# Numerische Simulationen zur Wellenauflaufhöhe auf rauen Deckwerken

Moritz Kreyenschulte<sup>1</sup>, Wenjia Xu<sup>2</sup> und Holger Schüttrumpf<sup>2</sup>

 <sup>1</sup> RWTH Aachen University, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, kreyenschulte@iww.rwth-aachen.de
 <sup>2</sup> RWTH Aachen University, Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

# Zusammenfassung

Die Wellenauflaufhöhe ist einer der wichtigsten Parameter zur Bemessung von Deichen und Deckwerken. Sie wird zur Abschätzung der Anzahl überlaufender Wellen und der Deichkronenhöhe verwendet. Raue, poröse und durchlässige Deckwerke reduzieren die Wellenauflaufhöhe aufgrund einer erhöhten Energiedissipation während des Wellenauflaufs. Zur Abschätzung der Wellenauflaufhöhe bei Deckwerken existieren empirische Modelle, die allerdings meist nur für einen speziellen Deckwerkstyp formuliert wurden und die unterschiedlichen möglichen Einflussfaktoren auf den Wellenauflauf wie Rauheit, Porosität und Durchlässigkeit des Deckwerks nicht explizit berücksichtigen.

Das Ziel des vorliegenden Beitrags ist die Beschreibung des Reduktionsfaktors infolge Rauheit für die Wellenauflaufhöhe anhand einer kombinierten Größe aus geometrischem Rauheitsmaß und Wellenparameter, die für verschiedene Deckwerkstypen gültig ist und einen Ansatz für die Zusammenführung der sonst nur für einzelne Deckwerkstypen formulierten Reduktionsfaktoren ermöglicht.

Dazu wurden naturmaßstäbliche hydraulische Versuche und numerische Simulationen zum Wellenauflauf auf mörtelvergossenen Schüttsteindeckschichten sowie numerische Simulationen des Wellenauflaufs auf idealisierten Deckwerksgeometrien durchgeführt. Zudem wurde eine vergleichbare geometrische Beschreibung der Rauheit von Deckschichten eingeführt, die für sämtliche Deckwerkstypen verwendet werden kann. Für brechende Wellen konnte ein guter Zusammenhang zwischen dem Reduktionsbeiwert infolge Rauheit und der relativen Rauheit (beschrieben als Quotient der Standardabweichung der Differenzen der Deckschichtoberfläche zur mittleren Deckschichtoberfläche und der Wellenhöhe) sowie der Kurtosis gefunden werden.

### Schlagwörter

Wellenauflaufhöhe, Reduktionsfaktoren, numerische Simulation, Smoothed Particle Hydrodynamics

### Summary

The wave run-up height is one of the most important parameters for the design of dikes and revetments. It is used to estimate the number of overtopping waves and the crest height of the dike. Rough, porous and permeable revetments reduce the wave runup height due to increased energy dissipation during wave runup. Empirical models exist to estimate the wave runup height for revetments, but most of them have been formulated only for a specific revetment type and do not explicitly consider the different possible factors influencing the wave runup such as roughness, porosity and permeability of the revetment.

The objective of this work is to describe the reduction factor due to roughness for wave runup height using a combined quantity of geometric roughness measure and wave parameter, which is valid for different revetment types that may serve as an approach for combining reduction factors otherwise formulated only for single revetment types.

For this purpose, full-scale hydraulic tests and numerical simulations of wave runup on mortar-grouted riprap revetments were performed, as well as numerical simulations of wave runup on idealized revetment geometries. In addition, a comparable geometric description of the roughness of revetments was introduced, which can be used for all revetment types. For breaking waves, a good correlation was found between the reduction coefficient due to roughness and the relative roughness (described as the quotient of the standard deviation of the differences of the revetment surface to the mean revetment surface and the wave height) as well as the kurtosis.

### Keywords

wave run-up height, reduction factors, numerical simulation

### 1 Einleitung

Die Wellenauflaufhöhe ist einer der wichtigsten Parameter zur Bemessung von Deichen und Deckwerken. Sie wird zur Abschätzung der Anzahl überlaufender Wellen und der Deichkronenhöhe verwendet. Zusammen mit der Wellenrücklaufhöhe definiert sie den Bereich, in dem die größten Belastungen des Deckwerks infolge Wellenbelastung auftreten (EurOtop 2018). Daher ist es wirtschaftlich geboten, die Wellenauflaufhöhe so weit wie möglich zu reduzieren (Pilarczyk 1998).

Dies geschieht, indem z. B. raue und/oder poröse Deckwerke gebaut werden, die eine erhöhte Energiedissipation während des Wellenauflaufs bewirken und somit die Wellenauflaufhöhe reduzieren (Pilarczyk 1998). Zur Abschätzung der Wellenauflaufhöhe bei Deckwerken existieren Gleichungen, die allerdings meist nur für einen speziellen Deckwerkstyp formuliert wurden und die unterschiedlichen möglichen Einflussfaktoren auf den Wellenauflauf wie Rauheit, Porosität und Durchlässigkeit des Deckwerks nicht explizit berücksichtigen. Damit ist auch unklar, wie die Auswirkungen auf die Wellenauflaufhöhe sind, wenn sich mehrere dieser Parameter gleichzeitig ändern. Fraglich ist z. B., wie sich die Wellenauflaufhöhe bei Reduktion der Porosität aber gleichzeitiger Erhöhung der Rauheit ändert.

Das Ziel des vorliegenden Beitrags ist die Beschreibung des Reduktionsfaktors infolge Rauheit für die Wellenauflaufhöhe anhand einer kombinierten Größe aus geometrischem Rauheitsmaß und Wellenparameter, die für verschiedene Deckwerkstypen gültig ist und einen Ansatz für die Zusammenführung der sonst nur für einzelne Deckwerkstypen formulierten Reduktionsfaktoren ermöglicht.

Dazu wird zunächst auf den Stand der Technik und Forschung zur Beschreibung des Wellenauflaufs auf rauen Deckwerken eingegangen. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf den unterschiedlichen Einflussparametern in den Modellen zur Berechnung der Wellenauflaufhöhe, die entweder die Welleneigenschaften oder die Eigenschaften des Bauwerks und der Wellen abbilden. Im Anschluss werden naturmaßstäbliche physische Versuche und numerische Simulationen zum Wellenauflauf auf mörtelvergossenen Schüttsteindeckschichten sowie numerische Simulationen des Wellenauflaufs auf idealisierten Deckwerksgeometrien vorgestellt und ausgewertet. Eine Methode zur Definition der Rauheit als geometrische Größe wird vorgestellt und mit dieser werden die Ergebnisse analysiert.

### 2 Stand der Forschung und Technik

Die Wellenauflaufhöhe ist definiert als vertikaler Abstand zwischen dem Ruhewasserspiegel und dem höchsten Punkt auf der Böschung oder Deckschicht, den die Welle erreicht. Dieser Punkt wiederum ist nach EurOtop (2018) bei einer Wasserschichtdicke auf der Böschung von ca. 2 cm (im Naturmaßstab) definiert. Die Wellenauflaufhöhe wird für regelmäßige Wellen meist als mittlere Wellenauflaufhöhe  $R_{it}$  angegeben, für Wellenspektren wird die von 2 % der einlaufenden Wellen überschrittene Wellenauflaufhöhe  $R_{it}2\%$  verwendet. Die Wellenauflaufhöhe wird wesentlich von den Eigenschaften der einlaufenden Wellen (z. B. Höhe, Periode, Angriffsrichtung), von Flachwasserbedingungen im Vorland, der Böschungsneigung und der Geometrie der Böschung (z. B. Bermen) sowie den Eigenschaften der Böschung oder des sich darauf befindenden Deckwerks beeinflusst, insbesondere der Rauheit, Porosität und Durchlässigkeit (Capel 2015, EurOtop 2018, Losada und Giménez-Curto 1981, van de Walle 2001).

Ein analytisch hergeleitetes Modell zur Ermittlung der Wellenauflaufhöhe liegt aufgrund der komplexen Interaktion der genannten Einflussfaktoren derzeit nicht vor (Elbisy 2015). Es werden daher fortwährend neue Ansätze entwickelt, um die Vorhersage der Wellenauflaufhöhe zu verbessern. Diese unterteilen sich in analytische Gleichungen, numerische Modelle, empirische Gleichungen und Methoden des Machine Learning (EurOtop 2018). Analytische Gleichungen liefern aufgrund der für die Lösbarkeit dieser Gleichungen notwendigen Vereinfachungen grundlegende Zusammenhänge, können aber die komplexen Interaktionen der Einflussfaktoren nicht abbilden (Elbisy 2015).

Numerische Modelle werden vermehrt eingesetzt, um die Wellen-Bauwerks-Interaktion zu simulieren und die Wellenauflaufhöhe zu bestimmen. Sie ergänzen dabei oft physische Modelluntersuchungen und erlauben weitere Parametervariationen (Alcerreca-Huerta 2014, Losada et al. 2016). Aufgrund des meist hohen Rechenaufwands bleibt die Simulation häufig auf regelmäßige Wellen beschränkt (Losada et al. 2016). Für größere räumliche Ausdehnungen von Küsten ist eine Diskretisierung der Küstenschutzelemente oder der Küste aufgrund des Rechenbedarfs ebenfalls bisher keine praktikable Lösung. In diesen Fällen werden meist die einlaufenden Wellen mit numerischen Modellen berechnet, die Wellenauflaufhöhe dann wiederum mit empirischen Modellen, siehe z. B. Stokes et al. (2021).

Empirische Gleichungen zur Berechnung der Wellenauflaufhöhe sind daher weit verbreitet und bieten die Vorteile einer schnellen und einfachen Berechnung. Da die Modelle meist aus einer expliziten Gleichung bestehen, sind sie vergleichsweise leicht zu interpretieren. Im Rahmen des vorliegenden Beitrags sollen empirische Gleichungen zur Bestimmung der Wellenauflaufhöhe auf Deckwerken verwendet werden, daher wird im Folgenden detailliert auf die bisher veröffentlichten Ansätze zur Berücksichtigung der Rauheit in den empirischen Gleichungen eingegangen.

