

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Bornschein, Antje**

## **Schwallströmungen auf trockener Sohle**

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/20.500.11970/103838>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bornschein, Antje (2006): Schwallströmungen auf trockener Sohle. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Strömungssimulation im Wasserbau (Flow Simulation in Hydraulic Engineering). Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 32. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 391-398.

### **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.



# Schwallströmungen auf trockener Sohle

Antje Bornschein

Die Kenntnis der hydraulischen Eigenschaften von Schwallströmungen ist sowohl bei der Bestimmung von Überflutungsflächen infolge eines Talsperrenbruchs als auch bei Schwallspülverfahren im Kanalnetz von Nutzen. Es wird ein Versuchsaufbau mit einer bewegten Sohle vorgestellt, der es erlaubt, die stark instationäre Strömung einer Schwallwelle für den Betrachter stationär darzustellen. Die Ergebnisse der Modellversuche werden hinsichtlich der Ausbreitungsgeschwindigkeit und der Form der Schwallwellenfront mit numerischen Simulationen verglichen.

An improved knowledge of the hydraulic behaviour of surge waves is of avail in determination the flooded area after a dam break event as well as in design of the flushing process of sewers or of rainwater storages in sewage networks. An experimental set-up allowing the transformation of the unsteady flow of a surge wave into a steady flow from the observers point of view will be presented. The comparison between the measurement results and numerical calculations is focused on the shape and the propagation velocity of the wave front.

## 1 Einleitung

Schwallströmungen sind instationäre Abflussprozesse, die man z. B. nach dem Bruch eines Absperrbauwerkes oder nach dem plötzlichen Öffnen von Armaturen beobachten kann. Erfolgt das Fortschreiten einer Schwallwelle in einem Bereich ohne Anfangswasserstand, so spricht man von einer Ausbreitung auf trockener Sohle, wie in Abbildung 1 zu sehen.

Das hydraulische Verhalten der Schwallwelle und damit zum einen ihr Vermögen, Ablagerungen in Kanälen und Becken zu mobilisieren, jedoch zum anderen auch ihr Zerstörungspotential bei der Überflutung nach einem Talsperrenbruch hängen maßgeblich von der Wellenfront ab, also dem Bereich in dem der Übergang von der trockenen Sohle zur nachfolgenden Strömung erfolgt. Eine eingehende Untersuchung der Schwallwellenfront scheiterte bislang an der starken zeitlichen Abhängigkeit der Strömungsparameter und an der nicht genügend großen Ausbildung der Schwallwellenfront in bisherigen hydraulischen Modellversuchen (Bornschein 2004).

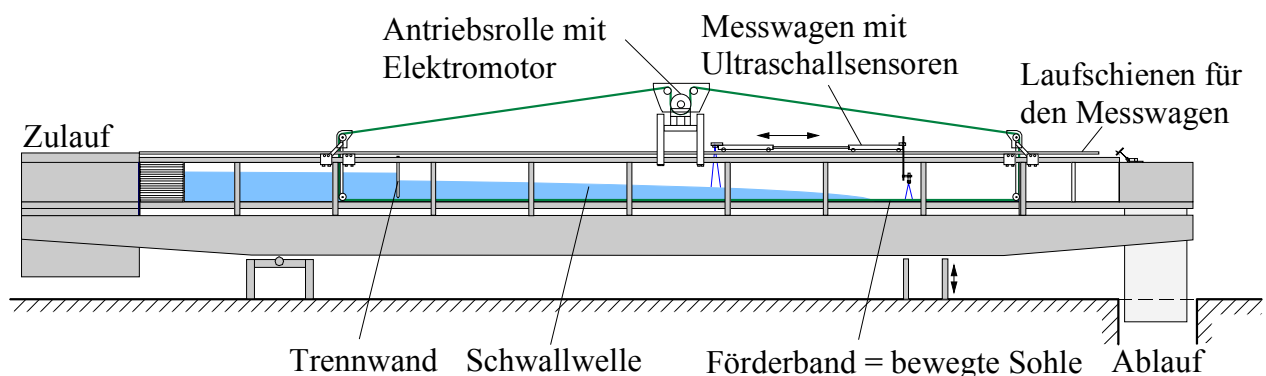


**Abbildung 1** Spülwelle in einem Regenüberlaufbecken (Foto: Steinhardt Wassertechnik).

## 2 Untersuchungen im hydraulischen Labor

### 2.1 Versuchsstand

Für die hydraulischen Untersuchungen wurde die Kipprinne im Hubert-Engels-Labor des Institutes für Wasserbau und Technische Hydromechanik der Technischen Universität Dresden genutzt. In dieses 0,3 m breite und 0,4 m hohe Rechteckgerinne, dessen Seiten aus Glas bestanden, wurde eine Vorrichtung zum Antrieb eines Kunststoffbandes eingebaut (Abbildung 2).



