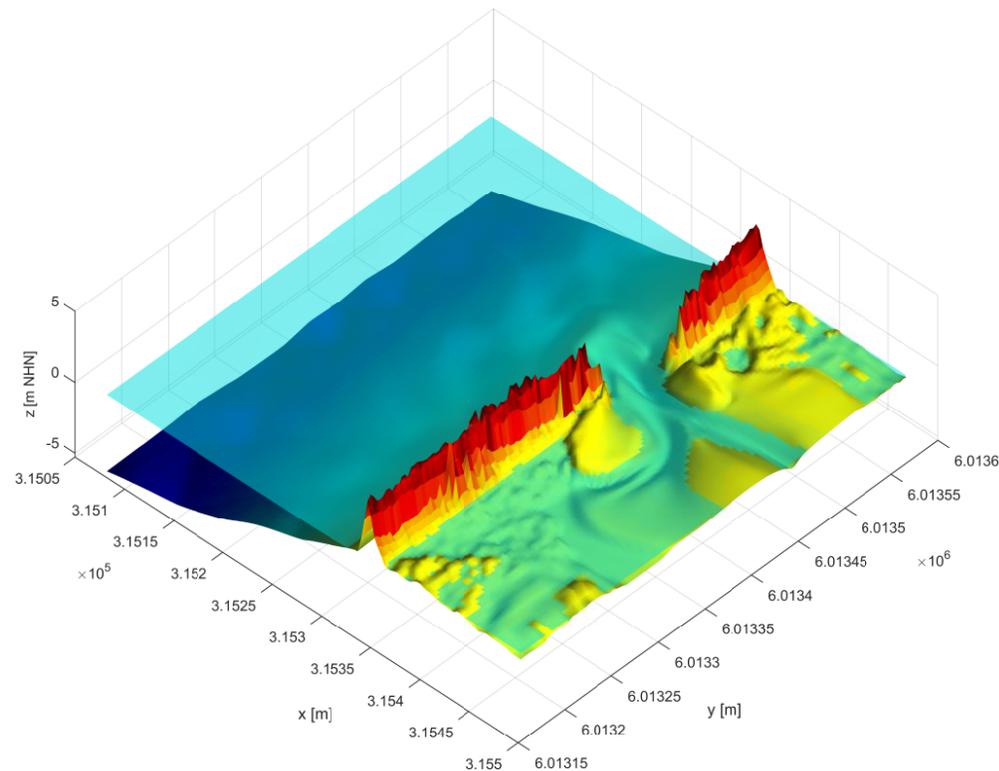


# PADO – Numerische Modellierungen



**Constantin Schweiger, M.Sc.**  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf

am 24.03.2021

Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und  
Wasserwirtschaft  
RWTH Aachen University

