

waveSTEPS

Wellenauf- und Überlauf an getreppten Deckwerken

Förderkennzeichen 03KIS118/119



Ludwig-Franzius-Institut

für Wasserbau, Ästuar- und
Küsteningenieurwesen

Dr.-Ing. Nils B. Kerpen

Talia Schoonees M.Eng.

Prof. Dr.-Ing. Torsten Schlurmann

Leibniz Universität Hannover

www.lufi.uni-hannover.de

kerpen@lufi.uni-hannover.de

FH AACHEN

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



Prof. Dr.-Ing. Daniel Bung

Dr.-Ing. Daniel Valero

FH Aachen, Lehr- und Forschungsgebiet Wasserbau

<https://www.fh-aachen.de/menschen/bung>



Gliederung

- Motivation
 - Hintergrund und Relevanz
 - Förderpolitische Ziele
 - Stand der Wissenschaft
 - Wissenschaftliche und technische Ziele
- Arbeitspakete, Methodik und Ergebnisse
 - Wellenauflauf
 - Wellenüberlauf
- Fazit, Zusammenfassung, Ausblick



Hintergrund & Relevanz

- Dem Küstenschutz dienende, begehbare Deckwerke ermöglichen den sicheren Zugang zum Wasser.



Hintergrund & Relevanz

- Dem Küstenschutz dienende, begehbare Deckwerke ermöglichen den sicheren Zugang zum Wasser.
- Bsp. für Vereinbarkeit von Küstenschutz und Erholungsflächen: Borkum, Norderney, Baltrum.

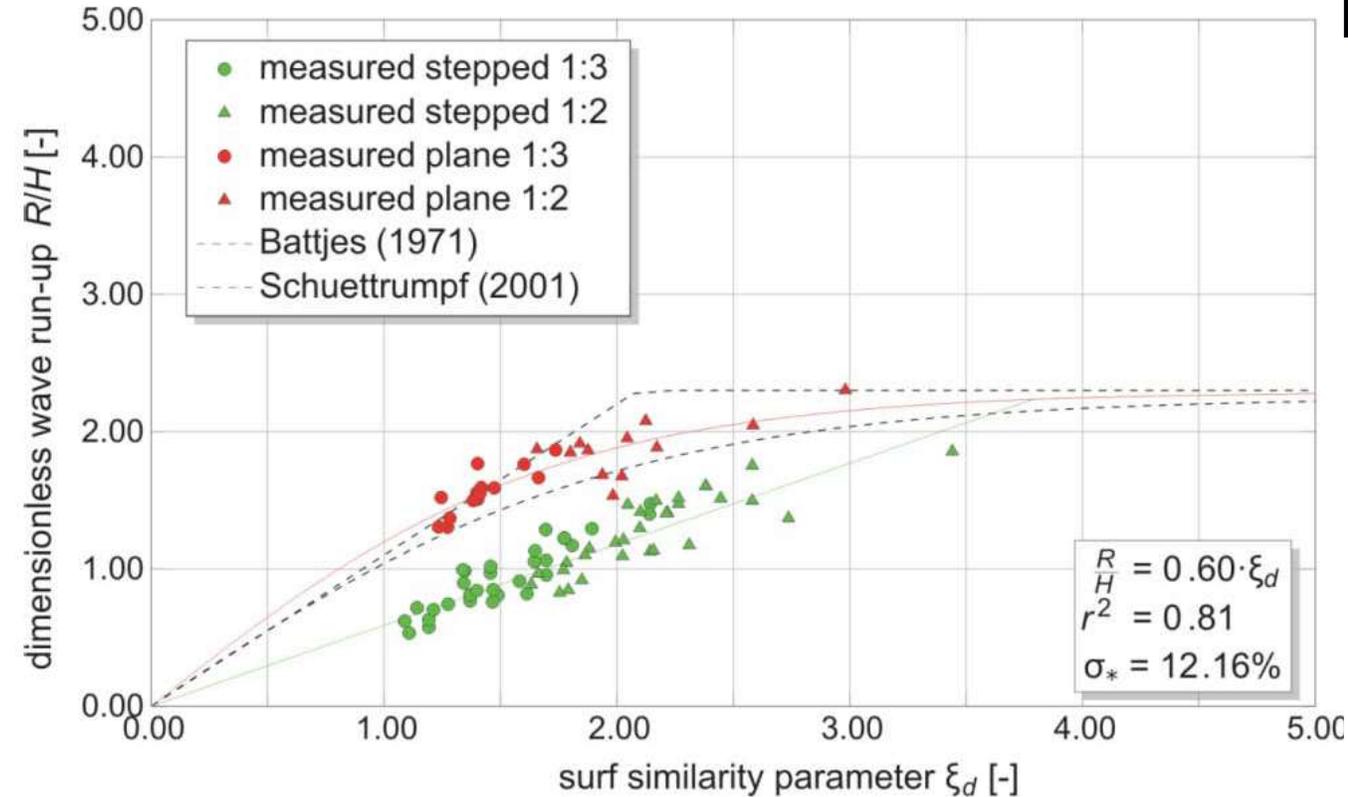


Hintergrund & Relevanz

- Dem Küstenschutz dienende, begehbare Deckwerke ermöglichen den sicheren Zugang zum Wasser.
 - Bsp. für Vereinbarkeit von Küstenschutz und Erholungsflächen: Borkum, Norderney, Baltrum.
 - Bsp. Hafensperrmauer in Hamburg von *Zaha Hadid architects*
- Reduzierung der Wellenaufhöhe während einer Sturmflut bei sicherem Aufenthalt auf dem Deckwerk außerhalb der Sturmflutsaison.

Ziele

- Systematische **Untersuchung des Systemverständnisses** des Wellenauf- und -überlaufs an getreppten Deckwerken.
- **Parametrisierung der Belastungen** an getreppten Deckwerken.
- Bewertung der **Leistungsfähigkeit** zur Energiedissipation einlaufender Wellen.
- Ermittlung von **Belastungen** und **Empfehlungen konstruktiver Details** und Ausführungen (Verstärkungen).
- Fortführung und **Ausbau der KFKI-Förderlinie** (Wellenauf- und -überlauf).



Vergleich des Wellenaufbaus an glatter und getreppter Böschung (unveröffentlicht)

Kerpen, N.B.; Goseberg, N.; Schlurmann, T. (2014): **Experimental Investigations on Wave Overtopping on Stepped Embankments**, Coastlab14, Vol.1, Varna, Bulgaria, ISBN: 978-619-90271-1-0, pp. 262-269.

Wirtschaftliche Bedeutung

- Ableitung von praxistauglichen Ergänzungen zu Bemessungsansätzen/-Richtlinien.
- Wertvoller Beitrag zur Fortentwicklung des Generalplans Küstenschutz durch Vereinbarkeit von Küstenschutz und Tourismus (NLWKN, 2007).
- Nach Cunningham et al., 2012 quantifizierbare Vorteile von getreppten Deckwerken im Hinblick auf:
 - Ästhetische Qualität
 - Ausführungsplanung
 - Konstruktive Umsetzung
 - Unterhaltung und Dauerhaftigkeit
 - Positives öffentliches Interesse
 - Multifunktionaler Ansatz des Küstenschutzes

Stand der Forschung

- Gegenstand der Forschung seid fast 100 Jahren.
- > 30 Veröffentlichungen zu getreppten Deckwerken mit dem Fokus auf:
 - Wellenauflauf
 - Wellenüberlauf
 - Kolkprozessen
 - Druckschlägen

Kerpen, N.B.; Schlurmann, T. (2016):
Stepped Revetments - Revisited,
Coastlab16, Ottawa, Canada.

