

Numerische Simulationen zum Wellenaufbau auf rauen Deckwerken

Moritz Kreyenschulte, Wenjia Xu und Holger Schüttrumpf

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen University

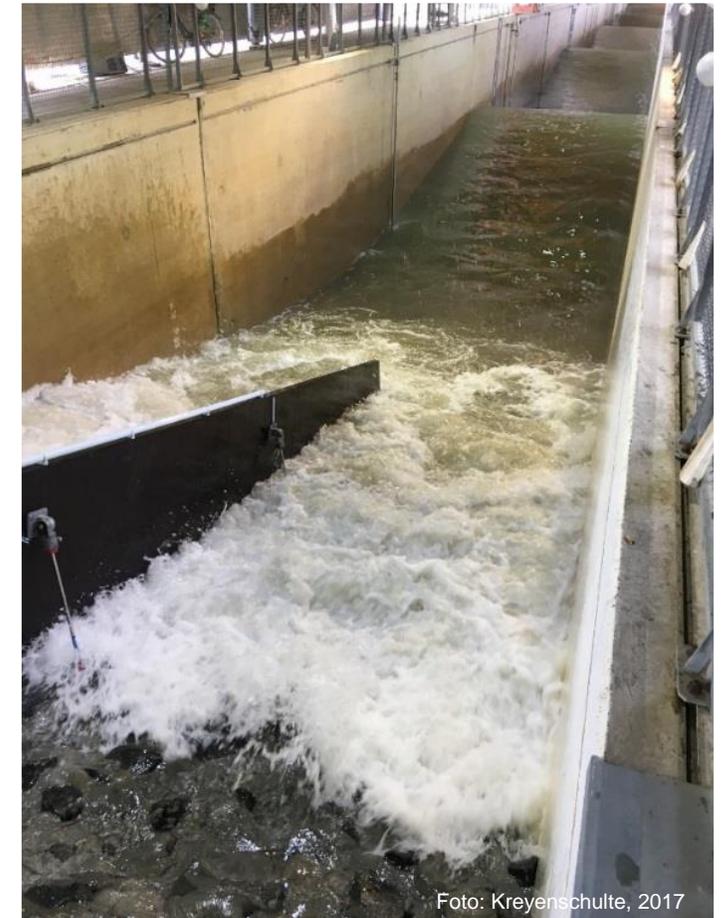
Wellenaufbau - Einleitung

Wellenaufbauhöhe wichtiger Bemessungsparameter

- Kronenhöhe
- Anzahl der Überlaufereignisse
- Bereich der Einwirkungen aus Wellenbelastung

Einflussparameter:

- Wellen (-spektrum)
- Vorland (-geometrie)
- Böschung
(Geometrie und
weitere Eigenschaften)



Wellenaufbau - Einleitung

Wellenaufbauhöhe wichtiger Bemessungsparameter

- Kronenhöhe
- Anzahl der Überlaufereignisse
- Bereich der Einwirkungen aus Wellenbelastung

Einflussparameter:

- Wellen (-spektrum)
- Vorland (-geometrie)
- Böschung
(Geometrie und
weitere Eigenschaften)

Reduzierung der
Wellenaufbauhöhe durch
raue, poröse, durchlässige
Deckwerke

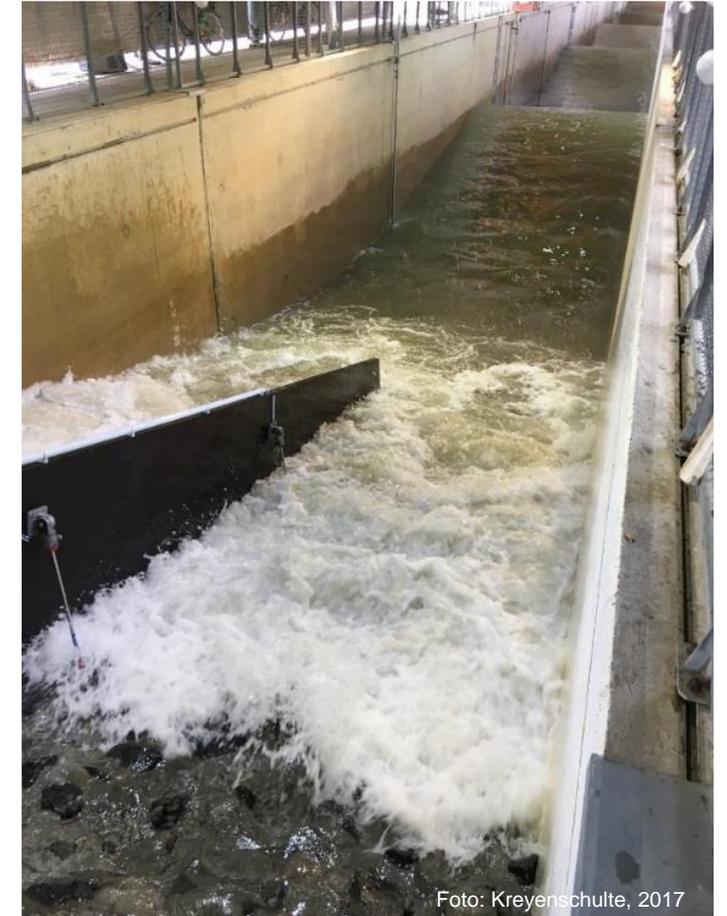
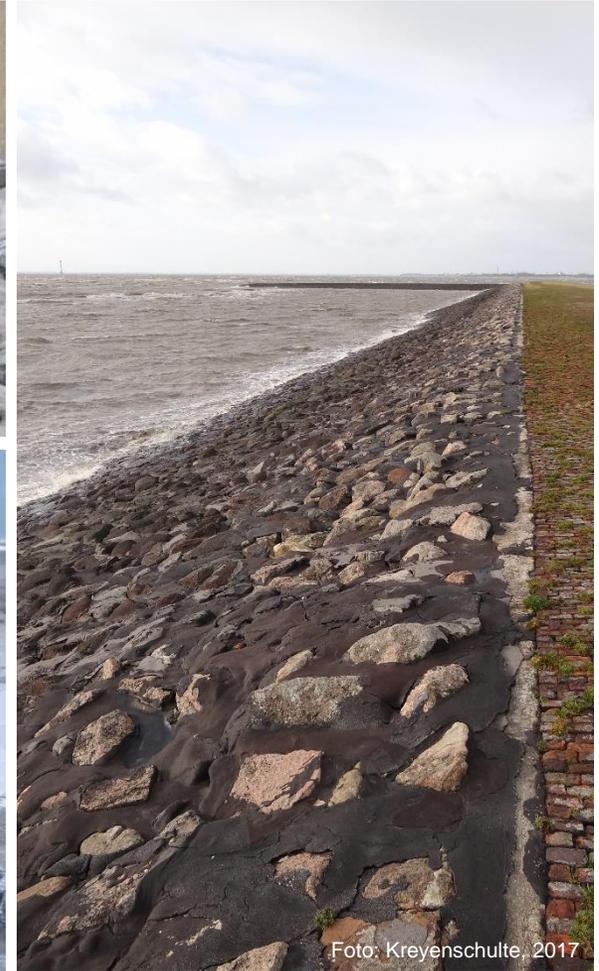


