Instationäre Wellen an mit Querschwellen verbauten Gebirgsbächen

Autor(en): **Gerke, Eva / Hohermuth, Benjamin / Weitbrecht, Volker**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **110 (2018)**

Heft 1

PDF erstellt am: **31.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-941575

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Instationäre Wellen an mit Querschwellen verbauten Gebirgsbächen

Eva Gerke, Benjamin Hohermuth, Volker Weitbrecht

Zusammenfassung

Für die Beurteilung der Kolkentwicklung und der dazugehörigen Abflussverhältnisse in Gebirgsflüssen, die durch eine Abfolge von Querschwellen (sog. Traversensystemen) stabilisiert sind, wurden hydraulische Modellversuche durchgeführt. Abfluss, Neigung, Kornverteilung und der Abstand der Traversen wurden variiert. Der Einfluss der Geschiebeführung auf die Sohlentwicklung und die Abflusssituation war ein wesentlicher Teil der Untersuchung. Die Versuchsresultate wurden Beobachtungen an Naturbeispielen und früheren hydraulischen Untersuchungen gegenübergestellt. Die Versuche zeigten, dass die Sohlentwicklung stark in Beziehung mit dem vorhandenen Geschiebetrieb steht. Ähnlich wie beim Hochwasser 2005 an der Kleinen Schliere wurde auch bei den vorliegenden Modellversuchen das Ablaufen von instationären Wellen im Traversensystem beobachtet. Eine hohe Geschiebeführung begünstigt die Entstehung von Antidünen in den Feldern zwischen den Schwellen. Die instationären Phänomene treten dann auf, wenn die theoretische Längenausdehnung der Antidünen den Schwellenabstand übertrifft. Somit kann über die Berechnung der theoretischen Länge der Antidünen unter Berücksichtigung des Abflusses, des Gefälles und der Korngrösse der Deckschicht das Auftreten von instationären Wellen vorhergesagt werden.

1. Einführung und Motivation

1.1 Definition von Traversensystemen

Bäche und Flüsse wurden in der Vergangenheit – häufig zur Gewinnung von Kulturland – im Grundriss in eine gestreckte Linienführung gezwungen. Infolge der Laufverkürzung und der Konzentration des Abflusses im Hochwasserfall auf eine im Vergleich zum unkorrigierten Zustand geringere Flussbreite besteht eine erhöhte Erosionsgefahr. Kleine bis mittlere Fliessgewässer mit einem Bruttogefälle bis ca. 7 % können durch eine Abfolge von Querschwellen (sog. Traversensystemen), welche meist in gleichmässigen Abständen verbaut sind, stabilisiert werden (*Volkart*, 1972).

Bei Traversensystemen ist die Lage des Kolks stark vom Abfluss Q abhängig. Bei Niedrigwasser stellt sich dieser direkt im Unterwasser der Traverse ein und wandert bei steigenden Abflüssen flussabwärts in die Mitte des Traversenfeldes. Bei extremen Ereignissen bewegt sich der Kolk weiter in Richtung des nächsten Traversenbauwerks, sodass es zum sogenannten Umschlagen des Kolks und einer Destabilisierung des nachfolgenden Bauwerks kommen kann *(Bild 1)*. Während bei geringen Abflüssen die Traversen als Abstürze mit vollkommenem Überfall wirken, stellt sich bei Hochwasserereignissen an den Traversen ein unvollkommener Überfall mit gewelltem Abfluss ein *(Bild 1)*. Die Kolke zwischen den Traversen verursachen eine erhöhte Formrauheit und damit eine Verzögerung des Abflusses gegenüber einer ebenen Sohle mit dem Bruttogefälle als Längsneigung. Eine zu starke Sohleintiefung in den Traversenfeldern kann jedoch Probleme in Bezug auf Stabilität der Traversenfundation und der Ufer mit sich bringen. Die für die Dimensionierung relevanten Parameter sind die maximale Kolktiefe S_{max} im massgebenden Traversenfeld und die maximale Wasserspiegellage h_{max} über Bezugshorizont bei Bemessungsabfluss.

Volkart führte 1972 an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) Versuche an Traversensystemen durch, um Dimensionierungsgrundlagen zu entwickeln. Er hatte