Stand der Forschung

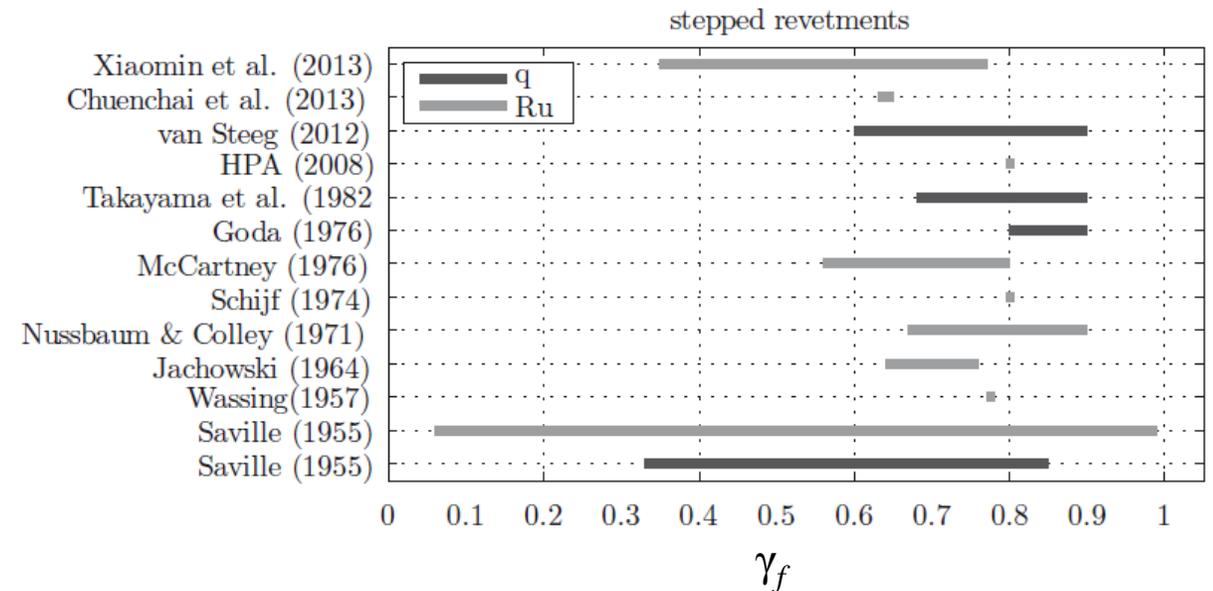
Bestimmung von Wellenauf- und -überlauf durch Standardwerk, z.B. **EurOtop 2007**.

Einfluss von gestuften Deckwerken:

- Bestimmung von **Abminderungsfaktoren zur Berechnung des Wellenaufbaus** an gestuften Deckwerken seit Pionierarbeit von **Saville (1955)**.
- **Stabilitätsuntersuchungen** ($N_s > 12,8$) durch **Jachowski (1964)**.
- **Druckschlagbelastung** durch **Heimbaugh (1988)**.
- Einfluss der **Stufenform** (vertikal, rund, schräg) durch **Jachowski (1964)**, **Nussbaum & Colley (1971)**, **van Steeg (2012)**.

Wellenaufbauhöhe [-]:

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = c_1 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \xi_{m-1,0}$$



→ **große Variation des Abminderungsfaktors γ_f**

→ **Unsicherheit hinsichtlich der Bemessung!**

Stand der Forschung

- Vermeintlich umfängliche, erkenntnisreiche Untersuchungen!
- Aber **grundlegend unzureichende Parametervariation** und **systemische Wissenslücken** des Einzelprozess- und Gesamtsystemverständnisses des Wellenauf- und -überlaufs an getreppten Deckwerken!
- Relevanz der Untersuchungen lange bekannt, aber **fehlende Übereinstimmungen** (Methodik und Ziele) sowie mangelhafte Bemessungsgrundlagen (Streubreiten γ_f).

Kerpen, N.B.; Schlurmann, T. (2016):
Stepped Revetments - Revisited,
Coastlab16, Ottawa, Canada.

Resümee

- Bisherige Untersuchungen wenn überhaupt nur schwer vergleichbar (Maßstäbe, Geometrie, ...)
- Bisher kein geschlossenes Systemverständnis
→ keine Bemessungsgrundlage!
- Ergänzende kleinmaßstäbliche Versuche (Hannover und Aachen).
- (ausgewählte) großmaßstäbliche Versuche (GWK Hannover) erforderlich.

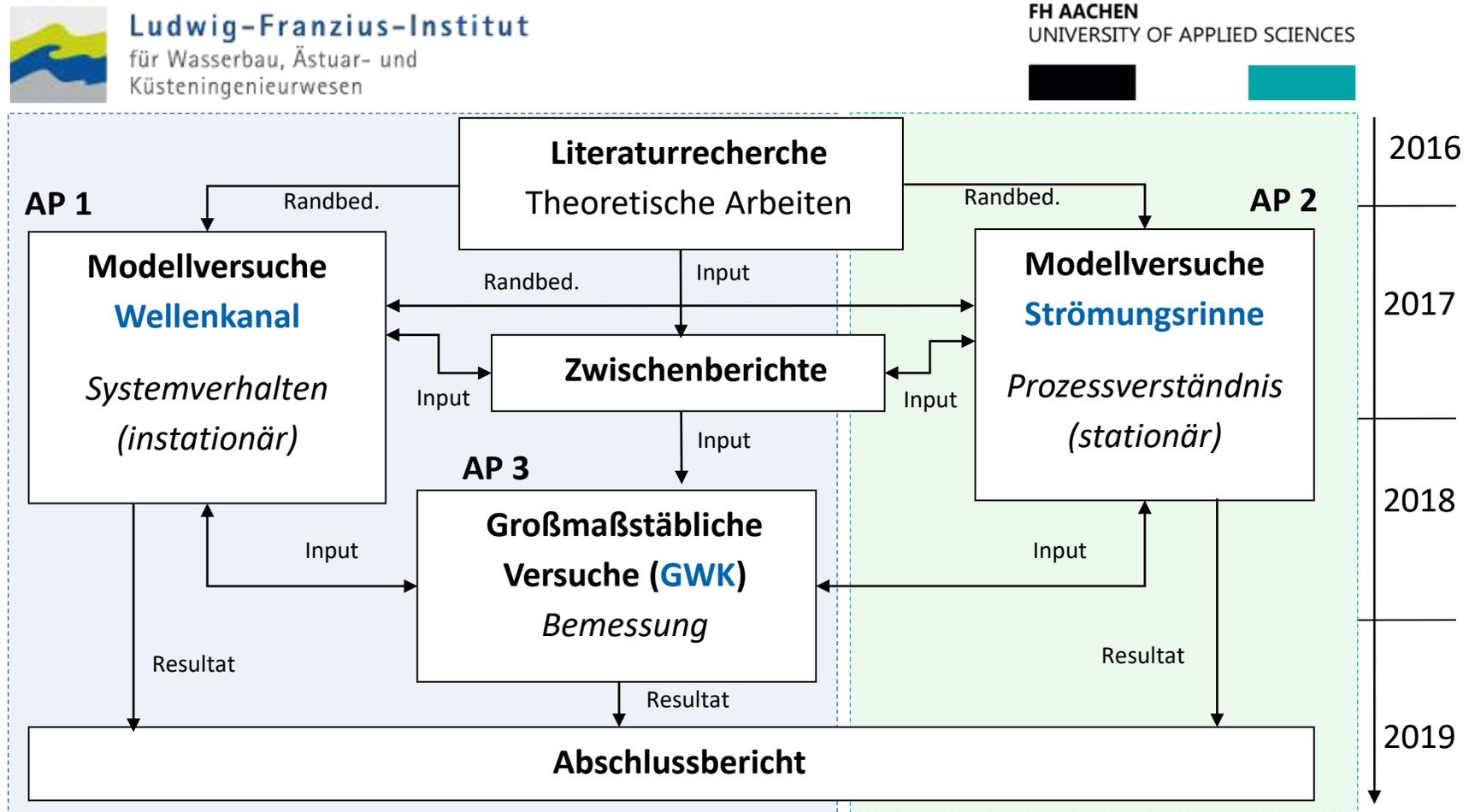
Abgeleitete Forschungsfragen

- Welche **Funktions- und Wirkprinzipien** bzw. welche Einzelprozesse **dominieren** den Wellenauf- und –überlauf an getreppten Deckwerken?
- Welche **Energiedissipation, Luftaufnahme** und **Reflexion** eines getreppten Deckwerks bestimmen die wesentlichen Funktionen und die Wirkungsweisen im küstennahen Umfeld sowie die Effizienz?
- Welche **transienten Belastungen** (Wellenschlag, Druckgradienten, Wirbelablösungen) treten auf und wie lassen sich diese in einer **Lebensdaueranalyse** integrieren?
- Wie lassen sich diese Erkenntnisse in **praxistaugliche Bemessungsansätze** übertragen?
- **Wie lässt sich ein γ_{Treppe} entwickeln und in die allg. gültigen Bemessungsansätze für den Wellenauf- und –überlauf einfügen?**