Foto: Kreyenschulte, 2017

Wellenauflauf - Einleitung



Wellenaufbau - Einleitung

1. jeweils für *einen* speziellen Deckwerkstyp gültiges Modell

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = \frac{1,022 \cdot \xi_p}{1 + 0,247 \cdot \xi_p}$$

Schüttsteine (Ahrens und Heimbaugh, 1988)

Wellenaufbau - Einleitung

1. jeweils für *einen* speziellen Deckwerkstyp gültiges Modell
2. ein einzelner, nur für *einen* speziellen Deckwerkstyp gültiger Reduktionsfaktor in Kombination mit einem empirischen Modell

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = \frac{1,022 \cdot \xi_p}{1 + 0,247 \cdot \xi_p}$$

Schüttsteine (Ahrens und Heimbaugh, 1988)

$$\gamma_f = 0,55$$

(für Schüttsteine, z. B. EurOtop, 2018)

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = \gamma_f \cdot f(\xi_{m-1,0}, \dots)$$

Wellenaufbau - Einleitung

1. jeweils für *einen* speziellen Deckwerkstyp gültiges Modell
2. ein einzelner, nur für *einen* speziellen Deckwerkstyp gültiger Reduktionsfaktor in Kombination mit einem empirischen Modell
3. ein Reduktionsfaktor, der Gültigkeit innerhalb der Bandbreite der möglichen Variationen der Rauheit *für einen speziellen Deckwerkstyp* besitzt, in Kombination mit einem empirischen Modell

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = \frac{1,022 \cdot \xi_p}{1 + 0,247 \cdot \xi_p}$$

Schüttsteine (Ahrens und Heimbaugh, 1988)

$$\gamma_f = 0,55$$

(für Schüttsteine, z. B. EurOtop, 2018)

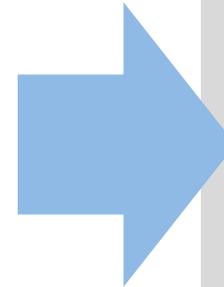
$$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = \gamma_f \cdot f(\xi_{m-1,0}, \dots)$$

$$\gamma_f = f(\text{Maß für Rauheit, Wellenparameter ...})$$

(z. B. Capel 2015, Kerpen 2017, van Steeg et al. 2016)

Methodik und Zielsetzung

1. Erstellung eines numerischen Modells zur Simulation des Wellenaufbaus auf rauen Deckwerken
2. Simulationen des Wellenaufbaus auf verschiedenen rauen Deckschichten zur Schaffung einer Datenbasis
3. Beschreibung der Rauheit



