

# Einfluss verstellbarer Klappen auf die Surfbarkeit stehender Wellen

*Helge Fuchs*

## Zusammenfassung

Wellenreiten als Surfsport ist insbesondere in Urlaubsdestinationen mit Meeresanschluss eine beliebte Freizeitbeschäftigung. In Binnenländern bleibt Interessierten oft nur das gefährliche Wellenreiten auf stehenden Wellen bei Hochwasser. Aufgrund der hohen Fließgeschwindigkeiten sowie der Schwimmstoffe im Wasser birgt dies jedoch ein hohes Gefahrenpotenzial für Surfende.

Am Eisbach in München (Abb. 1a) wird seit den 1980er Jahren eine stehende Welle durch Surfende genutzt, welche sich zufällig aufgrund der gegebenen Randbedingungen gebildet hat. Mit diesem Vorbild gibt es vereinzelte Bestrebungen, durch gezielte Einbauten in Flussabschnitten kontrollierte surfbare Wellen zu erzeugen. Diese sollen möglichst ganzjährig und ungefährlich nutzbar sein. Während dies bei der Eisbachwelle gut funktioniert, konnte beispielsweise an der Sillmündung in Innsbruck keine zufriedenstellende Welle erzeugt werden. Der zum Surfen genutzte Wechselsprung ist örtlich sehr labil und kann sich bereits bei kleiner Variation der Zuflussbedingungen oder der Unterwassertiefe negativ verändern. Eine gezielte Regulierung der Durchflussbedingungen mittels verstellbarer Einbauten hat sich beispielsweise bei der Almwelle in Salzburg als positiv erwiesen (Abb. 1b).

In Rahmen von physikalischen Modellversuchen an der VAW in einem 6.0 m langen, 0.3 m breiten und 0.5 m tiefen Kanal wurde der Einfluss einer verstellbaren Klappe auf die Ausbildung eines surfbaren Wechselsprungs untersucht. Bei einer Sohlstufe mit einer Höhe von  $s = 0.1$  m wurde der Durchfluss von  $Q = 20 - 40$  l/s variiert, die Zufluss-Froude-Zahlen lagen im Bereich von  $F_o = 2.0 - 4.0$ . Zusätzlich wurde das Strömungsbild mithilfe von Particle Image Velocimetry (PIV) visualisiert. Im vorliegenden Beitrag werden ausgewählte Resultate vorgestellt.

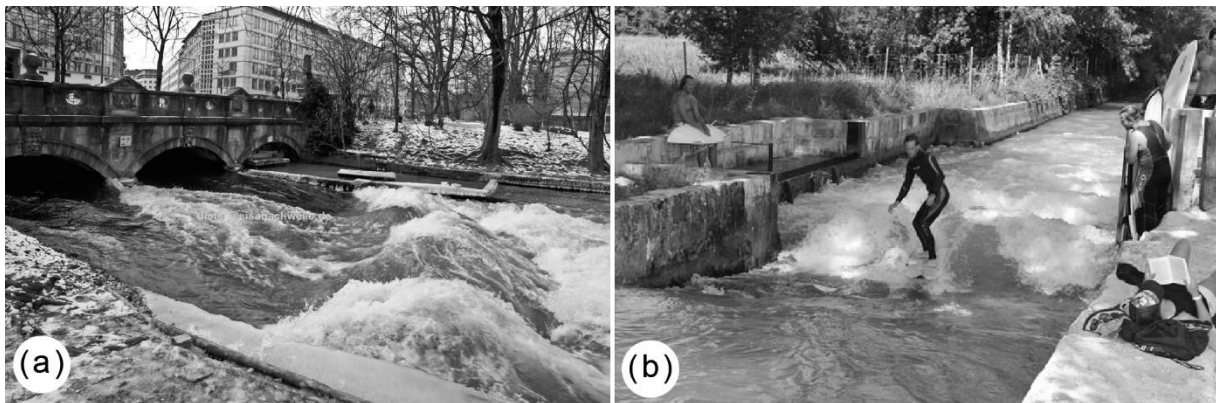
## 1 Einleitung

In Regionen mit Meeresanschluss ist der Surfsport eine beliebte Freizeitbeschäftigung. Beim Windsurfen ist mit dem Brett ein Segel verbunden, über das die kinetische Energie des Windes in eine Bewegung auf dem Wasser umgewandelt wird. Dafür müssen günstige Windbedingungen vor Ort vorherrschen. Im Gegensatz dazu steht das Wellenreiten, bei dem es eher auf eine günstige Ufer- und Meeresbodengeometrie ankommt. Die Wellen werden oft in weit entfernten Windgebieten erzeugt, propagieren zur Küste und verändern durch Energiekonzentration ihre Wellenhöhe und Länge zu günstigen Surfbedingungen. Die Surfenden auf dem Brett befinden sich dabei in einem Gleichgewichtszustand: durch die Hangabtriebskraft gleiten sie auf der Welle nach unten und die propagierende Welle erzeugt eine Relativbewegung, bei der das Wasser unter den Surfenden durchströmt. Die Reibung am Surfbrett schiebt die Surfenden auf der Welle nach oben.

Surfsportlern bleibt in Binnenländern ohne Meeresanschluss zum Üben oder Ausüben ihres Sports oft nur das gefährliche Wellenreiten auf stehenden Wellen bei Hochwasser. Dies birgt jedoch ein hohes Gefahrenpotenzial für Surfende, zum einen aufgrund der unkontrollierten Fließbedingungen und zum anderen infolge der transportierten Schwimmstoffe im Wasser.

