

Bewegungen von Transportkörpern an der Elbesohle

Yinan Wang, Amrei Gottauf, Bui Minh Duc, Matthias Trau, Franz Nestmann

Der vorliegende Beitrag faßt vier Posterbeiträge der Tagung zusammen.

1 Einleitung

Die Morphodynamik eines Fließgewässers wird durch die Stabilität der Sohle und die Vorgänge des Feststofftransports bestimmt. Dieser erfolgt einerseits in Form von Suspension und andererseits als Geschiebe an der Gewässersohle. Mit Ausnahme einiger kurzer Elbeabschnitte (km 320 - 330 und km 390 - 420) umfaßt das Kornspektrum der Elbe bereits ab Elbe-km 240 hauptsächlich Mittelsand bis Feinkies. Gerade an Sohlen feinsandiger Flachlandflüsse verläuft der Geschiebetransport unter bestimmten hydraulischen Bedingungen nicht in Form von Einzelkornbewegungen, sondern es bilden sich dünenartig wandernde Großformen auf der Sohle aus, deren Bewegungsmechanismen im Vergleich zur Einzelkornbewegung grundsätzlich anders geartet sind. Die große Beweglichkeit feiner Sedimente bedingt demnach ein Strombett, dessen Erosions- und Sedimentationsvorgänge durch Bank- und Transportkörperbildung geprägt ist. Auffällig groß und häufig treten diese Formen in der Elbe nach hohen Wasserständen auf, und behindern dabei die Binnenschifffahrt. Aus hydraulischer Sicht beeinflussen diese im folgenden als Transportkörper bezeichneten Großformen das gesamte Strömungsgeschehen im Gewässerbett und wirken sich direkt auf den Sedimenttransportbeginn und die Sedimenttransportleistung aus. Hinsichtlich des grundsätzlichen Verständnisses dieser Transportprozesse bestehen heute noch erhebliche Wissenslücken.

Das Teilprojekt „Physikalische Modelle“ im Verbundprojekt „Morphodynamik der Elbe“ führt Untersuchungen durch zum Einfluß instationärer Abflußbedingungen auf die Transportformen und das Transportverhalten an der Sohle. Bezugsabschnitt ist der Elbeabschnitt um Elbe-km 450. Die bisherigen Arbeiten umfassen folgende Auswertungen:

- *Analyse von Transportformen in der Natur (Kap. 2)*
Analyse von vermessenen Flächenpeilungen der Sohle bei unterschiedlichen Abflußzuständen zwischen Niedrigwasser und bordvollem Abfluß
- *Untersuchung von Transportvorgängen anhand von Laborversuchen (Kap. 3)*
Untersuchungen zum Einfluß der Instationarität und von Strombauwerken auf Bettform und Transportverhalten
- *Numerische Simulation von Transportvorgängen (Kap. 4)*
Untersuchungen zur Sohlverformung anhand numerischer Berechnungen

2 Analyse von Naturdaten

Zielstellung

Ziel der Analysen einer aktuellen Diplomarbeit ist es, aus Naturmessungen charakteristische Informationen über Transportkörper-Geometrien unter Berücksichtigung der hydrologischen Verhältnisse zu gewinnen. Hierzu wurden von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Datensätze aus drei Flächenpeilungen, die im April, Mai und September 1997 im Elbeabschnitt km 449-453 durchgeführt wurden, zur Verfügung gestellt. In der Auswertung werden die hydrologischen Verhältnisse *vor* der Sohlenaufnahme besonders berücksichtigt, da die Instationarität der Abflußverhältnisse Transportkörpergeometrien entscheidend verändert (s.u.). Als wesentliche hydraulische Randeinflüsse in dem 1800 Meter langen Sohlabschnitt sind der Krümmungsverlauf und die Querbauwerke in Form von Buhnen zu berücksichtigen.