Das "Manual on Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures" (EurOtop 2018) stellt den Stand der Technik zur Bestimmung der Wellenauflaufhöhe auf Deckwerken

dar. Dort wird der Wellenauflauf anhand der Brecherkennzahl  $\xi$  (Hunt 1959) beschrieben und wellenauflaufreduzierende Einflüsse mit Reduktionsfaktoren berücksichtigt:

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = min \begin{cases} 1,65 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \xi_{m-1,0} \\ 1,00 \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \left(4 - \frac{1,5}{\sqrt{\gamma_b \cdot \xi_{m-1,0}}}\right) \end{cases}$$
(1)

In Gleichung (1) beschreibt  $R_{u2\%}$  die Wellenauflaufhöhe, die von 2 % der einlaufenden Wellen überschritten wird,  $H_{m0}$  die mittlere spektrale Wellenhöhe,  $\gamma_b$  den Einflussfaktor für Rauheit und  $\xi_{m-1,0}$  die Brecherkennzahl unter Verwendung der spektralen Wellenperiode  $T_{m-1,0}$ . In der Literatur existieren weitere Parameter zur Beschreibung der Wellenauflaufhöhe, z. B. der Reflexionsbeiwert (Muttray et al. 2006), modifizierte Brecherkennzahlen (Hammeken Arana 2017) oder der Wave Momentum Flux Parameter (Hughes 2004). Bei rauen, porösen und durchlässigen Deckwerken wird meist von der Brecherkennzahl Gebrauch gemacht. So hat sich für die in Abschnitt 3 beschriebenen mörtelvergossenen Schüttsteindeckwerke bei Wellenspektren (Kreyenschulte et al. 2020) und regelmäßigen Wellen (Kreyenschulte und Schüttrumpf 2020) die Brecherkennzahl als bestes Maß zur Beschreibung der Wellenauflaufhöhe erwiesen. Daher wird in der folgenden Darstellung der empirischen Gleichungen nur auf die Brecherkennzahl in Kombination mit Reduktionsfaktoren detailliert eingegangen.

Im EurOtop-Manual werden "Einflussfaktoren für Rauheit" für verschiedene Deckschichten angegeben, die allerdings alle wellenauflaufreduzierenden Einflüsse zusammenfassen und jeweils nur für einen speziellen Deckwerkstyp gelten. Darüber hinaus existieren Ansätze, die den Wellenauflauf in Abhängigkeit entweder der Rauheit, Porosität oder Durchlässigkeit für einen Deckwerkstyp beschreiben. Diese liefern Ansätze zur expliziten Beschreibung der Reduktionsfaktoren für verschiedene Einflussparameter.

Kerpen (2017) untersuchte getreppte Deckwerke und gibt einen Reduktionsfaktor für die Wellenauflaufhöhe in Abhängigkeit der relativen Rauheit  $k_b/(H_{m0} \cdot \xi_{m-1,0})$  an:

$$\gamma_f = \left[1 - a \cdot \arctan\left(\frac{k_h \cdot b}{H_{m0} \cdot \xi_{m-1,0}}\right)\right] \cdot c \tag{2}$$

Der orthogonale Abstand der Streichlinie der Treppen zur hinteren Kante jeder Stufe  $k_b$  (= Stufenhöhe·cos (Böschungsneigung)) wird als charakteristische Größe zur Beschreibung der geometrischen Rauheit verwendet, *a*, *b* und *c* sind abhängig vom Verhältnis der Wellenhöhe zur Stufenhöhe. Der Reduktionsfaktor wird in der Gleichung zum Wellenauflauf von Schüttrumpf (2001) verwendet.

Capel (2015) untersuchte Setzsteindeckwerke mit erhöhter Rauheit, die durch aus der Deckschicht ragende Setzsteine erzeugt wird. Damit können z. B. Schachbrettmuster oder Muster von versetzten Steinreihen erstellt werden. Capel (2015) verwendet ebenfalls eine relative Rauheit, beschreibt diese aber anhand der mittleren Wellenüberlaufrate folgendermaßen: Bei steigender mittlerer Wellenüberlaufrate reduziert sich die Rauheitswirkung der Rauheitselemente aufgrund der steigenden Schichtdicke des Wellenauflaufs auf der Böschung. Der Reduktionsbeiwert wird daher als Funktion der mittleren Wellenüberlaufrate q angegeben:

$$\gamma_f = 1 - \left[ 0.585 \sqrt{0.075 - s'_{m-1,0}} \cdot \rho_{\gamma_f}^{0.5} \cdot \left( -\ln\left(\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_s}}\right) \right) \right]$$
(3)

Dabei ist  $\rho_{yf}$  die von Capel (2015) neu definierte Rauheitsdichte,  $H_s$  die signifikante Wellenhöhe und  $s'_{m-1,0}$  die Wellensteilheit bezogen auf die lokale Wellenlänge unter Verwendung der spektralen Wellenperiode  $T_{m-1,0}$ . Der Reduktionsfaktor für die Wellenauflaufhöhe muss beim Ansatz von Capel (2015) iterativ bestimmt werden, da die Wellenauflaufhöhe von der mittleren Wellenüberlaufrate abhängig ist und diese wiederum von der Wellenauflaufhöhe.

Van Steeg et al. (2016) beschreiben die wellenauflaufreduzierende Wirkung von Hohlräumen in Setzsteindeckwerken (z. B. bei den Steintypen Hillblock oder Verkalit<sup>®</sup> GOR) anhand des Hohlraumvolumens der Steine pro Quadratmeter  $d_{Kanal}$  und einer Konstante  $c_{Kanal}$  in Abhängigkeit des Deckschichttyps:

$$\gamma_f = 0,0028 \cdot \frac{H_{m0}}{d_{Kanal}} + c_{Kanal} \tag{4}$$

Sie setzen dabei eine ausreichende Durchlässigkeit der Deckschicht durch Öffnungen zwischen den Setzsteinen voraus, die eine Füllung des Hohlraums mit Wasser während des Wellenauflaufvorgangs erlauben.

Eine umfassende Arbeit zur Betrachtung der Einflüsse aus Porosität, Durchlässigkeit und Rauheit auf die Wellenauflaufhöhe liegt von Hammeken Arana (2017) vor. Er untersuchte in kleinmaßstäblichen hydraulischen Modellversuchen mit regelmäßigen Wellen Wellenauflaufhöhen, Schichtdicken und Geschwindigkeiten des Wellenauflaufs. Für brechende Wellen konnte er den Einfluss der Rauheit (Reduktionsfaktor  $\gamma$ ) und den Einfluss der Durchlässigkeit (Reduktionsfaktor  $\gamma_K$ ) auf die mittlere Wellenauflaufhöhe  $R_{\pi}$  in Abhängigkeit der Brecherkennzahl  $\zeta_0$  (siehe Gleichung (8)) getrennt abbilden:

$$R_u/H = 3,74 \cdot tanh(0,38 \cdot \xi_0) \cdot \gamma_f \cdot \gamma_K \tag{5}$$

Beide Reduktionsfaktoren sind allerdings lediglich für Böschungen mit ähnlichen Eigenschaften wie den von Hammeken Arana (2017) untersuchten Böschungen verwendbar, da der Reduktionsfaktor für Rauheit nur von der Brecherkennzahl abhängig ist:

$$\gamma_f = 0.8 \cdot \xi_0^{-0.1} \tag{6}$$

Gleichung (6) gilt offensichtlich nicht für alle Deckwerksarten (vgl. Gleichung (2) und (3)), sondern nur für im Vergleich zur Wellenhöhe sehr geringe Rauheiten. Zudem fasst der Parameter  $\gamma_K$  die Einflüsse aus Porosität und Durchlässigkeit zusammen, was einen bestimmten und nur für die untersuchten Böschungen gültigen Zusammenhang zwischen diesen Parametern voraussetzt. Für nichtbrechende Wellen war es Hammeken Arana (2017) aufgrund fehlender Daten nicht möglich, die Einflüsse aus Rauheit und Durchlässigkeit zu trennen. Daher verwendete er für nichtbrechende Wellen einen Reduktionsfaktor, der beide Einflüsse zusammenfasst und damit dem Vorgehen zur Beschränkung auf einen (entweder gut messbaren oder tatsächlich maßgebenden) Einflussparameter entspricht.

Zuletzt sollen noch die unter dem Schlagwort "Machine Learning" zusammengefassten Methoden und ihre Anwendung zur Beschreibung der Wellenauflaufhöhe erwähnt werden. Diese wurden erfolgreich eingesetzt, um den Wellenauflauf auf Stränden zu modellieren (Passarella et al. 2018, Power et al. 2019) und die bestehenden empirischen Gleichungen (Stockdon et al. 2006) zu prüfen bzw. zu verbessern.

Abolfathi et al. (2016) werteten Wellenauflaufdaten auf glatten, undurchlässigen Böschungen von Ahrens (1981), Mase (1989), Hughes (2004) sowie auf Deckwerken und durchlässigen Böschungen von van der Meer und Stam (1992) aus, um daraus explizite Gleichungen zur Beschreibung der Wellenauflaufhöhe zu erhalten. Dabei wurden die Brecherkennzahl, die nominelle Porosität (van der Meer 1988), die Böschungsneigung, die Form des Wellenspektrums, die relative Wellenhöhe mit Bezug zur Wassertiefe h (H/h) und der "wave momentum flux"-Parameter (Hughes 2004) verwendet.

Bonakdar und Etemad-Shahidi (2011) verwendeten die gleiche Methodik wie Abolfathi et al. (2016) und die Daten von 162 Versuchen von van der Meer und Stam (1992). Mit der Brecherkennzahl und der nominellen Porosität als Parameter kommen sie auf geringfügig bessere Modellvorhersagen als Abolfathi et al. (2016). Die Vorhersagegenauigkeit für die Wellenauflaufhöhe wurde im Vergleich zum empirischen Modell von van der Meer und Stam (1992) verbessert.

Erdik et al. (2009) nutzen künstliche neuronale Netze und die Wellenauflaufdaten von van der Meer und Stam (1992), um die Wellenauflaufhöhe zu modellieren. Da es sich um ein künstliches neuronales Netz handelt, kann folglich keine explizite Gleichung angegeben werden.

