

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Hüsener, Thorsten

Hydraulisch-morphologische Laboruntersuchungen an Stromregelungsbauwerken

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103368>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Hüsener, Thorsten (2015): Hydraulisch-morphologische Laboruntersuchungen an Stromregelungsbauwerken. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Messen und Überwachen im Wasserbau und am Gewässer. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 53. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 79-88.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Hydraulisch-morphologische Laboruntersuchungen an Stromregelungsbauwerken

Thorsten Hüsener

Stromregelungsbauwerke wie Buhnen, Parallel- und Deckwerke finden sich nahezu an allen freifließenden, schiffbaren Flüssen, in der Regel als Bestandteil eines durchgehenden Regelungssystems. Die Hauptaufgaben des Regelungssystems sind die Schaffung gleichmäßiger hydraulisch-morphologischer Verhältnisse, gleichmäßige Tiefen für die Schifffahrt und der Schutz der Ufer. Zur Bauwerkssicherung, Verbesserung der Regelungswirkung oder zur Berücksichtigung ökologischer Belange werden durch die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) bei Bedarf Modifikationen an den Bauwerken vorgenommen. Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) berät die WSV bei der Planung dieser Maßnahmen, muss dafür über entsprechendes Wissen verfügen und dieses aufgrund höherer und veränderter Anforderungen stetig erweitern. Hierzu werden derzeit generalisierte Untersuchungen in drei verschiedenen Laborrinnen der BAW durchgeführt. Es werden Prinzipuntersuchungen an Laborrinnen für rein hydraulische Messungen durchgeführt, die Auswirkungen auf Geschiebetransport und Dünenbildung untersucht sowie der Einfluss von Stromregelungsbauwerken und Dünen auf die lokale Strömung betrachtet. Bei Letzterem steht insbesondere die Erfassung von zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Strömungs- und Turbulenzdaten zur Verbesserung des Verständnisses der physikalischen Prozesse und der numerischen Modellierbarkeit der Dünenbewegung im Vordergrund.

Stichworte: Stromregelung, Buhnen, Dünen, Labormodell

1 Stromregelungsbauwerke - Stromregelungssysteme

An den frei fließenden Wasserstraßen im Zuständigkeitsbereich der WSV befindet sich eine große Zahl von Stromregelungsbauwerken, die in der Regel Bestandteil eines Stromregelungssystems sind. Typische Bauwerke eines Regelungssystems sind Buhnen, Deck- und Parallelwerke. Die Aufgaben der Bauwerke bzw. der Regelungssysteme sind vielfältig, sie dienen an den Wasserstraßen in erster Linie dem Erhalt einer zuverlässigen Wassertiefe für die Schifffahrt. Dies wird durch die Einengung des Abflussquerschnitts erreicht. Die Einengung sorgt zunächst für eine Anhebung des Wasserspiegels und einer Erhöhung der Sohlschubspannung mit der Folge einer gewünschten Sohleintiefung. Dieser folgt der Wasserspiegel wieder bis zu einem gewissen Maß, bis der Fluss ein Gleichgewicht aus Wasserspiegel- und Sohllage mit größerer Wassertiefe

erreicht. Weiterhin sollen Regelungssysteme neben gleichförmigen Abflussverhältnissen für einen gleichförmigen Feststofftransport sorgen. Daneben ist der Uferschutz und damit die Lagefixierung des Flussbetts noch eine wesentliche Aufgabe eines Regelungssystems. Alle deutschen Wasserstraßen weisen Regelungssysteme auf, deren Zustand sowohl zwischen den Gewässern als auch entlang der Gewässer stark variieren. Der Bau und die Unterhaltung der Bauwerke liegen im Aufgabenbereich der WSV. Neben der bereits genannten Funktion der Systeme zur Stromregelung sind in jüngerer Zeit weitere Anforderungen, wie zum Beispiel die ökologische Aufwertung der Strukturvielfalt oder die Schaffung von Ersatzhabitaten, hinzugekommen. Bei neuen Zielen oder Formen der Modifikation an den Bauwerken, insbesondere bei Bauwerksgruppen, wird häufig die Bundesanstalt für Wasserbau beratend hinzugezogen. Um zu den komplexen Wirkmechanismen der Regelungsbauwerke, einzeln oder als Gruppe, auskunftsfähig zu sein, betreibt die BAW hydraulisch-morphologische Strecken- und Prinzipmodelle verschiedener Skalen und Dimensionen, sowohl numerischer als auch gegenständlicher Art. Für grundsätzliche Fragestellungen werden Untersuchungen durchgeführt, die sich durch eine WSV- und Forschungssicht unterscheiden. Aus WSV-Sicht sind Auswirkungen von Modifikationen an Einzelbauwerken und Bauwerksgruppen auf Wasserspiegel, Sohlgestalt und Geschiebetransport von primärem Interesse. Aus Forschungssicht der BAW ist das Systemverständnis allgemein, die Dynamik und Charakteristik von Dünen mit Beeinflussung durch Regelungsbauwerke sowie die Strömung und Turbulenz im Nahbereich von Dünen und Bauwerken von besonderer Bedeutung, insbesondere für die weitere Entwicklung der HN-Modellierung und als Nachweis von deren Prognosefähigkeit. Da sich diese vielfältigen Fragestellungen nicht in einem einzigen Modell oder Modelltyp untersuchen lassen, wurde eine Modellfamilie konzipiert.