Methodik

Die Daten der Flächenpeilungen, die in Gauß-Krüger-Koordinaten vorliegen, werden mit dem Softwareprogramm FIKS der BAW statistisch hinsichtlich geometrischer Größen ausgewertet. Bei der Visualisierung der Daten konnte global festgestellt werden, daß der betrachtete Flußabschnitt großflächige, örtlich stabile Anlandungen aufweist. Da kein ausgeprägter Talweg erkennbar ist, ist es sinnvoll, eine statistische Auswertung von Sohlängsschnitten vorzunehmen, deren Lage durch den Flußlauf so zu wählen ist, daß stationäre Sandbänke oder Kolke (größerer Abmessungen) von möglichst geringem Einfluß auf die Auswertung zu halten sind. Um Fehlinterpretationen zu vermeiden, müssen bei der Bewertung der Ergebnisse (z.B. abflußbedingte Schwankungen der Transportkörpergeometrien) die möglichen Randeinflüsse aus stationären Großformen weiterhin beachtet werden.

Zur Auswertung und Beurteilung stehen ferner die Ganglinie im Untersuchungszeitraum sowie hydrologische Kenndaten zur Verfügung. Abbildung 1 zeigt die Zeitpunkte der Sohlvermessungen hinsichtlich der jeweiligen Abflußzustände sowie deren hydrologische Vorgeschichte (April: bordvoller Abfluß nach ca. 2-jährlichem Hochwasser; Mai: mittlere Wasserführung im abfallenden Ast; Niedrigwasserphase nach kurzzeitig erneut erhöhten Wasserständen).

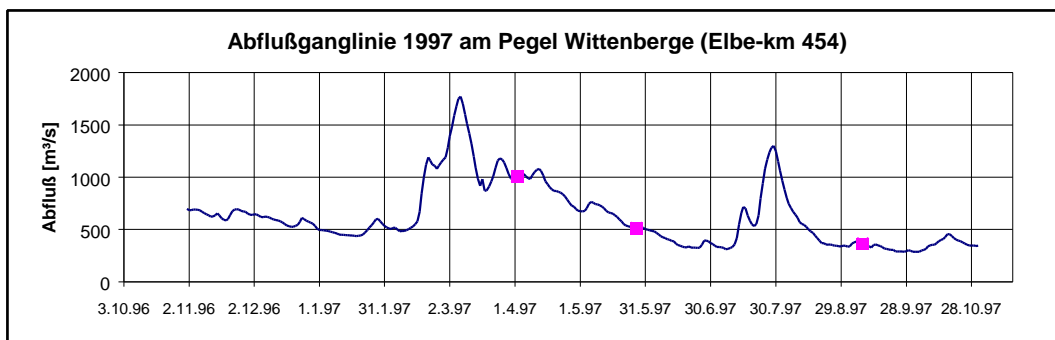


Abb. 1. Ganglinie mit Zeitpunkten der drei Sohlvermessungen (Flächenpeilung)

Bisherige Auswertung und Ergebnisse

Um die unterschiedlichen Transportkörperabmessungen, die sich in Abhängigkeit der jeweiligen hydrologischen Vorgeschichte ergeben, deutlicher herauszuarbeiten, wurden die Ergebnisse der Aprilauswertung (nach Hochwasser) mit jenen vom September (während Niedrigwasser) verglichen. Folgende erste Ergebnisse sind hier festzuhalten.

Zu beiden Aufnahmezeitpunkten wurde die Sohle von Großformen ($L > 100$ m) dominiert. Es zeigt sich, daß die mittlere Länge L der Transportkörper kurz nach dem Hochwasserereignis um ca. 12 % kürzer war als während der Niedrigwasserperiode (April: 207 m, September: 231 m). Die mittlere Transportkörperhöhe H nimmt dagegen mit zurückgehendem Abfluß um 31 % ab (April: 0,86 m, September: 0,58 m). Bezüglich der Steilheit der Transportkörper (als Verhältnis H/L) ist festzustellen, daß diese sich mit abnehmendem Abfluß von 0,0041 auf 0,0025 verringert; dies entspricht einer Abnahme von 39 %. Zu berücksichtigen bleibt, daß die Sohlgeometrie im vorliegenden Elbeabschnitt von stationären Sandbänken dominiert wird, so daß die Aussagekraft der statistischen Auswertung, insbesondere hinsichtlich der Transportkörperlänge, abgeschwächt wird. Eine statistische Auswertung von Mittelformen findet auf Grund seltenen Auftretens nicht statt.