Der Überblick über die Literatur zeigt, dass sämtliche Beschreibungen der Wellenauflaufhöhe auf rauen Deckwerken einem der folgenden drei Typen entsprechen:

- ein jeweils für einen speziellen Deckwerkstyp gültiges Modell (z. B. Ahrens und Heimbaugh 1988)
- einen einzelnen, nur für diesen speziellen Deckwerkstyp gültigen Reduktionsfaktor in Kombination mit einem empirischen Modell (aufgeführt z. B. im EurOtop (2018))
- einen Reduktionsfaktor, der G
  ültigkeit innerhalb der Bandbreite der m
  öglichen Variationen der Rauheit f
  ür einen speziellen Deckwerkstyp besitzt, und der innerhalb dieser Bandbreite angepasst werden kann, in Kombination mit einem empirischen Modell (z. B. f
  ür getreppte Gerinne (Kerpen 2017) oder Setzsteindeckwerke mit erh
  öhter Rauheit (Capel 2015))

Eine für unterschiedliche Deckwerkstypen verwendbare Beschreibung ist für keinen der drei Einflussparameter Rauheit, Porosität und Durchlässigkeit vorhanden. Auch die Beschreibung der Rauheit geschieht deckwerksspezifisch über Steingrößen, Stufengeometrien (Kerpen 2017) oder Ersatzgrößen wie die von Capel (2015) verwendete Rauheitsdichte.

Daher wird in der vorliegenden Studie folgendes Vorgehen gewählt: Naturmaßstäbliche hydraulische Versuche zur Wellenauflaufhöhe regelmäßiger Wellen bei mörtelvergossenen Schüttsteindeckwerken werden ausgewertet und zur Kalibrierung und Validierung eines numerischen Modells verwendet. Bei dem genannten Deckwerkstyp handelt es sich je nach Bauausführung um ein raues oder um ein raues, poröses und durchlässiges Deckwerk. Mit dem numerischen Modell werden verschiedene raue Deckschichtoberflächen diskretisiert und so die Datenbasis für eine Analyse der Ergebnisse auf Grundlage verschiedener Rauheitsmaße gelegt.

Im Folgenden werden zuerst die naturmaßstäblichen hydraulischen Versuche zum Wellenauflauf auf mörtelvergossenen Schüttsteindeckwerken vorgestellt und ausgewertet. Danach wird das numerische Modell kalibriert und validiert, indem die vom numerischen Modell bei Diskretisierung der Deckwerksgeometrien der vollvergossenen Deckwerke berechneten Wellenauflaufhöhen mit den im hydraulischen Modell ermittelten Wellenauflaufhöhen verglichen werden. Die darüber hinaus im numerischen Modell diskretisierten rauen Deckwerke und die Ergebnisse der Wellenauflaufsimulationen werden in Abschnitt 5 vorgestellt. Schließlich werden die Ergebnisse in Abschnitt 6 analysiert und diskutiert.

# 3 Naturmaßstäbliche Versuche zum Wellenauflauf regelmäßiger Wellen auf mörtelvergossenen Schüttsteindeckwerken

Im Rahmen des Projekts "Wellenbelastung und Stabilität hydraulisch gebundener Deckwerke" (Fördernummer 03KIS110 und 03KIS111) (Kreyenschulte et al. 2019) wurden naturmaßstäbliche Versuche im Großen Wellenkanal (GWK) des Forschungszentrums Küste in Hannover durchgeführt. Für eine detaillierte Beschreibung des Aufbaus der Deckwerke und der Randbedingungen des GWK sei auf Kreyenschulte et al. (2020) verwiesen.

### 3.1 Materialien und Messinstrumentierung

Regelmäßige Wellen mit Wellenhöhen von H = 0,36-1,49 m und Wellenperioden von T = 2,49-12,98 s wurden untersucht, woraus sich Brecherkennzahlen von  $\xi_0 = 1,19-8,82$  ergeben. Die Wassertiefe im Kanal und am Deckwerksfuß betrug in allen Versuchen 4 m.

Zur Bestimmung der Wellenauflaufhöhe wurden 2D-LIDAR-Messungen der Wasserund Deckschichtoberfläche durchgeführt, einer bewährten Methode zur Messung von Wasseroberflächen (Blenkinsopp et al. 2010, Blenkinsopp et al. 2012), insbesondere auf Deckwerken (Howe 2016, Hofland et al. 2015). Zudem wurden Videoaufnahmen der Deckwerke während der Versuche durchgeführt. Abbildung 1 stellt die Position der Messtechnik im GWK dar.



Abbildung 1: Position der für die Auswertung verwendeten Messtechnik im GWK (a) im Querschnitt des gesamten Kanals sowie (b) im Bereich der Deckwerke im Querschnitt (teilweise verändert nach Kreyenschulte et al. 2020).

Die Laserscanner vom Typ *LMS511* der Firma *SICK* wurden in der Mitte beider Kanalhälften mit einem minimalen Abstand zum Deckwerk von 7,9 m angebracht. Die Winkelauflösung der Scanner beträgt bei einer Messfrequenz von 25 Hz 0,167°. Für den in den Versuchen vorhandenen Abstand zwischen Laserscanner und gemessener Wasser- bzw. Deckwerksoberfläche von ca. 7,9–11 m wird ein systematischer Fehler von ±25 mm und ein statistischer Fehler von ±6 mm angegeben (SICK 2020). Zusätzlich filmten zwei Kameras in Richtung der Ausbreitungsrichtung der einlaufenden Wellen und in Richtung des Deckwerks, eine weitere Kamera war unter dem Dach des GWK angebracht und filmte entgegen der Ausbreitungsrichtung der einlaufenden Wellen (siehe Abbildung 1). Die Kameras nahmen fünf Bilder pro Sekunde auf.

Darüber hinaus wurde die Deckschichtoberfläche mit dem 3D-Laserscanner Focus<sup>3D</sup> der Firma FARO aufgenommen. Der systematische Distanzfehler beträgt bei diesem Gerät  $\pm 2$  mm, es wurden ca. 4 Messpunkte pro cm<sup>2</sup> aufgenommen.

Die Wellenparameter am Deckwerksfuß wurden anhand der Wasserstandsmessungen an der Wellenharfe, die ca. 45 m vor dem Deckwerk installiert war (siehe Abbildung 1), mit der Methode von Mansard und Funke (1980) im Programm L~davis (Leichtweiß-Institut für Wasserbau 2007) berechnet. Die Wellenharfe bestand aus vier Drahtwellenpegeln, die den Wasserstand mit einer Frequenz von 100 Hz aufzeichneten.

### 3.2 Methodik zur Auswertung der 2D-LIDAR-Daten

Die Daten der kalibrierten 2D-LIDAR-Scanner wurden mit MATLAB-Routinen (MathWorks® MATLAB R2018b) verarbeitet. Die aus den 2D-LIDAR-Daten berechnete Differenz zwischen der gemessenen Oberfläche des Deckwerks zu Beginn der Versuche (Ruhewasserspiegel, ohne Wellen im Kanal) und der gemessenen Oberfläche während der Versuche (Oberfläche der auflaufenden Wellen bzw. des Deckwerks) zu jedem Zeitschritt wurde verwendet, um die Schichtdicke des Wassers auf der Deckschicht zu berechnen. Diese Daten wurden gefiltert, um Ausreißer wie z. B. Spritzwasser zu entfernen. Dafür wurden Kriterien genutzt, die nicht-physikalische Werte filtern, wie z. B. gemessene Punkte über der Kanalhöhe, Wellenauflaufgeschwindigkeiten, die einen physikalisch sinnvollen Bereich überschreiten oder eine Mindestlänge der Wellenauflaufzunge. Zur Identifizierung der Front der Wellenauflaufzunge auf dem Deckwerk wurde die Mindestschichtdicke mit einem Grenzwert von 2,5 cm definiert. Die so ermittelten Wellenauflaufhöhen wurden anhand der Videodaten validiert.

### 3.3 Ergebnisse

Abbildung 2 zeigt die relativen Wellenauflaufhöhen regelmäßiger Wellen auf voll- und mörtelvergossenen Schüttsteindeckwerken. Gleichung (7), modifiziert nach Hunt (1959), mit den jeweiligen Reduktionsbeiwerten  $\gamma_f$  für die Rauheit wurde mit einer Regression an die Ergebnisse angepasst.

$$R_u/H = \min \begin{cases} \xi_0 \cdot c_1 \cdot \gamma_f \\ c_2 \cdot \gamma_{f,nb} \end{cases}$$
(7)

Dabei sind  $c_1 = 1,16$  und  $c_2 = 2,2$  empirische Beiwerte, die anhand der Wellenauflaufhöhe auf einer glatten, undurchlässigen Böschung ermittelt werden (siehe Abschnitt 5), der Index

(9)

"nb" steht für nichtbrechende Wellen und die Brecherkennzahl wird mit der mittleren Wellenhöhe H und der zugehörigen Wellenperiode T am Bauwerksfuß berechnet, wobei für die Wellenlänge Tiefwasserbedingungen angenommen werden (fiktive Brecherkennzahl, siehe EurOtop 2018):

$$\xi_0 = \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{H/L_0}} \tag{8}$$

Die Böschungsneigung  $tan(\alpha)$  betrug während der Versuche stets 1:3, die Wellenlänge  $L_0$ berechnet sich wie folgt:

 $L_0 = \frac{gT^2}{2\pi}$ 



Abbildung 2: Relative Wellenauflaufhöhen auf vollvergossenen Schüttsteindeckwerken mit unterschiedlichen Deckschichtdicken d. Die Deckschichten wurden nachvergossen (nachv.) oder direkt nach Herstellung der porösen Schüttsteindeckschicht vollvergossen (vollv.). Dargestellt ist auch Gleichung (7) mit den jeweiligen Reduktionsbeiwerten  $\gamma_{f}$  und  $\gamma_{f,nb}$ .

Für brechende Wellen ( $\xi_0 < 2,4$ ) stellt Gleichung (7) eine sehr gute Beschreibung der Ergebnisse dar, da sich auch in den Versuchsergebnissen ein linearer Trend steigender relativer Wellenauflaufhöhen  $R_{\mu}/H$  mit der Brecherkennzahl  $\xi_0$  zeigt. Für nichtbrechende Wellen beschreibt Gleichung (7) bis zu einer Brecherkennzahl  $\xi_0 \approx 3$  die Ergebnisse mit geringer Streuung. Bei Brecherkennzahlen  $\xi_0>3$  nimmt die Streuung um den im Bereich nichtbrechender Wellen konstanten Funktionswert deutlich zu. Dennoch beschreibt Gleichung (7) die Wellenauflaufhöhe regelmäßiger Wellen auf mörtelvergossenen Schüttsteindeckwerken mit der höchsten Genauigkeit im Vergleich zu anderen häufig in der Literatur verwendeten Gleichungen, die ebenfalls einen Reduktionsbeiwert zur Berücksichtigung der den Wellenauflauf reduzierenden Parameter verwenden (Kreyenschulte und Schüttrumpf 2020).

