

Digitale Bildererkennung von experimentellen Surfwellen

Benedikt Mester, Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung (IWS), Universität Stuttgart
Markus Noack, Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung (IWS), Universität Stuttgart
Silke Wieprecht, Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung (IWS), Universität Stuttgart

Hintergrund

Das moderne Surfen von Flusswellen wurde in den 1970er Jahren am Eisbach in München entwickelt. Aufgrund der zunehmenden Beliebtheit und der Knappheit geeigneter Wellen sind die bestehenden Orte stark frequentiert (von Wyl 2015). Daher sind sowohl Surfer als auch Ingenieure auf der Suche nach Möglichkeiten, durch die Erzeugung von Wechselsprüngen in Fließgewässern künstliche Flusswellen zu erzeugen. Allerdings kann nur ein bestimmter Typ, die so genannte „Maximum Wave“, gesurft werden (Aufleger und Neisch 2018), welcher sowohl höher als auch steiler als alle anderen Wechselsprungtypen ist. Ein Hauptmerkmal ist die gleichmäßige und stabile Oberfläche der Wellenfront (Jakob 2010). Zielsetzung der Untersuchung ist es, neue Erkenntnisse über die hydraulischen Randbedingungen stehender Wellen zu gewinnen, um diese für das Flusswellenprojekt „Neckarwelle“ in Stuttgart zu nutzen (Puckert et al. 2018). Hierfür wurde in der Versuchsanstalt für Wasserbau des Instituts für Wasser- und Umweltsystemmodellierung der Universität Stuttgart eine Miniaturanlage zur Wellenerzeugung im Maßstab 1:10 erstellt (Bild 1). Es wurden verschiedene hydraulische Szenarien getestet, um Einstellmöglichkeiten der Anlage zu finden, welche eine möglichst hohe und steile Welle erzeugen. Damit Aussagen über die lateralen und vertikalen Abmessungen der Welle getätigt werden können, ist der Einsatz geeigneter Messtechnik notwendig, um den Wechselsprung detailliert zu analysieren. Im Zentrum dieser Studie steht daher die berührungsfreie Erfassung der Miniaturwelle mit einem neuentwickelten, digitalen Bildererkennungssystem. Die Ergebnisse der Bildererkennung werden mit anderen Messtechniken verglichen, um die Qualität des neuen Messsystems gegenüber herkömmlichen Verfahren aufzuzeigen.

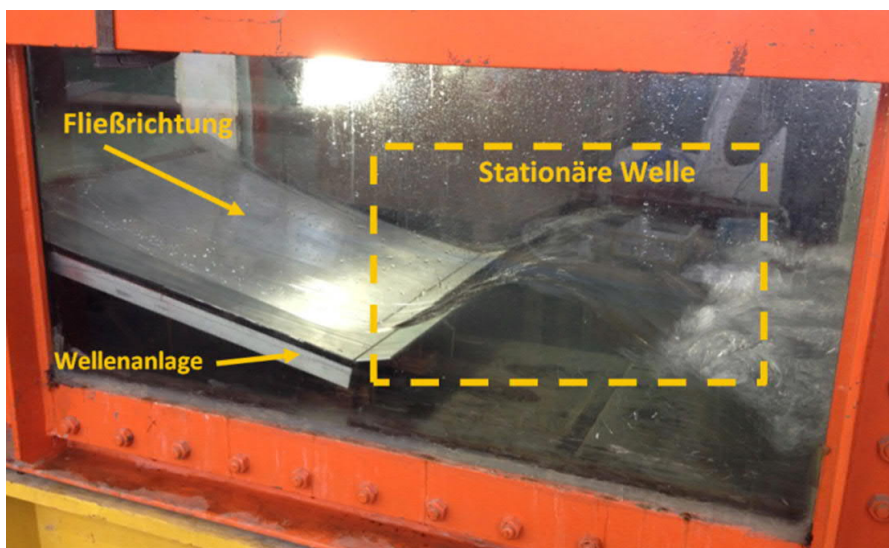


Bild 1: Ausbildung einer stationären Surfwelle im 2D-Schnittmodell im Maßstab 1:10