**Abbildung 2** Versuchstand mit bewegter Sohle.

Dieses Kunststoffband bewegte sich entgegengesetzt der Strömungsrichtung auf dem Boden der Rinne und stellte die abflusswirksame Sohle dar. Es kamen zwei unterschiedlich profilierte Kunststoffbänder (glatt und genoppt) zum Einsatz, um so den Einfluss der Sohlrauheit untersuchen zu können. Das Gefälle der Glasrinne wurde zwischen 0; 0,1; 0,2; 0,3 und 0,4 variiert.

Durch die Verwendung einer bewegten Sohle überlagert sich die Ausbreitung der Schwallwelle mit einer ihr entgegengesetzten Bewegung der Sohle. Sind beide Geschwindigkeiten vom Betrag gleich groß, verharrt die Schwallwelle für den Betrachter auf der Stelle (Bornschein 2001). Dieser Ansatz geht auf die theoretische Ableitung von Martin & Bollrich 1989 zurück.

Die Wellenfront konnte ausreichend groß abgebildet werden. Die Schwallwelle, die sich im Versuchstand ausbildet, repräsentiert einen Gleichgewichtszustand zwischen der hangabtreibenden Komponente der Gewichtskraft des Wassers, der Stützkraft der nachfolgenden Strömung und der die Bewegung verzögernden Reibung zwischen Wasserkörper und Sohle.

Bei jeder Versuchsdurchführung wurde die Geschwindigkeit des Kunststoffbandes bestimmt. Zur Messung des Wasserstandes kamen Ultraschallsonden zum Einsatz, die auf einem Messwagen montiert waren, der entlang des zu vermessenden Abschnittes fahrbar war. Die horizontalen und vertikalen Komponenten der Strömungsgeschwindigkeit wurden mit einem zweidimensionalen Laser-Doppler-Anemometrie-System (LDA-System) erfasst. Eine videobasierte Auswertung der Bewegung von Driftkörpern diente der Vermessung der Geschwindigkeit an der Oberfläche der Strömung.

Im Rahmen der Voruntersuchungen konnte anhand der vermessenen Profile der horizontalen Geschwindigkeitskomponente nachgewiesen werden, dass die in dem Versuchstand mit bewegter Sohle entstehende Strömung ähnlich der einer zweidimensionalen Gerinneströmung ist. Damit können die Messergebnisse mittels einer Galileischen Transformation auf Strömungen in einem Kanal mit fester Sohle übertragen werden.

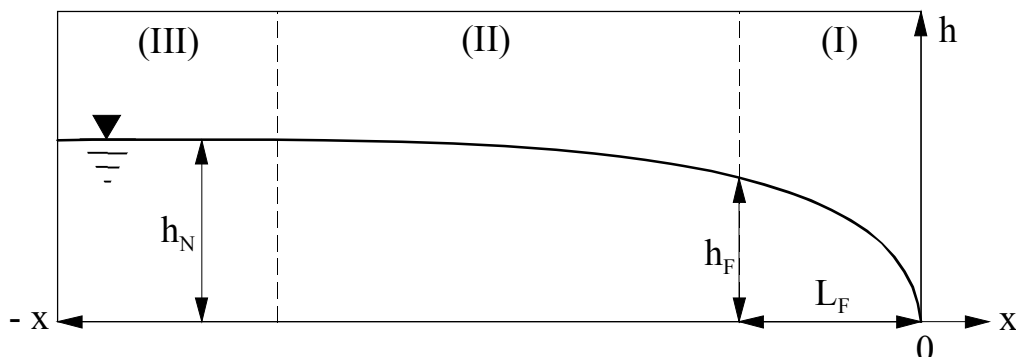
Für die beiden Kunststoffbänder wurde der Reibungsbeiwert nach Strickler bestimmt. Dazu wurde in dem Versuchstand mit bewegter Sohle eine Strömung mit einem sohlparallelen Wasserspiegel eingestellt, die einem stationären gleichförmigen Abfluss in einem Gerinne mit fester Sohle entspricht. Während für das glatte Band der Reibungsbeiwert  $125 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  betrug, ergab sich für das genoppte Band ein Wert von  $58 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ . Der Reibungsbeiwert war in dem untersuchten Bereich nicht von der Fließtiefe abhängig.