Arbeitspakete, Methodik und Ergebnisse

Arbeitspakete



Methodik

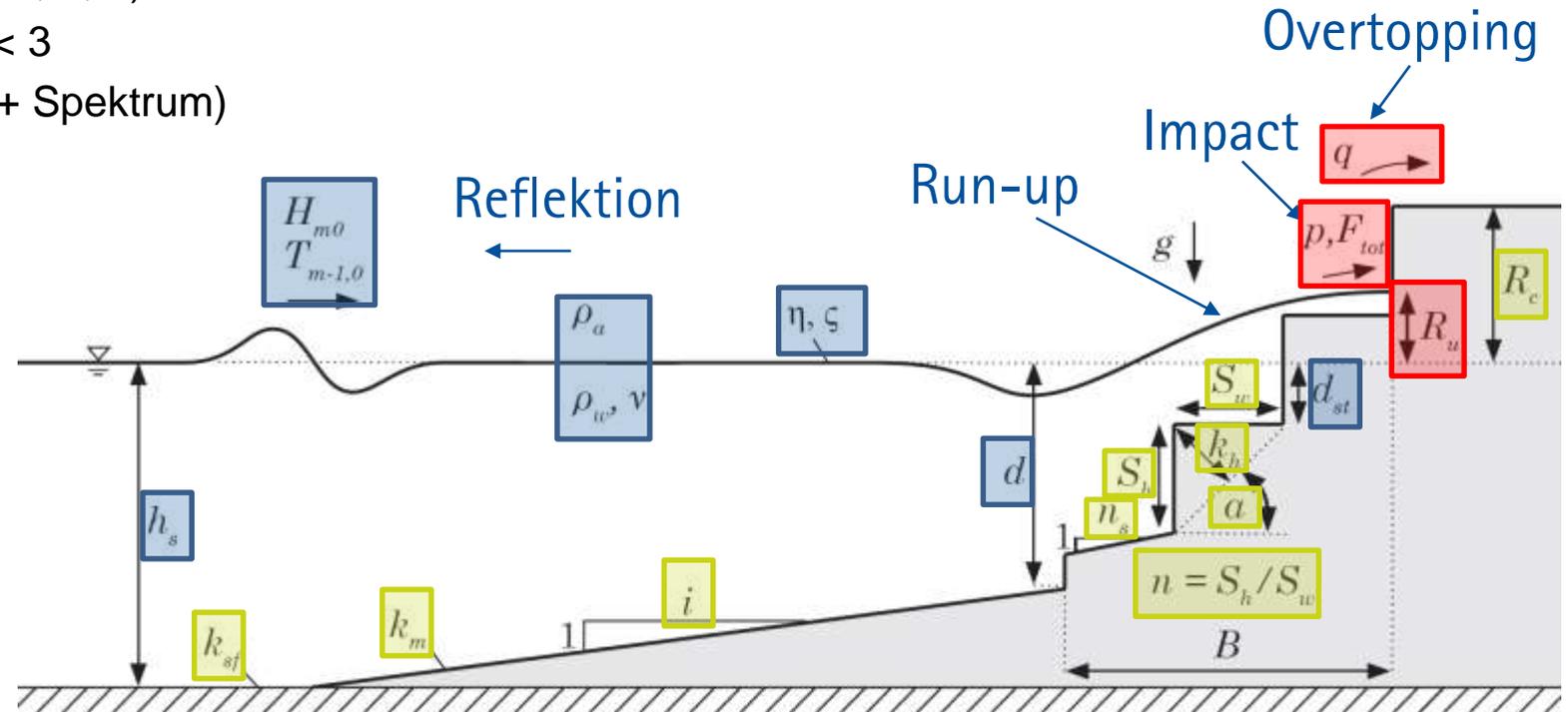
Arbeitspaket 1: Kleinskalige Modellversuche

Analyse des Wellenauf- und – überlaufs an getreppten Deckwerken für

- variierenden Neigungen ($\cot \alpha = 1, 2, 3, 6$)
- variierende Stufenhöhen $0 < S_r/H < 3$
- variierende Wellensteilheiten (RW + Spektrum)

Messung von

- Wellenauflauf
- Welleninduzierten Drucklasten
- Wellenüberlaufmengen
- Reflexionskoeffizient