Versuchsaufbau

Die konzipierte Miniaturwellenanlage orientiert sich an dem *Dreamwave-concept* (Aufleger und Neisch 2018) und wurde in einer Fließrinne (0,5 m Breite; 7,15 m Länge; $Q_1 = 31,5$ l/s; $Q_2 = 42,0$ l/s) getestet, um ein Design zu bestimmen, das letztlich die Wellenhöhe und -neigung maximiert und so das Surfen ermöglichen würde. Das Modell besteht aus einer Rampe (Neigung: 10%, 20% und 30%) mit einer am Ende angebrachten stufenlos einstellbaren Klappe (Neigung: 20° und 30°), welche es ermöglicht im Versuchsablauf verschiedene hydraulische Szenarien abzudecken. Die Rampe beschleunigt die Strömung und bildet eine stehende Welle im Unterwasser aus. Die Klappe dient zur Anpassung der Welle an hydraulische Schwankungen und zur Feinjustierung der Wellenoberfläche (von Wyl 2015; Koch 2016). Durch die Rampe wird im Oberwasser zusätzlich ein Aufstau induziert. Diese Erhöhung der potentiellen Energie aufgrund der größeren Wasserspiegeldifferenz trägt zu einer höheren Welle bei. Der gewählte Modellaufbau erlaubt es erstmals die kombinierten Auswirkungen aller relevanten geometrischen und hydraulischen Parameter zu untersuchen.

Messtechnik

Das Ziel der messtechnischen Erfassung der freien Wasseroberfläche ist es den Verlauf der Welle detailliert zu erfassen, um diesen in einem weiteren Schritt zu analysieren und zu charakterisieren. Von besonderem Interesse sind die x- und y-Positionen des höchsten Punktes (Wellenspitze) und des tiefsten Punktes (Wellental), da mit diesen beiden Punkten die Wellenhöhe und -neigung bestimmt werden können. Neben einem Stechpegel und einem Ultraschallsensor wurde auch ein neuentwickeltes digitales Bilderkennungssystem verwendet, welches aus zwei Arbeitsabläufen besteht: die Bilderfassung und die Bildanalyse. Das Setup für die Bilderfassung besteht aus einer Kamera mit Stativ, einem Scheinwerfer und einer abgedunkelten Versuchsumgebung. Die Analyse gliedert sich in Bildvorverarbeitung, Berechnung der Wellenkonturlinie und Visualisierung.

Die stehende Welle wird zunächst mit einem Flutlicht ausgeleuchtet, um Bildqualität und -kontrast zu verbessern. Molleton wird an den Seiten und auf der Oberseite der Fließrinne platziert, um die Auswirkungen der Lichtreflexionen zu reduzieren (Nóbrega et al. 2014) und den Kontrast zwischen Welle und Hintergrund zu verbessern (Viriyakijja und Chinnarasri 2015). Zusätzlich wird eine Kamera (*Nikon® COOLPIX P7800*) in einen geschlossenen „Korridor“, auch aus diesem Gewebe bestehend, platziert, um das Glas vor Reflexionsschatten durch andere Objekte abzuschirmen.

Der Prozess der Bildanalyse beginnt mit der Vorbearbeitung der Rohbilder mit der Freeware *Fiji* (Schindelin et al. 2012) (Bild 2). (1) zeigt die Wellenanlage vor der Ausleuchtung der Welle und Abdunkelung der Umgebung. Für eine bessere Berechnung werden die Rohaufnahmen (2) von Rot/Grün/Blau (RGB) in Graustufen (3) umgewandelt (Nóbrega et al. 2014) und die durchschnittliche Minimalintensität von 180 Bildern eines Aufnahmesatzes berechnet (4). Durch Subtraktion jedes einzelnen Bildes durch (4) kann der Hintergrund entfernt werden (5). Zusätzlich wird ein Medianfilter (fünf Pixel) verwendet (6). Dieser Unschärfe-Effekt eliminiert störende Rauscheffekte, wie z.B. kleine Tropfen oder Pixelfehler.

