

KFKI-Seminar 2017, Bremerhaven, 22.11.2017

Untersuchung der physikalischen Wellentransformationsprozesse an konkaven und konvexen Deichlängsprofilen

- **Dr.-Ing. S. Liebisch**, **M. Schilling M.Sc.**, **M. Rabah M.Sc.**, **Prof. Dr.-Ing. T. Schlurmann**  
Ludwig-Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen,  
Leibniz-Universität Hannover
- **B. Scheres M.Sc.**, **S. Subramaniam M.Sc.**, **Prof. Dr.-Ing. H. Schüttrumpf**  
Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft,  
RWTH Aachen University

## ConDyke Verbundprojekt

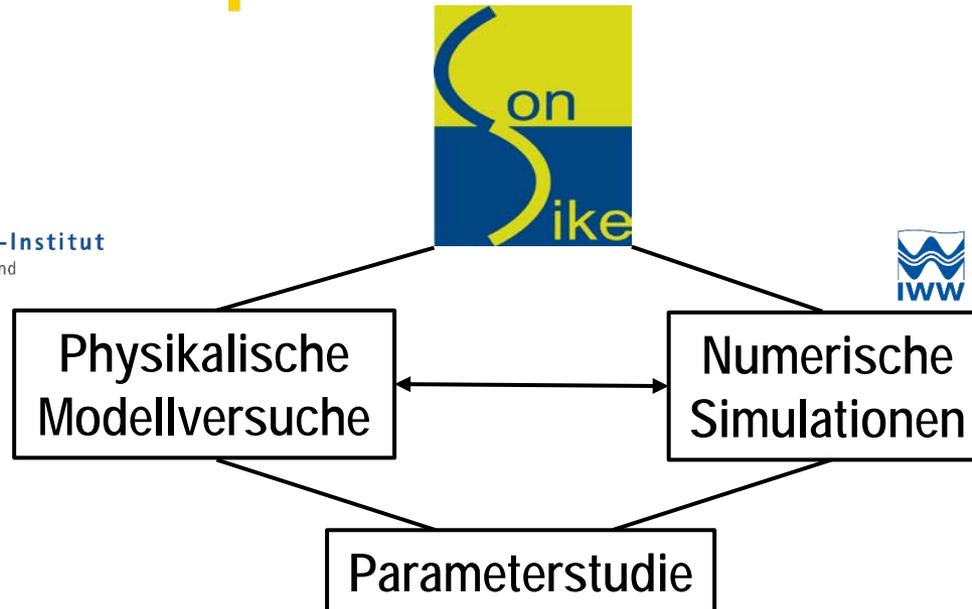
gefördert durch:



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



KFKI



→ Vorteile beider Methoden genutzt

## 1. Einführung

- Anpassung der Deichlinie an den natürlichen Küstenlinienverlauf  
→ Krümmungen in der Deichlängsachse
- konvex: Krümmung zur Seeseite
- konkav: Krümmung zur Landseite



- Bislang keine wissenschaftlich fundierten Aussagen zum Wellenauflauf und -überlauf an konkaven und konvexen Deichkrümmungen vorhanden
- Unsicherheiten hinsichtlich eventueller Über- oder Unterdimensionierung von Deichen mit Krümmungen in der Längsachse

## 1. Einführung – Stand des Wissens

### Stand des Wissens – Parallele Deichlinie

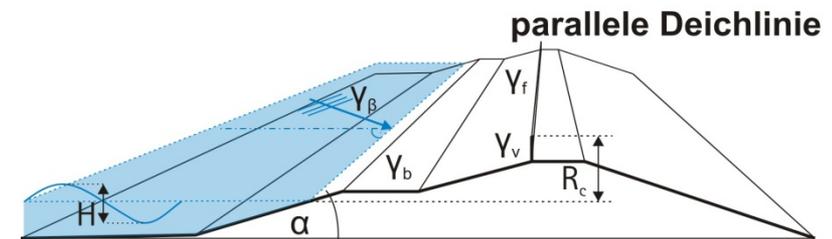
#### ■ EurOtop (2007) beschreibt Magnituden des

i) Wellenaufaufs

ii) Wellenüberlaufs

bauwerksbedingt durch empirisch  
ermittelte Korrekturfaktoren:

- Berme  $\gamma_b$
- Rauheit und Durchlässigkeit  $\gamma_f$
- Wellenangriffswinkel  $\gamma_\beta$
- vert. Wand auf Krone  $\gamma_v$
- Böschungsneigung  $\alpha$



H:	Wellenhöhe	$\gamma_b$ :	Berme
$\gamma_\beta$ :	Wellenangriffswinkel	$\gamma_f$ :	Rauheit / Permeabilität
$R_{u2\%}$ :	Wellenauflaufhöhe	$\gamma_v$ :	vertikale Wand
$\xi_{m-1,0}$ :	Brecherkennzahl	$\alpha$ :	Deichneigung
		$R_c$ :	Freibordhöhe

#### Wellenauflaufhöhe [-]:

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

#### Wellenüberlaufmenge [-]:

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = \frac{0.067}{\sqrt{\tan \alpha}} \gamma_b \cdot \xi_{m-1,0} \cdot \exp\left(-4.75 \frac{R_c}{\xi_{m-1,0} \cdot H_{m0} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_v}\right)$$

## 1. Einführung – Stand des Wissens

### Stand des Wissens – Gekrümmte Deichlinie

Wellenaufbauhöhe [-]:

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



Wellenüberlaufmenge [-]:

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = \frac{0.067}{\sqrt{\tan \alpha}} \gamma_b \cdot \xi_{m-1,0} \cdot \exp\left(-4.75 \frac{R_c}{\xi_{m-1,0} \cdot H_{m0} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_v}\right)$$

Zusätzliche Effekte:

- Wellenfokussierung?
- Reflexion?
- Refraktion?
- Diffraktion?

Öffnungsradius und Öffnungswinkel  
als zusätzliche geometrische Parameter

→ Korrekturfaktor Krümmungen

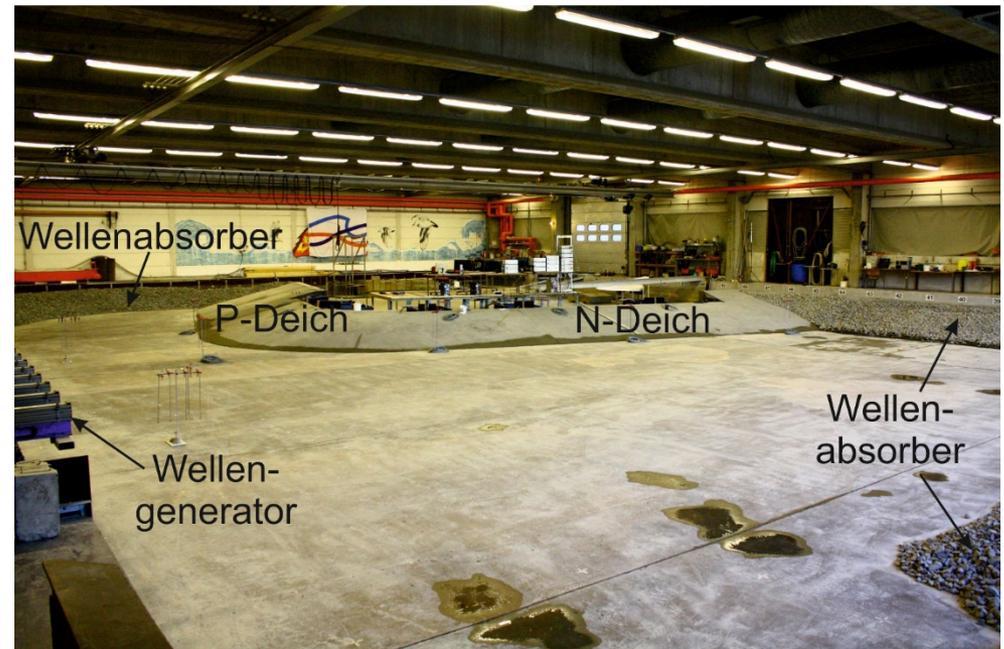
## 1. Einführung – HydralabIV-Projekt CornerDike

### Ziel:

Analyse des ...

