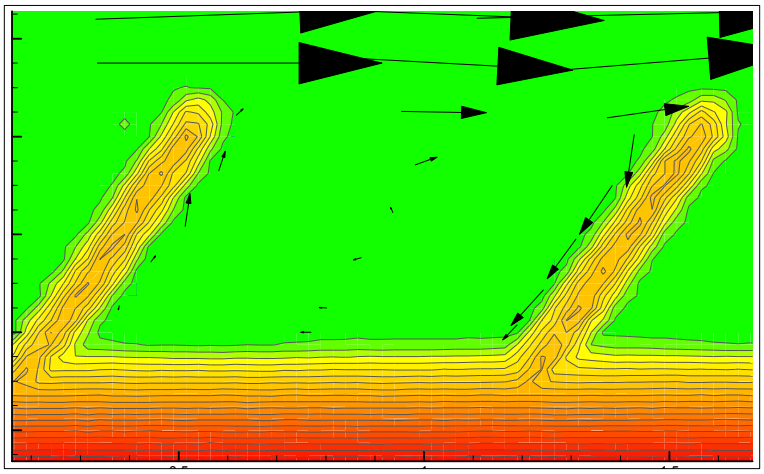


Abbildung 6.29 - VS5: Geschwindigkeitsvektoren 15-Sekunden Mittelwert – Buhnenabstand 2 – NW

Mittelwasser:

In Abbildung 6.30 sind die gemessenen Geschwindigkeiten bei Mittelwasser (15 l/s, Buhnenkrone bereits leicht überströmt) für die Versuchsserie 5 (Buhnenabstand 2) ersichtlich.

Wie im Abschnitt 6.1.1 beschrieben, ist im Buhnenfeld keine Zirkulationsströmung mehr erkennbar. Die gemessenen Längsgeschwindigkeiten sind alle positiv, es findet also keine Rückströmung mehr statt. Aus den Messreihen 1 und 3 (knapp nach der Buhne unterwasserseitig, bzw. knapp vor der Buhne oberwasserseitig) ist die Strömungsrichtung orthogonal über die Buhnenkrone, also Richtung Ufer gerichtet, deutlich abzulesen. Im Bereich der Streichlinie der Buhnenköpfe liegt der 15-Sekunden-Mittelwert der Querströmung zwischen v_y = -2,51 cm/s (Richtung Stromstrich) und v_y = 2,46 cm/s (Richtung Buhnenfeld).

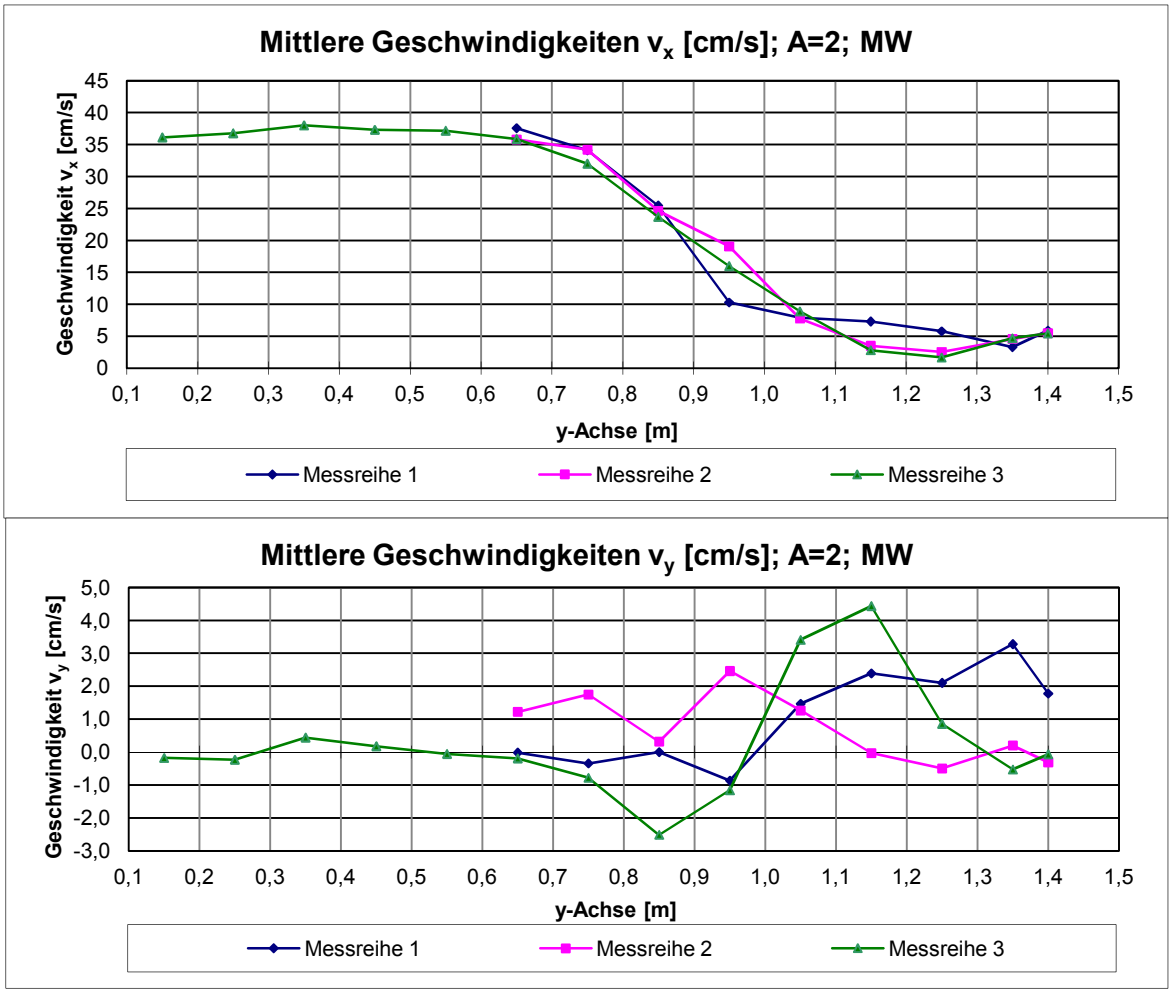


Abbildung 6.30 - VS5: Geschwindigkeitsprofile - Buhnenabstand 2 – MW

Hochwasser

In Abbildung 6.31 sind die Geschwindigkeitsverteilungen bei Hochwasser (28 l/s, Buhnen stark überströmt) für die Versuchsserie 5 (Buhnenabstand 2) dargestellt.

Bei Hochwasser wurde, wie in 4.6.2 erwähnt, zusätzlich zur Messung knapp unterhalb des Wasserspiegels eine zweite Messung knapp über der Gewässersohle durchgeführt.

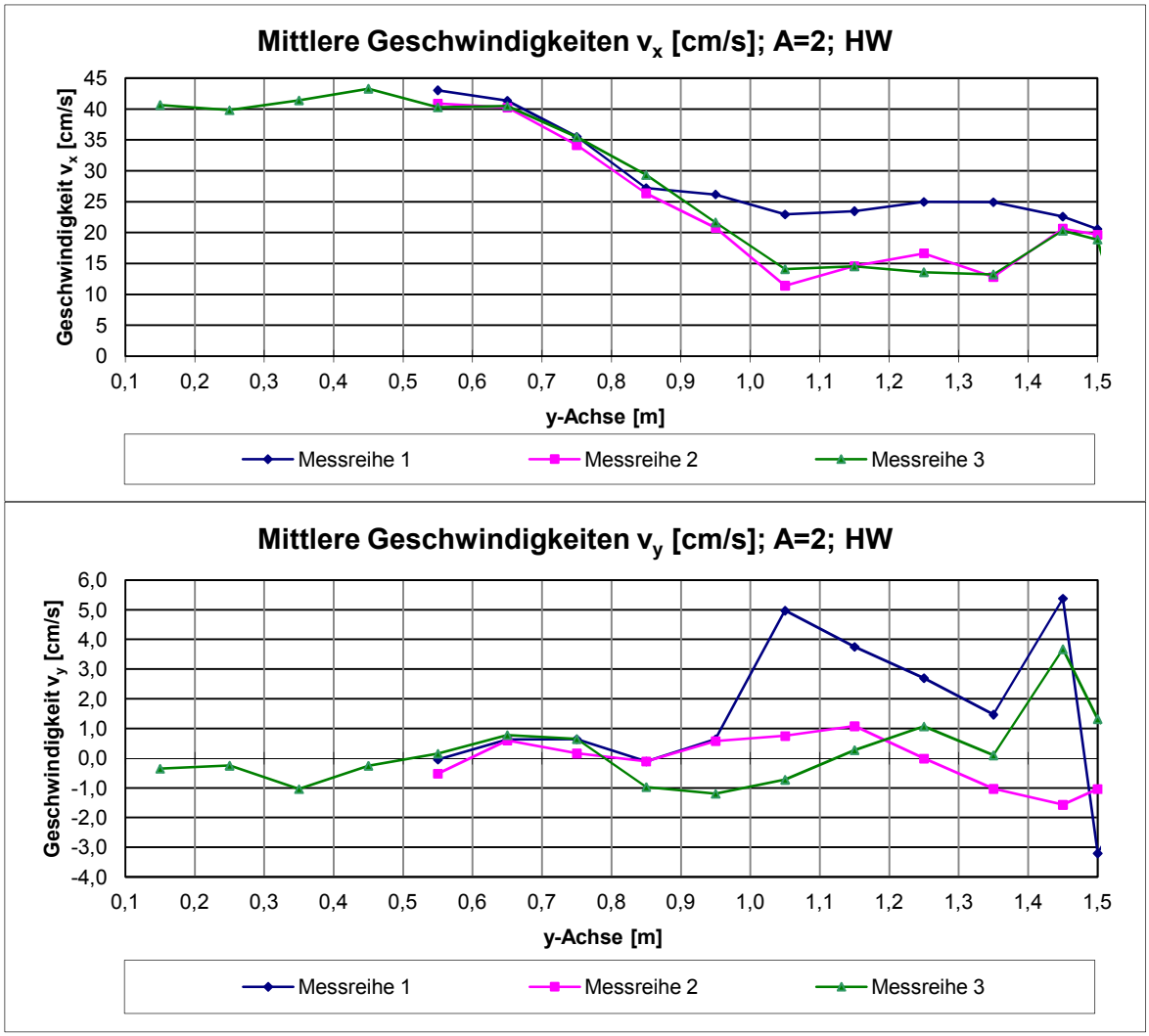


Abbildung 6.31 - VS5: Geschwindigkeitsprofile - Buhnenabstand 2 – HW

Knapp unterhalb des Wasserspiegels beträgt die gemessene Strömungsgeschwindigkeit v_x im Stromstrich etwas über 40 cm/s, im Bereich der Buhnen etwa 15 bis 25 cm/s, wobei der höhere Wert knapp hinter der Buhne gemessen wurde (Beschleunigung der Strömung über die Buhnenkrone). In den Messreihen 2 und 3, also in der Mitte des Buhnenfeldes bzw. knapp vor der nächsten Buhne betrug die Geschwindigkeit nur noch etwa 15 cm/s. Eine Zirkulationsströmung konnte auch bei Hochwasser nicht mehr beobachtet werden. Im Buhnenfeld war lediglich in der Messreihe 1 durch die orthogonale Überströmung der Buhnenkrone eine Strömung in Richtung Ufer erkennbar. Im Bereich der Streichlinie der Buhnenköpfe liegt der 15-Sekunden-Mittelwert der Querströmung zwischen v_y = -1,19 cm/s (Richtung Stromstrich) und v_y = 0,65 cm/s (Richtung Buhnenfeld).

In der nächsten Abbildung (Messung knapp über der Gewässersohle) ist vor allem bei der Messreihe 1 eine deutliche Strömung Richtung Hauptstrom erkennbar (siehe auch Abbildung

6.9). In Hauptstromrichtung sind die Geschwindigkeiten naturgemäß etwas geringer als knapp unter der Wasseroberfläche.

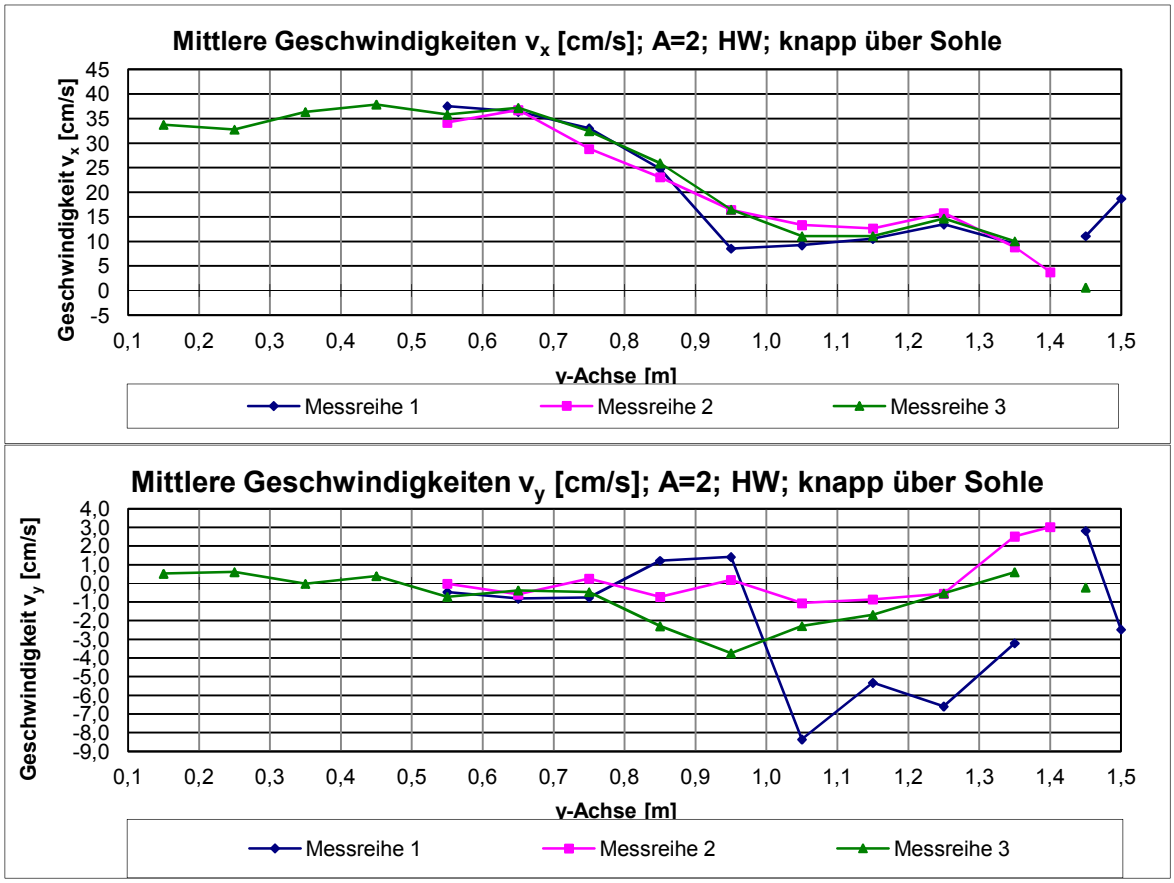


Abbildung 6.32 - VS5: Geschwindigkeitsprofile - Buhnenabstand 2 – HW-knapp über Gewässersohle

Geschwindigkeitsprofile Buhnenabstand 4:

Für den Buhnenabstand 4 und sämtliche folgenden Versuchsserien werden hier nur noch die Geschwindigkeitsdiagramme bei Niederwasser dargestellt. Die Diagramme bei Mittel- und Hochwasser (die Messungen direkt unter Wasserspiegel und auch die Messungen knapp über Gewässersohle) befinden sind im Anhang.

Niederwasser:

In der folgenden Abbildung 6.33 ist die Verteilung der Geschwindigkeiten in Versuchsserie 5 mit Buhnenabstand 4 bei Niederwasser (7,1 l/s Durchfluss, Buhnen gerade noch nicht überströmt) ersichtlich. Bei diesem großen Buhnenabstand 4 (Buhnenabstand a / Buhnenlänge L) wurde eine 4. Messreihe eingefügt. Messreihe 1 liegt direkt hinter (stromab)

der Buhne, Messreihe 4 im selben Buhnenfeld knapp vor der nächsten Buhne (stromaufwärtsliegende Seite der Buhne) und die Messreihen 2 und 3 entsprechend in den Drittelpunkten dazwischen.

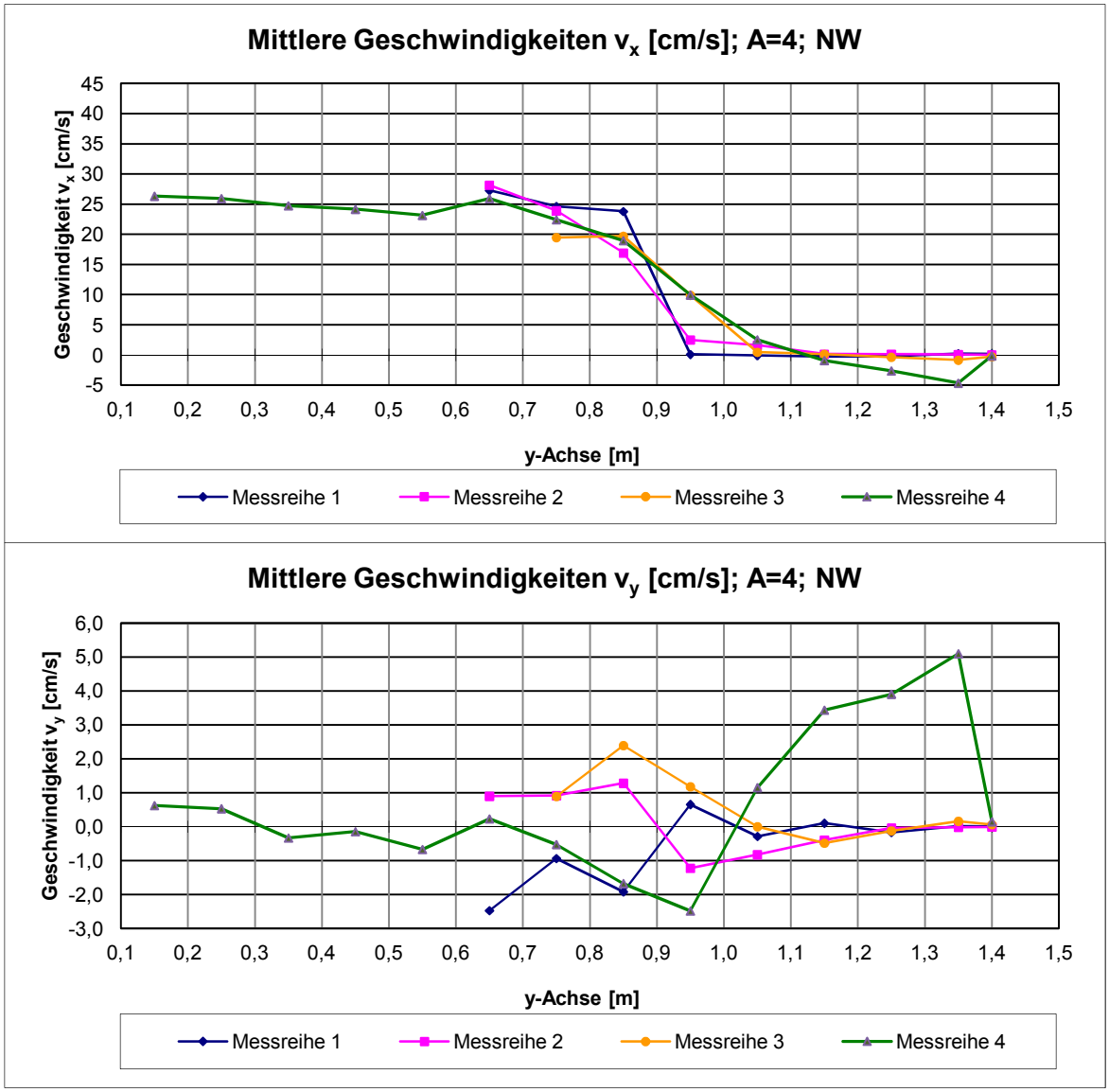


Abbildung 6.33 - VS5: Geschwindigkeitsprofile - Buhnenabstand 4 – NW

Auch hier bleibt die Strömung im Hauptstrom mit etwa 25 cm/s außerhalb des Einwirkungsbereichs der Buhnen konstant. Ebenso ist hier die Zirkulationsströmung im Buhnenfeld zu erkennen, allerdings nur im stromabwärtsliegenden Bereich des Buhnenfeldes. Direkt hinter einer Buhne entsteht ein Bereich mit sehr geringen Strömungen (Stillwasserzone). An der Streichlinie der Buhnenköpfe beträgt der 15-Sekunden-Mittelwert der Querströmung v_y max. 2,4 cm/s Richtung Buhnenfeld und min. -2,48 cm/s Richtung Strommitte.

Mittelwasser

Wie schon in den anderen Versuchsserien bleibt die Geschwindigkeit v_x im Hauptstrom außerhalb des Einwirkungsbereichs der Buhnen bei etwa 37 cm/s konstant. Über die Buhnenkrone fließt das Wasser wieder orthogonal zur Buhnenachse Richtung Ufer (Querströmungen v_y von bis zu 6 cm/s in den Messreihen 1 und 4).

Im Bereich der Streichlinie der Buhnenköpfe liegt der 15-Sekunden-Mittelwert der Querströmung zwischen v_y = -3,46 cm/s (Richtung Stromstrich) und v_y =3 ,15 cm/s (Richtung Buhnenfeld).

Hochwasser

Auch bei Buhnenabstand 4 beträgt die Geschwindigkeit v_x im Hauptstrom wie bei den anderen Serien etwas mehr als 40 cm/s. Im Bereich der Buhnen liegt v_x bei etwa 25 cm/s direkt hinter der Buhne und zwischen 15 und 20 cm/s im Buhnenfeld. Im Vergleich zu den Buhnenabständen 1,5 und 2 sind diese Werte hier etwas höher. Im Bereich der Streichlinie der Buhnenköpfe liegt der 15-Sekunden-Mittelwert der Querströmung zwischen v_y = -2,44 cm/s (Richtung Stromstrich) und v_y = 2,91 cm/s (Richtung Buhnenfeld).

Die Messungen an der Gewässersohle beim Buhnenabstand 4 haben gezeigt, dass die Querströmung hinter der Buhne Richtung Hauptstrom gerichtet ist. Die Messung an der Oberfläche ergab dagegen eine Strömung in die entgegengesetzte Richtung. Im Bereich der Streichlinie der Buhnenköpfe liegt der 15-Sekunden-Mittelwert der Querströmung an der Gewässersohle zwischen v_y = -6 cm/s (Richtung Stromstrich) und v_y = 1,8 cm/s (Richtung Buhnenfeld).

6.2.2 Buhnenabstände 2,5 und 3 (Versuchsserie 6)

Morphologie:

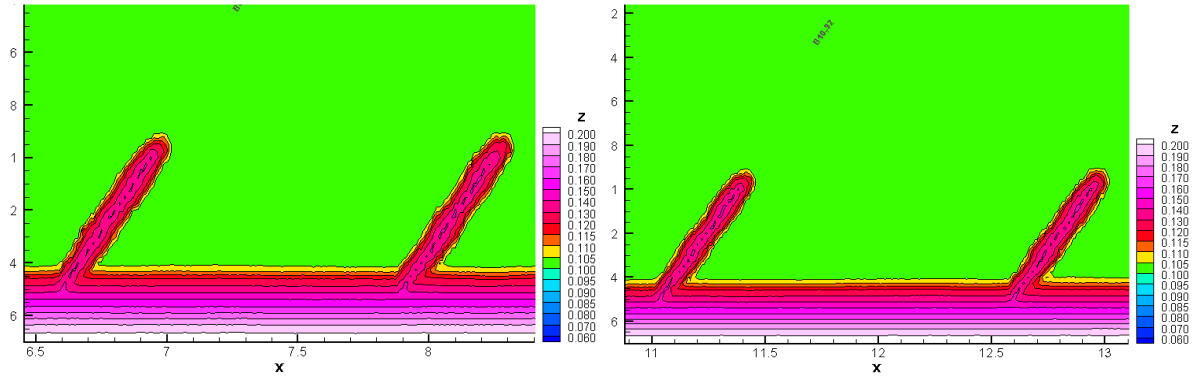


Abbildung 6.34 - morphologische Aufnahmen der Sohle VS6 vor Versuchsstart, Buhnenabstand 2,5 (links) und 3 (rechts)

Niederwasser:

In dieser ersten Belastungsstufe mit 7,1 l/s (Buhnen gerade noch nicht überströmt) über einen Zeitraum von sechs Stunden kam es im gesamten Modellbereich zu praktisch keiner Kornbewegung. Im untersten Bereich des Modells (in diesem waren die Buhnen mit einem Abstand 3 eingebaut) kam es zu Beginn des Versuches wieder zu leichten Kornbewegungen im Buhnenkopfbereich. Nach der Feineinstellung des Normalabflusses konnte auch hier keine Kornbewegung mehr beobachtet werden.

Mittelwasser:

In der zweiten Belastungsstufe mit 15 l/s (Buhnen bereits leicht überströmt) wiederum über ein Zeitraum von sechs Stunden konnte bereits eine deutliche Veränderung der Modellmorphologie, vor allem im Bereich des Ufers direkt hinter den Buhnen beobachtet werden. Im Bereich des Buhnenkopfes kam es bei beiden eingebauten Buhnenabständen zur Ausbildung von leichten Kolken. Im Stromstrich konnte, wie in allen vorangegangenen Versuchen bei Mittelwasser, eine leichte Kornbewegung festgestellt werden.

Hochwasser:

Im Laufe der dritten Belastungsstufe mit 28 l/s (Buhnen stark überströmt) konnte eine große Veränderung der Modellsohle, vor allem im Bereich des Buhnenfeldes beobachtet werden. Der beobachtete Uferangriff war dabei ähnlich stark wie in Versuchsserie 5. Durch die Beruhigungsplatte im Oberwasserbehälter, die vor der Versuchsserie 6 eingebaut wurde, war die Veränderung der Modellsohle über die gesamte Länge des Modells in etwa gleich

groß. Nur an der ersten und teilweise auch noch an der zweiten Buhne, die sich noch außerhalb des Messbereiches befanden, konnte ein außergewöhnlich starker Uferangriff - hier wurden sogar die Buhnenkörper aus Kies im Uferbereich angegriffen - beobachtet werden.

In Abbildung 6.35 und Abbildung 6.36 sind die Veränderung der Modellsohle im Buhnenfeld nach der Hochwasserbelastung für den jeweiligen Buhnenabstand ersichtlich.

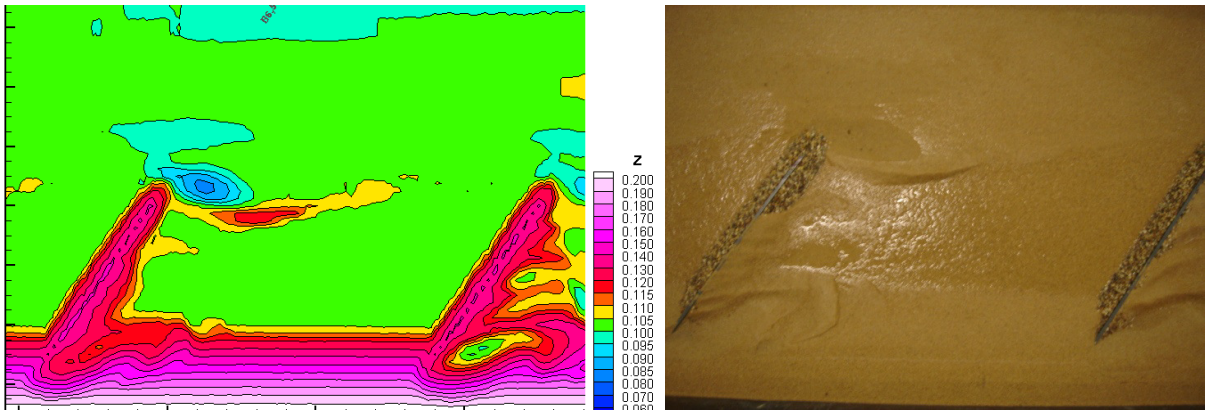


Abbildung 6.35 – VS6: Aufnahmen der Sohle nach HW, Buhnenabstand 2,5

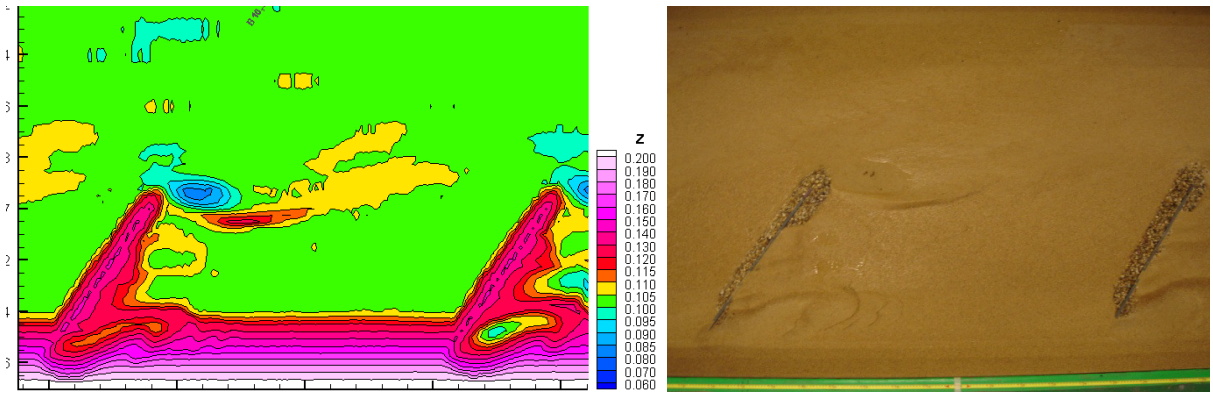


Abbildung 6.36 – VS6: Aufnahmen der Sohle nach HW, Buhnenabstand 3

Bei der Berechnung der Kolke und Anlandungen wurde, wie in Punkt 4.6.1 bereits beschrieben, vorgegangen. Aus den folgenden beiden Abbildungen sind die Sohlveränderungen in jeweils einem repräsentativen Buhnenfeld als Differenz der Sohle nach der Hochwasserbelastung und der Sohle vor Versuchsstart abzulesen. Zur besseren Orientierung wurden nach der Berechnung und Darstellung der Differenzgrafik die Buhnenpositionen nachträglich eingefügt. Aus diesen Abbildungen wird deutlich in welchen Bereichen Sohlmaterial erodiert (blaue Färbung) bzw. in welchen Bereichen dieses Material wieder abgelagert wurde (rote Färbung). Dadurch sind die starken Uferangriffe direkt hinter der Buhnenwurzel gut zu erkennen.