2 Laborrinnen als Modellfamilie

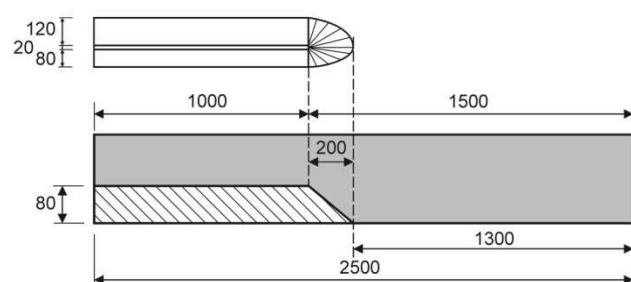
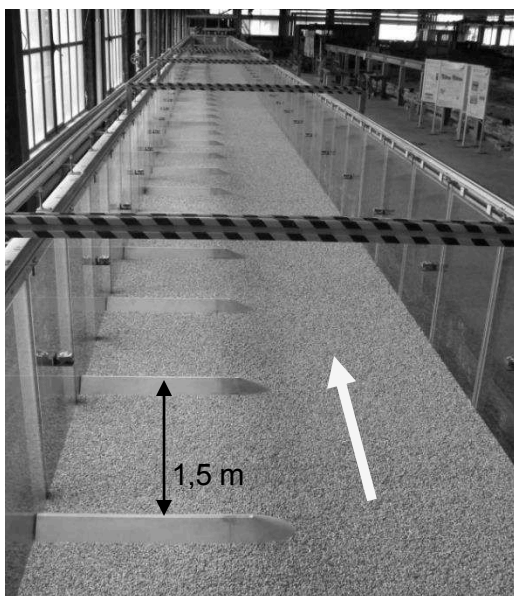
2.1 Untersuchungsschwerpunkte

Es werden die Auswirkungen von Modifikationen an einem bestehenden, gleichförmigen Regelungssystem aus Buhnen auf den Wasserspiegel, den Geschiebetransport im Dünenregime und auf das Strömungsfeld im Nahbereich von Bauwerken und Dünen untersucht. Da die Modellierung und die Erfassung der relevanten physikalischen Größen nicht gleichermaßen an einem einzigen Modell erfolgen können, wurde diese in drei Laborrinnen realisiert

2.2 Hydraulische Versuche an um- und überströmten Bauwerken

In einer 2,5 m breiten und ca. 60 m langen Laborrinne werden rein hydraulische Versuche über das gesamte Abflussspektrum von umströmten bis stark überströmten Regelungsbauwerken durchgeführt. Als Vorversuch (V0) für die Rauheitsbeiwerte der Kiessohle (Korngröße 4-8 mm) wurde eine Versuchsserie ohne Regelungsbauwerke durchgeführt. In der Grundvariante (V1) weisen die einseitig in der Rinne eingebauten Buhnen (halbes Flussmodell) durchgehend ein Verhältnis von Abstand zu Länge von 1 zu 1,5 und eine Höhe von 80 mm auf (siehe Abbildung 1), die Kiessohle und die Sollwasserspiegel haben ein Gefälle von 0,6‰. Der jeweilige Versuch in der Grundvariante ist auf einen Normalabfluss dimensioniert. Die Versuchsserien reichen von umströmten Buhnen mit 60 mm Wassertiefe bis hin zu stark überströmten Buhnen mit 200 mm Tiefe. Die eingesetzte Messtechnik umfasst:

- Magnetisch-induktive Durchfluss- und Strömungsmesser
- Externe Ultraschallmesstöpfe zur Wasserspiegelzeichnung
- Photogrammetrisches 3-Kamera-System zur Messung der Oberflächengeschwindigkeit, der Wasserspiegel-, Sohl- und Bauwerkstopografie (Kontrollmessungen) (Henning, 2008)
- 3D-ADV (Acoustic Doppler Velocimeter)



Einseitige Anordnung von Regelungsbauwerken („halbes“ Modell).