- ... Einflusses sehr schräg einlaufender Wellen auf den Wellenauflauf und -überlauf
- ... Einflusses **einer** Ecke in der Deichlinie auf den Wellenauflauf und -überlauf

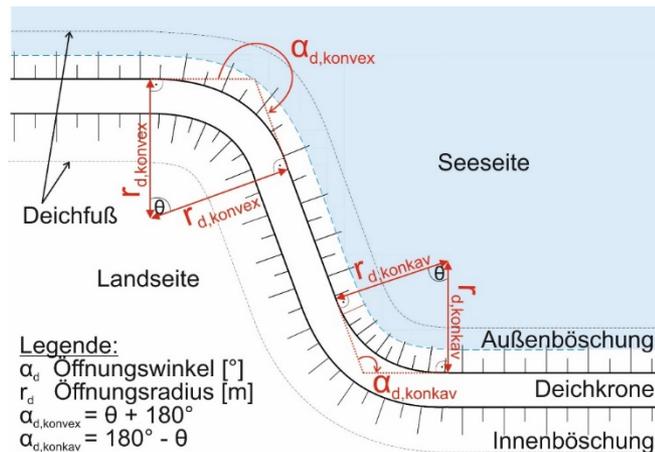
Gefördert durch:



## 1. Einführung – Definition

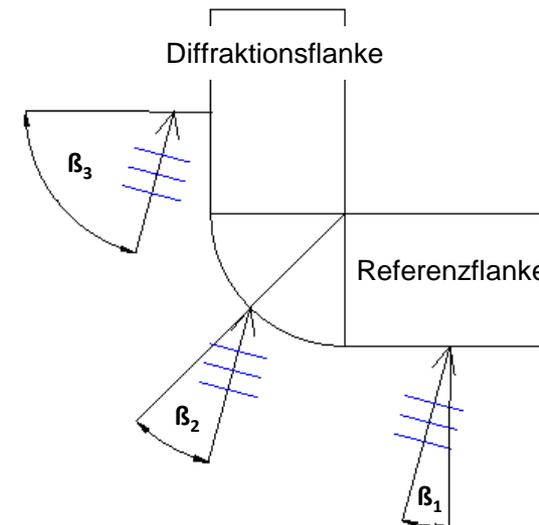
### Öffnungswinkel

- Abweichung von geradem Deich ( $180^\circ$ )
- konvex:  $\alpha_d$  ist größer als  $180^\circ$
- konkav:  $\alpha_d$  ist kleiner als  $180^\circ$



### Angriffswinkel

- $\beta_1$ : Angriffswinkel an der Referenzflanke
- $\beta_2$ : Angriffswinkel an der Krümmung
- $\beta_3$ : Angriffswinkel an der Diffraktionsflanke





## 2. Numerische Simulationen

---

# Numerische Untersuchungen

## 2. Numerische Simulationen

### Numerische Simulationen mit OpenFOAM und DualSPHysics

**OpenFOAM** („Open source Field Observation And Manipulation“)

nutzt Volume of Fluid (VOF) Methode  
→ Volumenanteil der Phasen  
(hier: Luft und Wasser) in jeder Zelle  
berechnet

Toolbox zur Wellengenerierung und  
-absorption:  
olaFOAM (mit active  
wave absorption)



**DualSPHysics**

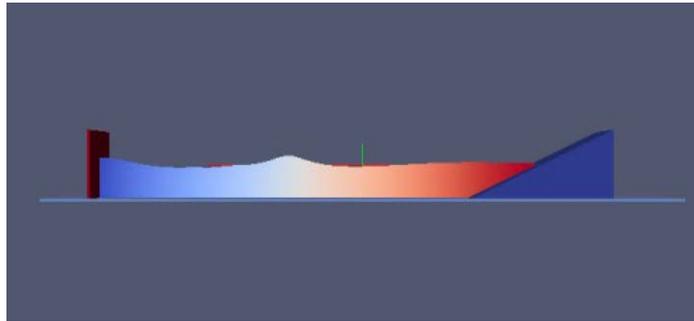
Weiterentwicklung vom SPHysics  
Code

nutzt Smoothed Particle  
Hydrodynamics (SPH) Modell  
→ Netzfrie Methode; System als  
Zusammensetzung von Partikeln  
betrachtet

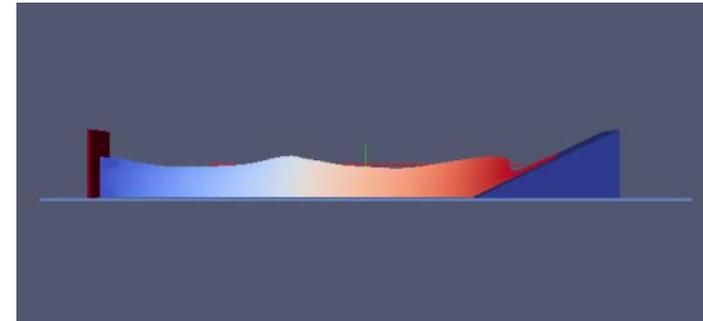


## 2. Numerische Simulationen

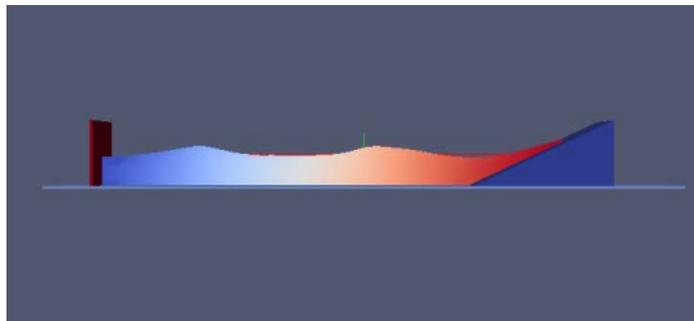
### Numerische Simulationen – Kalibrierung



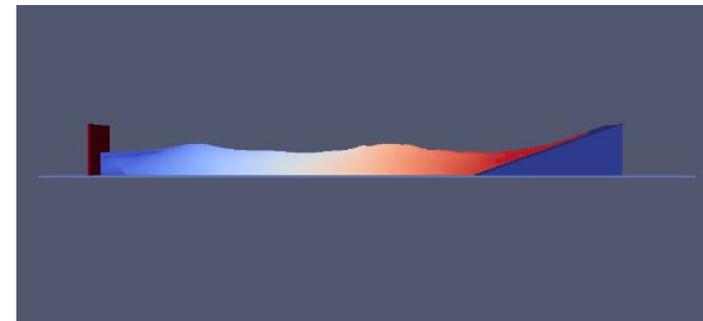
(a)



(c)



(b)



(d)

### Simulation regelmäßiger Wellen (keine Spektren)

## 2. Numerische Simulationen

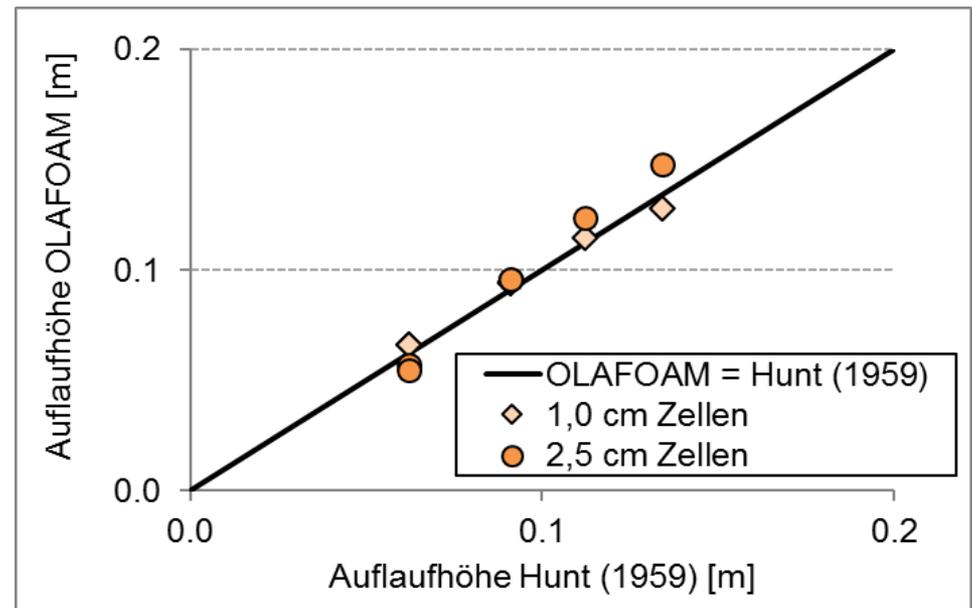
### Numerische Simulationen – Kalibrierung

#### OpenFOAM:

- Zellgröße von 1,0 cm reproduziert Hunt (1959)
- für 3D-Simulationen: 2,5 cm Zellen  
→ Abweichung tolerierbar (s. Abb.)

#### DualSPHysics:

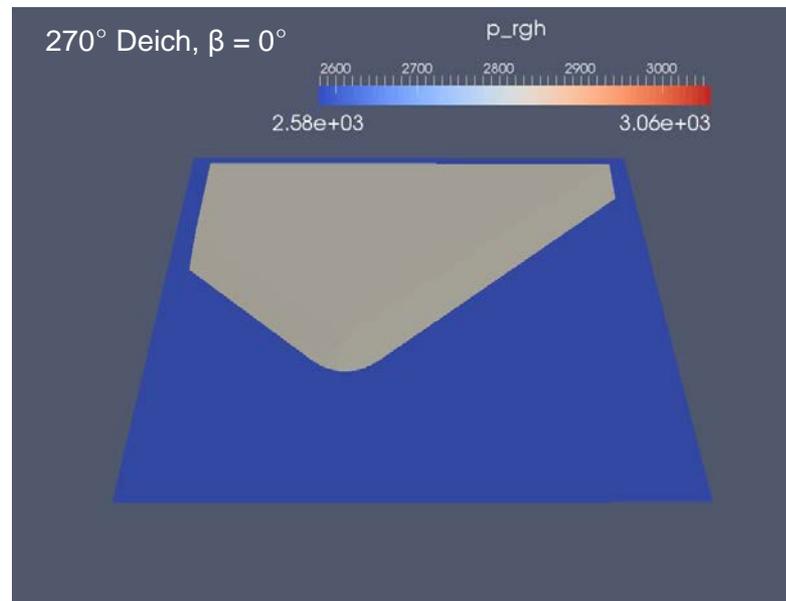
- Partikelabstand  $d_p$  von 1,0 cm reproduziert Hunt (1959)
- für 3D-Simulationen:  $d_p = 3,0$  cm