Insbesondere unterstrom von Schwellen oder Abstürzen, an denen sich im Hochwasserfall stehende Wellen ausbilden, kann der gefährliche, nicht sichtbare Tauchstrahl entstehen. Die damit einhergehende, ausgedehnte Rückströmung kann bewirken, dass sich gestürzte Personen aus eigener Kraft nicht aus der Gefahrenzone herausbewegen können. Infolge einer solchen „drowning machine“ kam es beispielsweise am 12. Juni 2008 bei einer Militärübung an der Kander leider zu einem Schlauchboot-Unfall mit mehreren Toten (Schweizer Armee, 2008).

Am Eisbach in München (Abb. 1a) wird seit den 1980er Jahren eine stehende Welle durch Surfende genutzt, welche sich zufällig aufgrund der gegebenen Randbedingungen gebildet hat. Bei regulierten Abflussbedingungen bildet sich hier an einer Sohlrampe ein ondulierender Wechselsprung aus. Durch nachträgliches Anbringen eines Strahlablenkers auf der Bachsohle wurde diese Welle zusätzlich stabilisiert und die Wellenhöhe vergrößert.



**Abb. 1** Surfable Welle (a) am Eisbach in München (Quelle: [www.eisbachwelle.de](http://www.eisbachwelle.de)), (b) am Almkanal in Salzburg (Quelle: [www.stadt-salzburg.at](http://www.stadt-salzburg.at))

Mit diesem Vorbild gibt es vereinzelte Bestrebungen in Europa, durch gezielte Einbauten in Flussabschnitten kontrollierte surfbare Wellen zu erzeugen. In der Schweiz konzentrieren sich solche Vorhaben auf die Reuss bei Luzern, die Limmat bei Zürich, die Aare in Bern oder die Aare in Bremgarten (Dietsche, 2015). In den Jahren 2013 und 2014 wurden von der Bayerischen Ingenieurkammer-Bau und dem Workshop Wellentechnik ein sogenanntes „Flusswellenforum“ organisiert, bei dem sich ca. 100 Interessierte trafen. Mit Vorträgen und Ausstellungen wurde dort ein geeigneter Rahmen geschaffen, um über verschiedene Aspekte und Probleme im Zusammenhang mit der Errichtung stehender Wellen in Flüssen zu diskutieren.

Die grössten Vorteile der künstlich erzeugten Wellen im Vergleich zu Wellen, die ausschliesslich bei Hochwasser surfbar sind, sind eine ganzjährige und ungefährliche Nutzbarkeit. Dazu müssen diverse rechtliche, ökologische und hydraulische Randbedingungen berücksichtigt werden. Ein grosser Widerstand gegen die Errichtung surfbarer Wellen entsteht durch unklare rechtliche Rahmenbedingungen, da lokale Behörden oder Wasserkraftanlagenbetreiber keine Verantwortung oder Haftung übernehmen wollen. Dazu kommen ökologische Anforderungen, wie beispielsweise Nutzungseinschränkungen während der Fischschutz-Zeiten, falls eine surfbare Welle im Hauptschluss eines Gewässers angeordnet ist. Durch die Errichtung von Querbauwerken kann es bei natürlich vorhandenem Geschiebetrieb zu Auflandungen im Oberwasser, respektive Erosionserscheinungen im Unterwasser kommen. Diese können wiederum Einflüsse auf die Hydraulik im Gerinne haben, denn letztendlich muss die Welle hydraulisch stabil sein, um langfristig nutzbar zu sein. Während die surfbare Welle am Eisbach gut funktioniert, ist dies für andere Versuche, eine künstliche Surfwellen zu erzeugen, nicht der

Fall. Beispielsweise wurde an der Sillmündung in Innsbruck neben einer ökologisch wertvollen Blockrampe ein Absturzbauwerk aus Beton errichtet, an dem keine zufriedenstellende Welle erzeugt werden kann. Der zum Surfen genutzte Wechselsprung ist dort örtlich labil und kann sich bereits bei kleiner Variation der Zuflussbedingungen oder der Unterwassertiefe negativ verändern.

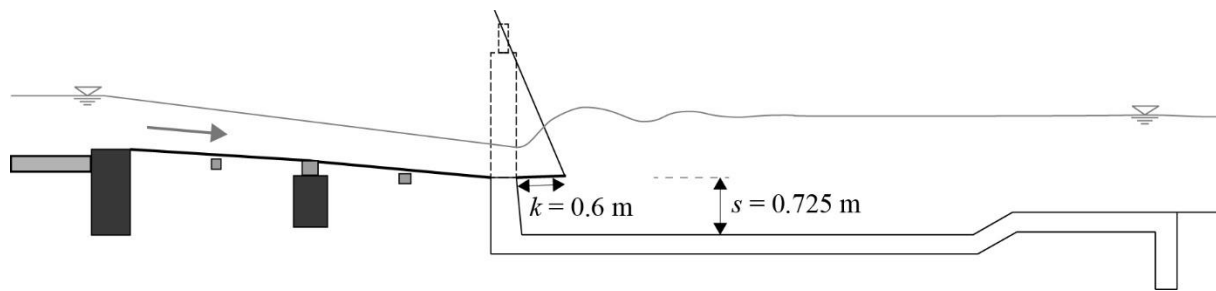
Grundsätzlich lassen sich vier verschiedene Methoden zur Erzeugung surfbarer Wellen in Fliessgewässern unterscheiden: (1) *Sheet flow* (Schichtabfluss) entlang einer Wellenberg-ähnlichen Sohltopografie, (2) Erzeugung einer räumlichen *Wave-tube* (Wellenröhre), (3) ebener Wechselsprung an Sohlstufe, und (4) ebener Wechselsprung an einer Sohlstufe mit zusätzlichen verstellbaren Elementen.