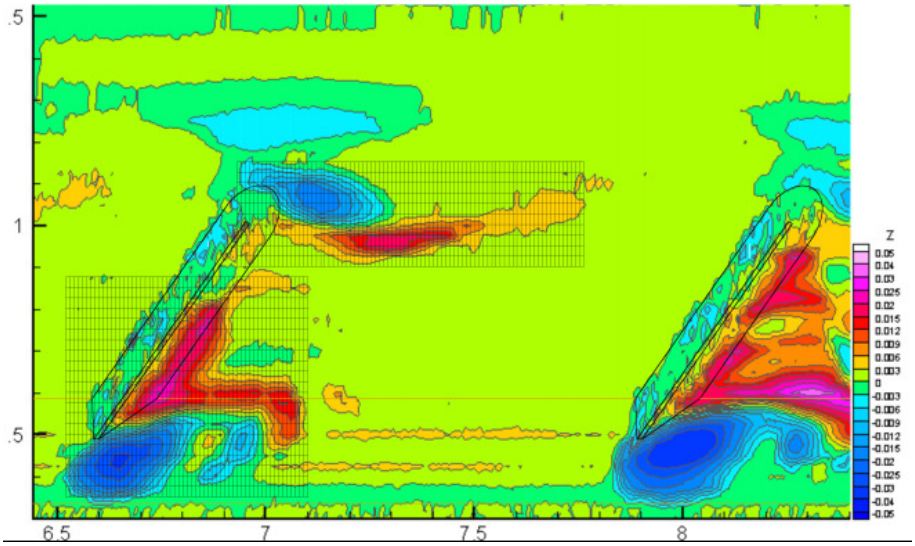


Abbildung 6.37 – VS6: Differenz der Sohle nach HW und der Sohle vor dem Versuch, Buhnenabstand 2,5

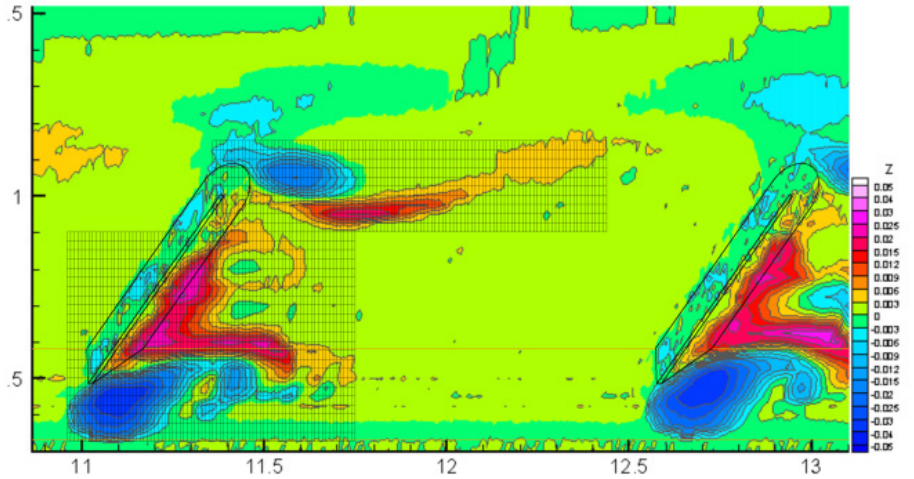


Abbildung 6.38 – VS6: Differenz der Sohle nach HW und der Sohle vor dem Versuch, Buhnenabstand 3

In der folgenden Tabelle 6.2 ist die morphologische Veränderung der Sohle in den Bereichen des Buhnenkopfes und der Buhnenwurzel zusammengefasst. Dabei sind neben den Werten aus Versuchsserie 6 (Buhnenabstand 2,5 und 3) auch die Werte aus den Serien 3 (hellgrau hinterlegt) und 1 (dunkelgrau hinterlegt) mit angeführt.

Vergleich der morphologischen Veränderung (nach der Versuchsserie 6)						
Versuchs serie	Buhnen abstand	Einbauwinkel	Buhnen kopfkolk	Anlandung Buhnenkopf	Ufer angriff	Anlandung im Wurzel bereich
			[cm³]	[cm³]	[cm³]	[cm³]
1	1,5	leicht inklinant	-209,3	340,0	-37,0	111,3
3	1,5	stark deklinant	-166,7	68,7	-280,9	252,5
6	2,5	stark deklinant	-281,7	308,1	-802,3	895,3
6	3	stark deklinant	-319,2	351,5	-1030,5	1130,2

Tabelle 6.2 - VS5: morphologische Veränderung

Wie erwartet sind bei den betrachteten Buhnenabständen 2,5 und 3 die Kolke und auch die Anlandungen im Bereich der Buhnenköpfe größer als bei den Referenzmessungen (VS1 und VS3). Bei Buhnenabstand 3 ist der Wert des Buhnenkopfkolkes etwa doppelt so groß wie bei Buhnenabstand 1,5. Die Anlandung hinter dem Buhnenkopf beträgt mit 351,5 cm² sogar mehr als das Fünffache des abgelagerten Sohlsubstrats bei Versuchsserie 3. Die Anlandungen im Buhnenkopfbereich, die in dieser Form in der Natur nicht zu beobachten sind, sind in der Versuchsserie 6 sowohl bei Buhnenabstand 2,5 als auch bei Buhnenabstand 3 quantitativ in etwa gleich dem ausgetragenen Sohlmaterial des Buhnenkopfkolkes. Im Vergleich zur Referenzmessung aus Versuchsserie 1 sind die Werte des Buhnenkopfkolkes sowohl bei Buhnenabstand 2,5 als auch bei Abstand 3 nur geringfügig (etwa 35% bzw. 50%) größer, und die Anlandungen hinter dem Buhnenkopfkolk bewegen sich im selben Bereich.

Am Ufer beträgt sowohl der Angriff als auch die Anlandung etwa das drei- (Buhnenabstand 2,5) bis vierfache (Buhnenabstand 3) der Werte aus der Versuchsserie 3. Auch hier sind die Werte des ausgetragenen Sohlmaterials im Kolk und das abgelagerte Material im Uferbereich nahezu ident.

Geschwindigkeitsprofile Buhnenabstand 2,5:

Im Folgenden sind wieder nur die Geschwindigkeitsdiagramme bei Niederwasser abgebildet. Die Diagramme für Mittelwasser und Hochwasser finden sich im Anhang.

Niederwasser:

In der folgenden Abbildung ist die Verteilung der Geschwindigkeiten für die Versuchsserie 6 mit Buhnenabstand 2,5 bei Niederwasser (7,1 l/s Durchfluss, Buhnen gerade noch nicht überströmt) ersichtlich.

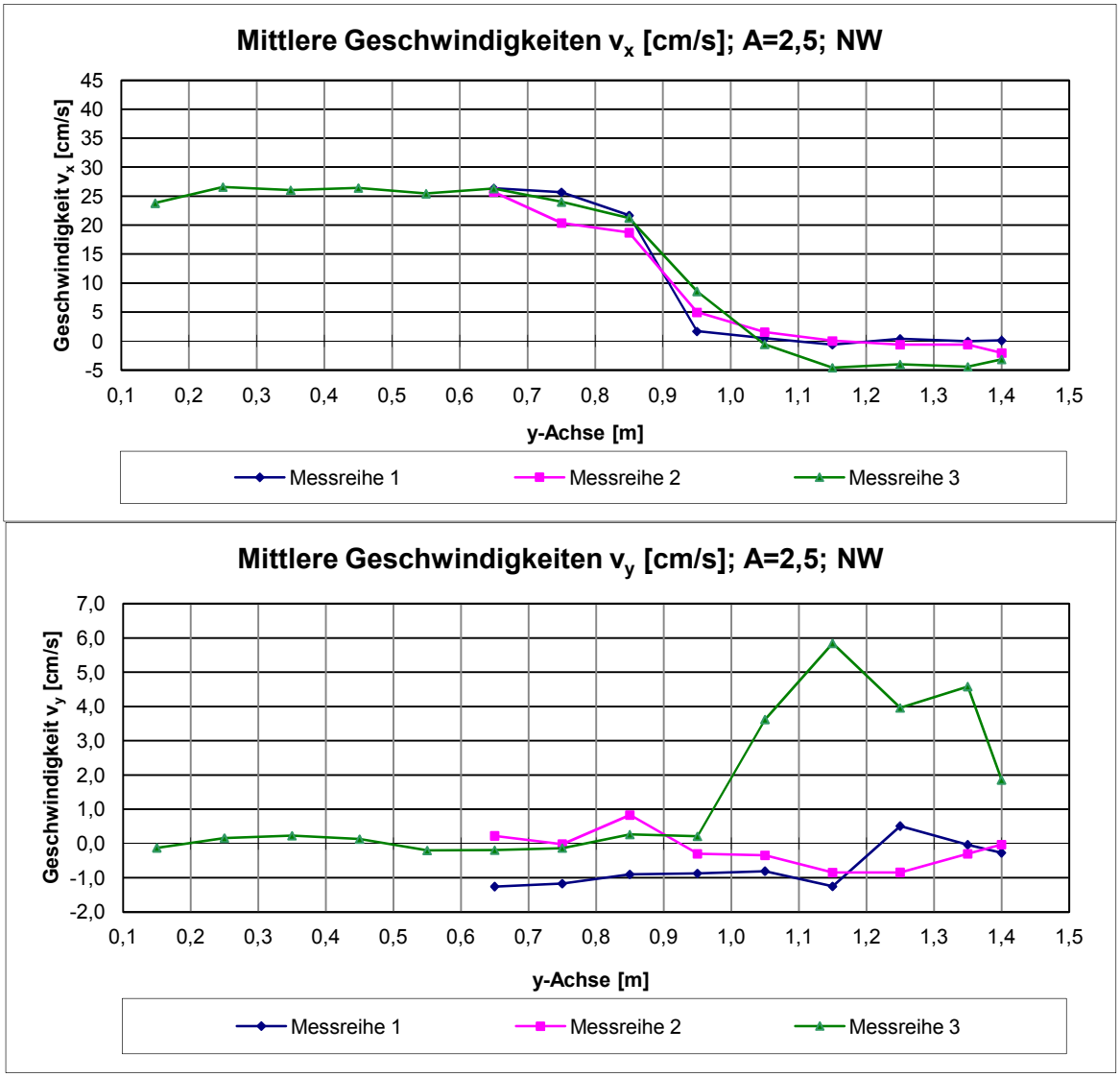


Abbildung 6.39 - VS6: Geschwindigkeitsprofile - Buhnenabstand A2,5 – NW

Auch bei diesem Buhnenabstand ist die Zirkulationsströmung im Buhnenfeld deutlich erkennbar. In Messreihe 3, also knapp vor der Buhne, ist die Strömungsgeschwindigkeit v_x negativ, und richtet sich demnach gegen den Hauptstrom. v_y dagegen verläuft eindeutig Richtung Ufer und das Wasser fließt entlang der Buhnenkrone stromaufwärts.

Die Strömungsgeschwindigkeit im Hauptstrom liegt auch hier wieder etwas über 25 cm/s. Im Bereich der Streichlinie der Buhnenköpfe beträgt der 15-Sekunden-Mittelwert der Querströmung v_y max. 0,83 cm/s Richtung Buhnenfeld und min. -1,17 cm/s Richtung Strommitte.

Mittelwasser:

Im Bereich der Streichlinie der Buhnenköpfe beträgt der 15-Sekunden-Mittelwert der Querströmung v_y max. 1,36 cm/s Richtung Buhnenfeld und v_y min. -1,20 cm/s Richtung Strommitte.

Hochwasser:

Im Bereich der Streichlinie der Buhnenköpfe beträgt der 15-Sekunden-Mittelwert der Querströmung v_y max. 1,58 cm/s Richtung Buhnenfeld und v_y min. -2,39 cm/s Richtung Strommitte.

Geschwindigkeitsprofile Buhnenabstand 3:

Wie oben werden hier nur die Geschwindigkeitsdiagramme für Niederwasser dargestellt. Die Diagramme für Mittelwasser und Hochwasser sind wieder im Anhang zu finden.

Niederwasser:

In der folgenden Abbildung ist die Verteilung der Geschwindigkeiten für die Versuchsserie 6 mit Buhnenabstand 3 bei Niederwasser (7,1 l/s Durchfluss, Buhnen gerade noch nicht überströmt) ersichtlich. Auch hier wurde, wie in der Versuchsserie 5 beim Buhnenabstand 4 (Buhnenabstand a / Buhnenlänge L), eine 4. Messreihe eingefügt. Messreihe 1 liegt direkt hinter (stromab) der Buhne, Messreihe 4 im selben Buhnenfeld knapp vor der nächsten Buhne (stromaufwärtsliegende Seite der Buhne), und die Messreihen 2 und 3 entsprechend in den Drittelpunkten dazwischen.

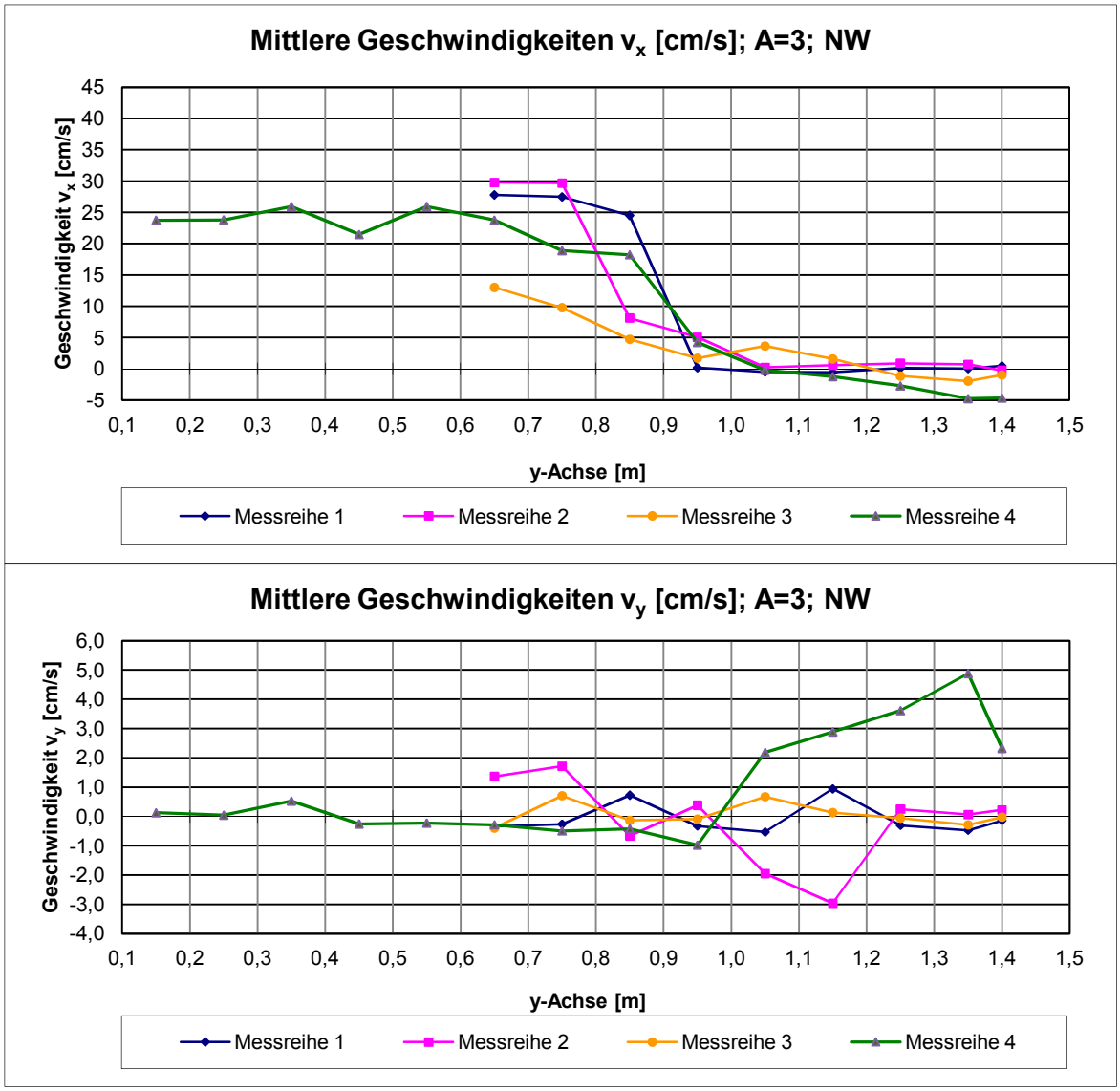


Abbildung 6.40 - VS6: Geschwindigkeitsprofile - Buhnenabstand 3 – NW

Bei diesem Buhnenabstand liegt das Zentrum der Zirkulationsströmung nicht in der Mitte des Buhnenfeldes, sondern etwas stromabwärts davon (etwa zwischen Messreihe 2 und 4, siehe oben). Direkt hinter der Buhne ist ein Bereich mit sehr geringen Strömungsgeschwindigkeiten, eine Stillwasserzone. Die Strömungsgeschwindigkeit im Hauptstrom liegt wieder bei etwa 25 cm/s. Im Bereich der Streichlinie der Buhnenköpfe beträgt der 15-Sekunden-Mittelwert der Querströmung v_y max. 1,71 cm/s Richtung Buhnenfeld und min. -0,98 cm/s Richtung Strommitte.

Mittelwasser:

Im Bereich der Streichlinie der Buhnenköpfe beträgt der 15-Sekunden-Mittelwert der Querströmung v_y max. 2,06 cm/s Richtung Buhnenfeld und v_y min. -1,90 cm/s Richtung Strommitte.

Hochwasser:

Im Bereich der Streichlinie der Buhnenköpfe beträgt der 15-Sekunden-Mittelwert der Querströmung v_y max. 2,45 cm/s Richtung Buhnenfeld und v_y min. -3,60 cm/s Richtung Strommitte.

6.2.3 Gegenüberstellung der Buhnenabstände

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der morphologischen Veränderungen und der Geschwindigkeitsmessungen der unterschiedlichen Buhnenabstände für die Versuchsserien 5 und 6 einander qualitativ gegenübergestellt. In der prozentuellen Betrachtung bilden die Werte aus Versuchsserie 3 die Basis, also 100%. Als Vergleichswerte sind die Werte der Versuchsserie 1 mit den traditionell verbauten, und im Projektgebiet derzeit eingebauten, leicht inklinanten Buhnenform ebenfalls mit angeführt.

Buhnenkopfkolk und Anlandung im Buhnenkopfbereich:

Versuchs serie	Buhnen abstand	Einbauwinkel	Buhnenkopfkolk		Anlandung Buhnenkopf	
			[cm³]	[Vol-%]	[cm³]	[Vol-%]
1	1,5	leicht inklinant	-209,3	126	340,0	495
3	1,5	stark deklinant	-166,7	100	68,7	100
5	2	stark deklinant	-183,7	110	134,2	196
6	2,5	stark deklinant	-281,7	169	308,1	449
6	3	stark deklinant	-319,2	191	351,5	512
5	4	stark deklinant	-886,0	531	799,9	1165

Tabelle 6.3 - morphologische Sohlveränderungen im Buhnenkopfbereich der Modellversuchsreihe 2

Wie in Tabelle 6.3 und in Abbildung 6.41 zu sehen ist, steigen die Werte des ausgetragenen Sohlmaterials am Buhnenkopfkolk bis zum Buhnenabstand 3 annähernd linear an. Erst bei Buhnenabstand 4 ist ein deutlich größerer Buhnenkopfkolk zu beobachten. So beträgt der Wert des Buhnenkopfkolkes bei Buhnenabstand 2 mit -183,7 cm³ weniger als bei der Referenzmessung in der Versuchsserie 1 (-209,3cm³). Bei Buhnenabstand 3 beträgt dieser Wert mit 319,2cm³ allerdings schon das 1,5 fache. Bei Buhnenabstand 4 ist der Wert dann um ein vielfaches höher, was dadurch zu erklären ist, dass hier jede Buhne wie eine erste

Buhne in einem Buhnenfeld wirkt, und dementsprechend einem stärkeren Angriff der Strömung ausgesetzt ist.

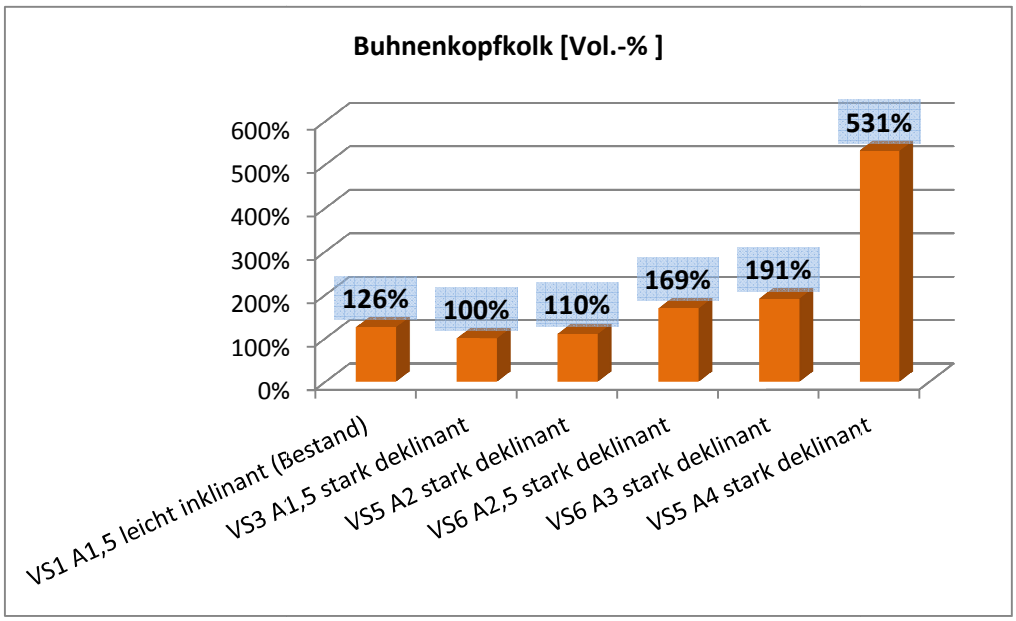


Abbildung 6.41 – Gegenüberstellung Buhnenkopfkolk – Modellversuchsreihe 2

Da der Buhnenkopfkolk so gering wie möglich sein soll, ist bereits bei einem Buhnenabstand von 2,5 mit einer mäßigen Verschlechterung der derzeitigen Situation zu rechnen. Dasselbe gilt für einen Buhnenabstand von 3. Ein Buhnenabstand von 4 ist für die definierten Ziele dieser Vergleichsuntersuchung definitiv zu groß.

In Abbildung 6.42 ist das Volumen des abgelagerten Materials im Bereich des Buhnenkopfes dargestellt. Obwohl eine solche Verlandung im Buhnenfeld in der Natur in dieser Art nicht vorkommt, wird sie der Vollständigkeit halber hier trotzdem mit einbezogen. Der Grund für diese untypischen Ablagerungen im Buhnenkopfbereich dürfte an den fehlenden Modellähnlichkeiten liegen.

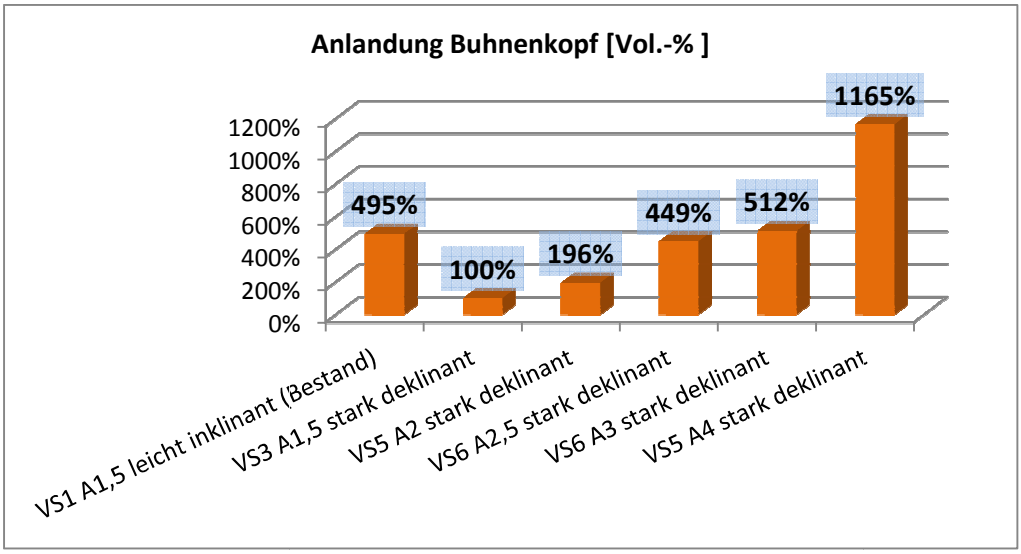


Abbildung 6.42 - Gegenüberstellung der Anlandung hinter dem Buhnenkopfkolk – Modellversuchsreihe 2

Uferangriff und Anlandungen im Buhnenwurzelbereich des Buhnenfeldes:

In Tabelle 6.4 sind die Veränderungen der Modellsohle im Buhnenfeld ersichtlich. Der Uferangriff steigt mit zunehmendem Buhnenabstand, einzig bei Buhnenabstand 2 reißen die Werte etwas nach oben aus (Abbildung 6.43). Dies könnte daran liegen, dass bei der Versuchsserie 5 (Buhnenabstand 2 und Buhnenabstand 4) das Wasser unruhiger ins Modell eingeflossen ist (siehe Anmerkung in Abschnitt 6.1.1).

Das Volumen der Anlandung in Wurzelnähe des Buhnenfeldes steigt angefangen von der Versuchsserie 1 (leicht inklinante Buhnenform, Referenzmodell), über die Buhnenabstände 1,5 bis 4 mit stark deklinanter Buhnenform stetig an.

Bis auf die Versuchsserie 1, das Referenzmodell, sind der Uferangriff und die Anlandung im Buhnenwurzelbereich annähernd gleich groß (im Bereich von etwa ±30%), es handelt sich hier also nur um eine lokale Verfrachtung des Sohlmaterials.

Versuchs serie	Buhnen abstand	Einbauwinkel		Uferangriff		Anlandung im Wurzel bereich	
				[cm³]	[Vol-%]	[cm³]	[Vol-%]
1	1,5	leicht inklinant		-37,0	13	111,3	44
3	1,5	stark deklinant		-280,9	100	252,5	100
5	2	stark deklinant		-856,6	305	619,3	245
6	2,5	stark deklinant		-802,3	286	895,3	355
6	3	stark deklinant		1030,5	367	1130,2	448
5	4	stark deklinant		1707,0	608	1376,2	545

Tabelle 6.4- morphologische Sohlveränderungen im Uferbereich der Modellversuchsreihe 2

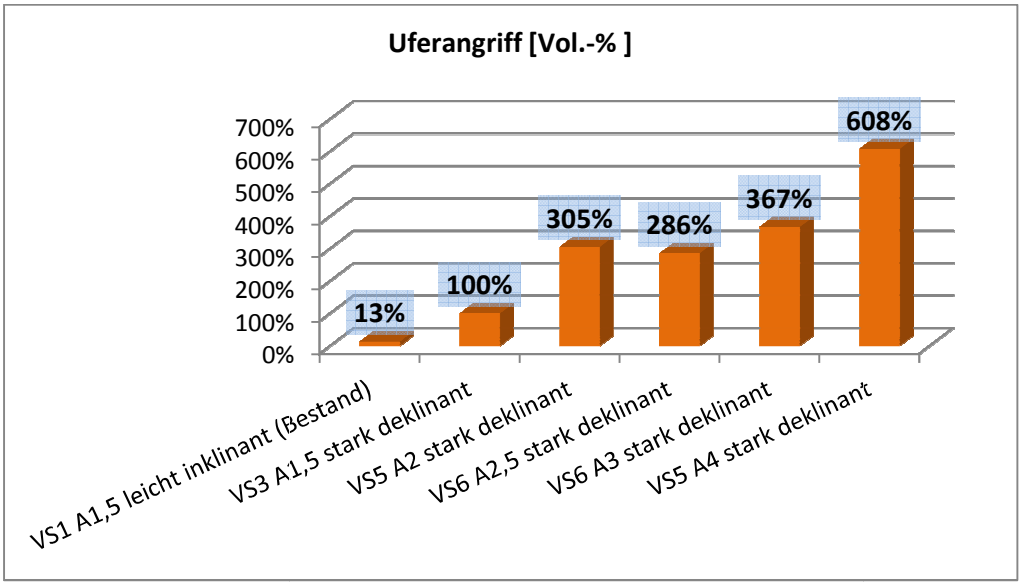


Abbildung 6.43 - Gegenüberstellung Uferangriff - Modellversuchsreihe 2

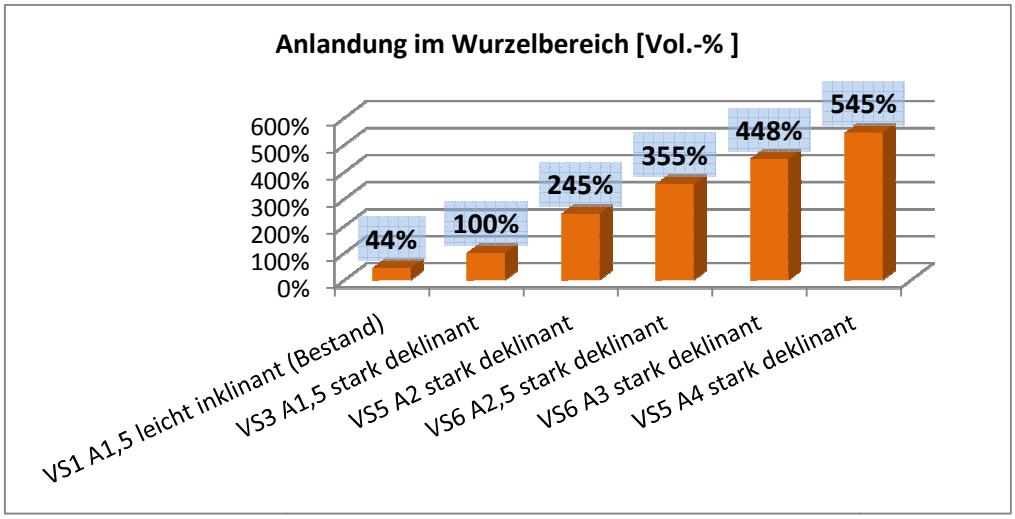


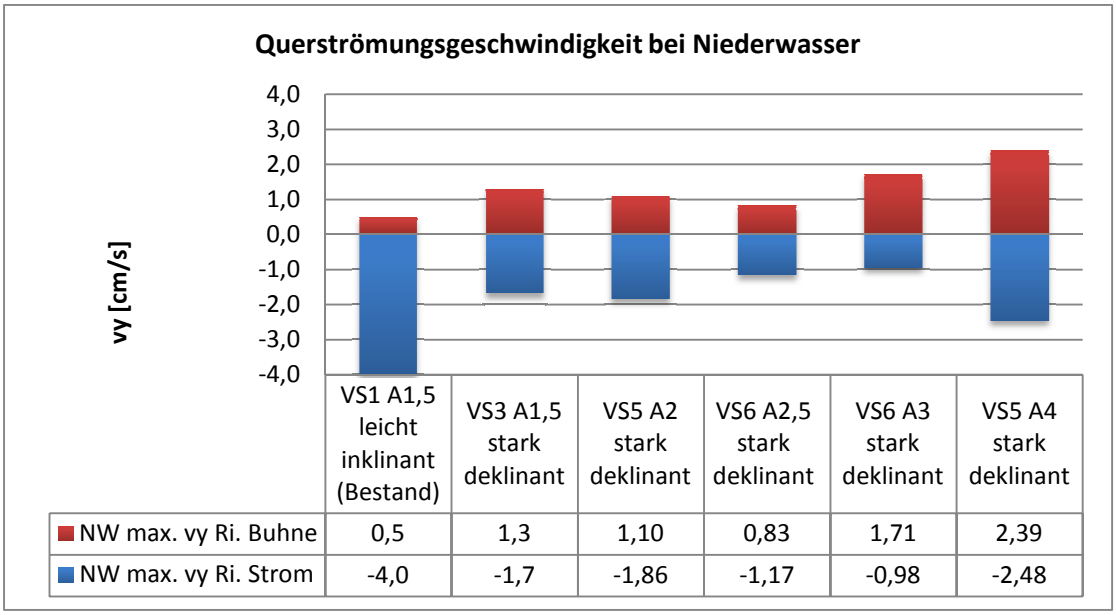
Abbildung 6.44 - Gegenüberstellung der Anlandung im Buhnenfeld - Modellversuchsreihe 2

Zusammenfassend können folgende Aussagen hinsichtlich der Kolkentwicklung und des Angriffs auf das Ufers in Abhängigkeit zum Buhnenabstand gemacht werden:

Der in den Zielen des *FGP* geforderte stärkere Uferangriff (siehe Kapitel 2 und Abschnitt 4.2) wird mit zunehmendem Buhnenabstand immer größer. Auch der Buhnenkopfkolk wird, wenig überraschend, mit zunehmendem Buhnenabstand immer größer. Der Buhnenkopfkolk soll aber möglichst gering sein. Dahingehend stellen im Vergleich zur derzeitigen Situation nur die beiden Buhnenabstände 1,5 und 2 eine Verbesserung dar. Bei größeren Buhnenabständen werden die Buhnenkopfkolke größer als im Referenzmodell mit den derzeit im Projektgebiet eingebauten leicht inklinanten Buhnen und einem Buhnenabstand von 1,5.