## 2.2 Experimentelle Ergebnisse

Das vermessene Oberflächenprofil der Schwallwellen kann in drei Bereiche eingeteilt werden (Abbildung 3):

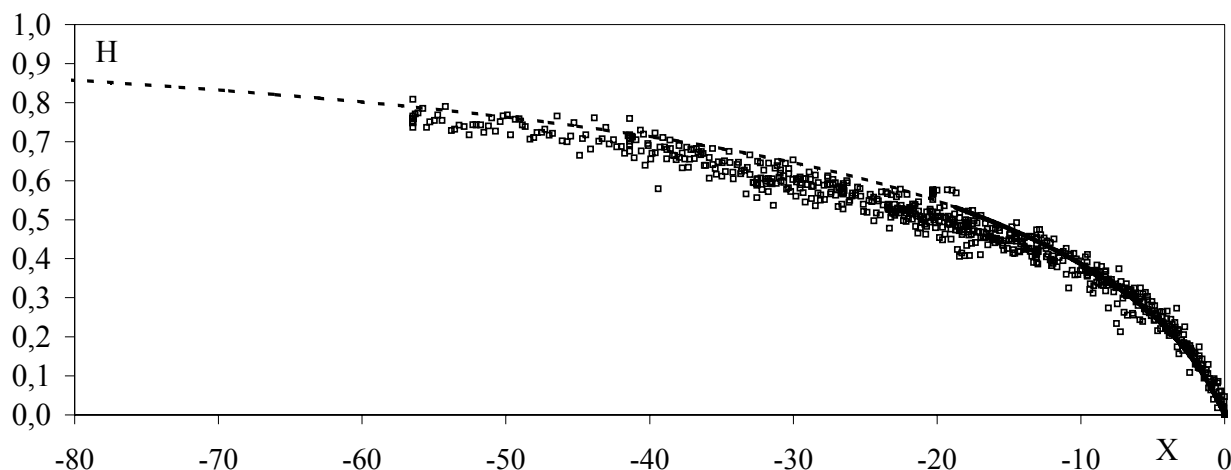
- I. Die Schwallwellenfront, deren Ausdehnung und Wasserspiegelneigung abhängig von der Sohlrauheit ist.
- II. Ein Übergangsbereich, in dem die Abflusstiefe stetig zunimmt.

III. Ein Abschnitt mit gleichbleibender Abflusstiefe, der einem stationär gleichförmigen Abfluss in einem Gerinne mit fester Sohle entspricht.



**Abbildung 3** Die drei Bereiche einer Schwallwelle (Normalabflusstiefe  $h_N$ , Höhe der Schwallwellenfront  $h_F$ , Länge der Schwallwellenfront  $L_F$ ).

Für eine weitere Auswertung der vermessenen Oberflächenprofile wurden die Messwerte normiert. Als Normierungsgröße wurde die Normalabflusstiefe  $h_N$  gewählt, da diese die obere Randbedingung der Strömung der Schwallwelle darstellt. Die normierte Horizontalkoordinate ergibt sich zu  $X = x/h_N$  und der normierte Wasserstand zu  $H = h/h_N$ . Der Verlauf der normierten Wasserspiegelprofile ist unabhängig von der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schwallwelle, jedoch abhängig vom Sohlgefälle  $I$  und der Sohlrauheit. Eine größere Sohlrauheit erzeugt eine deutlich steilere Wellenfront.



**Abbildung 4** Normierte Messwerte ( $\square$ ) für den Wasserstand für  $I = 0,01$  und verschiedene Bandgeschwindigkeiten im Vergleich mit dem berechneten Wasserspiegelverlauf nach der Gleichung 1 (- -) und der abgeänderten Gleichung 2 (—).