Feste Sohle: Kiesschüttung 4–8 mm

Gefälle: 0,6 ‰

Wassertiefe: 60 bis 200 mm

Abbildung 1: Oben: Skizze der Aufsicht. Links: Laborrinne mit Blick in Fließrichtung, rechts: Skizze der Modellbuhnen, Querschnitt

Folgende Varianten wurden bisher untersucht:

- V0: unverbaute Rinne mit Kiessohle, Vorversuch
- V1: Referenzregelbuhnen, Buhnenabstand A zu Buhnenlänge $L = 1,5$
- V2: Deckwerk im Variantenbereich (s. Abbildung 1)
- V3: Doppelter Buhnenabstand im Variantenbereich $A/L=3$
- V4: Doppelter Buhnenabstand wie V3, teilverlandete Buhnenfelder

Als Beispiel für ein Versuchsergebnis ist in Abbildung 2 die Wasserspiegeldifferenz der Deckwerksvariante (V2) zu der Referenzvariante mit Standardbuhnen (V1) bei einer Wassertiefe mit stark überströmten Bauwerken dargestellt. Das im Vergleich zur Buhnenfeldabfolge glattere Deckwerk führt zu einem Absinken des Wasserspiegels im Variantenbereich. Der Vergleich der gemessenen Differenz mit Ergebnissen verschiedener numerischer Modellansätze zeigt, dass diese den Verlauf sehr gut nachbilden können (Telemac 3D, nicht hydrostatisch). Es zeigt aber auch, dass nicht alle numerischen Ansätze zu einem gleichmaßen belastbaren Prognoseresultat kommen (*Hüsener 2012, Goll 2013b*).

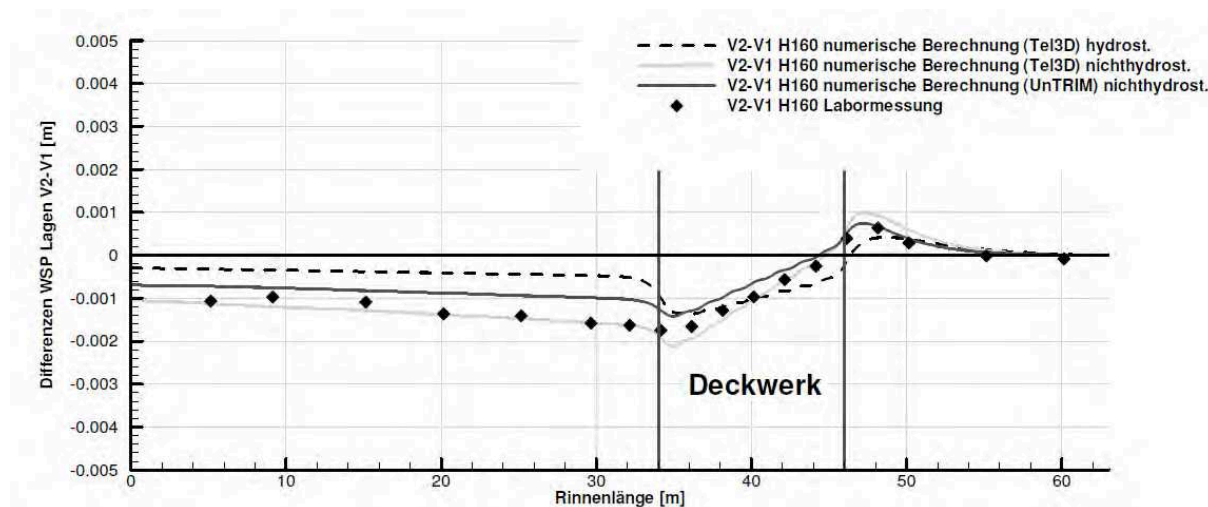


Abbildung 2: Wasserspiegeldifferenz V2–V1 bei stark überströmten Bauwerken ($h=160$ mm), Vergleich von Messung und verschiedenen HN-Modellierungen