<u>Quergeschwindigkeiten entlang der Streichlinie:</u>

In den folgenden Darstellungen der in den Versuchsserien gemessenen 15-Sekunden-Mittelwerte der Quergeschwindigkeiten wurden nur die für die Schifffahrt störenden Geschwindigkeiten entlang der Streichlinie der Buhnenköpfe (siehe Abbildung 4.11, Abschnitt 4.6.2) herangezogen. Aus diesen Messpunkten entlang der Streichlinie wurden die Maximalwerte sowohl in Richtung Buhnenkopf (diese sind für die Schifffahrt problematisch und in den folgenden Abbildungen rot eingezeichnet) als auch die Maximalwerte in Richtung Strommitte, diese sind blau gekennzeichnet, aufgetragen.

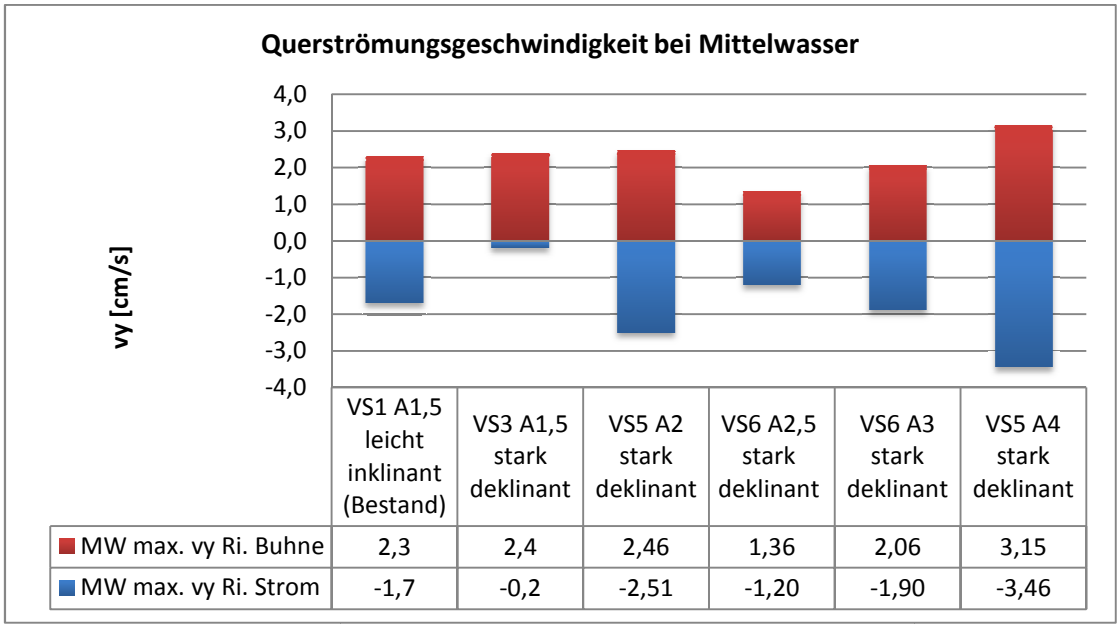


	VS1 A1,5 leicht inklinant (Bestand)	VS3 A1,5 stark deklinant	VS5 A2 stark deklinant	VS6 A2,5 stark deklinant	VS6 A3 stark deklinant	VS5 A4 stark deklinant
NW max. vy Ri. Buhne	0,5	1,3	1,10	0,83	1,71	2,39
NW max. vy Ri. Strom	-4,0	-1,7	-1,86	-1,17	-0,98	-2,48

Abbildung 6.45 - Querströmungsgeschwindigkeit entlang der Streichlinie, NW - Modellversuchsreihe 2

In Abbildung 6.45 ist die Querströmung entlang der Steichlinie für die verschiedenen Buhnenabstände sowie für die Referenzserie der ersten Phase (Niederwasser) ersichtlich. Die gesamte Balkenbreite stellt die Schwankungsbreite der Quergeschwindigkeiten dar, innerhalb derer die Einzelwerte variieren. Die Querströmungen in Richtung Buhnenköpfe (rot) liegen bis zu einem Buhnenabstand von 3 im Bereich der Messungenauigkeit von etwa 1 cm/s. An den Querströmungen Richtung Stromstrich ist erkennbar, dass sämtliche Versuche mit deklinanter Buhnenanordnung, geringere Werte aufweisen, als die Referenzserie mit den derzeit verbauten leicht inklinanten Buhnen. Die Schwankungsbreite der Quergeschwindigkeiten ist erst ab einem Buhnenabstand 4 größer als bei der Referenzserie.

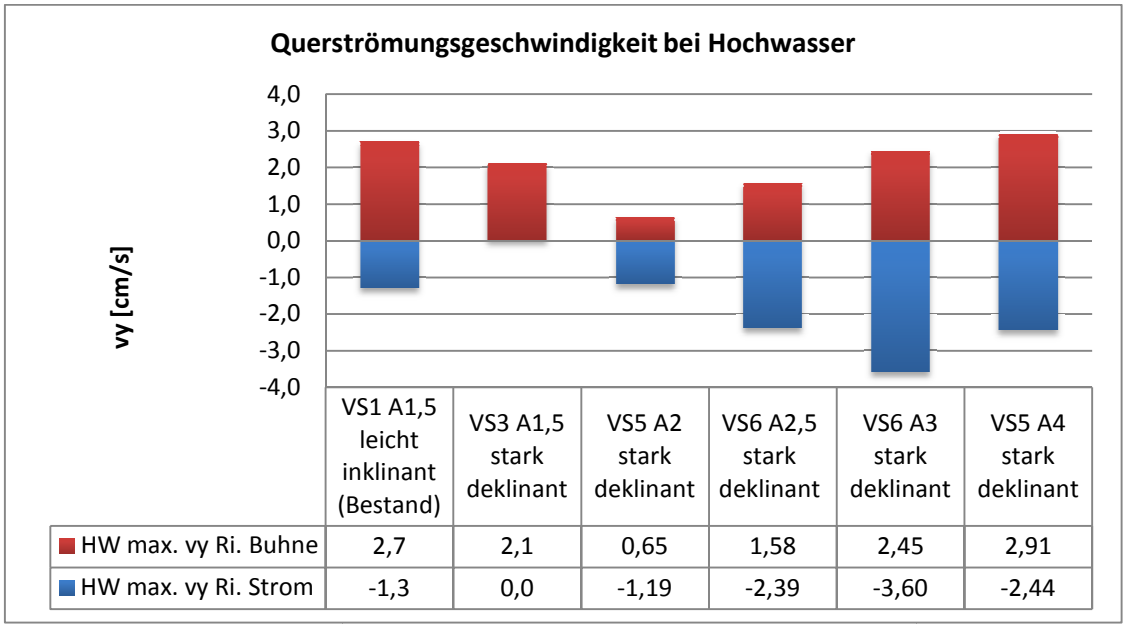
In Abbildung 6.46 sind die Schwankungsbreiten der maximal gemessenen 15-Sekunden-Mittelwerte der Querströmungsgeschwindigkeiten bei Mittelwasser dargestellt. Die Querströmungen Richtung Buhnenköpfe sind bis zu einem Buhnenabstand von 3 in etwa gleich groß oder kleiner als in der Referenzserie. Genauso verhält es sich mit der Querströmung Richtung Stromstrich, hier allerdings mit Ausnahme des Buhnenabstandes 2, der auch bei der Schwankungsbreite größer ist als die Referenzserie.



	VS1 A1,5 leicht inklinant (Bestand)	VS3 A1,5 stark deklinant	VS5 A2 stark deklinant	VS6 A2,5 stark deklinant	VS6 A3 stark deklinant	VS5 A4 stark deklinant
MW max. vy Ri. Buhne	2,3	2,4	2,46	1,36	2,06	3,15
MW max. vy Ri. Strom	-1,7	-0,2	-2,51	-1,20	-1,90	-3,46

Abbildung 6.46 - Querströmungsgeschwindigkeit entlang der Streichlinie, MW - Modellversuchsreihe 2

In Abbildung 6.47 sind schließlich die Schwankungsbreiten der 15-Sekunden-Mittelwerte der Querströmungsgeschwindigkeiten entlang der Streichlinie bei Hochwasser zu sehen. Auch hier ist das Maximum der Querströmung Richtung Buhnenköpfe erst bei einem Buhnenabstand 4 größer als in der Referenzserie. Anders verhält es sich aber bei der Querströmung Richtung Strommitte, hier ist bereits bei einem Buhnenabstand von 2,5 eine Verschlechterung, also eine höhere Maximalgeschwindigkeit, als in der Referenzserie zu erkennen.



	VS1 A1,5 leicht inklinant (Bestand)	VS3 A1,5 stark deklinant	VS5 A2 stark deklinant	VS6 A2,5 stark deklinant	VS6 A3 stark deklinant	VS5 A4 stark deklinant
HW max. vy Ri. Buhne	2,7	2,1	0,65	1,58	2,45	2,91
HW max. vy Ri. Strom	-1,3	0,0	-1,19	-2,39	-3,60	-2,44

Abbildung 6.47 - Querströmungsgeschwindigkeit entlang der Streichlinie, HW - Modellversuchsreihe 2

Zusammenfassend können folgende Aussagen hinsichtlich der Quergeschwindigkeiten entlang der Streichlinie in Abhängigkeit zum Buhnenabstand gemacht werden:

Von einer Verschlechterung der Verhältnisse für die Schifffahrt kann bei diesen Untersuchungen, wenn überhaupt, lediglich bei den großen Buhnenabständen 3 und 4 gesprochen werden. Bei den anderen untersuchten Buhnenabständen kann davon ausgegangen werden, dass die Querströmungen nicht größer werden als sie derzeit im Projektgebiet sind.

Kapitel 7

7 Modellversuchsreihe 3: Variation der Buhnenwurzelausführung

In diesem Kapitel werden die Versuchsserien 7 und 8 beschrieben. In diesem dritten Schritt der Versuche werden noch verschiedene Ausführungen der Buhnenwurzel unter gleichen Bedingungen miteinander verglichen. In der Versuchsserie 7 wird die Buhnenkrone im Bereich des Ufers leicht abgesenkt, sodass eine ökologisch günstig wirkende Verbindung der einzelnen Buhnenfelder entsteht. In der Versuchsserie 8 wird die Buhnenkrone bis auf Sohlniveau abgesenkt. Bei diesen letzten beiden Versuchsserien kommen die im ersten Schritt dieser Vorversuchsreihe ermittelten stark deklinanten Buhnen, und der aus dem zweiten Schritt ermittelte Buhnenabstand 2 zum Einsatz. Ziel dieser weiteren Untersuchung ist es eine optimale Ausführung der Buhnenwurzel im Sinne der Anforderungen des *FGP* zu ermitteln.

7.1 Durchführung der Versuche

7.1.1 Versuchsserie 7 - abgesenkte Buhnenwurzel

Parameter:

Verhältnis Buhnenabstand zu Buhnenlänge (a/b): 2

Buhneneinbauwinkel β : 55° (stark deklinant)

Buhnenwurzelausführung: Buhnenwurzel abgesenkt

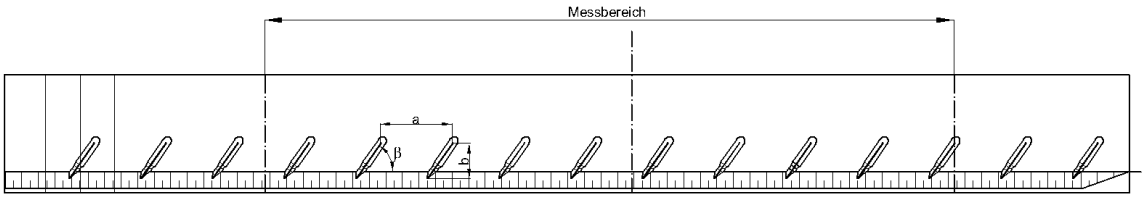


Abbildung 7.1 - Buhnenanordnung Versuchsserie 7

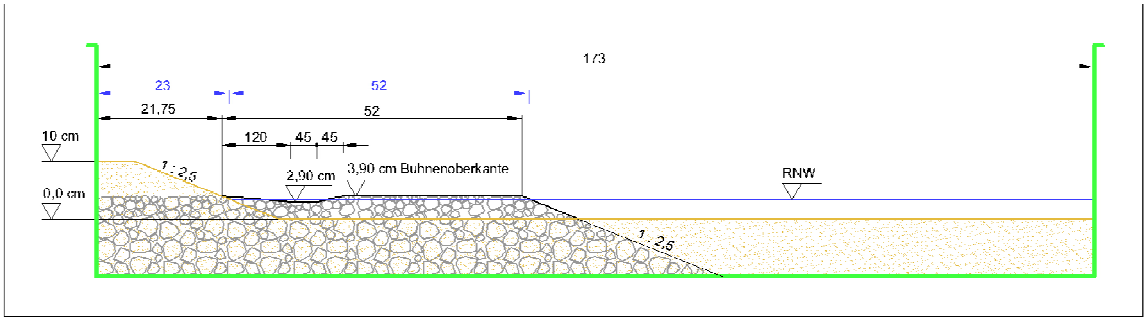


Abbildung 7.2 - Buhnenlängsschnitt für Versuchsserie 7

Der Buhnenlängsschnitt wurde adaptiert, wie in obiger Abbildung ersichtlich ist. Die Buhnenwurzel wurde soweit abgesenkt, dass sie schon bei Niederwasser überströmt wird. Buhnenlänge und Verbauungsgrad wurden nicht verändert. In der folgenden Abbildung sind die eingebaute Buhne und das fertige Modell vor Versuchsstart zu sehen.

Abbildung 7.3 - Buhnengeometrie und gesamtes Modell der Versuchsserie 7 vor dem Versuch

<u>Niederwasser – stark deklinante Buhne, Buhnenabstand 2, Buhnenwurzel abgesenkt:</u>

Auch bei dieser Buhnenform kam es in Phase 1 (Niederwasser mit 7,1 l/s Durchfluss) zu einer Zirkulationsströmung (Abbildung 7.4 rechts). Das Zentrum dieser Drehströmung lag im Vergleich zur Versuchsserie 5 (Buhnenabstand 2) etwas weiter stromabwärts, und befand sich somit nicht mehr im Zentrum des Buhnenfeldes (vgl. Abbildung 6.4, Abschnitt 6.1.1).

Im Bereich der Buhnenwurzel wurde bei dieser adaptierten Buhnenform die Buhnenkrone bereits bei Niederwasser überströmt. Wider Erwarten kam es aber nicht zu einer durchgehend zur Hauptströmung parallel verlaufenden Strömung im Bereich des Ufers. Die Buhnenkrone wurde überströmt, und etwa in der Mitte des Buhnenfeldes traf die Strömung von der oberwasserseitigen Buhne auf die offensichtlich stärkere Rückströmung der

Zirkulationsströmung (Abbildung 7.4, rechts), floss dann mit dieser orthogonal zur Uferböschung Richtung Hauptströmung und wurde im weiteren Verlauf teilweise von der Hauptströmung stromabwärts mitgerissen.

Zwischen der oberwasserseitigen Buhne und dieser orthogonalen Strömung Richtung Hauptstrom entstand eine sekundäre Drehströmung, die sich in die entgegengesetzte Richtung zur primären Drehströmung drehte.

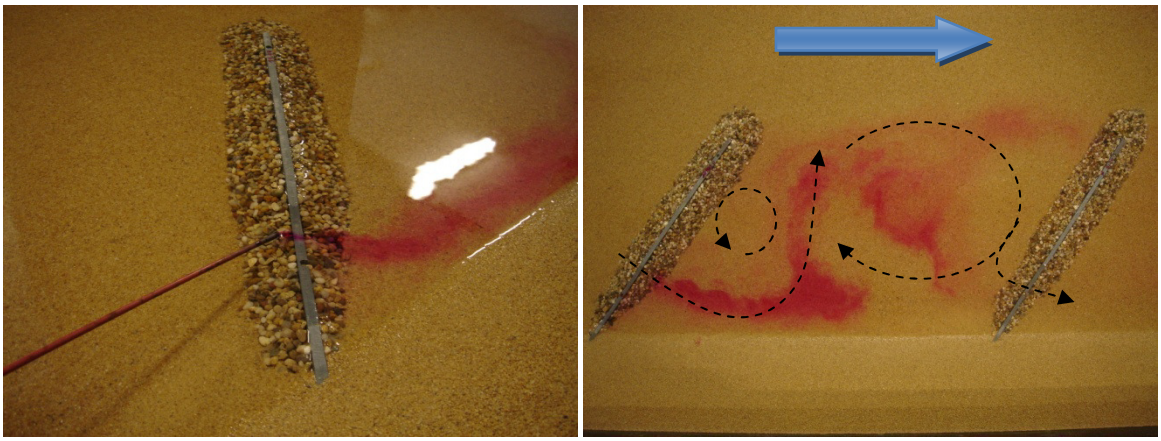


Abbildung 7.4 – VS 7: Strömungen über die Buhnenkrone und im Buhnenfeld (Buhnen nicht überströmt, Buhnenabstand 2, abgesenkte Buhnenwurzel)

Über der Buhnenkrone im abgesenkten Buhnenwurzelbereich verlief die Strömung orthogonal zur Buhnenachse (siehe Abbildung 7.4, linkes Bild).

Mittelwasser – stark deklinante Buhne, Buhnenabstand 2, Buhnenwurzel abgesenkt:

In Phase 2 (Mittelwasser mit 15 l/s Durchfluss) bewegte sich die Strömung im hinteren, abgesenkten Teil der Buhne parallel zum Ufer stromabwärts. An der Sohle, direkt nach dem Überfließen der Buhnenwurzel verlief die Strömung analog zu den vorherigen Serien in Richtung Hauptstrom. Im Buhnenfeld war - wie in der Serie 5 (ebenfalls Buhnenabstand 2) eine Zirkulationsströmung in Ansätzen zu beobachten, die aber von der Strömung über die Buhnenkrone gestört wurde. Die Wirbelablösungen am Buhnenkopf konnten bei diesem Versuch ebenfalls beobachtet werden. Auch ein auftretender Fließwechsel über die Buhnenkrone war in dieser Versuchsanordnung erneut zu beobachten. Allerdings traten die Fließwechsel unabhängig voneinander im vorderen und im hinteren Bereich der Buhnenkrone auf. Im abgesenkten Bereich der Buhnenkrone, dort wo die Absenkung am größten ist, war kein Fließwechsel zu beobachten.

Abbildung 7.5 - VS 7: Fließwechsel über der Buhnenkrone (Buhnen leicht überströmt, Buhnenabstand 2, abgesenkte Buhnenwurzel)

Hochwasser – stark deklinante Buhne, Buhnenabstand 2, Buhnenwurzel abgesenkt:

In der dritten und letzten Phase (Hochwasser mit 28 l/s Durchfluss) war - wie schon in den letzten Serien - keine Zirkulationsströmung im Buhnenfeld zu beobachten. Die Oberflächengeschwindigkeit ist nahe dem Ufer - im Bereich der Buhnenkronenabsenkung - größer als im restlichen Buhnenfeld (Abbildung 7.6a). An der Sohle im Bereich der Buhnenwurzel verlief die Strömung trotz Absenkung der Buhnenwurzel ganz ähnlich wie bei der nicht abgesenkten Buhnenkrone in Richtung Hauptströmung.

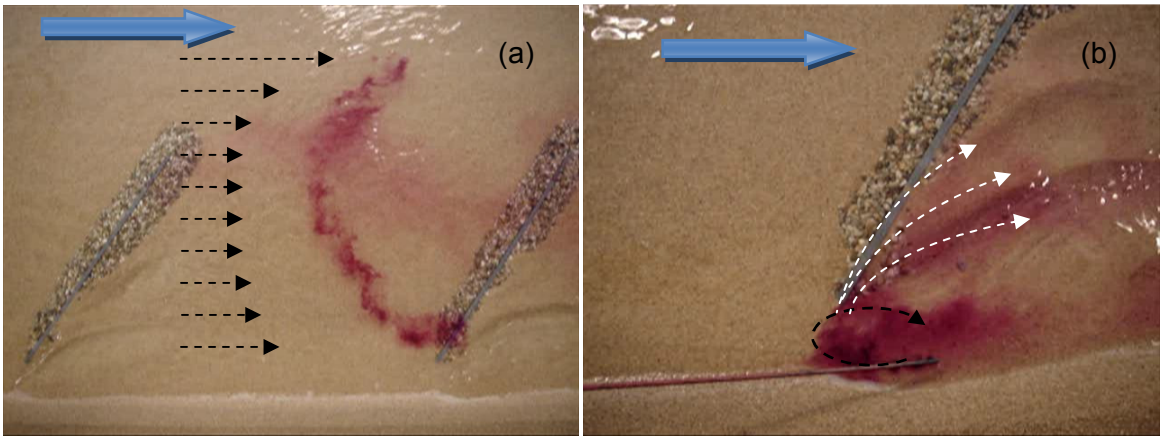


Abbildung 7.6 - VS 7: Strömung im Buhnenfeld (Buhnen stark überströmt, Buhnenabstand 2, abgesenkte Buhnenwurzel)

7.1.2 Versuchsserie 8 - „ohne“ Buhnenwurzel

Parameter:

Verhältnis Buhnenabstand zu Buhnenlänge (a/b): 2

Buhneneinbauwinkel β : 55° (stark deklinant)

Buhnenwurzelausführung: „ohne“ Buhnenwurzel

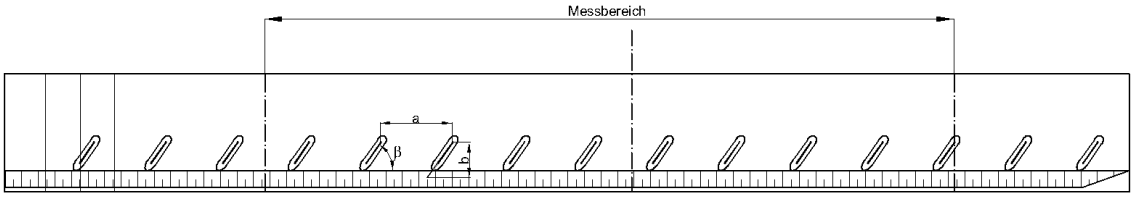


Abbildung 7.7 - Buhnenanordnung Versuchsserie 8

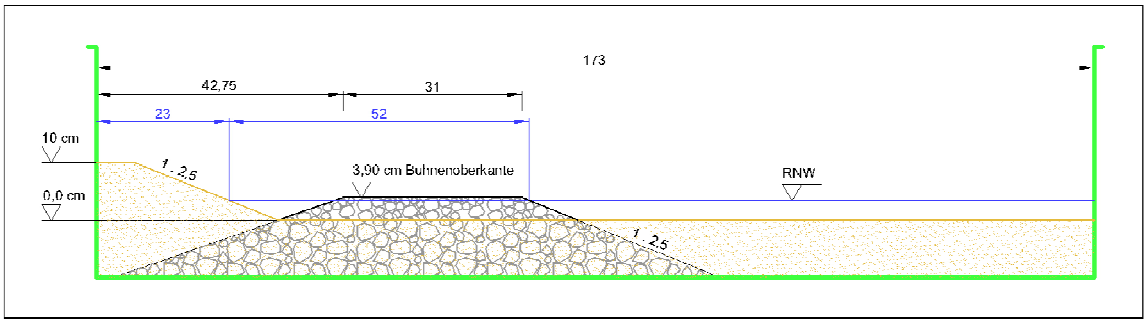


Abbildung 7.8 - Buhnenlängsschnitt für Versuchsserie 8

Abbildung 7.9 – Buhnengeometrie und gesamtes Modell der Versuchsserie 8 vor dem Versuch

Niederwasser – stark deklinante Buhne, Buhnenabstand 2, „ohne“ Buhnenwurzel:

In der ersten Phase (7,1 l/s Durchfluss für die Versuchsdauer von 6 Stunden) war, wie erwartet, zwischen dem hinteren Teil der Buhnen und dem Ufer eine durchgehende Strömung zu beobachten. Im Buhnenfeld waren zeitweise 2 Drehströmungen erkennbar: eine etwas unterhalb der Buhnenfeldmitte und in Ansätzen auch eine zweite direkt hinter der oberwasserseitigen Buhne. Diese Drehströmungen wurden aber immer wieder durch die sich am Buhnenkopf ablösenden Wirbel, die stromab immer größer wurden, gestört. Zudem traten solche Ablösewirbel auch am hinteren Teil der Buhne, am Ufer, auf, wenn auch nicht so stark wie am Buhnenkopf.

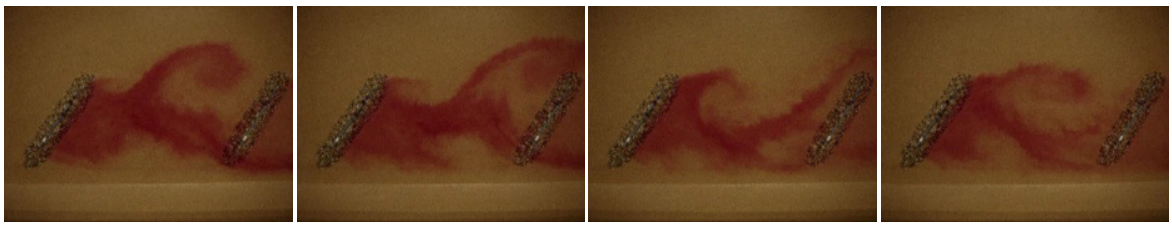


Abbildung 7.10 - VS 8: Strömung im Buhnenfeld (Buhnen nicht überströmt, Buhnenabstand 2, „ohne“ Buhnenwurzel)

Mittelwasser – stark deklinante Buhne, Buhnenabstand 2, „ohne“ Buhnenwurzel

Bei einem Durchfluss von 15 l/s wurden die Buhnenkronen leicht überströmt. Hier konnte kein eindeutiges Strömungsmuster mehr erkannt werden. Ein Ansatz einer Drehströmung wurde immer wieder durch die Strömung über die Buhnenkronen überlagert. Im durchgehenden Durchflussquerschnitt zwischen Ufer und Buhne verlief die Strömung parallel zur Hauptströmung, im Buhnenfeld alternierend Richtung Hauptstrom und Richtung Ufer. Über den Buhnenkronen war auch hier - wie in den anderen Serien bei Mittelwasser - immer wieder ein Übergang vom Strömen zum Schießen zu beobachten.

Hochwasser – stark deklinante Buhne, Buhnenabstand 2, „ohne“ Buhnenwurzel

Bei dieser Buhnenanordnung ist die Längsgeschwindigkeit nahe dem Ufer naturgemäß deutlich größer als im Buhnenfeld. Eine Zirkulationsströmung im Buhnenfeld konnte, wie auch schon bei den anderen Versuchsserien bei Hochwasser, nicht mehr beobachtet werden. Die Interaktionszone entlang der Streichlinie zwischen Hauptstrom und Buhnenfeld war aber wieder deutlich zu erkennen.

7.2 Auswertung der Versuchsserien 7 und 8

7.2.1 Versuchsserie 7 (abgesenkte Buhnenwurzel)

Morphologie:

Niederwasser:

Bei der Belastung des Modells über 6 Stunden mit 7,1 l/s kam es bei der gesamten Sohle praktisch zu keiner Veränderung.

Mittelwasser:

In der zweiten Durchflussstufe kam es über den gesamten Messbereich zu leichten Kolken hinter den Buhnenköpfen. Direkt hinter der Buhnenwurzel konnte ebenfalls sehr gleichmäßig an allen Buhnen ein geringer Angriff des Ufers festgestellt werden.

Hochwasser:

Bei der dritten Belastungsstufe mit 28 l/s kam es zu deutlichen Veränderungen der Modellsohle. An den Buhnenköpfen traten deutliche Kolke auf und dahinter Anlandungen des ausgetragenen Materials. Diese Veränderungen im Buhnenkopfbereich, als auch die Veränderungen im Buhnenwurzelbereich, Abtrag von Sohlmaterial am Ufer, sowie Kolke hinter der Buhnenwurzelabsenkung und die Anlandung des ausgetragenen Materials, traten gleichmäßig über den gesamten Messbereich des Modells auf.

In Abbildung 7.11 ist die morphologische Aufnahme eines Buhnenfeldes der Versuchsserie 7 vor dem Versuchsstart und nach der dritten Belastungsstufe mit Hochwasser zu sehen.

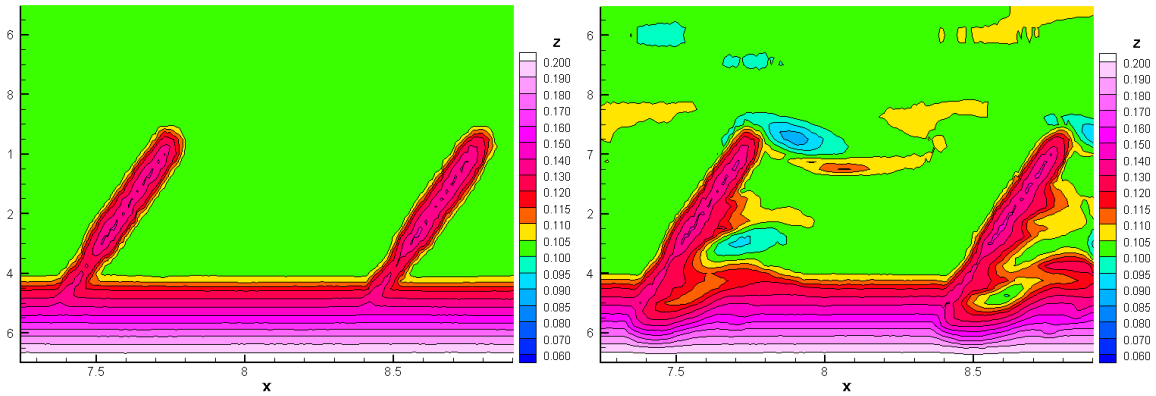


Abbildung 7.11 – VS 7 - Morphologische Aufnahmen der Sohle vor dem Versuch, und nach HW

Abbildung 7.12 – VS 7 - Aufnahme der Sohle nach HW, Buhnenabstand 2, abgesenkte Buhnenwurzel

In der folgenden Abbildung ist wieder die absolute Veränderung der Sohle in einem Buhnenfeld zu sehen. Dazu wurde die Differenz aus der vermessenen Modellsohle nach Hochwasserbelastung und der vermessenen Sohle vor dem Versuch errechnet und anschließend mittels *Tecplot* graphisch dargestellt. Der großflächige Angriff des Ufers hinter der Buhnenwurzel ist hier deutlich zu erkennen.

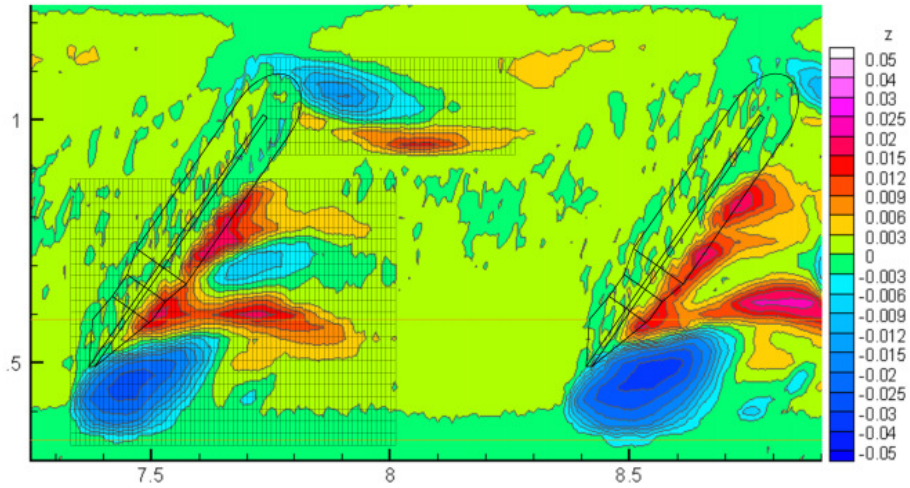


Abbildung 7.13 – VS 7 - Differenz der Sohle nach HW und der Sohle vor dem Versuch

Die in der Abbildung 7.13 dargestellten Veränderungen der Modellsohle sind in nachfolgender Tabelle nach Bereichen getrennt ersichtlich. Trotz abgesenkter Buhnenwurzel sind die Ergebnisse aus der Versuchsserie 7 nahezu ident mit jenen aus VS5; die Buhnenabstände waren in beiden Serien gleich groß. Daher ist das Volumen des Buhnenkopfkolkes ebenfalls kleiner als bei Versuchsserie 1 (Referenzmodell, dunkelgrau hinterlegt). Im Bereich des Ufers sind sowohl der Uferangriff als auch die Anlandung im Buhnenwurzelbereich etwas größer als noch bei Versuchsserie 5 mit demselben Buhnenabstand.