Ein Sheet flow entlang einer Wellenberg-ähnlichen Sohltopografie (1) wird oft in Freizeitbädern (z. B. Alpmare Pfäffikon, Schweiz) verwendet, um dort hauptsächlich für Kinder das Surfen mit kleinen Brettern ohne Finnen auf kleinen Schichtströmungen (Wassertiefe  $h \approx 10$  cm) zu ermöglichen. Die realisierte Surfwellen an der Donau in Cunovo bei Bratislava, Slowakei, nutzt das gleiche Prinzip bei Abflusstiefen von  $h \approx 40$  cm, um die schwankenden Zuflussbedingungen und Unterwasserstände auszugleichen (Bauer, 2015). Der Standort wird kommerziell genutzt, so dass ein Tagespass zur Surfwellenbenutzung ca. 10 EUR kostet. Benutzer berichten teilweise von abgebrochenen Surfbrettfinnen aufgrund der geringen Abflusstiefen.

Räumliche Wave-tubes (2) entsprechen dem zusammenbrechenden Oberflächenprofil eines ausgeprägten Sturzbrechers. Sie können mit relativ grossen, auf dem Gerinneboden befestigten, Strömungsablenkern erzeugt werden (Hornung und Killen, 1976; Oertel et al., 2012). Aufgrund der erhöhten Verletzungsgefahr und des grösseren Bauaufwands infolge der Einbauten wird diese Wellenform im Rahmen von Bauprojekten für surfbare Wellen praktisch nicht angestrebt.

Der ebene Wechselsprung an einer Sohlstufe (3) ist eines der klassischen Probleme in der Hydraulik und wurde daher in der Vergangenheit detailliert untersucht (Moore und Morgan, 1957; Rajaratnam und Ortiz, 1977; Hager und Bretz, 1986; Kawagoshi und Hager, 1990; Ohtsu und Yasuda, 1991; Mossa et al., 2003). Im Zentrum dieser Untersuchungen standen die Fixierung des Wechselsprungs innerhalb eines Tosbeckens sowie eine möglichst hohe Energieumwandlung. Basierend auf den zitierten Arbeiten lassen sich die Wechselsprünge an Sohlstufen in 3 verschiedene Wellentypen, nämlich A-jump (Wechselsprung oberhalb der Sohlstufe), Wave-jump (Ausbildung eines Wellenbergs kurz unterhalb der Sohlstufe) und B-jump (Wechselsprung unterhalb der Sohlstufe) einteilen. Es hat sich zudem gezeigt, dass die Wechselsprungcharakteristika wesentlich von der Zufluss-Froude-Zahl und der Unterwassertiefe abhängen.

Der ebene Wechselsprung an einer Sohlstufe mit zusätzlichen verstellbaren Elementen (4) stellt die vielversprechendste Möglichkeit zur Erzeugung stabiler stehender Wellen dar. Durch eine Regulierung der Zuflussbedingungen kann die Entstehung der oben genannten Wechselsprung-Typen beeinflusst werden. Beispielsweise bei der surfbaren Welle am Almkanal in Salzburg übt eine verstellbare Klappe einen positiven Einfluss auf die entstehende Welle aus (Abb. 1b, Abb. 2). Analog zu regulierbaren Hochwasserentlastungen entsteht hier eine Verantwortung für die Klappensteuerung. Als Erweiterung der Wellenregulierung mittels verstellbaren Klappen kann diese zusätzlich noch mit einem vorgeschalteten, höhenverstellbaren Wehrkörper kombiniert werden.



**Abb. 2** Längsschnitt der projektierten Surfwelle am Almkanal, Salzburg; die  $k = 0.6$  m lange Klappe kann zwischen  $0-30^\circ$  geneigt werden, die Zuflusswassertiefe beträgt  $h_o \approx 0.4$  m und die Stufenhöhe  $s = 0.725$  m (nach Ingenieurbüro Gostner & Aigner und Donauconsult Zottl & Erber, 2010)

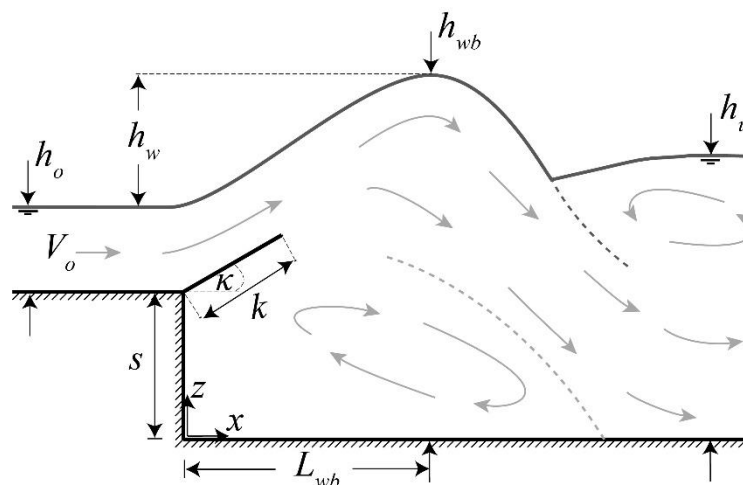
Über surfbare Wellen sind nur wenige Publikationen verfügbar. Die nicht-wissenschaftliche Surfgemeinschaft ist aktiv tätig, so dass ein Grossteil der verfügbaren Untersuchungen nichtwissenschaftlicher Natur ist und damit hydraulische Fachbegriffe eher selten verwendet werden. Eine (verstellbare) Klappe oder ein Strahlablenker wird häufig als ‚Spoiler‘ oder ‚Kicker‘ bezeichnet, Rückströmzonen sind als ‚Kehrwasser‘ und Lufteintrag als ‚Weisswasser‘ benannt.