Es konnte nachgewiesen werden, dass die beiden Bereiche (II) und (III) mit folgender, von den Gleichungen nach de-Saint-Venant 1871 abgeleiteten Formel berechnet werden können:

$$\frac{\Delta H}{\Delta X} = I \cdot \left(1 - H_m^{-4/3}\right) \quad (1)$$

Die Wassertiefe  $H_m$  ist die mittlere Wassertiefe im Berechnungsabschnitt  $\Delta X$ . Für den Bereich (I) wurde eine neue Berechnungsformel anhand der Messwerte angepasst:

$$\frac{\Delta H}{\Delta X} = I \cdot \left( \frac{H^{4/3} - B}{H^{4/3} + A \cdot I} \right) \quad (2)$$

Die Parameter A und B sind wie die Länge und Höhe der Schwallwellenfront von der Sohlrauheit abhängig.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schwallwelle war gleich der Normalabflussgeschwindigkeit des nachfolgenden Abflusses.

### 3 Numerische Berechnungen und Vergleich mit den Messwerten

Mit den Ergebnissen der Modellversuche stehen erstmals Validierungswerte für numerisch ermittelte Schwallwellenprofile zur Verfügung. Zur Gegenüberstellung mit den Messergebnissen wurden Berechnungen zur Schwallwellenausbreitung mit der Software Mike 11 (Danish Hydraulic Institute) durchgeführt.

Diese Software ist primär zur Berechnung von strömendem Abfluss entwickelt worden. Bei schießendem Abfluss werden bestimmte Terme der dynamischen Gleichung der de-Saint-Venant-Gleichungen unterdrückt, was zu einem ungenaueren Ergebnis für einen Abfluss mit großer Froudezahl führt. Darüber hinaus kann durch die Auswahl eines bestimmten dynamischen Ansatzes Einfluss auf die verwendete dynamische Gleichung genommen werden.

Für die Berechnungen wurde der Abfluss in einem 10 m breiten und 500 m langen Rechteckgerinne simuliert. Das Gerinne hatte ein Gefälle von 1 %. Die Sohlrauheit wurde entsprechend den Versuchsbedingungen mit  $58 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  festgelegt. Die Randbedingung am unteren Ende des Kanals war ein konstanter Wasserstand. Die Zuflussganglinie für das obere Ende sah eine plötzliche Abflusssteigerung von 0 auf  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  innerhalb einer Minute vor. Dieser Abfluss wurde über 10 Minuten konstant gehalten und verringerte sich dann wieder innerhalb einer Minute auf den Anfangswert.

Der maximale breitenbezogene Abfluss für diese Randbedingungen ergab sich zu  $q_{\max} = 1 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ . Der Abfluss im Gerinne war schießend. Für die Berechnungen wurde ein Knotenabstand von  $\Delta x = 0,05 \text{ m}$  gewählt. Der Zeitschritt

wurde abhängig von den Gradienten der Zustandsvariablen Durchfluss und Wasserstand und abhängig von der Courant-Zahl in einem Bereich zwischen 0,005 bis 2 Sekunden gewählt. Im Mittel dauerte eine Berechnung 15 Stunden.

Die Fließformel nach Strickler (vgl. Bollrich 1996) für ein sehr breites Gerinne, in dem der hydraulische Radius  $r_{hy}$  gleich der Abflusstiefe  $h$  ist, lautet:

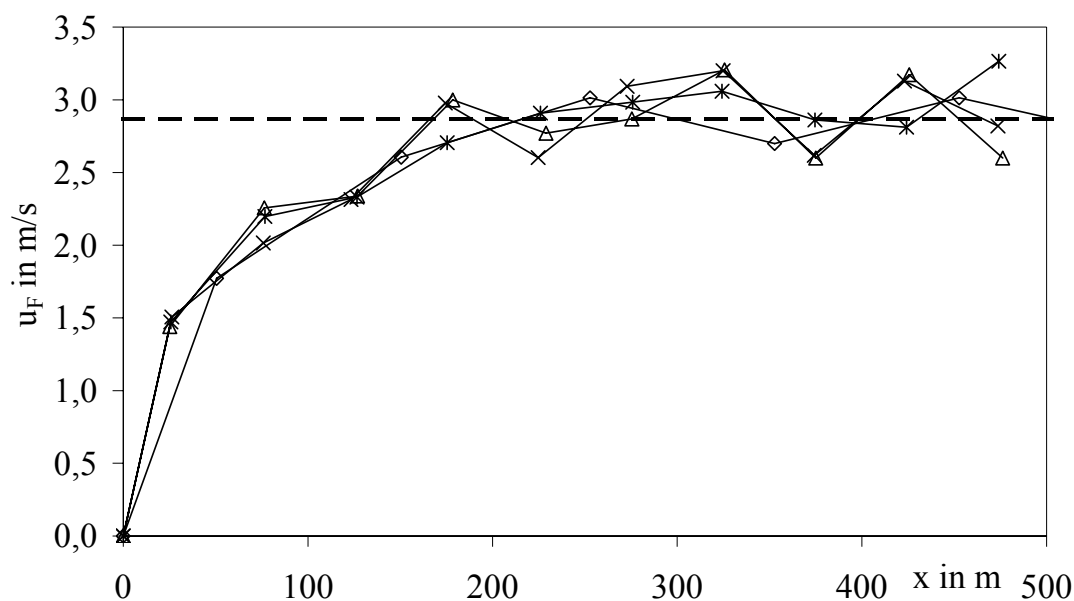
$$u_m = k_{st} \cdot h^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (3)$$