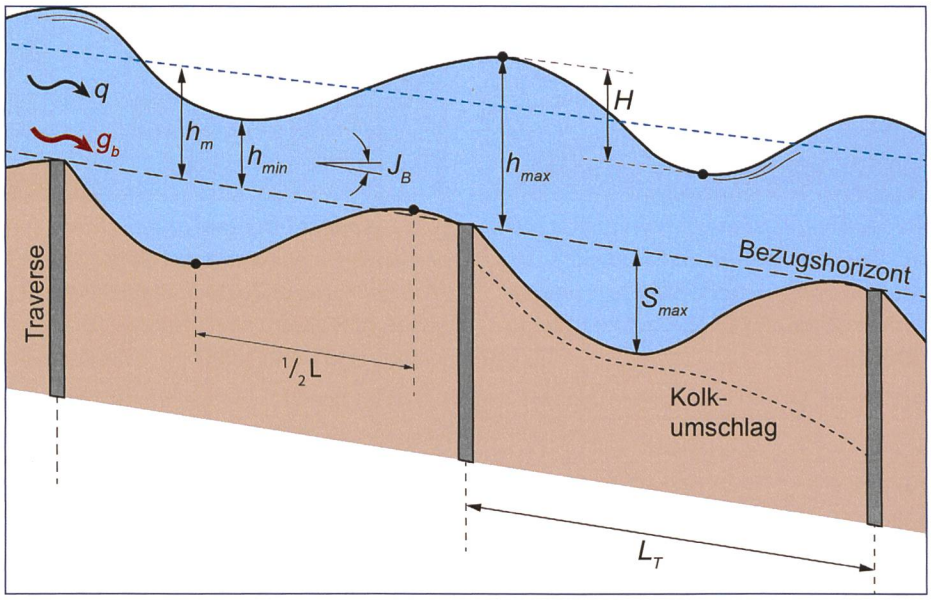

Bild 1. Kolke in Traversenfeldern und gewellter Wasserspiegel mit L_T = Traversenabstand, q = spezifischer Abfluss, g_b = spezifische Geschiebetransportrate, J_B = Bruttogefälle, S_{max} = maximale Kolktiefe, bezogen auf die Traversenoberkante, ½ L = halbe Antidünenlänge im Traversenfeld, definiert als Abstand zwischen Wellenberg und Wellental der Antidüne, h_m = mittlere Wasserspiegellage, h_{min} = minimale Wasserspiegellage, bezogen auf die Traversenoberkante, h_{max} = maximale Wasserspiegellage über Bezugshorizont, H = Wellenhöhe (nach Volkart 1972).

jedoch nicht die Möglichkeit, den Einfluss hoher Geschiebekonzentrationen zu untersuchen. *Volkart* (1972) konstatierte, dass bereits durch eine geringe Geschiebeführung in Traversensystemen die Kolktiefen deutlich vermindert werden können. An der VAW wurde kürzlich untersucht, welchen Einfluss die Kornverteilung, die hydraulische Belastung und insbesondere die Geschiebeführung auf die Kolkbildung und die Abflussverhältnisse an Traversensystem ausüben.

1.2 Fallbeispiele von Traversensystemen

Die Kleine Schliere, ein Wildbach im Kanton Obwalden mit einem Einzugsgebiet von rund 21 km^2, ist auf ihrem Schwemmkegel kanalisiert. Der Abschnitt zwischen den Geschiebesammlern Chlewigen am Kegelhals und Chilcherli am Fuss des Kegels ist mit Traversen in regelmässigen Abständen von 15–20 m auf einer Fliessstrecke von etwa 1.6 km verbaut. Das Bruttogefälle nimmt kontinuierlich von $J_B = 5$ % im oberen Bereich bis auf $J_B = 2$ % im unteren Bereich ab. Das Hochwasserereignis vom August 2005 ($q = 7$ m^2/s) brachte das Traversensystem der Kleinen Schliere an seine Kapazitätsgrenze. Im aktuellen Zustand wird ein schlagartiger Kollaps der Uferböschung durch zu starke Unterkolkung bei extremen Belastungen befürchtet. Zudem wurden beim Hochwasserereignis im August 2005 im Traversensystem stehende Wellen und das Ablaufen von instationären Wellen beobachtet *(Bild 2)* (*Bezzola* und *Hegg*, 2008).

Instabile Abflusszustände wurden auch bei einem etwa 20-jährlichen Hochwasserereignis im Jahr 1991 an der Ruetz, einem kleineren Gebirgsfluss in der Nähe von Innsbruck (Österreich), beobachtet. Das Auftreten von instationären Wellen in der mit Schwellen stabilisierten Fliessstrecke führte zum Überströmen der Ufer und zerstörte diese teilweise (*Premstaller et al.* 2004). *Premstaller* untersuchte mit einem hybriden Ansatz, d. h. mit einer Kombination von physikalischen Modellversuchen und numerischen Simulationen, das Auftreten der Abflussinstabilitäten, allerdings ohne Berücksichtigung der Geschiebeführung. Er erkannte, dass Oszillationen in den Wechselsprüngen zu solchen Abflussinstabilitäten führen können.

Comiti und *Lenzi* (2006) haben am Gebirgsbach Maè in den italienischen Dolomiten erhobene Felddaten ausgewertet. Ihre Untersuchungen konzentrierten sich auf das Auftreten von stehenden Wellen an Gebirgsbächen, die mittels Schwellen stabilisiert sind. Solche Wellen traten beim Hochwasserereignis im November 2002 auf *(Bild 3)*. Der untersuchte Flussabschnitt weist ein Bruttogefälle von $J_B = 2$ % auf. Analysen vergangener Hochwasserereignisse, bei denen stehende Wellen beobachtet wurden, ergaben, dass der Abfluss durch eine mittlere Froude-Zahl von $F \approx 1$, also kritischem Abfluss geprägt war. Anhand von physikalischen Modellversuchen konnten *Comiti* und *Lenzi* (2006) zeigen, dass sich über den Schwellen Froude-Zahlen von 1.3 bis 1.7 einstellten. Folglich entstanden unterstrom schwach gewellte Wechselsprünge, welche als stehende Wellen wahrgenommen wurden. In den Modellversuchen von *Comiti* und *Lenzi* (2006) war zudem erkennbar, dass die gewellten Wechselsprünge antidünenartige Sohlenformen in den Schwellenfeldern provozieren.

Bild 2. Ablaufen einer instationären Welle am Geschiebetriebkanal Alpnach an der Kleinen Schliere beim Hochwasserereignis im August 2005 (Bezzola und Hegg, 2008).

Bild 3. Kanalisierter und mittels Traversen stabilisierter Abschnitt des Gebirgsbachs Maè bei Forno di Zoldo (Italien) während des Hochwassers im November 2002 (Comiti und Lenzi, 2006).

	Mischung 1	Mischung 2	Mischung 3
Mittlerer Durchmesser d_m [m]	0.13	0.34	0.07
Durchmesser bei 90% Siebdurchgang d_{90} [m]	0.34	0.38	0.17
Standardabweichung $\sigma = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$ [-]	3.5	1.1	3.0

Tabelle 1. Charakteristische Korndurchmesser und Standardabweichung der für die Versuche verwendeten Kornmischungen (Naturmassstab).