# 4 Numerische Simulationen zum Wellenauflauf regelmäßiger Wellen auf vollvergossenen Schüttsteindeckwerken

Für alle numerischen Berechnungen wurde das Open-Source-Programmpaket DualSPHysics v4.4 (Crespo et al. 2015) verwendet, das unter www.dual.sphysics.org verfügbar ist. Die Methode der "Smoothed Particle Hydrodynamics" (SPH) ist eine netzfreie Lagrange-Methode, die ein Fluid als Masse diskreter Elemente, die Partikel genannt werden, darstellt. Eine detaillierte Beschreibung der Methode kann Monaghan (2005) und Crespo et al. (2015) entnommen werden. DualSPHysics wurde unter anderem bereits verwendet, um Wellenausbreitung und Wellenbrechen (Lowe et al. 2019), Kräfte auf Bauwerke (Altomare et al. 2015), Wellenauflauf auf Deichen (Subramaniam et al. 2019) und hochturbulente Strömungen auf getreppten Gerinnen (Nóbrega et al. 2020) zu simulieren.

Zuerst wurde die Deckschichtgeometrie eines im GWK untersuchten vollvergossenen Deckwerks anhand der Daten des 3D-Laserscanners Focus<sup>3D</sup> in das numerische Modell übertragen. Aus der Punktwolke der eingemessenen Punkte des Laserscanners wurde die Oberfläche mit dem Open-Source-Programm MeshLab (Cignoni et al. 2008) mittels "Ball Pivoting Algorithm" (Bernardini et al. 1999) rekonstruiert und als STL-Datei exportiert. Diese wird vom Programm DualSPHysics verwendet, um im durch den Benutzer vorgegebenen Abstand ortsfeste Partikel zu generieren, die die Oberfläche des Deckwerks abbilden.

Das numerische Modell bestand schlussendlich aus dem diskretisierten Deckwerk und einem Wellenkanal mit variabler Länge (Abstand von Wellenpaddel zu Böschungsfuß), siehe Abbildung 3. Die Länge des Kanals wurde auf die jeweils simulierte Wellenlänge angepasst, sodass der Kanal mindestens zwei Wellenlängen lang war.



Abbildung 3: (a) 3D-Wellenkanal mit variabler Länge sowie (b) Detailansicht der Böschung und eines Deckwerks im numerischen Modell.

Die Wellen wurden mit einem Wellenpaddel am Kanalende erzeugt. Aktive Wellenabsorption verhinderte die Re-Reflektion von an der Deckschicht reflektierten Wellen am Wellenpaddel (Altomare et al. 2017).

Alle Strömungsgrößen des numerischen Modells wurden mit einer Frequenz von 25 Hz ausgegeben. Zu Beginn der Simulationen müssen erst einige Wellen auf der Deckschicht auflaufen, bevor sich eine bis auf sehr kleine Schwankungen gleichbleibende Wellenauflaufhöhe einstellt. Die Anzahl der zur Erreichung einer gleichbleibenden Wellenauflaufhöhe benötigten Wellen hängt von den Wellenparametern und von der Deckschicht ab. Eine gleichbleibende Wellenauflaufhöhe war meist nach 2 bis 4 auf der Deckschicht auflaufenden Wellen erreicht.

Der verwendete Algorithmus zur Berechnung der Position der auflaufenden Wellenfront entspricht methodisch dem zur Auswertung der 2D-LIDAR-Daten (siehe Abschnitt 3.2). Dadurch wird eine einheitliche Auswertemethodik der numerischen und hydraulischen Versuche gewährleistet.

Mit den in DualSPHysics vorhandenen Werkzeugen des "Measure Tools" wurden Wasserstände an vorgegebenen Positionen für jeden Ausgabezeitschritt der numerischen Berechnungen als CSV-Datei ausgegeben. Diese Positionen wurden entlang der Deckschicht im Abstand von 0,05 m in Längsrichtung des Kanals definiert. Die Position der festen Partikel, die die Deckschicht repräsentieren, wurde ausgelesen und zu jedem Zeitschritt von den aufgezeichneten Wasserständen subtrahiert, woraus die Schichtdicke der Wellenauflaufzunge berechnet wurde. Die weiteren Schritte (Filtern von Ausreißern und nicht-physikalischen Werten, Identifizierung der Front der Wellenauflaufzunge auf dem Deckwerk) im Algorithmus entsprechen den in Abschnitt 3.2 beschriebenen Schritten.

Im Folgenden werden eine Sensitivitätsstudie, eine Konvergenzstudie und eine Parameterstudie zur Festlegung der Einstellungen des numerischen Modells beschrieben (Kalibrierung). Das numerische Modell wird anschließend mithilfe der Ergebnisse der hydraulischen Modellversuche im GWK (siehe Abschnitt 3) für den Wellenauflauf auf rauen Deckwerken validiert.

### 4.1 Festlegung der Einstellungen des numerischen Modells

Folgende Schritte zur Festlegung der Einstellungen des numerischen Modells, die von Gehrmann (2020) und Kreyenschulte und Schüttrumpf (2019) beschrieben wurden und hier der Übersichtlichkeit halber nur zusammengefasst wiedergegeben werden, wurden durchgeführt:

• Überprüfung der Abbildung der mit dem Laserscanner aufgenommenen Geometrie anhand der Punktgeometrie in DualSPHysics in Abhängigkeit des Partikelabstands *dp* 

Ab einem Partikelabstand dp<0,01 m tritt keine wesentliche Verbesserung der Abbildung der Deckschicht mit kleiner werdendem Partikelabstand ein. Die mittlere Fehlerquadratsumme (root mean squared error *RMSE*, siehe Anhang) der Differenz der Lage von Partikeln im numerischen Modell zu den mit dem 3D-Laserscanner eingemessenen Punkten beträgt dann *RMSE* = 2,8 mm (siehe Anhang A-1).

• Dimensionalität des Modells

Das vollständige Modell der Deckschicht hatte im GWK eine Breite von 2,5 m. Da bei einem Partikelabstand von dp = 0,03 m, der kürzesten verwendeten Kanallänge von 20 m und einer Wassertiefe von 4 m bereits ca. 8·10<sup>6</sup> Fluidpartikel und 7·10<sup>6</sup> ortsfeste Partikel für die Simulation benötigt werden, sind die numerischen Berechnungen sehr rechenzeitintensiv. Um eine große Anzahl verschiedener Geometrien simulieren zu können ist die Rechenzeit eine entscheidende Größe. Deshalb wurde in einer Sensitivitätsstudie untersucht, inwieweit die Breite des Modells verringert werden kann, ohne die Ergebnisse der Wellenauflaufhöhen maßgeblich zu beeinflussen. Dazu wurden fünf verschiedene Kombinationen aus Wellenhöhe und Wellenperiode ( $\xi_0 = 1,25-3,25$ ) mit zwei Partikelabständen (dp = 0,05 m und dp = 0,03 m) simuliert und dabei die Breite des Modells auf 1 m und 0 m (2D-Abbildung) reduziert. Die Abweichung der Wellenauflaufhöhe  $R_{tt}$  der verschiedenen Rechnungen untereinander betrug in allen Fällen weniger als 10 % (siehe Anhang A-2). Zwischen 2D-Simulation und 3D-Simulation mit 2,5 m breitem Kanal (dp = 0,03 m) betrug die Abweichung im Mittel 2 % und in allen Fällen weniger als 6 %. Das spricht dafür, dass bei dem hier simulierten rauen Deckwerk zufällige Effekte, z. B. die genaue Lage der einzelnen vergossenen Wasserbausteine, die die Rauheit erzeugen, die Ergebnisse in der gleichen Größenordnung beeinflussen wie die Reduktion der Simulation auf eine 2D-Berechnung.

• Partikelabstand dp

Der Partikelabstand dp ist nicht nur entscheidend für die Genauigkeit der Diskretisierung der Deckschicht, sondern analog zu Methoden, die ein numerisches Gitter verwenden, auch entscheidend für die Abbildung der Strömungsvorgänge und kann als Auflösung der Strömungsprozesse betrachtet werden. Im 2D-numerischen Modell wurden im Rahmen einer Konvergenzstudie Berechnungen mit Partikelabständen dp = 0,08 | 0,05 | 0,03 | 0,02 | 0,01 m durchgeführt. Dabei zeigen sich erwartungsgemäß abnehmende Differenzen zwischen den Berechnungsergebnissen mit geringer werdendem Partikelabstand (höherer Auflösung). Zwischen den Partikelabständen dp = 0,02 m und dp = 0,01 m betrug die mittlere Differenz der relativen Wellenauflaufhöhen  $R_u/H$  lediglich 0,05, sodass bei einem Partikelabstand von dp = 0,01 m von konvergenten Ergebnissen ausgegangen wird. Bei dp = 0,01 m und einer Wassertiefe von 3,5 m werden ca. 2·10<sup>6</sup> Fluidpartikel und 2,2·10<sup>5</sup> ortsfeste Partikel für eine 2D-Simulation benötigt.

• Numerische Parameter

Numerische Parameter wurden nach Veröffentlichungen zur Verwendung von DualSPHysics für Fragestellungen des Küsteningenieurwesens (Lowe et al. 2019, Altomare et al. 2015) und nach Parameterstudien (Gehrmann 2020) festgelegt. Bei diesen Parametern handelt es sich z. B. um den verwendeten Zeitschrittalgorithmus und um die sog. künstliche Viskosität, die bei der expliziten zeitlichen Diskretisierung benötigt wird, um hochfrequente Schwingungen zu dämpfen (Monaghan 1992, Lowe et al. 2019). Die wichtigsten Parameter der Simulationen, die für alle weiteren Berechnungen verwendet wurden, sind in Tabelle 1 dargestellt.

| Parameter  | Wert       |
|--|------------|
| Künstliche Viskosität a                          | 0,01       |
| Partikelabstand <i>dp</i>                        | 0,01 m     |
| Zeitschrittalgorithmus                           | Symplectic |
| ViscoBoundFactor (Berücksichtigung von zusätzli- | 0          |
| cher Reibung unterhalb der Partikelauflösung)    |            |
| coef_h (Festlegung der Glättungslänge)           | 1,2        |

Tabelle 1: Verwendete numerische Parameter zur Berechnung des Wellenauflaufs auf rauen Deckwerken, festgelegt anhand der Sensitivitäts-, Konvergenz- und Parameterstudien und anhand von Literaturwerten.