2.3 Hydraulisch-morphologische Versuche an umströmten Bauwerken

Versuche zur Auswirkung von Stromregelungsbauwerken auf die Gewässersohle, insbesondere bei ausgeprägtem Geschiebetransport in Form von Dünen werden in einer ca. 30 m langen Rinne durchgeführt. Diese Rinne ist zweigeteilt, mit jeweils 2 m Abflussbreite (s. Abbildung 3). Die linke Rinnenhälfte dient zur Untersuchung der Dynamik und Charakteristik von Dünen, die rechte Rinnenhälfte der Messung von Strömungsparametern im Nahbereich von Buhnen und fixierten Dünen.

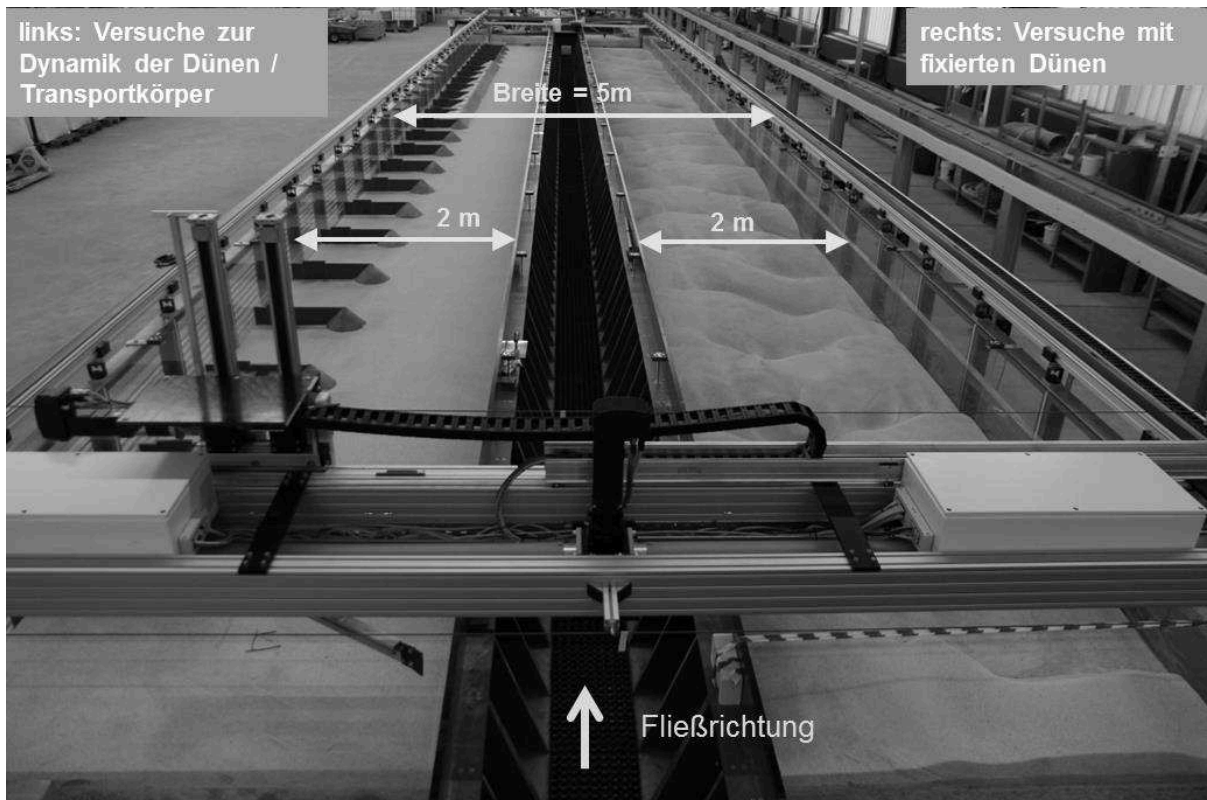


Abbildung 3: Zweigeteilte Laborrinne mit 30 m Länge und jeweils 2 m Breite

Das Versuchskonzept für die linke Rinnenhälfte beinhaltet folgende Untersuchungsgruppen:

1. Vorversuche zur Dünenentwicklung und -bewegung ohne Regelbauwerke bei einem Gefälle von 0,6 ‰, Normalabfluss bei drei verschiedenen Abflüssen und Wassertiefen und einer Sandsohle mit $d_m=1$ mm (nahezu Einkornmaterial). Als Variante wurde die Auswirkung auf die Dünendynamik durch die Befestigung der Sohle auf halber Rinnenbreite, mittlerer Sohlhöhe und einer Länge von 6 m untersucht (*Henning 2013*).
2. Regelbuhnen, umströmt, mit einem Gefälle von 0,6 und 1,2 ‰ bei Normalabfluss (Wasserstand knapp unter Bauwerksoberkante).
3. Verschiedene Formen und Variationen von Buhnenkerben, d.h. durchströmbare Öffnungen im Buhnenrücken mit Einfluss auf die Buhnenfeldwirbel mit einer durchgehenden Nebenströmung (*Richter 2011*).
4. Variation der Regelbauwerke: Doppelter Buhnenabstand, durchgehend und in Teilbereichen, Deckwerke statt Buhnen in Teilbereichen, den Buhnen vorgelagerte Kopfschwellen.

Die verwendete Messtechnik ist die gleiche wie in Kapitel 2.2, jedoch erhält das photogrammetrische Messsystem zur Sohlvermessung hier eine wesentlich höhere Bedeutung. Als Datengrundlage für die Charakteristik der Dünen dienen

hochauflösende Sohlvermessungen der ruhenden Sohle nach dem jeweiligen Versuchsende. Zur Beschreibung der Dünendynamik wurden lokale Intervallmessungen durch das Wasser durchgeführt. Zusätzliche Messtechnik wurde für die Quantifizierung des Feststoffein- und -austrags eingesetzt. Der Eintrag erfolgt diskontinuierlich über eine gravimetrische Dosiereinrichtung in stündlichen Intervallen. Der Austrag wird kontinuierlich über eine Unterwasserwaage erfasst. Die Versuchsparameter Durchfluss und Feststoffeintrag für die Dünenversuche wurden in einem iterativen Kalibrierprozess ermittelt. Für die Grundlagenversuche ohne Buhnen sind die wesentlichen Daten in Tabelle 1 für drei Wassertiefen dargestellt (Henning 2013).

Tabelle 1: Versuchsparameter der Vorversuche ohne Regelungsbauwerke (Q=Durchfluss, G_s=Feststoffeintrag, Fr= Froudezahl, Re= Reynoldszahl, Fr*=Feststoff-Froudezahl, Re*= Feststoff-Reynoldszahl)

Versuchs- bezeichnung	Dauer [h]	Wassertiefe <i>h</i> [m]	<i>Q</i> [m ³ /s]	<i>G_s</i> [kg/h]	<i>Fr</i>	<i>Re</i>	<i>Fr*</i>	<i>Re*</i>
W1	24	0,17	0,140	37	0,35	6100	0,06	26
W2	18	0,22	0,185	47	0,36	8700	0,07	29
W3	18	0,27	0,240	60	0,37	11500	0,09	32

3 Modellkonzeption „fixierte Sandsohle“

3.1 Versuchsaufbau

Das Phänomen des Geschiebetransportes in Form von ausgeprägten Dünen ist ein intensives Wechselspiel aus der Fluidströmung und den Umlagerungsprozessen des Feststoffkorns. Die wesentlichen Transportkräfte resultieren aus der Fließgeschwindigkeit und der Turbulenz im Nahbereich der Sohle. Um in diesem Nahbereich die Strömungsgrößen über eine längere Zeit erfassen zu können, wären stationäre geometrische Bedingungen erforderlich, die jedoch durch die ständige Umformung der Sohle und der Fortbewegung der Dünen lokal nicht herrschen. Detaillierte Kenntnisse der Nahfeldströmung sind die Voraussetzung für ein verbessertes Prozessverständnis und belastbare Messdaten sind eine notwendige Grundlage für die Entwicklung und Überprüfung hydropnumerischer Modellverfahren.