2. Physikalische Modellversuche

Die aktuellen physikalischen Modellversuche an der VAW wurden in einer neigbaren Rinne mit senkrechten Wänden mit einer Höhe von 0.6 m, einer Länge von 13.5 m und einer Breite von 0.2 m durchgeführt. Die Versuchsrinne ist auf einer Seite mit einer Glasscheibe ausgestattet, sodass während der Versuche die Entwicklung der Sohle und des Wasserspiegels beobachtet werden konnte. Die Geschiebezugabe erfolgte mit einer kalibrierten Beschickungsmaschine, die am oberen Ende der Rinne montiert ist. Die Traversen sind aus Holz mit einer Stärke von 2.8 cm gefertigt. Vor Versuchsbeginn wurden die Traversenfelder soweit aufgefüllt, dass die Traversen eingedeckt waren und die Neigung der Sohle durchgehend dem Bruttogefälle entsprach. Das Modell entspricht in etwa den Grössenverhältnissen des Geschiebetriebkanals der Kleinen Schliere mit einem Massstab von 1:32. Im Folgenden werden alle Grössen im Naturmassstab wiedergegeben.

Es wurde der Einfluss von drei verschiedenen Kornverteilungen untersucht *(Tabelle 1)*, wobei die Zusammensetzung des eingebauten Sohlenmaterials jeweils dem der Geschiebebeschickung entsprach. Mischung 1 entspricht der skalierten Mischung aus der Kleinen Schliere, Mischung 2 ist ein Einkornmaterial mit $d = d_{90}$ von Mischung 1. Bei Mischung 3 sind die Korngrössen im Vergleich zu Mischung 1 in etwa halbiert, die Breite der Kornverteilung (Standardabweichung σ) bleibt sonst nahezu gleich.

Zu Beginn aller Versuche entsprach die Geschiebebeschickungsrate g_b der rechnerischen Transportkapazität

Stationäre Versuche				Ganglinienversuche Kleine Schliere			
q [m²/s]	4.4	8.9	13.3		Abschnitt I	Abschnitt II	Abschnitt III
J_B [-]	0.02	0.03	0.05	J_B [-]	0.048	0.032	0.021
L_T [m]	10	15	20	L_T [m]	15	20	20
Kornmischung	Mischung 1	Mischung 2	Mischung 3	Kornmischung	Mischung 1		
$g_b/g_{b,max}$ [-]	1.0	0.5	0.25	0.0	Szenario	Abfluss- und Geschiebeganglinien eines HQ300 / EHQ	

Tabelle 2. Zusammenfassung des Versuchsprogramms.

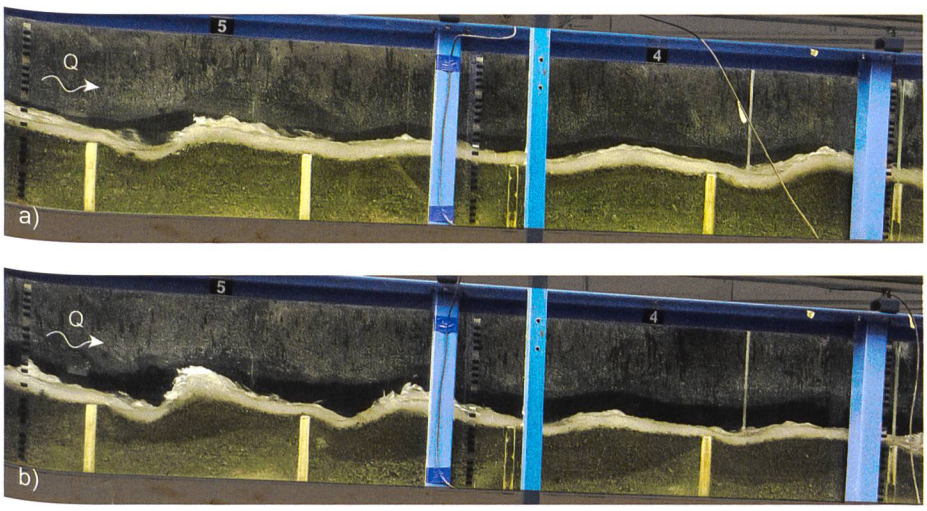

Bild 4. Antidünenbildung bei einer Geschiebeführung von $g_b/g_{b,max}$ = 1, mit Kornmischung 1, L_T = 20 m und q = 8.9 m³/(ms); a) J_B = 3 %; b) J_B = 5 %.

$g_{b,max}$ [kg/(ms)], berechnet nach dem Ansatz von *Rickenmann* (1991), unter Berücksichtigung des Bruttogefälles J_B. Die Versuche wurden unter stationären Bedingungen durchgeführt, d. h., Abfluss und Geschiebezugaberate waren konstant. Die Geschiebezugaberate wurde nach Erreichen eines stationären Zustands im Kanal (Geschiebeeintrag ≈ Geschiebeaustrag) schrittweise bis zum Klarwasserabfluss reduziert (*Tabelle 2*, links).

Neben den stationären Versuchen wurden Ganglinienversuche mit den Hochwasser- und Geschiebeganglinien des Geschiebetriebkanals der Kleinen Schliere durchgeführt. Die Geometrie wurde entsprechend dem Traversensystem der Kleinen Schliere im Modell angepasst. Das Längsgefälle des Traversensystems der Kleinen Schliere nimmt in Fliessrichtung ab. Daher wurden drei Abschnitte des Traversensystems separat in der Laborrinne modelliert (*Tabelle 2*, rechts). Die Abfluss- und Geschiebeganglinien für ein 300-jährliches Ereignis basieren auf den Modellversuchen zum geplanten Umbau des Geschiebesammlers Chlewigen (*VAW*, 2016). Die Geschiebezugabe wurde von einer Zugabe zum Sammler entsprechend der Transportkapazität bis hin zu geschiebefreiem Abfluss variiert. Der Geschiebeaustrag eines jeden Abschnitts wurde als obere Randbedingung für den nächsten Abschnitt unterstrom verwendet.