Im Rahmen der beschriebenen Sensitivitäts-, Konvergenz- und Parameterstudien zeigte sich außerdem, dass aufgrund der durch die tolerierbaren Rechenzeiten beschränkten Länge des Wellenkanals nur Wellen mit Perioden bis zu ca. 6 s berechnet werden können. Sollen Wellen mit Brecherkennzahlen  $\xi_0>3-3,5$  simuliert werden, muss die Wellenhöhe daher kleiner als 0,70 m gewählt werden. Für Wellenhöhen kleiner als 0,40 m nimmt der Einfluss der Rauheit auf die Wellenauflaufhöhe bei den Simulationen mit der Geometrie des vollvergossenen Schüttsteindeckwerks überproportional zu und auch der Unterschied der Ergebnisse der 3D- und 2D-numerischen Berechnungen nimmt tendenziell zu. Daher wurden in allen folgenden Berechnungen im numerischen Modell nur Wellen mit Brecherkennzahlen von maximal  $\xi_0 = 3,23$  (H = 0,60 m; T = 6 s) durchgeführt.

Darüber hinaus wurde an den festen Rändern des Modells der Partikelabstand in jede Raumrichtung halbiert, um eine gute Abbildung der festen Ränder durch die Erhöhung der Anzahl der ortsfesten Partikel zu erhalten. Für die festen Ränder, die das Wellenpaddel und die Deckschicht repräsentieren, wurde außerdem die sog. "Boundary Correction" verwendet, die eine verbesserte Berechnung der auf das Fluid wirkenden Kräfte an festen Rändern ermöglicht.

Das Verhältnis von Simulationszeit zu Rechenzeit betrug ungefähr 1:900 bei ca.  $2 \cdot 10^6$ Fluidpartikeln und  $2,2 \cdot 10^5$  ortsfesten Partikeln (Partikelabstand dp = 0,01 m, Wassertiefe h = 3,5 m, 2D-Berechnung) unter Verwendung einer Grafikkarte GeForce GTX 1080 Ti TURBO, 16GB DDR4 Arbeitsspeicher und einem AMD Ryzen 7 2700X (8 CPU-Kerne mit 3,7 GHz). Beispielsweise werden also für die Simulation von 20 Wellenaufläufen einer Welle mit T = 4,5 s auf einer Deckschicht ca. 23 Stunden Rechenzeit benötigt.

### 4.2 Validierung des numerischen Modells

Mit den anhand der Ergebnisse der Sensitivitäts- und Konvergenzstudie festgelegten Größen wurden die GWK-Versuche im 2D-numerischen Modell nachgerechnet, die Ergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt.

der GWK-Versuche



Abbildung 4: Vergleich der 2D-numerischen Berechnungen (dp = 0,01 m) mit den Ergebnissen der naturmaßstäblichen hydraulischen Versuche mit mörtelvergossenen Schüttsteindeckwerken im GWK anhand des relativen Wellenauflaufs  $R_u/H$  in Abhängigkeit der Brecherkennzahl.

Im Bereich der brechenden Wellen ( $\xi_0 < 2,5$ ) zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse der numerischen Berechnung mit den im GWK gemessenen Wellenauflaufhöhen. Im Bereich der nichtbrechenden Wellen zeigt sich, genau wie in den Ergebnissen der GWK-Versuche, auch in den Ergebnissen des numerischen Modells eine stärker werdende Streuung. Da aufgrund der benötigten Rechenleistung keine Berechnungen mit größeren Brecherkennzahlen im numerischen Modell durchgeführt wurden, kann anhand der Ergebnisse nicht abschließend beurteilt werden, ob das numerische Modell auch im Bereich nichtbrechender Wellen valide Ergebnisse berechnet.

Wird mit den Ergebnissen nach Gleichung (7) sowie  $c_1 = 1,16$  und  $c_2 = 2,2$  (zur Festlegung der Konstanten  $c_1$  und  $c_2$  siehe Abschnitt 5.3) eine Regression von Gleichung (7) mit den Reduktionsfaktoren als Parametern durchgeführt, so ergeben sich die in Tabelle 2 dargestellten Reduktionsfaktoren. Während die berechneten Reduktionsbeiwerte im Bereich brechender Wellen sehr gut übereinstimmen, unterscheiden sie sich im Bereich nichtbrechender Wellen aufgrund der begrenzten Datenlage der numerischen Simulationen stark. Im Bereich brechender Wellen sind *RMSE* und Streuungsfaktor (*scatter index SI*, siehe Anhang) für das numerische Modell doppelt so groß wie für die Ergebnisse der hydraulischen GWK-Versuche.

|   | Brechende Wellen |      | Nichtbrechende Wellen |      |      |        |
|---|------------------|------|-----------------------|------|------|--------|
|   | γf               | RMSE | SI [%]                | ү£ль | RMSE | SI [%] |
| Regression anhand der Ergebnisse<br>des numerischen Modells | 0,67             | 0,15 | 10,39                 | 0,78 | 0,15 | 8,74   |
| Regression anhand der Ergebnisse                            | 0,68             | 0,08 | 5,47                  | 0,86 | 0,47 | 24,66  |

Tabelle 2: Reduktionsbeiwerte für Gleichung (7), ermittelt anhand einer Regression der Ergebnisse des numerischen Modells und der GWK-Versuche.

# 5 Numerische Simulationen zum Wellenauflauf regelmäßiger Wellen auf rauen Deckwerken

Gemäß der Zielsetzung dieses Beitrags, die Reduktion der Wellenauflaufhöhe infolge rauer Deckschichten zu beschreiben, wurden im validierten numerischen Modell verschiedene raue Oberflächen diskretisiert und Simulationen zum Wellenauflauf durchgeführt. Im Folgenden wird auf das Versuchsprogramm, die rauen Deckschichtoberflächen und die Beschreibung der Rauheit der Deckschichtoberflächen eingegangen. Anschließend werden die Ergebnisse dargestellt, bevor diese in Abschnitt 6 analysiert werden.



# 5.1 Materialien

Abbildung 5: Teilansicht der im numerischen Modell untersuchten rauen Deckschichtgeometrien mit runden Rauheitselementen (s1, s2), rechteckigen Rauheitselementen (c1, c2), rechteckigen gedrehten Rauheitselementen (cr1, cr2), Deckschichtoberfläche aus dem GWK mit Verzerrung in alle Raumrichtungen (GWK\_2XYZ) und unregelmäßige Polygone (p1–p4). Die rote Linie zeigt die Neigung des Deckwerks an.

Die numerischen Berechnungen wurden mit regelmäßigen Wellen mit Wellenhöhen H = 0,40-1,00 m und Wellenperioden von T = 3-6,2 s durchgeführt, woraus sich Brecherkennzahlen von  $\xi_0 = 1,40-3,23$  ergeben. Alle Deckwerke hatten eine Neigung von 1V:3H. Zunächst wurde der Wellenauflauf auf einer glatten Böschung berechnet, um die Ergebnisse als Referenz zur Bestimmung der Reduktionsbeiwerte rauer Deckschichten zu nutzen. Darüber hinaus wurden elf verschiedene raue Deckwerksoberflächen im zweidimensionalen numerischen Modell untersucht. Die rauen Deckschichtoberflächen sollten sich möglichst unähnlich sein, um Ergebnisse zu erhalten, die eine möglichst allgemeine Beschreibung des Einflusses der Rauheit auf die Wellenauflaufhöhe erlauben. Dazu wurden unregelmäßige Polygone, die Deckschichtoberfläche aus dem GWK mit Verzerrung in alle Raumrichtungen (jeweils um den Faktor zwei), runde Rauheitselemente, rechteckige

Rauheitselemente und um 45° gedrehte rechteckige Rauheitselemente verwendet. Dabei wurden die Abmessungen der Kugeln und Quader sowie der Abstand der Elemente zueinander variiert. Sämtliche Oberflächen und deren Kurzbezeichnung sind in Abbildung 5 dargestellt. Im Anhang werden die variierten Größen detailliert beschrieben.

### 5.2 Beschreibung der Rauheit der Deckwerke

Die Rauheit soll als geometrische Größe beschrieben werden. Da die Welle parallel zur Deckschicht auf dieser aufläuft, sind für die Rauheitswirkung die Höhenänderungen orthogonal zur Deckschichtoberfläche maßgebend. Daher wird mittels linearer Regression einer Geradengleichung der Trend der die Deckschicht diskretisierenden Punkte bestimmt. Die Punkte der Deckschicht werden damit "in die Horizontale gedreht", indem der Trend von den Höhen der Punkte subtrahiert wird. Anschließend wird der Trend der Punkte, die die Deckschichtoberfläche beschreiben, bestimmt. Das Vorgehen ist in Abbildung 6 verdeutlicht.



Abbildung 6: Darstellung aller Punkte, die die Deckschicht diskretisieren (blau), der Punkte, die die Oberfläche der Deckschicht repräsentieren (schwarz), sowie der jeweiligen Trends für die Deckschicht "polygon1 (p1)". (a) Deckwerk wie in den numerischen Berechnungen verwendet, (b) "in die Horizontale" gedrehtes Deckwerk.

Die Differenz jedes Punkts der Deckschichtoberfläche zu dieser Trendlinie wird bestimmt. Die kumulative Dichteverteilung dieser Differenz beschreibt nun die Rauheit der Deckschicht, siehe Abbildung 7. Die Verteilungen können mit verschiedenen Maßen charakterisiert werden, z. B. der Standardabweichung, der Schiefe oder Kurtosis, einem Quantilwert, oder Differenzen der Quantilwerte (Kernhöhe), siehe z. B. DIN EN ISO 25178-2 (2019). Die Wahl des jeweiligen Maßes bzw. der jeweiligen Maße ist dabei abhängig vom betrachteten Prozess. Im numerischen Modell wurden relative Rauheiten k/H = 0,02-0,20 untersucht (für die Rauheit k wurde hier die Standardabweichung verwendet).



Abbildung 7: Kumulative Dichteverteilung der Differenzen der Punkte der Deckschichtoberfläche zur Trendlinie für (a) raue Deckschichtoberflächen mit runden und rechteckigen Rauheitselementen sowie (b) raue Deckschichtoberflächen aus unregelmäßigen Polygonen und verzerrte GWK-Deckschicht.