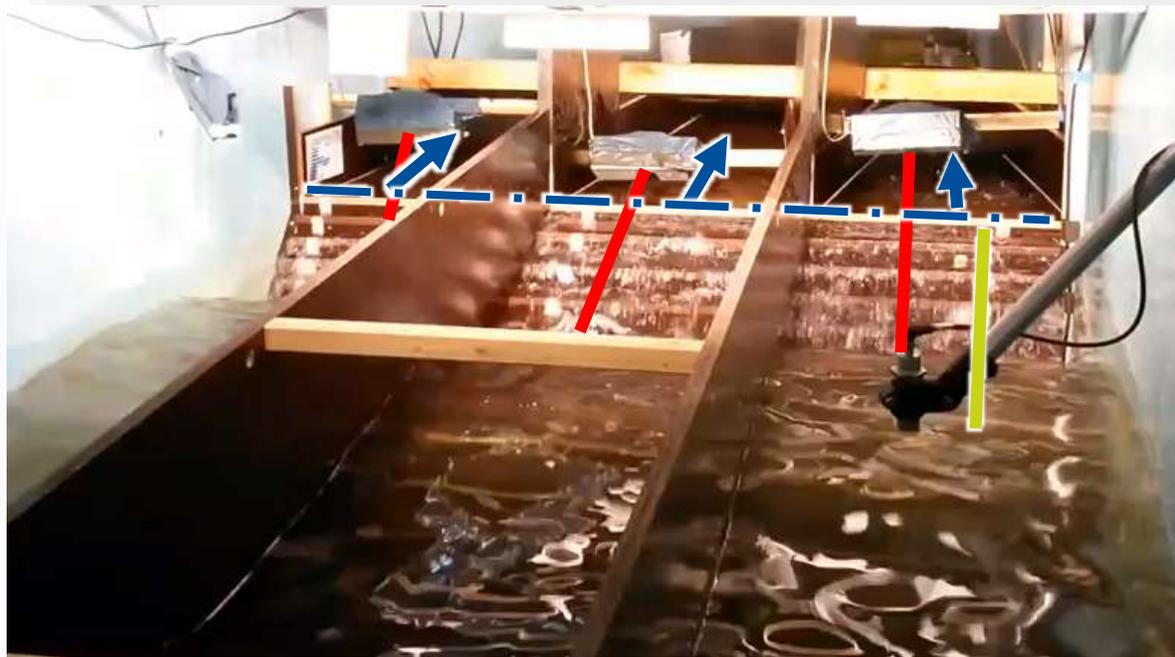
Methodik

$$S_h = 0.05 \text{ m}$$

1:1

1:3

1:2

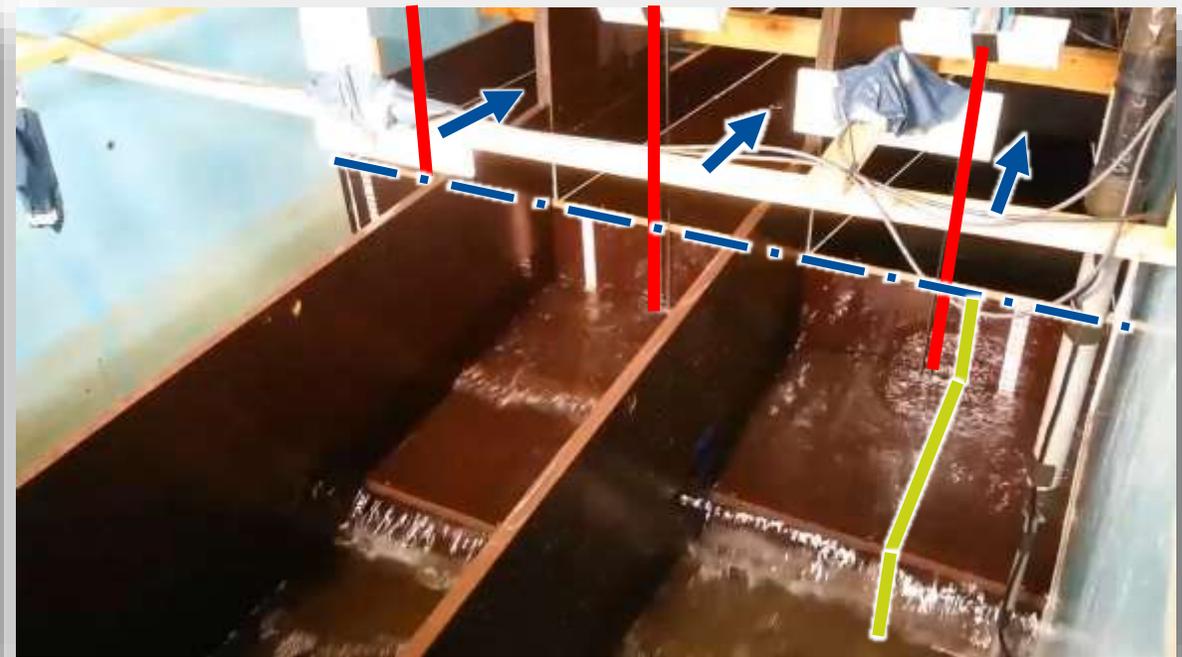


$$S_h = 0.3 \text{ m}$$

1:1

1:3

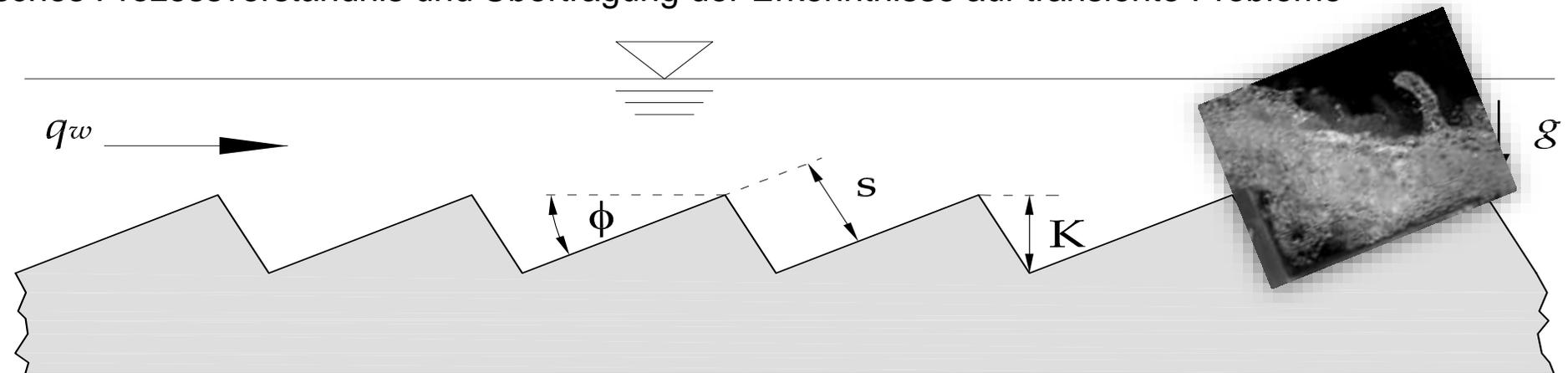
1:2



Methodik

Arbeitspaket 2: Untersuchung stationärer Strömungen

- Horizontale Rinne und Rinne mit Gegengefälle
 - Variation der Froudezahl
 - Variation der Stufengeometrie
 - Klarwasser- und belüftete Strömungen
 - Ziel: Physikalisches Prozessverständnis und Übertragung der Erkenntnisse auf transiente Probleme



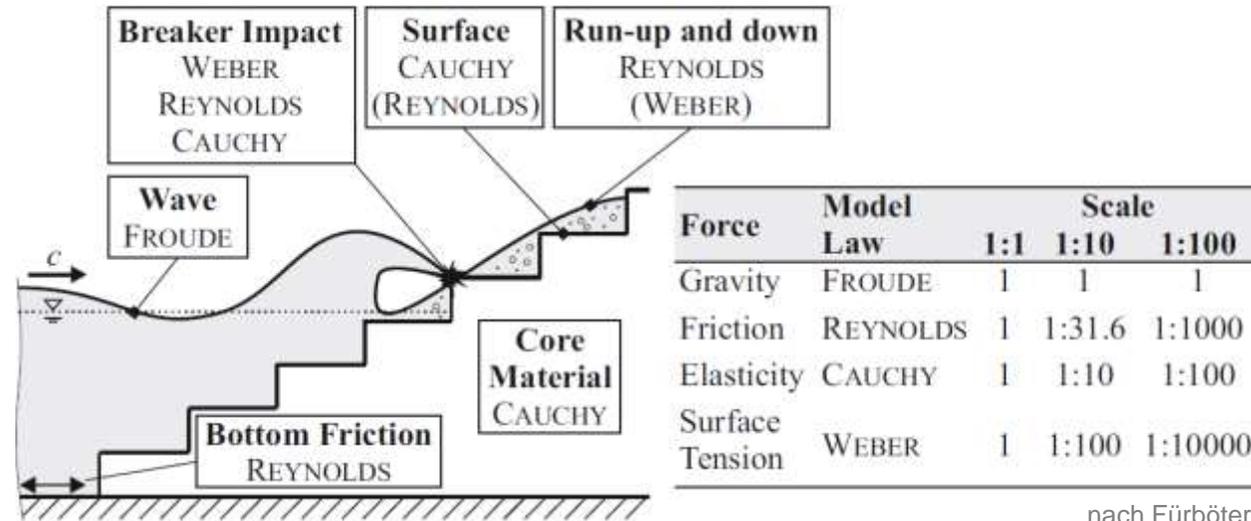
Stationäre Strömung mit Makrorauheit

Methodik

Arbeitspaket 3: Großskalige Modellversuche (1:1)