Anhand von Foto- und Videoaufnahmen wurden die Kolkentwicklung, die Wasserspiegellagen und die Abflusszustände ausgewertet. An festen Stellen an der Versuchsrinne waren Ultraschallsensoren in Kanalmitte zur Messung der Wasserspiegellage über die Zeit angebracht.

3. Entwicklung der Sohlenlage in den Traversenfeldern

Die maximale Kolktiefe ohne Geschiebezugabe $S_{0,max}$ wurde bei den stationären Versuchen dann erfasst, wenn das statische Geschiebegleichgewicht erreicht war, d. h., wenn kein Geschiebeaustrag mehr beobachtet wurde. In den Modellversuchen zeigte sich eine Korrelation zwischen $S_{0,max}$ und qJ_B/d_m. Bei steigender hydraulischer Belastung qJ_B respektive feinerer Kornverteilung nahm $S_{0,max}$ zu.

In den Versuchen mit Geschiebezugabe war die Geometrie der Kolke in den Traversenfeldern zeitlich und räumlich variabel. Die für die Dimensionierung relevante Kolktiefe S_{max} ist definiert als die maximale Kolktiefe, welche in einem Traversenfeld zu einem bestimmten Zeitpunkt auftrat. Sie trat nicht zwingend in jedem Traversenfeld und trotz stationärer Beschickung und stationärem Abfluss auch nicht dauerhaft auf. Bei einigen Versuchen bewirkte eine höhere Geschiebeführung eine Verminderung von S_{max}. Konfigurationen mit hohen Abflüssen und geringem Bruttogefälle (J_B = 2 %), aber auch die Reduktion von L_T hatten hingegen zur Folge, dass trotz Reduktion der Geschiebeführung S_{max} nahezu konstant blieb.

Bei hoher Geschiebeführung ($0.5 \leq g_b/g_{b,max} \leq 1$) und einer mittleren Froude-Zahl von $F \geq 1$ bildeten sich in einigen Traversenfeldern antidünenartige Sohlstrukturen aus. Dies war daran erkennbar, dass es unterstrom des Kolks zu Ablagerungen kam und der Wasserspiegel in Phase mit der Sohle gewellt war *(Bild 4)*. Aufgrund der Störung durch die Traversen war jedoch eine vollständige Ausbildung der Antidünen und deren Bewegung beeinträchtigt. Die Antidünen traten nicht mit gleicher Ausprägung in jedem Traversenfeld auf.

Die Länge der Antidünen L wird als zweifacher Abstand zwischen dem Wellental und dem Wellenberg der Antidüne definiert *(Bild 1)* Die Geometrie der Antidünen wurde nur für die massgebenden Traversenfelder ausgewertet, d. h. für die Felder, in denen ein ausgeprägter Kolk und anschliessend eine deutliche Ablagerung beobachtet wurden.

Die beobachteten Wellenlängen der antidünenartigen Sohlenformen korrelieren mit qJ_B. Diese Beobachtungen decken sich mit der Gleichung nach *Recking et al.* (2009) zur Berechnung der Wellenlänge L von Antidünen für $J_B \geq 0.01$.

$$\frac{L}{R_s} = 16\, J_B^{\,0.17}\, \mathrm{F} \qquad (1)$$

mit $R_S = A_S/P_S$ = hydraulischer Radius der Sohle, wobei A_S = auf die Sohle bezogene durchflossene Querschnittsfläche und $P_S = b$ = benetzte Sohlbreite *(Bild 5)*.

Mit den Eingangsparametern q, J_B und d_{90} kann die theoretische Antidünenlänge L ermittelt werden. Die mittlere Fliessgeschwindigkeit v_m berechnet sich nach dem Ansatz für steile Gerinne mit J_B < 20 % nach *Smart* und *Jäggi* (1983).

$$v_m = 2.5(g\, h_m\, J_B)^{0.5} \left[1 - exp\left(-0.05\, h_m/\left(d_{90}\, J_B^{\,0.5}\right)\right)\right]^{0.5} \ln[12.3\, h_m/(1.5\, d_{90})] \qquad (2)$$

v_m und die mittlere Fliesstiefe h_m müssen iterativ anhand Gl. (2) und der Kontinuitätsgleichung bestimmt werden. Es ist zu bedenken, dass in Gl. (1) nicht h_m, sondern R_s verwendet wird. Dem Wandeinfluss respektive der Rauheitseinfluss der Ufer

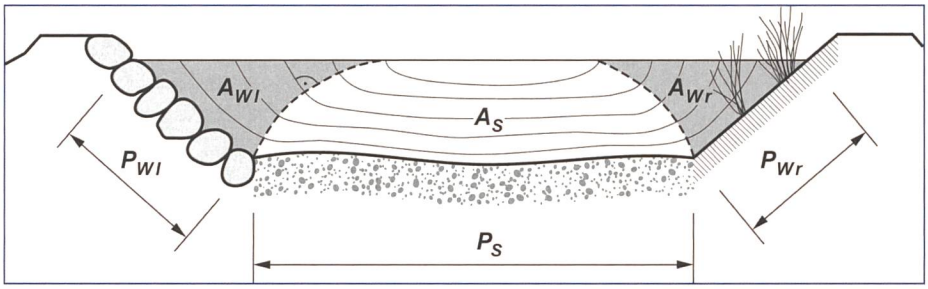

Bild 5. Querschnittszerlegung zur Berücksichtigung des Wandeinflusses bei kompakten Gerinnequerschnitten, mit AWl,r = linke respektive rechte Wandeinflussfäche, PWl,r = benetzter Umfang der linken respektive rechten Wandeinflussfläche (Bezzola, 2016).