Im nächsten Schritt wird jedes Bild mit einer internen Kalibrierungsanwendung von *MATLAB™* (MATLAB 2018) bearbeitet und anschließend binärisiert (Verfahren: *RenyiEntropy*), was den späteren Wellenerkennungsprozess erleichtert. Die so aufbereiteten Bilder (1) werden zugeschnitten (2), um die Verarbeitungszeit zu reduzieren (Bild 3). Anschließend wird jedes Bild mit einem *holefill*-Kommando bearbeitet, welches Pixelrauschen entfernt, und das Komplement des Binärbildes wird berechnet (3). Es erfolgt die Erstellung einer polynominalen Kurvenanpassung (4). Das Ergebnis ist eine Kurvenlinie, die die freie Oberfläche der Welle darstellt. Es ergibt sich ein Gesamtsatz von 180 Linien pro Setup, für den eine gemittelte Konturlinie berechnet wird (5). Das finale Ergebnis wird anschließend mit einer visuellen Erfassung von Wellental und –spitze abgeglichen (6).

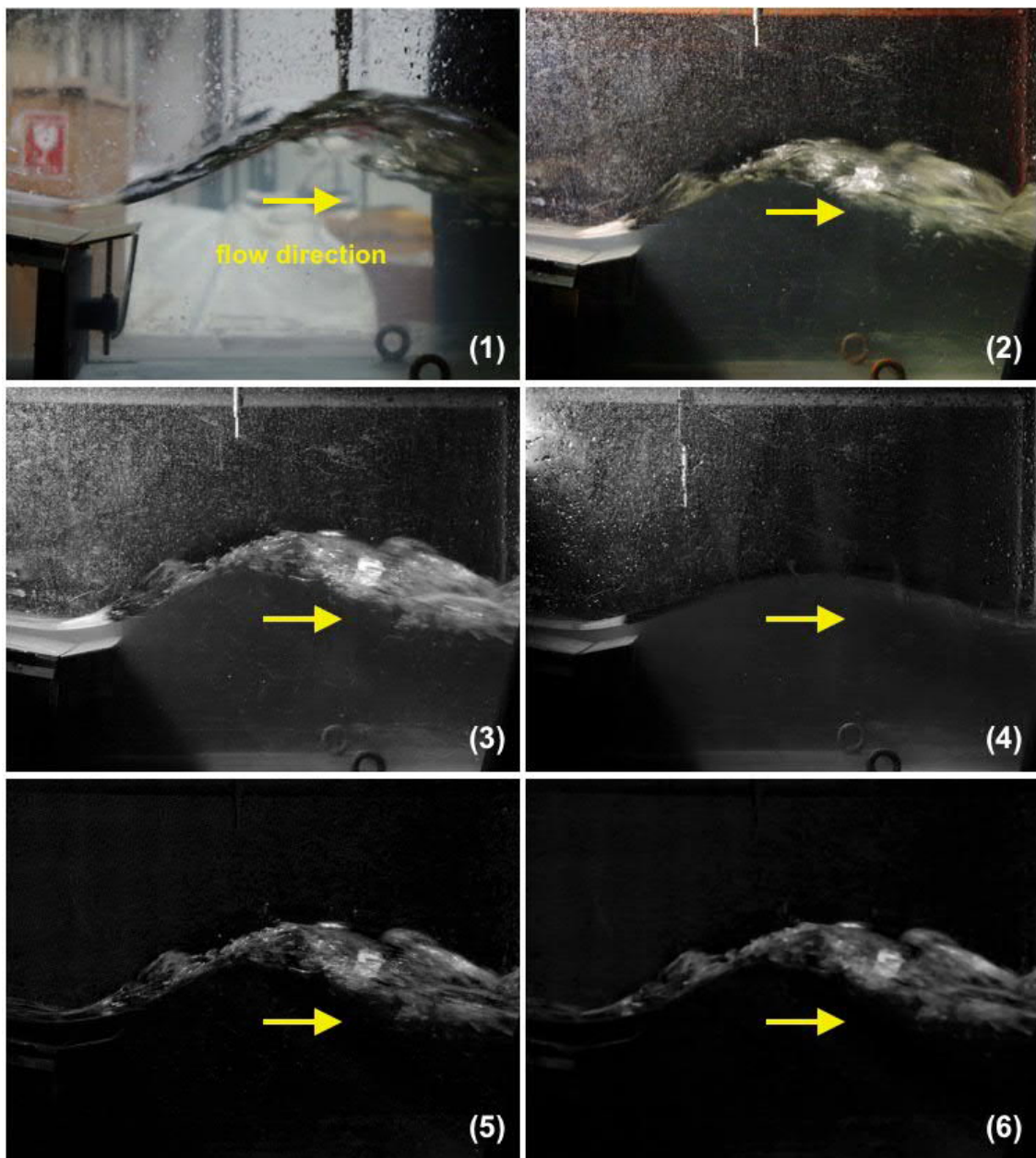


Bild 2: Schritte der digitalen Bildanalyse: Wellenanlage vor der Abdunkelung der Umgebung und Ausleuchtung der Welle (1); Rohaufnahme (2); Transformation in Graustufen (3); Minimalintensität von 120 Bildern (4)(exemplarisch); (5): (3) subtrahiert mit (4); (6): Anwendung eines Medianfilters

