

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Schnauder, Ingo; Rüter, Nils; Anlanger, Christine
Feldexperimente und Messungen der Strömung um
Buhnen

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/20.500.11970/103398>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Schnauder, Ingo; Rüter, Nils; Anlanger, Christine (2015): Feldexperimente und Messungen der Strömung um Buhnen. 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. 395-404.

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.



Feldexperimente und Messungen der Strömung um Buhnen

Ingo Schnauder
Nils Rüter
Christine Anlanger

Buhnen sind seit Beginn des technischen Flussbaus ein wichtiges Gestaltungselement zur Strömungs- und Sedimentkontrolle. Um ihre Auswirkungen auf die Strömung und Turbulenz zu quantifizieren, wurden Feldexperimente mit temporär eingebauten Versuchsbuhnen in der Müggelspree bei Berlin durchgeführt. Durch Kontrolle der Versuchsbedingungen konnten dabei um- und überströmte Buhnen sowie zwei unterschiedliche Längen / Breitenverhältnisse der Buhnenfelder untersucht werden. Analysen der Messungen mit ADV-Sonden ergaben ein differenziertes Bild der Geschwindigkeits- und Schubspannungsverteilungen, das zum Verständnis der Austauschprozesse und der Sedimentumlagerungen in Buhnenfeldern beiträgt.

Stichworte: Feldmessungen, Feldexperimente, Strömungsmessung, Buhnen, Buhnenfelder, ADV (Acoustic Doppler Velocimeter)

1 Einführung

Im Flussbau werden Buhnen seit Jahrhunderten zur Schiffbarmachung eingesetzt, insbesondere an großen Flüssen wie Elbe, Donau und Rhein (Abbildung 1). Sie engen den Fließquerschnitt ein, erhöhen damit die Fließgeschwindigkeit und führen so zu einer Eintiefung und Freihaltung der Fahrrinne. In den Buhnenfeldern wird Sediment zurückgehalten und die Ufer damit vor Erosion geschützt.

In letzter Zeit werden Buhnen auch vermehrt an kleineren Fließgewässern im Rahmen von Gewässerrenaturierungen eingesetzt. Dabei macht man sich ihre förderliche Wirkung auf die Struktur-, Strömungs- und Habitatvielfalt zu Nutze oder setzt sie als Initialmaßnahmen zur Remäandrierung der Laufform ein. Bauform und eingesetzte Materialien der Buhnen sind dabei sehr unterschiedlich, z.B. Wasserbausteine, Tot- oder Lebendholz und beeinflussen Strömungsmuster und Sedimentabsetzverhalten in den Buhnenfeldern.

In der Literatur wurden im Wesentlichen drei Faktoren identifiziert, die die Wirkung von Buhnen / Buhnenfeldern bestimmen:

- die Geometrie der Buhnenfelder, insbesondere ihr Längen / Breitenverhältnis [z.B. *Sukhodolov et al. (2002)*, *Weitbrecht (2004)*]
- die Wassertiefe in Bezug zur Buhnenhöhe, wobei zwischen Umströmung und Überströmung der Buhnen unterschieden wird [z.B. *Uijtewaal (2005)*, *Yossef (2005)*]
- die Form der Buhne (z.B. Hakenbuhnen, Kerbbuhnen, Knickbuhnen) und ihr Winkel zur Strömung (Inklinationswinkel) [z.B. *Weitbrecht (2004)*, *Uijtewaal (2005)*]



Abbildung 1: Buhnenfeld im Rhein bei Duisburg (Quelle: *Oceancetaceen / A. Chodura*)

Im Fokus der vorliegenden Studie lag die Untersuchung der Unterschiede bei Um- / Überströmung und verschiedenen Längen / Breitenverhältnissen. Buhnenform und Inklinationswinkel wurden nicht variiert. Ziel war eine möglichst detaillierte Erfassung der Strömungsmuster, einschließlich der Schubspannungsverteilung, und eine Analyse der kohärenten Strukturen in Hinblick auf den Stoffaustausch zwischen der Hauptströmung und den Zirkulationsströmungen in den Buhnenfeldern.

2 Feldexperimente

2.1 Untersuchungsgebiet und -bedingungen

Die Experimente wurden an der Müggelspree bei Freienbrink im Sommer 2007 durchgeführt. An der IGB-Versuchsstrecke lagen eine vorhandene Infrastruktur und gut kontrollierbare Versuchsbedingungen vor. Dazu relativ konstant gehaltene Abflüsse durch die Wehrsteuerung Große Tränke oberstrom.