muss daher Rechnung getragen werden. In Gl. (1) werden die Geschiebemenge und die Formverluste durch Kolke in den Traversenfeldern nicht berücksichtigt. Die mit Gl. (2) berechnete Fliessgeschwindigkeit v_m stimmt jedoch gut mit den gemessenen mittleren Fliessgeschwindigkeiten der Versuche bei $g_b/g_{b,max} \geq 0.5$ überein. Es wurde zudem beobachtet, dass sich bei $g_b/g_{b,max} \geq 0.5$ zwischendurch immer wieder Kolke in den Traversenfeldern auffüllten, sodass dann die Formverluste vernachlässigbar waren.

Die gemessenen Antidünenlängen der Versuche fallen mehrheitlich kürzer aus als die mit Gl. (1) berechneten *(Bild 6)*. Eine mögliche Erklärung ist, dass sich im Traversensystem die antidünendünenartigen Sohlenformen nicht voll ausbilden können, sondern durch die Traversen begrenzt werden. Bei Konfigurationen mit $g_b/g_{b,max} \geq 0.5$ und $L > L_T$ (x in *Bild 6*) wurde mehrheitlich beobachtet, dass die Sohlenformen periodisch in sich zusammenfallen und anschliessend wieder neu gebildet werden, was zu instationären Wellen führt. Einzig bei einem Versuch mit feinerer Kornzusammensetzung (Mischung 3), bei welchem auch instationäre Wellen beobachtet wurden, liegt die berechnete Wellenlänge der Antidünen knapp unter dem Traversenabstand.

Simons und *Richardson* (1966) sowie *Alexander et al.* (2001) beobachteten ebenfalls bei physikalischen Modelluntersuchungen zu Antidünen, dass sich periodisch bei Zunahme der Amplitude der Antidünen die stehenden Wellen aufsteilen und gegen die Fliessrichtung brechen.

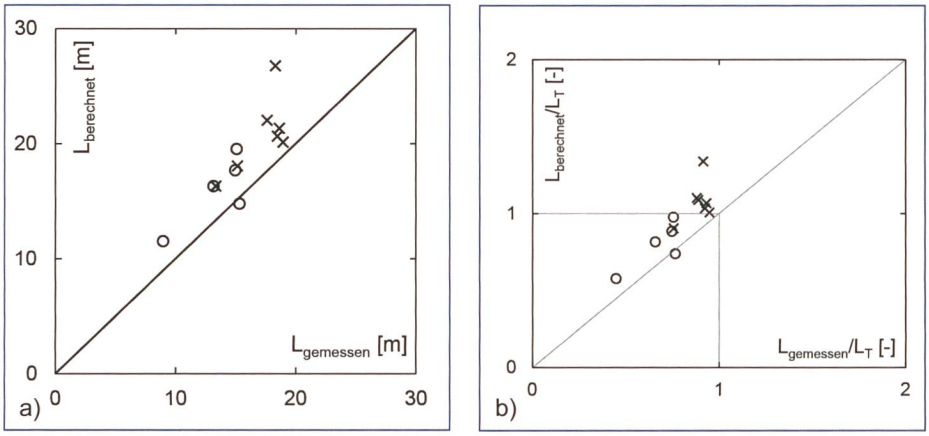

Bild 6. (a) Vergleich der in den Versuchen gemessenen Antidünenlängen mit den berechneten Antidünenlängen nach dem Ansatz von Recking et al. (2009); b) Vergleich der dimensionslosen gemessenen Antidünenlängen $L_{gemessen}/L_T$ mit dem Verhältnis $L_{berechnet}/L_T$ (o stabile Abflussverhältnisse an Antidünen, x in sich zusammenfallende Antidünen mit instationären Wellen).

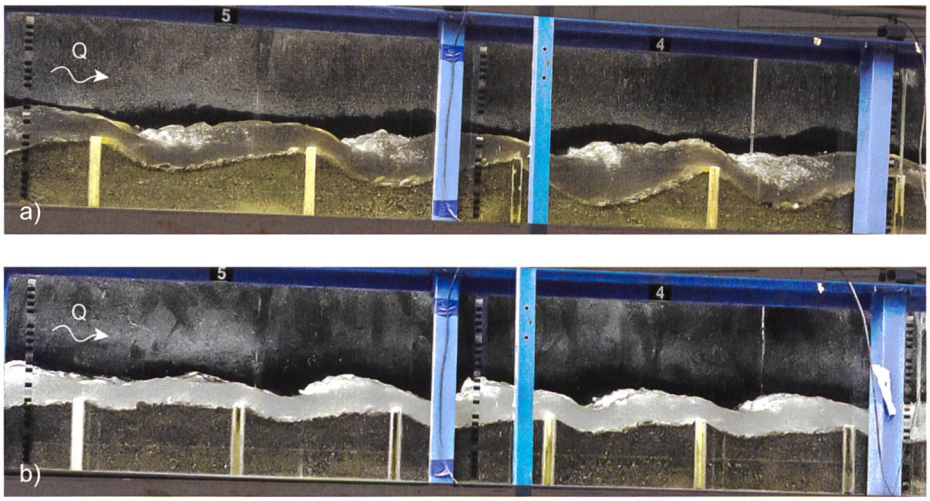

Bild 7. Wasserspiegellagen bei Klarwasserabfluss mit q = 8.9 m³/(ms) und Kornmischung 1 a) Wechselsprünge mit eingetauchtem Strahl bei J_B = 5 %, L_T = 20 m, b) stehende Wellen bei bei J_B = 3 %, L_T = 15 m.