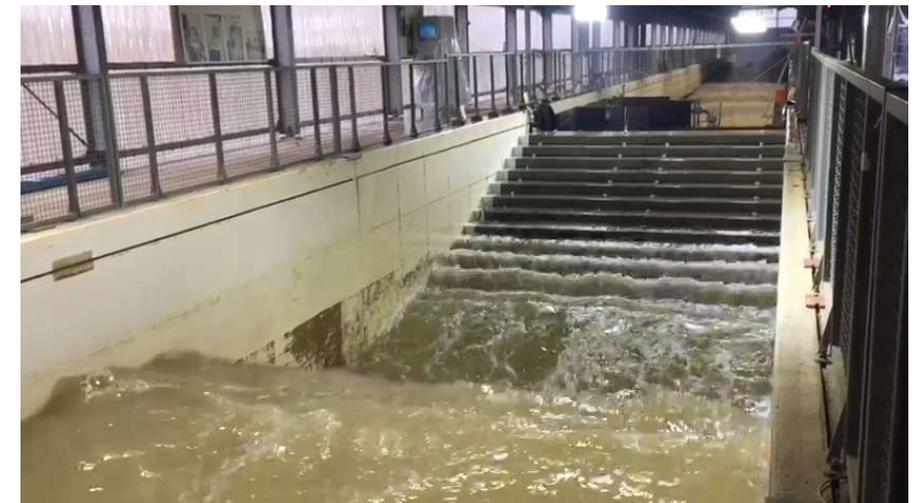
Analyse des Wellenauf- und – überlaufs an getreppten Deckwerken für ausgewählte Versuche

- variierenden Neigungen ($\cot \alpha = 3$)
- variierende Stufenhöhen $0 < S_H/H < 3$
- variierende Wellensteilheiten (RW + Spektrum)



Messung von

- Wellenauflauf
- welleninduzierte Drucklasten
- Wellenüberlaufmengen
- Reflexionskoeffizient

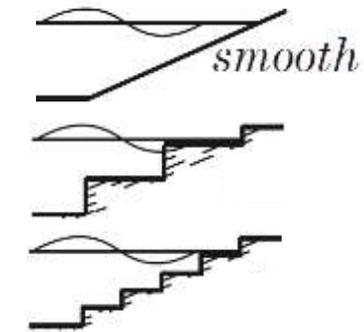
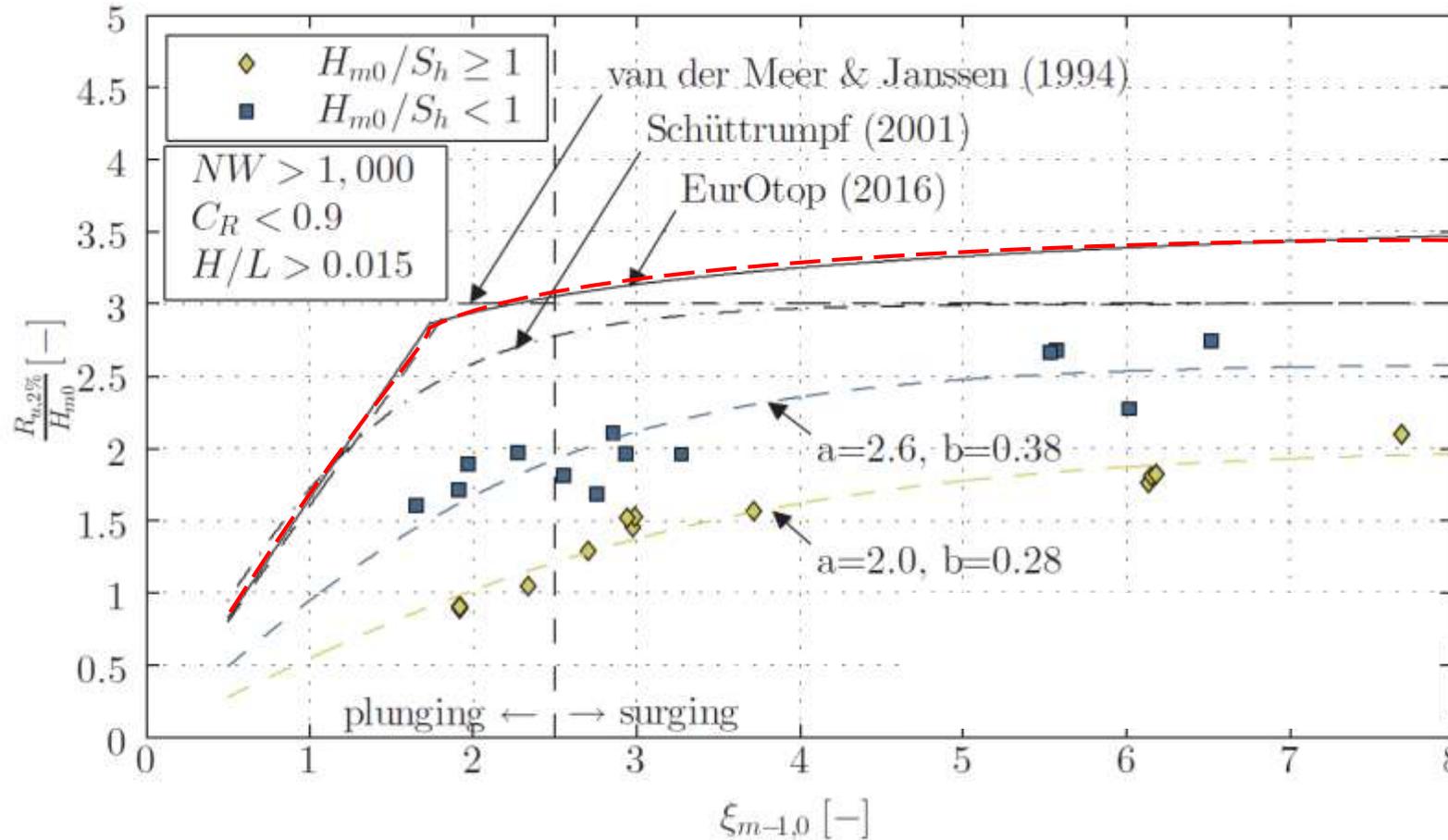