*Kontakt:*

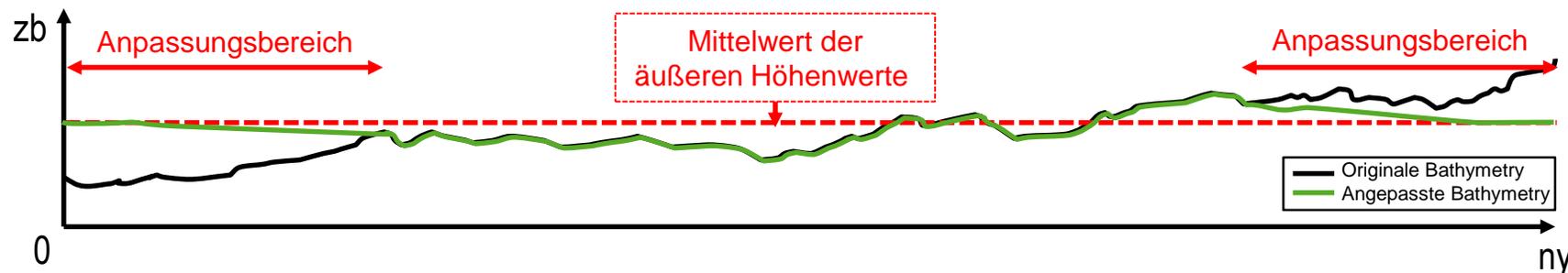
*Tel:* 0241 8025162

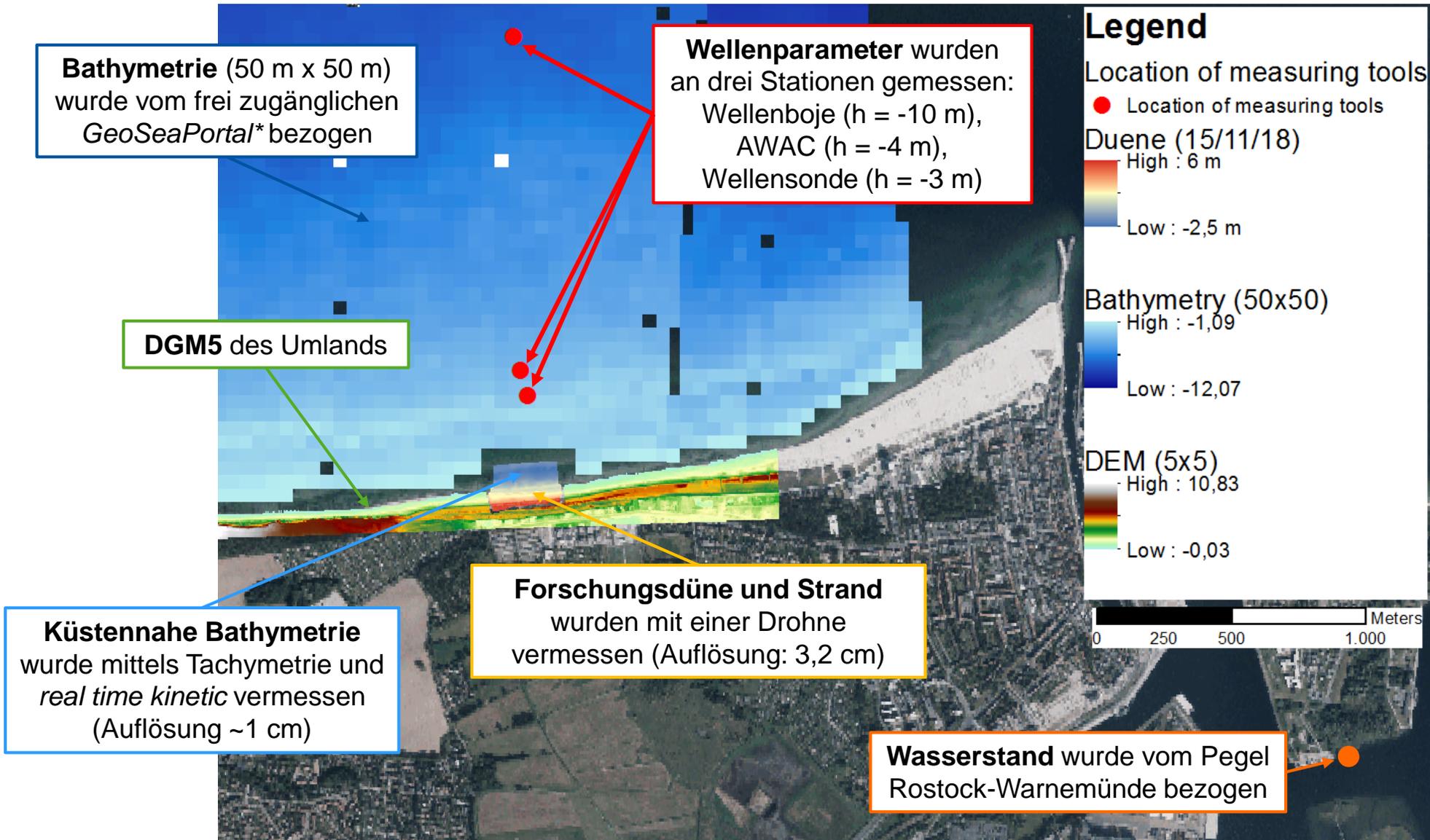
*E-Mail:* [schweiger@iww.rwth-aachen.de](mailto:schweiger@iww.rwth-aachen.de)

- Einführung
- Modellaufbau und -kalibrierung am Beispiel der Versuchsdüne
- Zeitliche Analyse des Dünenversagens
- Modellierung der “Zeetje”-Sturmflut am *Hütelmoor*
- Modellanwendung: *Pilotgebiet (PG) Ahrenshoop*
- Zentrale Erkenntnisse