4. Wasserspiegellagen und Auftreten von instationären Wellen

4.1 Wasserspiegel bei Klarwasserabfluss

Abhängig von den verschiedenen Versuchskonfigurationen wurden sehr unterschiedliche Abflussverhältnisse beobachtet, wobei sich die Bandbreite vom stabilen und nur geringfügig durch Wellen geprägten Wasserspiegel bis hin zum Auftreten von starken Instabilitäten erstreckt.

Bei Klarwasserabfluss und grossen Kolktiefen, welche für J_B = 0.05 respektive bei der feineren Kornverteilung (Mischung 3) entstanden, bildeten sich in den Traversenfeldern Wechselsprünge mit eingetauchtem Strahl aus *(Bild 7a)*. Die Wechselsprünge waren überwiegend stabil und der Wasserspiegel wegen des eingetauchten Strahls nur leicht gewellt. Bei Klarwasserabfluss und geringen Kolktiefen konnte sich kein stabiler Wechselsprung mit eingetauchtem Strahl ausbilden. Stattdessen entstanden stehende Wellen *(Bild 7b)*, hervorgerufen durch einen schwachen und gewellten Wechselsprung. Diese Beobachtungen decken sich mit den Analysen nach *Comiti* und *Lenzi* (2006).

Bei den Versuchen mit Klarwasserabfluss und Traversenabständen L_T = 15 m und L_T = 20 m traten keine Instabilitäten auf. Beim Versuch mit dem kleinsten Traversenabstand L_T = 10 m wurde das periodische Brechen der steilen stehenden Wellen gegen die Fliessrichtung beobachtet. Anschliessend steilten sich die Wellen wieder auf. Das Wiederaufsteilen der Wellen wird im Kanal wie schwallartige, instationären Wellen, welche sich stromabwärts bewegen, wahrgenommen. Ähnliche Phä-

nomene zum Auftreten von Instationaritäten hatten auch *Premstaller et al.* (2004) beobachtet.

Spezifische Wellenparameter der instationären Wellen konnten anhand der Wasserspiegelaufzeichnungen über die Zeit und mithilfe des Zero-Downcrossing-Verfahrens analysiert werden (*KFKI*, 2007). Die mittlere Wellenperiode T_m beschreibt den zeitlichen Abstand, in welchem sich das Ablaufen der instationären Wellen wiederholt. Weiterhin wurden die mittlere Wellenhöhe H_m und die für die Bemessung relevante signifikante Wellenhöhe $H_{1/3}$ bestimmt. $H_{1/3}$ bezeichnet den Mittelwert der 33 % grössten Wellenhöhen der ausgewerteten Zeitreihe. Für L_T = 10 m wurden T_m = 34 s und H_m = 0.98 m ermittelt. Die signifikante Wellenhöhe wurde zu $H_{1/3}$ = 1.48 m bestimmt. Das entspricht einem Verhältnis von $H_{1/3}/h_m$ = 0.8.

4.2 Instationäre Wellen bei Geschiebeführung

Die Entstehung von Antidünen ist ein dynamischer Vorgang. Auch bei geringen hydraulischen Belastungen entstanden Antidünen, welche jedoch über einen längeren Zeitraum stabil waren. An diesen Antidünen mit niedrigen Amplituden bildeten sich stehende Wellen aus, welche in Phase mit der Sohle waren.

Eine höhere hydraulische Belastung führte dazu, dass sich schwallartige, instationäre Wellen bildeten, welche sich stromabwärts bewegten. Die Beobachtungen decken sich mit den Beschreibungen nach *Bezzola* und *Hegg* (2008) für das Traversensystem der Kleinen Schliere während des Hochwasserereignisses im August 2005. Es wurde vermutet, dass dort während des Hochwasserereignisses Kolke umgeschlagen sind und dies die instationären Wellen hervorgerufen hat. Während der physikalischen Modellversuche an der VAW wurde jedoch auch bei sehr hohen hydraulischen Belastungen, welche das Abflussmaximum vom Hochwasserereignis 2005 noch übertrafen, kein Kolkumschlagen beobachtet.

Die instationären Wellen im hydraulischen Modell entstanden aufgrund der Instabilitäten in der Sohlenlage, ohne dass es zu einem Umschlagen des Kolks kam. An den antidünenartigen Sohlenstrukturen entstand ein gewellter Wasserspiegel *(Bild 8a)*. Die Amplitude der Antidünen nahm zu und die Wellen steilten sich am Kolkwall immer weiter auf *(Bild 8b)*, bis sie schliesslich gegen die Fliessrichtung brachen. Das Aufsteilen der Wellen geschah allerdings nur in jedem zweiten bis dritten Traversenfeld. In einem nächsten Schritt fielen die Wellen in sich zusammen und der Abfluss im Gerinne ging kurzzeitig fast gegen null. Dieser Moment korrespondiert mit der grössten beobachteten Kolktiefe *(Bild 8c)*. Da jedoch der Kanal weiterhin mit einem konstanten Abfluss beschickt wurde, kam es anschliessend zum Ablaufen der Wellenfront stromabwärts *(Bild 8d)*. Danach begann der Prozess von vorne.