#### 5.3 Ergebnisse

Abbildung 8 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der numerischen Berechnungen für eine glatte Böschung sowie jeweils eine Auswahl der Ergebnisse der rauen Böschungen. Darüber hinaus ist das modifizierte Modell von Hunt (1959) zur Berechnung der Wellenauflaufhöhe, siehe Gleichung (7), mit den durch Regression festgelegten Reduktionsbeiwerten dargestellt.



Abbildung 8: Ergebnisse der Berechnungen mit DualSPHysics: Relative Wellenauflaufhöhe  $R_{\#}/H$ in Abhängigkeit der Brecherkennzahl für (a) eine glatte Böschung und zwei Polygon-Geometrien und (b) raue Deckschichtoberflächen mit runden und rechteckigen Rauheitselementen. Dargestellt ist außerdem Gleichung (7) mit den jeweils durch Regression ermittelten Reduktionsbeiwerten.

Zunächst wurden die empirischen Beiwerte in Gleichung (7) für eine glatte Böschung anhand von Simulationen zur Wellenauflaufhöhe auf glatten Böschungen zu  $c_1 = 1,16$  und  $c_2 = 2,2$  bestimmt. Diese Werte liegen im Bereich der in der Literatur angegebenen Werte, siehe Tabelle 3. Die Beiwerte dienen als Referenz zur Bestimmung der Reduktionsfaktoren aller anderen Deckwerke.

|                       | Hunt (1959) | Hammeken<br>Arana (2017) | Oumeraci et al.<br>(2010) | Losada und<br>Giménez-Curto<br>(1981) | Eigene<br>Untersuchung |
|-----------------------|-------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------------------|------------------------|
| <i>C</i> 1            | 1           | 1,25                     | 1                         | 1                                     | 1,16                   |
| <i>C</i> <sub>2</sub> | 3           | 2,5*                     | 2,3                       | 2-3**                                 | 2,2                    |
| -                     |             |                          |                           |                                       |                        |

Tabelle 3: In der Literatur aufgeführte empirische Beiwerte  $c_1$  und  $c_2$  für Gleichung (7) (ohne Anspruch auf Vollständigkeit).

\*abhängig u. a. von der Böschungsneigung,  $c_2 = 2,5$  bei tan  $\alpha = 1/3$ \*\* $R/H = 2,5-(2,5-\xi)/3$  für  $2,5 < \xi < 4$  und R/H = 2 für  $\xi > 4$  (Gleichung zitiert nach Hammeken Arana, 2017)

#### 6 Weitere Analyse und Diskussion

Da die Validität des numerischen Modells im Bereich nichtbrechender Wellen nicht abschließend beurteilt werden konnte, werden im Folgenden nur die Ergebnisse der numerischen Simulationen für brechende Wellen analysiert. Dazu wurde folgendes Vorgehen gewählt: Für jede Deckschicht und jeden Versuch liegt durch Vergleich jedes Versuchs mit der Funktion für glatte Deckwerke ein Reduktionsfaktor für Rauheit vor. Diese Reduktionsfaktoren wurden für jede Deckschicht als Funktion von Rauheitsmaßen und hydraulischen Parametern wie der Wellenhöhe ausgedrückt.

Folgende Rauheitsmaße wurden verwendet, die aus der kumulativen Dichtefunktion der geometrischen Differenzen von der mittleren Deckschichtoberfläche (siehe Abschnitt 5.2) berechnet wurden: Standardabweichung, verschiedene Quantilwerte (80 %, 60 %, 40 %, 20 %), Kernhöhe (Differenz von 80 %-Quantilwert und 20 %-Quantilwert), Kurtosis, Schiefe.

Folgende Kombinationen aus Rauheitsmaßen und hydraulischen Parametern wurden verwendet: Relative Rauheiten k/H, k/L,  $k(HL)^{-0.5}$  (k steht hier für die Rauheit, jeweils ausgedrückt durch ein oben beschriebenes geometrisches Maß, z. B. die Standardabweichung).

Die Ergebnisse der unterschiedlichen Modellgleichungen zur Beschreibung des Reduktionskoeffizienten wurden anhand der Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE), des Streuungsfaktors (SI) und bei linearen Regressionen durch den Korrelationskoeffizienten  $R^2$  beurteilt.

Als bestes Maß zur Beschreibung der Rauheit stellte sich die Standardabweichung heraus. Der stärkste Zusammenhang zwischen Reduktionskoeffizient und hydraulischen Parametern bzw. Rauheitsparametern wurde jeweils in der Form  $\gamma_f = f\{\ln(k/H)\}$  festgestellt. Als weiterer Parameter wurde die Kurtosis *w* berücksichtigt, die ein Maß für die Gleichmäßigkeit der Verteilung der Differenzen von der mittleren Deckschichtoberfläche ist. Schließlich ergibt sich:

$$\gamma_f = a \cdot \ln \frac{k}{H} + b \cdot w + c = -0,165 \cdot \ln \frac{k}{H} + 0,047 \cdot w + 0,214 \tag{10}$$

Dabei sind *a*, *b* und *c* empirische Konstanten. Das Bestimmtheitsmaß der Funktion beträgt  $R^2 = 0,84$ , die Signifikanz des Zusammenhangs zwischen dem Reduktionsbeiwert und der relativen Rauheit k/H kann für ein Signifikanzniveau <1 % nachgewiesen werden (p-Wert = 7·10<sup>-17</sup>), der Zusammenhang zwischen Reduktionsbeiwert und Kurtosis auf einem Signifikanzniveau <2 % (p-Wert = 1,76·10<sup>-2</sup>). Abbildung 9 zeigt den Vergleich der im numerischen Modell bestimmten und anhand der Gleichung berechneten Reduktionsbeiwerte.



Abbildung 9: Vergleich der im numerischen Modell bestimmten Reduktionsbeiwerte  $\gamma_{f,num.Modell}$  und anhand von Gleichung (10) berechneten Reduktionsbeiwerte  $\gamma_{f,berechnet}$  ( $R^2 = 0,84$ ; RMSE = 0,041; SI = 5,31 %). Die nicht für die Regression verwendeten Werte der Geometrien c1, c2 und p4 sind als Kreuze dargestellt.

Bei der Berechnung der empirischen Beiwerte wurden die Deckschichten mit rechteckigen Blöcken (Deckschichten c1 und c2) sowie die sinusförmige Deckschichtoberfläche (Deckschicht p4) aus der Betrachtung ausgelassen. Die Deckwerke mit rechteckigen Blöcken haben dem Zahlenwert der Rauheit nach unter den betrachteten Deckschichten eine mittlere Rauheit, wirken aber durch die senkrecht aus der Deckschicht ragenden Rauheitselemente anders auf die auflaufende Welle als die übrigen Deckschichtgeometrien. Der Abstand der Blöcke zueinander ist relativ gering, sodass nach einigen Wellen, die auf der Deckschicht aufgelaufen sind, die Zwischenräume der Blöcke mit Wasser gefüllt sind und während des Wellenrücklaufs größtenteils gefüllt bleiben. Die nächste Welle läuft dann auf diesen wassergefüllten Zwischenräumen und den Oberkanten der Blöcke auf, nur ein geringer Teil der Wellenauflaufzunge läuft gegen die senkrechte Seite der Blöcke. Die Rauheitswirkung ist bei den rechteckigen Blöcken daher mit Bezug auf ihre Rauheit, ausgedrückt als geometrische Größe, überproportional reduziert.

Bei der sinusförmigen Deckschicht (p4) ist der Zahlenwert der geometrischen Rauheit relativ hoch, die Welle trifft während des Wellenauflaufs (im Gegensatz z. B. zu den Deckschichtgeometrien aus Polygonen p1–p3) aber nie auf eine Fläche, deren Steigung zur vorherigen Fläche plötzlich stark verändert ist. Die Steigung wird vielmehr stetig größer oder kleiner, die Rauheitswirkung ist bei der sinusförmigen Deckschicht daher mit Bezug auf ihre Rauheit, ausgedrückt als geometrische Größe, überproportional reduziert. Sinusförmige Deckschichten sind offenkundig keine tatsächlich verwendete Geometrie von Deckwerken, wurden aber hier gezielt betrachtet, um die Grenzen der Anwendbarkeit des hier gewählten Zusammenhangs zwischen Reduktionsbeiwert und Rauheit zu überprüfen.

Die vorgestellten Ergebnisse geben erste Hinweise auf eine mögliche geometrische Beschreibung der Rauheit zur Berechnung von Reduktionsfaktoren, die für mehrere Deckwerkstypen anwendbar ist. Allerdings sind mehr Daten notwendig, um weitergehende Aussagen zu treffen. So muss der Bereich der untersuchten relativen Rauheiten k/H vergrößert werden, um mehr Ergebnisse für größere Makrorauheiten auswerten zu können. Darüber hinaus sind Berechnungen mit größeren Wellenlängen notwendig, um die Validität des numerischen Modells für Brecherkennzahlen im Bereich nichtbrechender Wellen und damit auch von Gleichung (10) für nichtbrechende Wellen zu bestätigen.

Das größte Hindernis dafür ist der hohe Rechenaufwand des numerischen Modells. Mögliche Lösungen dafür sind Rechnungen auf Rechenclustern oder Hochleistungsrechnern. Auch die jüngsten Entwicklungen zur modelltechnischen Verkürzung von Wellenkanälen durch alternative Methoden der Wellengenerierung sind vielversprechend (Verbrugghe et al. 2019, Altomare et al. 2018).

#### 7 Fazit

Das Ziel des vorliegenden Beitrags war die Beschreibung des Reduktionsfaktors infolge Rauheit anhand einer kombinierten Größe aus geometrischem Rauheitsmaß und Wellenparameter, die für verschiedene Deckwerkstypen gültig ist und einen Ansatz für die Zusammenführung der sonst nur für einzelne Deckwerkstypen formulierten Reduktionsfaktoren ermöglicht.

Dazu wurden naturmaßstäbliche hydraulische Versuche und numerische Simulationen zum Wellenauflauf auf mörtelvergossenen Schüttsteindeckschichten sowie numerische Simulationen des Wellenauflaufs auf idealisierten Deckwerksgeometrien durchgeführt und ausgewertet. Darüber hinaus wurde eine vergleichbare geometrische Beschreibung der Rauheit von Deckschichten eingeführt, die für sämtliche Deckwerkstypen verwendet werden kann.