**Ein Modell zur
Beschreibung des
Reduktionsbeiwerts in
Abhängigkeit der
Rauheit für unterschiedliche
Deckwerkstypen**

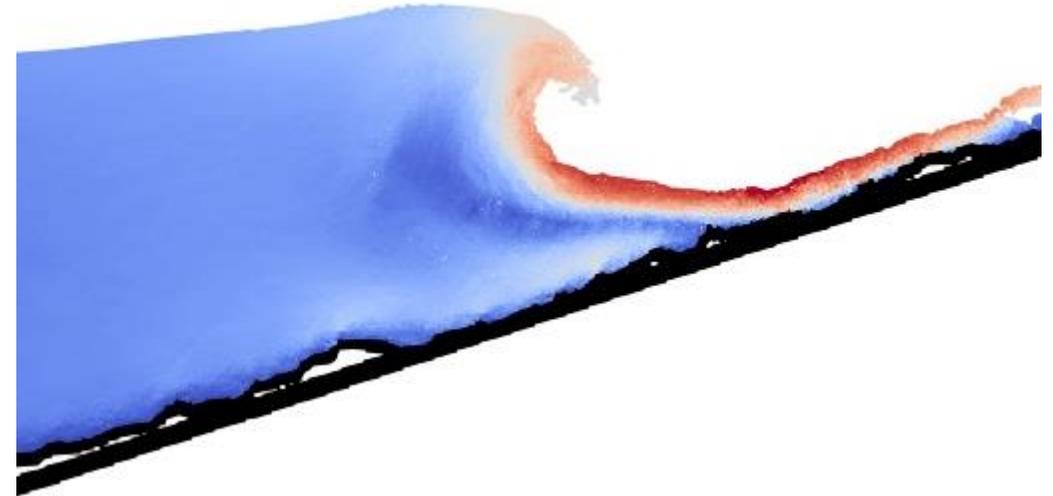
Erstellung numerisches Modell

Smoothed Particle Hydrodynamics

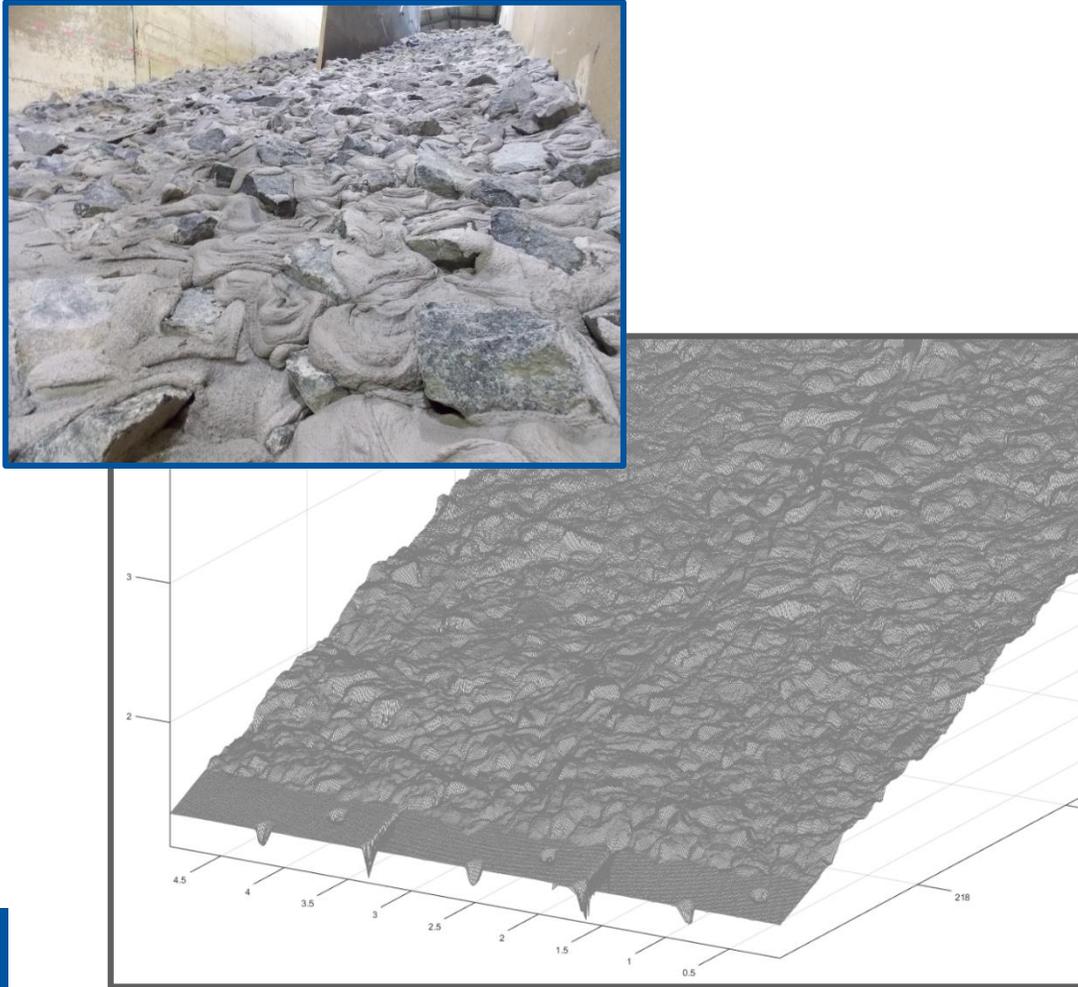
DualSPHysics (*Crespo et al. 2015*)

Vorteile:

- Schnelle Erstellung neuer Geometrien
- Hohe Auflösung der rauen Geometrien
- Gute Abbildung der freien Wasseroberfläche
- Bewährte Methodik für Wellen-Bauwerks-Interaktion (*Lowe et al. 2019; Altomare et al. 2015; Subramaniam et al. 2019; Nóbrega et al. 2020*)



Erstellung numerisches Modell

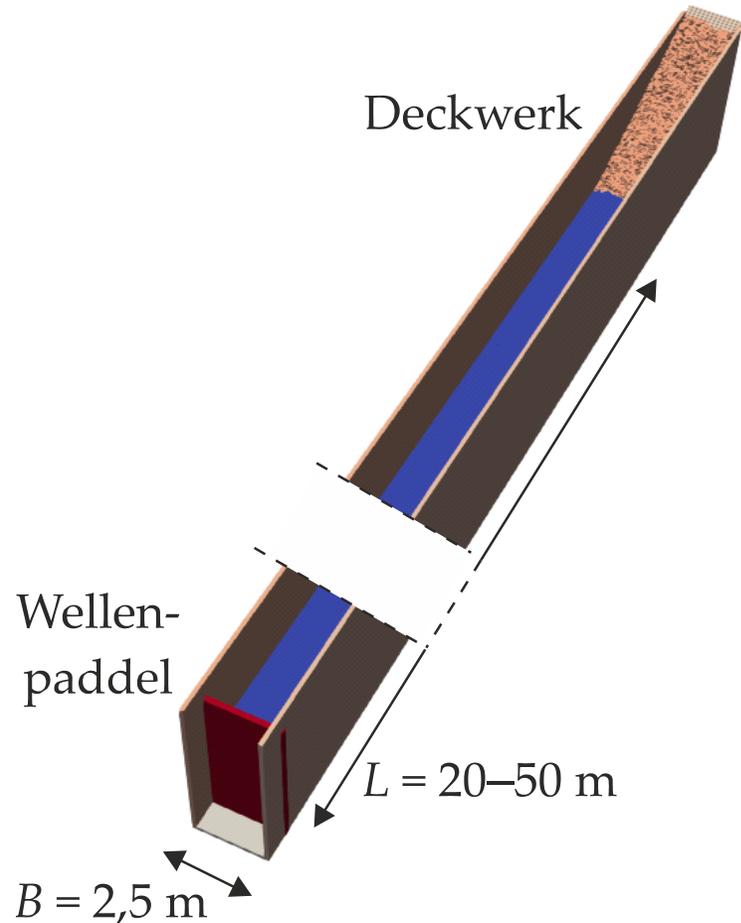


3D-Scans rauer Deckwerke zur Diskretisierung der Deckschichtoberfläche

Daten zur Validierung:

- Naturmaßstäbliche Versuche mit rauen Deckwerken
 - 2D-LIDAR- und Videodaten vorhanden
 - Hohe räumliche und zeitliche Auflösung jeder einzelnen Welle möglich
- (Literaturwerte)

Validierung numerisches Modell



(verändert nach Kreyenschulte et al., 2021)

Zu Beginn:

- Konvergenzstudien zum initialen Partikelabstand dp

- Abbildung der Geometrie der Deckschicht

→ $dp \leq 3 \text{ cm}$

- Unabhängigkeit der Ergebnisse vom Partikelabstand

→ $dp \leq 1 \text{ cm}$

- Parameterstudien

- Modellbreite

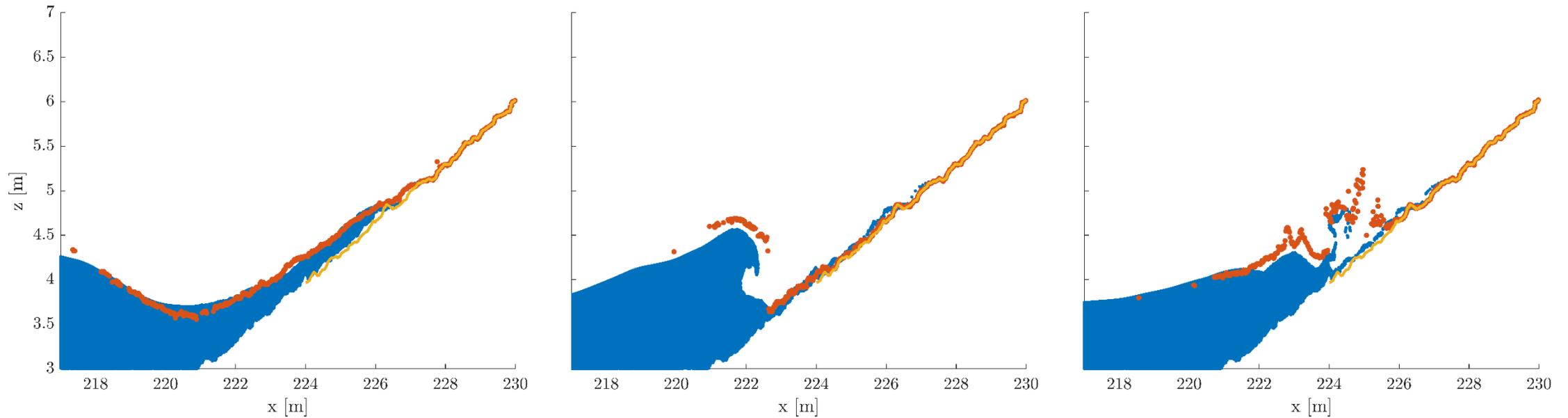
→ 2D-Modell

Im Anschluss:

- Validierung des Modells anhand der Daten der physischen Versuche

Validierung numerisches Modell

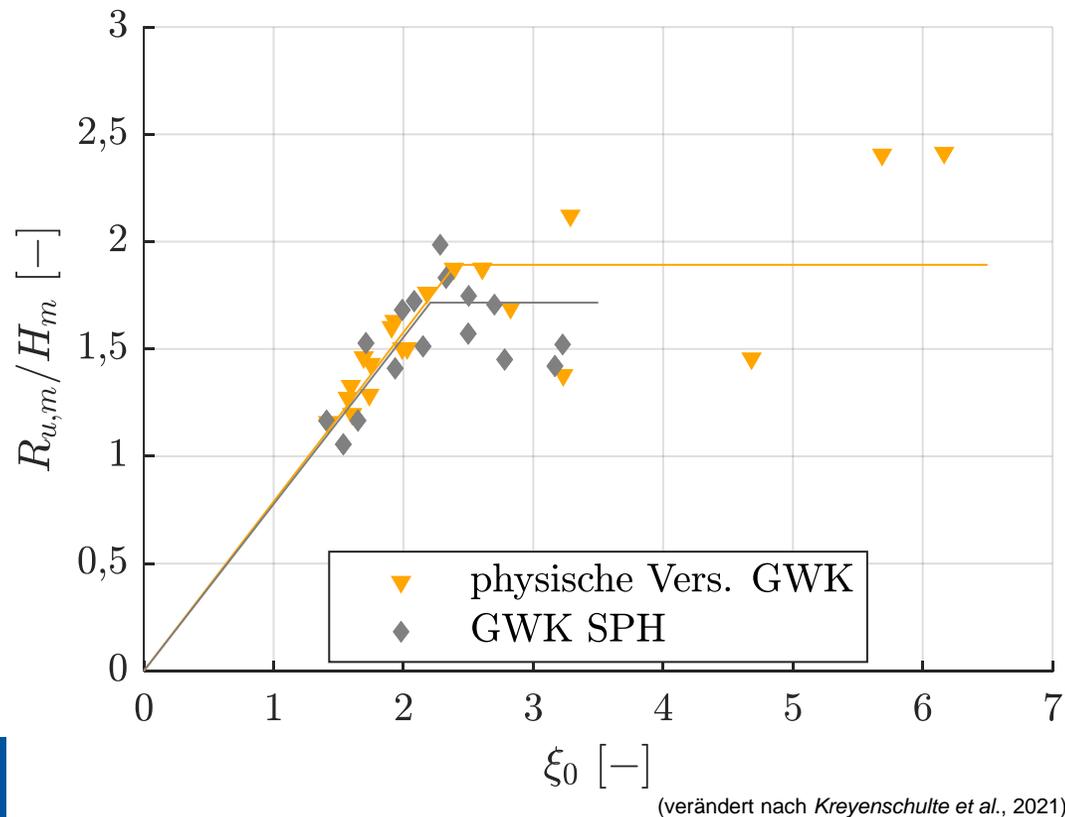
Qualitativer Vergleich 2D-LIDAR-Daten – numerisches Modell



- Dynamik des Wellenbrechens wird gut wiedergegeben
- Wellenaufbauhöhe wird gut wiedergegeben
- Vergleich einzelner Wellen aufgrund von auch bei regelmäßigen Wellen unterschiedlichem Verhalten von Welle zu Welle nur bedingt möglich