Nachfolgend werden ausgewählte Ergebnisse aus physikalischen Modellversuchen zum ebenen Wechselsprung an einer negativen Sohlstufe mit zusätzlichen verstellbaren Elementen präsentiert. Diese Konfiguration scheint besonders vielversprechend, um mit kleinem baulichem Aufwand eine signifikante Verbesserung der Surfbarkeit stehender Wellen zu erreichen. Das Ziel der Modellversuche war die Quantifizierung des Einflusses der Klappe für verschiedene Eingangsparameter.

## 2 Versuchsaufbau

Die physikalischen Modellversuche wurden am 6.0 m langen, 0.3 m breiten und 0.5 m tiefen PIV-Kanal der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) durchgeführt. Während die Rückwand aus lackierten Stahlplatten besteht, wurde für den Boden sowie die vordere Seitenwand ein optischer Zugang mittels Glaswänden realisiert. Mithilfe einer Strahlbox (Jetbox) werden die Zuflussrandbedingungen des Freispiegelabflusses kontrolliert (Schwalt und Hager, 1992). Abbildung 3 zeigt eine Definitionsskizze mit den massgebenden, am Prozess beteiligten Parametern: Oberwassertiefe  $h_o$ , mittlere Zuflussgeschwindigkeit  $V_o$ , Stufenhöhe  $s$ , Klappenlänge  $k$ , Klappenwinkel  $\kappa$ , Unterwassertiefe  $h_u$ , Wellenhöhe  $h_w$ , sowie Höhe  $h_{wb}$  und Länge des Wellenbergs  $L_{wb}$ . Die horizontale Koordinate  $x$  und die vertikale Koordinate  $z$  haben ihren Ursprung am Fusspunkt der Sohlstufe.

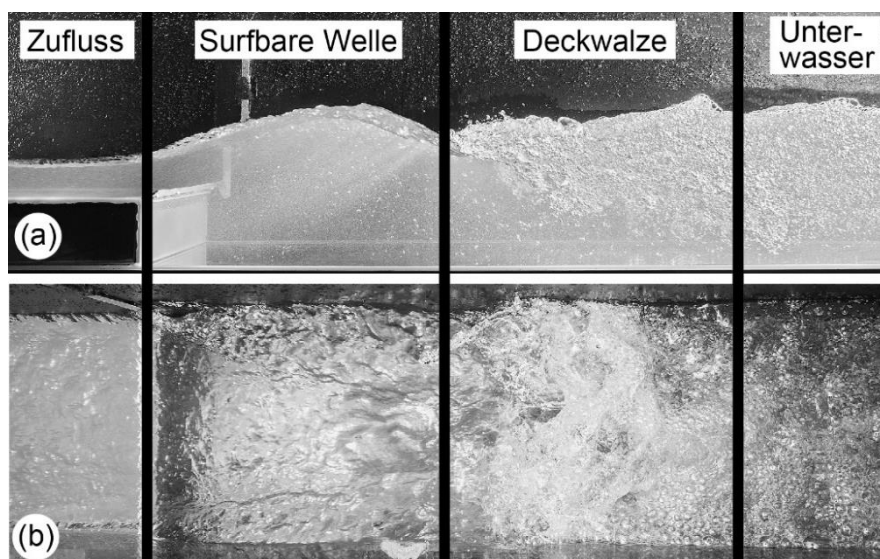
Mit einem Durchfluss von  $Q = 20 - 40$  l/s und Zuflusswassertiefen von  $h_o = 3.3 - 7.7$  cm ergaben sich Zufluss-Froude-Zahlen im Bereich von  $F_o = V_o / (gh_o)^{1/2} = 2.0 - 4.0$ . Die Sohlstufe mit einer Höhe von  $s = 0.1$  m befindet sich 0.8 m unterstrom der Jetbox. An der Sohlstufe war zusätzlich eine verstellbare Klappe mit verschiedenen Klappenlängen ( $k = 1$  cm, 2.5 cm, 5.0 cm) und Klappenneigungen ( $\kappa = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ ) angeordnet. Der Unterwasserstand wurde mithilfe eines überströmten Wehrs im Auslaufbereich des Kanals verändert. Die Oberflächenprofile wurden mit einem Stechpegel aufgenommen, der über eine Schienentraverse am Kanal befestigt war.



**Abb. 3** Definitionsskizze für surfbare Wellen an Sohlstufe mit einer verstellbaren Klappe, hier  $\kappa = 30^\circ$

### 3 Versuchsergebnisse

Abbildung 4 zeigt den gewünschten Zustand einer surfbaren Welle für  $Q = 30$  l/s,  $F_o = 3.0$ ,  $k = 2.5$  cm, und  $\kappa = 30^\circ$ . Der Abflusszustand lässt sich in vier Bereiche aufteilen: (1) den schiessenden Zufluss, (2) die surfbare Welle, (3) die oberflächennahe Rückströmung mit Deckwalze und (4) das strömende Unterwasser. Eine Welle ist einfacher surfbar, falls sich eine möglichst glatte Oberfläche ohne Lufteintrag durch eine Deckwalze einstellt. Kommt es zu einem Lufteintrag, verringert sich die Dichte des Wassers massgeblich, so dass sich der auf die Surfenden wirkende Auftrieb reduziert. Aus den realisierten Flusswellen ergibt sich eine anzustrebende Wellenhöhe im Prototyp im Bereich von  $h_w = 0.5 - 1.2$  m. Die anschließende Deckwalze sollte möglichst kurz und vom Surfbereich getrennt sein. Eine kurze Deckwalze ist im Falle eines Sturzes weniger gefährlich. Insbesondere lange Rückströmzonen können bewirken, dass sich Personen nicht mehr aus eigener Kraft aus dem Gefahrenbereich entfernen können. Auch hier bewirkt die verringerte Dichte aufgrund von Lufteintrag eine zusätzliche Erschwernis, um wieder auftauchen zu können. Im Unterwasserbereich beruhigt sich die Strömung wieder, so dass die transportierten Luftblasen ausgetragen werden.