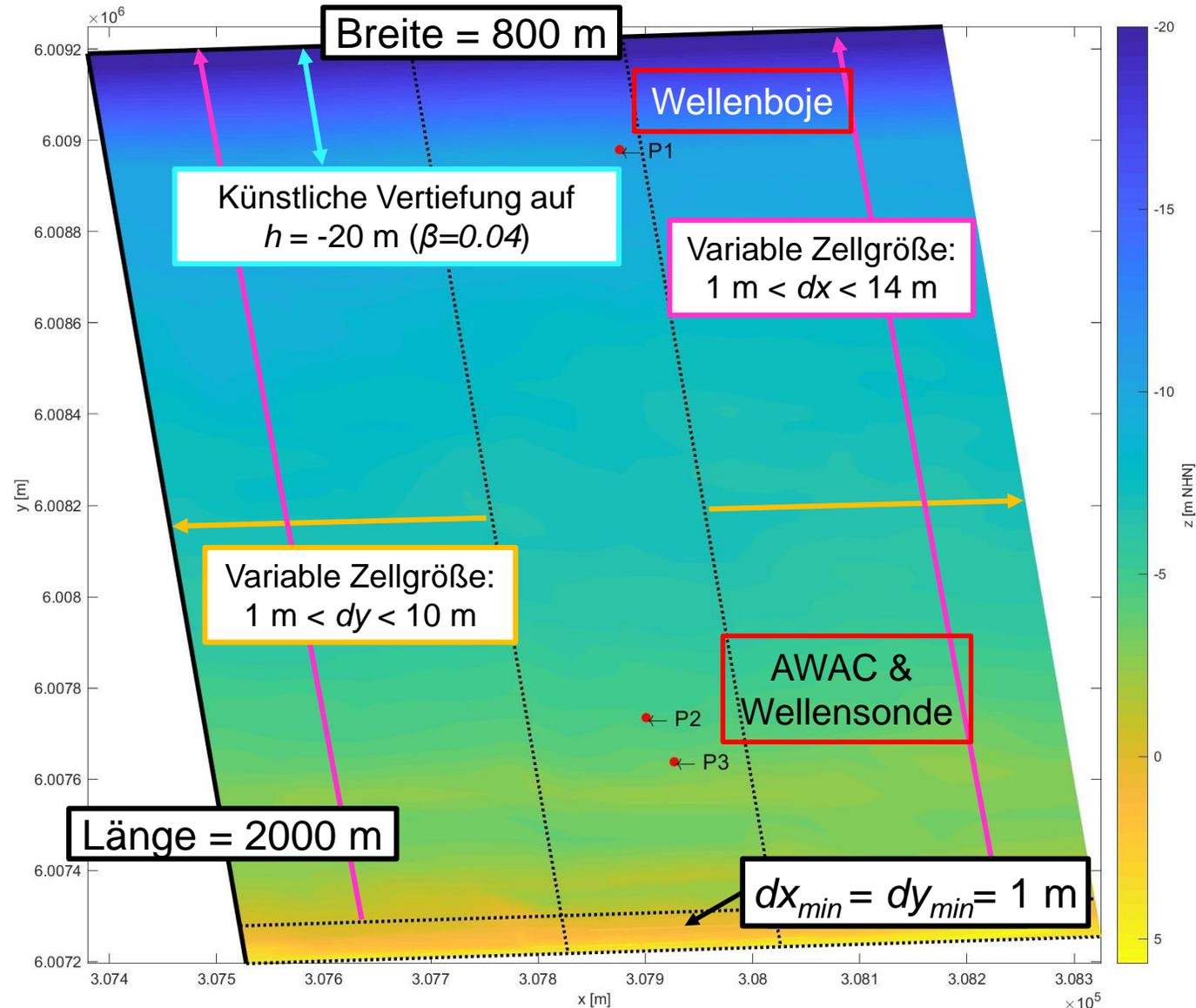
- XBeach (Roelvink et al. 2009): *eXtreme Beach behaviour*
  - Open-source!
  - Entwicklung aufgrund der Hurrikan-Ereignisse 2004 und 2005 durch u.a. Deltares
  - 2DH\*-Modell für die sturmflutbedingte Erosion sandiger Küstenabschnitte
  - Zeitlich-variierende Wellen- und Wasserstandsrandbedingungen
  - hydrodynamische Prozesse:
    - Ausbreitung und Transformation kurz- und langperiodischer Wellen
    - Welleninduzierte Strömungen
    - Basis: *wave-action-balance* und *2D-Flachwassergleichungen*
  - morphodynamische Prozesse:
    - Sedimenttransport und Sohländerungen
    - *Avalanching* Mechanismus für die (2D) sturmflutbedingte Dünenerosion
    - Basis: *Advektions-Diffusions-Gleichung* und *Exner-Gleichung*