Vergleich der morphologischen Veränderung (nach Versuchsserie 7)							
Versuchsserie	**Buhnenabstand A**	**Einbauwinkel**	**Buhnenwurzel**	**Buhnenkopfkolk**	**Anlandung Buhnenkopf**	**Uferangriff**	**Anlandung im Wurzelbereich**
				[cm³]	[cm³]	[cm³]	[cm³]
1	1,5	leicht inklinant	normal	-209,3	340,0	-37,0	111,3
5	2	stark deklinant	normal	-183,7	134,2	-856,6	619,3
7	2	stark deklinant	abgesenkt	-172,1	123	-938,2	844,7

Tabelle 7.1 - morphologische Veränderung VS7

Geschwindigkeitsprofile

Auch für diese Versuchsserie werden hier nur die Geschwindigkeitsdiagramme bei Niederwasser angeführt. Die Diagramme für Mittelwasser und Hochwasser finden sich wieder im Anhang.

Niederwasser:

Im Stromstrich liegen auch in dieser Versuchsserie die Geschwindigkeiten v_x zwischen 25 und 30 cm/s. Im Buhnenfeld ist die Strömung vom Ufer etwa in der Mitte des Buhnenfeldes (dort wo die Strömung über die abgesenkte Buhnenwurzel und die Drehströmung von der unterwasserseitigen Buhne aufeinandertreffen) Richtung Stromstrich gut zu erkennen (Messreihe 2, v_y erreicht hier einen Wert von mehr als -3 cm/s in Richtung Stromstrich). Es bildet sich eine primäre Drehströmung im unteren Bereich des Buhnenfeldes etwa zwischen Messreihe 2 und Messreihe 3 sowie eine sekundäre Drehströmung (mit umgekehrter Drehrichtung) zwischen Messreihe 1 und Messreihe 2 (siehe auch Abbildung 7.4).

Im Bereich der Streichlinie liegt der 15-Sekunden-Mittelwert der Querströmung zwischen v_y = -1,97 cm/s (Richtung Stromstrich) und v_y = 1,36 cm/s (Richtung Buhnenfeld).

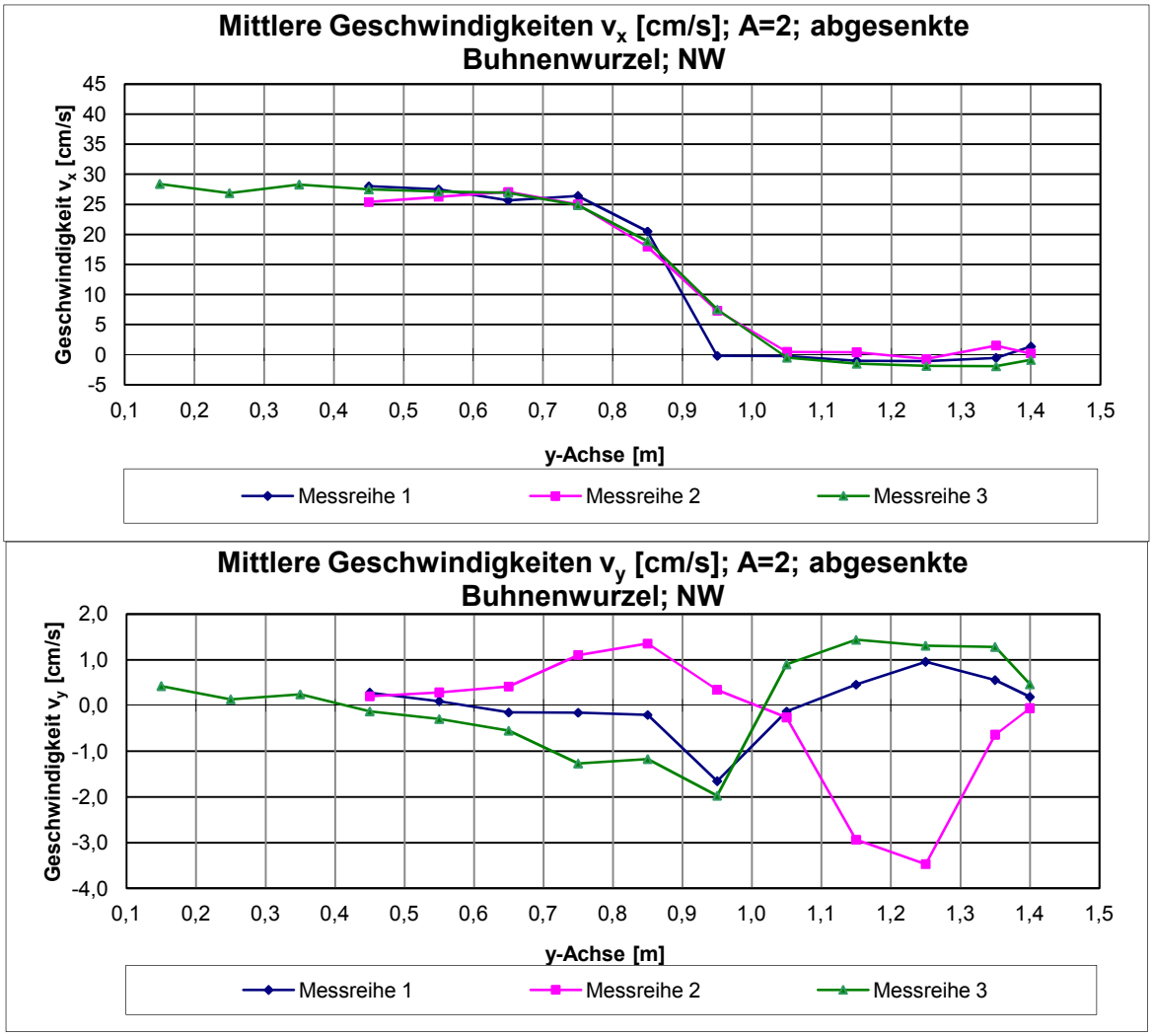


Abbildung 7.14 - VS7 - Geschwindigkeitsprofile - Buhnenabstand 2 – abgesenkte Buhnenwurzel NW

Mittelwasser:

Auch in dieser Serie verläuft bei leicht überströmten Buhnen die Strömung orthogonal über die Buhnenkronen (Abbildung 10.20 im Anhang, Messreihe 1 und Messreihe 3). Hier wird auch die im Vergleich zum Buhnenfeld höhere Geschwindigkeit v_x direkt am Ufer über die abgesenkte Buhnenkrone ersichtlich.

Im Bereich der Streichlinie liegt der 15-Sekunden-Mittelwert der Querströmung zwischen v_y = -1,57 cm/s (Richtung Stromstrich) und v_y = 1,44 cm/s (Richtung Buhnenfeld).

Hochwasser:

In der dritten Phase mit einem Durchfluss von 28 l/s ist die Geschwindigkeit vx in der Hauptströmung wieder zwischen 40 und 45 cm/s. Innerhalb des Buhnenfeldes ist die Beschleunigung der Strömung über der Buhnenkrone (Messreihe 1 befindet sich direkt

dahinter) und das darauffolgende Abfallen der Geschwindigkeit zu sehen. Auch hier ist die höhere Geschwindigkeit v_x über dem abgesenkten Teil der Buhnenkrone ersichtlich.

Im Bereich der Streichlinie liegt der 15-Sekunden-Mittelwert der Querströmung zwischen v_y = -1,52 cm/s (Richtung Stromstrich) und v_y = 1,25 cm/s (Richtung Buhnenfeld).

In Abbildung 10.22 im Anhang sind die Geschwindigkeiten bei Hochwasser knapp über der Gewässersohle zu sehen. Hier ist die Strömung direkt hinter der Buhne Richtung Hauptstrom ersichtlich (vgl. Abbildung 7.6).

7.2.2 Versuchsserie 8 („ohne“ Buhnenwurzel)

Morphologie:

Niederwasser:

Bei der Belastung des Modells über 6 Stunden mit 7,1 l/s kam es auch bei dieser Versuchserie an der gesamten Sohle zu praktisch keiner Veränderung.

Mittelwasser:

In der zweiten Durchflussstufe kam es über den gesamten Messbereich zu leichten Kolken hinter den Buhnenköpfen und auch bei der entfernten Buhnenwurzel. Bei dieser Versuchsserie wurde im Bereich des Ufers die Buhnenkrone bis auf Sohlniveau abgeböscht, daher wird dieser Teil der Buhne durch das fließende Wasser auch wie ein Buhnenkopf belastet. Im Stromstrich konnte eine leichte Kornbewegung beobachtet werden.

Hochwasser:

In der dritten Durchflussstufe mit 28 l/s erfolgte - wie bei allen bisherigen Versuchsserien - eine deutliche Veränderung der Modellsohle. Am Buhnenkopf traten die üblichen Buhnenkopfkolke auf, und dahinter kam es zur Anlandungen des ausgetragenen Materials.

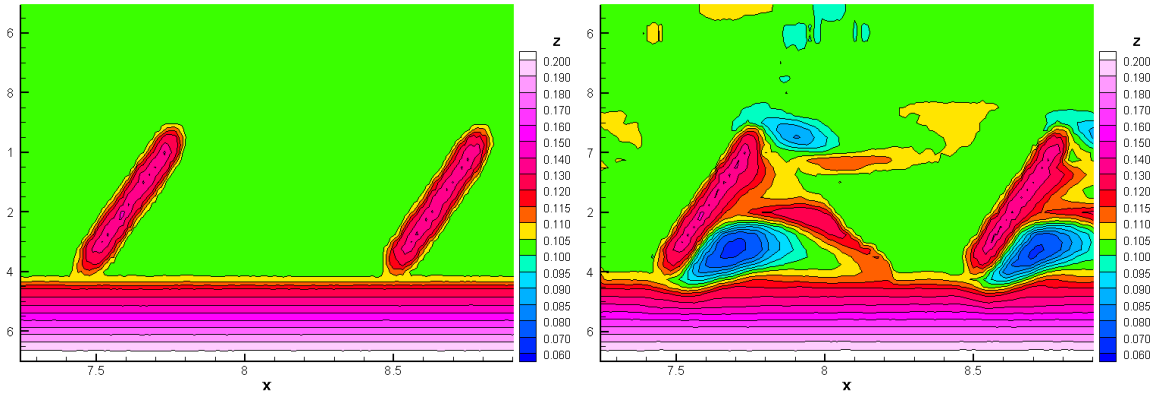


Abbildung 7.15 – VS 8 - Morphologische Aufnahmen der Sohle vor dem Versuch, und nach HW

Da in dieser Versuchsanordnung die Buhnenkrone nicht bis ans Ufer reichte, sondern davor abgeböscht wurde, blieb die Uferböschung nahezu vollständig erhalten. Der Uferangriff war bei weitem nicht so stark wie in den anderen Versuchsserien.

Die stärkste Veränderung der Sohle trat im Buhnenfeld direkt hinter der uferseitigen Böschung (der entfernten Buhnenwurzel) auf (siehe Abbildung 7.15 und Abbildung 7.16). Hinter diesem Kolk folgte wieder direkt die Anlandung des ausgetragenen Sohlsubstrats.

Abbildung 7.16 – VS 8 - Aufnahme der Modellsohle nach HW

Die folgende Abbildung zeigt abermals die Differenz zwischen der Sohle vor dem Versuchsstart und der Modellsohle nach der Belastung. Auch in dieser Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass das Ufer eigentlich kaum angegriffen wurde, und die stärkste Veränderung der Modellsohle im Buhnenfeld direkt hinter der abgeböschten Buhnenwurzel stattgefunden hat.

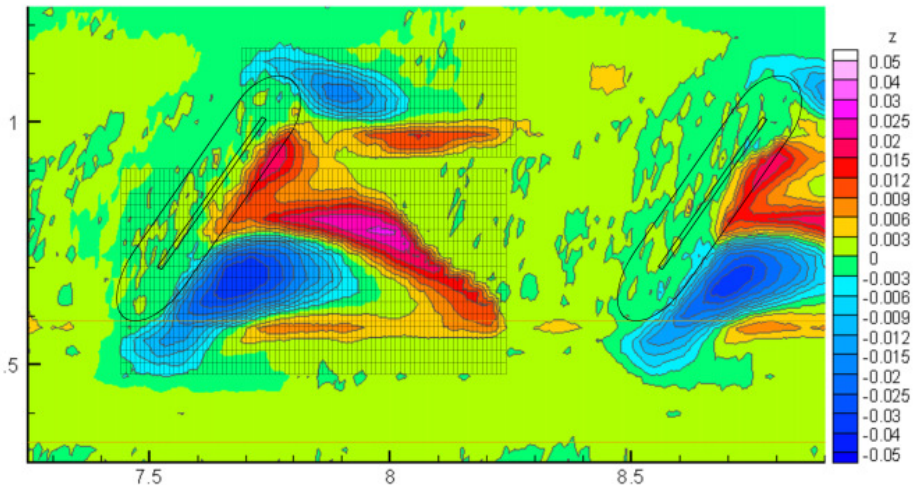


Abbildung 7.17 – VS 8 - Differenz der Sohle nach HW und der Sohle vor dem Versuch

Aus Tabelle 7.2 sind die berechneten morphologischen Veränderungen ersichtlich. Wieder sind in der dunkelgrau hinterlegten Zeile die Referenzserie 1, und in der hellgrau hinterlegten Zeile in dieser Tabelle die Versuchsserie 5 mit angeführt.

Vergleich der morphologischen Veränderung (nach Versuchsserie 8)							
Versuchs serie	**Buhnen abstand A**	**Einbauwinkel**	**Buhnen wurzel**	**Buhnen kopfkolk**	**Anlandung Buhnenkopf**	**Ufer angriff**	**Anlandung im Wurzel bereich**
				[cm³]	[cm³]	[cm³]	[cm³]
1	1,5	leicht inklinant	normal	-209,3	340,0	-37,0	111,3
5	2	stark deklinant	normal	-183,7	134,2	-856,6	619,3
8	2	stark deklinant	"ohne"	-208,9	136,0	-1004,5	955,1

Tabelle 7.2 - morphologische Veränderung VS8

Im Bereich des Buhnenkopfes sind die Werte für den Kolk und die Anlandung mit denen aus Versuchsserie 5 vergleichbar. Der Kolk ist etwas größer als bei der normal ausgeführten Buhnenwurzel, aber nahezu gleich groß wie in Versuchsserie 1.

Für die Berechnung der Volumina des Uferangriffs (negative Werte) und der Anlandung im Wurzelbereich (positive Werte) wurde wie in allen Versuchsserien die in Abbildung 7.17 mit einem Gitter markierte Fläche im Uferbereich des Buhnenfeldes herangezogen. Aus den errechneten Werten allein ist nicht ersichtlich, wo genau die Veränderung der Sohle innerhalb dieses Gebietes stattgefunden hat. Die exakte Positionierung kann nur mithilfe der Abbildung 7.17 erfolgen. Es kann abgelesen werden, dass der Uferangriff eigentlich sehr

gering ist, und die größte Veränderung im Bereich der Sohle innerhalb des Buhnenfeldes direkt hinter der Böschung der entfernten Buhnenwurzel stattgefunden hat. Der in Tabelle 7.2 rot markierte Wert des Uferangriffs ist zwar korrekt berechnet, er spiegelt jedoch nicht den tatsächlichen Uferangriff wider, sondern den Angriff auf den gesamten durch das Gitter in Abbildung 7.17 markierten Bereich. Im Gegensatz zu allen bisherigen Versuchsserien entstand bei der Versuchsserie 8 durch die Entfernung der Buhnenwurzel ein „zweiter Buhnenkopf“ nahe dem Ufer. Durch die Strömung stromab dieses „zweiten Buhnenkopfes“ an der Sohle Richtung Stromstrich kam es zu einer starken Auskolkung in diesem Bereich des Buhnenfeldes. Die Uferböschung blieb dabei nahezu komplett erhalten (siehe Abbildung 7.16).

Geschwindigkeitsprofile:

Niederwasser:

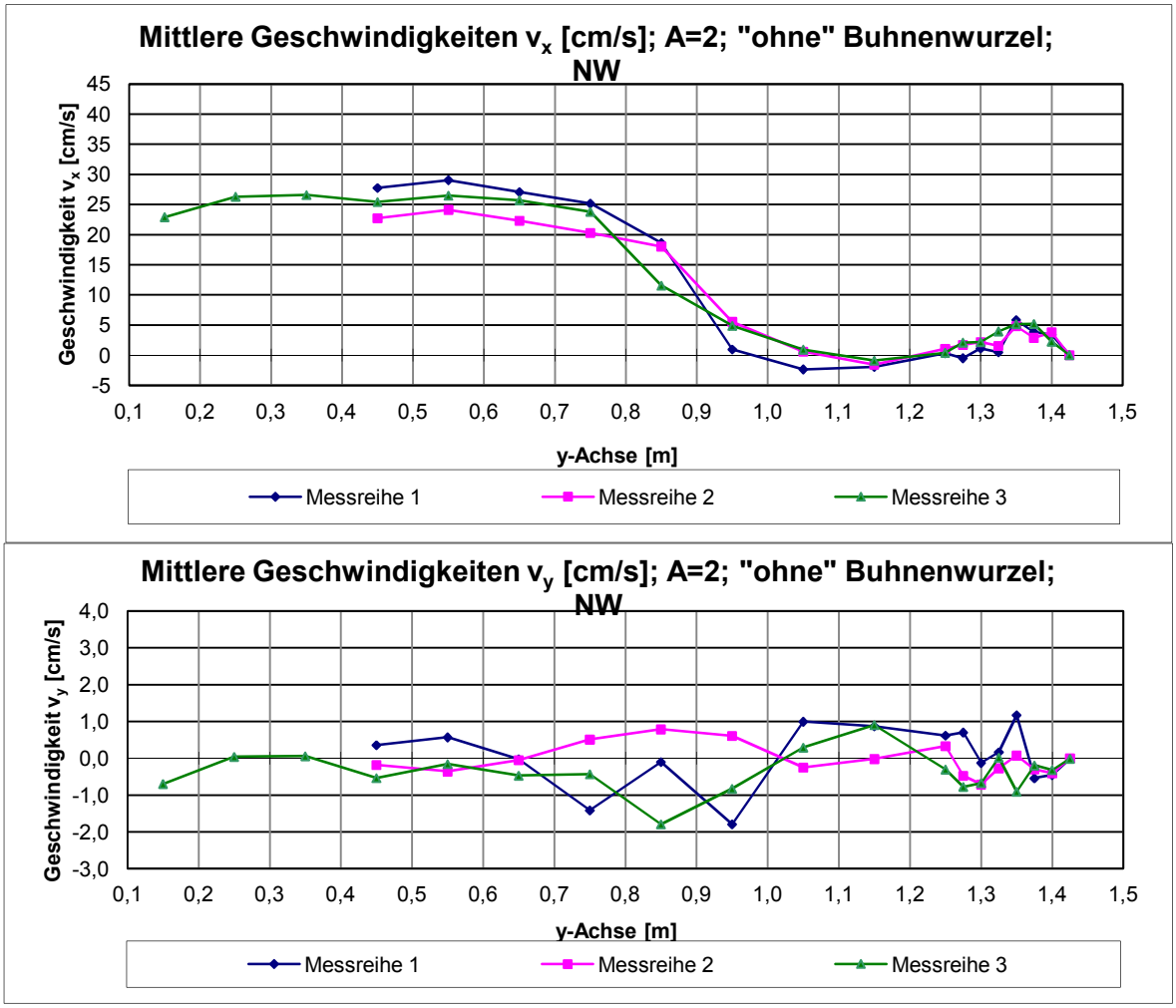


Abbildung 7.18 - VS8 – Geschwindigkeitsprofile, Buhnenabstand 2 – „ohne“ Buhnenwurzel – NW

Im Hauptstrom liegt die Geschwindigkeit v_x auch in dieser Versuchsserie wieder im Bereich von 25 cm/s. Im Buhnenfeld sinkt sie bis auf 0 cm/s, wird zum Teil sogar negativ, und im Uferbereich steigt v_x wieder bis auf etwa 5 cm/s an (Abbildung 7.18). Auch aus diesen Geschwindigkeitsdiagrammen ist keine Drehströmung mehr erkennbar (vgl. Abbildung 7.10).

Im Bereich der Streichlinie liegt der 15-Sekunden-Mittelwert der Querströmung zwischen v_y = -1,79 cm/s (Richtung Stromstrich) und v_y = 0,79 cm/s (Richtung Buhnenfeld).

Mittelwasser:

Die Diagramme der gemessenen Geschwindigkeiten bei der zweiten Durchflussstufe sind im Anhang in Abbildung 10.25 ersichtlich. Im Stromstrich erreichen die Geschwindigkeiten v_x einen Wert von etwa 25 cm/s, fallen dann im Buhnenfeld auf etwa 5 cm/s stark ab, und erreichen im ufernahen Bereich, dort wo die Buhnenwurzel entfernt wurde, wieder Werte von etwa 15 bis 20 cm/s. Die Quergeschwindigkeiten sind über die Buhnenkronen erneut orthogonal gegen das Ufer gerichtet, direkt am Ufer aber bewegen sich die Werte im Bereich der Messungenauigkeit bei etwa 1 cm/s, sind also sehr gering.

Im Bereich der Streichlinie liegt der 15-Sekunden-Mittelwert der Querströmung zwischen v_y = -2,20 cm/s (Richtung Stromstrich) und v_y = 1,33cm/s (Richtung Buhnenfeld).

Hochwasser:

In der dritten Durchflussstufe gilt ähnliches wie bei Mittelwasser (siehe Anhang, Abbildung 10.26), nur dass die Geschwindigkeiten v_x naturgemäß höher sind.

Im Bereich der Streichlinie liegt der 15-Sekunden-Mittelwert der Querströmung zwischen v_y = -2,01 cm/s (Richtung Stromstrich) und v_y = 1,90 cm/s (Richtung Buhnenfeld).

Bei der Messung der Geschwindigkeiten knapp über der Modellsohle fällt wieder die Strömung bei Messreihe 1, direkt hinter der Buhne im Bereich des Ufers, Richtung Stromstrich auf (Anhang, Abbildung 10.27).

7.2.3 Gegenüberstellung der verschiedenen Buhnenwurzelausführungen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der morphologischen Veränderungen und der Geschwindigkeitsmessungen der Versuchsserien 7 und 8, also der verschiedenen Buhnenwurzelausführungen, einander qualitativ gegenübergestellt. In der prozentuellen Betrachtung der morphologischen Veränderungen bilden die Werte aus der Versuchsserie 5 mit einem Buhnenabstand 2 und einer normal ausgeführten, nicht abgesenkten Buhnenwurzel die Basis (100%). Als Vergleichswerte sind die Werte des Referenzmodells, also der Versuchsserie 1 mit den derzeit im Projektgebiet eingebauten leicht inklinanten Buhnen und einem Abstand von 1,5 wieder mit angeführt.

Buhnenkopfkolk und Anlandung im Buhnenkopfbereich:

Serie	Buhnen abstand	Einbauwinkel	Buhnen wurzel	Buhnen kopfkolk		Anlandung Buhnenkopf	
				[cm³]	[Vol-%]	[cm³]	[Vol-%]
1	1,5	leicht inklinant	normal	-209,3	114	340,0	253
5	2	stark deklinant	normal	-183,7	100,0	134,2	100,0
7	2	stark deklinant	abgesenkt	-172,08	94	122,99	92
8	2	stark deklinant	ohne	-208,90	114	135,95	101

Tabelle 7.3 - morphologische Sohlveränderungen im Buhnenkopfbereich der Modellversuchsreihe 3

In Tabelle 7.3 sind die absoluten Werte der morphologischen Veränderung im Buhnenkopfbereich für diese vier Versuchsserien dargestellt. Hieraus geht hervor, dass der Buhnenkopfkolk bei Versuchsserie 7 mit der abgesenkten Buhnenwurzel am geringsten ist. Allerdings sind die Unterschiede sehr gering, was auch in Abbildung 7.19 gut erkennbar ist. Die absolute Größe der Anlandungen hinter dem Buhnenkopfkolk ist in den Versuchsserien 5, 7 und 8, also bei den stark deklinanten Buhnen mit demselben Abstand 2 fast identisch.

Da alle Versuchsserien mit dem Buhnenabstand 2 und deklinanter Buhnenanordnung verglichen mit der derzeit im Projektgebiet eingebauten Buhnenanordnung (leicht inklinante Buhne mit einem Abstand von 1,5) einen geringeren Buhnenkopfkolk aufweisen, erfüllen sie die Auswahlkriterien des *FGP*.

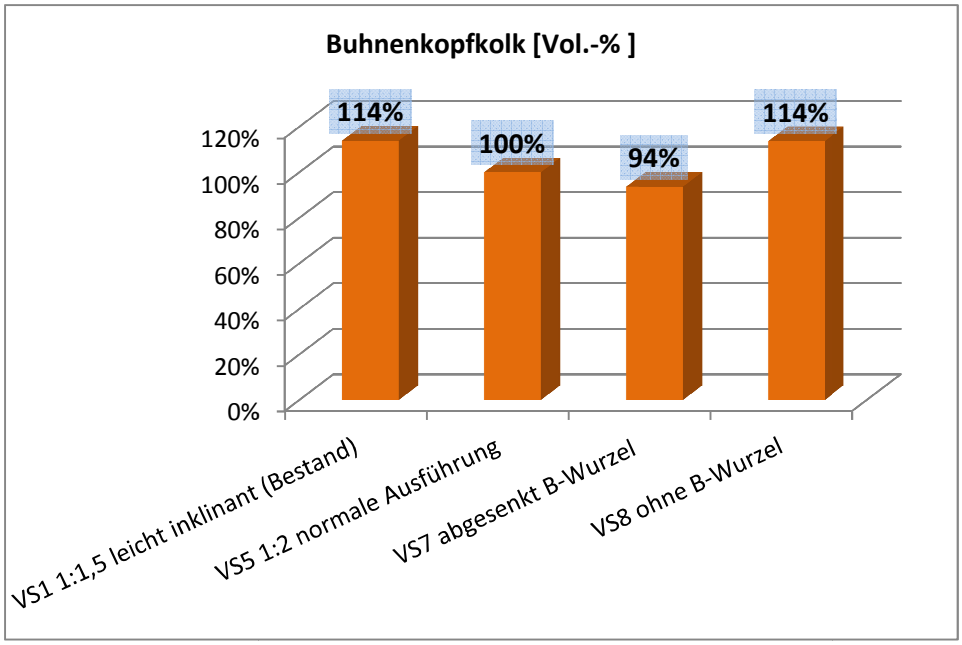


Abbildung 7.19 - Gegenüberstellung Buhnenkopfkolk – Modellversuchsreihe 3

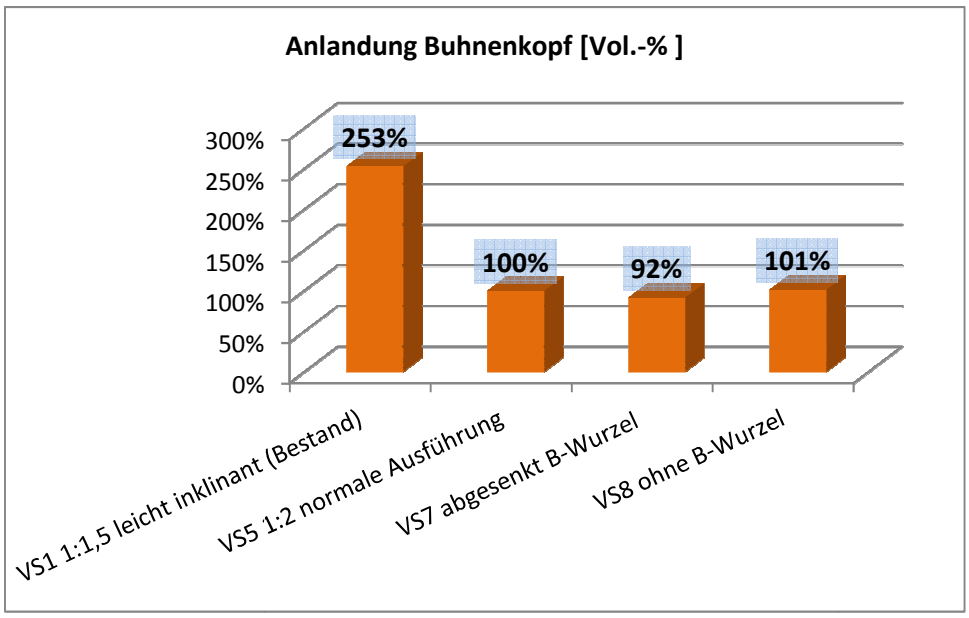


Abbildung 7.20 - Gegenüberstellung Anlandung im Buhnenkopfbereich – Modellversuchsreihe 3

Uferangriff und Anlandungen im Buhnenwurzelbereich des Buhnenfeldes:

In Tabelle 7.4 sind die morphologischen Veränderungen der Modellsohle im Buhnenwurzelbereich dieser vier Versuchsserien angeführt. Auch hier ist zu erkennen, dass in allen drei Versuchsserien mit den stark deklinanten Buhnen und mit einem Buhnenabstand 2 der absolute Betrag des ausgetragenen Sohlmaterials in etwa gleich groß ist. Ein wesentlicher Unterschied dieser drei Versuchsserien ist aus Tabelle 7.4 und Abbildung 7.22 aber nicht ersichtlich.

Serie	Buhnen abstand	Einbauwinkel	Buhnen wurzel	Uferangriff		Anlandung Wurzelbereich	
				[cm³]	[Vol-%]	[cm³]	[Vol-%]
1	1,5	leicht inklinant	normal	-37,0	4	111,3	18
5	2	stark deklinant	normal	-856,6	100	619,3	100
7	2	stark deklinant	abgesenkt	-938,19	110	844,69	136
8	2	stark deklinant	ohne	-1004,49	117	955,12	154

Tabelle 7.4 - morphologische Sohlveränderungen im Buhnenfeld der Modellversuchsreihe 3

Vergleicht man die morphologischen Sohlaufnahmen (Abbildung 6.24, Abbildung 7.11 und Abbildung 7.15) bzw. die Differenzberechnung der Sohle nach Hochwasser und der Sohle vor Versuchsstart (Abbildung 6.26, Abbildung 7.13 und Abbildung 7.17) so werden die Unterschiede deutlich. Während bei der normalen und bei der leicht abgesenkten Buhnenwurzel der Uferangriff tatsächlich an der Uferböschung stattfindet (Abbildung 7.21 a bzw. b), ist dies bei der Versuchsserie ohne Buhnenwurzel, nicht der Fall. Hier bleibt die Uferböschung nahezu durchgehend intakt (Abbildung 7.21 c). Der Angriff erfolgt hier nicht auf die Uferböschung, sondern auf die Modellsohle im Buhnenfeld direkt stromab der uferseitigen Buhnenböschung.