## 2. Numerische Simulationen

### Numerische Simulationen – 3D-Simulationen

3D-Simulation ( $H = 0,07$  m;  $T = 1,22$  s;  $d = 0,55$  m):



Technische Herausforderungen aufgrund hoher Zellanzahl

→ hohe Rechenzeiten und Anforderungen an Speicher

→ Untersuchung von Teilbereichen, Ausnutzung der Symmetrie

### 3. Physikalische Untersuchungen

---

## Physikalische Untersuchungen

### 3. Physikalische Untersuchungen

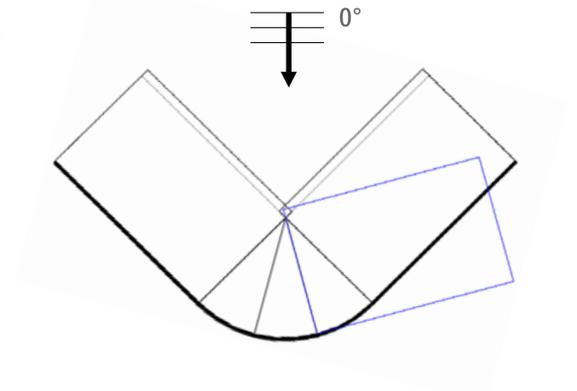
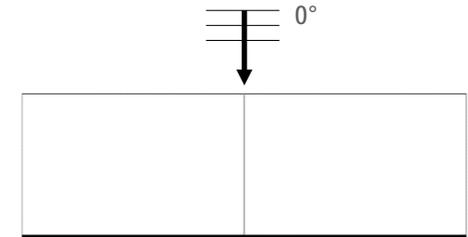
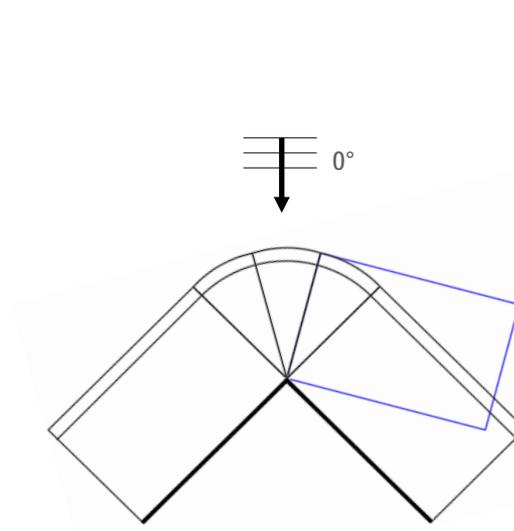
#### Wellenbecken Marienwerder (WBM)

- Länge: 40m, Breite: 25m
- Wellenhöhen 0,5m (un-/regelmäßig)
- Aktive Absorption
- Interagierende Strömung bis zu 50cm/s



### 3. Physikalische Untersuchungen

- Untersuchung von:
  - einem Referenzdeich
    - $\alpha_d = 180^\circ$
  - zwei konvexen Deichen
    - $\alpha_d = 240^\circ$  (blau)
    - $\alpha_d = 270^\circ$
  - zwei konkaven Deichen
    - $\alpha_d = 120^\circ$  (blau)
    - $\alpha_d = 90^\circ$

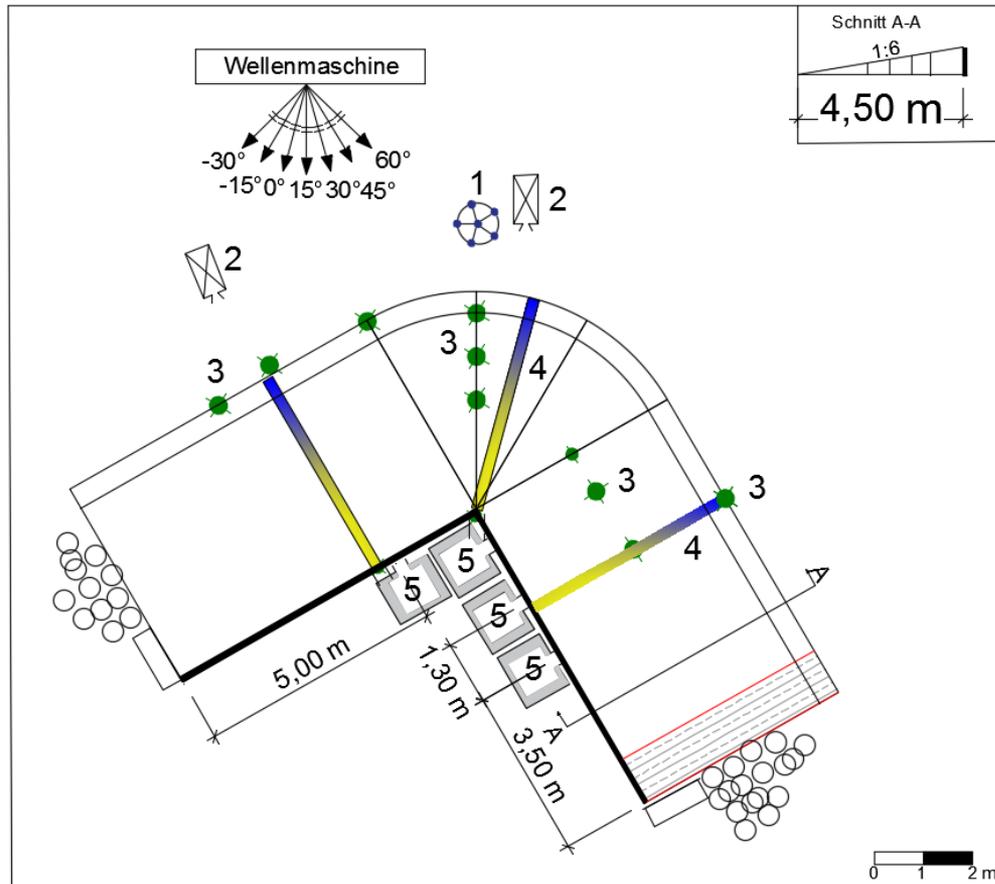


Versuchsprogramm:

- Regelmäßige Wellen und Wellenspektren
- $H = 0,05 - 0,10 \text{ m}$ ,  $T = 0,8 - 1,8 \text{ s}$ ,  $\beta$  bzw.  $\beta_2 = 0^\circ - 45^\circ$

### 3. Physikalische Untersuchungen

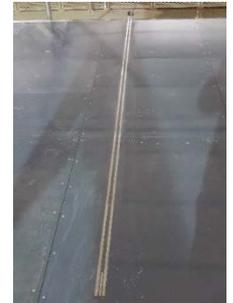
#### Versuchsaufbau konvexer Deich ( $\alpha_d=270^\circ$ )



Einzelement



4 Wellenauflaufpegel



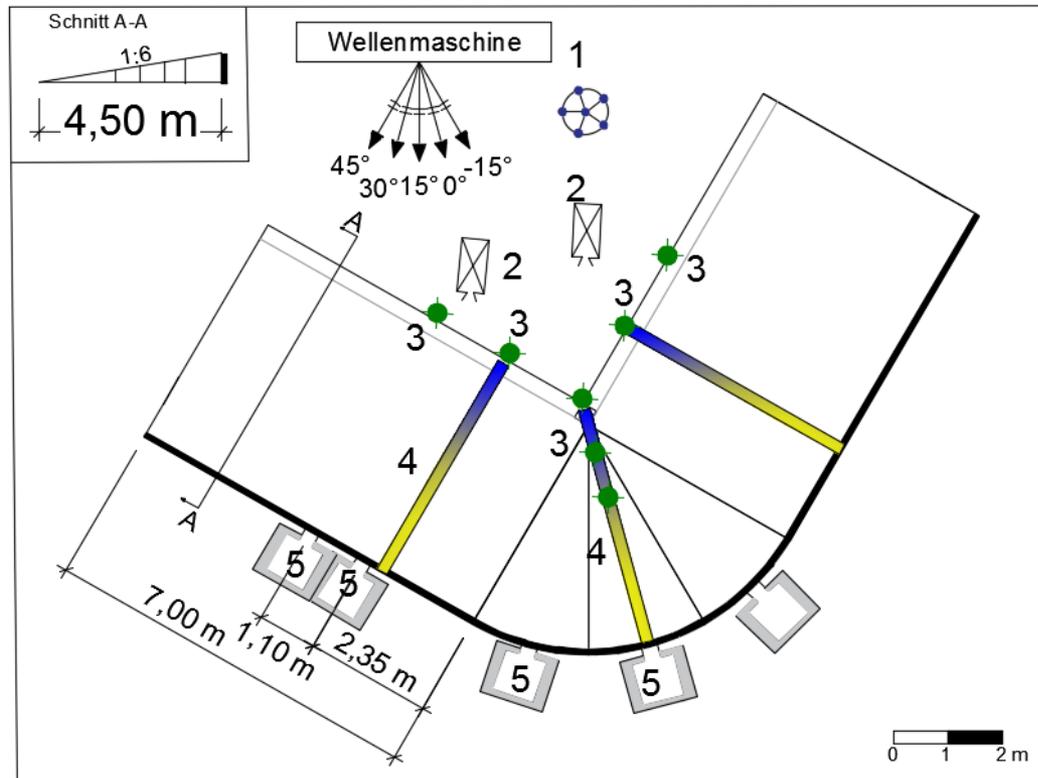
5 Überlaufbehälter



1 CERC6-Feld, 2 Kameras, 3 Wellenpegel, 4 Auflaufpegel, 5 Überlaufbehälter

### 3. Physikalische Untersuchungen

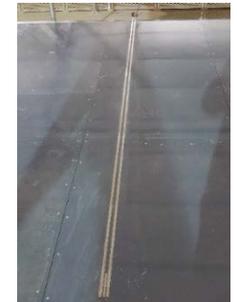
#### Versuchsaufbau konkaver Deich ( $\alpha_d=90^\circ$ )