- Aufbereitung der Rohdaten mit ArcGIS
- Modellgittererstellung mit MATLAB unter Berücksichtigung verschiedener Kriterien und Verwendung der Deltares *Open Earth Toolbox*:
  - Ausreichende Wassertiefe am Modelleinlauf ( $h \geq 20$  m)
  - Variable Zellgröße:
    - Feinere Auflösung im untersuchungsrelevanten Bereich ( $dx_{min}$  ( $dy_{min}$ )  $\sim 1$  m – 4 m)
    - Ansteigende Zellgröße in Richtung Einlaufrand und Modellränder ( $dx_{max}$  ( $dy_{max}$ )  $\sim >10$  m)
  - Verwendung der XBeach MPI\* Version für größere Modellgebiete empfehlenswert:
    - Aufteilung in mehrere Teilgebiete während Simulation (ein Teilgebiet pro CPU-Kern)
    - Anpassung der Modellränder notwendig:

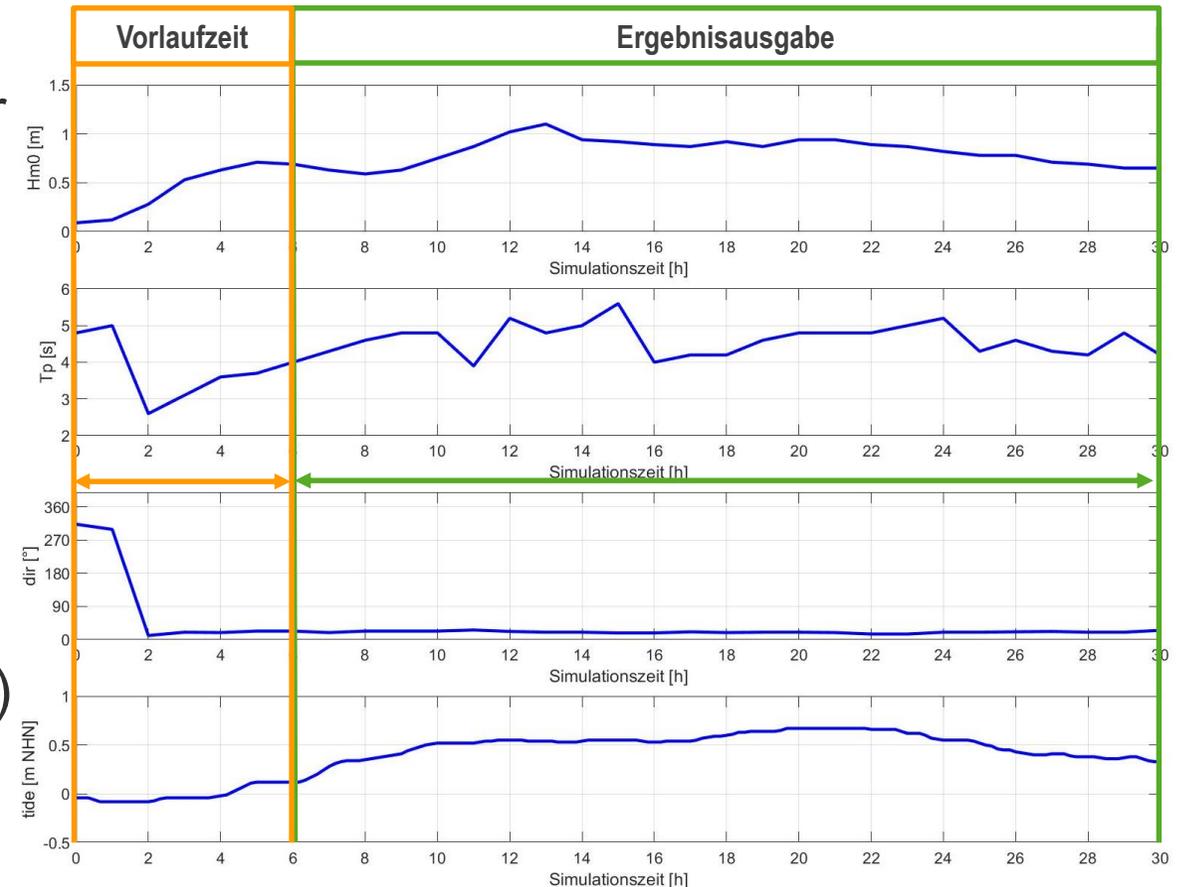




$n_x = 279$   
 $n_y = 324$



- Hydrodyn.-Randbedingungen:
  - Surfbeat-Ansatz
  - Stündlich variierende/r Wellenparameter ( $T_p$ ,  $H_{m0}$ ,  $dir$ ) und Wasserstand
- Sediment:
  - $D50 = 0.3 \text{ mm}$  ( $D90 = 0.5 \text{ mm}$ )
  - Rauheit:
    - Manning mit  $n = 0.02 \text{ s/m}^{1/3} = \text{konst.}$
- Zeitliche Diskretisierung:
  - Simulationsdauer: 30 h (inkl. Vorlaufzeit)
- XBeach Version:
  - MPI-Version 1.23.5526 des XBeach-X release (3 CPU Kerne)