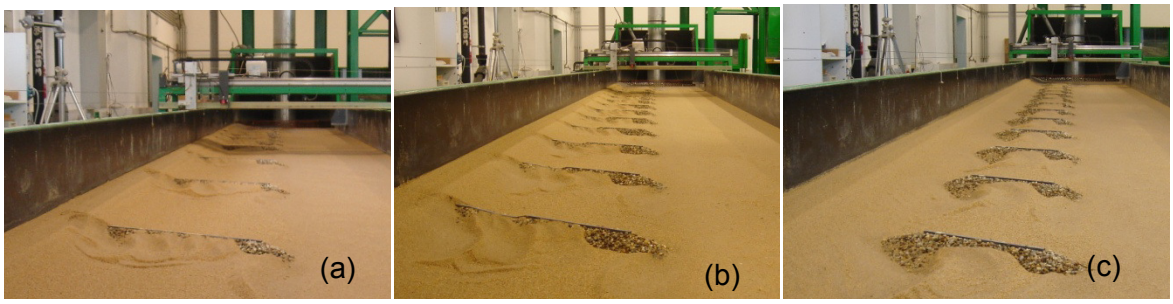


Abbildung 7.21 - Vergleich des Uferangriffs der Modellversuchsreihe 3

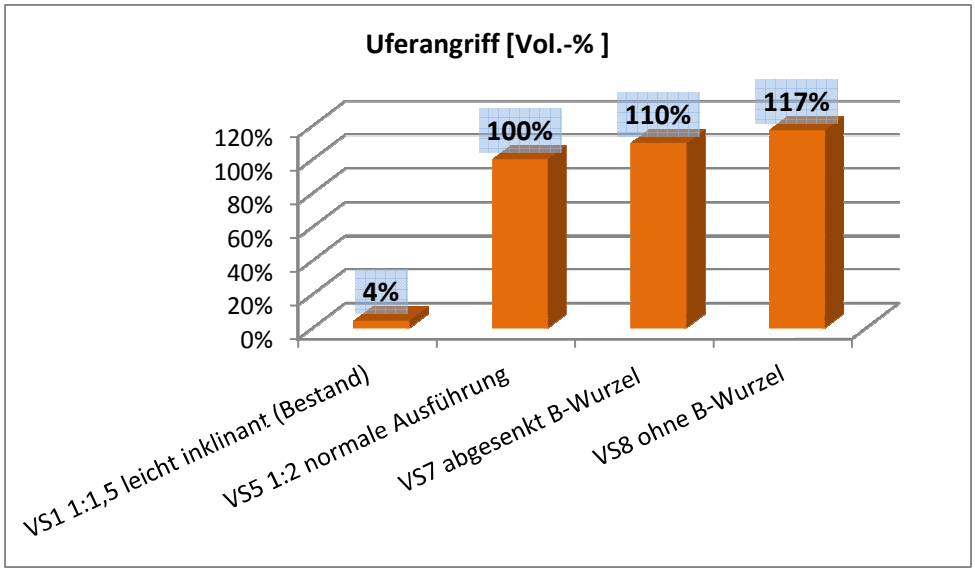


Abbildung 7.22 - Gegenüberstellung Uferangriff – Modellversuchsreihe 3

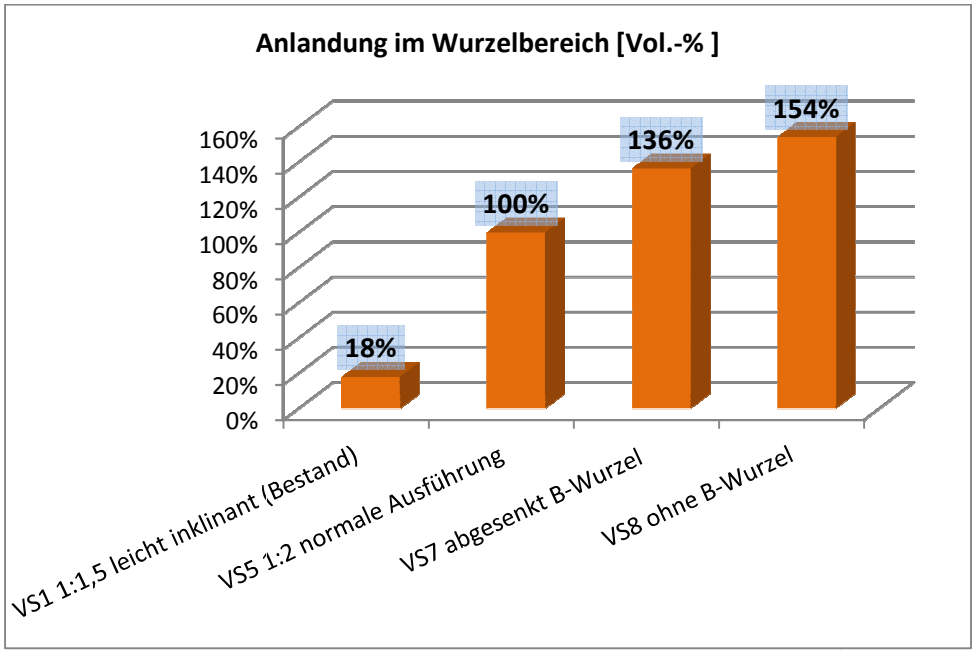


Abbildung 7.23 - Gegenüberstellung Anlandung im Buhnenfeld – Modellversuchsreihe 3

Zusammenfassend können folgende Aussagen hinsichtlich der Kolkentwicklung und des Angriffs auf das Ufers in Abhängigkeit zur Buhnenwurzelausführung gemacht werden:

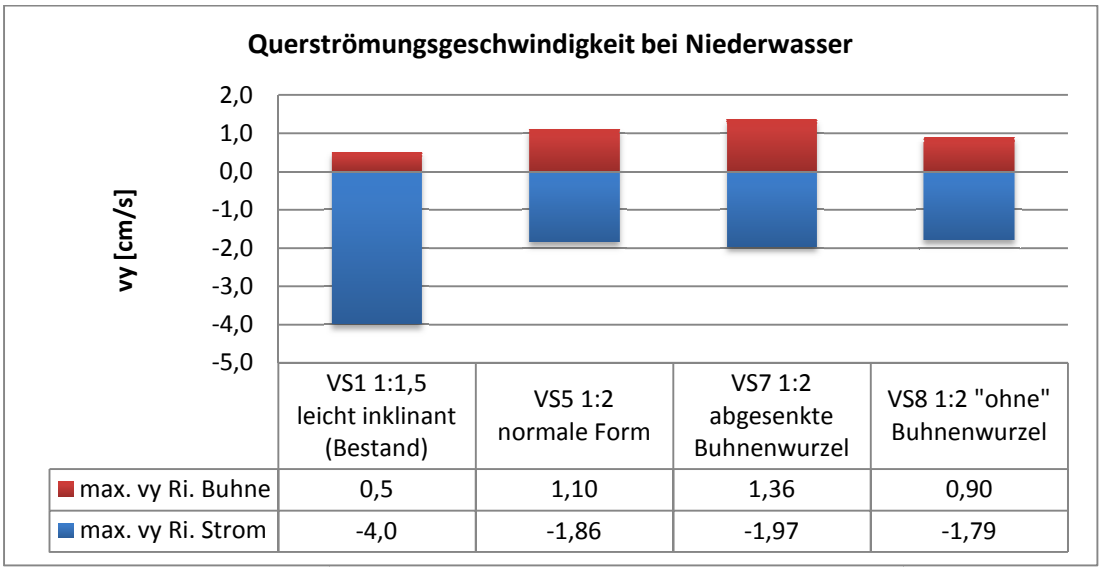
In den Zielen des *FGP* wird unter anderem ein möglichst geringer Buhnenkopfkolk angegeben. Diese Anforderung wird von allen drei hier besprochenen Versuchsserien erfüllt. Ein solches Ergebnis war wenig überraschend, da in allen drei Versuchsserien die selben Buhnengeometrien und Buhnenabstände verbaut wurden. Die Modelle unterscheiden sich nur durch die Ausführung der Buhnenwurzel. Dass es in den morphologischen

Veränderungen im Bereich des Buhnenkopfes nur sehr geringe Unterschiede gibt zeigt vielmehr, dass die Versuche stabile, reproduzierbare Ergebnisse geliefert haben.

Unterschiede in den verschiedenen Modellen gibt es erwartungsgemäß bei der morphologischen Veränderung im Bereich des Ufers. Wie bereits zuvor beschrieben, sind auch die Werte beim Uferangriff recht ähnlich, unterscheiden sich jedoch erheblich durch den Ort ihres Auftretens. Die Forderung nach einem möglichst großen Uferangriff, erfüllen demnach nur die Versuchsserie 5 (stark deklinante Buhnenanordnung, Buhnenabstand 2, normal ausgeführte, bis ins Ufer eingebundene Buhnenkrone) und die Versuchsserie 7 mit der leicht abgesenkten Buhnenwurzel. Die Versuchsserie 8 mit der bis auf Sohlniveau abgeböschten Buhnenwurzel erfüllt diese Forderung nicht.

Quergeschwindigkeiten entlang der Streichlinie:

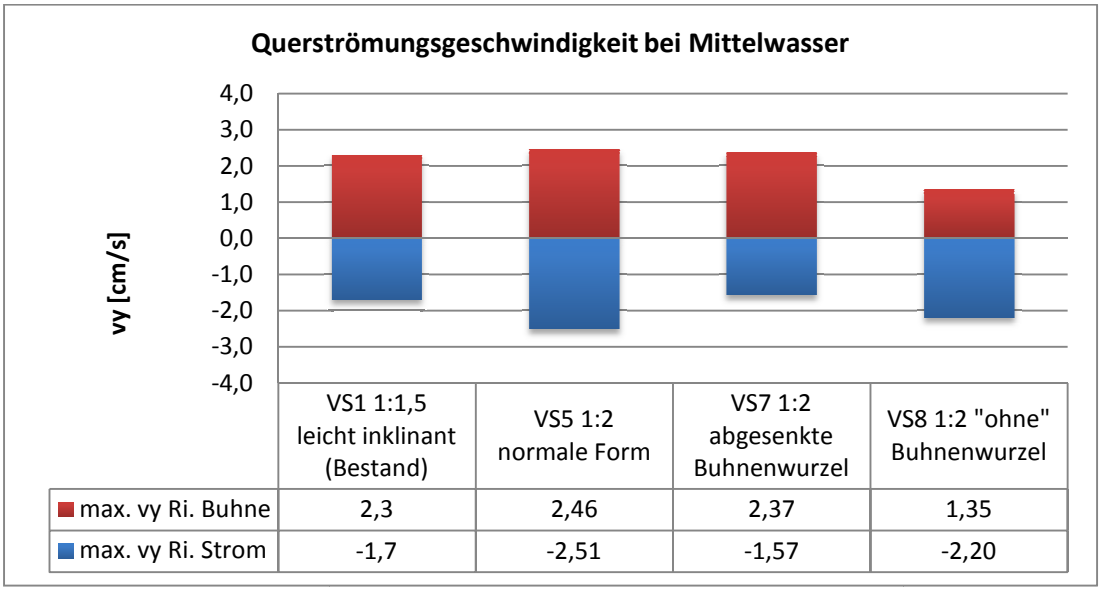
In den folgenden Darstellungen der in den Versuchsserien gemessenen 15-Sekunden-Mittelwerte der Quergeschwindigkeiten wurden wieder die für die Schifffahrt störenden Geschwindigkeiten entlang der Streichlinie der Buhnenköpfe herangezogen. Aus diesen Messpunkten entlang der Streichlinie wurden die Maximalwerte sowohl in Richtung Buhnenkopf (in den folgenden Abbildungen rot eingezeichnet) als auch die Maximalwerte in Richtung Strommitte (diese sind blau gekennzeichnet) aufgetragen. Die Balkenlänge in den folgenden Diagrammen stellt also die Schwankungsbreite dar, innerhalb derer die Einzelmesswerte variieren.



	VS1 1:1,5 leicht inklinant (Bestand)	VS5 1:2 normale Form	VS7 1:2 abgesenkte Buhnenwurzel	VS8 1:2 "ohne" Buhnenwurzel
max. vy Ri. Buhne	0,5	1,10	1,36	0,90
max. vy Ri. Strom	-4,0	-1,86	-1,97	-1,79

Abbildung 7.24 - Querströmungsgeschwindigkeit entlang der Streichlinie, NW - Modellversuchsreihe 3

Bei Niederwasser liegen die Messwerte Richtung Buhnenkopf im Bereich der Messungenauigkeit. Richtung Stromstrich sind die Werte bei allen drei untersuchten Buhnenwurzelausführungen geringer als in der Referenzserie. Auch die Schwankungsbreite der Quergeschwindigkeiten ist geringer.

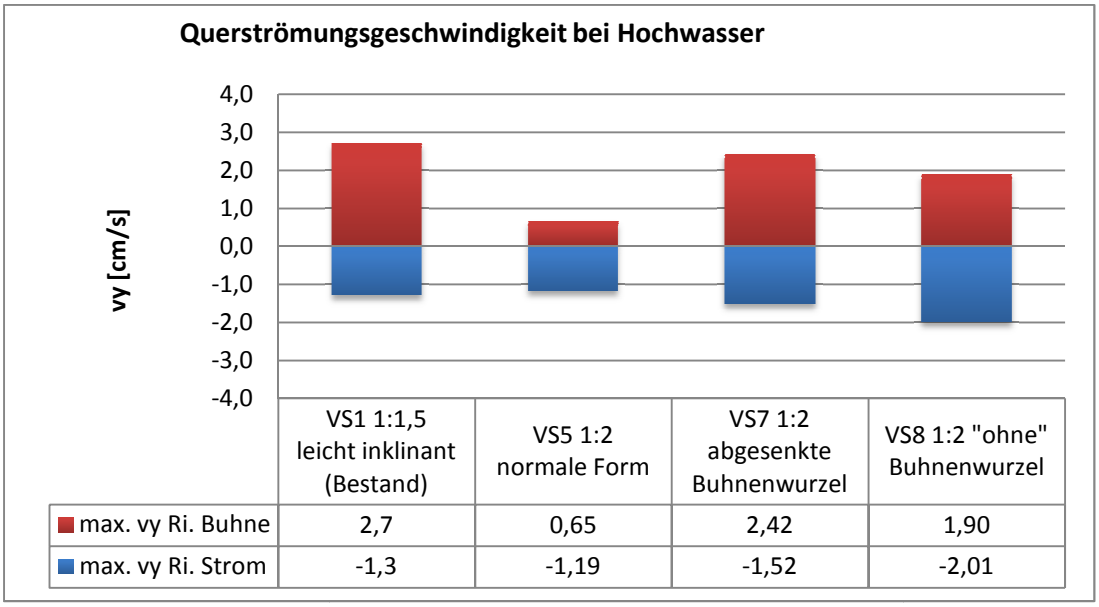


	VS1 1:1,5 leicht inklinant (Bestand)	VS5 1:2 normale Form	VS7 1:2 abgesenkte Buhnenwurzel	VS8 1:2 "ohne" Buhnenwurzel
max. vy Ri. Buhne	2,3	2,46	2,37	1,35
max. vy Ri. Strom	-1,7	-2,51	-1,57	-2,20

Abbildung 7.25 - Querströmungsgeschwindigkeit entlang der Streichlinie, MW - Modellversuchsreihe 3

Bei Mittelwasser (Abbildung 7.25) liegen alle Werte für die Querströmung Richtung Buhnenkopf im selben Bereich, nur in Versuchsserie 8 sind sie etwas geringer. Richtung Stromstrich ist der Wert der Querströmung in Versuchsserie 5 (Buhnenabstand 2) am größten, in Versuchsserie 7 mit der abgesenkten Buhnenwurzel ist er am geringsten. Die Schwankungsbreite der Quergeschwindigkeiten ist ebenfalls in Versuchsserie 5 mit einem Wert von 4,97 cm/s am größten.

Bei Hochwasser weisen sämtliche Versuchsserien in der Querströmung Richtung Buhnenkopf geringere Werte auf als in der Referenzserie. Gleiches gilt für die Schwankungsbreite. In der Querströmung Richtung Stromstrich liegt der Wert der abgesenkten Buhne etwas, bei der Versuchsserie „ohne“ Buhnenwurzel recht deutlich über den Werten der Referenzserie.



	VS1 1:1,5 leicht inklinant (Bestand)	VS5 1:2 normale Form	VS7 1:2 abgesenkte Buhnenwurzel	VS8 1:2 "ohne" Buhnenwurzel
max. vy Ri. Buhne	2,7	0,65	2,42	1,90
max. vy Ri. Strom	-1,3	-1,19	-1,52	-2,01

Abbildung 7.26 - Querströmungsgeschwindigkeit entlang der Streichlinie, HW - Modellversuchsreihe 3

Zusammenfassend können folgende Aussagen hinsichtlich der Quergeschwindigkeiten entlang der Streichlinie in Abhängigkeit zur Buhnenwurzelausführung gemacht werden:

Die Werte für die Querströmungen liegen annähernd im selben Bereich wie in der Referenzserie. Bei Niederwasser liegen die Werte der Querströmung Richtung Buhnenkopf zwar etwas höher als in der Referenzserie, allerdings immer noch im Bereich der Messungenauigkeit der Messsonde, also 1 cm/s. Das Versuchsmodell mit den abgesenkten Buhnenwurzeln (Versuchsserie 7) lieferte durchwegs gleiche oder kleinere Werte der Quergeschwindigkeit und der Schwankungsbreite als die Referenzserie. Um ein genaueres Bild der Querströmungen im Bereich der Streichlinie entlang der Buhnenköpfe zu erhalten, wären weitere, genauere Untersuchungen notwendig.

Allerdings kann aufgrund der Ergebnisse dieser Arbeit davon ausgegangen werden, dass es für die Schifffahrt bei allen drei untersuchten Buhnenwurzelausführungen zumindest zu keiner Verschlechterung der Verhältnisse kommen würde.

Kapitel 8

8 Pilotprojekt Witzelsdorf

Dieses Pilotprojekt wurde im Rahmen der Planungen für das *Flussbauliche Gesamtprojekt* entwickelt und folgt dessen integrativem Planungsansatz. Das Vorhaben setzte erstmals die vom interdisziplinär besetzten Leitungsausschuss entwickelten Planungsgrundsätze in die Praxis um (VIA DONAU, Zugriff im Oktober 2012). Ein Teil dieses Pilotprojektes war der Einbau der in dieser Arbeit untersuchten neuen Buhnengeometrien in der Donau. Mit den Bauarbeiten wurde kurz nach Vorliegen der endgültigen Ergebnisse dieser Arbeit im November 2007 begonnen.

Der Standort für das Pilotprojekt liegt in der Nähe der Ortschaft Witzelsdorf, Stromkilometer 1893,4 - 1891,7 am linken Donauufer. Der Stromabschnitt zählte bisher zu den am stärksten verbauten Abschnitten an der gesamten Donau. Neben dem Blockwurf zur Ufersicherung drängten sich ein Längsbauwerk (Leitwerk) und acht Querbauwerke (Buhnen) auf nicht einmal 2 km Uferlänge (VIA DONAU, Zugriff im Oktober 2012).

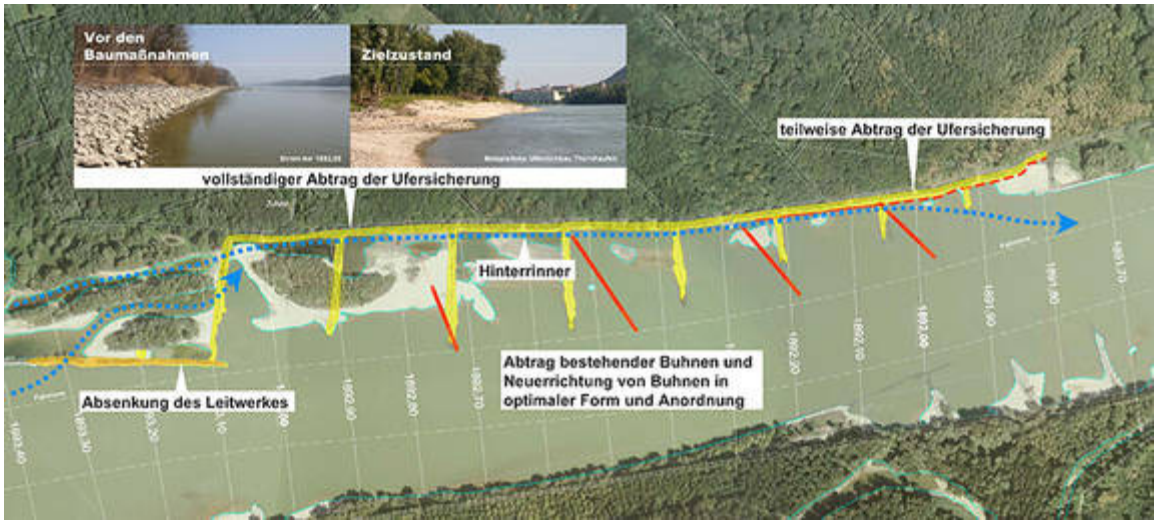


Abbildung 8.1 - Lageplan mit Maßnahmen (VIA DONAU, Zugriff im Oktober 2012)

Dieser nicht strömungsexponierte Uferabschnitt bot ideale Voraussetzungen für einen Uferrückbau und einen Test innovativer Buhnen in optimierter Form und Anordnung. Die Wasserbauarbeiten wurden von November 2007 bis Mai 2009 durchgeführt. Durch diese

Maßnahmen-Kombination entstand anstelle des unnatürlichen Blockwurfs ein neuer, dynamischer Lebensraum (VIA DONAU, Zugriff im Oktober 2012).

Durchgeführte Maßnahmen:

Abtragen von acht alten Buhnen und Felderprobung neuartiger Buhnengeometrien

Die vier neuen Buhnen wurden in Strömungsrichtung geneigt. Sie erzielen dabei die gleiche Anhebung der Niederwasserspiegel für die Schifffahrt, wie sie durch die bisherigen Verbauungsmaßnahmen erreicht wurden. Der Buhnenkopf läuft jetzt flach aus, um die Bildung von Buhnenkopfkolken zu reduzieren. Die Buhnenwurzel wurde derart abgesenkt, dass sie selbst bei Niederwasser überströmt wird. Dadurch sollen Anlandungen im Buhnenfeld reduziert und die Dynamik am Ufer verstärkt werden. Auch können so Jungfische ungehindert entlang des Ufers zwischen den Flachwasserbereichen wechseln (VIA DONAU, Zugriff im Oktober 2012).

Abbildung 8.2 - Alte Buhne, rechtwinkelig zum Ufer, durch die Sohleintiefung ragt sie zu hoch aus dem Wasser (VIA DONAU, Zugriff im Oktober 2012)

Abbildung 8.3 - Neue, niedrigere und in Strömungsrichtung geneigte Buhne mit Hinterrinner in Ufernähe (VIA DONAU, Zugriff im Oktober 2012)

Uferrückbau auf insgesamt fast 2 km Länge (Strom-km 1893,4 bis 1891,7)

Auf einer Länge von ca. 800 m wurde die Ufersicherung vollkommen entfernt. Im darunterliegenden, stärker angeströmten Bereich wurde eine Böschungsfußsicherung bis knapp auf Niveau von Regulierungsniederwasser belassen. Dadurch wird zwar Seitenerosion zugelassen, aber eine grundlegende Lageveränderung des Flusslaufs verhindert (VIA DONAU, Zugriff im Oktober 2012).

Absenkung des vorhandenen Leitwerks auf 0,5 m über RNW.

Ein vorhandenes Leitwerk (ein etwa parallel zum Ufer laufendes Regulierungsbauwerk) wurde auf 0,5 m über RNW abgesenkt. Dadurch wird die Wirkung des Bauwerks auf Niederwasserbedingungen reduziert (VIA DONAU, Zugriff im Oktober 2012).

Entfernung von Bewuchs

Für den Rückbau der Uferverbauungen war es zunächst notwendig, jene Büsche und Bäume zu entfernen, die auf der Verbauung gewachsen waren. Darüber hinaus war entlang des Ufers ein schmaler Arbeitsstreifen für die Baumaschinen erforderlich. Wie alle Baumaßnahmen wurden diese Arbeiten von einer ökologischen Bauaufsicht überwacht. Für den Umbau der Buhnen waren keine Fällungen erforderlich (VIA DONAU, Zugriff im Oktober 2012).

Ca. 30.800 m³ Steinüberschuss aus Uferrückbau, Leitwerkabsenkung und Buhnenumbau wurde mit Schiffen abtransportiert (VIA DONAU, Zugriff im Oktober 2012).

Kapitel 9

9 Zusammenfassung

Die freifließende Donaustrecke zwischen dem Kraftwerk Freudenau in Wien und der österreichisch-slowakischen Staatsgrenze stellt derzeit durch zu geringe und zeitlich stark schwankende Fahrwasserverhältnisse eine wesentliche Schwachstelle für die Binnenschifffahrt dar. Zudem ist dieser Donauabschnitt von einer anhaltenden Sohlerosion von etwa 2 bis 3,5 cm pro Jahr gekennzeichnet. Diese kontinuierliche Eintiefung der Donausohle führt zu einer Beeinträchtigung des ökologischen Gleichgewichts in den Donauauen, da diese immer mehr vom Hauptfluss abgetrennt werden. Das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit), sowie die Via donau – Österreichische Wasserstraßen-Gesellschaft mbH haben daher zur Verbesserung der Situation das *„Flussbauliche Gesamtprojekt Donau östlich von Wien“* ins Leben gerufen, welches am Beginn der vorliegenden Arbeit vorgestellt wird.

Das integrative Gesamtprojekt soll in diesem Donauabschnitt der anhaltenden Sohleintiefung nachhaltig entgegenwirken, für zuverlässige Fahrwasserverhältnisse sorgen sowie umfangreiche Renaturierungsmaßnahmen umsetzen, ohne dabei den Hochwasserschutz zu beeinträchtigen.

Eine der Maßnahmen im Gesamtprojekt ist die Optimierung der Buhnenbauwerke nach flussbaulichen und ökologischen Gesichtspunkten. Im Zuge dieses interdisziplinären Planungsprozesses wurden verschiedene Kriterien erarbeitet, anhand derer die bestehenden Buhnen optimiert werden sollen. So soll am Ufer eine erhöhte Dynamik erreicht werden und die Buhnenfeldverlandung möglichst gering sein, ohne jedoch die wasserspiegelanhebende Wirkung der Buhnen bei Niederwasser zu verringern.

Ziel dieser Arbeit war es, mittels vergleichender Untersuchungen, eine Buhnenform zu ermitteln, die diese Kriterien weitestgehend erfüllt. Dazu wurden im Wasserbaulabor der TU Wien mehrere Modellversuche durchgeführt.

Aufgebaut wurden diese Versuche in der 1,7 m breiten und 17,5 m langen Modellbaurinne. Der Modellmaßstab betrug etwa 1:100. Da es sich um qualitative, vergleichende Modelle handelte, mussten keine Modellgesetze eingehalten werden. So wurde auch für die Herstellung der Modellsohle ein Sand verwendet, der nicht dem Modellgesetz von Froude

entspricht. Die Buhnen wurden mit Kies (Korndurchmesser ca. 4-8 mm) hergestellt, diese sollten auch bei dem größten Durchfluss im Modell nicht ausgespült werden. Im Kern bestanden die Buhnen aus PVC-Platten, damit die Höhe der Buhnenkrone exakt eingestellt werden konnte. Sämtliche Versuche wurden in drei Phasen durchgeführt. Die erste Phase mit einem Durchfluss von 7,1 l/s sollte dem Regelniederwasser entsprechen. Die zweite Phase sollte mit 15 l/s das Mittelwasser, und die dritte Phase mit 28 l/s ein Hochwasser beim höchsten Schifffahrtswasserstand darstellen. Diese Modelldurchflüsse wurden in Vorversuchen in Abstimmung mit dem verwendeten Modellsand für die Sohle und dem eingestellten Sohlgefälle ermittelt.

Als Grundlage für die Versuche dieser Arbeit, diente eine erste Reihe von Modellen mit verschiedenen Buhnenformen. Diese sind in der Diplomarbeit von DI André Puntigam – *„Vergleichende Untersuchungen zu Buhnenformen an der Donau östlich von Wien“* genau beschrieben. Als Referenzmodell wurden im ersten Versuch die derzeit im Projektgebiet verbauten leicht inklinanten Buhnen mit einem Buhnenabstand a zur verbauten Breite b (Ufer bis Streichlinie) von 1,5 verbaut. Dieses erste Modell diente als Vergleichsbasis für alle folgenden Modelle. Weiters wurden in dieser Reihe leicht deklinante (also stromabwärtsgeneigte), stark deklinante und sichelförmige Buhnen in drei Modellen eingebaut. Nach der Auswertung dieser ersten Modellreihe wurde für die weiteren Versuchsreihen die stark deklinante Buhnenanordnung ausgewählt.

Die darauf folgenden Versuchsserien bildeten das Zentrum der vorliegenden Diplomarbeit.

Zuerst wurde der Buhnenabstand im Modell variiert. In den Versuchsserien 5 und 6 wurden Buhnenfelder mit zwei verschiedenen Buhnenabständen verbaut. Bei der Serie 5 wurden im oberen Bereich des Modells die Buhnen mit einem Buhnenabstand von 2 und im unteren Bereich mit einem Abstand von 4 (Buhnenabstand a zur verbauten Breite b) eingebaut. In der Serie 6 hatten die Buhnen im oberen Modellbereich einen Abstand von 2,5 und im unteren Bereich einen Abstand von 3. Abmessungen, wie die verbaute Breite der Buhnen, und Einstellungen wie Durchfluss, Sohlneigung etc. blieben im Vergleich zur ersten Versuchsreihe unverändert. Eine vergleichende Auswertung dieser zwei Versuchsserien zeigte, dass sowohl der Buhnenkopfkolk als auch der Angriff auf das Ufer mit zunehmendem Buhnenabstand größer werden. Beim Buhnenabstand 2 kann sowohl bei den morphologischen Veränderungen der Modellsohle als auch bei den gemessenen Geschwindigkeiten entlang der Streichlinie von einer Verbesserung der derzeitigen Situation gesprochen werden.

Anhand dieser Auswertung wurde der Buhnenabstand 2 für den dritten Schritt dieser Versuchsserien ausgewählt.

In diesem wurde die Ausführung der Buhnenwurzel variiert. Dabei wurde die in den vorherigen Schritten ermittelte Buhnengeometrie für die Versuchsserien 7 und 8 übernommen (stark deklinant, Buhnenabstand 2). In diesen beiden Versuchsserien wurde aber die Buhnenkrone im Bereich des Ufers abgesenkt, um eine Verbindung der Buhnenfelder bereits bei Niederwasser herzustellen. In der Versuchsserie 7 wurde die Buhnenkrone im Uferbereich leicht abgesenkt, in der Versuchsserie 8 wurde die Buhnenkrone bis auf Sohlniveau abgeböscht. Die Auswertung dieser beiden Versuche zeigte im Bereich des Buhnenkopfkolkes erwartungsgemäß wenig Unterschiede. Große Abweichungen ergaben sich beim Angriff auf das Ufer. Waren bei der normal ausgeführten Buhnenkrone und bei der leicht abgesenkten Buhnenwurzel die Uferangriffe noch sehr beträchtlich, blieb die Uferböschung im letzten Versuch mit der entfernten Buhnenwurzel nahezu vollständig erhalten. Bei diesem Modell führte die bis zur Modellsohle abgeböschte Buhnenwurzel zu einer Auskolkung im Buhnenfeld nahe am Ufer direkt hinter der Buhne, vergleichbar mit einem Buhnenkopfkolk. Die gemessenen Querströmungen im Bereich der Streichlinie zeigten, dass durch keine der untersuchten Buhnenwurzelausführungen Verschlechterungen im Vergleich zur derzeitigen Situation hinsichtlich der Strömungssituation für die Schifffahrt zu erwarten sind.

Anhand dieser Auswertungen kommen im Sinne des *„Flussbauliche Gesamtprojekt Donau östlich von Wien“* sowohl die Buhnen mit normal ausgeführter Buhnenkrone bis ans Ufer als auch die Buhnenvariante mit leicht abgesenkter Buhnenkrone im Buhnenwurzelbereich in Frage.