Einzelement



4 Wellenauflaufpegel



5 Überlaufbehälter

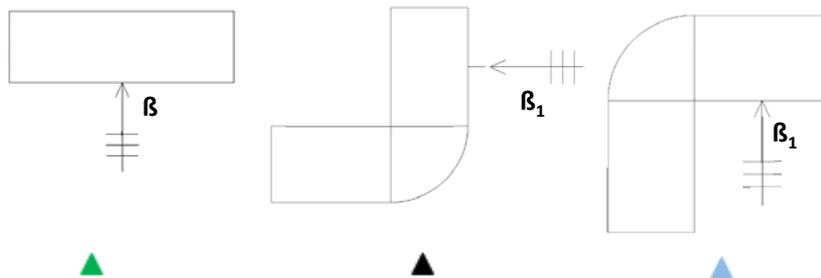
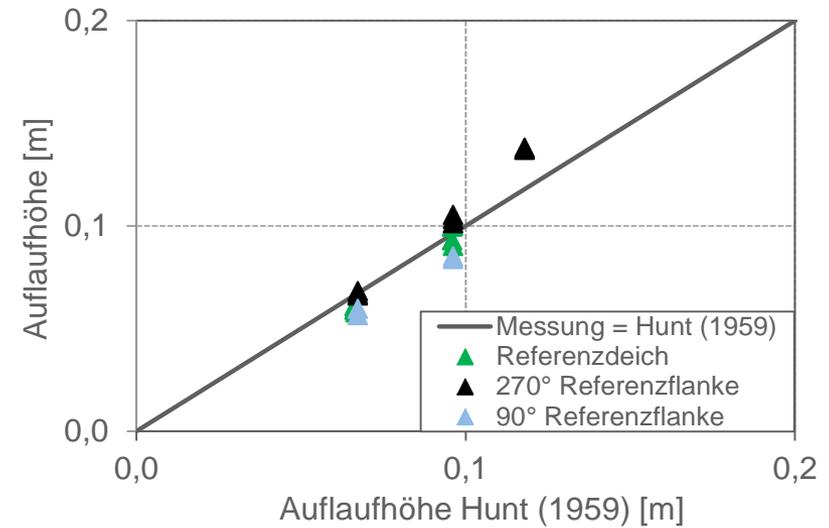


1 CERC6-Feld, 2 Kameras, 3 Wellenpegel, 4 Auflaufpegel, 5 Überlaufbehälter

### 3. Physikalische Untersuchungen

#### 2. Vergleichbarkeit

- Auflaufmessung an geradem Deich
- Referenzflanke bei konvexem Deich
- Referenzflanke bei konkavem Deich
- Vergleich mit theoretischen Werten nach Hunt (1959) für regelmäßige Wellen



H [m]	T [s]	Wassertiefe	$\xi$ [-]	$\beta_1$
0,07	1,22	0,55	0,96	0°
0,10	1,46	0,55	0,96	0°
0,10	1,79	0,55	1,18	0°



## 4. Ergebnisse

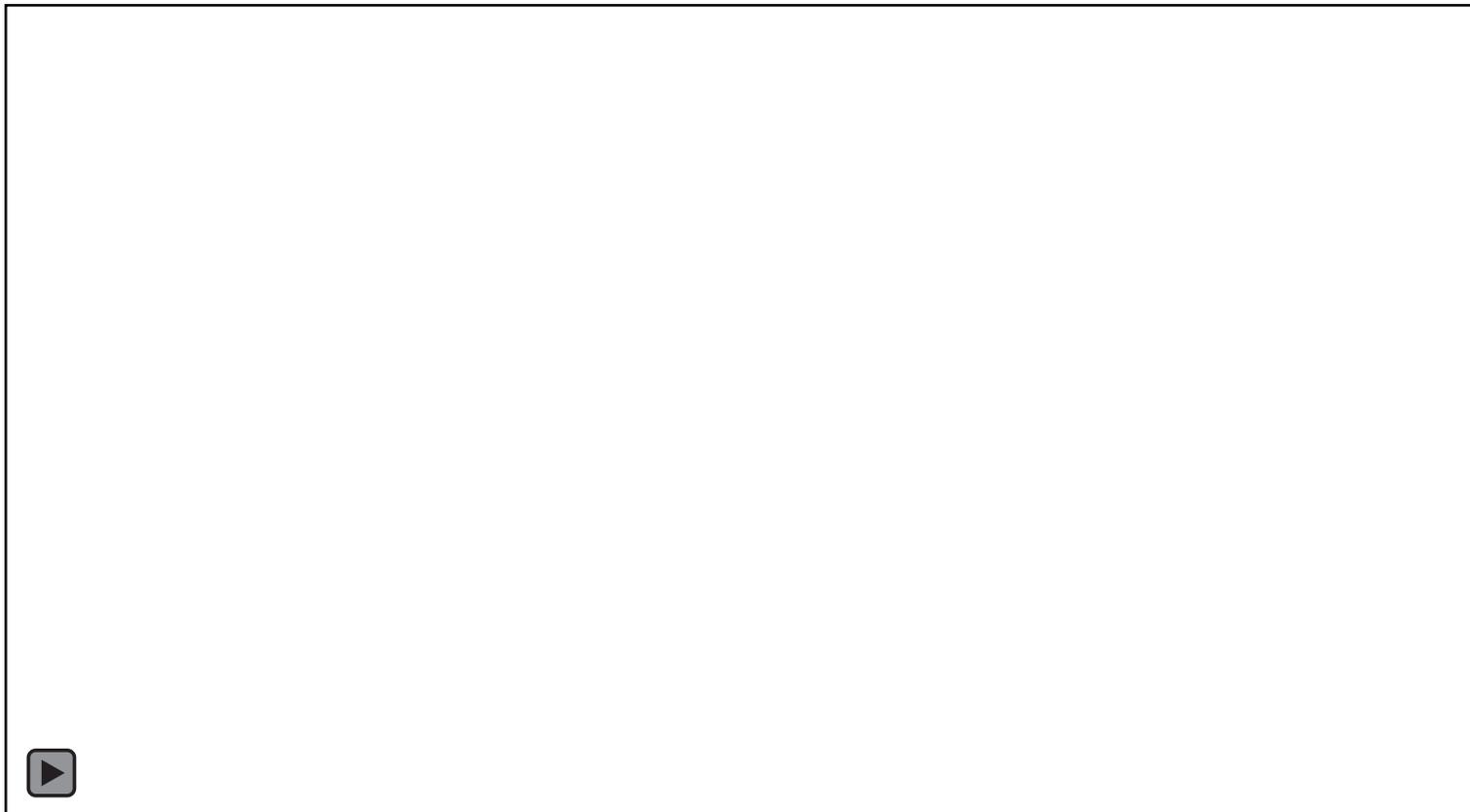
---

# Ergebnisse

## 4. Ergebnisse

### Transformationsprozesse am konvexen Deich

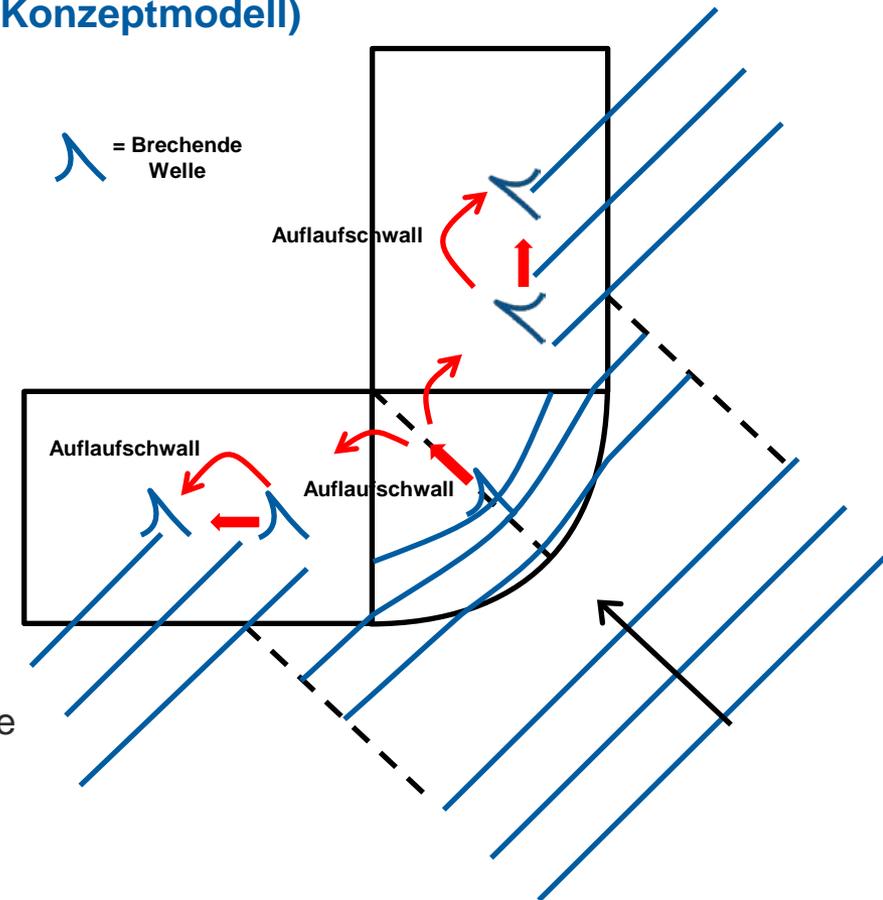
Regelmäßige Wellen;  $H=0,10$  m;  $T=0,80$  s;  $h=0,55$  m;  $R_c=0,20$  m;  $\beta_2=30^\circ$