Entlang eines geraden Flussabschnitts wurden 7 Buhnen in der Spree eingebaut. Die Messungen erfolgten im vorletzten Buhnenfeld (Nr. 5), um eine voll entwickelte Anströmung / Hauptströmung zu gewährleisten. Dazu wurden die letzten drei Buhnen als dreidimensionale Volumenkörper gestaltet, d.h. ein Gerüst aus Dachlatten in der fließenden Welle errichtet und daraufhin mit Schaltafeln und Noppenbahnen verkleidet. Die ersten vier Buhnen, die zur Entwicklung der Strömung dienten, wurden als vertikale Wände mit Schaltafeln ausgeführt (Abbildung 2).



Abbildung 2: Experimentelle Buhnenfelder mit Messrahmen und ADVs (Experiment 2)

Die Buhnenkrone lag dabei unterhalb des Wasserspiegels, damit zunächst überströmte Zustände untersucht werden konnten. Für die Umströmung der Buhnen wurden Aufsätze konstruiert und damit die Buhnenhöhe über die Wasserspiegelhöhe hinaus verlängert. Das Längen / Breitenverhältnis wurde variiert, indem in der zweiten und dritten Versuchsreihe eine Buhne (Nr. 6) entfernt wurde. Damit verdoppelte sich das Längen / Breitenverhältnis (Tabelle 1).

Tabelle 1 Versuchsbedingungen und hydraulische Kennwerte

Experiment	Längen / Breiten- verhältnis (-)	Abfluss Q (m ³ /s)	Mittl. Fließ- geschwindig- keit U (m/s)	Mittl. Wassertiefe H (m)	Neigung WSP-Lage I (× 10 ⁻⁵)	Mittl. Sohlenschub- spannung u* (m/s)	Froude-Zahl Fr (-)	Reynolds- Zahl Re (× 10 ⁵)
1 - überströmt	1,3	7,0	0,43	0,95	0,81	0,03	0,14	4,1
2 - umströmt	1,3	7,5	0,46	1,05	1,00	0,03	0,14	4,4
3 - umströmt	2,9	9,3	0,48	1,15	1,40	0,04	0,14	5,0

2.2 Messtechnik

Den Schwerpunkt der Messungen bildeten punktuelle Geschwindigkeitsmessungen mit 5 parallel eingesetzten ADV-Sonden (Typ: Vectrino+ und ADV, NORTEK AS, Norwegen). Dazu wurde ein Messrahmen mit Messbrücke konstruiert und die ADVs durch justierbare Halter vertikal traversiert. Pro Experiment wurde ein Messraster mit 70 - 90 Messlotrechten und jeweils 10 Messpunkten über die Wassertiefe abgedeckt.

Die Punktmessungen gingen über 4 Minuten bei einer Messfrequenz von 25 Hz. Zeitreihen der drei Geschwindigkeitskomponenten wurden daraufhin gefiltert, statistisch ausgewertet (Software Explore ADV) und in Profil-, Vektor- und Iso-tachendarstellungen aufgetragen.

Zusätzlich erfolgten an wenigen ausgewählten Messpunkten am Buhnenkopf und im Buhnenfeld Langezeitmessungen über 50 Minuten, um statistische Korrelationen vornehmen zu können und die kohärenten turbulenten Strukturen und Austauschprozesse zu erfassen.

Ergänzt wurden die Messungen um Tracermessungen mit Farbstoff und Schwimmkörpern, sowie Vermessungen der Sohlenlage (siehe *Anlanger, 2008*).

3 Ergebnisse

3.1 Horizontale Geschwindigkeitsverteilung

Die Geschwindigkeitsverteilungen für den umströmten und überströmten Fall unterscheiden sich grundlegend. Bei der Umströmung bildet sich eine große horizontale Rezirkulationszelle aus, die fast das gesamte Bühnenfeld ausfüllt (Abbildung 3). Zum Zentrum der Zelle hin verringern sich die Geschwindigkeiten und eine Stillwasserzone entsteht. In den Randbereichen am Ufer bildet sich eine zweite, kleinere Rezirkulationszelle, die beim größeren Längen / Breitenverhältnis etwa ein Viertel der Bühnenfeldlänge einnimmt. Das Strömungsmuster ist quasi-zweidimensional, d.h. über die Wassertiefe konstant.