Der Mangel an geometrischer Stationarität im Nahbereich der Dünen führte schon mehrfach, z.B. bei Maddux *et al.* (2003) zu der Überlegung, Strömungsversuche über unbeweglichen Dünen durchzuführen. Es kamen in der Regel

immer künstliche Dünen zum Einsatz, die das Strömungsfeld nur bedingt naturnah wiedergeben. Im Zuge der laufenden Untersuchungen zur Dynamik der Dünen kam die Idee auf, diese in einem bestimmten Zustand „einzufrieren“, ohne dabei wesentliche Eigenschaften wie die Kornrauheit zu verändern. Bei *Benson et al. (2001)* oder *Kashyapa et al. (2010)* werden Methoden zur Fixierung von Sandoberflächen beschrieben. Nach eingehenden Verfahrenstests hat sich die Verwendung eines 2-Komponentenklebers als zielführend herausgestellt. Zur Ausbildung einer Dünensohle ohne Bauwerksbeeinflussung wurden im rechten Teil der Laborrinne die Versuchsparameter entsprechend der in Tabelle 1 dargestellten Daten für den Versuch W3 über einen Zeitraum von 24 h eingestellt. Im Anschluss wurde die Sohle einmal im eingestauten Zustand durch das Wasser hindurch und anschließend nach der Entwässerung photogrammetrisch vermessen. Zur Fixierung wurde im ersten Schritt ein Flüssigleim aus Kaurit 243-Pulver und Wasser im Verhältnis 1:1 (Gewichts-%) hergestellt. Anschließend wurde der Leim mit etwa 4 l/m^2 durch ein Airless-Spray-Verfahren aufgebracht. Bei diesem Verfahren wird der Leim durch hohen Druck, aber ohne Pressluft vernebelt. Der Sprühnebel fällt drucklos auf die Sandoberfläche nieder, ohne diese zu verändern. Die Auftragsmenge wurde so dimensioniert, dass der Kleber vollflächig mindestens 5 mm tief eindringt und einen zusammenhängenden Verbund ergibt. Im Anschluss an das Aufbringen des Leims wurde als Reaktionsmittel Ameisensäure (30%) mit ca. $0,25 \text{ l/m}^2$ ebenfalls im Sprühverfahren gleichmäßig aufgebracht. Nach mehreren Tagen bei guter Lüftung war die Sohle vollständig ausgehärtet. Augenscheinlich ist keine Veränderung der Oberflächenrauheit festzustellen (s. Abbildung 4). Die Oberfläche ist dauerhaft fest und geschlossen, dabei aber noch wasserdurchlässig.

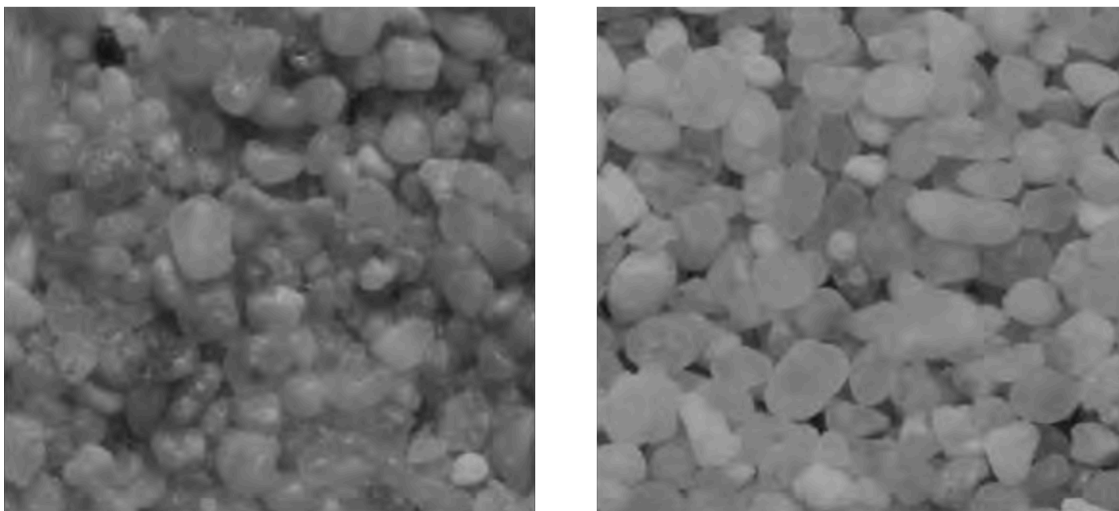


Abbildung 4: Vergleich des Korngefüges, links mit Leimverbund, rechts ohne

Nach dem Leimauftrag wurde die Sohle erneut photogrammetrisch vermessen. Die Differenz zu der Oberfläche vor dem Leimauftrag zeigt, dass ein Einsinken im Mittel um 0,5 mm stattgefunden hat. Ca. 90 % der Fläche liegt im Bereich 0,6 mm Anhebung und 1,5 mm Absenkung.