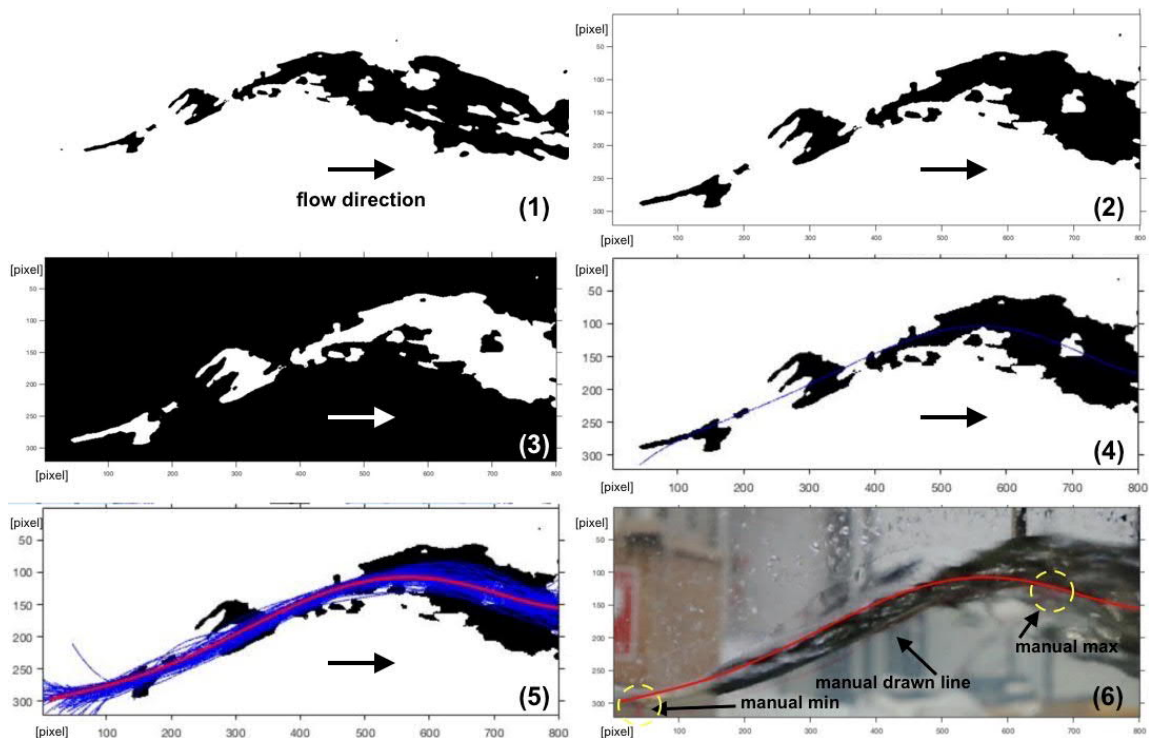


Bild 3: Aufbereitete Aufnahme (1); Zuschnitt auf die „Region of Interest“(2); Anwendung der Funktionen „Complementation“ und „Holefill“(3); polynominale Kurvenanpassung für eine Aufnahme (blau) (4); 120 polynominale Kurvenanpassungen und die gemittelte Kurve (rot) mit (4) als Hintergrund (5); Vergleich von gemittelter Kurve und visueller Detektion von Wellental und -spitze (6)