Als Ergebnis einer flächenhaften statistischen Auswertung ist festzuhalten, daß in beiden Fällen (NW, HW) die Standardabweichung der normierten Sohlhöhen - als Maß für die Sohlenunebenheit - mit zunehmender Breite der betrachteten Sohlfläche linear mit um das gleiche Maß zunimmt (vgl. Abb.2). Für diese Steigerung der Sohlhöhenvariabilität um bis zu 20 cm in Querrichtung lassen sich mehrere Ursachen anführen: 1. Mit zunehmender Breite nimmt die Anzahl der erfaßten Transportkörper unterschiedlicher Geometrien zu. 2. Je weiter sich die betrachtete Fläche der Uferzone nähert, desto mehr macht sich der Einfluß von Randbauwerken (z.B. Kolke an Bühnenköpfen) bemerkbar. 3. Der Einfluß der Gerinnekrümmung, der beispielsweise in Form ufernaher Sandbänke Ausdruck findet, trägt ebenso zu einer Zunahme der Standardabweichung bei.

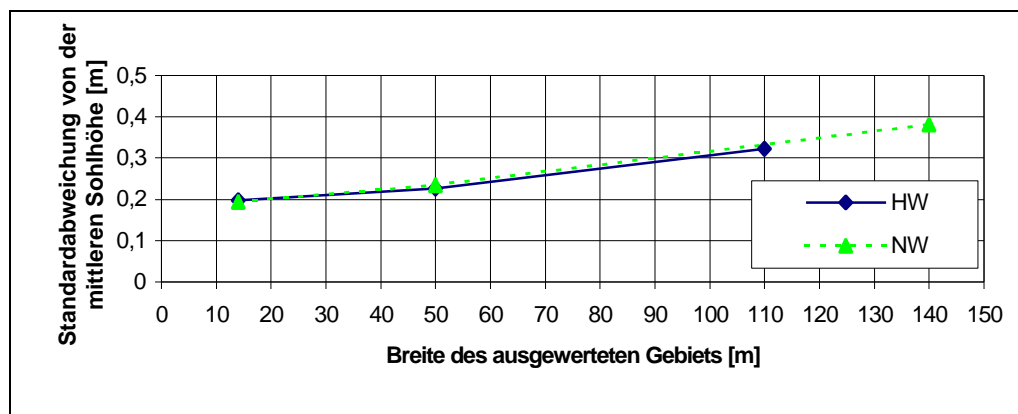


Abb. 2. Standardabweichung der normierten Sohlhöhen in Abhängigkeit der betrachteten Sohlenbreite (Normierung auf: 16,00 m+NN und mittlere Sohlneigung $I = 0,0014$ %)

3 Untersuchung von Transportvorgängen anhand von Laborversuchen

Zielstellung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden an der Universität Karlsruhe Untersuchungen durchgeführt, welche sich insbesondere mit dem Einfluß der Instationarität auf die Transportformen und die Sedimenttransportleistung sowie mit der langfristigen Auswirkung von Ausbaumaßnahmen wie Buhnen auf die Sohlenstabilität befassen.

Methodik

Für die Untersuchungen wurde Anfang 1997 eine große, mit aufwendigen Meßeinrichtungen ausgestattete Versuchsrinne fertiggestellt (vgl. Abb. 4). Die experimentelle Arbeit begann 1996 zunächst in einer kleinen Rinne (Breite 0,3 m, Länge 9 m) mit der Auswahl eines geeigneten Versuchsmaterials, um erste Erkenntnisse bezüglich der Entstehung und der Dynamik von Transportkörpern zu gewinnen. Dabei wurden drei Materialien mit unterschiedlichen sedimentologischen Kenngrößen getestet.

Ergebnisse der Untersuchungen in einer kleinen Rinne

Mit Hilfe der Dimensionsanalyse und Meßdaten wurden für die charakteristischen Transportkörpergrößen Dünenhöhe, -länge und Wandergeschwindigkeit die dimensionslosen Berechnungsansätze entwickelt, die für verschiedene Dichten des Sedimentes gültig sind (Abb. 3).