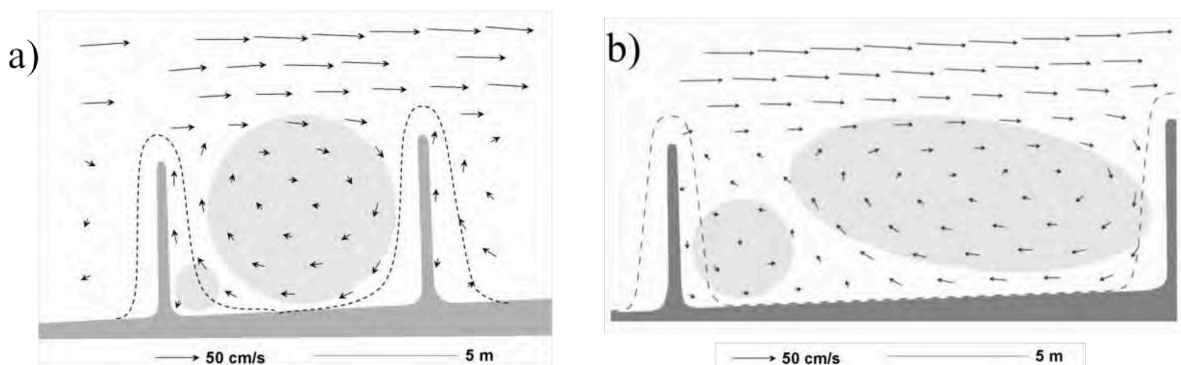


Abbildung 3: Tiefengemittelte Geschwindigkeitsverteilungen bei Umströmung; a) Experiment 2, b) Experiment 3. Grau hinterlegt sind die Rezirkulationszellen.

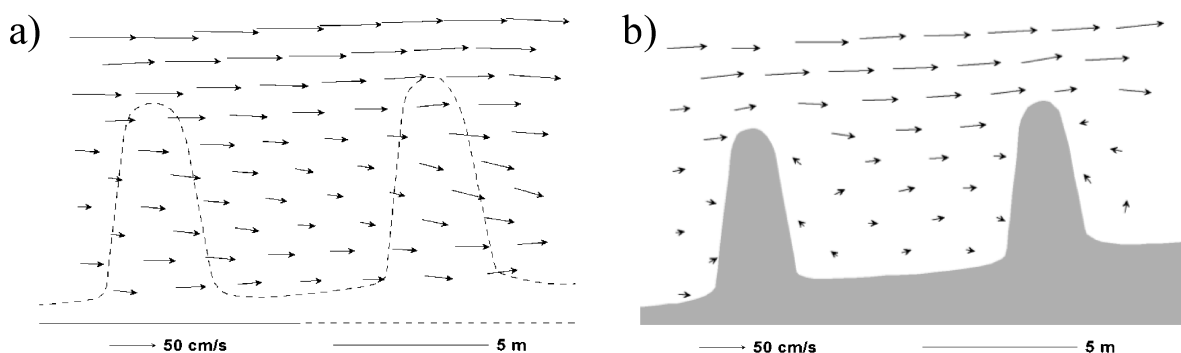


Abbildung 4: Geschwindigkeitsverteilungen bei Überströmung (Experiment 1); a) oberflächennahe Vektoren, b) sohlennahe Vektoren.

Bei Überströmung bilden sich keine horizontalen Zirkulationszellen (Abbildung 4). Stattdessen löst sich die Strömung an der Buhnenkrone ab und bildet im Nachlauf eine vertikale Rezirkulationsblase mit sohlennaher Rückströmung. Durch den Aufstau am Buhnenkopf wird die Strömung nach außen zum Ufer hin beschleunigt (Abbildung 4a). Die geringsten oberflächennahen Fließgeschwindigkeiten treten daher zentral im Buhnenfeld auf, etwa an der Stelle, an der die Strömung nach der Zirkulationsblase wieder an der Sohle anliegt.

3.2 Vertikale Geschwindigkeitsverteilung

Der quasi-zweidimensionale Charakter der horizontalen Rezirkulationszellen bei Umströmung zeigt sich in den vertikalen Geschwindigkeitsprofilen (Abbildung 5). Im Buhnenfeld ist die Geschwindigkeit fast über die gesamte Tiefe gleichverteilt, vom logarithmischen Wandgesetz sind nur die unteren 5% der Wassertiefe beeinflusst. Nur direkt an den Buhnen treten auch kleinräumig dreidimensionale Strömungseffekte auf.