**Abb. 4** Angestrebter Zustand einer surfbaren Welle bei  $Q = 30$  l/s,  $F_o = 3.0$ ,  $k = 2.5$  cm,  $\kappa = 30^\circ$  in (a) Seitenansicht, (b) Situation mit vier charakteristischen Bereichen

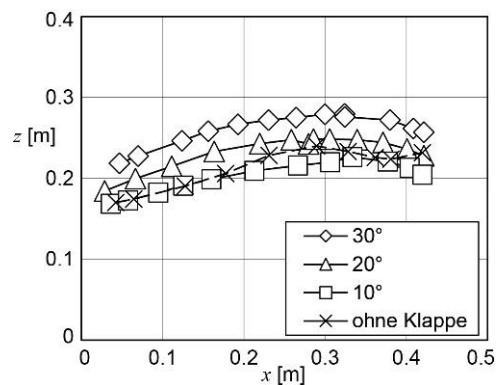
Die maximale gemessene Wellenhöhe im Rahmen der Versuche ist in Abb. 5 dargestellt. Aufgrund des hohen Lufteintrags durch starke Turbulenz sowie die anschliessende grosse Rückströmzone ist dieser Zustand zum Surfen ungeeignet.



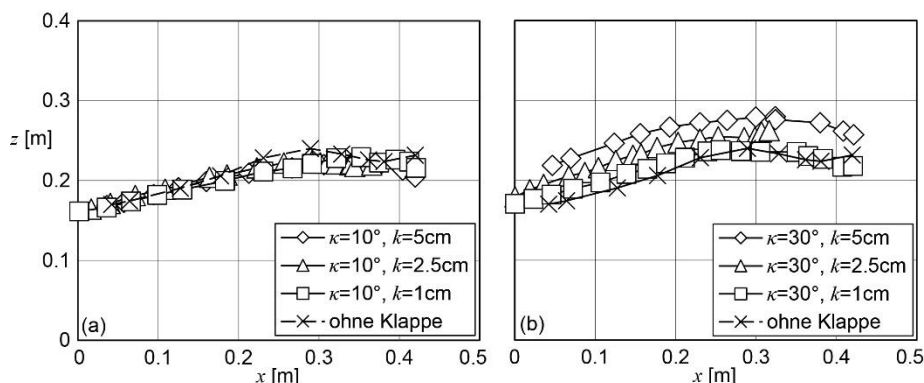
**Abb. 5** Maximale Wellenhöhe im physikalischen Modell bei  $Q = 40$  l/s,  $F_o = 4.0$ ,  $k = 5.0$  cm und  $\kappa = 30^\circ$

Abbildung 6 vergleicht die Oberflächenprofile der surfbaren Wellen für  $Q = 30$  l/s,  $F_o = 3.0$ ,  $k = 5.0$  cm und drei verschiedene Klappenwinkel  $\kappa = 30^\circ$ ,  $20^\circ$  und  $10^\circ$  sowie den Referenzfall ohne Klappe. Die maximale Wellenhöhe  $h_w = 0.18$  m entsteht beim grössten untersuchten Klappenwinkel  $\kappa = 30^\circ$ . Bei kleineren Klappenwinkeln reduziert sich die Wellenhöhe auf  $h_w = 0.15$  m ( $\kappa = 20^\circ$ ) bzw.  $h_w = 0.126$  m ( $\kappa = 10^\circ$ ). Bei der Sohlstufe ohne Klappe beträgt  $h_w = 0.14$  m. Während durch den Einsatz einer langen, steil geneigten Klappe die erzeugte Wellenhöhe um  $\approx 29\%$  vergrössert werden kann, legt eine flach geneigte Klappe die Strömung nach unten in Richtung Kanalsole an, so dass sich die Wellenhöhe um  $\approx 10\%$  reduziert.

Die Oberflächenprofile unter Variation der Klappenlänge sind in Abb. 7 für  $Q = 30$  l/s,  $F_o = 3.0$  und  $\kappa = 10^\circ$ ,  $30^\circ$  sowie ohne Klappe dargestellt. Bei kleinen Klappenwinkeln  $\kappa = 10^\circ$  hat die Klappenlänge einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Wellenhöhe. In allen drei Fällen ist die erzeugte Wellenhöhe kleiner als ohne Verwendung einer Klappe (Abb. 7a). Für grosse Klappenwinkel  $\kappa = 30^\circ$  ist jedoch ein signifikanter Einfluss der Klappenlänge erkennbar (Abb. 7c). Während sich die Wellenhöhe für  $k = 5.0$  cm um  $\approx 29\%$  auf  $h_w = 0.18$  m vergrössert, vergrössert sie sich bei  $k = 2.5$  cm nur um  $\approx 16\%$  auf  $h_w = 0.162$  m und ist bei  $k = 1$  cm identisch mit der Sohlstufe ohne Klappe.