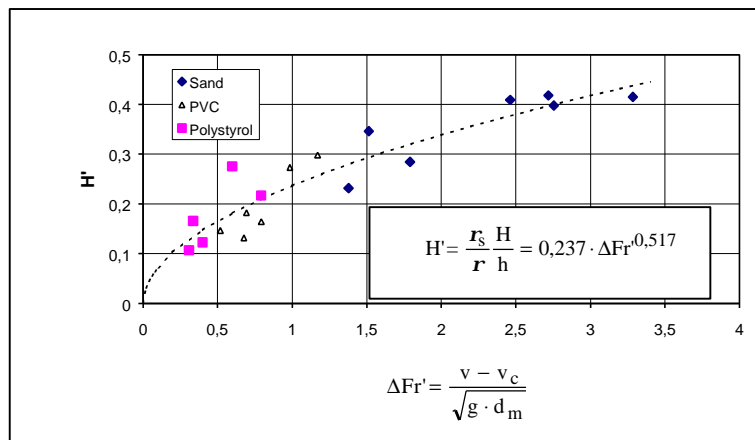


Abb. 3. Dimensionslose Dünenhöhe H' in Abhängigkeit von der Differenzfroudezahl $\Delta Fr'$ (H =Dünenhöhe, h =Wassertiefe, v =Fließgeschwindigkeit, v_c =kritische Fließgeschwindigkeit hinsichtlich Bewegungsbeginn, d_m =mittlerer Korndurchmesser, ρ , ρ_s =Dichte des Wassers bzw. des Sedimentes)

Darüber hinaus wurden in den Voruntersuchungen Messungen bei instationären Durchflüssen durchgeführt. Es wurden die Steilheit, das Zeitintervall sowie der Anfangs- abfluß der abgestuften Abflußganglinien variiert.

Die Ergebnisse der instationären Vorversuche zeigten, daß sich die *Instationarität signifikant auf den Geschiebetransport auswirkt*. Weiterhin zeigte sich, daß die gemessene transportierte Fracht wesentlich vom Anfangszustand der Sohle abhängt. Je größer der Unterschied zwischen der augenblicklichen Bettform und einer vollständig den (unter stationären) Strömungsbedingungen angepaßten Bettform ist, desto deutlicher weicht die Transportfracht bei instationärer Strömung von jener der stationären ab. Diese Abweichung nimmt mit kleiner werdenden Zeitschritten der Abflußganglinie zu.

Untersuchungen in der großen Rinne

In der Literatur existieren zahlreiche Berechnungsansätze zur Beschreibung der Transportkörperbewegung. Diese Ansätze, wie auch jene der Voruntersuchungen, basieren auf experimentellen Untersuchungen mit kleinen Breite : Wassertiefe - Verhältnissen (B/h) der Laborrinnen. Unter solchen Randbedingungen wurden i.d.R. zweidimensionale Dünenformen beobachtet, die sich parallel zur Fließrichtung bewegen.

Natürliche Gerinne großer Ströme weisen dagegen ein sehr großes B/h -Verhältnis auf. Dieses beträgt z.B. im Bereich der Reststrecke der Elbe etwa 60. Auf Grund sekundärer Strömungseffekte sind feinkörnige Flußsohlen dabei hauptsächlich von *dreidimensionalen* Dünenformen geprägt.