Ergebnisse

- Wellenauflauf
- Wellenüberlauf
- Druckschläge
- Energiedissipation

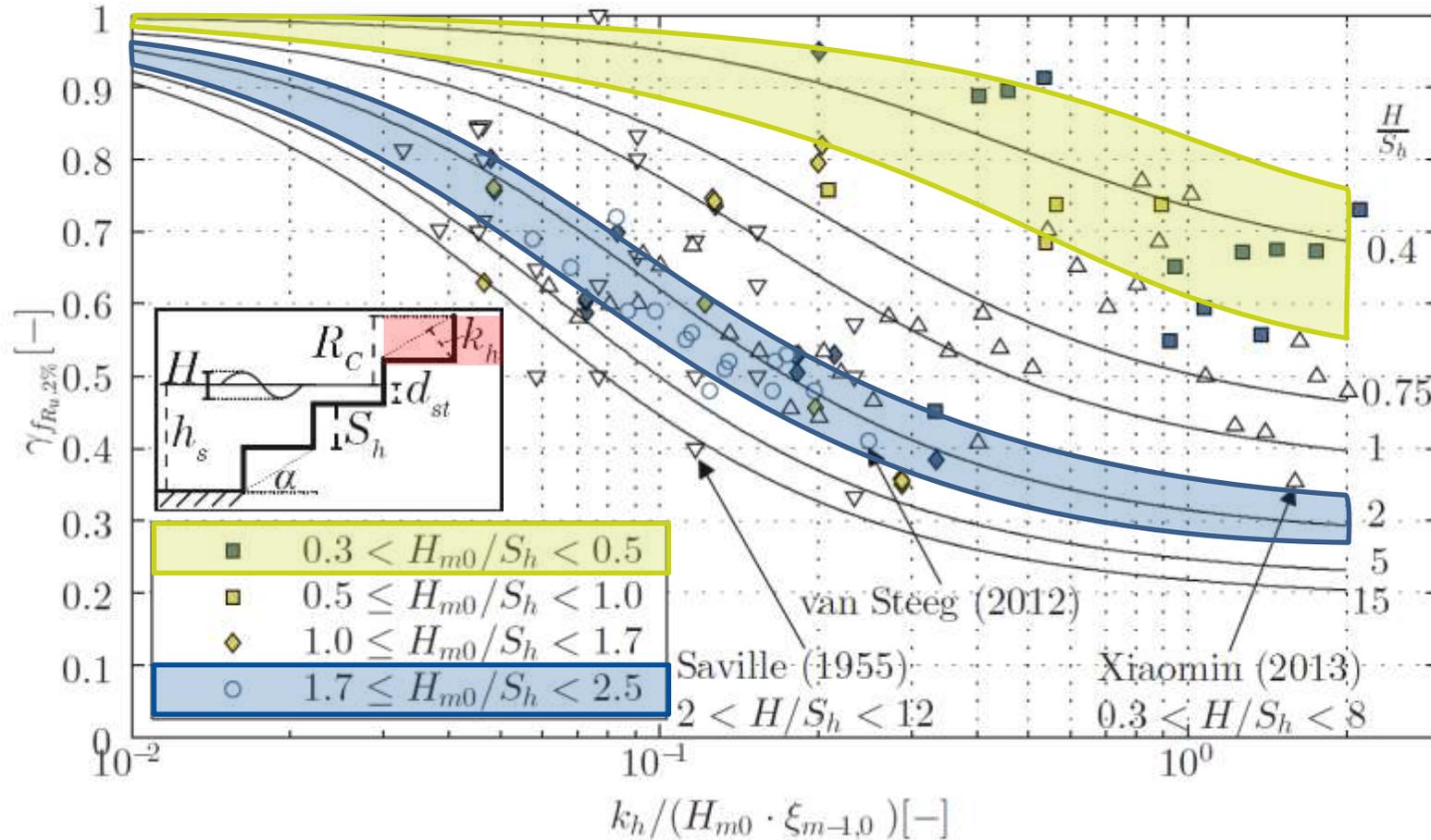
Wellenauflauf



$$\gamma_f = \frac{R_{u,2\%,rough}}{R_{u,2\%,smooth}}$$

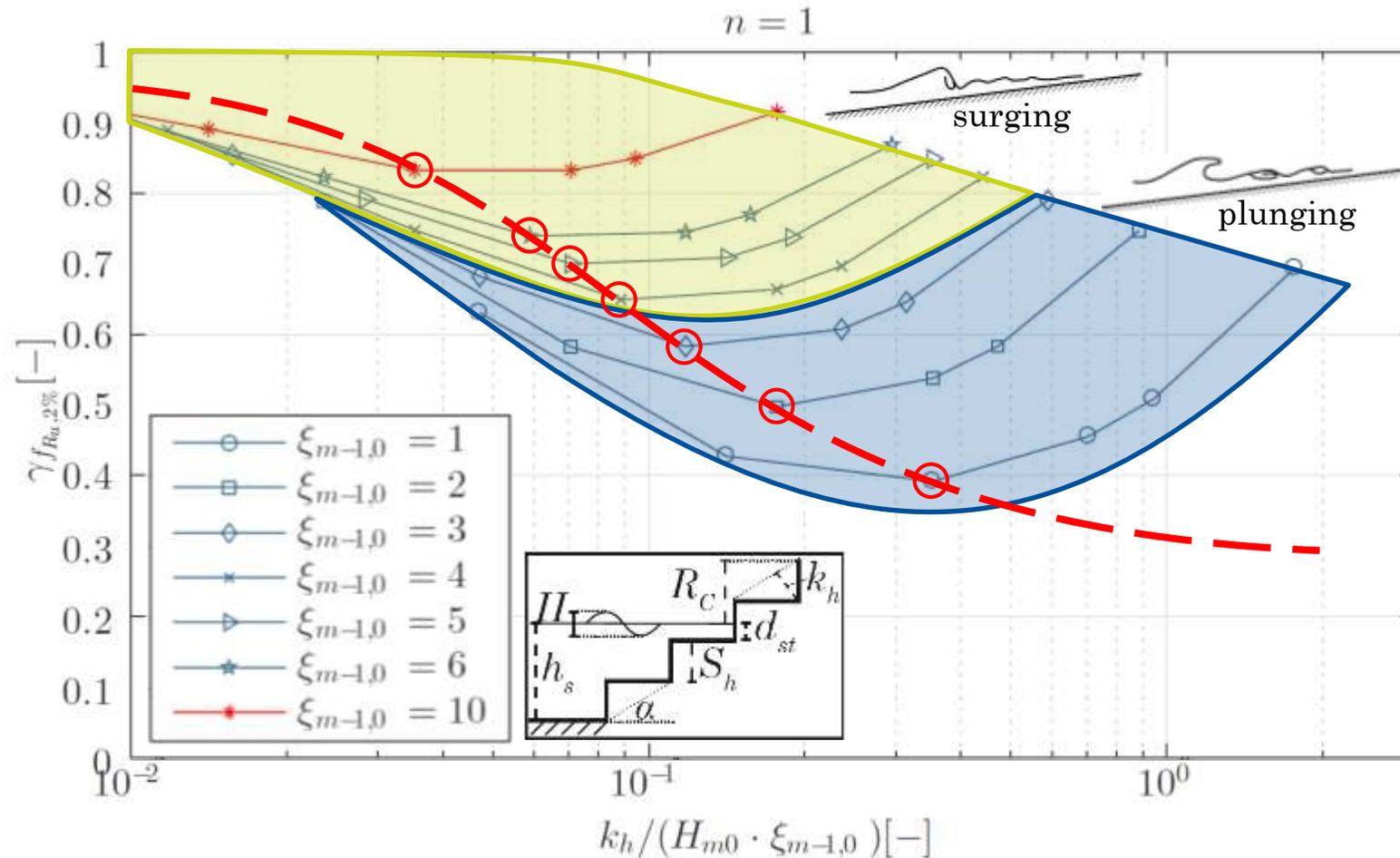
Kerpen, N.B. (2017): Wave Induced Responses of Stepped Revetments, Dissertation, Ludwig-Franzius-Institute, Leibniz University Hannover.

Wellenauflauf



Kerpen, N.B. (2017): Wave Induced Responses of Stepped Revetments, Dissertation, Ludwig-Franzius-Institute, Leibniz University Hannover.

Wellenauflauf



- Geringere Energiedissipation für steigende Iribarren Zahl.
- Für jede Iribarren Zahl kann ein Optimum bestimmt werden .
- Das Optimum ist $H/S_h = 2$ für jede Iribarren Zahl.

Kerpen, N.B. (2017): Wave Induced Responses of Stepped Revetments, Dissertation, Ludwig-Franzius-Institute, Leibniz University Hannover.



Wellenüberlauf

$$\gamma_f = 1.55 - 0.55 \operatorname{atan} \left[12 \left(\frac{k_h}{H_{m0}} + 0.07 \right)^{1.4} \right] + 0.35 \cdot \operatorname{atan} \left[0.6 \left(\frac{k_h}{H_{m0}} - 3.5 \right) \right]$$

ABBILDUNG IM PAPER

Kerpen, N.B.; Schoonees, T.; Schlurmann, T. (2019): **Wave Overtopping of Stepped Revetments**, Water. 2019; 11(5):1035. doi:10.3390/w11051035.