## 4. Ergebnisse

### Transformationsprozesse am konvexen Deich (Konzeptmodell)

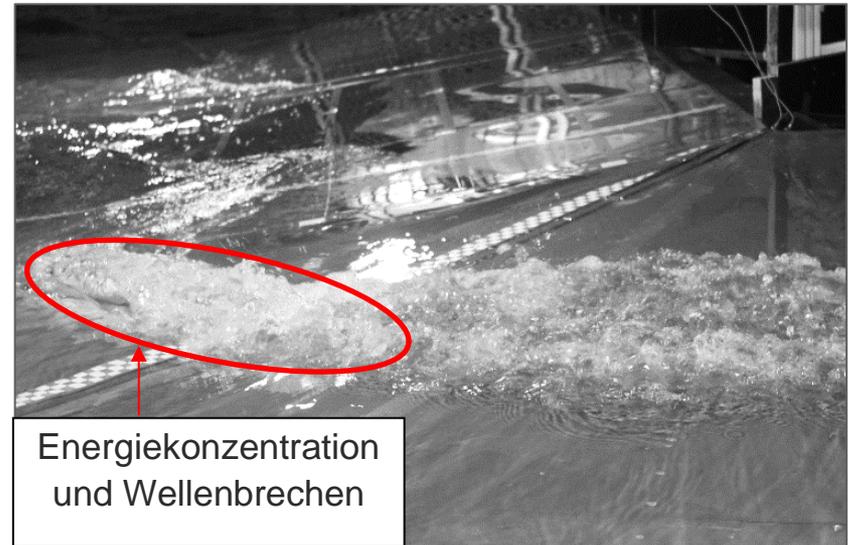
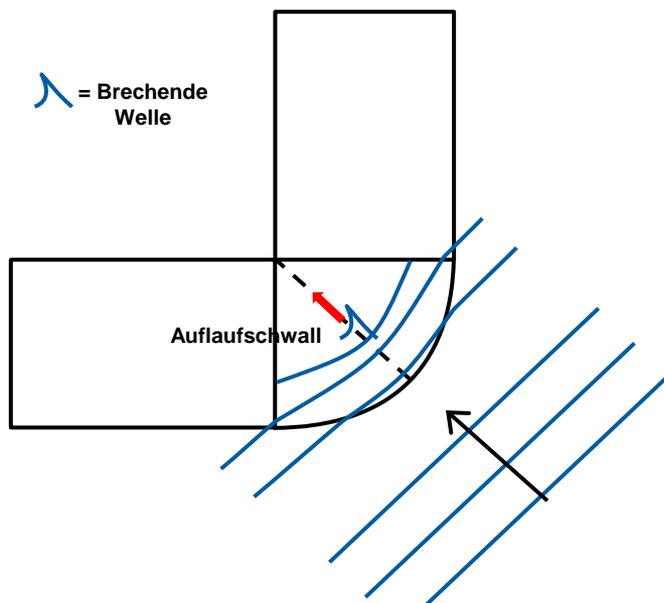
1. Einlaufende Wellen treffen zuerst auf konvexe Krümmung: Refraktion und Konzentration der einlaufenden Wellenenergie in Abhängigkeit der Wellenparametern
2. Shoaling und Wellenbrechen
3. Erhöhter Wellenauflauf auf konvexer Krümmung in Abhängigkeit der Wellenparameter (bis zu 25% erhöht)
4. Ableitung des Auflaufschwells in der Swash Zone in Richtung der Deichflanken
5. Interaktion des zu den Flanken abgeleiteten Ablaufschwells mit den schräg einlaufenden Wellen auf den Flanken
6. Bildung von Wellenwalzen entlang der Böschung, die einen pulsierenden unregelmäßigen Wellenauflauf erzeugen



## 4. Ergebnisse

### Transformationsprozesse am konvexen Deich

1. Einlaufende Wellen treffen zuerst auf konvexe Krümmung: Refraktion und Konzentration der einlaufenden Wellenenergie in Abhängigkeit der Wellenparametern
2. Shoaling und Wellenbrechen
3. Erhöhter Wellenauflauf auf konvexer Krümmung in Abhängigkeit der Wellenparameter (bis zu 25% erhöht)



Regelmäßige Wellen

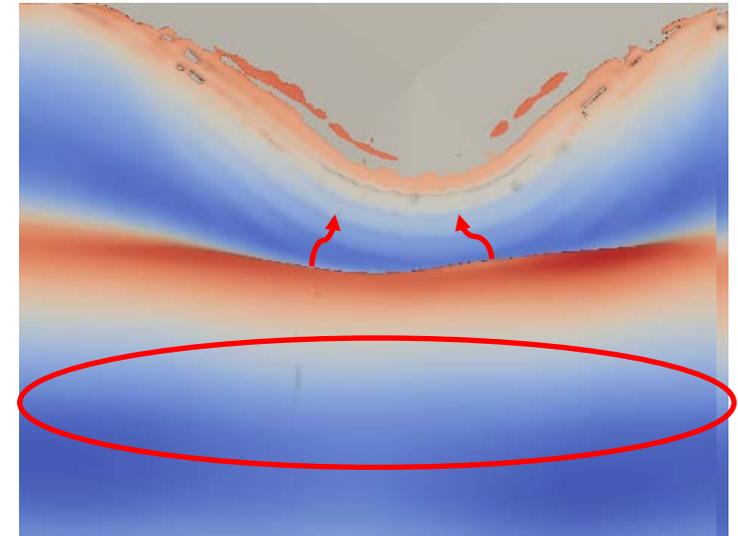
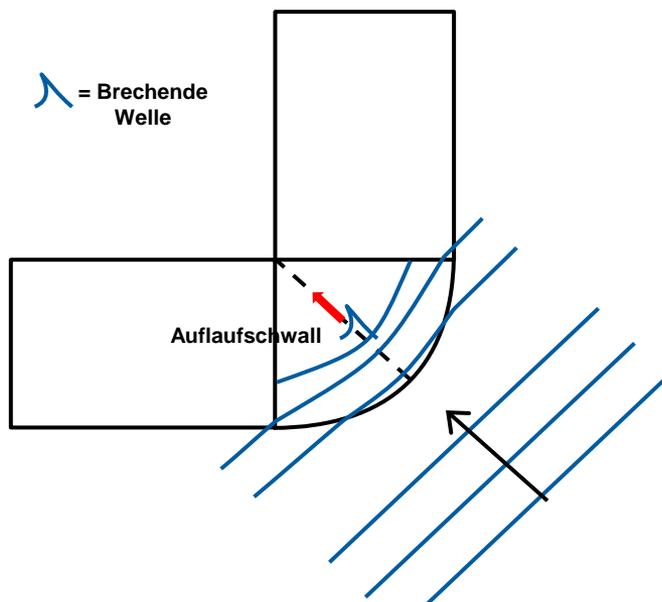
H [m]	T [s]	Wassertiefe	$\xi$ [-]
0,07	1,22	0,55	0,96
0,10	1,46	0,55	0,96
0,10	1,79	0,55	1,18

## 4. Ergebnisse

### Transformationsprozesse am konvexen Deich

Simulation aus olaFOAM

1. Einlaufende Wellen treffen zuerst auf konvexe Krümmung: Refraktion und Konzentration der einlaufenden Wellenenergie in Abhängigkeit der Wellenparametern
2. Shoaling und Wellenbrechen



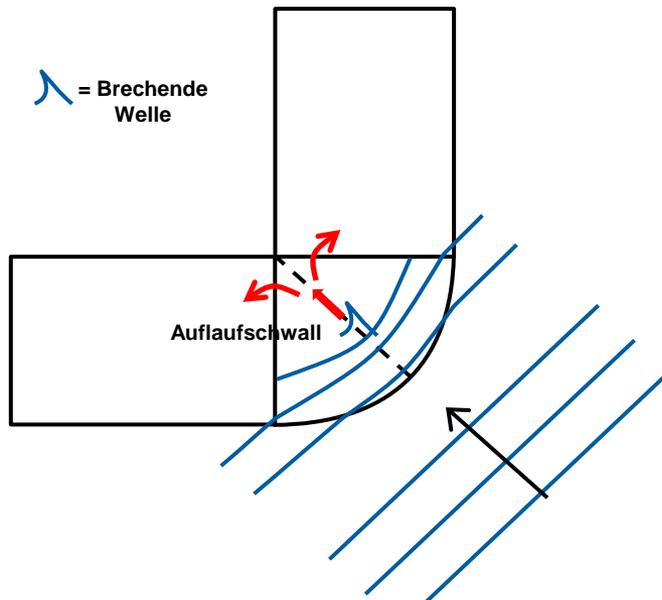
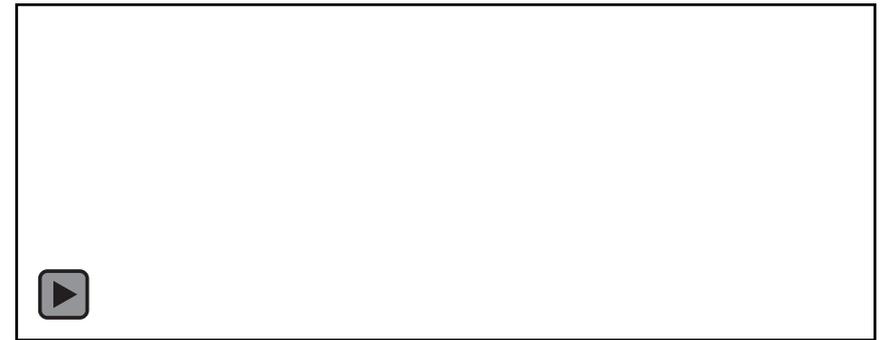
Regelmäßige Wellen