In den Geschwindigkeitsprofilen bei Überströmung lässt sich deutlich die vertikale Ablösezone hinter den Buhnen identifizieren. Hier zeigen die Vektoren eine Umkehr der Fließrichtung an (Abbildung 6a). Darunter bildet sich eine Rezirkulationsblase, die zum Ufer hin kleiner wird und damit stark dreidimensional ausgebildet ist.

Bei der Überströmung sind die Geschwindigkeiten im Buhnenfeld größer, damit nehmen auch die Geschwindigkeitsgradienten zur Sohle hin zu und das logarithmische Wandgesetz gilt für etwa 10-20% der Wassertiefe. Dies wird besonders bei den Profilen in Ufernähe deutlich (Abbildung 6b).

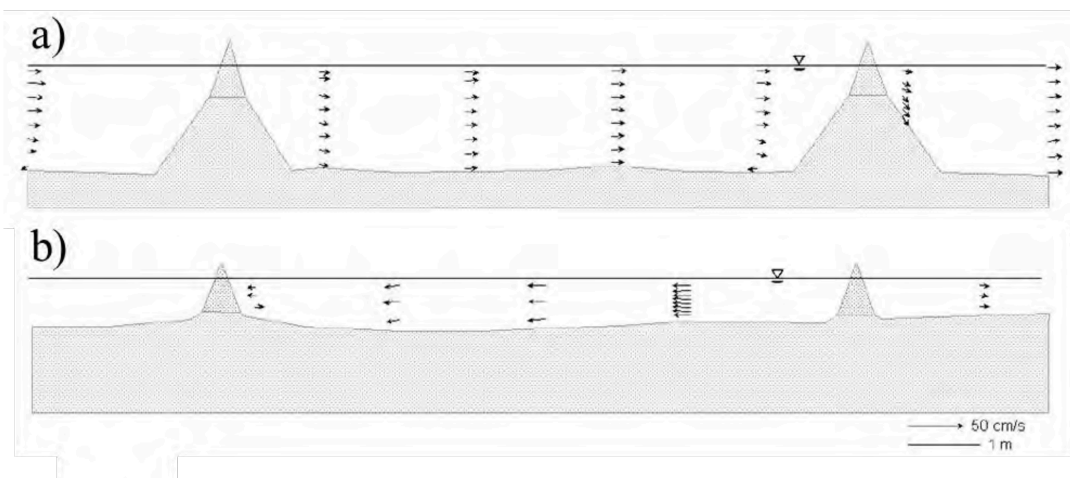


Abbildung 5: Vertikale Geschwindigkeitsverteilungen bei Umströmung (Exp. 2); a) Profilschnitt nahe der Buhnenköpfe; b) Profilschnitt ufernah.