3.2 Messung der Fließgeschwindigkeit

Zur Messung der Fließgeschwindigkeit wurden 3D-ADV-Sonden der Fa. Nortek eingesetzt (Vectrino). Für den sohnahen Bereich wurde ein „downlooking“-Messkopf eines Vectrino Profilers verwendet, für die oberflächen- und randnahen Messungen ein „sidelooking“-Messkopf eines Vectrino+. Die Messungen wurden entsprechend der in Tabelle 2 dargestellten Sonden-Parameter durchgeführt.

Tabelle 2: Messparameter Vectrino-Sonden

	Sample Rate	Velocity Range	Cell Start	Cell End	Cell Size	n Cells	Power Level	Ping Algorithm	Measure. Time
Vectrino Profiler	100 Hz	1,5 m/s	50	50	4 mm	1	high -	min	100 s
Vectrino +	100 Hz	1,0 m/s	-	-	7 mm	1	high	-	100 s

Das Messraster ist im Längsschnitt so angeordnet, dass Bereiche mit steilem Sohlradienten mit höherer Dichte abgetastet wurden. In der Vertikalen wurden oberflächen- und sohnah ebenfalls mit einer größeren Dichte abgetastet. Das Messlängsprofil verläuft von Rinnenstation 18 m bis 23 m in der Rinnenmitte. Parallel zu dieser Zentralmessung wurden zwei weitere Längsprofile parallel um 25 mm versetzt zu beiden Seiten gemessen. Zusätzlich wurde ein Querprofil bei Rinnenstation 20,85 m gemessen.

3.3 Ergebnisdarstellung und –verwendung

Die Rohdaten wurden plausibilisiert, einer Filterung nach *Goring et al. (2002)* unterzogen und gemittelt. Für die Daten der Vectrino+ wurde die Software WinADV32 (*Wahl 2000*) verwendet, für die Daten des Vectrino Profiler das in der BAW erstellte Matlab-Script VTMT, welches die gleichen Filterroutinen verwendet wie WinADV32.

Eine beispielhafte Darstellung eines gemessenen Vektorfeldes zeigt Abbildung 5. Deutlich zu erkennen sind die Strömungswalzen mit horizontaler Achse quer zur Hauptfließrichtung im Lee der Dünen bei Rinnenstation 20,1 m und 22,3 m. Keine Walzenbildung entsteht im Strömungsschatten bei Rinnenstation 21,2 m, obwohl dort die Dünengeometrie ähnlich ist. Die Düne ist etwas kleiner und flacher als ihre Nachbarn.

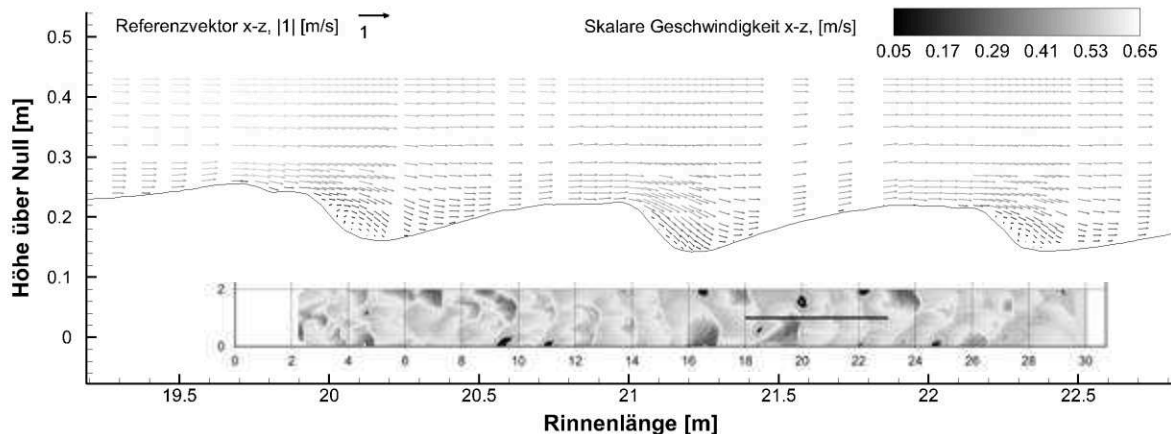


Abbildung 5: Längsschnitt des Vektorfeldes, die Vektoren zeigen die Komponenten v_x und v_z (m/s) (Darstellung überhöht, innen: Sohltopografie mit Profilschnitt)

In einem Forschungsprojekt der BAW wird derzeit an der Verbesserung der numerischen Modellierbarkeit von Dünentransport gearbeitet (*Goll et al. 2013 a/b*). Hierfür stellen diese Messungen die wesentliche hydraulische Validierungsgrundlage dar.