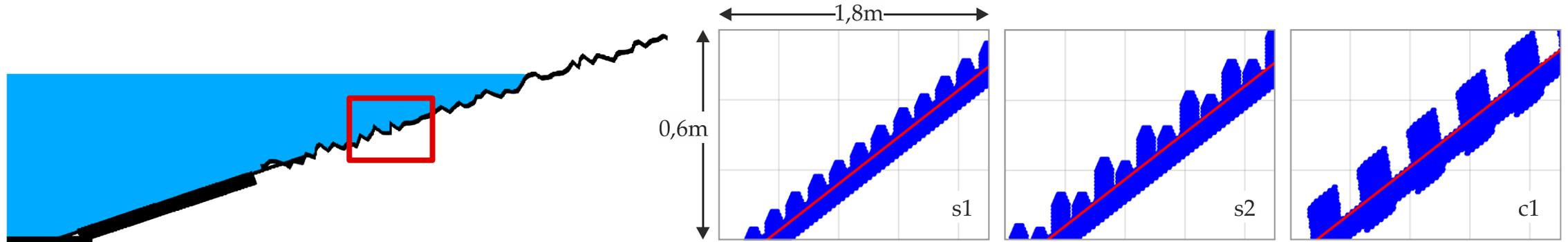
Validierung numerisches Modell

Vergleich Ergebnisse numerisches Modell
und physisches Modell

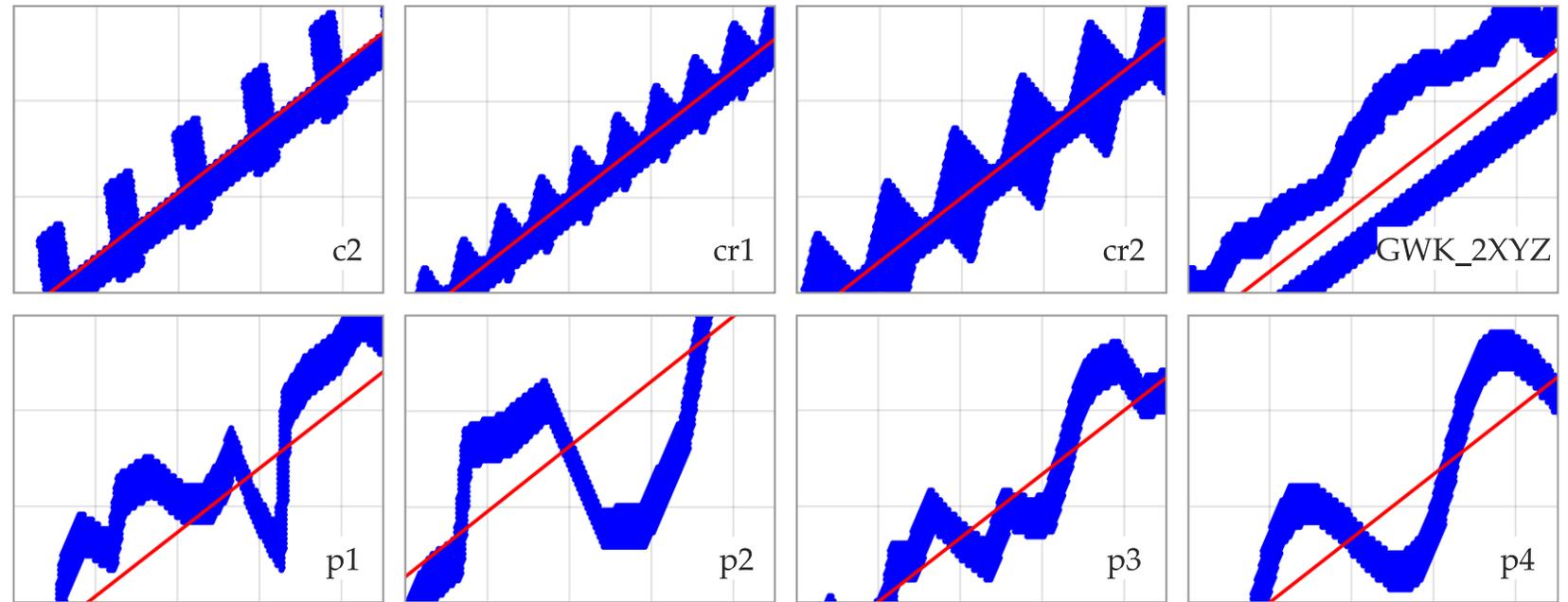


- Ergebnisse für brechende Wellen validiert
- Größere Datengrundlage für nicht brechende Wellen notwendig
 - Höhere Brecherkennzahlen bedingen längere (und tiefere) Wellenkanäle
 - Hoher Rechenaufwand bei geringem Partikelabstand

Raue DS im numerisches Modell



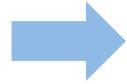
- Breites Spektrum verschiedener rauer Deckschichten
- Methode zur Beschreibung aller Oberflächen erforderlich



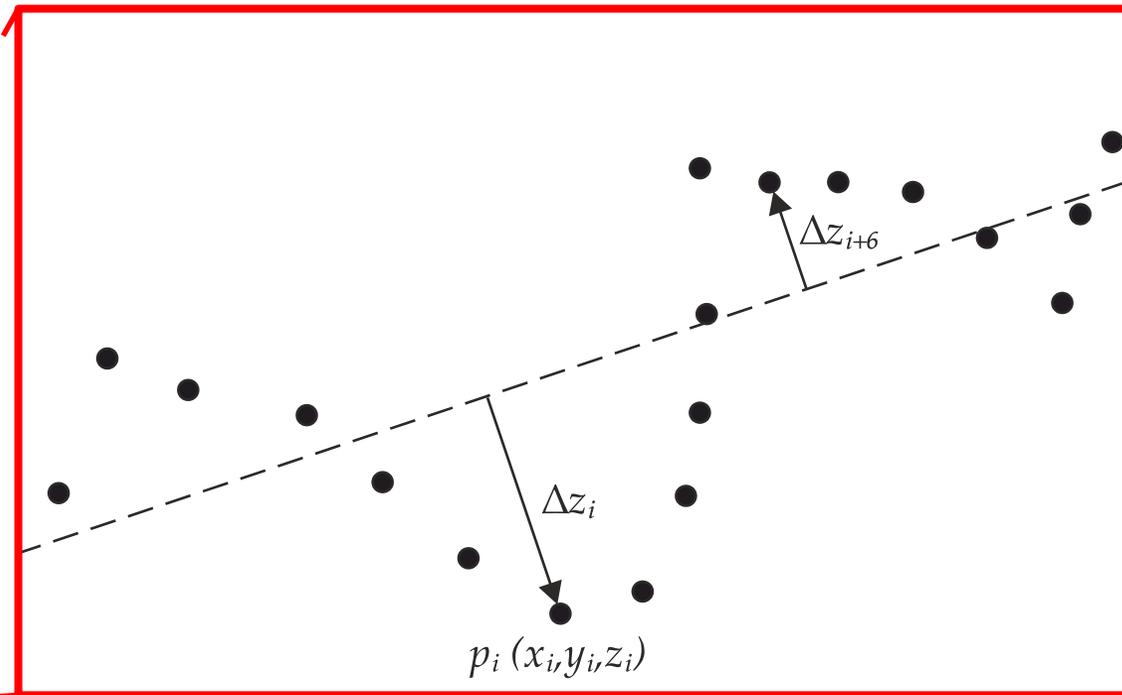
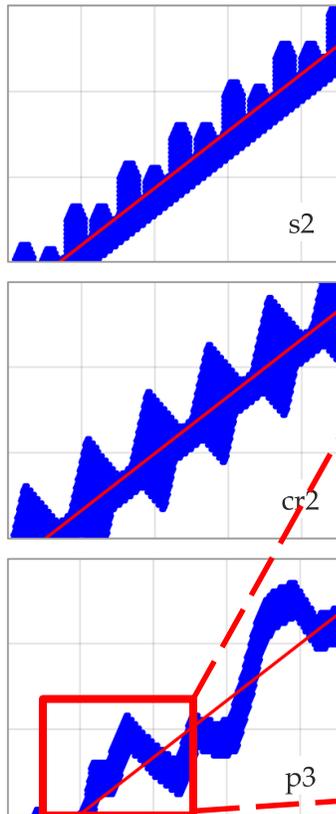
(verändert nach Kreyenschulte et al., 2021)