Ergebnisse

Die messtechnische Erfassung der stehenden Welle erfolgte durch Stechpegel, Ultraschallsensor und die digitale Bilderkennung. Das Messprogramm besteht aus sechs Geometriekombinationen, welche mit zwei Wasserständen und zwei Abflüssen getestet wurden. Anhand eines Vortestes mit den Einstellungen $Q_1 = 31,5 \text{ l/s}$, Rampenneigung von 20% und Klappenneigung von 20° werden die ersten Unterschiede herausgearbeitet (Bild 4). Der Ultraschallsensor besitzt am Wellental eine gute Übereinstimmung mit den anderen Methoden, allerdings empfängt er ab mittleren Wellenneigungen und bei turbulenten Oberflächen kein korrektes Signal und wird daher für die Analyse nicht weiter verwendet. Die Ergebnisse der digitalen Bilderkennung von 24 Läufen des Messprogramms wurden bezüglich Wellenhöhe, -länge und -neigung sowie der Positionsdivergenz von Wellental und -spitze mit den Messungen des Stechpegels verglichen. Bei der Bilderkennung liegt das Wellental um durchschnittlich 5 mm über und die Wellenspitze um 10 mm unter dem Resultat des Stechpegels (y-Richtung). In x-Richtung liegen beide Extremwerte weiter stromabwärts (Wellental: 6 mm; Wellenspitze: 15 mm). Folglich ist bei der Bilderkennung die Wellenhöhe im Durchschnitt 15 mm niedriger, was 16,7% entspricht. Die Längendifferenz ist mit 8 mm geringer, was sich auf eine Neigungsdifferenz von 13,6 % gegenüber den Messungen des Stechpegels auswirkt.

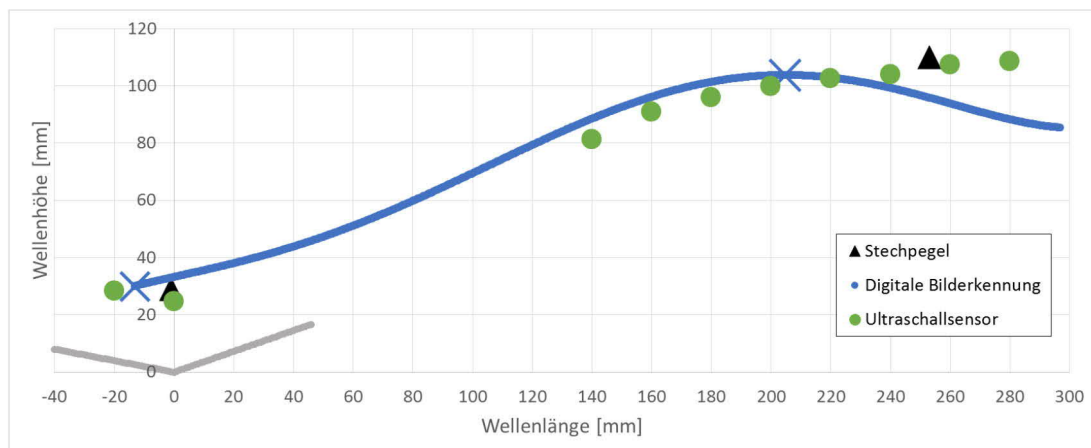


Bild 4: Messtechnische Erfassung der stehenden Welle durch den Stechpegel (schwarz), den Ultraschallsensor (grün) und die digitale Bildererkennung (blau) inklusive Ausschnitt der Wellenanlage (grau)

Diskussion

Die Position des Wellentals kann durch den Stechpegel aufgrund der konstanten Wasseroberfläche sehr gut erfasst werden. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit dem Ultraschallsensor und der digitalen Bildererkennung. Der Wellenberg weist hingegen in den meisten Einstellungen eine fluktuierende Oberfläche auf (Koch 2016), wodurch die Lokalisierung der Wellenspitze, insbesondere der x-Position, durch den Stechpegel als subjektive Methodik einzustufen ist. Bei der Bildererkennung liegt hingegen eine neutrale Erfassung der Wellenspitze vor, da diese Methodik im Vergleich mit dem Stechpegel berührungsfrei, standardisiert und repetierbar ist. Die Fluktuationen der Wellenhöhe werden durch die digitale Bildererkennung über drei Sekunden bei 60 Hz als gemittelten Wert wiedergegeben. Die Qualität der verarbeiteten Rohbilder sollte jedoch erhöht werden, insbesondere beim Kontrast, und die polynominale Kurvenanpassung weist ebenfalls Optimierungsbedarf auf. Weiter erfasst die Bildererkennung die Welle an der Glasscheibe, wodurch Randeffekte die Messung beeinflussen und nicht der zentrale Bereich betrachtet wird. Jedoch weist die digitale Bildererkennung durch die Darstellung einer durchgängigen Konturlinie einen weiteren Vorteil gegenüber den anderen beiden Methoden auf. So versagt bereits ab mittleren Wellenneigungen der Ultraschallsensor und aufgrund des Messaufwandes wird die Wellenneigung bei der Stechpegelmessung über die Steigung zwischen Wellental und -spitze berechnet, wohingegen das digitale Bildererkennungssystem eine um 40% höhere Wellenneigung im vom Surfer genutzten Bereich aufzeigt. Da in den Rohbildern eine noch stärkere Krümmung festgestellt wurde, könnte eine optimierte Bildanalyse von noch größerem Vorteil für die Beurteilung der Wellenqualität sein.