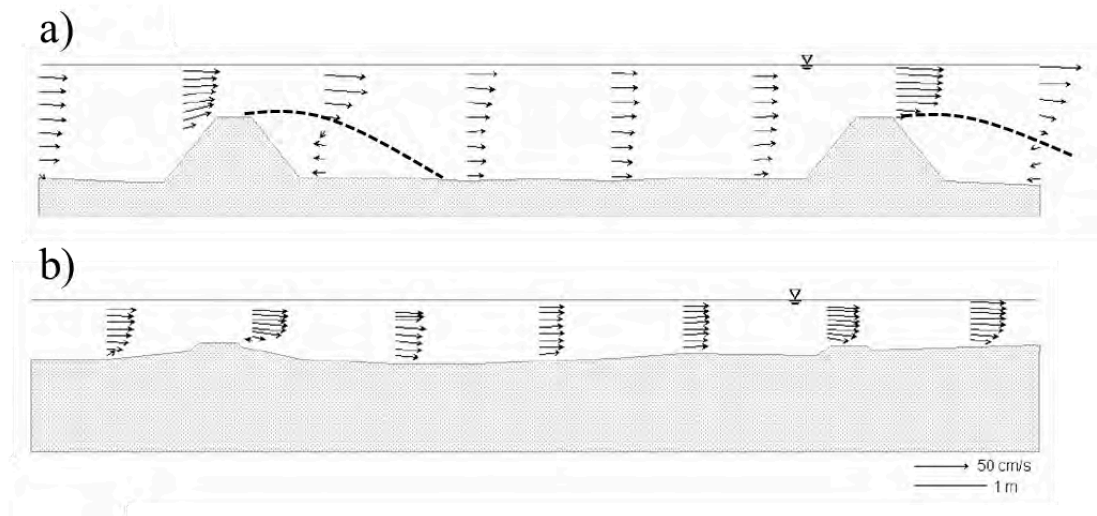


Abbildung 6: Vertikale Geschwindigkeitsverteilungen bei Überströmung (Exp. 1); a) Profilschnitt nahe der Bühnenköpfe mit angedeuteten Ablösezononen; b) Profilschnitt ufernah.

3.3 Schubspannungsverteilung

Die maximalen sohlennahen Schubspannungen $\langle u'w' \rangle$ treten im Bereich der Strömungsablösung an den Bühnenköpfen außerhalb der Bühnenfelder auf (Abbildung 7). Sie korrespondieren mit den größten Geschwindigkeitsgradienten. Dabei liegen die Maxima mit $15 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ bei über- und umströmten Bedingungen nah beieinander. Im Bühnenfeld zeigen sich dagegen wesentliche Unterschiede. Im überströmten Fall tritt ein weiteres lokales Maximum mit $5 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ hinter der Bühne auf (Abbildung 7a). Ursache ist die starke Turbulenzproduktion in der Scherschicht der vertikalen Ablösung an der Bühnenkrone.

Daraus lässt sich ableiten, dass es bei umströmten Bühnen zur Kolkbildung nur direkt am Bühnenkopf kommt. Sediment, das über die Rezirkulationsströmung in das Bühnenfeld gelangt, setzt sich aufgrund der geringen Schubspannungen ab. Da die Schubspannungen zur Mitte der Zelle hin abnehmen, werden die abgelagerten Korngrößen zur Mitte hin immer feiner. Werden die Bühnen dann überström, kommt es zusätzlich zur Auskolkung im Bühnenfeld. Zuvor abgelagerten Feinsedimente können so mobilisiert und aus dem Bühnenfeld ausgetragen werden.