Literaturverzeichnis

KREUTER,F. 1907. *„Der Flussbau“.* Handbuch der Ingenieurwissenschaften, III. Teil, 6. Band, 4. Auflage, 270S, München, 1907

KROUZECKY, Norbert. 2004. *„Wasserspiegelhebung zufolge nicht überströmter Buhnen bei fester Sohle“.* Wien: Publish Factory Medienproduktion GmbH, 2004

NACHTNEBEL, H.P. 2003. *„Gewässerplanung und konstruktiver Wasserbau - Studienblätter“.* Wien, Universität für Bodenkultur: Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, 2003

NEGER, R. 1932. *„Die Entwicklung des Buhnenbaues in den deutschen Stromgebieten“.* Mitteilungen des Wasserbaues und der Baugrundforschung, Heft 6, 31S, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin. 1932

MALCHEREK, A. 2004. *„Fließgewässer – Hydromechanik und Wasserbau“.* Institut für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München, München

PUDELKO, A., PUFFAHRT, O.1981. *„Hannover und Preußen betrieben gemeinsam den Ausbau der Elbe zu einer neuzeitlichen Wasserstraße“.* Jahresheft des Heimatkundlichen Arbeitskreises Lüchow-Danneberg, S 169-181, 1981

PUNTIGAM; André. 2007. „Vergleichende Untersuchungen zu Buhnenformen an der Donau östlich von Wien“. Wien: Diplomarbeit TU Wien, 2007

PÜRSCHEL, W. 1967. *„Flussbau“.* Bauingenieur-Praxis, Heft 96, 124S, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1967

SCHWARZ, R., KOZERSKI, H.P.,2001. *„Die Buhnenfelder der unteren Mittelelbe – Geschichte, Bedeutung, Zukunft“.* Tagungsbericht der Deutschen Gesellschaft für Limnologie (DGL), Kiel, 2001

SUKHODOLOV, A., Engelhardt, Ch. 2001. *„Muster der Geschwindigkeitsverteilung in einem Buhnenfeld der Elbe“.* Kurzbericht des Expertenworkshops „Neue Erkenntnisse im Bereich der physikalischen und ökologischen Prozesse an Buhnenfeldern“ – TU Delft, Universität Karlsruhe, S 23, Magdeburg, 2001

UIJTTEWAAL, W. 2001. *„Experiments on physical scale models for submerged and non-submerged groynes" ,*Kurzbericht des Expertenworkshops „Neue Erkenntnisse im Bereich der physikalischen und ökologischen Prozesse an Buhnenfeldern" – TU Delft, Universität Karlsruhe, S 15, Magdeburg, Oktober 2001

VIA DONAU, Zugriff im Oktober 2012. „Flussbauliches Gesamtprojekt Donau östlich von Wien". http://www.bmvit.gv.at

WEITBRECHT, V. 2004. *„Influence of dead-water zones on the dispersive mass transport in rivers".* Dissertationsreihe am Institut für Hydromechanik der Universität Karlsruhe, 2004

WSV.de, Zugriff im Oktober 2012. „Die Elbe – Entwicklung als Schifffahrtsstraße". http://www.wsv.de

WURMS; Sven. 2004. „Parametrisierung von Buhnen in 2D-HN-Modellen anhand numerischer Modellrechnungen und Naturdaten der Donau". Stuttgart: Diplomarbeit Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau, 2004

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 2.1 - Projektgebiet "Flussbauliches Gesamtprojekt Donau östlich von Wien" (VIA DONAU, Zugriff im Oktober 2012) 5
Abbildung 2.2 - Donauabschnitt bei Witzelsdorf (Quelle: google maps, Zugriff im Oktober 2012) 6
Abbildung 2.3 - Prinzipskizze zum Uferrückbau mit Fußsicherung (VIA DONAU, Zugriff im Oktober 2012) 8
Abbildung 3.1 - Buhnen an der Elbe (WSV.de, Zugriff im Oktober 2012) 9
Abbildung 3.2 - Bezeichnung einer Buhne (NEGER, 1932) 10
Abbildung 3.3 - Anordnung der Buhnen am Inn bei Terfens, 1890 (KREUTER, 1907) 11
Abbildung 3.4 - Luftbild des Tiroler Inn bei Terfens nach der Regulierung (Quelle: google maps, Zugriff im Oktober 2012) 11
Abbildung 3.5 – Beispiel einer Steinbuhne (PÜRSCHEL, 1967) 13
Abbildung 3.6 - Typische Geschwindigkeitsprofile in Querschnitten von Gewässern mit Buhnen (links) und ohne Buhnen (rechts) (KROUZECKY, 2004) 15
Abbildung 3.7 - Einfluss des Verhältnisses Buhnenfeldbreite zu -länge (W/L) auf die Strömungsverhältnisse im Buhnenfeld (WEITBRECHT, 2004) 15
Abbildung 3.8 - Horizontale Walze an der Unterstromböschung (NEGER, 1932) 16
Abbildung 3.9 - Lage der Buhne zum Stromstrich (KROUZECKY, 2004) 17
Abbildung 3.10 - Kolkbildung und Uferangriff bei geneigten und überströmten Buhnen (PRESS, 1956) 17
Abbildung 3.11 - Verlandungen im Buhnenfeld bei unterschiedlichen Buhnenrichtungen (PÜRSCHEL, 1967) 18
Abbildung 4.1 - Flussbaurinne 24
Abbildung 4.2 – Messwagen mit Messgeräten 26
Abbildung 4.3 - Beispiel eines Online Dokumentes "catman" 28
Abbildung 4.4 - Sieblinie des Modellsandes 29
Abbildung 4.5 - Modellabmessungen für Versuchsserien 1-6 (oben), Serie 7 (Mitte) und Serie 8 (unten) 30
Abbildung 4.6 - Aufbau der Buhnen 31
Abbildung 4.7 - Abziehen der Sohle und der Uferböschung 31
Abbildung 4.8 - fertiges Modell (Versuchsserie 5) vor dem Versuch 32
Abbildung 4.9 - Schema der Versuchsabläufe 33

Abbildung 4.10 – Stellung des Unterwasserschiebers für Normalabfluss (PUNTIGAM, 2007) 34
Abbildung 4.11 - Quergeschwindigkeit im Bereich der Streichlinie 37
Abbildung 4.12 - Echtzeitmessung an einem Buhnenkopf (PUNTIGAM, 2007) 38
Abbildung 5.1 - Aufbauschema der Versuchsserien 1 bis 4 im Grundriss 39
Abbildung 5.2 - Aufnahmen der Sohle nach HW 41
Abbildung 5.3 - Aufnahmen der Sohle nach HW 41
Abbildung 5.4- Vergleich der morphologischen Veränderung VS1 bis VS4 43
Abbildung 5.5 - Querströmungsgeschwindigkeit entlang der Streichlinie VS1 bis VS4 44
Abbildung 6.1 - Buhnenanordnung Versuchsserie 5 47
Abbildung 6.2 - Buhnenlängsschnitt für Versuchsserie 5 48
Abbildung 6.3: Buhnengeometrie und gesamtes Modell der Versuchsserie 5 vor dem Versuch 48
Abbildung 6.4 - VS 5: Strömungen im Buhnenfeld (Buhnen nicht überströmt, Buhnenabstand 2) 49
Abbildung 6.5 - Geschwindigkeitsprofile VS 5 NW - vx 50
Abbildung 6.6 - VS 5: Strömungen im Buhnenfeld (Buhnen nicht überströmt, Buhnenabstand 4) 51
Abbildung 6.7 – VS 5: stehende Welle über der Buhnenkrone 51
Abbildung 6.8 - VS 5: Strömungen über die Buhnenkrone (Buhnen leicht überströmt, Buhnenabstand 2) 52
Abbildung 6.9 - VS 5: Strömungen im Buhnenfeld (Buhnen stark überströmt, Buhnenabstand 2) 53
Abbildung 6.10 – VS 5: Zirkulationsströmung im Buhnenwurzelbereich (Buhnen stark überströmt, Buhnenabstand 4) 53
Abbildung 6.11 - Buhnenanordnung Versuchsserie 6 55
Abbildung 6.12 - Buhnenlängsschnitt für Versuchsserie 6 55
Abbildung 6.13 - Buhnengeometrie und gesamtes Modell der Versuchsserie 6 vor dem Versuch 56
Abbildung 6.14 - VS 6: Strömungen im Buhnenfeld (Buhnen nicht überströmt, Buhnenabstand 2,5) 56
Abbildung 6.15 - VS 6: Strömungen im Buhnenfeld (Buhnen nicht überströmt, Buhnenabstand 3) 57
Abbildung 6.16 – VS 6: Wirbelablösung am Buhnenkopf 57
Abbildung 6.17 - VS 6: Sohlströmung im Buhnenfeld (Buhnen leicht überströmt, Buhnenabstand 2,5) 58

Abbildung 6.18 – VS 6: Interaktionszone zwischen Buhnenfeld und Hauptstrom (Buhnen leicht überströmt, Buhnenabstand 2,5) 58
Abbildung 6.19 - VS 6: Zirkulationsströmung im Buhnenfeld (Buhnen leicht überströmt, Buhnenabstand 3) 59
Abbildung 6.20 - VS 6: Strömung im Buhnenfeld (Buhnen stark überströmt, Buhnenabstand 2,5) 59
Abbildung 6.21 - VS 6: Zirkulationsströmung im Buhnenwurzelbereich (Buhnen stark überströmt, Buhnenabstand 2,5) 60
Abbildung 6.22 - VS 6: Strömung im Buhnenfeld (stark überströmte Buhnen, Buhnenabstand 3) 60
Abbildung 6.23 - morphologische Aufnahmen der Sohle VS5 vor dem Versuch, Buhnenabstand 2 und 4 62
Abbildung 6.24 – VS 5: Aufnahmen der Sohle nach HW, Buhnenabstand 2 63
Abbildung 6.25 – VS 5: Aufnahmen der Sohle nach HW, Buhnenabstand 4 64
Abbildung 6.26 – VS 5: Differenz der Sohle nach HW und der Sohle vor Versuchsstart – Buhnenabstand 2 64
Abbildung 6.27 – VS5: Differenz der Sohle nach HW und der Sohle vor Versuchsstart – Buhnenabstand 4 65
Abbildung 6.28 - VS5: Geschwindigkeitsprofile - Buhnenabstand 2 – NW 67
Abbildung 6.29 - VS5: Geschwindigkeitsvektoren 15-Sekunden Mittelwert – Buhnenabstand 2 – NW 68
Abbildung 6.30 - VS5: Geschwindigkeitsprofile - Buhnenabstand 2 – MW 69
Abbildung 6.31 - VS5: Geschwindigkeitsprofile - Buhnenabstand 2 – HW 70
Abbildung 6.32 - VS5: Geschwindigkeitsprofile - Buhnenabstand 2 – HW-knapp über Gewässersohle 71
Abbildung 6.33 - VS5: Geschwindigkeitsprofile - Buhnenabstand 4 – NW 72
Abbildung 6.34 - morphologische Aufnahmen der Sohle VS6 vor Versuchsstart, Buhnenabstand 2,5 (links) und 3 (rechts) 74
Abbildung 6.35 – VS6: Aufnahmen der Sohle nach HW, Buhnenabstand 2,5 75
Abbildung 6.36 – VS6: Aufnahmen der Sohle nach HW, Buhnenabstand 3 75
Abbildung 6.37 – VS6: Differenz der Sohle nach HW und der Sohle vor dem Versuch, Buhnenabstand 2,5 76
Abbildung 6.38 – VS6: Differenz der Sohle nach HW und der Sohle vor dem Versuch, Buhnenabstand 3 76
Abbildung 6.39 - VS6: Geschwindigkeitsprofile - Buhnenabstand A2,5 – NW 78
Abbildung 6.40 - VS6: Geschwindigkeitsprofile - Buhnenabstand 3 – NW 80

Abbildung 6.41 – Gegenüberstellung Buhnenkopfkolk – Modellversuchsreihe 2 82
Abbildung 6.42 - Gegenüberstellung der Anlandung hinter dem Buhnenkopfkolk – Modellversuchsreihe 2.....83
Abbildung 6.43 - Gegenüberstellung Uferangriff - Modellversuchsreihe 2.....84
Abbildung 6.44 - Gegenüberstellung der Anlandung im Buhnenfeld - Modellversuchsreihe 2 85
Abbildung 6.45 - Querströmungsgeschwindigkeit entlang der Streichlinie, NW - Modellversuchsreihe 2.....86
Abbildung 6.46 - Querströmungsgeschwindigkeit entlang der Streichlinie, MW - Modellversuchsreihe 2.....87
Abbildung 6.47 - Querströmungsgeschwindigkeit entlang der Streichlinie, HW - Modellversuchsreihe 2.....87
Abbildung 7.1 - Buhnenanordnung Versuchsserie 7.....89
Abbildung 7.2 - Buhnenlängsschnitt für Versuchsserie 7.....90
Abbildung 7.3 - Buhnengeometrie und gesamtes Modell der Versuchsserie 7 vor dem Versuch.....90
Abbildung 7.4 – VS 7: Strömungen über die Buhnenkrone und im Buhnenfeld (Buhnen nicht überströmt, Buhnenabstand 2, abgesenkte Buhnenwurzel).....91
Abbildung 7.5 - VS 7: Fließwechsel über der Buhnenkrone (Buhnen leicht überströmt, Buhnenabstand 2, abgesenkte Buhnenwurzel).....92
Abbildung 7.6 - VS 7: Strömung im Buhnenfeld (Buhnen stark überströmt, Buhnenabstand 2, abgesenkte Buhnenwurzel) 92
Abbildung 7.7 - Buhnenanordnung Versuchsserie 8.....93
Abbildung 7.8 - Buhnenlängsschnitt für Versuchsserie 8.....93
Abbildung 7.9 – Buhnengeometrie und gesamtes Modell der Versuchsserie 8 vor dem Versuch.....93
Abbildung 7.10 - VS 8: Strömung im Buhnenfeld (Buhnen nicht überströmt, Buhnenabstand 2, „ohne“ Buhnenwurzel) 94
Abbildung 7.11 – VS 7 - Morphologische Aufnahmen der Sohle vor dem Versuch, und nach HW 95
Abbildung 7.12 – VS 7 - Aufnahme der Sohle nach HW, Buhnenabstand 2, abgesenkte Buhnenwurzel.....96
Abbildung 7.13 – VS 7 - Differenz der Sohle nach HW und der Sohle vor dem Versuch 96
Abbildung 7.14 - VS7 - Geschwindigkeitsprofile - Buhnenabstand 2 – abgesenkte Buhnenwurzel NW.....98

Abbildung 7.15 – VS 8 - Morphologische Aufnahmen der Sohle vor dem Versuch, und nach HW 100
Abbildung 7.16 – VS 8 - Aufnahme der Modellsohle nach HW 100
Abbildung 7.17 – VS 8 - Differenz der Sohle nach HW und der Sohle vor dem Versuch 101
Abbildung 7.18 - VS8 – Geschwindigkeitsprofile, Buhnenabstand 2 – „ohne“ Buhnenwurzel – NW 102
Abbildung 7.19 - Gegenüberstellung Buhnenkopfkolk – Modellversuchsreihe 3 105
Abbildung 7.20 - Gegenüberstellung Anlandung im Buhnenkopfbereich – Modellversuchsreihe 3 105
Abbildung 7.21 - Vergleich des Uferangriffs der Modellversuchsreihe 3 106
Abbildung 7.22 - Gegenüberstellung Uferangriff – Modellversuchsreihe 3 107
Abbildung 7.23 - Gegenüberstellung Anlandung im Buhnenfeld – Modellversuchsreihe 3 ..107
Abbildung 7.24 - Querströmungsgeschwindigkeit entlang der Streichlinie, NW - Modellversuchsreihe 3 108
Abbildung 7.25 - Querströmungsgeschwindigkeit entlang der Streichlinie, MW - Modellversuchsreihe 3 109
Abbildung 7.26 - Querströmungsgeschwindigkeit entlang der Streichlinie, HW - Modellversuchsreihe 3 110
Abbildung 8.1 - Lageplan mit Maßnahmen (VIA DONAU, Zugriff im Oktober 2012) 111
Abbildung 8.2 - Alte Buhne, rechtwinkelig zum Ufer, durch die Sohleintiefung ragt sie zu hoch aus dem Wasser (VIA DONAU, Zugriff im Oktober 2012) 112
Abbildung 8.3 - Neue, niedrigere und in Strömungsrichtung geneigte Buhne mit Hinterrinner in Ufernähe (VIA DONAU, Zugriff im Oktober 2012) 113
Abbildung 10.1 - Aufnahmen der Versuchsserie 5, Buhnenabstand 2, nach Niederwasserdurchfluss 127
Abbildung 10.2 - Aufnahmen der Versuchsserie 5, Buhnenabstand 2, nach Mittelwasserdurchfluss 127
Abbildung 10.3 - Aufnahmen der Versuchsserie 5, Buhnenabstand 4, nach Niederwasserdurchfluss 128
Abbildung 10.4 - Aufnahmen der Versuchsserie 5, Buhnenabstand 4, nach Mittelwasserdurchfluss 128
Abbildung 10.5 - Geschwindigkeitsprofile VS5 - Buhnenabstand 4 – MW 129
Abbildung 10.6 - Geschwindigkeitsprofile VS5 - Buhnenabstand 4 – HW 130
Abbildung 10.7 - Geschwindigkeitsprofile VS5 - Buhnenabstand 4 – HW-knapp über Gewässersohle 131

Abbildung 10.8 - Aufnahmen der Versuchsserie 6, Buhnenabstand 2,5, nach Niederwasserdurchfluss 132
Abbildung 10.9 - Aufnahmen der Versuchsserie 6, Buhnenabstand 2,5, nach Mittelwasserdurchfluss 132
Abbildung 10.10 - Geschwindigkeitsprofile VS6 - Buhnenabstand 2,5 – MW....133
Abbildung 10.11 - Geschwindigkeitsprofile VS6 - Buhnenabstand 2,5 – HW....134
Abbildung 10.12 - Geschwindigkeitsprofile VS6 - Buhnenabstand 2,5 – HW-knapp über Gewässersohle....135
Abbildung 10.13 - Aufnahmen der Versuchsserie 6, Buhnenabstand 3, nach Niederwasserdurchfluss 136
Abbildung 10.14 - Aufnahmen der Versuchsserie 6, Buhnenabstand 3, nach Mittelwasserdurchfluss 136
Abbildung 10.15 - Geschwindigkeitsprofile VS6 - Buhnenabstand 3 – MW....137
Abbildung 10.16 - Geschwindigkeitsprofile VS6 - Buhnenabstand 3 – HW....138
Abbildung 10.17 - Geschwindigkeitsprofile VS6 - Buhnenabstand 3 – HW-knapp über Gewässersohle....139
Abbildung 10.18 - Aufnahmen der Versuchsserie 7, Buhnenabstand 2, abgesenkte Buhnenwurzel, nach Niederwasserdurchfluss 140
Abbildung 10.19 - Aufnahmen der Versuchsserie 7, Buhnenabstand 2, abgesenkte Buhnenwurzel, nach Mittelwasserdurchfluss 140
Abbildung 10.20 - Geschwindigkeitsprofile VS7 - Buhnenabstand 2 – abgesenkte Buhnenwurzel MW 141
Abbildung 10.21 - Geschwindigkeitsprofile VS7 - Buhnenabstand 2 – abgesenkte Buhnenwurzel HW....142
Abbildung 10.22 - Geschwindigkeitsprofile VS7 - Buhnenabstand 2 –abgesenkte Buhnenwurzel – HW – knapp über Gewässersohle....143
Abbildung 10.23 - Aufnahmen der Versuchsserie 8, Buhnenabstand 2, „ohne“ Buhnenwurzel, nach Niederwasserdurchfluss....144
Abbildung 10.24 - Aufnahmen der Versuchsserie 8, Buhnenabstand 2, „ohne“ Buhnenwurzel, nach Mittelwasserdurchfluss....144
Abbildung 10.25 - Geschwindigkeitsprofile VS8 - Buhnenabstand 2 – „ohne“ Buhnenwurzel – MW....145
Abbildung 10.26 - Geschwindigkeitsprofile VS8 – Buhnenabstand 2 - “ohne“ Buhnenwurzel – HW 146
Abbildung 10.27 - Geschwindigkeitsprofile VS8 - Buhnenabstand 2 - "ohne" Buhnenwurzel - HW – knapp über Gewässersohle 147

Kapitel 10

10 Anhang

10.1 Versuchsserie 5

10.1.1 Buhnenabstand 2 Sohlaufnahmen

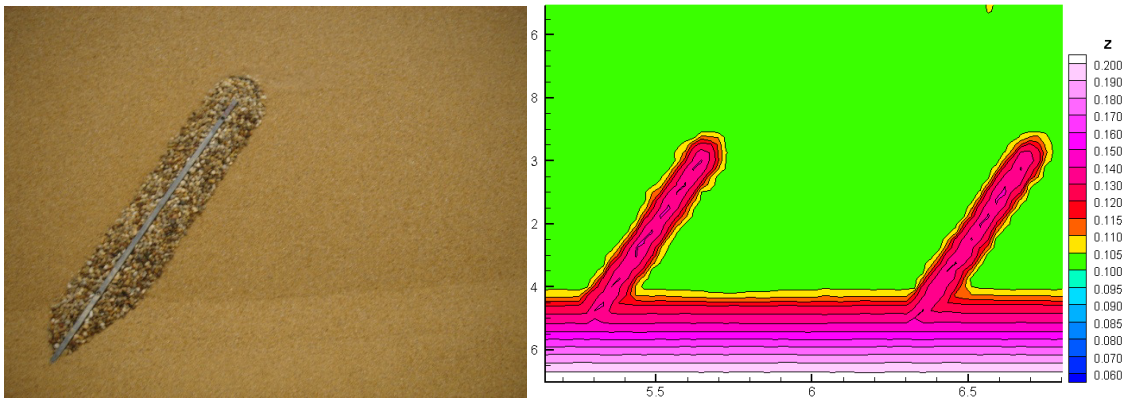


Abbildung 10.1 - Aufnahmen der Versuchsserie 5, Buhnenabstand 2, nach Niederwasserdurchfluss

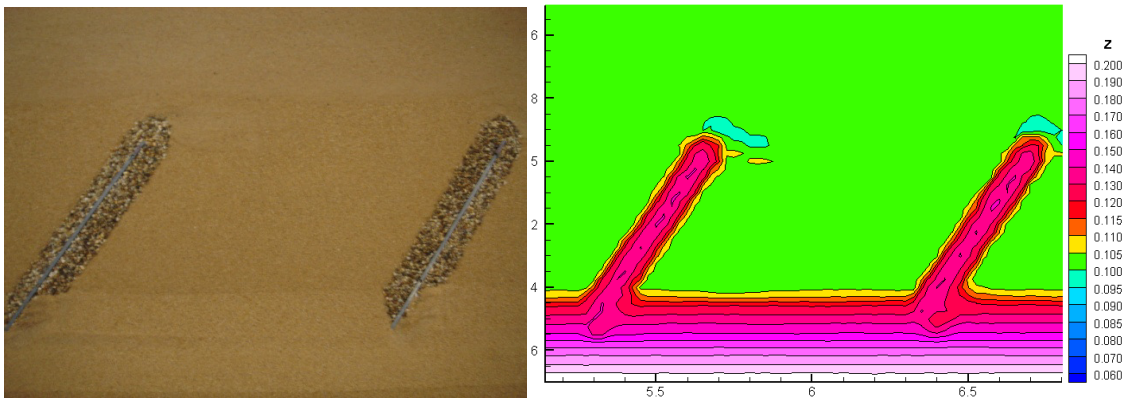


Abbildung 10.2 - Aufnahmen der Versuchsserie 5, Buhnenabstand 2, nach Mittelwasserdurchfluss

10.1.2 Buhnenabstand 4 Sohlaufnahmen

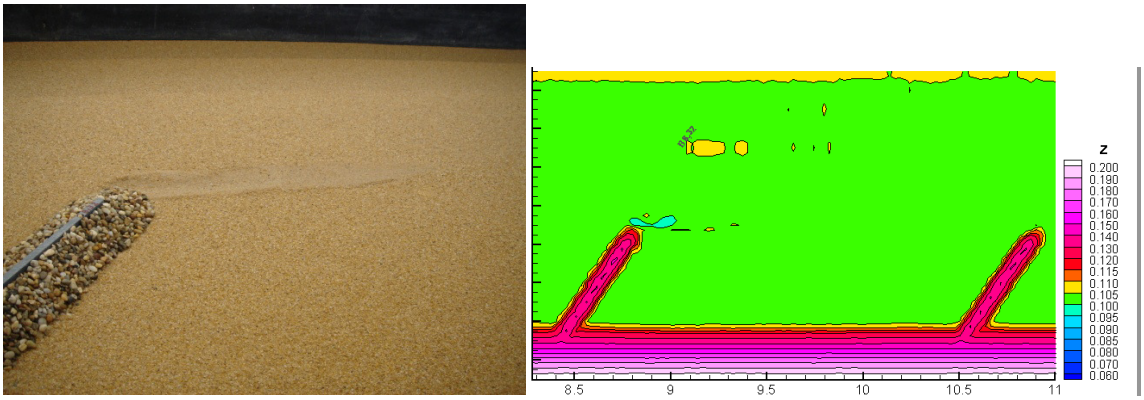


Abbildung 10.3 - Aufnahmen der Versuchsserie 5, Buhnenabstand 4, nach Niederwasserdurchfluss

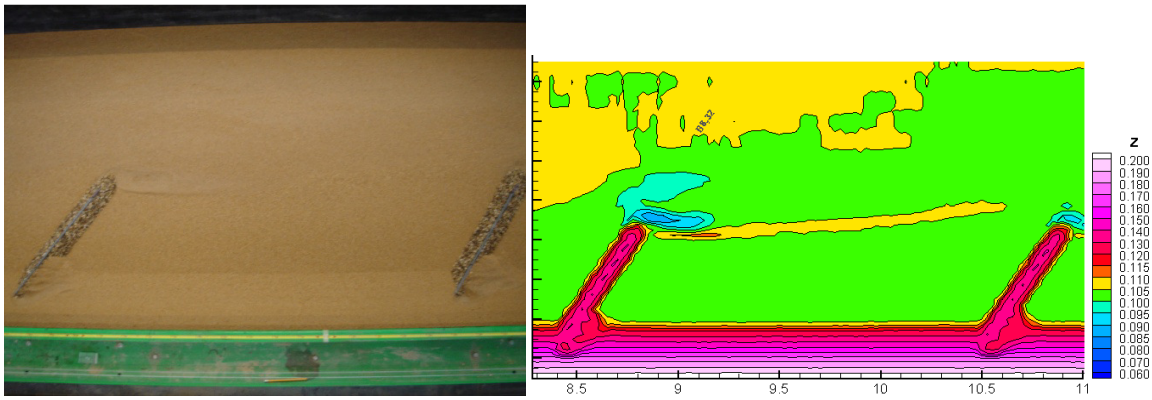


Abbildung 10.4 - Aufnahmen der Versuchsserie 5, Buhnenabstand 4, nach Mittelwasserdurchfluss

10.1.3 Buhnenabstand 4 Geschwindigkeitsdiagramme

Mittelwasser:

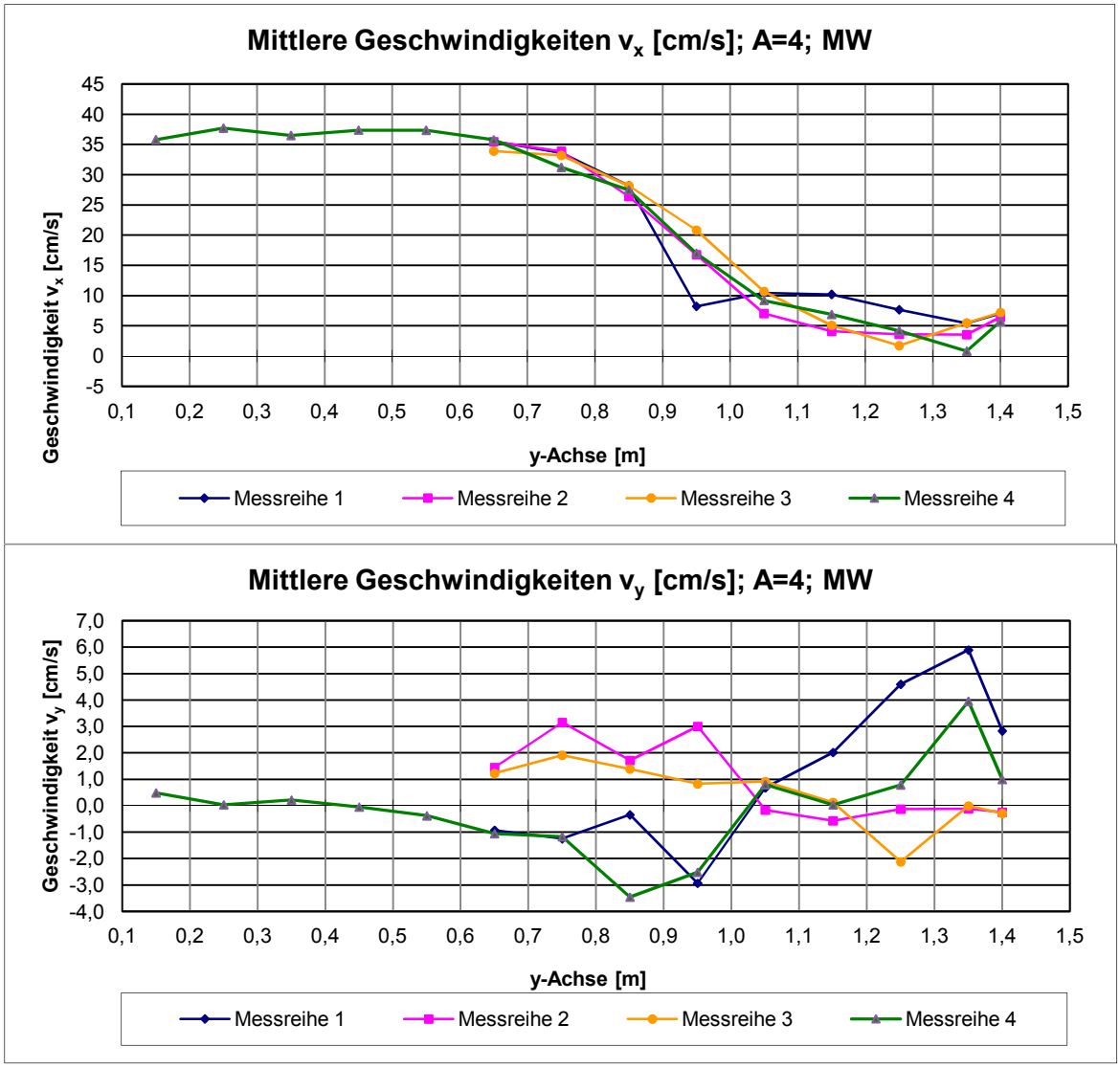


Abbildung 10.5 - Geschwindigkeitsprofile VS5 - Buhnenabstand 4 – MW

Hochwasser:

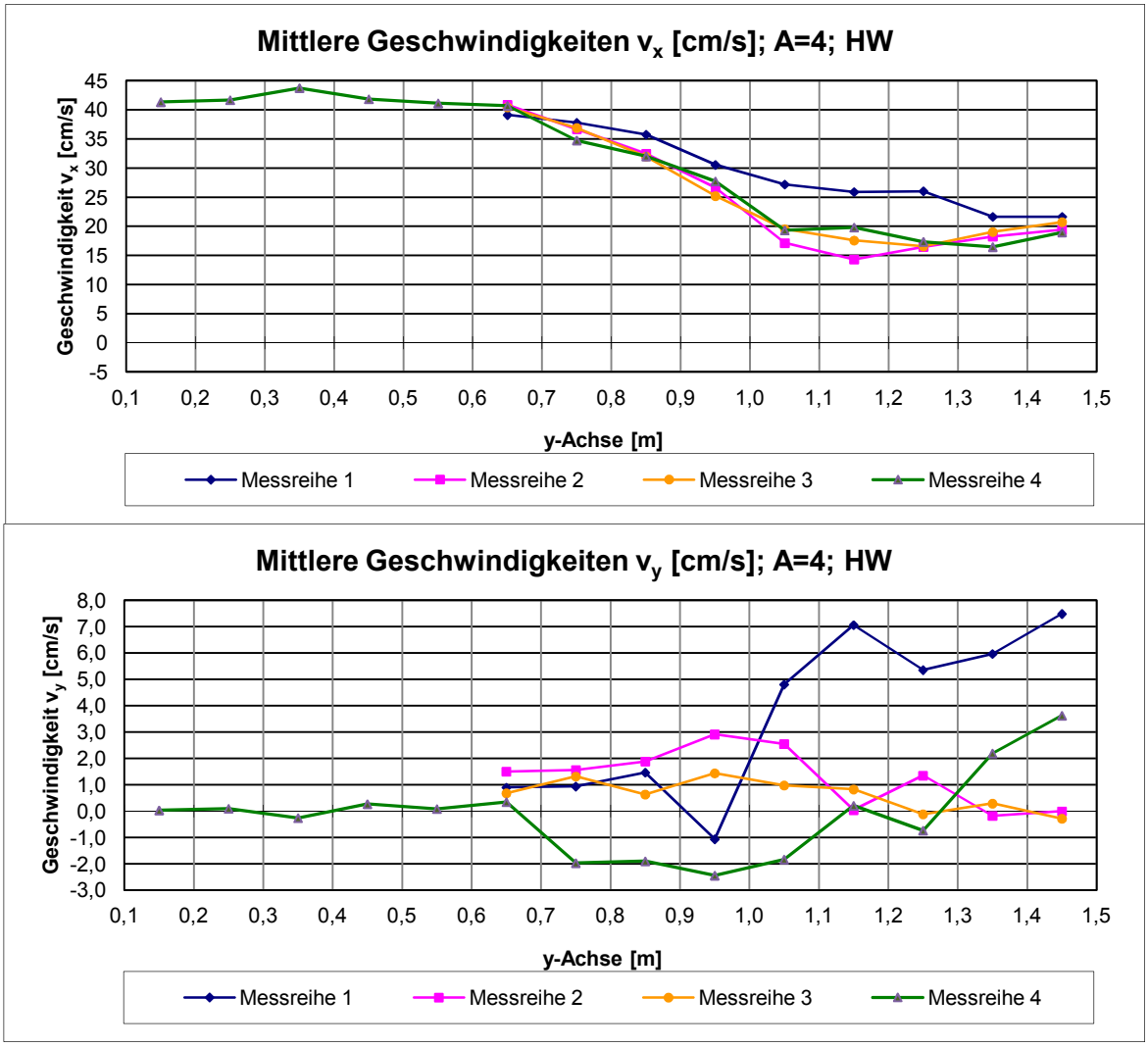


Abbildung 10.6 - Geschwindigkeitsprofile VS5 - Buhnenabstand 4 – HW

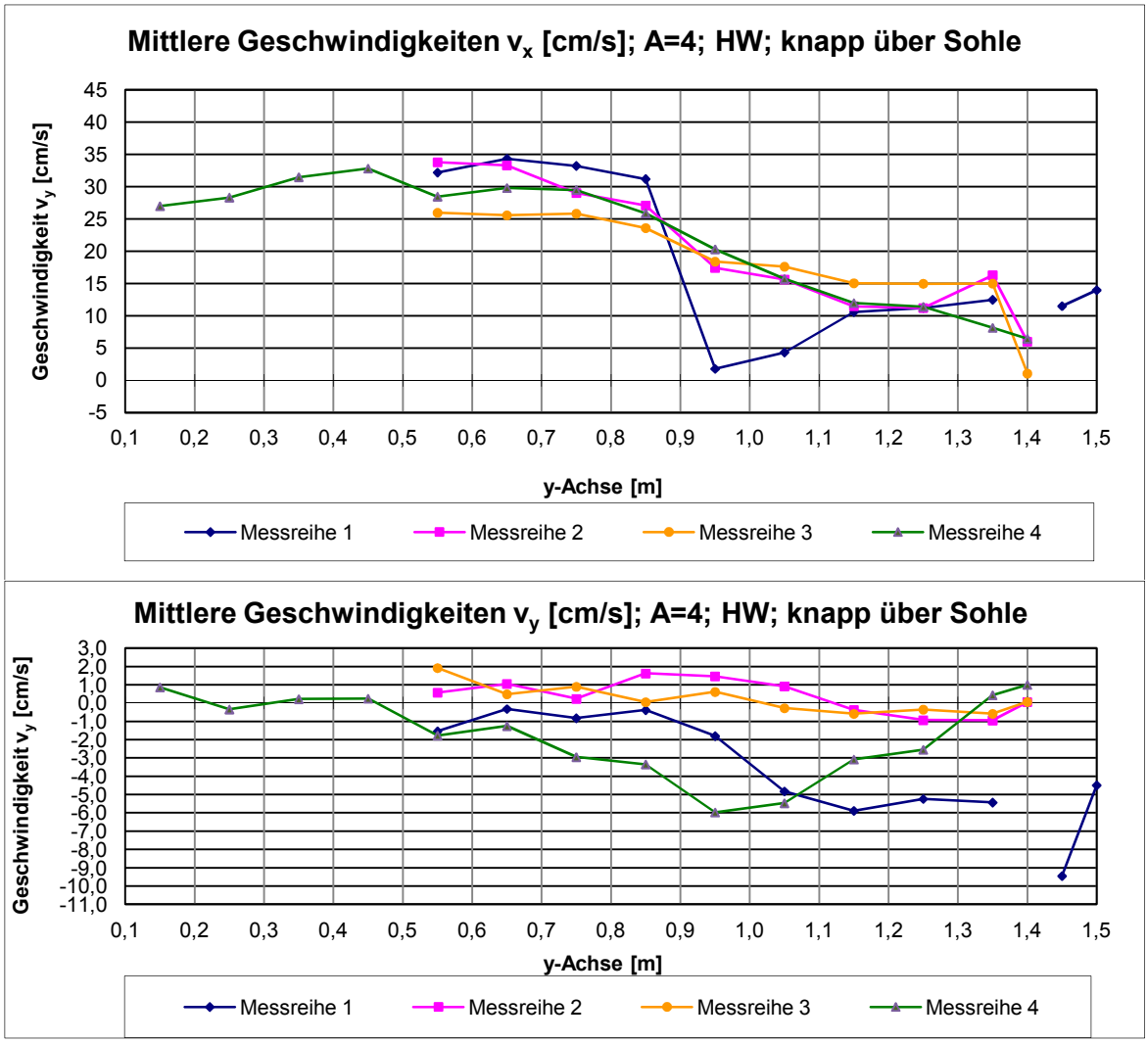


Abbildung 10.7 - Geschwindigkeitsprofile VS5 - Buhnenabstand 4 – HW-knapp über Gewässersohle

10.2 Versuchsserie 6

10.2.1 Buhnenabstand 2,5 Sohlaufnahmen

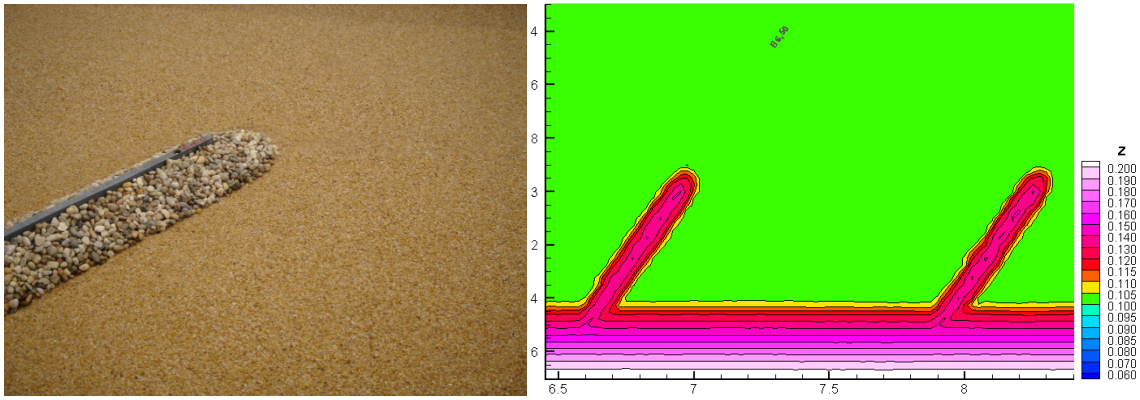


Abbildung 10.8 - Aufnahmen der Versuchsserie 6, Buhnenabstand 2,5, nach Niederwasserdurchfluss

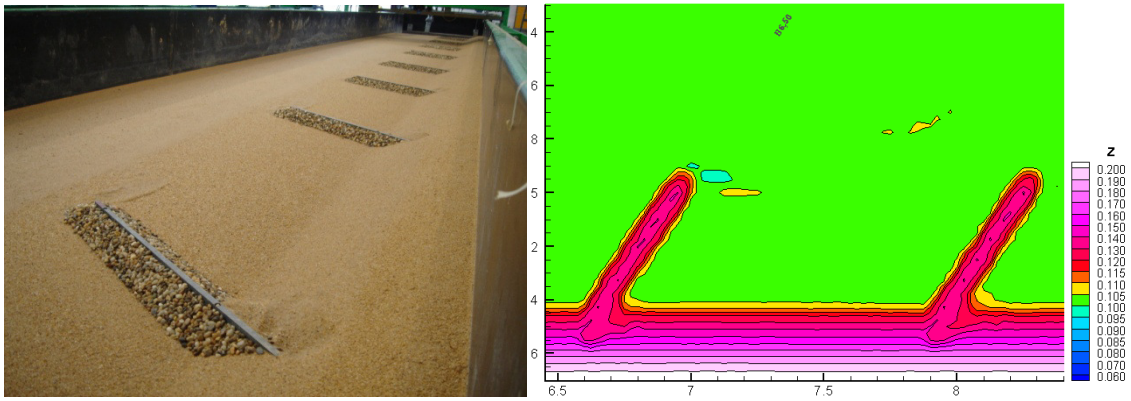


Abbildung 10.9 - Aufnahmen der Versuchsserie 6, Buhnenabstand 2,5, nach Mittelwasserdurchfluss

10.2.2 Buhnenabstand 2,5 Geschwindigkeitsdiagramme

Mittelwasser:

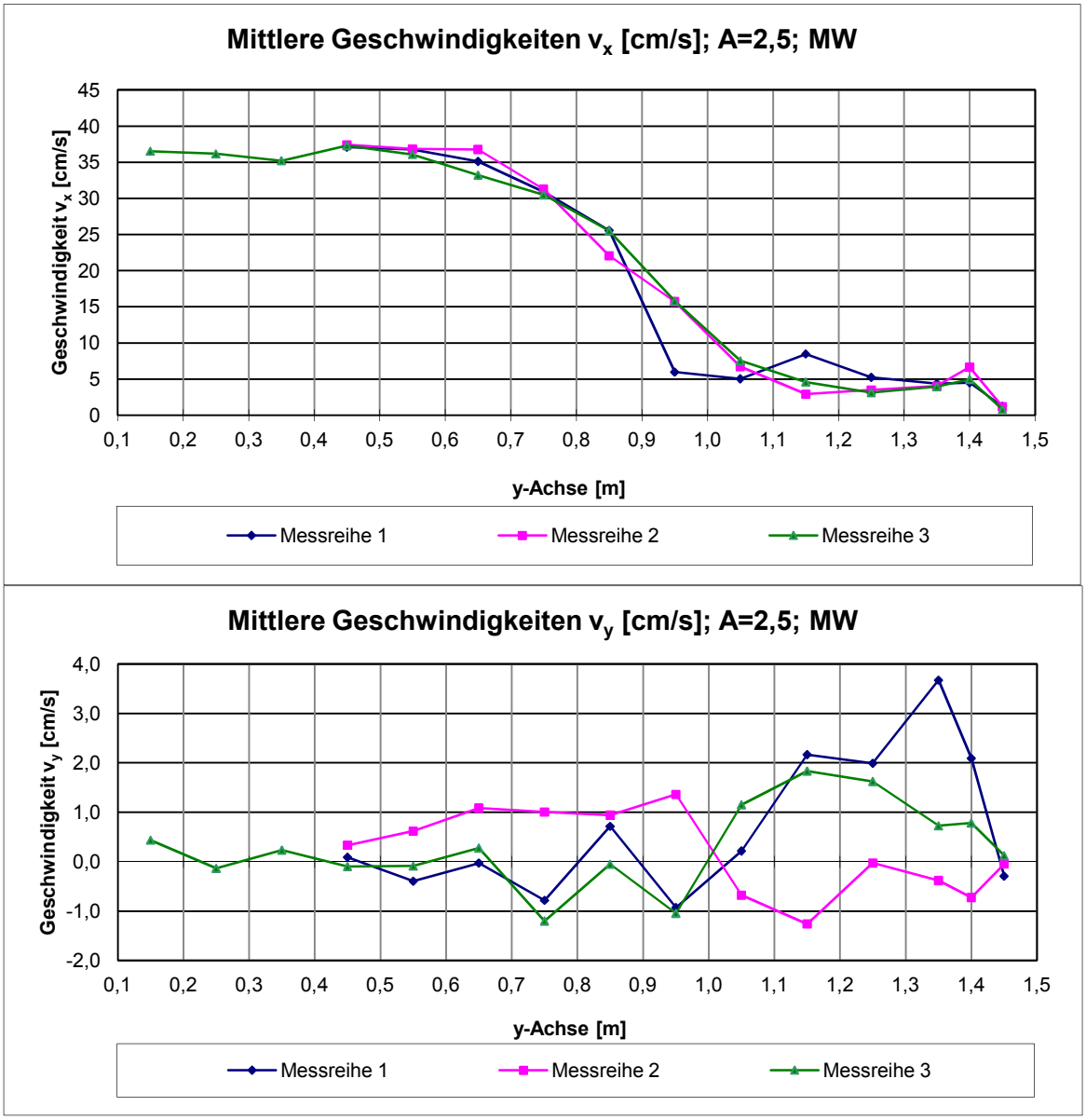


Abbildung 10.10 - Geschwindigkeitsprofile VS6 - Buhnenabstand 2,5 – MW

Hochwasser:

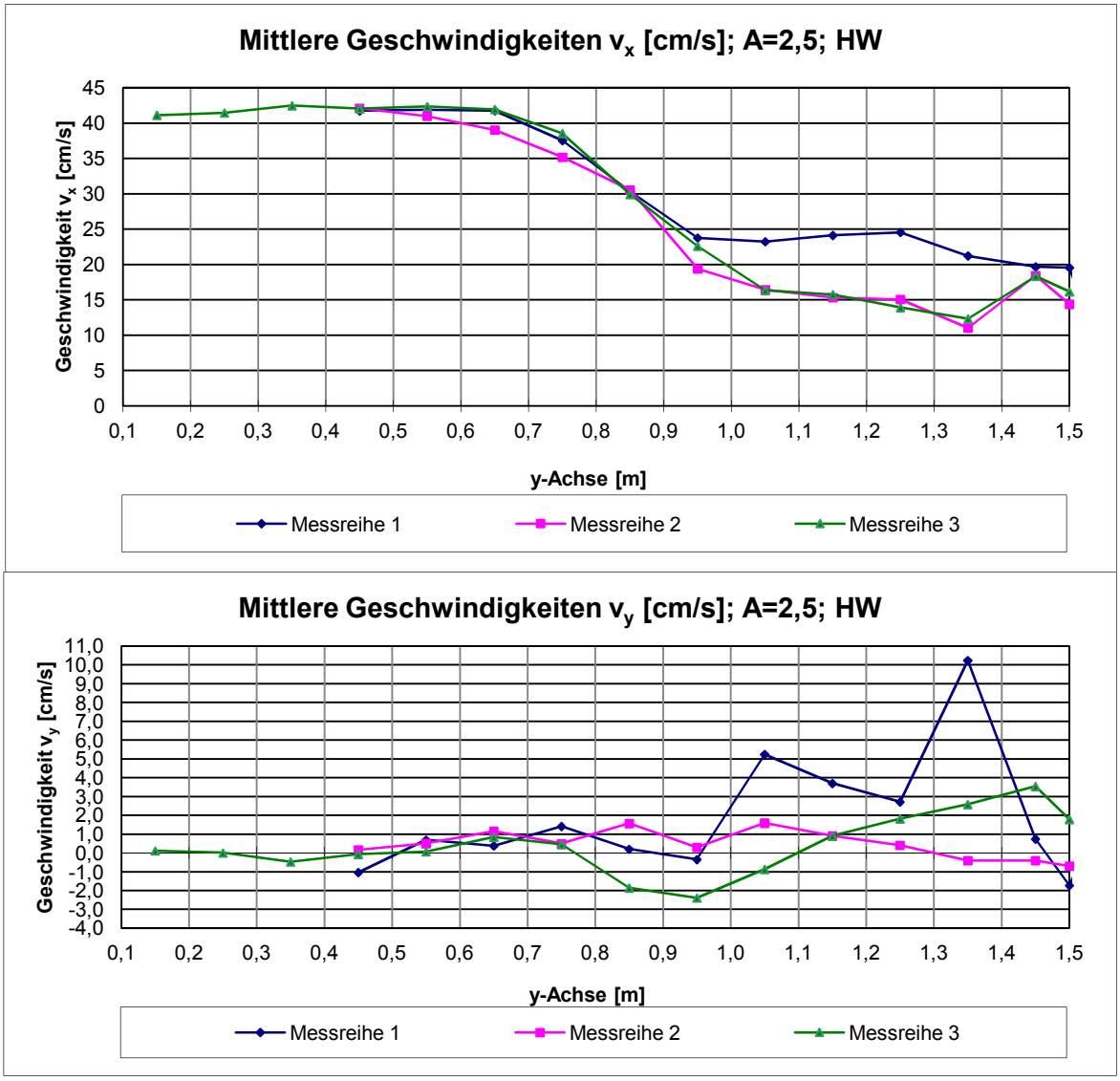


Abbildung 10.11 - Geschwindigkeitsprofile VS6 - Buhnenabstand 2,5 – HW

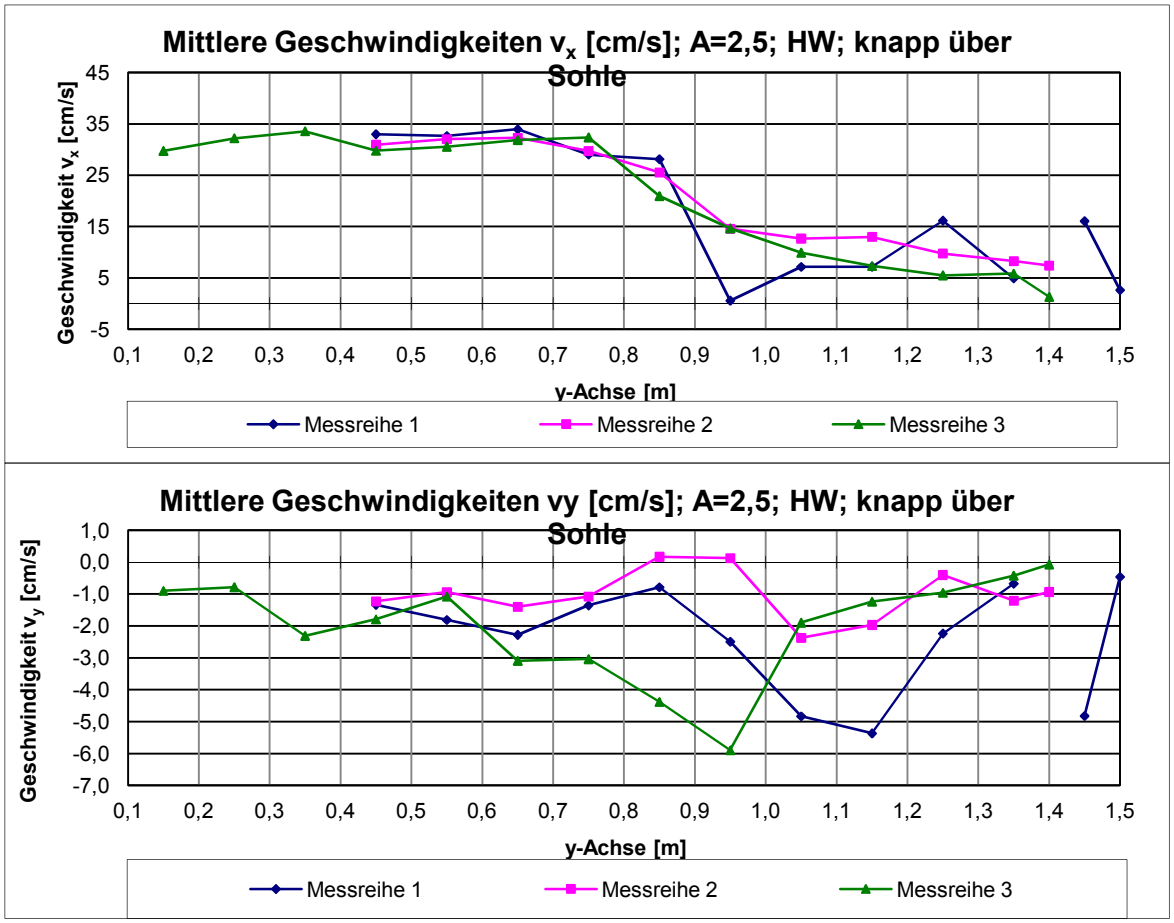


Abbildung 10.12 - Geschwindigkeitsprofile VS6 - Buhnenabstand 2,5 – HW-knapp über Gewässersohle

10.2.3 Buhnenabstand 3 Sohlaufnahmen

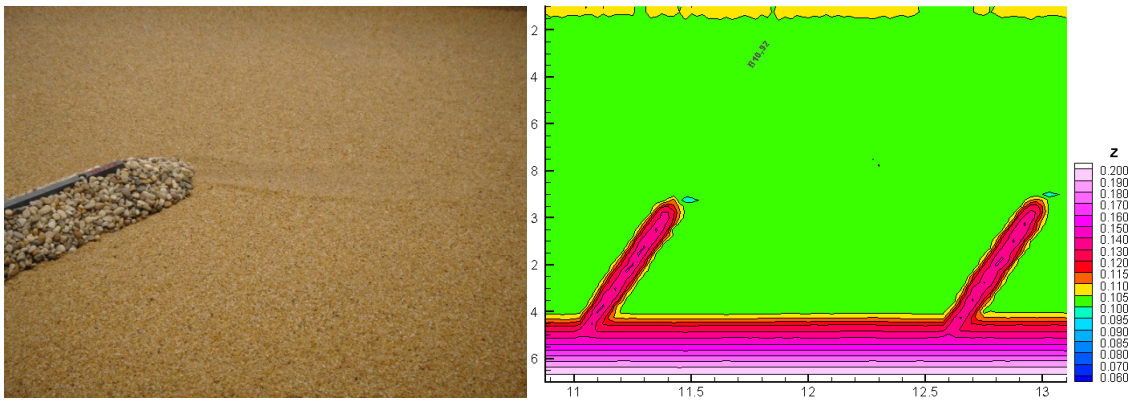


Abbildung 10.13 - Aufnahmen der Versuchsserie 6, Buhnenabstand 3, nach Niederwasserdurchfluss

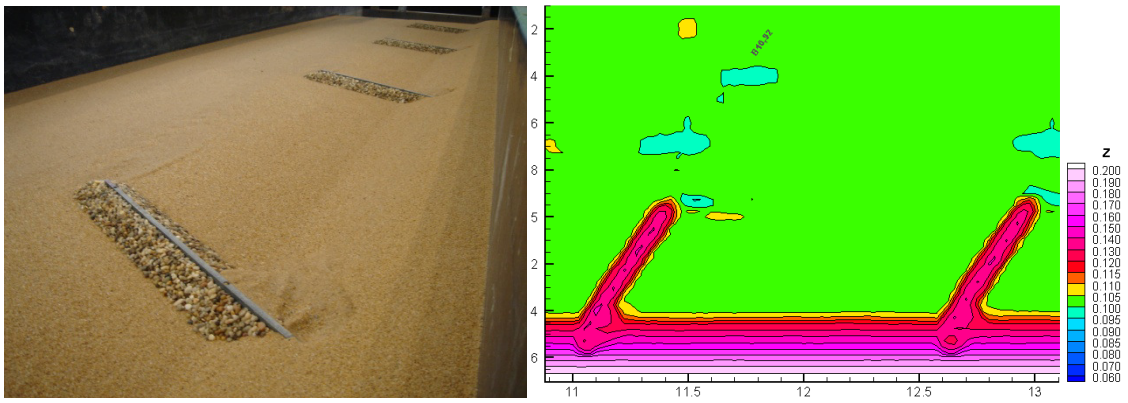


Abbildung 10.14 - Aufnahmen der Versuchsserie 6, Buhnenabstand 3, nach Mittelwasserdurchfluss

10.2.4 Buhnenabstand 3 Geschwindigkeitsdiagramme

Mittelwasser:

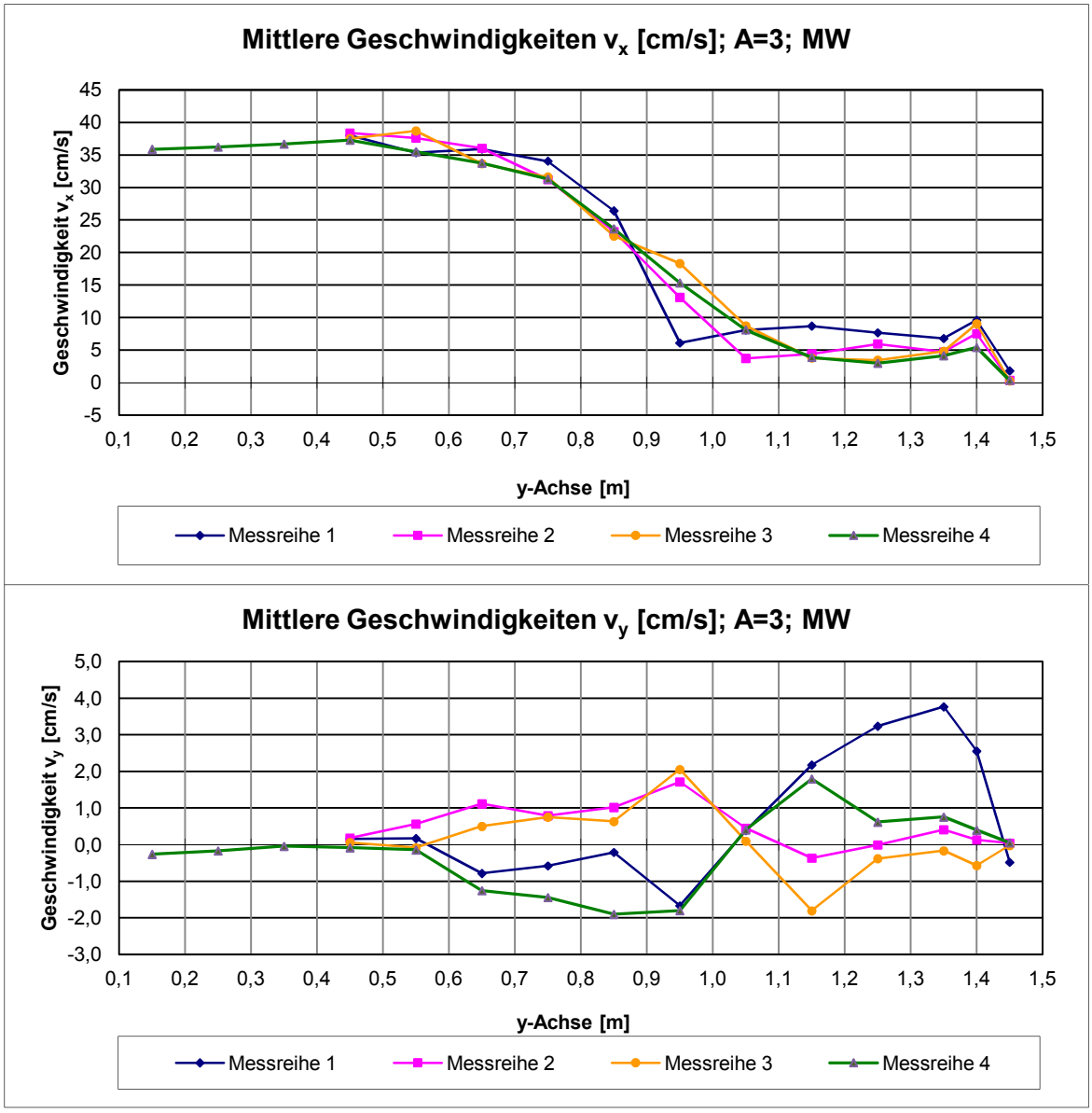


Abbildung 10.15 - Geschwindigkeitsprofile VS6 - Buhnenabstand 3 – MW

Hochwasser:

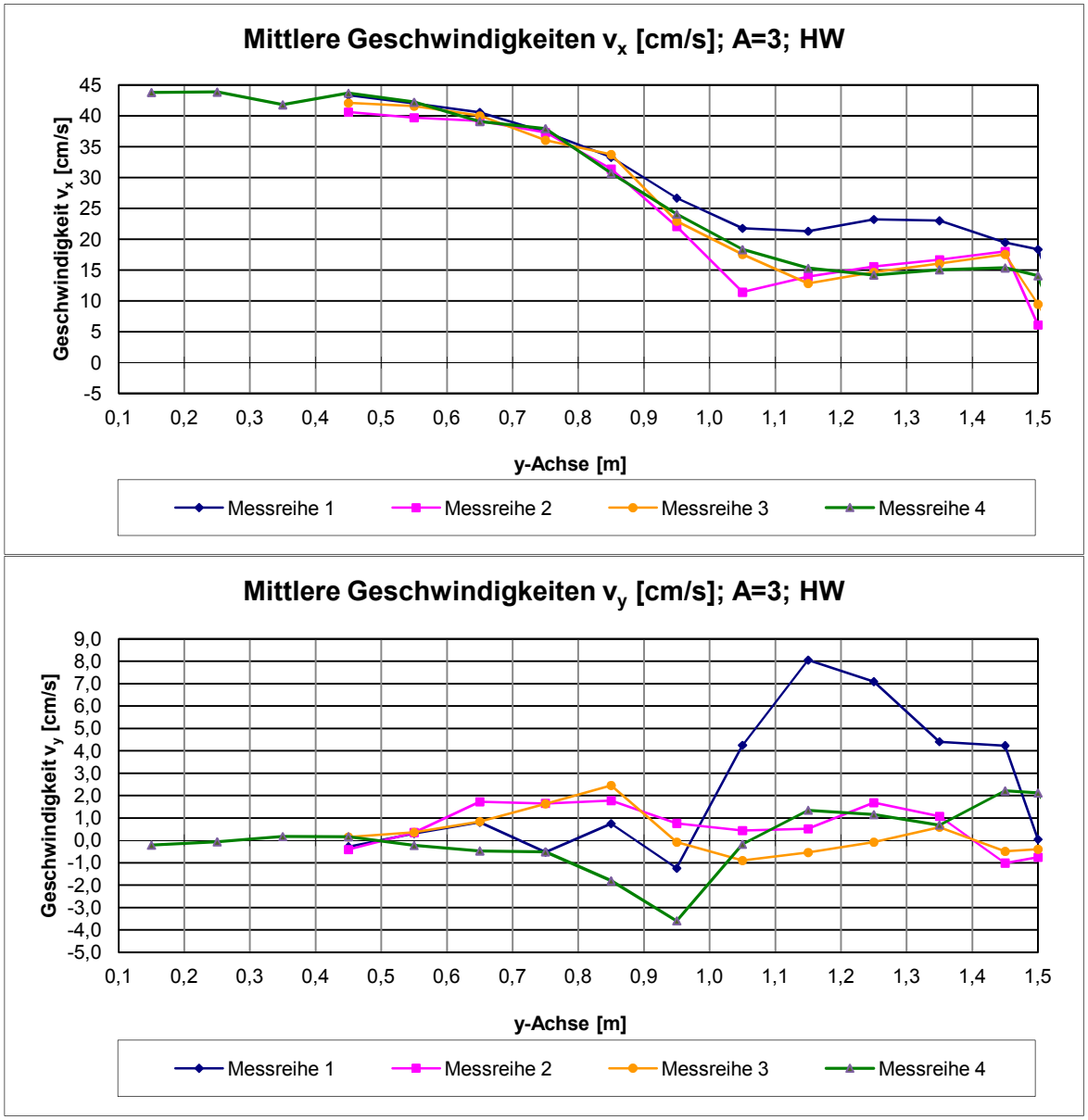


Abbildung 10.16 - Geschwindigkeitsprofile VS6 - Buhnenabstand 3 – HW

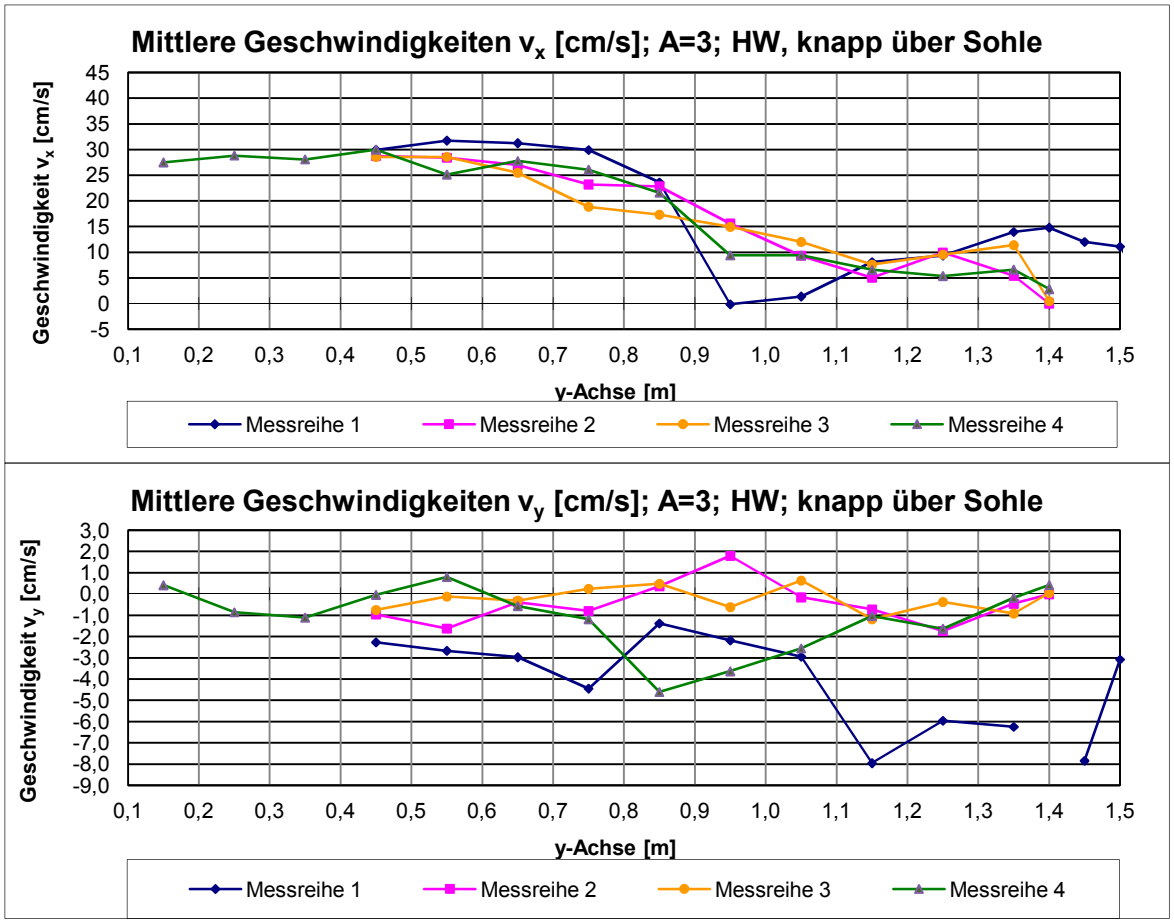


Abbildung 10.17 - Geschwindigkeitsprofile VS6 - Buhnenabstand 3 – HW-knapp über Gewässersohle