Wellenüberlauf

ABBILDUNG IM PAPER

Non-breaking:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.09 \cdot \exp \left[- \left(1.5 \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \gamma_f} \right)^{1.3} \right]$$

Breaking:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = \frac{0.023}{\sqrt{\tan \alpha}} \cdot \gamma_b \cdot \xi_{m-1,0} \cdot \exp \left[- \left(2.7 \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \xi_{m-1,0} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_v} \right)^{1.3} \right]$$

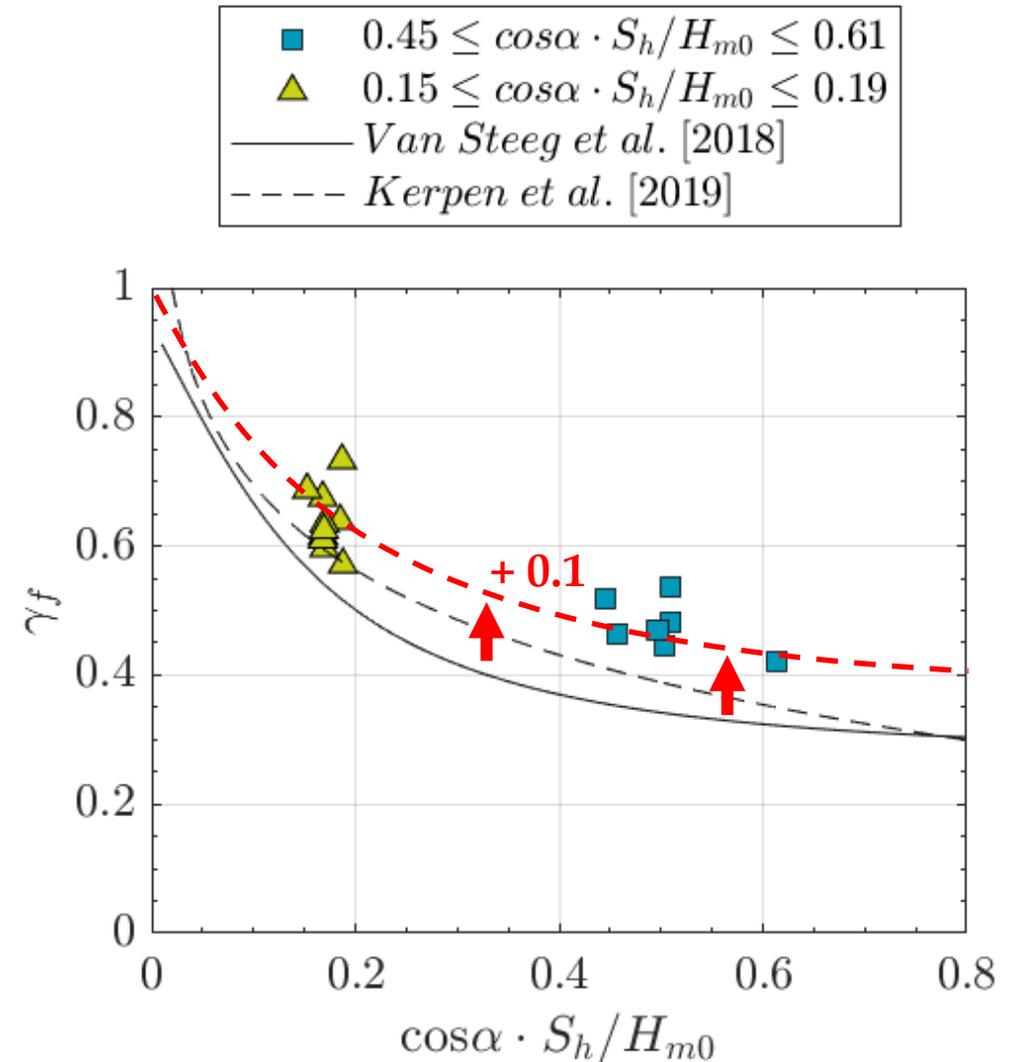
Kerpen, N.B.; Schoonees, T.; Schlurmann, T. (2019): **Wave Overtopping of Stepped Revetments**, Water. 2019; 11(5):1035. doi:10.3390/w11051035.

Wellenüberlauf

- Quantifizierung von Maßstabeffekten durch Versuche im GWK.

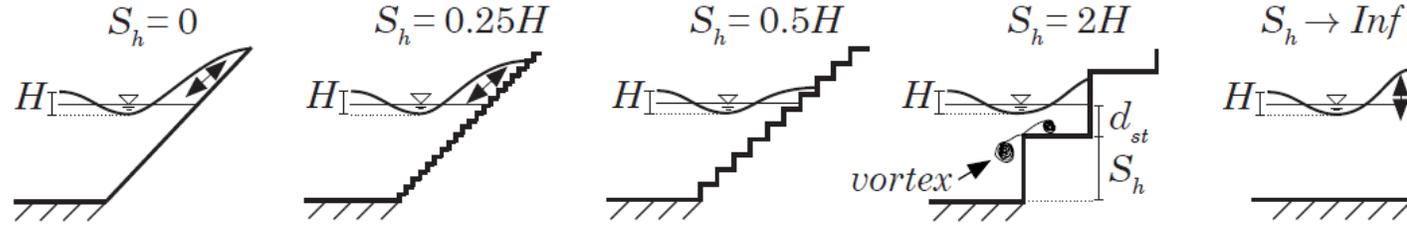
→ Die in kleinskaligen Modellversuchen ermittelte **Effektivität der Reduzierung** von Wellenauf- und -überlauf ist **überschätzt**.

Der Reduzierungsfaktor ermittelt nach Kerpen *et al.* (2019) sollte um 0.1 erhöht werden, um Maßstabeffekte zu berücksichtigen.

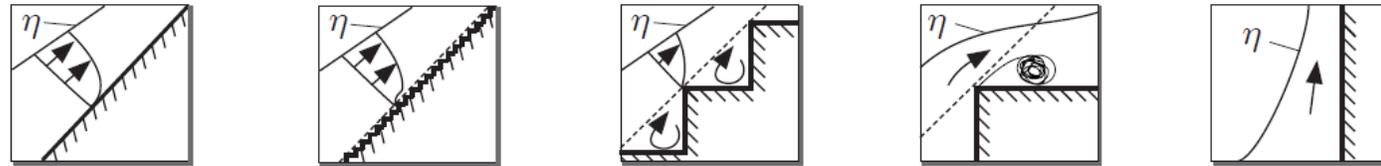


Prozessdefinition

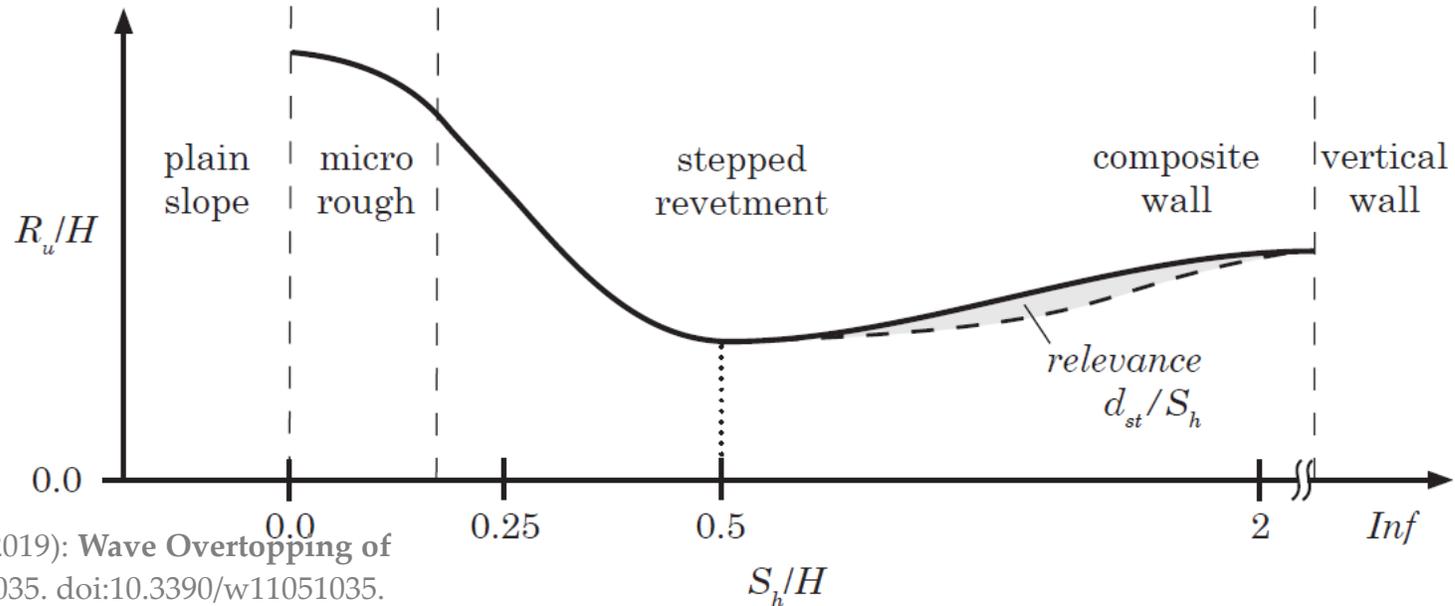
global flow conditions:



local flow conditions:



qualitative run-up:



Kerpen, N.B.; Schoonees, T.; Schlurmann, T. (2019): Wave Overtopping of Stepped Revetments, Water. 2019; 11(5):1035. doi:10.3390/w11051035.



Belastung durch Wellenbrechen (impact pressures)

ABBILDUNG IM PAPER

Kerpen, N.B.; Schoonees, T., Schlurmann, T. (2018): **Wave Impact Pressures on Stepped Revetments**, J. Mar. Sci. Eng. 2018, 6, 156. doi: 10.3390/jmse6040156.



Energiedissipation in den Stufen

- Vergleichbare Strömungsverhältnisse für stationäre und in-stationäre Versuchsbedingungen.

ABBILDUNG IM PAPER

Kerpen, N.B., Bung, D.B., Valero, D., Schlurmann, T. (2017): **Energy Dissipation Within the Wave Run-Up at Stepped Revetments**, J. Ocean Univ. China (2017) 16: 649. doi:10.1007/s11802-017-3355-z.



Fazit, Zusammenfassung und Ausblick

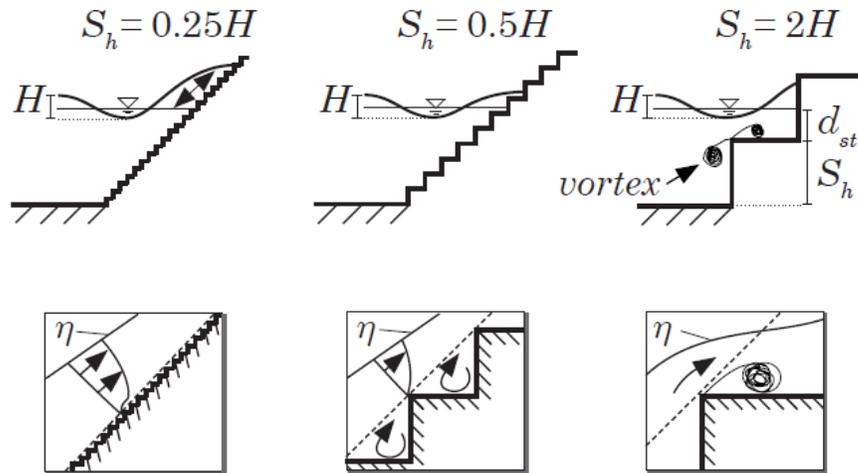
Fazit

- Erreichung aller Projektziele:
 - Systemverständnis ✓
 - Parametrisierung der Belastungen ✓
 - Bewertung der Leistungsfähigkeit ✓
 - Ermittlung von Belastungen ✓
 - Empfehlungen konstruktiver Details ✓
 - Fortführung und Ausbau der KFKI-Förderlinie (Wellenauf- und –überlauf). ✓

Zusammenfassung

- Dominierender Wirkungsmechanismus:

Verhältnis von $\frac{\text{Wellenhöhe}}{\text{Stufenhöhe}}$



- Wellenauf- und -überlauf können im Vergleich zu einer glatten Böschung **um bis zu 50%** reduziert werden.



- Optimales Verhältnis:

$$\frac{\text{Wellenhöhe}}{\text{Stufenhöhe}} = 2$$

Zusammenfassung

- Praxistauglicher Bemessungsansatz nach EurOtop (2018):

$$\gamma_f = 1.55 - 0.55 \operatorname{atan} \left[12 \left(\frac{k_h}{H_{m0}} + 0.07 \right)^{1.4} \right] + 0.35 \cdot \operatorname{atan} \left[0.6 \left(\frac{k_h}{H_{m0}} - 3.5 \right) \right] + 0.1$$

**Einfluss von
Maßstabeffekten
(noch nicht wiss. gesichert)**

Zusammenfassung (Literatur)

- Literatur: Kerpen, N.B.; Schlurmann, T. (2016): [Stepped Revetments - Revisited](#), Coastlab16, Ottawa, Canada.
- Regelmäßige Wellen: Kerpen, N.B.; Goseberg, N.; Schlurmann, T. (2014): [Experimental Investigations on Wave Overtopping on Stepped Embankments](#), Coastlab14, Vol.1, Varna, Bulgaria, ISBN: 978-619-90271-1-0, pp. 262-269.
- Wellenspektren: Schoonees, T.; Kerpen, N.B.; Liebisch, S.; Schlurmann, T. (2018): [Wave Overtopping Prediction of A Gentle Sloped Stepped Revetments](#), 36th International Conference on Coastal Engineering 2018, Baltimore, Maryland. doi:10.9753/icce.v36.papers.99.
Kerpen, N.B.; Schoonees, T.; Schlurmann, T. (2019): [Wave Overtopping of Stepped Revetments](#), Water. 2019; 11(5):1035. doi:10.3390/w11051035.
- Druckschläge: Kerpen, N.B.; Schoonees, T., Schlurmann, T. (2018): [Wave Impact Pressures on Stepped Revetments](#), J. Mar. Sci. Eng. 2018, 6, 156. doi: 10.3390/jmse6040156.
- Energiedissipation: Kerpen, N.B., Bung, D.B., Valero, D., Schlurmann, T. (2017): [Energy Dissipation Within the Wave Run-Up at Stepped Revetments](#), J. Ocean Univ. China (2017) 16: 649. doi:10.1007/s11802-017-3355-z.
Valero, D.; Bung, D.B. (2016a): [Vectrino Profiler spatial filtering for shear flows based on the mean velocity gradient equation](#), Journal of Hydraulic Engineering 144(7). doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001485.
- Maßstabseffekte: Schoonees *et al.* (2020), In preparation.

Ausblick

- Gemeinsame Ergebnisdiskussion mit Fachkollegen von Deltares (NL), der TU Gent (BEL) und HR Wallingford (UK)
- Zusammenstellung von Erkenntnissen für einen Beitrag im EurOtop Manual:

EUROTOP LIVE - A DISCUSSION

We challenge researchers and practitioners to come with improvements they see possible for the next EurOtop. They should provide:

- background to the improvement (paper or report), taking into account the data of the existing method (not just their own research neglecting existing data);
- the original data if needed for figures and/or checking;
- a text proposal for the next EurOtop, written for application of the improvement.

<http://www.overtopping-manual.com/eurotop/eurotop-live/>



Dr.-Ing. Nils B. Kerpen
Talia Schoonees M.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Torsten Schlurmann

Leibniz Universität Hannover
www.lufi.uni-hannover.de

kerpen@lufi.uni-hannover.de

Prof. Dr.-Ing. Daniel Bung
Dr.-Ing. Daniel Valero

FH Aachen, Lehr- und Forschungsgebiet Wasserbau
<https://www.fh-aachen.de/menschen/bung>

waveSTEPS

*Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!*