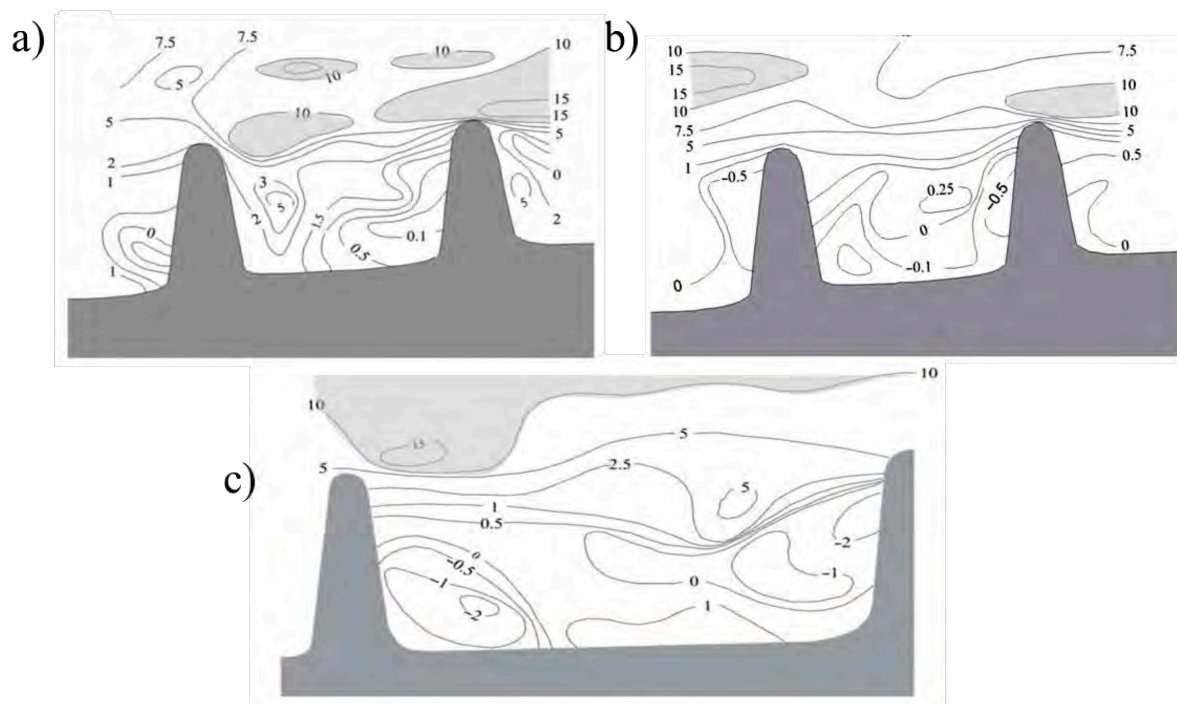


Abbildung 7: Sohlennahe Schubspannungsverteilungen $\langle u'w' \rangle$ (Einheit cm^2/s^2); a) Experiment 1 - überströmt, b) Experiment 2, c) Experiment 3 (verändert nach Sukhodolov 2014).

3.4 Kohärente Turbulenzstrukturen bei der Umströmung

Zusätzliche Langzeitmessungen wurden mit einer ADV-Sonde direkt oberstrom des Bühnenkopfes durchgeführt. Die gemessene Querströmungskomponente v ist in Abbildung 8 über die gesamte Messdauer (50 Minuten) aufgetragen. Die Autokorrelation der Zeitreihe ist in Abbildung 9 dargestellt.