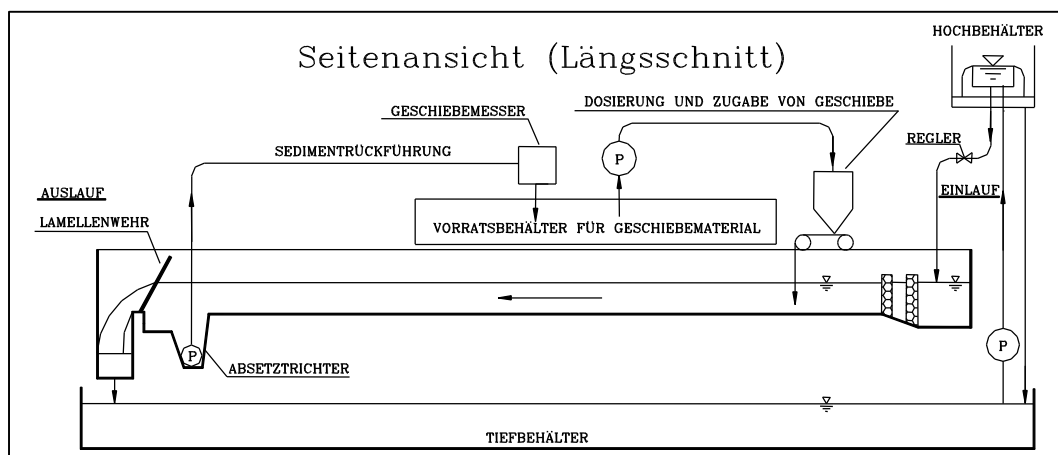


Abb. 4. Schematische Darstellung der großen Versuchsrinne

In der großen Versuchsrinne (Breite 2,5 m, Länge 60 m) wurde während der Modellversuche bei stationärer Strömung mit einem B/h -Wert von 22 bis 35 beobachtet, daß die Dünen infolge der Sekundärwirkung nicht nur in, sondern auch quer zur Fließrichtung wandern. Abb. 5 verdeutlicht die Dreidimensionalität der gemessenen Sohlformen.



Abb. 5. Beobachtete Dünenformen in der großen Laborrinne

Die beobachteten Sekundäreffekte bzw. ausgeprägte Dreidimensionalität der Strömungsverhältnisse und Sohlformen hat eine Vergrößerung der Dünenhöhe und der Geschiebetransportrate zur Folge (Abb. 6). Dabei können die Höhen der Dünen mehr als 60% der Wassertiefe erreichen, während die maximalen zweidimensionalen Dünen nach Zanke (1976) nicht größer als ein Drittel der Wassertiefe werden können. Weiterhin ist festzustellen, daß bei unsymmetrischem Wasserzulauf infolge verstärkter Sekundärwirkung dieser dreidimensionale Effekt noch ausgeprägter wird.

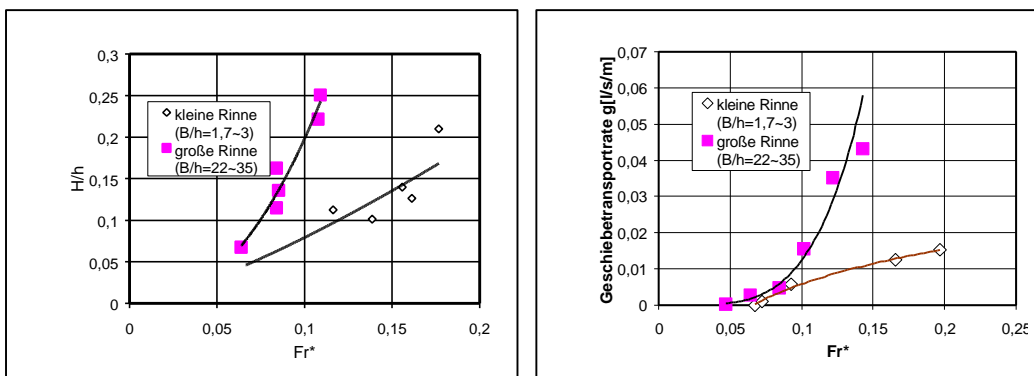


Abb. 6. Vergleich der relativen Dünenhöhe H/h sowie der Geschiebetransportrate g in der kleinen Rinne ($B/h=1,7-3$) und der großen Rinne ($B/h=22-35$)

Auf Grundlage der zeitlichen Entwicklung der gemessenen Bettformationen ist festzustellen, daß es in der Natur bei einem zweijährlichen Hochwasserabfluss der Elbe, ausgehend von einer anfänglich ebenen Sohle, ca. drei bis vier Monate Zeit dauern kann, um einen stationären Sohlzustand zu erreichen. Daraus folgt, daß die in der Elbe während Hochwasser vorhandene Bettformation im engeren Sinne *nie* mit einem stationären Zustand vergleichbar ist.

Um die Dynamik der Transportkörper in instationären Strömungen zu klären, werden in der großen Rinne verschiedene charakteristische Abflußganglinien simuliert. Es kann festgehalten werden, daß die Dimensionen der zu beobachtenden Dünen grundsätzlich und signifikant von folgenden Einflüssen abhängig sind:

- jeweilige hydraulische Randbedingungen (B/h, Bauwerke, Krümmung etc.)
- hydrologische Vorgeschichte (zeitliche Abfolge der Belastung)
- Art, Dauer und Steilheit der Abflußganglinie
- Sohlzustand direkt vor dem Hochwasser

Die Untersuchungen werden im Hinblick auf die zuvor genannten Einflüsse weitergeführt.