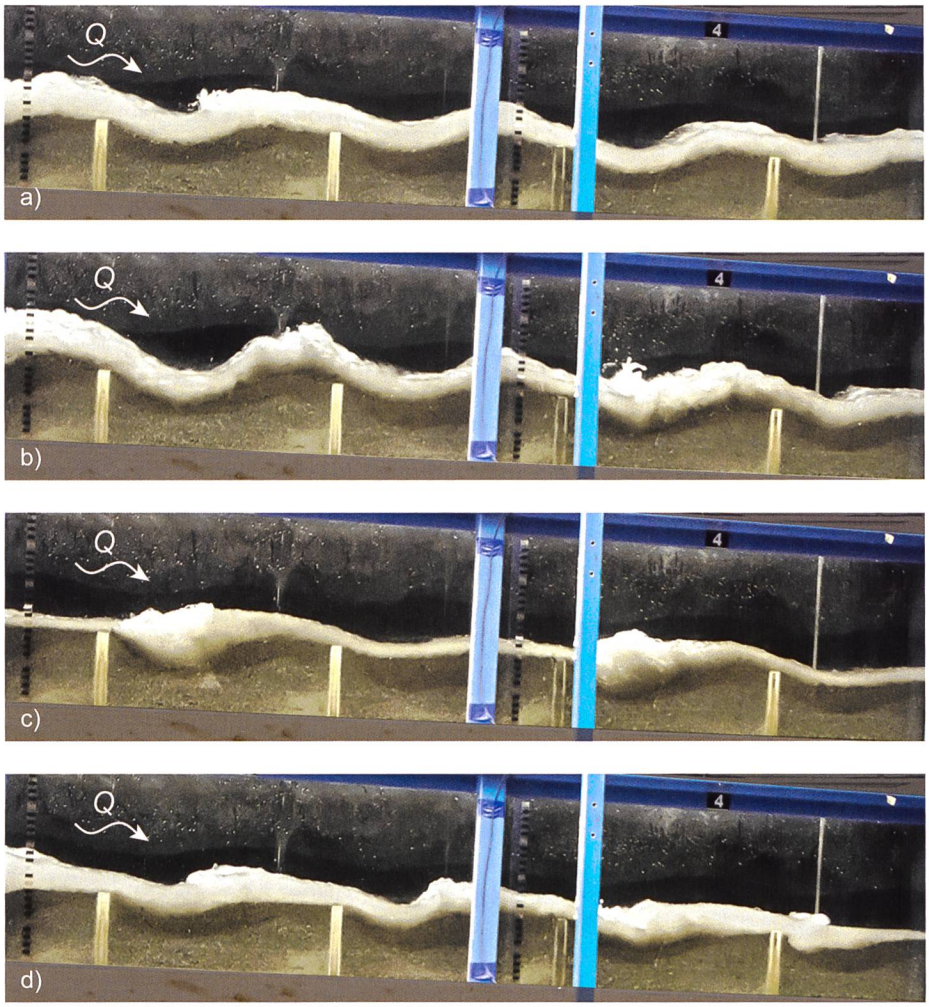

Bild 8. Instationäre Wellen bei q = 13.3 m³/(ms), J_B = 0.05, L_T = 20 m mit Kornmischung 1 und $g_b/g_{b,max}$ = 0.5; a) stehende Wellen im Sperrenfeld, b) maximale Steilheit der stehenden Welle, c) Wechselsprung in den Kolken, der Abfluss kommt fast zum Erliegen, d) Front der instationären Welle im letzten Traversenfeld.

Die mittleren Wellenperioden bewegten sich zwischen T_m = 37 s und T_m = 58 s, wobei die grösste Wellenperiode bei der geringsten Neigung von 2 % sowie dem grössten spezifischen Abfluss von q = 13.3 m²/s auftrat. Bei hoher Geschiebeführung ($0.5 \leq g_b/g_{b,max} \leq 1$) war $H_{1/3}$ nie kleiner als 1 m. Die grössten Wasserspiegelauslenkungen mit $H_{1/3}$ = 3.12 m wurden beim Versuch mit der grössten hydraulischen Belastung beobachtet. Dies entspricht einem Verhältnis von $H_{1/3}/h_m$ = 1.1.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass verschiedene Parameter an Traversensystemen die Bildung von instationären Wellen mit teilweise starken Wasserspiegelauslenkungen begünstigen. Bei hohem Gefälle bzw. grossen Abflüssen spielt die Geschiebezugabemenge eine bedeutende Rolle. Einen weiteren Zusammenhang zeigt der Vergleich der nach *Recking et al.* (2009) berechneten Wellenlängen der Antidünen mit dem Auftreten der instationären Wellen. Bei den Konfigurationen mit $L > L_T$ *(Bild 6b)* wurde das periodische Entstehen und Zusammenfallen der Antidünen und die Bildung von instationären Wellen beobachtet. Die Modellversuche zeigten, dass, sobald die Antidünen in ihrer Länge durch die Traversen begrenzt sind, sich diese nicht komplett ausbilden können und deshalb in sich zusammenfallen. Dies führt zum Brechen der stehenden Wellen und zum Ablaufen von instationären Wellen.

In den Ganglinienversuchen am Modell des Traversensystems der Kleinen Schliere konnte im steilsten Abschnitt des Traversensystems für $8 \leq q \leq 12$ m²/s, J_B = 0.048 und L_T = 15 m das Auftreten instationärer Wellen für Versuche mit

Geschiebezugabe ebenfalls beobachtet werden. Für die Versuche ohne Geschiebezugabe traten instationäre Wellen seltener, in abgeschwächter Form und nur im ansteigenden Ast der Ganglinie auf. Aufgrund des hohen Geschiebeaustrags aus dem steilsten Abschnitt war die Kolkentwicklung in den flacheren Abschnitten (J_B = 0.033 und J_B = 0.021) im Vergleich zur Reinwassertiefe deutlich reduziert. Speziell im absteigenden Ast der Ganglinie wurden darum deutliche Auflandungen beobachtet. Zudem ist der Traversenabstand in den flacheren Abschnitten mit L_T = 20 m grösser. Folglich wurden selbst für hohe Abflüsse q = 12 m^2/s in den flacheren Abschnitten keine instationären Wellen beobachtet. Die Ganglinienversuche unterscheiden sich folglich bezüglich dem Auftreten von instationären Wellen nicht grundsätzlich von den stationären Versuchen, und das Grenzkriterium $L > L_T$ ist ebenfalls anwendbar.