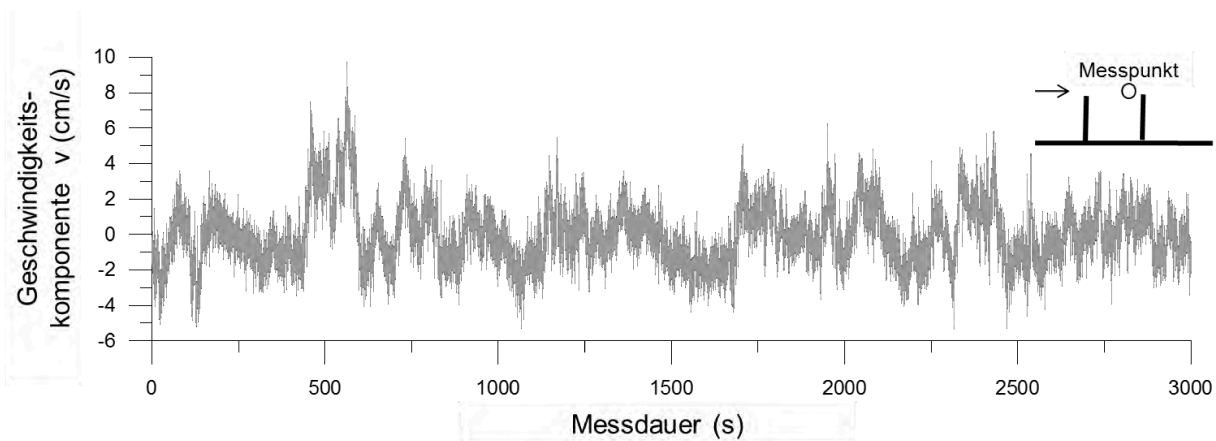


Abbildung 8: Fluktuation der Querströmungskomponente v in einer Langzeitmessung

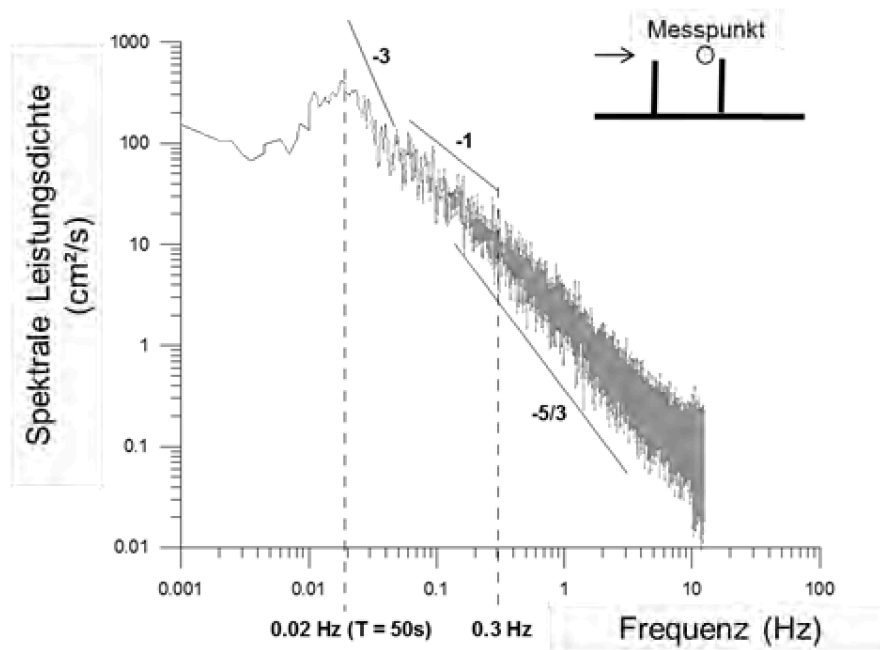


Abbildung 9: Autokorrelation der Querströmungskomponente aus der Langzeitmessung

Die Autokorrelation der Geschwindigkeitskomponente weist einen Peak im niederfrequenten Bereich bei etwa 0,02 Hz auf. Das bedeutet, dass Austauschprozesse zwischen Bühnenfeld und Hauptströmung nicht kontinuierlich, sondern periodisch etwa alle 50 Sekunden stattfinden. Dabei werden schnellere Fluidballen mit hohem Impuls aus der Hauptströmung in das Bühnenfeld eingetragen.

4 Zusammenfassung

In Feldexperimenten mit Bühnen wurden Ultraschall-Messsonden (ADV) eingesetzt und über umfangreiche Punktmessungen der Geschwindigkeiten ein detailliertes Bild der Strömungsstruktur gewonnen.

Bei Umströmung bilden sich große horizontale Rezirkulationszellen im Bühnenfeld, die über die Wassertiefe konstant sind, d.h. quasi zweidimensional. Zur Kolkbildung kommt es dabei am Bühnenkopf, während im Bühnenfeld Sedimentablagerungen auftreten.

Bei der Überströmung ist die Strömungsstruktur stark dreidimensional und durch die Ablösung der Strömung an der Bühnenkrone entsteht eine vertikale Rezirkulationsblase. Die starke Turbulenzproduktion in diesem Bereich führt zu hohen Schubspannungen und damit auch zur Kolkbildung im Bühnenfeld.

5 Literatur

- Anlanger, C. (2008): Field-scale experiments and analysis of turbulent flow structures in a river reach with groynes. Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur (BOKU), Wien.
- Sukhodolov, A., Uijttewaal, W.S.J. & Engelhardt, C. (2002) On the correspondence between morphological and hydrodynamical patterns of groyne fields. *Earth Surface Processes and Landforms* 27, 289-305.
- Sukhodolov, A. (2014): Hydrodynamics of groyne fields in a straight river reach: insight from field experiments. *Journal of Hydraulic Research*, 52(1), 105-120.
- Uijttewaal, W.S.J. (2005) Effects of groyne layout on the flow in groyne fields: Laboratory experiments. *Journal of Hydraulic Engineering-Asce* 131, 782-791.
- Yossef, M.F.M. (2005) Morphodynamics of rivers with groynes. Delft Hydraulics Selected Series, Delft University of Technology, Delft NL.
- Weitbrecht, V. (2004) Influence of dead-water zones on the dispersive mass transport in rivers. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH).

Danksagung

Die Feldmessungen wurden über das DFG-Projekt SU-405/1-2 finanziert. Dank geht an die Arbeitsgruppe, besonders Alex Sukhodolov und Achim Reiprich (IGB Berlin), Christiaan Erdbrink und Wim Uijttewaal (TU Delft), Wernher Brewis (IfH Karlsruhe).

Autoren:

Dr.-Ing. Ingo Schnauder

gerstgraser - Ingenieurbüro
für Renaturierung
Gaglower Straße 17/18
D-03048 Cottbus

Tel.: +49 355 48389 13
Fax: +49 355 48389 20
E-Mail: schnauder@gerstgraser.de

Dr. Nils Rüther

Norwegian University of Science and
Technology, Department of Hydraulic and
Environmental Engineering
S.P. Andersens Veg 5
N-7491 Trondheim, Norwegen

Tel.: +47 951 37746
Fax: +47 735 912 98
E-Mail: nils.ruther@ntnu.no

Dipl.-Ing. Christine Anlanger

Institut für Umweltwissenschaften
Universität Koblenz-Landau
Fortstraße 7
D-76829 Landau

E-Mail: anlanger@uni-landau.de