4 Numerische Simulation von Transportvorgängen

Motivation und Methodik

Auf der Basis des Finite-Volumen-Verfahrens FAST2D (2D Flow Analysis Simulation Tool) wurden in der Abteilung „Turbulente Strömungs- und Transportvorgänge“ am Institut für Hydromechanik der Universität Karlsruhe Ansätze entwickelt, um die Strömung und den Sedimenttransport in Flüssen zu simulieren. Zur Simulation der Strömung werden die instationären Flachwasser-Gleichungen verwendet. Die Berechnung des Schwebstofftransports basiert auf die über die Fließtiefe integrierte Advektions-Diffusionsgleichung, wobei die Beziehungen für Erosion und Sedimentation als Quell- und Senkenterm eingesetzt werden. Der Geschiebetransport unter Ungleichgewichtbedingungen kann durch die Lösung einer semi-empirischen Bilanzgleichung berechnet werden. Der Einfluß der Sohlneigung und der Gerinnekrümmung auf die Größe sowie die Richtung des Geschiebetransports kann durch Anwendung eines quasi-3D Strömungsmodells berücksichtigt werden. Der Einfluß von Sekundärströmungen auf die mittlere Strömung und den Schwebstofftransport wird über eine erhöhte Wirbelviskosität berücksichtigt; diese läßt sich durch die Kalibrierung der dimensionlosen Diffusivität, die im sekundären Produktionsterm des k- ϵ Turbulenzmodells entsteht, erreichen. Die umfangreichen Modellanwendungen, die von einfachen Testfällen über Simulationen von Strömungssituationen mit Sedimenttransport in verschiedene Laborgerinnen bis zur Modellierung von natürlichen Flußläufen reichen, zeugen von einer breiten Einsatzmöglichkeit des FAST2D Verfahrens (Minh Duc Bui, 1998).

Gegenstand dieser Untersuchung ist die Weiterentwicklung und Anwendung des FAST2D Codes zur Simulation von Transportvorgängen in einer Rinne, die auch im physikalischen Modell untersucht werden. Im numerischen Modell wird der Schwebstofftransport vernachlässigt. Zur Berechnung der Geschiebefracht wird die Formel von Fukuoka (Shimizu, et al. 1989) benutzt. Der Einfluß der Sohlneigung auf den Geschiebetransport wird durch das Einsetzen der Formeln von Nakagawa et al. (1980) und Struiksma et al. (1985) berücksichtigt.

Erste Ergebnisse

Bei der Diskretisierung des Modellgebietes wurde ein unregelmäßiges Gitter mit 342×56 Punkten benutzt. Der maximale Gitterabstand beträgt 10cm in Hauptströmungsrichtung. In Querströmungsrichtung ist der minimal Gitterabstand 2,5cm und zwar an den Seitenrändern, da hier erwartungsgemäß hohe Gradienten der Strömungs- und Transportgrößen auftreten. Der Simulation lagen die folgenden Randbedingungen zugrunde:

- Für die Strömung: Am Einlaufquerschnitt werden die Fließgeschwindigkeiten und die Turbulenzgrößen vorgegeben. Ein Abfluß von 80l/s wurde angenommen. Am Auslaufquerschnitt wurde die Wasserspiegel als annähernd horizontal angenommen und der Wasserstand mit einem Wert von 9.25cm konstant gehalten.
- Für den Sedimenttransport: Der Geschiebetransport wurde sowohl am Auslaufquerschnitt als auch an den festen Rändern als im Gleichgewicht befindlich angenommen.

Die Berechnung fing zuerst mit dem Ruhezustand und ohne Sedimenttransport bei fester glatter Sohle mit einer Sohlneigung von 0.08% an. Die Simulation des Sedimenttransports begann nach Erreichen einer stationären Strömung unter Gleichgewichtsbedingungen für den Sedimenttransport. Abbildung 7 stellt die Sohlverformung zu verschiedenen Zeitpunkten dar.