mit der mittleren Fließgeschwindigkeit  $u_m$  und dem Reibungsbeiwert nach Strickler  $k_{st}$ . Setzt man in diese Gleichung  $h = q_{max}/u_m$  ein, so erhält man:

$$u_m = \left( k_{st} \cdot q_{max}^{2/3} \cdot I^{1/2} \right)^{3/5} \quad (4)$$

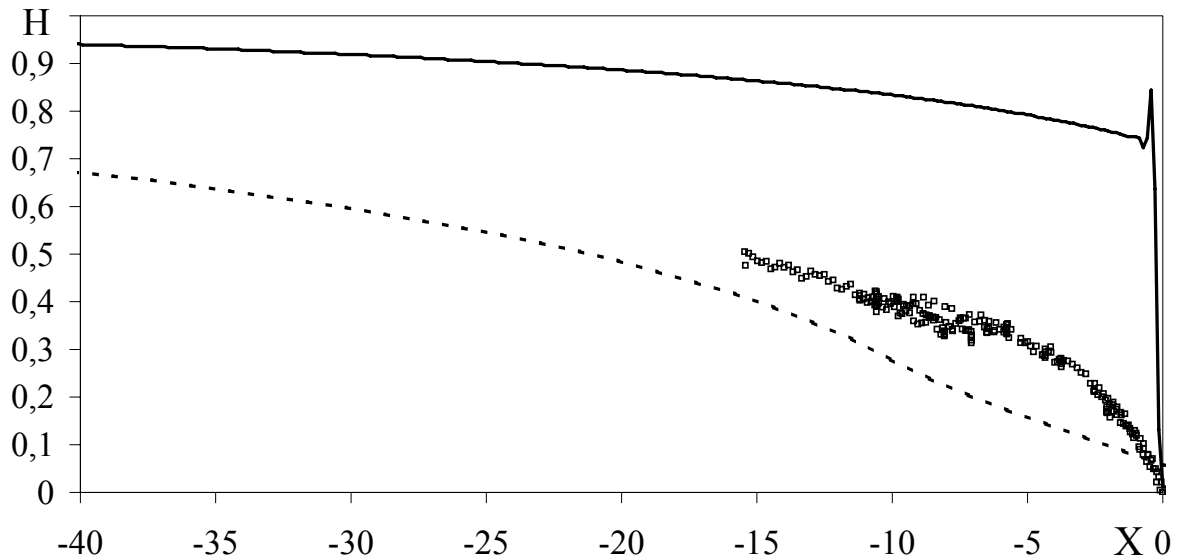
Für die simulierte Strömung ergibt sich demnach eine Normalabflussgeschwindigkeit von 2,87 m/s. Entsprechend den Ergebnissen der Modellversuche ist die Fortschrittgeschwindigkeit der Wellenfront  $u_F$  gleich der mittleren Normalabflussgeschwindigkeit.

In Abbildung 5 ist die aus den berechneten Wasserspiegelprofilen ermittelte Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellenfront entlang des Ausbreitungsweges  $x$  dargestellt. Man erkennt, dass nach einer anfänglichen Beschleunigung der Wellenfront die Ausbreitungsgeschwindigkeit um den Wert der Normalabflussgeschwindigkeit schwankt. Die Simulationssoftware ist also in der Lage, das Fortschreiten einer Schwallwellenfront in Übereinstimmung mit den Messergebnissen zu berechnen.