H [m]	T [s]	Wassertiefe	$\xi$ [-]
0,10	1,46	0,55	0,96

## 4. Ergebnisse

### Transformationsprozesse am konvexen Deich

4. Ableitung des Auflaufschwalls in der Swash Zone in Richtung der Deichflanken



Regelmäßige Wellen

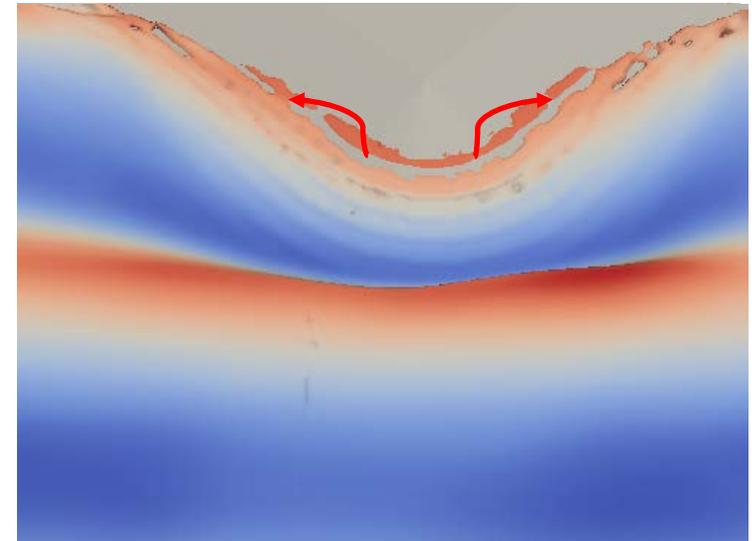
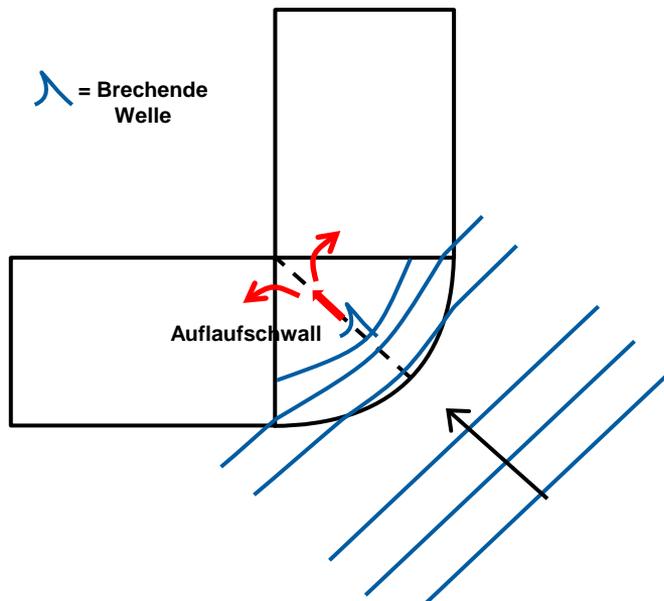
H [m]	T [s]	Wassertiefe	$\xi$ [-]	$\beta_2$
0,10	1,46	0,55	1,18	0°

## 4. Ergebnisse

### Transformationsprozesse am konvexen Deich

#### Simulation mit olaFOAM

4. Ableitung des Auflaufschwalls in der Swash Zone in Richtung der Deichflanken



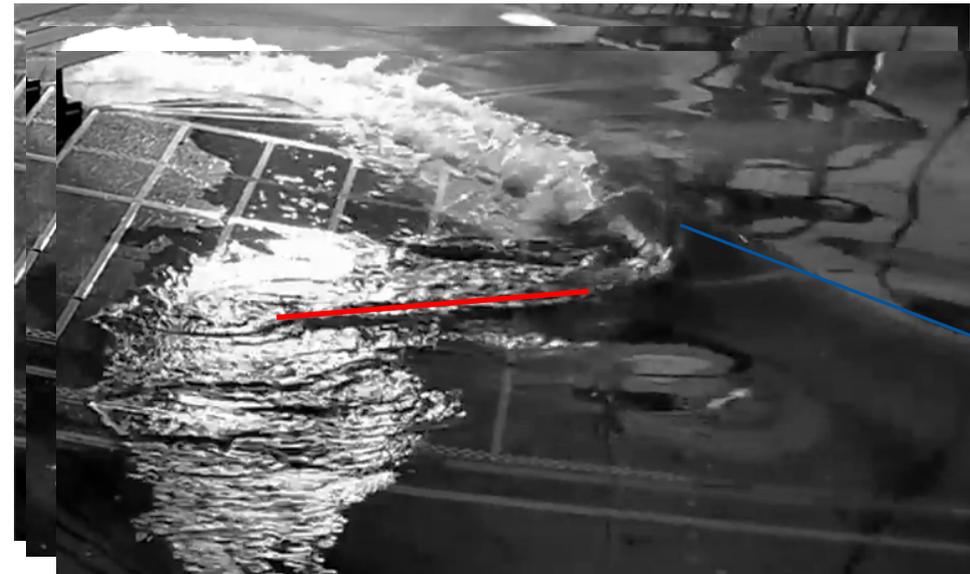
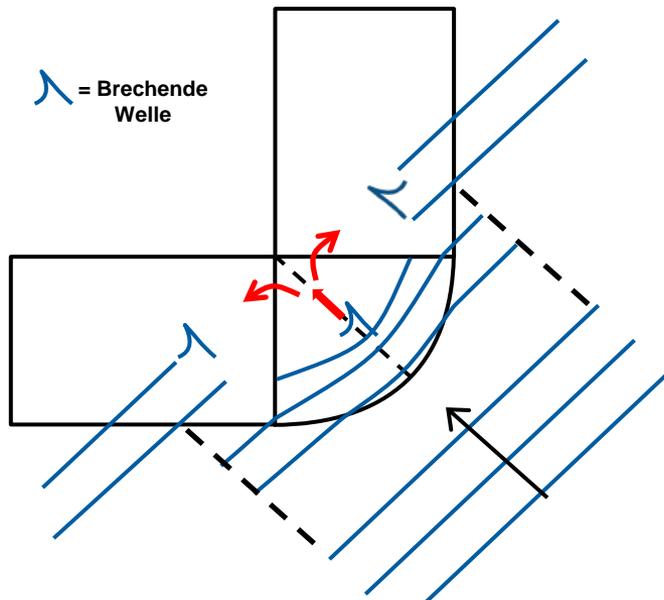
Regelmäßige Wellen

H [m]	T [s]	Wassertiefe	$\xi$ [-]	$\beta_2$
0,10	1,46	0,55	1,18	0°

## 4. Ergebnisse

### Transformationsprozesse am konvexen Deich

5. Interaktion des zu den Flanken abgeleiteten Ablaufschwalls mit den schräg einlaufenden Wellen auf den Flanken (hier: Diffraktionsflanke)



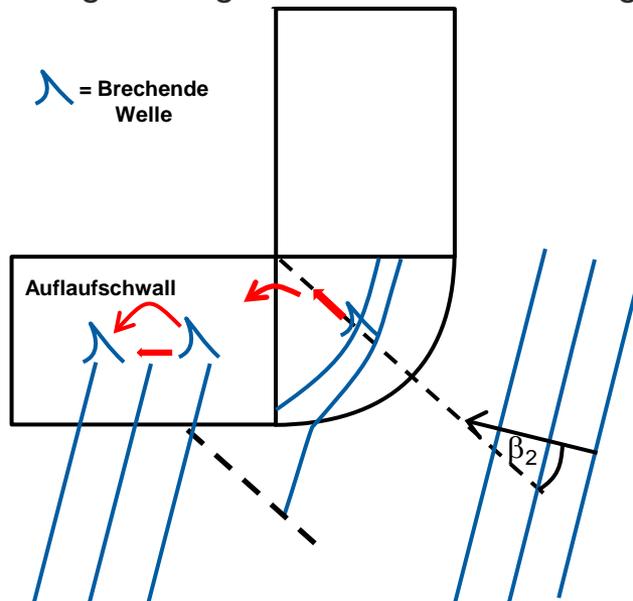
Regelmäßige Wellen

H [m]	T [s]	Wassertiefe	$\xi$ [-]	$\beta_2$
0,10	1,79	0,55	1,18	0°

## 4. Ergebnisse

### Transformationsprozesse am konvexen Deich

5. Interaktion des zu den Flanken abgeleiteten Ablaufschwalls mit den schräg einlaufenden Wellen auf den Flanken (hier: Diffraktionsflanke)
6. Bildung von Wellenwalzen entlang der Böschung, die einen pulsierenden unregelmäßigen Wellenauflauf erzeugen