Raue DS im numerisches Modell

Geometrie

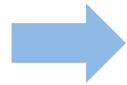


Differenz für jeden Punkt der
Deckschichtoberfläche

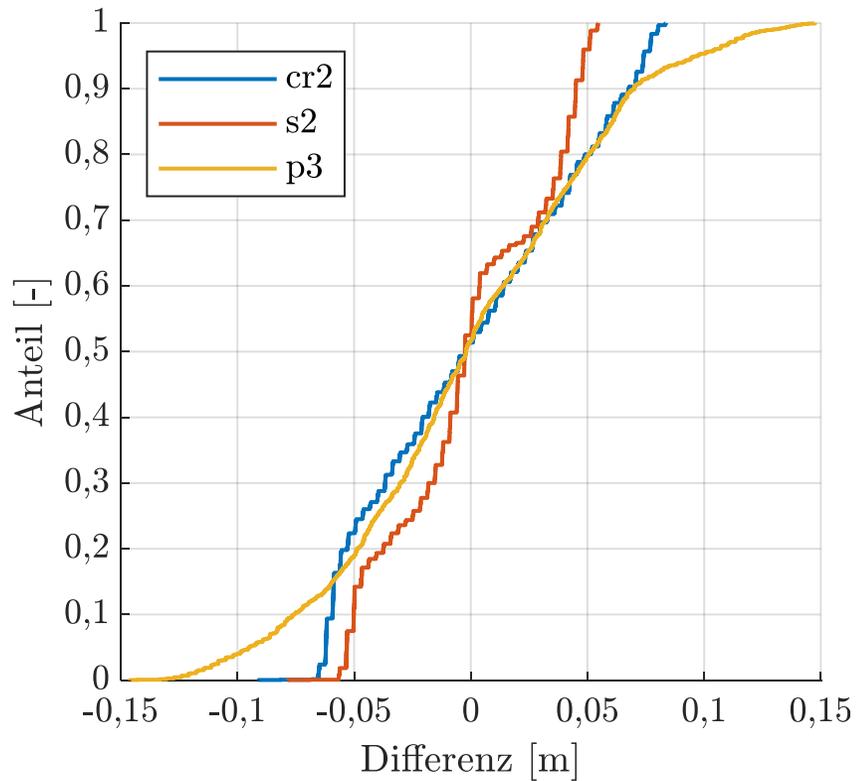
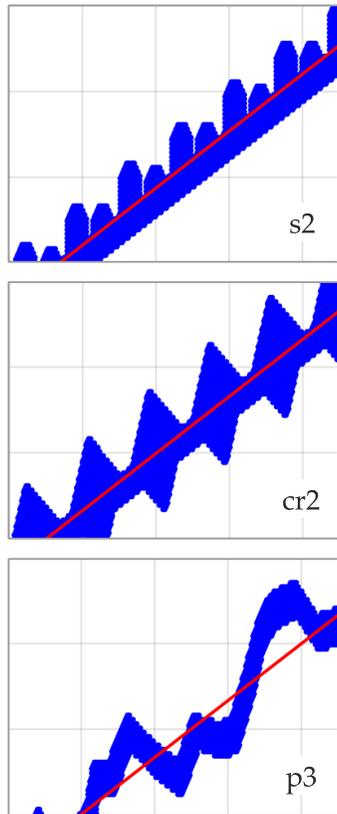


Raue DS im numerisches Modell

Geometrie



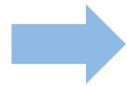
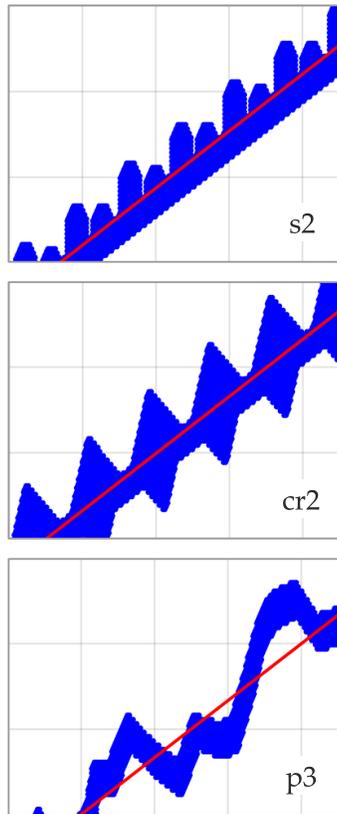
Verteilung



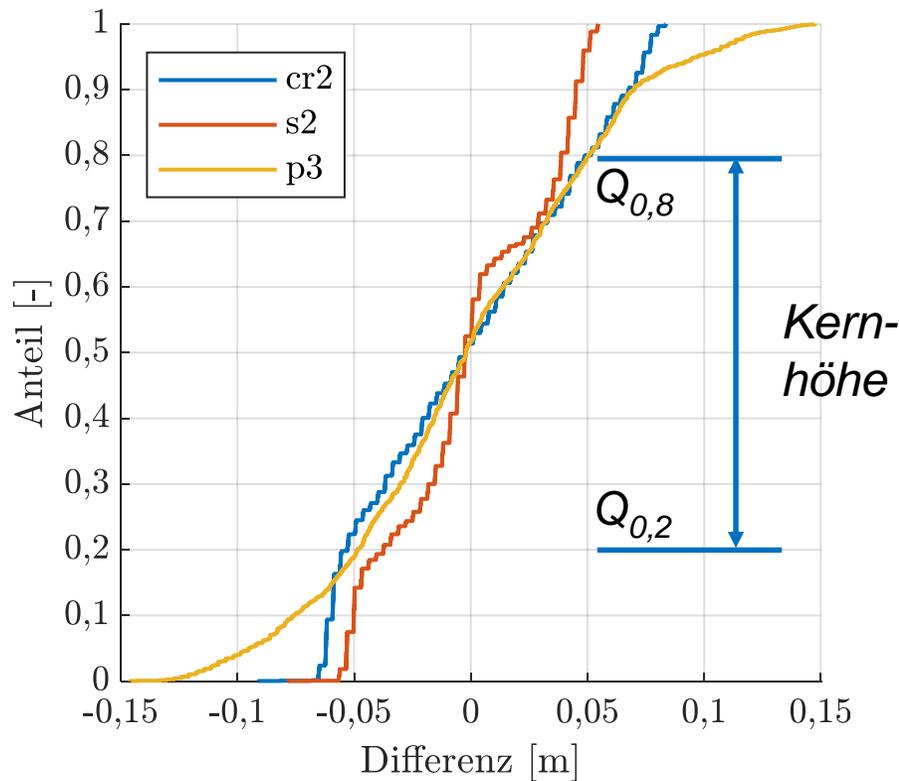
(verändert nach Kreyenschulte et al., 2021)

Raue DS im numerisches Modell

Geometrie



Verteilung



Kenngrößen der Verteilung

(siehe auch DIN EN ISO 25178-2)

Standardabweichung

Wölbung

Schiefe

char. Quantile

Kernhöhen

...