5. Schlussfolgerungen

Die Kenntnis über die Instabilität der Sohlenformen und das Auftreten von instationären Wellen ist relevant für die Bemessung von Traversensystemen, da die Gefahr besteht, dass die instationären Wellen die Ufer überströmen und beschädigen können. Im Wasserbaulabor der VAW wurden hydraulische Modelluntersuchungen zur Kolkentwicklung und zu Abflusszuständen an Traversensystemen durchgeführt. Bei den hydraulischen Modelluntersuchungen war der Einfluss der Geschiebeführung von besonderem Interesse. Die hier beschriebenen Versuche zeigten, dass aufgrund einer intensiveren Geschiebeführung die Geometrie der Kolke (Tiefe, Ausdehnung) zeitlichen Variationen unterworfen ist. Die bemessungsrelevante maximale Kolktiefe wurde nur zu bestimmten Zeitpunkten und nicht in jedem Traversenfeld beobachtet. Ein Zusammenhang zwischen der maximalen Kolktiefe und der Geschiebezugabe konnte nicht bei allen Versuchen erkannt werden.

Hohe Geschieberaten ($0.5 \leq g_b/g_{b,max} \leq 1.0$) begünstigten instabile Zustände und die Bildung von antidünenartigen Sohlenformen, welche zum Teil in sich zusammenfielen und so zu schwallartigen, instationären Wellen führten. Die instationären Wellen in den physikalischen Modellversuchen wiesen deutlich grössere Wellenhöhen auf als die stehenden Wellen, die sich meist bei sehr geringen Geschiebemengen oder Klarwasserabfluss bildeten.

Die Versuchsresultate zeigen einen Zusammenhang zwischen dem Auftreten instationärer Wellen, die durch das Brechen der stehenden Wellen entstanden, und den Antidünen in den Traversenfeldern. Antidünen mit instabilen Strömungszuständen waren deutlich steiler als die Antidünen in den Versuchen, bei denen keine instationären Wellen auftraten. Instationäre Wellen bildeten sich dann, wenn bei hohen Geschieberaten die theoretische Länge der Antidünen grösser als der Traversenabstand war. Mithilfe der Berechnung der theoretischen Länge der Antidünen kann so abgeschätzt werden, ob instationäre Wellen beim Bemessungsabfluss zu erwarten sind.

Danksagung

Die Forschungsarbeit und Modellversuche wurden vom Bundesamt für Umwelt, BAFU, und z. T. durch die Gemeinde Alpnach finanziert. Wir bedanken uns bei Dr. *Gian Reto Bezzola* (BAFU) für die wertvollen Hinweise und Kommentare zu diesem Beitrag.

Literatur

Alexander, J., Bridge, J.S. Cheel, R.J., Leclair, S.F. (2001). Bedforms and associated sedimentary structures formed under supercritical water flows over aggrading sand beds. Sedimentology, Vol. 48, pp. 133–152.

Bezzola, G.R. (2016). Vorlesungsmanuskript Flussbau, Fassung Herbstsemester 2016. Professur für Wasserbau an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.

Bezzola, G.R., Hegg, C. (ed.) (2008). Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. Bundesamt für Umwelt, BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0825.

Comiti, F., Lenzi, M.A. (2006). Dimensions of standing waves at steps in mountain rivers. Water Resources Research, Vol. 42, W03411, pp. 1–13.

KFKI – Kuratorium für Küsteningenieurwesen (Hrsg.) (2007). Die Küste – Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken (EAK) durch den Ausschuss für Küstenschutzwerke der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. und der Hafentechnischen Gesellschaft e. V., Heft 65, Korrigierte Ausgabe. Westholsteinische Verlagsanstalt Boysens & Co. Heide i. Holstein.

Premstaller, G., Rutschmann, P., Oberhuber, M. (2004). Numerical simulation of flow instabilities in steep, stepped channels. River Flow 2004. Proc. of the second International Conference on Fluvial Hydraulics, (ed. Greco, M.), Vol. 1, pp. 555–562. Napoli, Italy.

Recking, A., Bacchi, V., Naaim, M., Frey, P. (2009). Antidunes on steep slopes. Journal of Geophysical Research Vol. 114(F04025), pp. 1–11.

Rickenmann, D. (1991). Hyperconcentrated Flow and Sediment Transport at Steep Slopes. Journal of Hydraulic Engineering 117(11), pp. 1419–1439.

Simons, D.B., Richardson, E.V. (1966). Resistance to Flow in Alluvial Channels. Professional Paper 422-J, U.S. Geological Survey, GPO, Washington.

Smart, G., Jäggi, M. (1983). Sedimenttransport in steilen Gerinnen. VAW-Mitteilung Nr. 64 (D. Vischer, ed.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Zürich.

VAW (2016). Geschiebesammler Chlewigen Kleine Schliere – Hydraulische Modellversuche, Schlussbericht. VAW-Bericht Nr. 4328, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Zürich (unveröffentlicht).

Volkart, P. (1972). Die Stabilisierung von Flussläufen mittels einer Folge von Querschwellen. VAW-Mitteilung Nr. 6 (D. Vischer, ed.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Zürich.

Anschrift der Verfasser

Eva Gerke, *Benjamin Hohermuth*, Dr. *Volker Weitbrecht*
ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)
Hönggerbergring 26, CH-8093 Zürich
gerke@vaw.baug.ethz.ch
hohermuth@vaw.baug.ethz.ch
weitbrecht@vaw.baug.ethz.ch