Regelmäßige Wellen

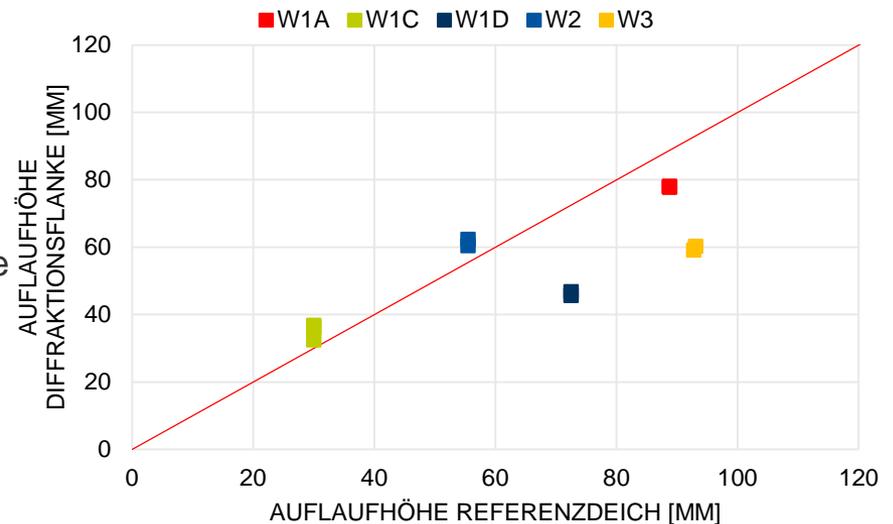
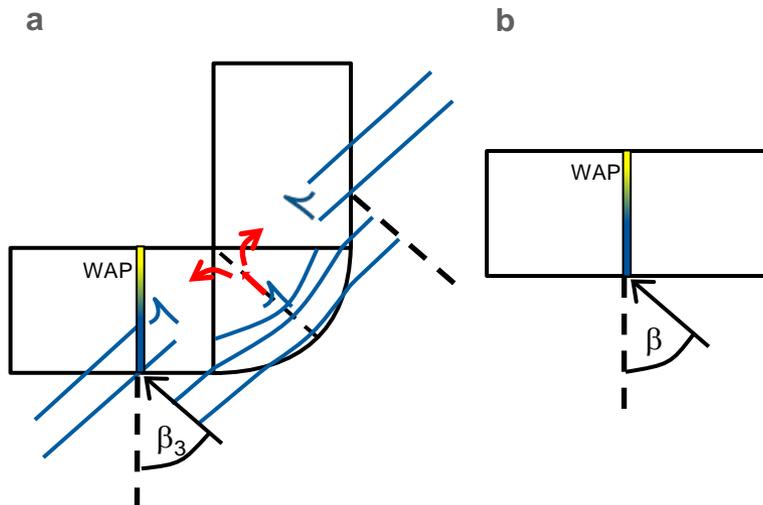
H [m]	T [s]	Wassertiefe	$\xi$ [-]	$\beta_2$
0,10	1,79	0,55	1,18	30°

Bei sehr schrägem Wellenangriff auf der Diffraktionsflanke scheinbares Aufsteilen der Wellenwalze durch Interaktion mit Wellenablaufschwall

## 4. Ergebnisse

### Transformationsprozesse am konvexen Deich

- Vergleich der Auflauhöhen für  $\beta=45^\circ$ :
  - Konvexer Deich ( $270^\circ$ ) (a) an Diffraktionsflanke ( $\beta_3$ )
  - Gerader Deich ( $180^\circ$ ) (b) ( $\beta$ )
- Streuung der Auflauhöhen auf der Diffraktionsflanke in Abhängigkeit der Wellenparameter, des Angriffswinkels und des Messpunktes



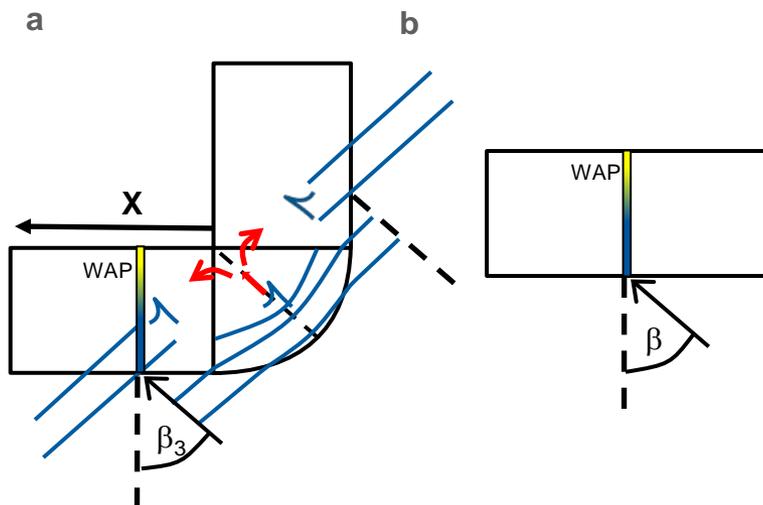
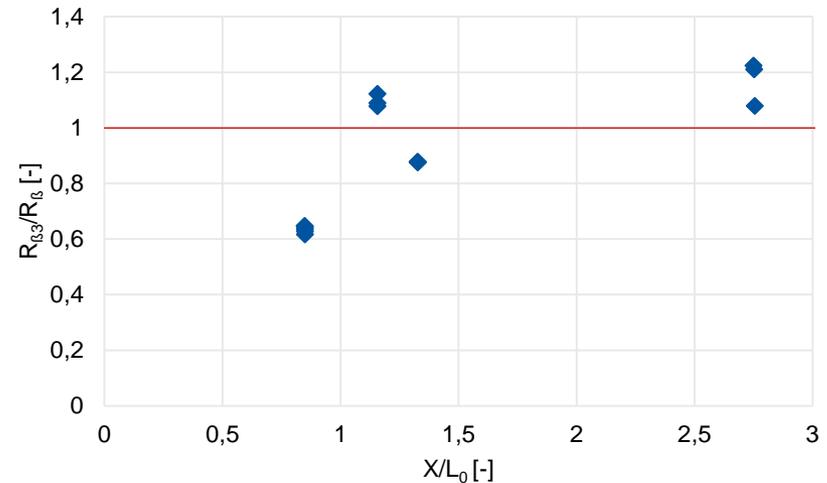
Regelmäßige Wellen

Seegang	H [m]	T [s]	Wassertiefe	$\xi$ [-]	$\beta_3$ bzw. $\beta$
W1A	0,10	1,15	0,55	0,75	$45^\circ$
W1C	0,05	0,80	0,55	0,53	$45^\circ$
W1D	0,05	1,44	0,55	1,26	$45^\circ$
W2	0,07	1,23	0,55	0,98	$45^\circ$
W3	0,10	1,44	0,55	0,98	$45^\circ$

## 4. Ergebnisse

### Transformationsprozesse am konvexen Deich

- Vergleich der Auflaufhöhen bei schrägem Wellenangriff ( $45^\circ$ ) auf geradem Deich (b) und der Diffraktionsflanke des konvexen Deichs (a)
- Einfluss der konvexen Krümmung nimmt mit relativem Abstand  $x/L_0$  zur Krümmung ab
- Überlauf nimmt ab bis wieder die Verhältnisse eines geraden Deichs erreicht sind (kein Einfluss der Krümmung)



Regelmäßige Wellen

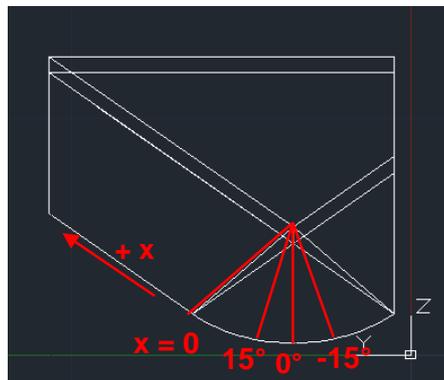
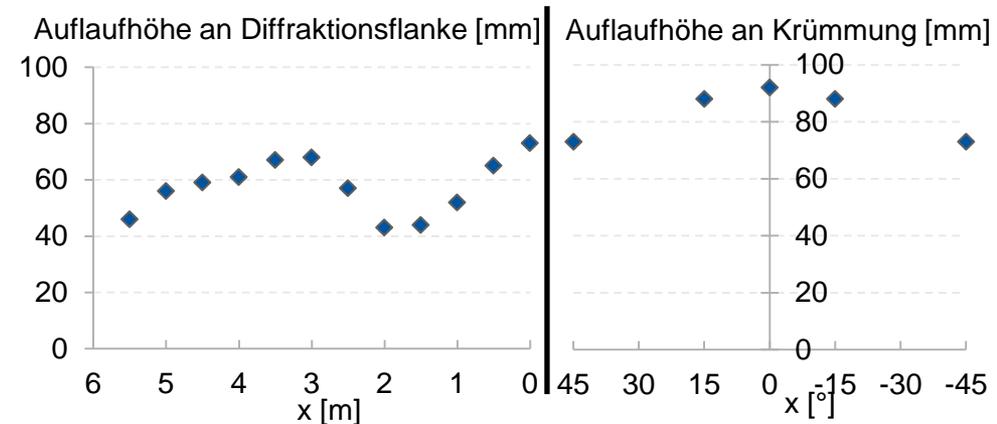
Seegang	H [m]	T [s]	Wassertiefe	$L_0$	$\xi$ [-]	$\beta_3$ bzw. $\beta$
W1A	0,10	1,15	0,55	2,1	0,75	$45^\circ$
W1C	0,05	0,80	0,55	1,0	0,53	$45^\circ$
W1D	0,05	1,44	0,55	3,2	1,26	$45^\circ$
W2	0,07	1,23	0,55	2,4	0,98	$45^\circ$
W3	0,10	1,44	0,55	3,2	0,98	$45^\circ$