10.3 Versuchsserie 7

10.3.1 Sohlaufnahmen

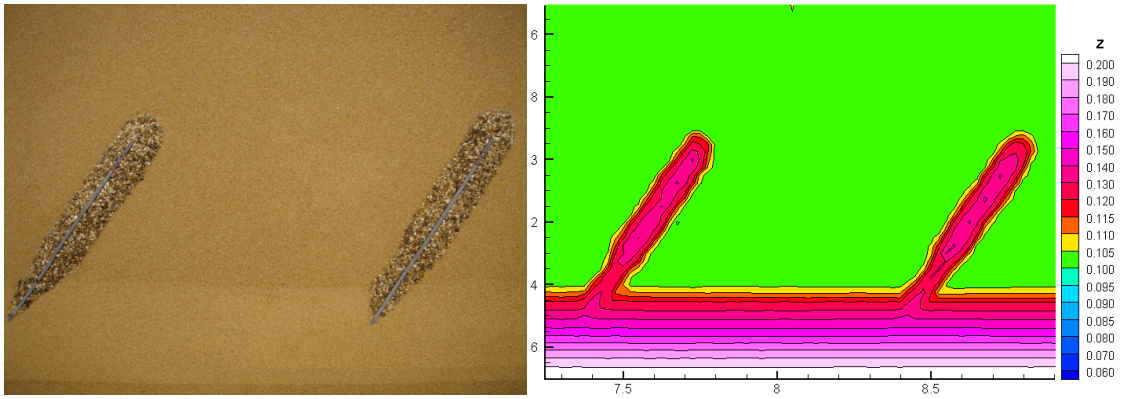


Abbildung 10.18 - Aufnahmen der Versuchsserie 7, Buhnenabstand 2, abgesenkte Buhnenwurzel, nach Niederwasserdurchfluss

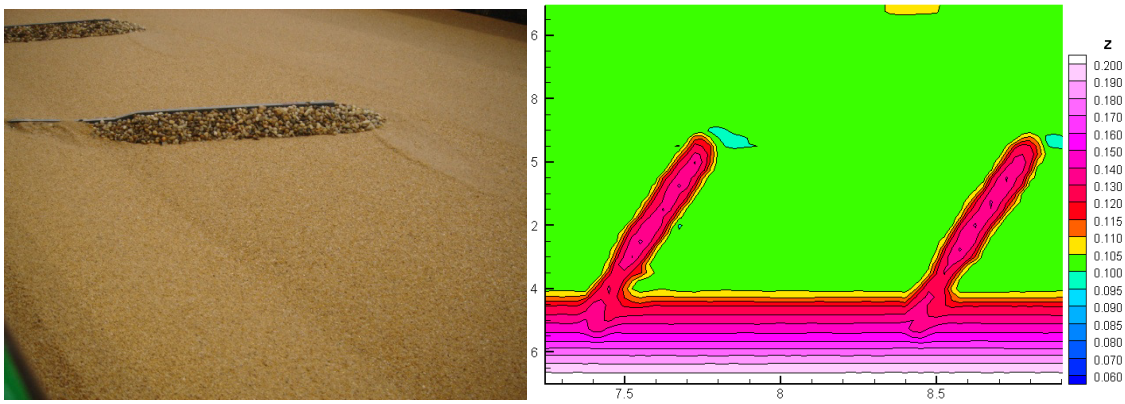


Abbildung 10.19 - Aufnahmen der Versuchsserie 7, Buhnenabstand 2, abgesenkte Buhnenwurzel, nach Mittelwasserdurchfluss

10.3.2 Geschwindigkeitsdiagramme

Mittelwasser:

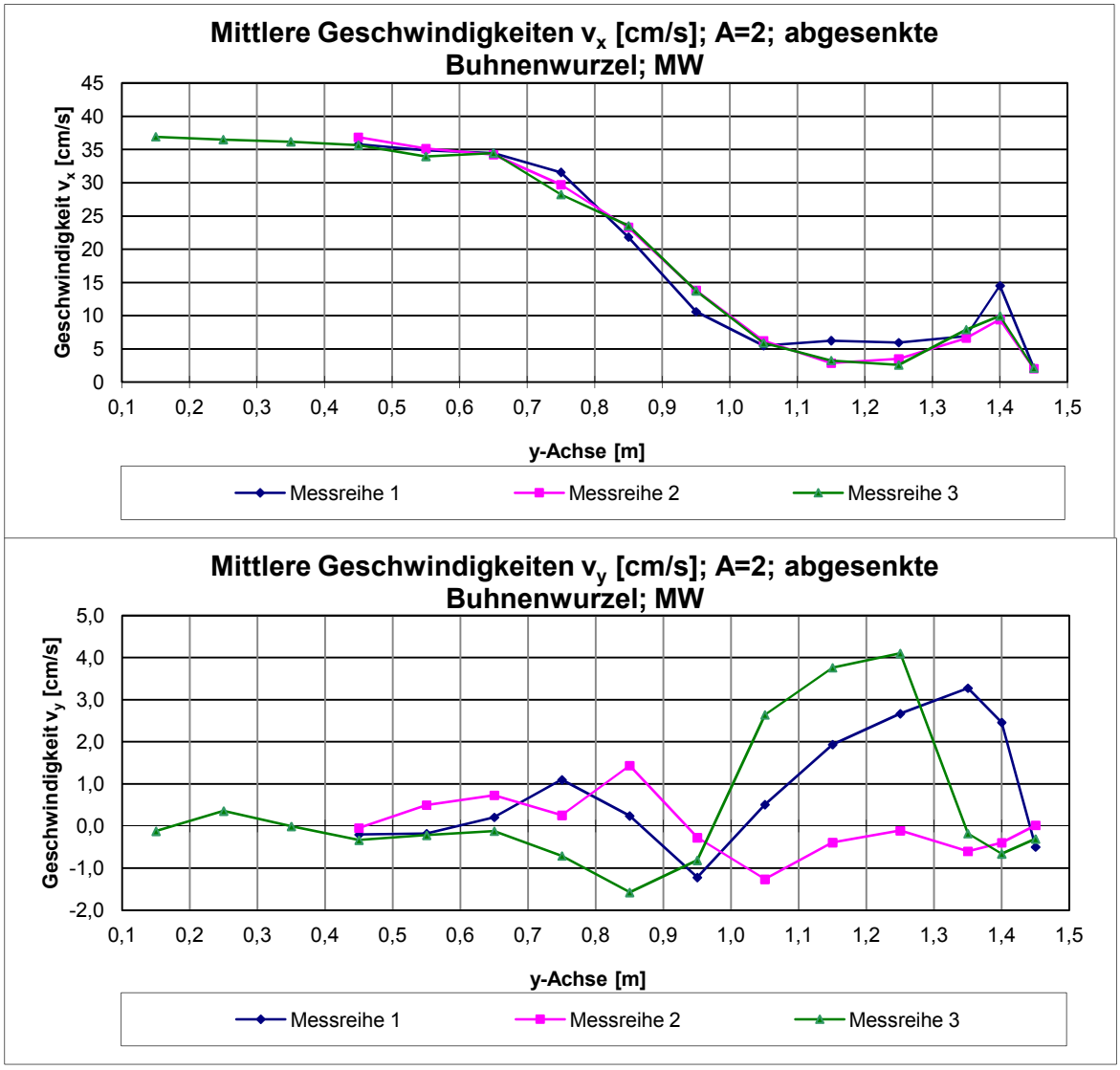


Abbildung 10.20 - Geschwindigkeitsprofile VS7 - Buhnenabstand 2 – abgesenkte Buhnenwurzel MW

Hochwasser:

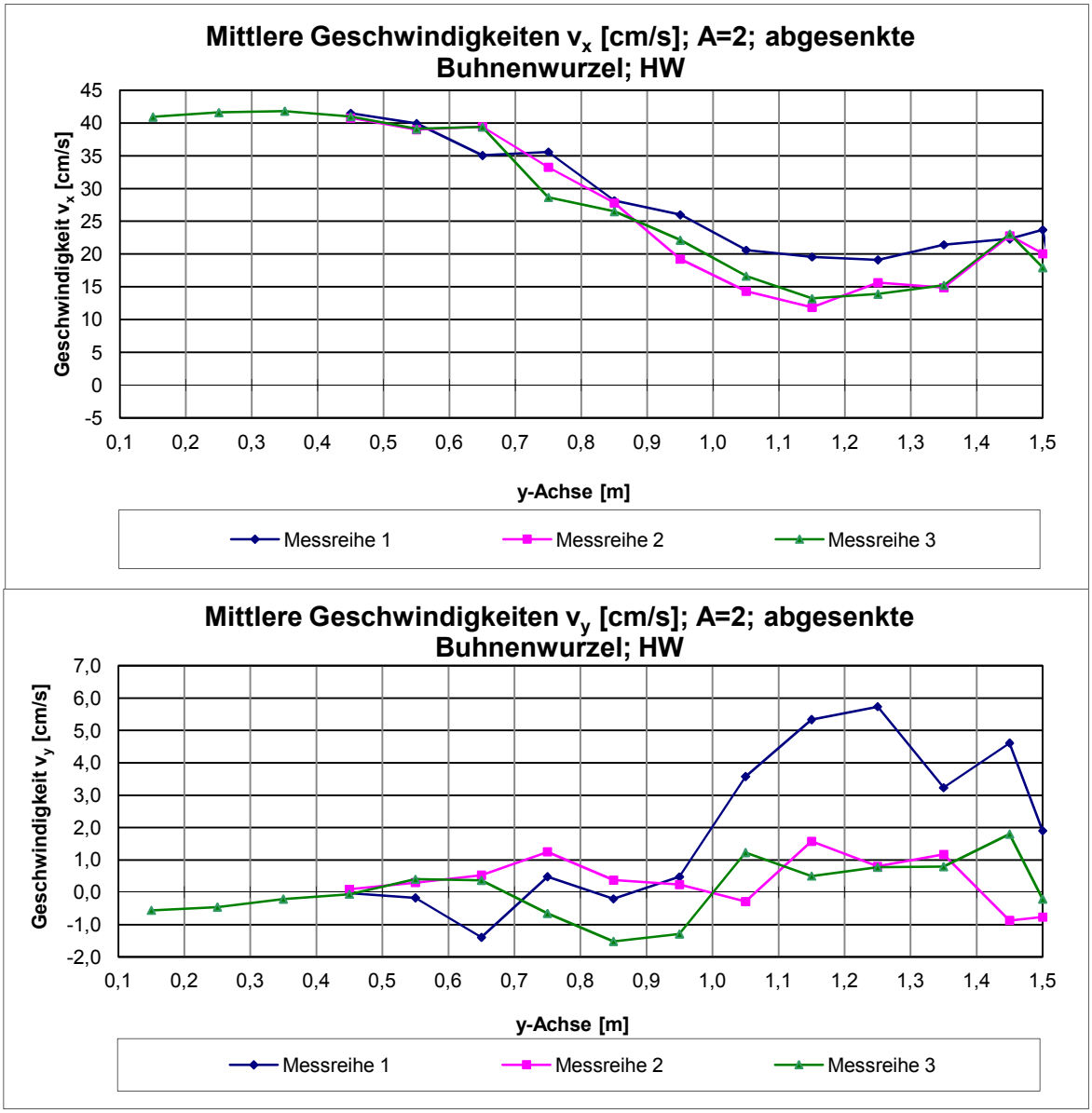


Abbildung 10.21 - Geschwindigkeitsprofile VS7 - Buhnenabstand 2 – abgesenkte Buhnenwurzel HW

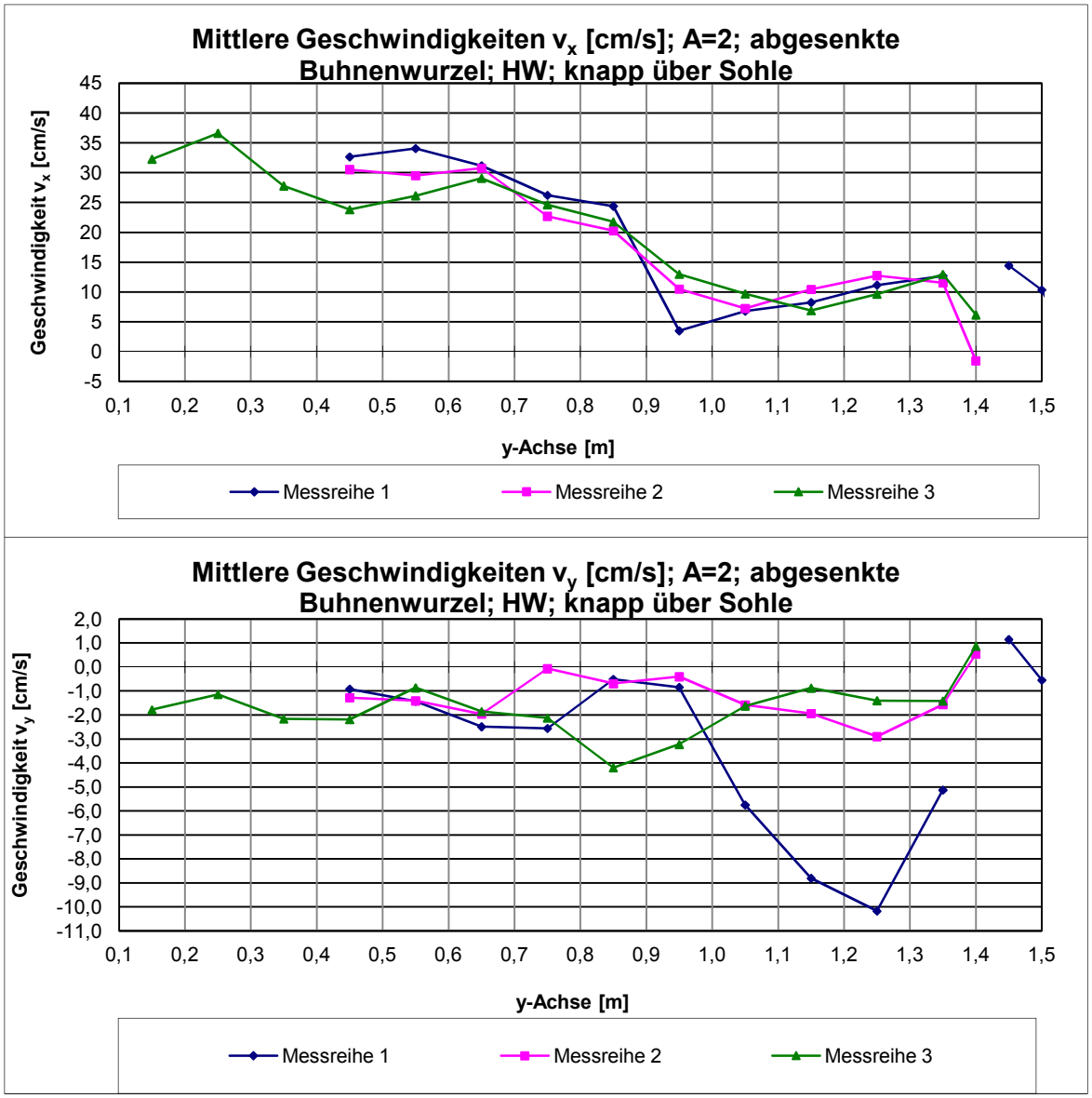


Abbildung 10.22 - Geschwindigkeitsprofile VS7 - Buhnenabstand 2 –abgesenkte Buhnenwurzel – HW – knapp über Gewässersohle

10.4 Versuchsserie 8

10.4.1 Sohlaufnahmen

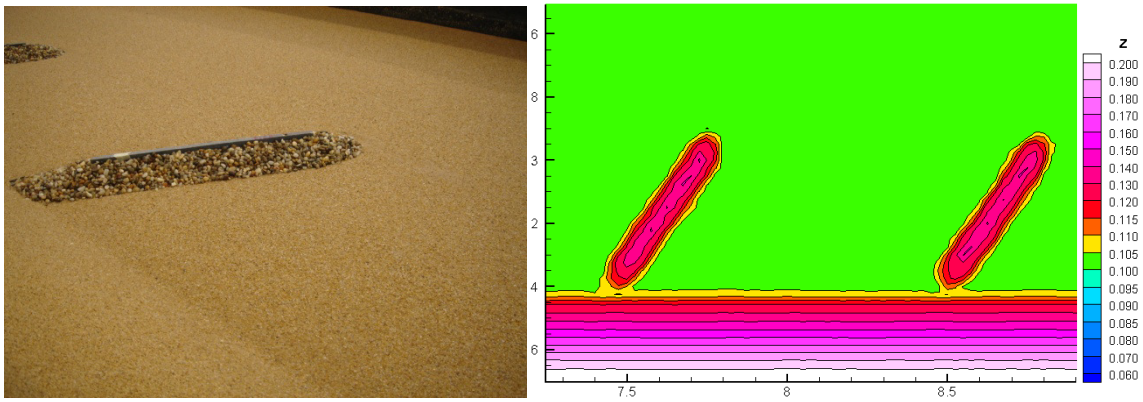


Abbildung 10.23 - Aufnahmen der Versuchsserie 8, Buhnenabstand 2, „ohne“ Buhnenwurzel, nach Niederwasserdurchfluss

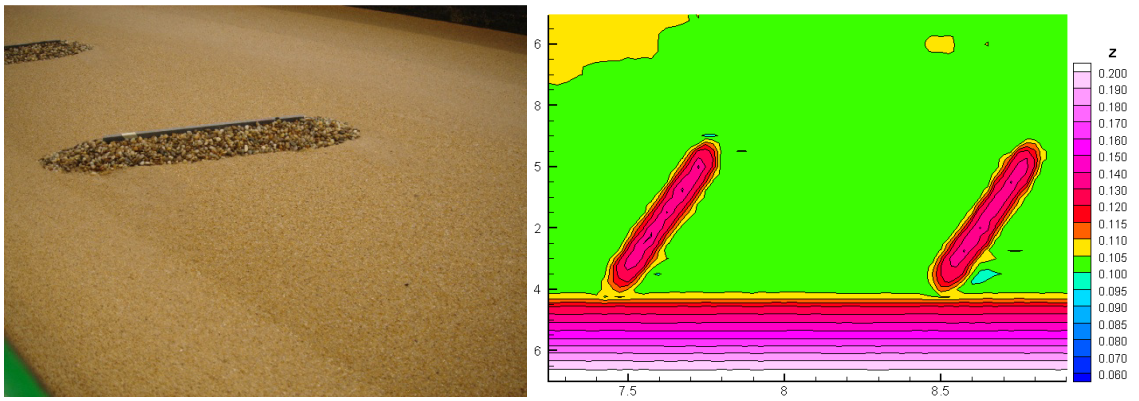


Abbildung 10.24 - Aufnahmen der Versuchsserie 8, Buhnenabstand 2, „ohne“ Buhnenwurzel, nach Mittelwasserdurchfluss

10.4.2 Geschwindigkeitsdiagramme

Mittelwasser:

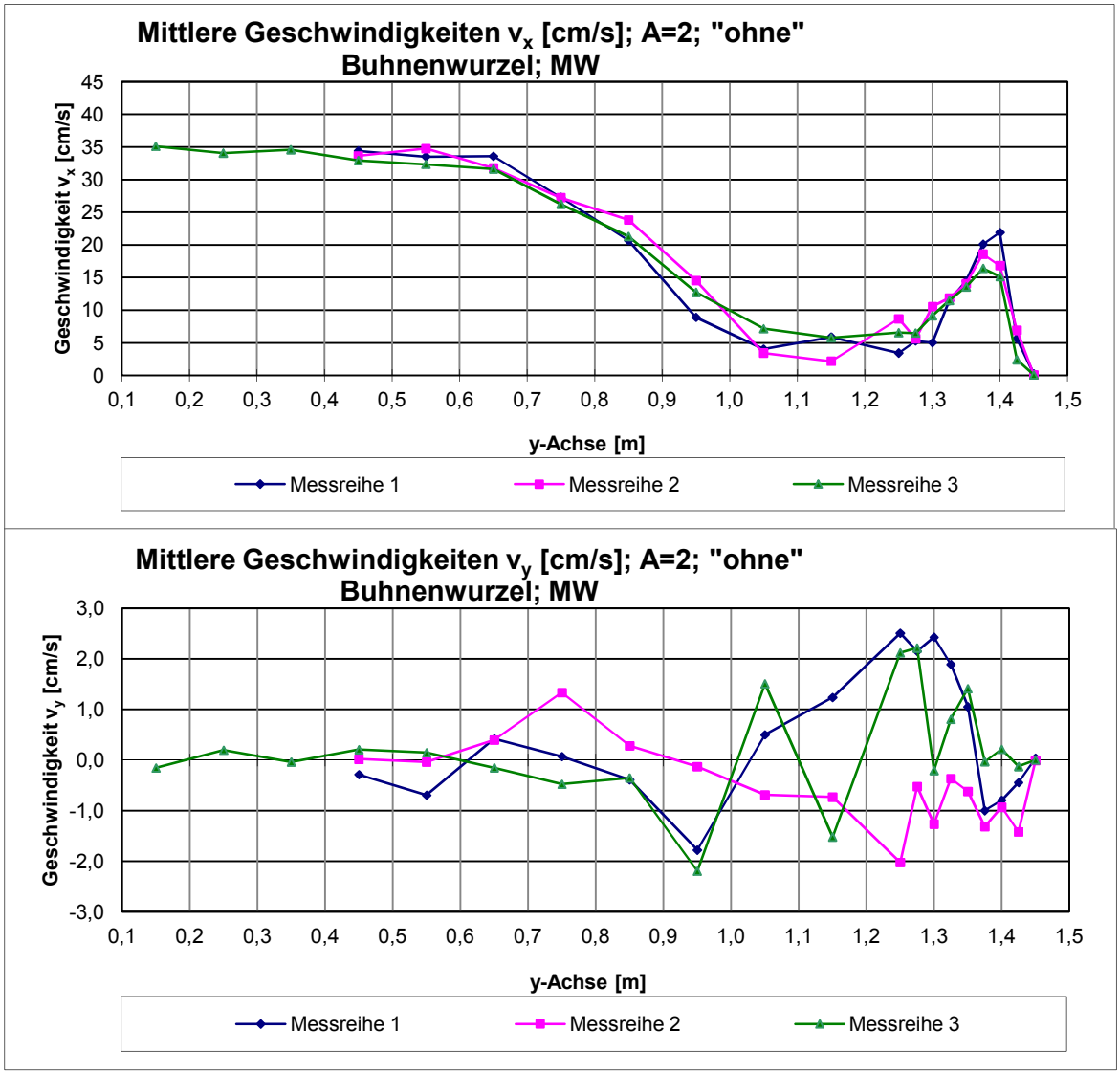


Abbildung 10.25 - Geschwindigkeitsprofile VS8 - Buhnenabstand 2 – „ohne“ Buhnenwurzel – MW

Hochwasser:

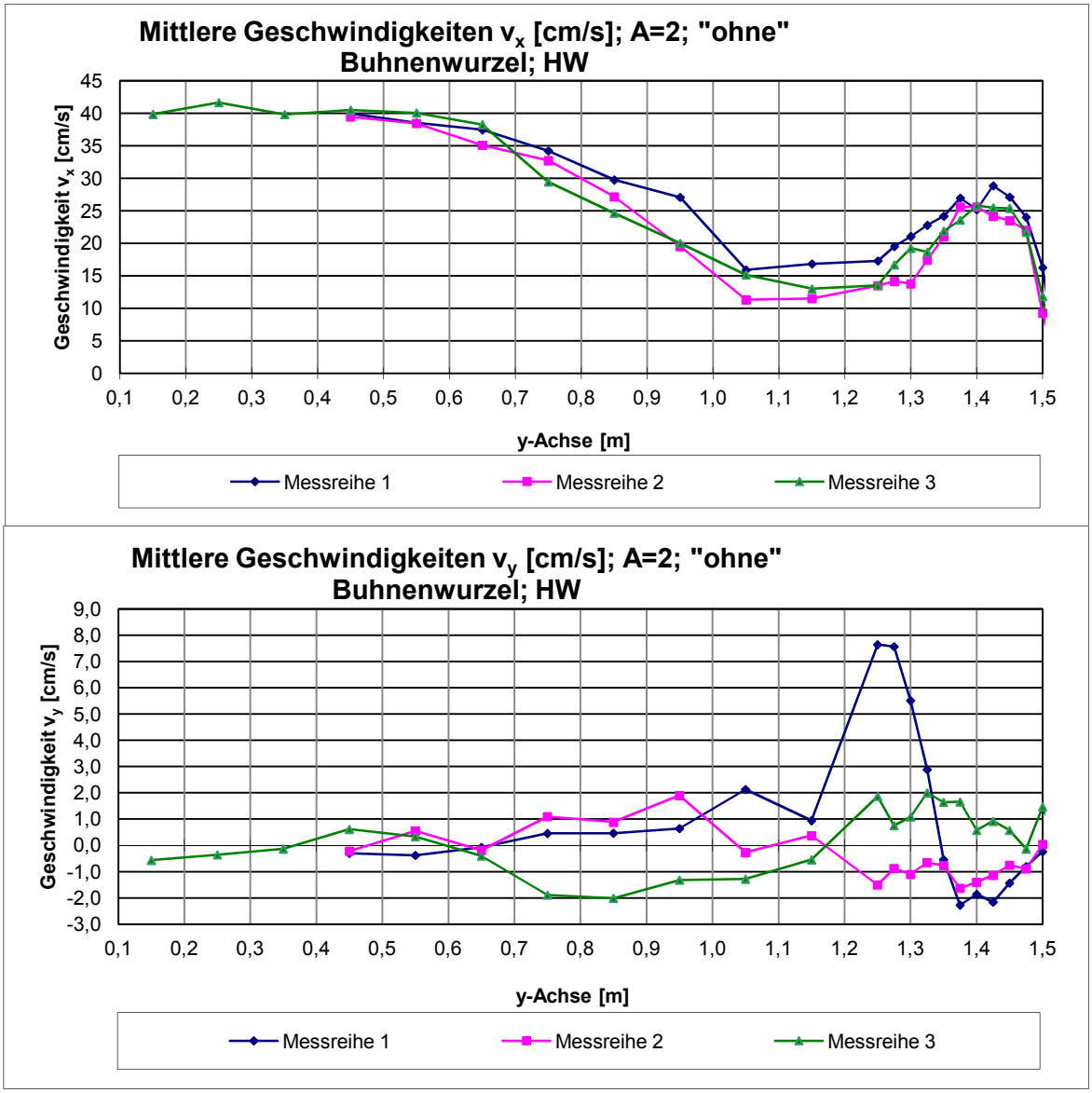


Abbildung 10.26 - Geschwindigkeitsprofile VS8 – Buhnenabstand 2 - “ohne“ Buhnenwurzel – HW

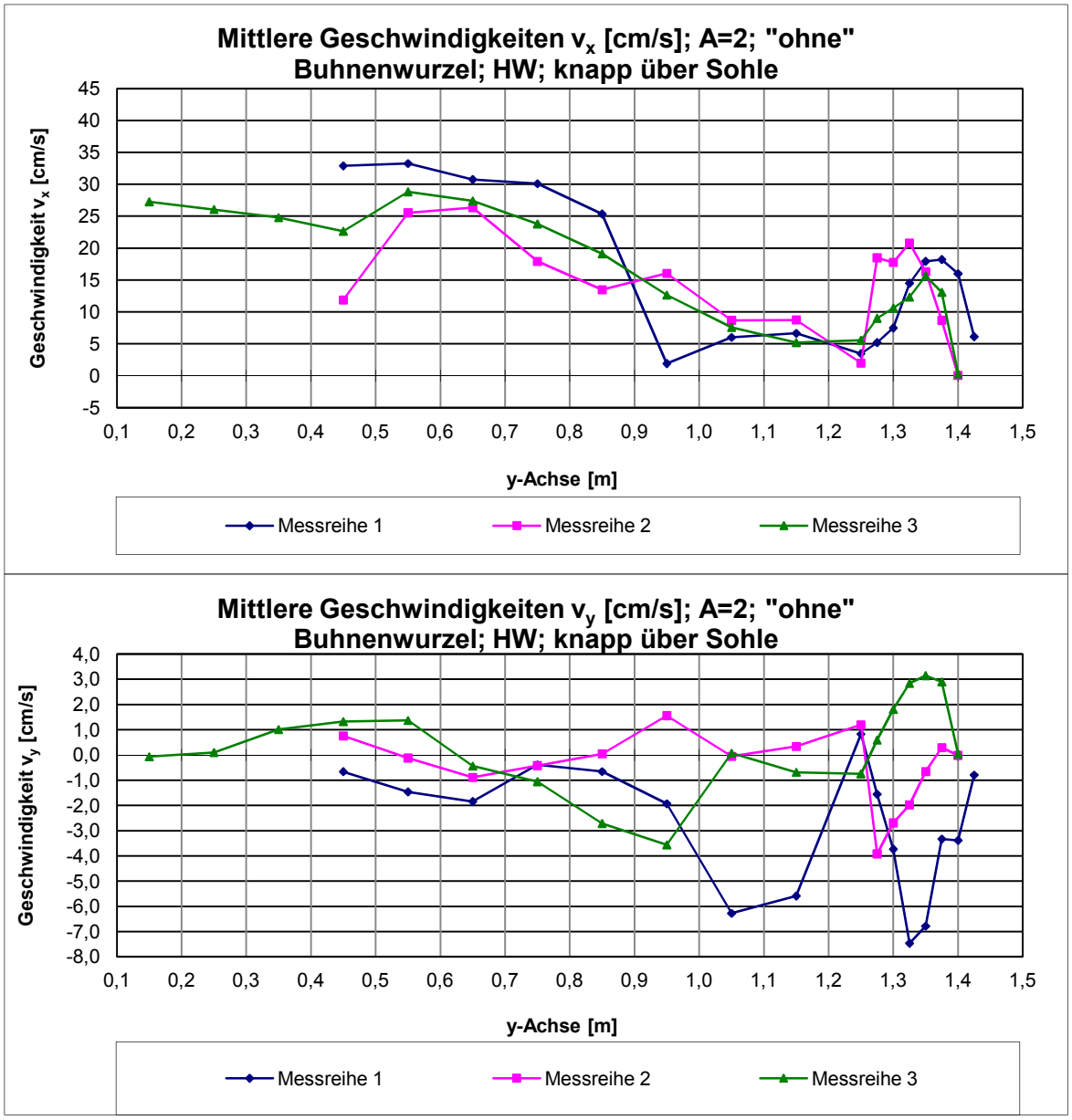


Abbildung 10.27 - Geschwindigkeitsprofile VS8 - Buhnenabstand 2 - "ohne" Buhnenwurzel - HW – knapp über Gewässersohle