Das numerische Modell konnte für brechende Wellen anhand der hydraulischen Modellversuche validiert werden. Für nichtbrechende Wellen und die damit einhergehenden größeren Wellenlängen stoßen die verwendeten Desktop-PCs aufgrund der hohen Anzahl an Partikeln und die damit verbundenen Speicher- und Rechenkapazitäten allerdings an ihre Grenzen. Für nichtbrechende Wellen konnte das Modell daher nicht validiert werden.

Für brechende Wellen konnte ein guter Zusammenhang zwischen dem Reduktionsbeiwert infolge Rauheit und der relativen Rauheit (beschrieben als Quotient der Standardabweichung der Differenzen der Deckschichtoberfläche zur mittleren Deckschichtoberfläche und der Wellenhöhe) sowie der Kurtosis für verschiedene Deckschichten gefunden werden. Bei zu stark abweichenden Rauheitseffekten aufgrund schlagartig veränderlicher Rauheitselemente (Rechteckblöcke) oder sich ausschließlich stetig ändernden Rauheitselementen (sinusförmige Deckschicht), stößt die hier gewählte Beschreibung der Rauheit an ihre Grenzen.

Für eine Weiterentwicklung des Ansatzes werden weitere Daten benötigt, die mit dem validierten Modell z. B. auf Rechenclustern erzeugt werden könnten. Bei ausreichend

großem Datensatz könnten Methoden des Machine Learning helfen, Zusammenhänge zwischen Reduktionsfaktoren, geometrischen Maßen der Rauheit und Wellenparametern zu finden.

# 8 Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung und dem Projektträger Jülich für die finanzielle Unterstützung des KFKI-Forschungsvorhabens "Wellenauflauf auf rauen, porösen und durchlässigen Deckwerken" (Förderzeitraum vom 01.09.2018 bis 31.08.2020, Förderkennzeichen 03KIS120).

# 9 Literaturverzeichnis

Abolfathi, S.; Yeganeh-Bakhtiary, A.; Hamze-Ziabari, S. M.; Borzooei, S.: Wave runup prediction using M5' model tree algorithm. In: Ocean Engineering, 112, 76–81, https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.12.016, 2016.

Ahrens, J. P.: Irregular Wave Run Up on Smooth Slopes. CETA No. 81–17, 1981.

Ahrens, J. P.; Heimbaugh, M. S.: Approximate upper limit of irregular wave runup on riprap. Technical Report CERC-88-5. Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS, United States, 1988.

Alcerreca-Huerta, J. C.: Process-based modelling of waves interacting with porous bonded revetments and their sand foundation. Ph.D. Thesis. Technische Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig, Germany, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, 2014.

Altomare, C.; Crespo, A. J. C.; Domínguez, J. M.; Gómez-Gesteira, M.; Suzuki, T.; Verwaest, T.: Applicability of Smoothed Particle Hydrodynamics for estimation of sea wave impact on coastal structures. In: Coastal Engineering, 96, 1–12, https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.11.001, 2015.

Altomare, C.; Domínguez, J. M.; Crespo, A.; González-Cao, J.; Suzuki, T.; Gómez-Gesteira, M.; Troch, P.: Long-crested wave generation and absorption for SPH-based DualSPHysics model. In: Coastal Engineering, 127, WW1, 37–54, https://doi.org/j.coastaleng.2017.06.004, 2017.

Altomare, C.; Tagliafierro, B.; Dominguez, J. M.; Suzuki, T.; Viccione, G.: Improved relaxation zone method in SPH-based model for coastal engineering applications. In: Applied Ocean Research, 81, 408, 15–33, https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.09.013, 2018.

Bernardini, F.; Mittleman, J.; Rushmeier, H.; Silva, C.; Taubin, G.: The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction. In: IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 5, 4, 349–359, https://doi.org/10.1109/2945.817351, 1999.

Blenkinsopp, C. E.; Mole, M. A.; Turner, I. L.; Peirson, W. L.: Measurements of the timevarying free-surface profile across the swash zone obtained using an industrial LIDAR. In: Coastal Engineering, 57, 11–12, 1059–1065, https://doi.org/10.1016/j.coastaleng. 2010.07.001, 2010. Blenkinsopp, C. E.; Turner, I. L.; Allis, M. J.; Peirson, W. L.; Garden, L. E.: Application of LiDAR technology for measurement of time-varying free-surface profiles in a laboratory wave flume. In: Coastal Engineering, 68, 1–5, https://doi.org/10.1016/j.coastaleng. 2012.04.006, 2012.

Bonakdar, L.; Etemad-Shahidi, A.: Predicting wave run-up on rubble-mound structures using M5 model tree. In: Ocean Engineering, 38, 1, 111–118, https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2010.09.015, 2011.

Capel, A.: Wave run-up and overtopping reduction by block revetments with enhanced roughness. In: Coastal Engineering, 104, 76–92. 2015.

Cignoni, P.; Callieri, M.; Corsini, M.; Dellepiane, M.; Ganovelli, F.; Ranzuglia, G.: MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool. In: Proceedings of the Eurographics Italian Chapter Conference, 129–136, https://doi.org/10.2312/LocalChapterEvents/ItalChap/ItalianChapConf2008/129-136, 2008.

Crespo, A.; Domínguez, J. M.; Rogers, B. D.; Gómez-Gesteira, M.; Longshaw, S.; Canelas, R.; Vacondio, R.; Barreiro, A.; García-Feal, O.: DualSPHysics. Open-source parallel CFD solver based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) In: Computer Physics Communications, 187, 204–216, https://doi.org/10.1016/j.cpc.2014.10.004, 2015.

Elbisy, M. S.: Estimation of regular wave run-up on slopes of perforated coastal structures constructed on sloping beaches. In: Ocean Engineering, 109, 60–71, https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.08.059, 2015.

Erdik, T.; Savci, M. E.; Şen, Z.: Artificial neural networks for predicting maximum wave runup on rubble mound structures. In: Expert Systems with Applications, 36, 3, 6403–6408, https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.07.049, 2009.

EurOtop: Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application. Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P.; Zanuttigh, B., www.overtopping-manual.com, 2018.

Gehrmann, L. M.: Auswertung von Videodaten zur Beschreibung der Wellenauflaufprozesse auf mörtelvergossenen Schüttsteindeckschichten (unveröffentlicht). Masterarbeit. RWTH Aachen University, Aachen, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, 2020.

DIN EN ISO 25178-2: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft–Teil 2: Begriffe, Definitionen und Oberflächen-Kenngrößen (ISO/DIS 25178-2:2019); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 25178-2:2019 (Entwurf). 2019.

Hammeken Arana, A.: Wave run-up on beaches and coastal structures. Ph.D. Thesis. University College London, London, United Kingdom, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, 2017.

Hofland, B.; Diamantidou, E.; van Steeg, P.; Meys, P.: Wave runup and wave overtopping measurements using a laser scanner. In: Coastal Engineering, 106, 20–29, https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.09.003, 2015.

Howe, D.: Bed shear stress under wave runup on steep slopes. Ph.D. Thesis. University of New South Wales, Sydney, Australia, 2016.

Hughes, S. A.: Estimation of wave run-up on smooth, impermeable slopes using the wave momentum flux parameter. In: Coastal Engineering, 51, 1085–1104, https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.026, 2004.

Hunt, I. A.: Design of seawalls and breakwaters. In: Journal of the Waterways and Harbors Division, 85, 3, 123–152. 1959.

Kerpen, N.: Wave-induced Responses of Stepped Revetments. Ph.D. Thesis. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, Hannover, Germany, Ludwig-Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen, 2017.

Kreyenschulte, M.; Schürenkamp, D.; Bratz, B.; Schüttrumpf, H.; Goseberg, N.: Wave Run-Up on Mortar-Grouted Riprap Revetments. In: Water, 12, 12, 3396, https://doi.org/10.3390/w12123396, 2020.

Kreyenschulte, M.; Schürenkamp, D.; Kühling, V.; Schüttrumpf, H.; Goseberg, N.; Brühl, M.: Wellenbelastung und Stabilität hydraulisch gebundener Deckwerke. In: Die Küste, 87, https://doi.org/10.18171/1.087105, 2019.

Kreyenschulte, M.; Schüttrumpf, H.: Wellenauflauf auf rauen, porösen und durchlässigen Deckwerken (WARP-2) - Zwischenbericht I (unveröffentlicht). Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen University, 2019.

Kreyenschulte, M.; Schüttrumpf, H.: Wellenauflauf auf rauen, porösen und durchlässigen Deckwerken (WARP-2) - Zwischenbericht II (unveröffentlicht). Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen University, 2020.

Leichtweiß-Institut für Wasserbau: L~davis: Manual for the data analysis and visualization software of the Leichtweiss Institute. Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Abteilung Hydromechanik, Küsteningenieurwesen und Seebau, Braunschweig, Germany, 2007.

Losada, I. J.; Lara, J. L.; del Jesus, M.: Modeling the Interaction of Water Waves with Porous Coastal Structures. In: Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 142, 6, https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000361, 2016.

Losada, M. A.; Giménez-Curto, L. A.: Flow Characteristics on Rough, Permeable Slopes under Wave Action. In: Coastal Engineering, 4, 187–206, https://doi.org/10.1016/0378-3839(80)90019-8, 1981.

Lowe, R. J.; Buckley, M. L.; Altomare, C.; Rijnsdorp, D. P.; Yao, Y.; Suzuki, T.; Bricker, J. D.: Numerical simulations of surf zone wave dynamics using Smoothed Particle Hydrodynamics. In: Ocean Modelling, 144, 387, 101481, https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2019.101481, 2019.

Mansard, E.; Funke, E. R.: The measurement of incident and reflected spectra using a least square method. In: Proceedings of the 17th International Conference on Coastal Engineering (ICCE). Sydney, Australien, 1, 17, 154–172, https://doi.org/10.9753/icce.v17.8, 1980.

Mase, H.: Random Wave Runup Height on Gentle Slope. In: Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 115, 5, 649–661, https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1989)115:5(649), 1989.

Monaghan, J. J.: Smoothed Particle Hydrodynamics. In: Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 30, 1, 543–574, https://doi.org/10.1146/annurev.aa.30.090192.002551, 1992.

Monaghan, J. J.: Smoothed Particle Hydrodynamics. In: Reports on Progress in Physics, 68, 8, 1703–1759, https://doi.org/10.1088/0034-4885/68/8/R01, 2005.