Diskussion

Die Berechnungsergebnisse zeigen, daß unter Berücksichtigung von Sohlformeffekten und mit einem kalibrierten dimensionlosen Diffusivitätskoeffizienten das numerische Modell Sedimenttransportvorgänge in der Rinne gut wiedergeben kann.

Bei der quantitativen Kalibrierung des Modells sind Meßdaten von zentraler Bedeutung. Erfahrungen bei der Bearbeitung numerischer Modelle zeigen, daß häufig das größte Problem in der Verfügbarkeit bzw. Qualität zuverlässiger Daten besteht für die Übertragung von Labor / Natur in Modell sowie zur Eichung und Validierung der Modelle. Es existiert einerseits Entwicklungsbedarf bei der mathematisch-numerischen Abbildung hydrodynamischer Prozesse zur Verbesserung der Modellaussagen, andererseits bei der Meßdatenerfassung, da bislang infolge nur bedingt zuverlässigen Meßdaten ein großer Unsicherheitsfaktor eingetragen wird.

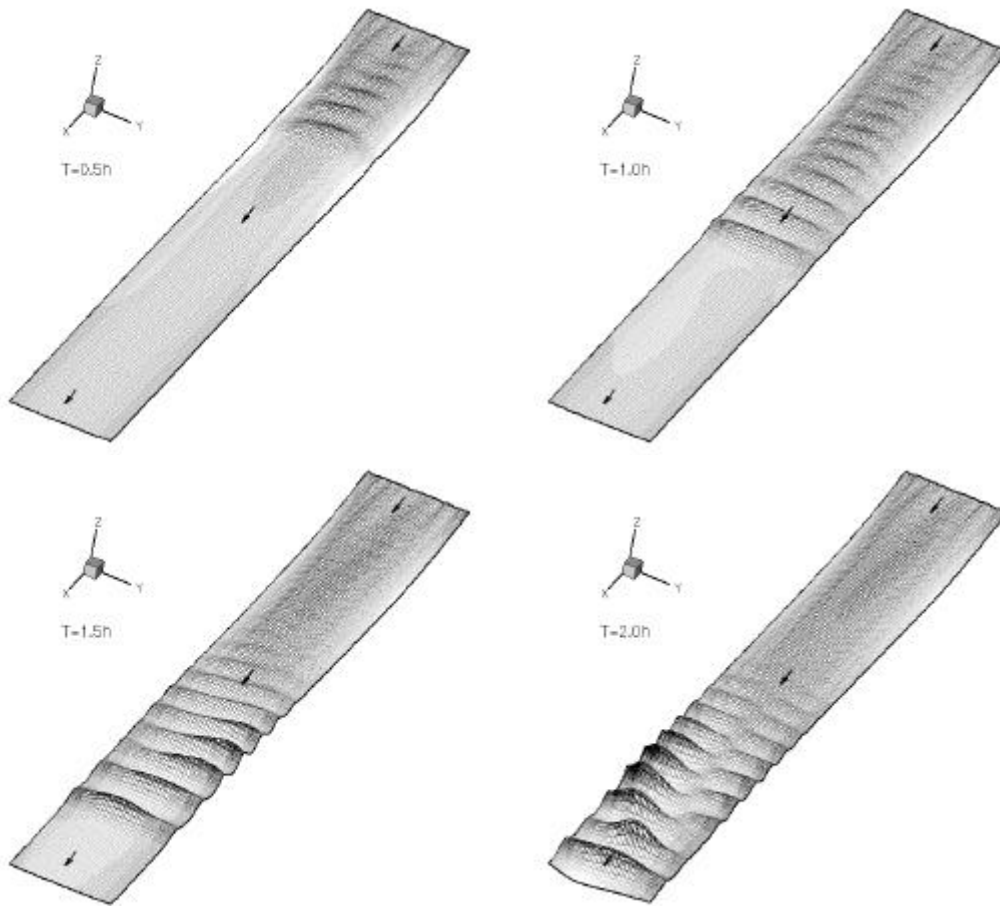


Abb. 7: Sohlverformung zu verschiedenen Zeitpunkten

Literatur

- Auer, K. (1999): Experimentelle Untersuchungen zur Bewegung der dreidimensionalen Transportkörper, Vertieferarbeit, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe
- Bui, M.D. (1998): Berechnung der Strömung und des Sedimenttransports in Flüssen mit einem tiefengemittelten numerischen Verfahren, Dissertation, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe
- Coleman, S.E. (1991): The Mechanics of Alluvial Stream Bed Forms, Department of Civil Engineering, University Auckland, New Zealand, Report 517
- Dorer, H. (1984): Ähnlichkeit bei Flußbaulichen Modellen, Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Heft 54
- Dunker, W. (1997): Bestimmung von Transportformem und Transportraten an feinsandigen Gewässersohlen anhand von Modellversuchen, Diplomarbeit, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Unive

- Führböter, A. (1980): Strombänke (Großriffel) und Dünen als Stabilisierungsformen, Mitteilungen des Leichtweiss-Instituts für Wasserbau, TU Braunschweig, Heft 67
- Führböter, A. (1991): Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Entstehungsprozess von Stromriffeln, Mitteilungen des Leichtweiss-Instituts der TU Braunschweig, Heft 111
- Glazik, G. (1993): Zur Abschätzung der Sedimenttransportverhältnisse
- Kauppert, K. (1997): Untersuchung in einem physikalischen Flußmodell über den Einfluß der Hydrologie auf die Sohlformen der Elbe, Diplomarbeit, Institut für Wasserbau und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe
- Meyer-Peter, E. & Müller R. (1948): Formulas for bed load transport, Intern. Assoc. Hydr. Res., 2d Meeting - Stockholm
- Nakagawa, H. & Tsujimoto, T. (1980): Sand Bed Instability due to Bed Load Motion, Journal of Hydraulics Division, IAHR, Vol.106 (1).
- Nestmann, F. (1993): Untersuchungen des Feststofftransportes in einem Wassermodell mit beweglicher Sohle am Beispiel des Unterwassers der Staustufe Iffezheim, Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau
- Nestmann, F., Rosport M. (1995): DFG-Rundgespräch „Geschiebe“: Physikalische Modelle, Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München, Heft 58
- Raudkivi, A.J. (1982): Grundlagen des Sedimenttransportes, Springer Verlag,
- Raudkivi, A., Witte H.-H. (1991): Ein synergetischer Ansatz zur Entwicklung von Transportkörpern, Mitteilungen des Leichtweiss-Instituts der TU Braunschweig, Heft 111
- Shimizu, Y. & Itakura T. (1989): Calculation of Bed Variation in Alluvial Channels, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.115(3).
- Struisma, N.; Olesen, K.W.; Flokstra, C. & De Vriend, H.J. (1985): Bed Deformation in Curved Alluvial Channels, Journal of Hydraulic Research, Vol.23(1).
- Trau, M. (1999): Analyse und Vergleich von Sohlformation (Transportkörper) der unteren Mittelelbe unter Berücksichtigung der hydrologischen Vorgeschichte, Diplomarbeit, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe
- Vollmers, H. Giese G. (1970): Diskussion zu: Instability of flat bed in alluvial channels Proc. ASCE, HY 6
- Wang, Y. (1998): Sachstandbericht, Teiprojekt II.1: „Physikalischen Modelle“, Verbundforschungsprojekt „Morphodynamik der Elbe“
- Yalin, M.S. (1977): Mechanics of sediment transport, 2nd Edition, Pergamon Press, Oxford
- Yalin, M.S. (1985): On the determination of ripple geometry, Journal of the Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 111(8), April
- Zanke, U. (1976): Über den Einfluß von Kornmaterial, Strömungen und Wasserständen auf die Kenngrößen von Transportkörpern in offenen Grinnen, Mitteilungen des Franzius-Instituts der Universität Hannover, Heft 44
- Zanke, U. (1982): Grundlagen der Sedimentbewegung, Springer-Verlag
- Zanke, U. (1990): Der Beginn der Sedimentbewegung als Wahrscheinlichkeitsproblem, Universität Hannover, Wasser und Boden 1.1990
- Zanke, U. (1995): DFG-Rundgespräch „Geschiebe“: Transportkörper, Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München, Heft 58