**Abbildung 5** Berechnete Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schwallwellenfront für verschiedenen Berechnungsszenarien im Vergleich mit der Normalabflussgeschwindigkeit des maximalen Abflusses  $u_m = 2,87$  m/s (- - -).

Für den Anstieg des Wasserspiegels in Abhängigkeit von der Zeit beim Eintreffen einer Schwallwelle an einem bestimmten Ort ist das Wasserspiegelgefälle an der Wellenfront maßgebend. In Abbildung 6 findet sich ein Vergleich zwischen den Messwerten der Wellenprofile und den Berechnungsergebnissen. Dargestellt ist der berechnete Wasserspiegelverlauf, wenn die Wellenfront den Ort  $x = 450$  m im simulierten Kanal erreicht. Die Darstellung erfolgt dimensionslos.



**Abbildung 6** Vergleich der Wellenprofile: ( $\square$ ) Messwerte, ( $\text{—}$ ) Berechnung mit der dynamischen Welle, ( $\text{- - -}$ ) Berechnung mit der diffusiven Welle (dimensionslose Darstellung,  $H = h/h_N$ ,  $X = x/h_N$  mit der Normalabflusstiefe  $h_N$ ).

Man erkennt in Abbildung 6 dass die Software Mike 11 das Wasserspiegelgefälle an der Wellenfront nicht korrekt berechnen kann. Wird die vollständige dynamische Gleichung berechnet, wobei die Einschränkungen für den schießenden Abfluss zu berücksichtigen sind, ist das berechnete Wasserspiegelgefälle deutlich steiler als die Messwerte es beschreiben. Demgegenüber wird bei der Nutzung des Modells der diffusiven Welle, bei dem die Trägheitsterme in der dynamischen Gleichung vernachlässigt werden, das berechnete Wasserspiegelgefälle weniger steil berechnet, als es die Messwerte erkennen lassen.

#### 4 Zusammenfassung

Der vorgestellte Versuchsstand mit einer bewegten Sohle ermöglicht die stationäre Ausbildung einer Schwallwelle. Er hat sich bei der eingehenden Untersuchung und Vermessung dieser instationären Strömung bewährt.

Es konnte gezeigt werden, dass sowohl die Steilheit der Wellenfront als auch ihre Ausdehnung abhängig von der Sohlrauheit ist. Die dimensionslosen



Wellenprofile sind jedoch unabhängig von der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schwallwelle.

Die Berechnung der Ausbreitung einer Schwallwelle stellt hohe Anforderungen an die verwendete Software Mike 11. Dies wird in der notwendigen Wahl von sehr kleinen Berechnungsschritten  $\Delta x$  und  $\Delta t$  sowie in dem hohen zeitlichen Aufwand deutlich. Es zeigt sich, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Schwallwellenfront korrekt berechnet wird. Das berechnete Wellenprofil weicht jedoch an der Wellenfront von den Messwerten ab.

## 5 Literatur

- Bollrich, G. (1996): Technischen Hydromechanik. Band 1, 4. Auflage, Verlag für Bauwesen, Berlin
- Bornschein, A. (2001): Die Untersuchungen von Schwallwellen in einem Versuchstand mit bewegter Sohle. In: Tagungsband zum 3. Treffen Junger Wissenschaftler der wasserbaulichen Institute deutschsprachiger Hochschulen und Universitäten am Institut für Konstruktiven Wasserbau, TU Wien, Österreich, S. 13 – 16
- Bornschein, A. (2004): Surge wave front in a moving reference system. In Proceedings of the River Flow Conference, Neapel, Italien, Volume 2, S. 945 – 949
- de Saint Venant, J. C. (1871): Théorie du mouvement non permanente des eaux avec application aux crues des rivières et a l'introduction des marées dans leur lit. In: Comptes rendues, Academie des Sciences, Paris, 73, S.148 – 154
- Martin, H.; Bollrich, G. (1989): Berechnungsgrundlagen für Schwall- und Sunkwellen sowie Dammbrechprobleme. In: Wiener Mitteilungen Wasser-Abwasser-Gewässer, TU Wien, Band 79, S. 139 - 164

### **Autor:**

Dipl.-Ing. Antje Bornschein,  
Institut für Wasserbau und THM  
Fakultät Bauingenieurwesen  
Technische Universität Dresden  
01062 Dresden  
Tel.: ++49 – 351 – 46334696  
Fax: ++49 – 351 – 46337141  
Antje.Bornschein@tu-dresden.de