Muttray, M. O.; Oumeraci, H.; Oever, E. ten: Wave reflection and wave run-up at rubble mound breakwaters. In: Smith, J. M. (Hg.): Proceedings of 30th Conference on Coastal Engineering. 4313–4324, https://doi.org/10.1142/9789812709554\_0362, 2006.

Nóbrega, J. D.; Matos, J.; Schulz, H. E.; Canelas, R. B.: Smooth and Stepped Spillway Modeling Using the SPH Method. In: Journal of Hydraulic Engineering, 146, 8, 4020054, https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001776, 2020.

Oumeraci, H.; Staal, T.; Pfoertner, S.; Ludwigs, G.; Kudella, M.: Hydraulic Performance, Wave Loading and Response of Elastocoast Revetments and their Foundation - A Large Scale Model Study. 2010.

Passarella, M.; Goldstein, E. B.; Muro, S. de; Coco, G.: The use of genetic programming to develop a predictor of swash excursion on sandy beaches. In: Natural Hazards and Earth System Sciences, 18, 2, 599–611, https://doi.org/10.5194/nhess-18-599-2018, 2018.

Pilarczyk, K. W.: Other design considerations. In: Pilarczyk, K. W. (Hg.): Dikes and Revetments. Design, maintanance and safety assessment. Delft, 407–428. 1998.

Power, H. E.; Gharabaghi, B.; Bonakdari, H.; Robertson, B.; Atkinson, A. L.; Baldock, T. E.: Prediction of wave runup on beaches using Gene-Expression Programming and empirical relationships. In: Coastal Engineering, 144, 47–61, https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.10.006, 2019.

Schüttrumpf, H.: Wellenüberlaufströmung bei Seedeichen. Experimentelle und theoretische Untersuchungen Ph.D. Thesis. Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig, Germany, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, 2001.

SICK 2020: Laser Measurement Systems of the LMS5xx Product Family. 2020. Online verfügbar unter www.sick.com.

Stockdon, H. F.; Holman, R. A.; Howd, P. A.; Sallenger, A. H.: Empirical parameterization of setup, swash, and runup. In: Coastal Engineering, 53, 7, 573–588, https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.12.005, 2006.

Stokes, K.; Poate, T.; Masselink, G.; King, E.; Saulter, A.; Ely, N.: Forecasting coastal overtopping at engineered and naturally defended coastlines. In: Coastal Engineering, 164, 3–4, 103827, https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103827, 2021.

Subramaniam, S. P.; Scheres, B.; Schilling, M.; Liebisch, S.; Kerpen, N. B.; Schlurmann, T.; Altomare, C.; Schüttrumpf, H.: Influence of Convex and Concave Curvatures in a Coastal Dike Line on Wave Run-up. In: Water, 11, 7, 1333, https://doi.org/10.3390/w11071333, 2019.

van de Walle, B.: Wave run-up on rubble mound breakwaters. Ph.D. Thesis. Universität Gent, Gent, Vakgroep Civiele Techniek (TW15), Afdeling Weg- en Waterbouwkunde, 2001.

van der Meer, J. W.: Rock slopes and gravel beaches under wave attack. Ph.D. Thesis. Delft University of Technology, Delft, 1988.

van der Meer, J. W.; Stam, C.-J. M.: Wave Runup on Smooth and Rock Slopes of Coastal Structures. In: Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 118, 5, 534–550, https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1992)118:5(534), 1992.

van Steeg, P.; Klein Breteler, M.; Provoost, Y.: Large-scale physical model tests to determine influence factor of roughness for wave run-up of channel shaped block revetments. In: university of Ottawa (Hg.): Proceedings of the 6th International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science (Coastlab16). 2016.

Verbrugghe, T.; Stratigaki, V.; Altomare, C.; Domínguez, J. M.; Troch, P.; Kortenhaus, A.: Implementation of Open Boundaries within a Two-Way Coupled SPH Model to Simulate Nonlinear Wave-Structure Interactions. In: energies, 12, https://doi.org/10.3390/en12040697, 2019.

# 10 Anhang

### A-1: Genauigkeit der Diskretisierung der GWK-Deckschicht im numerischen Modell in Abhängigkeit des Parikelabstands *dp*



Abbildung A-1: RMSE der Differenz der im GWK eingemessenen Punkte der Deckschichtoberfläche zu den Punkten der Deckschichtoberfläche im numerischen Modell in Abhängigkeit des Partikelabstands *dp*.

### A-2: Unterschiedliche Breiten des Wellenkanals im numerischen Modell



Abbildung A-2: Relative Differenz der Ergebnisse der numerischen Simulationen mit der GWK-Deckschichtgeometrie mit unterschiedlichen Modellbreiten *b* und Partikelabständen *dp*.

### A-3: Verwendete statistische Maße

Mittlere Fehlerquadratsumme (root mean squared error, RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (y_{p,i} - y_{m,i})^2}$$
(11)

Streuungsfaktor (scatter index, SI)

$$SI = \frac{RMSE}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} y_{m,i}}$$
(12)

Dabei ist N die Anzahl der Werte,  $y_{p,i}$  der jeweilige vorhergesagte Wert und  $y_{m,i}$  der gemessene Wert.

### A-4: Untersuchte Deckschichtgeometrien und deren Bezeichnung

Die Geometrien sind in Abbildung 5, die kumulative Dichteverteilung der Differenzen der Punkte der Deckschichtoberfläche zur Trendlinie der Deckschichtoberfläche in Abbildung 7 dargestellt. Die Geometrien sind wie folgt benannt, wobei die Zahlenwerte die jeweilige Größe in Zentimetern angeben:

| r     | Radius der Kugeln  |
|-------|--|
| lx    | Seitenlänge der Rechtecke  |
| dx    | Abstand der Mittelpunkte der Elemente entlang der Deckschicht                      |
| dlz   | Abstand der Mittelpunkte zusätzlicher kreisrunder Rauheitselemente von den restli- |
|       | chen kreisrunden Rauheitselementen orthogonal zur Deckschicht                      |
| rot45 | Drehung der Elemente um 45°  |

| Kurzform   | Bezeichnung           |
|------------|-----------------------|
| s1         | Spheres_r5_dx15       |
| s2         | Spheres_r5_dx15_dlz5  |
| <b>c</b> 1 | Cubes_lx18_dx35       |
| c2         | Cubes_lx11_dx35       |
| cr1        | Cubes_lx11_dx20_rot45 |
| cr2        | Cubes_lx20_dx35_rot45 |

Die Bezeichnungen und die im Text verwendeten Kurzformen sind:

Die Punkte der Polygone 1–3 wurden durch Vorgabe maximaler Schrittweiten MAX\_DZ und MAX\_DX erzeugt, deren jeweilige tatsächliche Schrittweite zufällig festgelegt wurde. Die Berechnung der Lage der Punkte wurde wie folgt durchgeführt, RAND ist dabei eine Zufallszahl im Bereich [0;1]:

While x<X\_END

z=sin(2\*pi/L\*x)\*MAX\_DZ/2+(RAND-0.5)\*2\*MAX\_DZ; dx=max((0.333+0.666\*RAND)\*MAX\_DX,MAX\_DZ/3); x=x+dx;

end

Die Parameter wurden wie folgt gewählt:

|    | MAX_DX | MAX_DZ          |
|----|--------|-----------------|
| p1 | 0,15 m | 0 <b>,2</b> 0 m |
| p2 | 0,30 m | 0 <b>,2</b> 0 m |
| p3 | 0,15 m | 0,10 m          |

Polygon 4 stellt eine Sinusfunktion mit einer Amplitude von 0,30 m dar. Die Deckschicht "GWK\_2XYZ" wurde erzeugt indem die Deckschicht aus dem GWK in alle Raumrichtungen um den Faktor zwei verzerrt wurde. Die geometrischen Maße der Deckschichten sind in den folgenden Tabellen dargestellt.

|          | Standardabwei- |          |         | Quantile     | [m]          |
|----------|----------------|----------|---------|--------------|--------------|
| Kurzform | chung [m]      | Kurtosis | Schiefe | <b>Q</b> 0,8 | <b>Q</b> 0,6 |
| s1       | 0,0205         | 1,749    | -0,536  | 0,0179       | 0,0116       |
| s2       | 0,0343         | 1,804    | -0,067  | 0,0387       | 0,0038       |
| cr1      | 0,0271         | 1,672    | 0,113   | 0,0293       | 0,0077       |
| cr2      | 0,0468         | 1,682    | 0,149   | 0,0490       | 0,0140       |
| c1       | 0,0509         | 1,142    | -0,328  | 0,0456       | 0,0423       |
| c2       | 0,0599         | 1,240    | 0,467   | 0,0769       | -0,0423      |
| p1       | 0,1079         | 2,344    | -0,303  | 0,0950       | 0,0413       |
| p2       | 0,1199         | 2,446    | 0,043   | 0,1192       | 0,0185       |
| p3       | 0,0564         | 2,589    | 0,061   | 0,0504       | 0,0139       |
| p4       | 0,1061         | 1,501    | -0,053  | 0,1187       | 0,0486       |
| GWK_2XYZ | 0,0548         | 2,360    | -0,035  | 0,0503       | 0,0178       |

|          | Quantile           | [m]          | Kernhöhen [m]         |                       |  |
|----------|--------------------|--------------|-----------------------|-----------------------|--|
| Kurzform | $\mathbf{Q}_{0,4}$ | <b>Q</b> 0,2 | $Q_{0,8}$ - $Q_{0,2}$ | $Q_{0,6}$ - $Q_{0,4}$ |  |
| s1       | 0,0018             | -0,0267      | 0,0446                | 0,0098                |  |
| s2       | -0,0087            | -0,0375      | 0,0762                | 0,0125                |  |
| cr1      | -0,0112            | -0,0304      | 0,0597                | 0,0189                |  |
| cr2      | -0,0205            | -0,0530      | 0,1020                | 0,0345                |  |
| c1       | -0,0545            | -0,0609      | 0,1065                | 0,0969                |  |
| c2       | -0,0460            | -0,0492      | 0,1261                | 0,0037                |  |
| p1       | -0,0156            | -0,1041      | 0,1991                | 0,0569                |  |
| p2       | -0,0381            | -0,0933      | 0,2125                | 0,0566                |  |
| p3       | -0,0157            | -0,0486      | 0,0990                | 0,0297                |  |
| p4       | -0,0430            | -0,1232      | 0,2419                | 0,0915                |  |
| GWK_2XYZ | -0,0160            | -0,0537      | 0,1040                | 0,0339                |  |