Eindeutige Beschreibung jeder
rauen Deckschicht möglich

(verändert nach Kreyenschulte et al., 2021)

Ergebnisse

Test verschiedener Zusammenhänge der Wellenparameter und Rauheitsparameter mit dem Reduktionskoeffizienten

- Ein Längenmaß der Rauheit
- Ein Maß zur Form der Verteilung
- Wellenhöhe

Ergebnisse

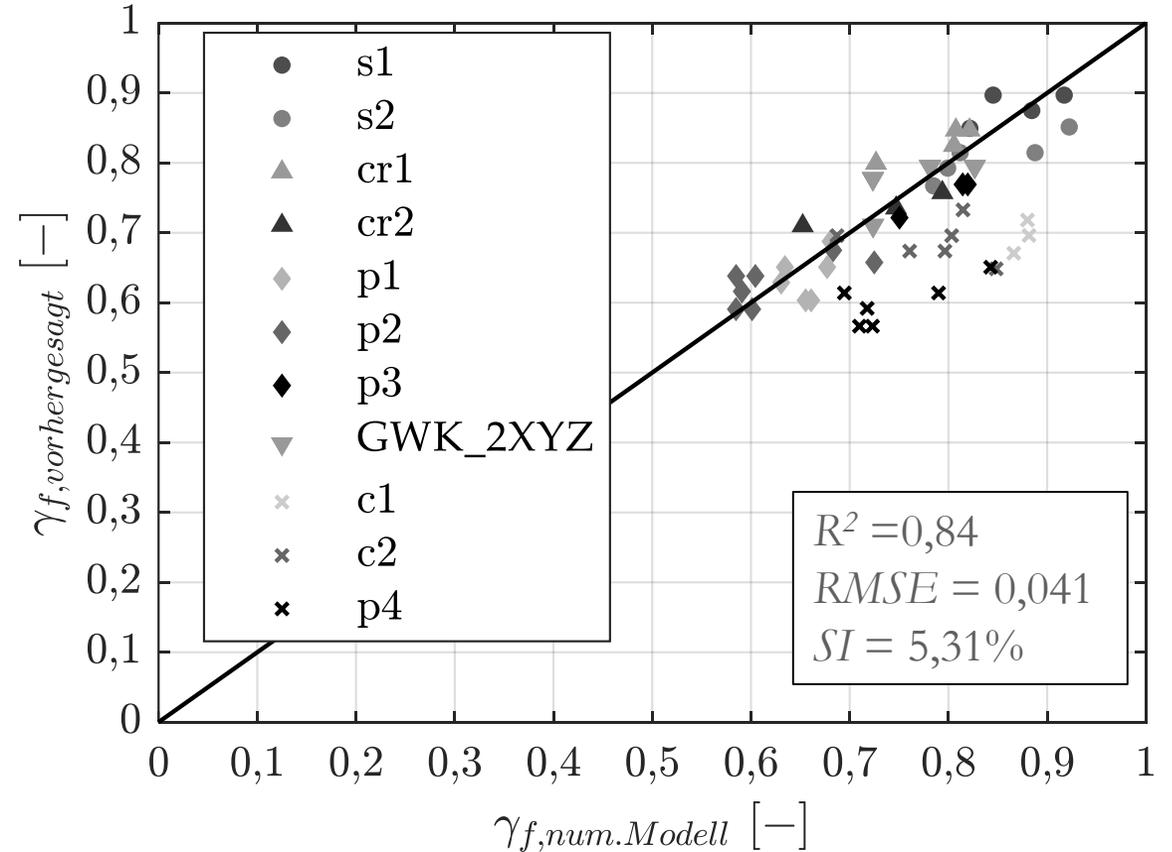
Test verschiedener Zusammenhänge der Wellenparameter und Rauheitsparameter mit dem Reduktionskoeffizienten:

- Ein Längenmaß der Rauheit
- Ein Maß zur Form der Verteilung
- Wellenhöhe

$$\gamma_f = -0,165 \cdot \ln \frac{STD}{H} + 0,047 \cdot w + 0,214$$

$$\frac{R_{u,m}}{H_m} = \gamma_f \cdot 1,16 \cdot \xi_0$$

($0,02 < STD/H < 0,2$; für brechende Wellen!)



(verändert nach Kreyenschulte et al., 2021)

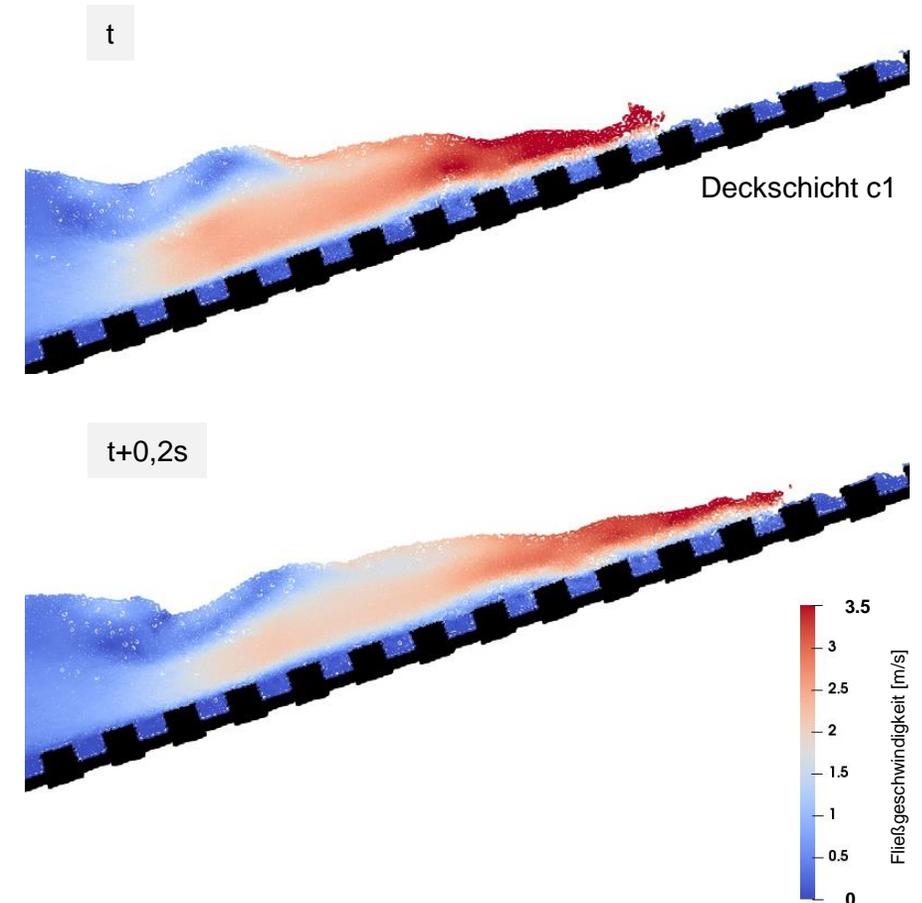
Erstellung numerisches Modell

Deckschicht mit Blöcken (c1,c2):