**Abb. 6** Oberflächenprofile der surfbaren Welle bei  $Q = 30$  l/s,  $F_o = 3.0$  und  $k = 5.0$  cm



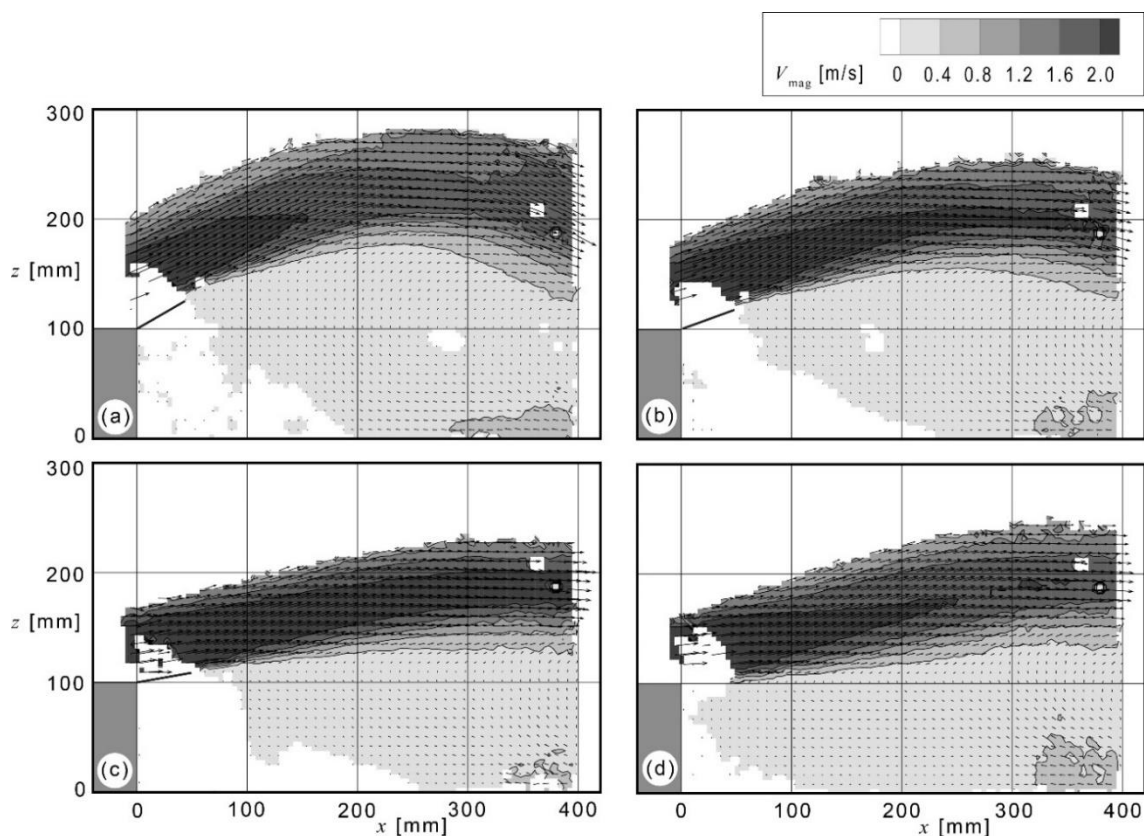
**Abb. 7** Oberflächenprofile der surfbaren Welle bei  $Q = 30$  l/s,  $F_o = 3.0$  mit (a)  $\kappa = 10^\circ$  und (b)  $\kappa = 30^\circ$

#### 4 Strömungsbilder

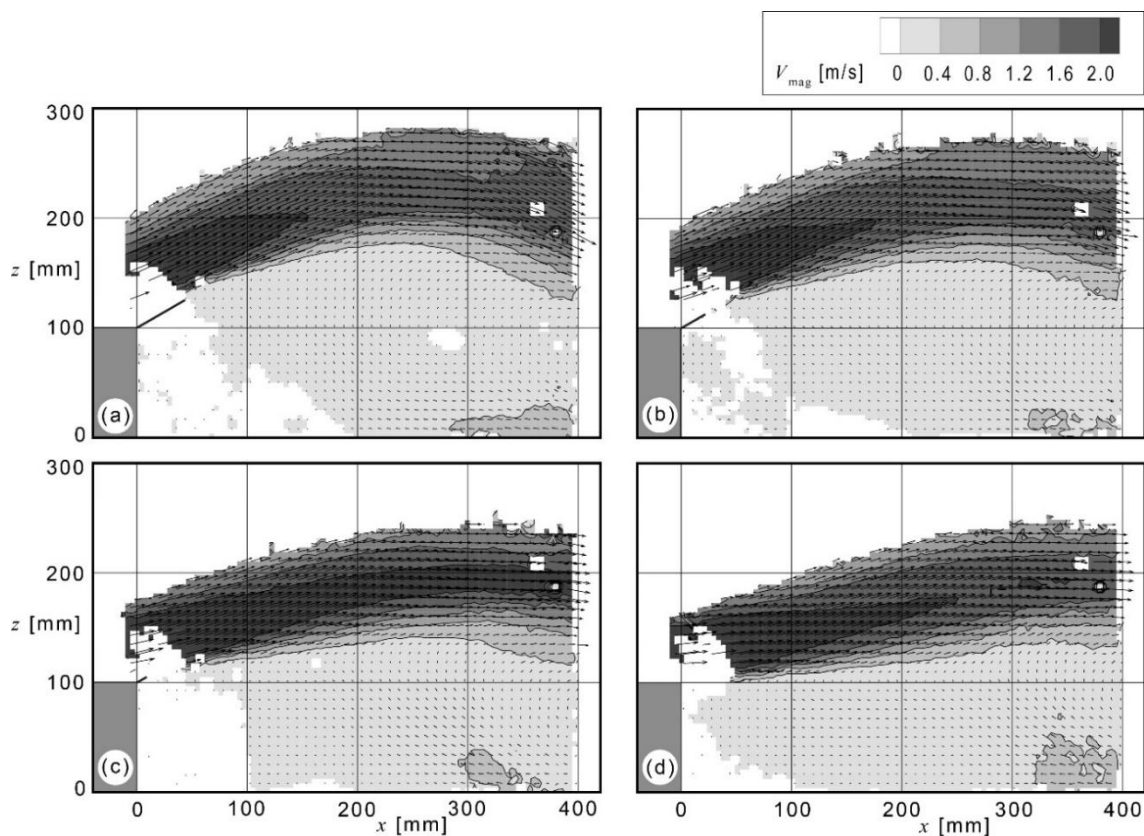
Zusätzlich wurde das Strömungsbild mithilfe der berührungslosen Particle Image Velocimetry (PIV) aufgenommen. Dabei werden der Strömung reflektierende Partikel zugegeben, die mit zwei aufeinanderfolgenden, sehr kurzen Laserlichtschnitt-Pulsen beleuchtet werden. Diese Partikel werden durch die Glaswand von einer Kamera in einem Doppelbild mit kurzer Belichtungszeit aufgenommen, so dass aus der Partikelverschiebung und dem bekannten zeitlichen Laser-Pulsabstand  $\Delta t$  die Geschwindigkeitsinformationen in der  $x$ - $z$ -Ebene korreliert werden können. Infolge der kurzen Belichtungszeit in Kombination mit der sehr kurzen Pulsdauer von ca. 6 ns lassen sich auch Hochgeschwindigkeitsströmungen scharf aufnehmen.