Zusammenfassung und Ausblick

Erste Versuche haben gezeigt, dass die für diese Studie entworfene Wellenanlage in der Lage ist eine stehende Welle zu produzieren. Um die sich einstellende Welle zu analysieren ist eine Charakterisierung des Wellentales sowie des Wellenbergs notwendig, um eine Aussage über die Surfbarkeit zu treffen. Als Methoden zur messtechnischen Erfassung wurden drei Systeme eingesetzt: ein Stechpegel, ein Ultraschallsensor und eine Bildererkennungsmethode. Der eingesetzte Stechpegel

ermöglicht eine Lokalisierung von Wellental und –spitze, deren Methodik allerdings subjektiv und aufgrund des Aufwands auf die Extrema beschränkt ist. Der Ultraschallsensor kann die Wellenoberfläche räumlich aufgelöster erfassen, versagt jedoch bei stärker geneigten Wellen und wird deswegen nicht weiter verwendet. Die sich daraus resultierende Entwicklung eines digitalen Bilderkennungssystems zeigt vielversprechende Ergebnisse. Zwar liegen Abweichungen in Bezug auf Wellental und –spitze gegenüber dem Stechpegel vor, jedoch ist durch die Technik bereits jetzt eine genauere Beurteilung der Wellenneigung möglich. Durch eine bessere Qualität der Rohbilder, z.B. höherer Kontrast zwischen Welle und Hintergrund, und einer Optimierung des MATLAB Codes kann die Leistung der objektiven Bildanalyse weiterentwickelt werden. Dadurch können in Zukunft nicht nur die herausfordernde Erfassung von Wechselsprüngen, sondern auch andere experimentelle Untersuchungen von turbulenten Wasseroberflächen verbessert werden.

Literatur

- Aufleger, Markus; Neisch, Valerie (2018): Stationary Surf Waves in Rivers. In: hydrolink, number 2/2018, ISSN 1388-3445
- Incorporated, T. M. MATLAB R2018a (2002): (9.4.0.813654; February 23, 2018). Natick, Massachusetts, USA.
- Jakob, Daniel (2010): Sicherheitsbetrachtung einer künstlichen Surfwelle. Bachelor Thesis der Universität Innsbruck
- Koch, Christof (2016): Einfluss einer Klappe auf die Surfbarkeit stehender Wellen. Master Thesis der ETH Zürich
- Nóbrega, Juliana Dorn, Schulz; Harry Edmar; Zhu, David (2014). Free Surface Detection in Hydraulic Jumps through Image Analysis and Ultrasonic Sensor Measurements. 5th International Symposium on Hydraulic Structures -Hydraulic Structures and Society: Engineering Challenges and Extremes. Brisbane.
- Puckert, Dominik; Mester, Benedikt; Noack, Markus; Wieprecht, Silke (2018): Neckarwelle: A River Surfing Wave Facility in the Heart of the City of Stuttgart. In: hydrolink, number 2/2018, ISSN 1388-3445
- Schindelin, J.; Arganda-Carreras, I. & Frise, E. et al. (2012): Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. Nature methods 9(7): 676-682, PMID 22743772
- Viriyakijja, K.; Chinnarasri, C. (2015). Wave Flume Measurement using Image Analysis. International Conference On Water Resources, Coastal And Ocean Engineering (ICWRCOE 2015) (S. 522-531). Bangkok: Elsevier B.V.
- von Wyl, Rafael (2015): Einfluss einer Klappe auf die Surfbarkeit stehender Wellen. Master Thesis der ETH Zürich