## 4. Ergebnisse

### Transformationsprozesse am konvexen Deich

#### Simulation mit olaFOAM

- Simulation des Wellenaufbaus auf der Diffraktionsflanke mithilfe von olaFOAM
- Auflaufhöhen auf der Krümmung des konvexen Deichs ( $\beta_2=0^\circ$ )
- Pulsierender Wellenaufbau entlang der Diffraktionsflanke



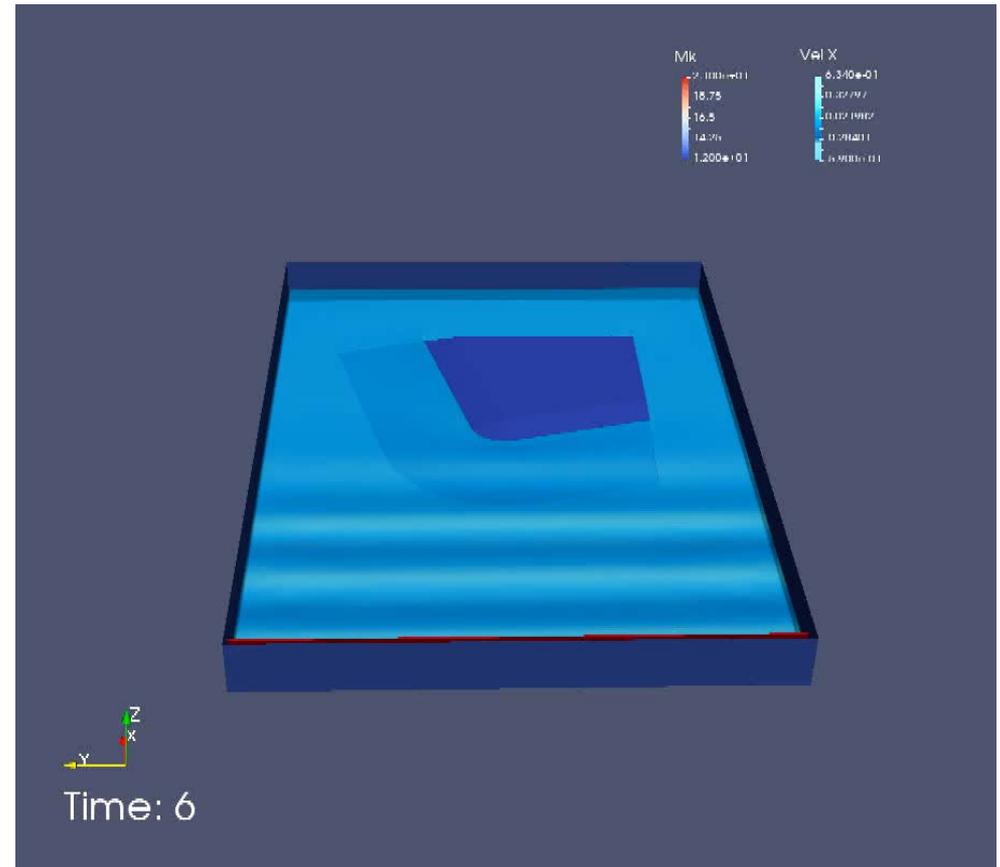
H [m]	T [s]	Wassertiefe	$\xi$ [-]	$\beta_2$
0,10	1,46	0,55	0,98	$0^\circ$

## 4. Ergebnisse

### Transformationsprozesse am konvexen Deich

#### Simulation mit DualSPHysics

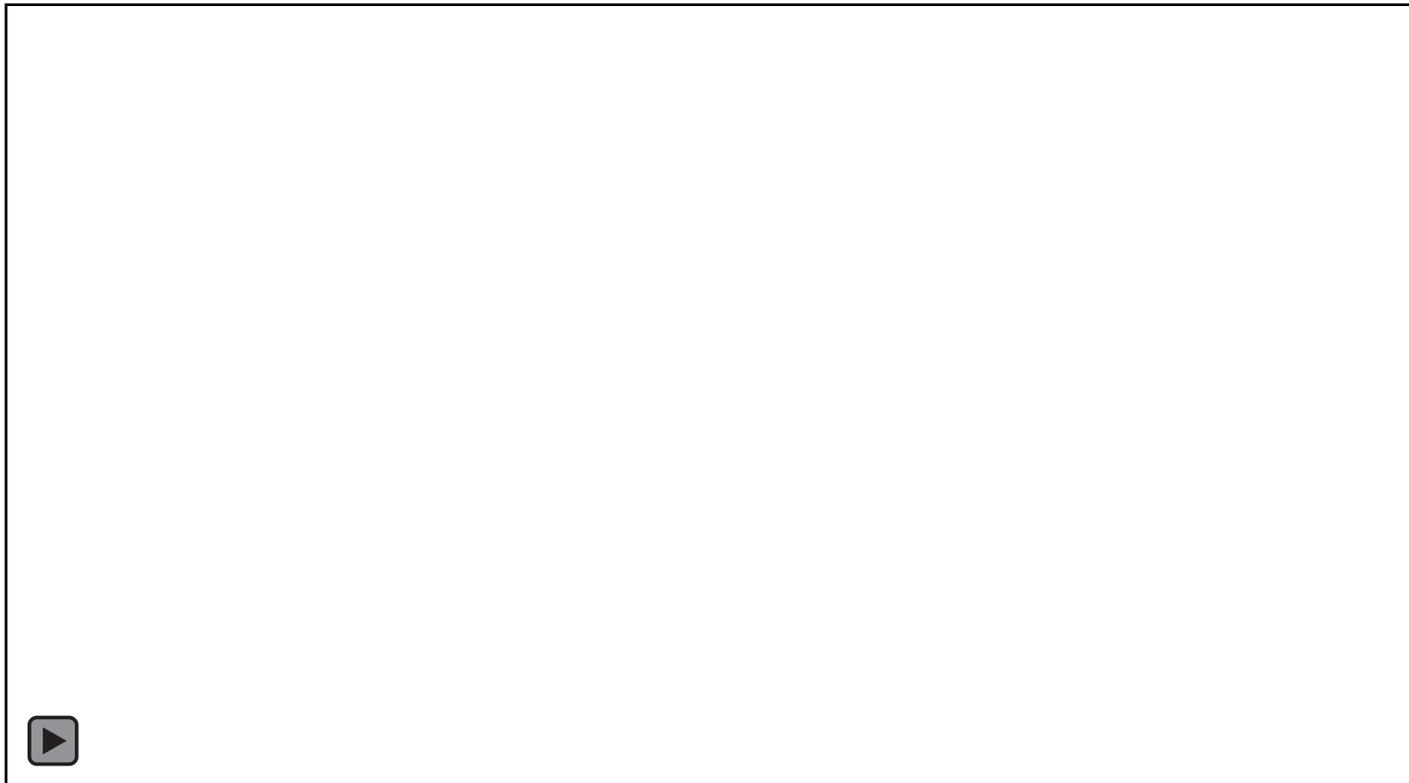
- Analysen mit DualSPHysics zum Vergleich
  - der unterschiedlichen numerischen Methoden
  - der Prozessabbildung
  - der Wellenauflaufabbildung



## 4. Ergebnisse

### Transformationsprozesse am konkaven Deich

Regelmäßige Wellen;  $H=0,10$  m;  $T=1,45$  s;  $h=0,55$  m;  $R_c=0,20$  m;  $\beta_2=0^\circ$





## 4. Ergebnisse

### Transformationsprozesse am konkaven Deich

1. Einlaufende Wellen treffen zunächst auf die Flanken (schräger Wellenangriff): Shoaling und Wellenbrechen



2. Schräger Wellenaufschwall auf den Flanken



## 4. Ergebnisse

### Transformationsprozesse am konkaven Deich

- Wellenablauf konzentriert in der konkaven Deichkrümmung
- Interaktion von Wellenablaufschwall mit einlaufender Welle: Beeinflussung des Wellenbrechens



## 4. Ergebnisse

### Transformationsprozesse am konkaven Deich

- Wellenaufbauhöhe in der konkaven Ecke ungleichmäßig und größer als erwartet
- Starke Rückströmung (Rippströmung) in der konkaven Ecke durch Konzentration des Wellenablaufschwalls: Beeinflussung der einlaufenden Wellen



## Ausblick

- **Überführung der Konzeptmodelle in prozessbasierte Modelle**
- **Untersuchung der hydrodynamischen Prozesse an der Deichkrümmung (pulsierender Wellenauflauf)**
- **Zusammenführung der Ergebnisse aus physikalischer und numerischer Modellierung**
- **Ergebnisse zum Einfluss des Öffnungswinkels auf Wellenauflauf und -überlauf in Abhängigkeit der einlaufenden Wellenparameter Anfang 2018 zu erwarten**

## Danksagung

Das Projektteam dankt dem BMBF für die finanzielle Unterstützung und dem KFKI für die fachliche Begleitung des ConDyke-Projektes



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



KFKI