Als Seedingmaterial wurden Polyamidpartikel mit einer Dichte von  $1.03\text{ g/cm}^3$  und einem mittleren Durchmesser von  $5\text{-}35\text{ }\mu\text{m}$  verwendet. Der Laserlichtschnitt wurde mit einem Litron-DualPower 200-15 erzeugt. Dieser generiert bei 15 Hz Pulsrate und einer Wellenlänge von  $532\text{ nm}$  eine Pulsenergie von  $2 \times 200\text{ mJ}$ . Der Laserstrahl wurde durch einen Laserführungsarm unter den Kanal geführt und dort durch eine Zylinderlinse in einen in der Kanalmitte positionierten vertikalen Lichtschnitt aufgefächert. Zur Bildaufnahme kam eine 2 MP FlowSense Kamera der Firma Dantec zum Einsatz, welche mit einer Auflösung von  $1600 \times 1200$  Pixeln (H:V) betrieben wurde. Das so gewählte Aufnahmefenster hatte eine Grösse von ca.  $400 \times 300\text{ mm}$  (H:V). Mit einer Grösse des Korrelationsrasters von  $32 \times 32$  Pixeln ergibt sich eine räumliche Auflösung des Vektorfelds von  $\approx 4.15 \times 4.15\text{ mm}$ . Der Wechselsprung an einer negativen Sohlstufe ist durch grosse Turbulenz und Wirbelbildung charakterisiert. Das Strömungsbild ändert sich daher stetig. Um einen aussagekräftigen Vergleich der Strömungsfelder zu ermöglichen, wurde das zeitliche Mittel über 5 Sekunden aus 75 Doppelbildern erstellt.

Abbildung 8 zeigt das Strömungsbild an einer negativen Sohlstufe mit  $F_o = 3.0$ ,  $h_o = 4.8\text{ cm}$  und  $k = 5\text{ cm}$  für verschiedene Klappenwinkel (a)  $\kappa = 30^\circ$ , (b)  $\kappa = 20^\circ$ , (c)  $\kappa = 10^\circ$  sowie (d) ohne Klappe. Es ist gut erkennbar, wie sich die Hauptströmung (dunkel) jeweils entlang der Klappe ausrichtet. Bei einem grossen Klappenwinkel  $\kappa = 30^\circ$  wird die Strömung im Bereich der Klappe bei  $x \approx 50\text{ mm}$  zwar stark nach oben abgelenkt, richtet sich jedoch unterhalb von  $x \approx 250\text{ mm}$  wieder nach unten in Richtung Sohle aus (Abb. 8a). Bei einem kleinen Klappenwinkel (Abb. 8c) wird die Hauptströmung nach unten abgelenkt, die entstehende Wellenhöhe ist kleiner als ohne Verwendung einer Klappe (Abb. 8d). Ausserdem bildet sich ein flacheres Oberflächenprofil der stehenden Welle aus.



**Abb. 8** Strömungsbild an einer Sohlstufe mit  $F_o = 3.0$ ,  $h_o = 4.8$  cm,  $k = 5$  cm und verschiedenen Klappenwinkeln (a)  $\kappa = 30^\circ$ , (b)  $\kappa = 20^\circ$ , (c)  $\kappa = 10^\circ$  sowie (d) ohne Klappe



**Abb. 9** Strömungsbild an einer Sohlstufe mit  $F_o = 3.0$ ,  $h_o = 4.8$  cm,  $\kappa = 30^\circ$  und verschiedenen Klappenlängen (a)  $k = 5$  cm, (b)  $k = 2.5$  cm, (c)  $k = 1$  cm sowie (d) ohne Klappe



Abbildung 9 zeigt das Strömungsbild an einer negativen Sohlstufe mit  $F_o = 3.0$ ,  $h_o = 4.8$  cm und  $\kappa = 30^\circ$  für verschiedene Klappenlängen (a)  $k = 5$  cm, (b)  $k = 2.5$  cm, (c)  $k = 1$  cm sowie (d) ohne Klappe. Die Hauptströmung wird in allen drei Fällen im Bereich der Klappe bei  $x \approx 50$  mm nach oben ausgelenkt und richtet sich wie oben beschrieben unterhalb von  $x \approx 250$  mm wieder nach unten in Richtung Sohle aus. Der Effekt der Strömungsablenkung ist dabei proportional zur Klappenlänge. Eine kurze, steil geneigte Klappe bewirkt daher ein flacheres Oberflächenprofil der stehenden Welle im Vergleich zu einer Sohlstufe ohne Klappe.