- Zwischenräume der Blöcke nach einigen Wellenaufläufen mit Wasser gefüllt
- Reduzierte Rauheitswirkung

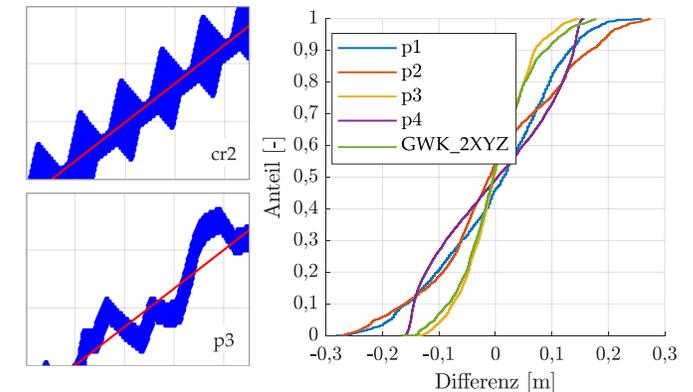
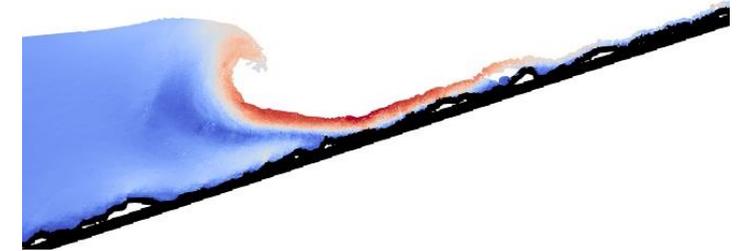
Sinusförmige Deckschicht (p4):

- Im Vergleich zu anderen untersuchten Deckschichten relative hohe Rauheit (*STD*)
 - Stetige Änderung der Deckschichtoberfläche
 - Reduzierte Rauheitswirkung
-
- Wölbung als Maß für Verteilung der Differenzen hier nicht sinnvoll



Zusammenfassung

- Num. SPH-Modell für brechende Wellen validiert
 - Gute Übereinstimmung mit Ergebnissen physischer Modellversuche
 - Hoher Rechenaufwand für lange Wellen
- Parametervariation: Simulation mit verschiedenen rauen Deckschichten
- Methodik zur Beschreibung der Rauheit
 - Vergleichbar, für alle Deckwerkstypen nutzbar
- Beschreibung des Reduktionskoeffizienten verschiedener rauer Deckschichten anhand einer Gleichung möglich



(verändert nach Kreyenschulte et al., 2021)

Ausblick

Weitere Simulationen zur Vergrößerung der Datenbasis:

- Nicht brechende Wellen
- Weitere Deckschichtgeometrien
- 3D-Berechnung

Kritische Ressource: Rechenzeit/Rechenleistung

Mögliche Abhilfe:

- Methoden zur Nutzung unterschiedlicher Partikelabstände im Modellgebiet (*Hu et al. 2020*)
- Alternative Methoden zur Wellengenerierung und Modellkopplung (*Verbrugge et al. 2019; Altomare et al. 2018*).

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Dank an die Förderer:



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Kuratorium für
Forschung im Küsteningenieurwesen

KFKI

PTJ
Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich

- AHRENS, J. P. und 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.
- ALTOMARE, C.; CRESPO, A. J. C.; DOMÍNGUEZ, J. M.; GÓMEZ-GESTEIRA, M.; SUZUKI, T. und VERWAEST, T.: Applicability of Smoothed Particle Hydrodynamics for estimation of sea wave impact on coastal structures. In: Coastal Engineering, 96, 1-12. 2015.
- CAPEL, A.: Wave run-up and overtopping reduction by block revetments with enhanced roughness. In: Coastal Engineering, 104, 76-92. 2015.
- CRESPO, A.; DOMÍNGUEZ, J. M.; ROGERS, B. D.; GÓMEZ-GESTEIRA, M.; LONGSHAW, S.; CANELAS, R.; VACONDIO, R.; BARREIRO, A. und GARCÍA-FEAL, O.: DualSPHysics. Open-source parallel CFD solver based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) In: Computer Physics Communications, Jg. 187, 204-216. doi: 10.1016/j.cpc.2014.10.004, 2015.
- 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. and Zanuttigh, B., www.overtopping-manual.com, 2018.
- 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.
- HU, L.; HONGFU, Q.; FUZHEN, C. und CHAO, S.: A particle refinement scheme with hybrid particle interacting technique for multi-resolution SPH. In: Engineering Analysis with Boundary Elements, Jg. 118, 108-123. doi: 10.1016/j.enganabound.2020.06.001, 2020.
- 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.; XU, W. und SCHÜTTRUMPF, H.: Numerische Simulationen zur Wellenaufbauhöhe auf rauen Deckwerken. In: Die Küste (eingereicht), 2021.
- LOWE, R. J.; BUCKLEY, M. L.; ALTOMARE, C.; RIJNSDORP, D. P.; YAO, Y.; SUZUKI, T. und BRICKER, J. D.: Numerical simulations of surf zone wave dynamics using Smoothed Particle Hydrodynamics. In: Ocean Modelling, Jg. 144, 387, 101481. doi: 10.1016/j.ocemod.2019.101481, 2019.

Literatur

- NÓBREGA, J. D.; MATOS, J.; SCHULZ, H. E. und CANELAS, R. B.: Smooth and Stepped Spillway Modeling Using the SPH Method. In: Journal of Hydraulic Engineering, Jg. 146, 8, 4020054. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001776, 2020.
- SUBRAMANIAM, S. P.; SCHERES, B.; SCHILLING, M.; LIEBISCH, S.; KERPEN, N. B.; SCHLURMANN, T.; ALTOMARE, C. und SCHÜTTRUMPF, H.: Influence of Convex and Concave Curvatures in a Coastal Dike Line on Wave Run-up. In: Water, Jg. 11, 7, 1333. doi: 10.3390/w11071333, 2019.
- VAN STEEG, P.; KLEIN BRETELER, M. und 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 (Hrsg.): 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. und KORTENHAUS, A.: Implementation of Open Boundaries within a Two-Way Coupled SPH Model to Simulate Nonlinear Wave-Structure Interactions. In: energies, 12, doi: 10.3390/en12040697, 2019.