4 Resümee und Ausblick

Die Modellfamilie zur Untersuchung von Modifikationen an Stromregulierungsbauwerken ermöglichte die Darstellung einer ganzen Reihe von Maßnahmen, wie sie in der Unterhaltungspraxis der WSV regelmäßig vorkommen. Zu diesen Maßnahmen gehören Bühnenkerben, Kopfschwellen, Deckwerke, Sohlbefestigungen, die Beseitigung von Bühnenfeldverlandungen und weitere. Es werden Auswirkungen auf den Wasserspiegel, den Geschiebetransport und das Strömungsfeld untersucht und beschrieben. Ein Verfahren, um durch hydraulische Prozesse entstandene Dünensohlen zu fixieren ohne die Strömung zu verändern, wurde entwickelt und großflächig in einer Laborrinne angewandt. Die Untersuchungen und Messungen in den Labormodellen wurden eng begleitet durch numerische Simulationen, mit dem Ziel, die anfallenden Messdaten zu Validierungszwecke einzusetzen und die Prognosefähigkeit numerischer Modelle nachzuweisen und zu verbessern. Weiterhin liefern die Geschwindigkeitsmessungen im Nahbereich von Dünen wertvolle Daten zum Prozessverständnis und zur Entwicklung von numerischen Verfahren zur Simulation des Dünentransportes.

Die Untersuchungen und Auswertungen sind noch nicht abgeschlossen und werden weiter fortgeführt.

5 Literatur

- Benson, I.A., Valentine, E.M., Nalluri, C. Bathurst, J.C. (2001): Stabilising the sediment bed in laboratory flumes, *Journal of Hydraulic Research*, Volume 39, Issue 3, 2001
- Goll, A., Kopmann, R., Villaret, C. (2013a): Numerical Modelling of flumes with moving dunes – TELEMAC3D and Sisyphe. *Proceedings of Marine and River Dune Dynamics – MARID IV*, 15. & 16. April, Bruges, Belgium. VLIZ Special Publication 65
- Goll, A., Kopmann, R., Baron, M., (2013b). Kontinuierliche Validierung hydrodynamischer und morphodynamischer Modelle mit physikalischen Modellversuchen. *Wasserwirtschaft*, Ausgabe 12/2013, S 28-33, Springer Verlag.
- Goring D., Nikora, V.I. (2002): Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data. *Journal of Hydraulic Engineering*, January 2002
- Henning, M., Hentschel, B., Hüsener, T., (2008): Determination of channel morphology and flow features in laboratory models using 3D-photogrammetry. *Proceedings of River Flow 2008 Conference*, Cesme, Turkey
- Hüsener, T., Faulhaber, P., Baron, M. (2012): Modifikationen in bestehenden Stromregelungssystemen an Wasserstraßen. *Wasserbausymposium 2012, Tagungsband*, TU Graz
- Henning, M. (2013): Mehrdimensionale statistische Analyse räumlich und zeitlich hochaufgelöster Oberflächen von Dünenfeldern. *Dissertation*, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig.
- Kashyapa, S., Doutreleau, B., Bou-Botros, G., Rennie, C.D., Townsends, R. (2010): A semi-permanent method for fixing sand beds in laboratory flumes. *Journal of Hydraulic Research*, Volume 48, Issue 3, 2010
- Maddux, T.B., McLean, S.R. and Nelson, J.M. (2003): Turbulent flow over three-dimensional dunes: 2. Fluid and bed stresses. *Journal of Geophysical Research* 108
- Richter, K. (2011): Physikalische Modellversuche zur Auswirkung von Kerbbuhnen auf die Morphologie und den Geschiebetransport des Flussschlauchs. *Diplomarbeit*, TU Kaiserslautern, Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft
- Wahl, T. L. (2000) "Analyzing ADV Data Using WinADV". 2000 Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management, American Society of Civil Engineers, July 30 - August 2, 2000, Minneapolis, Minnesota

Autor:

Dipl.-Ing. (FH) Thorsten Hüsener

Bundesanstalt für Wasserbau

Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Referat Flussbau (W2)

Kußmaulstraße 17

76187 Karlsruhe

Tel: +49 721 9726 4070

Fax: +49 721 9726 4540

E-Mail: thorsten.huesener@baw.de