## 5 Schlussfolgerungen

Basierend auf den Erfahrungen bei realisierten Flusswellenstandorten hat sich gezeigt, dass regulierbare Elemente, wie etwa Klappen, einen massgebenden positiven Einfluss auf die Eigenschaften der entstehenden Welle haben können. In der Literatur sind dazu bisher nur wenige Angaben zu finden. Physikalische Modellversuche im Labor der VAW haben bestätigt, dass eine Klappe sowohl die Höhe, als auch die Steilheit einer surfbaren Welle beeinflusst. Bei einer Zufluss-Froude-Zahl von  $F_o = 3.0$  kann eine lange, steil geneigte Klappe ( $\kappa = 30^\circ$ ) im Vergleich mit einer Surfwellen an einer Sohlstufe ohne verstellbare Einbauten, die Wellenhöhe um  $\approx 30\%$  vergrössern.

Tendenziell können längere Klappen die dabei entstehenden Welleneigenschaften für einen grösseren Parameterbereich beeinflussen. Weiter können beim Einsatz von Klappen unerwünschte Limitationen auftreten: einerseits kann bei sehr kleinen Zufluss-Froude-Zahlen ein Wechselsprung bereits oberhalb der Sohlstufe entstehen (A-jump), andererseits kann eine sehr flach geneigte Klappe die Strömung nach unten lenken und damit die Wellenhöhe verringern. Zudem kann eine lange Klappe bei grossen Froude-Zahlen ähnlich wie ein Skisprung wirken und zu einem aufgelösten Wave-jump mit hohem Lufteintrag und unregelmässigem Oberflächenprofil führen.

Es sind zusätzliche hydraulische Modellversuche notwendig, um den Einfluss einer Klappe auf die Wellenbildung umfassend quantifizieren zu können. Die geplanten Versuche an der VAW sehen unter anderem die Variation der Stufenhöhe sowie den Einsatz steiler Sohlrampen anstelle der vertikalen Sohlstufe vor.

## 6 Danksagung

Der Autor dankt J. Trachsel und R. von Wyl, die mit Ihren Studienarbeiten (Trachsel, 2013 und von Wyl, 2015) zum besseren Verständnis der surfbaren Wellen an einer Sohlstufe beigetragen haben.

## Literatur

Bauer, J. (2015). Von Cunovo lernen. TEC21 (1-2): 34-36.

Dietsche, D. (2015). Surfbarer Wechselsprünge. TEC21 (1-2): 29-31.

Hager, W.H.; Bretz, N.V. (1986). Hydraulic jumps at positive and negative steps. Journal of Hydraulic Research 24 (4): 237-253.

Hornung, H.; Killen, P. (1976). Laboratory testing of a stationary oblique plunging breaker for surfboard testing. Australian National University, Canberra, Australia.

- Ingenieurbüro Gostner & Aigner; Donauconsult Zottl & Erber (2010). Lageplan und Längsschnitt am Almkanal Salzburg, Plannummer 1008-E-01.2.
- Kawagoshi, N.; Hager, W.H. (1990). Wave type flow at abrupt drops. *Journal of Hydraulic Research* 28 (2): 235-252.
- Moore, W.L.; Morgan, C.W. (1957). The hydraulic jump at an abrupt drop. *Journal of the Hydraulics Division ASCE* 83(HY6): 1-21.
- Mossa, M.; Petrillo, A.; Chanson, H. (2003) Tailwater level effects on flow conditions at an abrupt drop. *Journal of Hydraulic Research* 41 (1): 39-51.
- Oertel, M.; Mönkemöller, J.; Schlenkhoff, A. (2012). Artificial stationary breaking surf waves in a physical and numerical model. *Journal of Hydraulic Research* 50 (3): 338–343.
- Ohtsu, I.; Yasuda, Y. (1991). Transition from supercritical to subcritical flow at an abrupt drop. *Journal of Hydraulic Research* 29 (3): 309-328.
- Rajaratnam, N.; Ortiz, N.V. (1977). Hydraulic jumps and waves at abrupt drops. *Journal of the Hydraulics Division ASCE* 103 (HY4): 381-394.
- Schwalt, M.; Hager, W.H. (1992). Die Strahlbox. *Schweizer Ingenieur und Architekt* 110 (27/28): 547-549.
- Schweizer Armee (2008). Kommunikation vom 27.06.2008 ([www.vtg.admin.ch/internet/vtg/de/home/dokumentation/news/newsdetail.19730.nsb.html](http://www.vtg.admin.ch/internet/vtg/de/home/dokumentation/news/newsdetail.19730.nsb.html)).
- Trachsel, J. (2013). Surfbare Wellen. Projektarbeit, ETH Zürich.
- von Wyl, R. (2015). Einfluss einer Klappe auf die Surfbarkeit stehender Wellen. Masterarbeit, ETH Zürich.

### **Anschrift des Verfassers**

Dr. Helge Fuchs  
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich  
Hönggerberggring 26, CH-8093 Zürich  
fuchs@vaw.baug.ethz.ch