Hydrodynamische Randbedingungen

- Variation einer Vielzahl von Modellparametern (s. Anhang)
- Kombinationen sensibler Modellparameter (bspw. *facua*, *gamma*, *wetslp*)
- Untersuchung des Einflusses der küstennahen Bathymetrie und des Strandbereiches vor Versuchsdüne (s. SCHWEIGER ET AL. 2020)
  - **Aber: Anwendung der default-Parameter führte bereits zu einer hohen Übereinkunft zwischen Simulation und Messung!**
- Hydrodynamik:
  - Gute Übereinkunft der  $H_{m0}$ -Wellenhöhen im Nahküstenbereich ( $h = -3$  m) während Belastung der Versuchsdüne mit  $\text{Bias}_{H_{m0}} = -0.04$  m (s. Anhang)

- Bewertung der Morphodynamik anhand verschiedener Parameter, um Vor-/Nachteile der einzelnen auszugleichen
- Anwendung qualitativer (○) und quantitativer (▪) Kriterien:

- Vergleich von Quer- und Längsprofilen
- Vergleich von Geländehöhendifferenzen
- Vergleich der Erosionsvolumina

- Brier-Skill-Score:

$$BSS = 1 - \frac{\sum_1^n (zb_c - zb_m)^2}{\sum_1^n (zb_i - zb_m)^2}$$

- Mittlere quadratische Abweichung:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (zb_c - zb_m)^2}$$

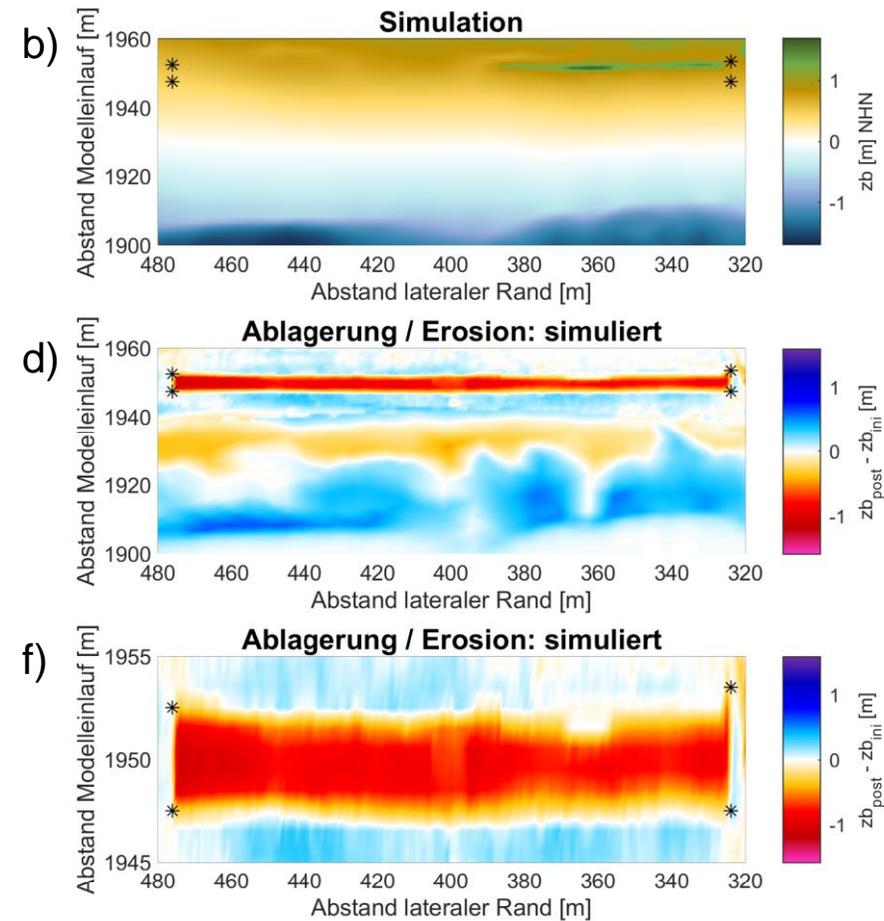
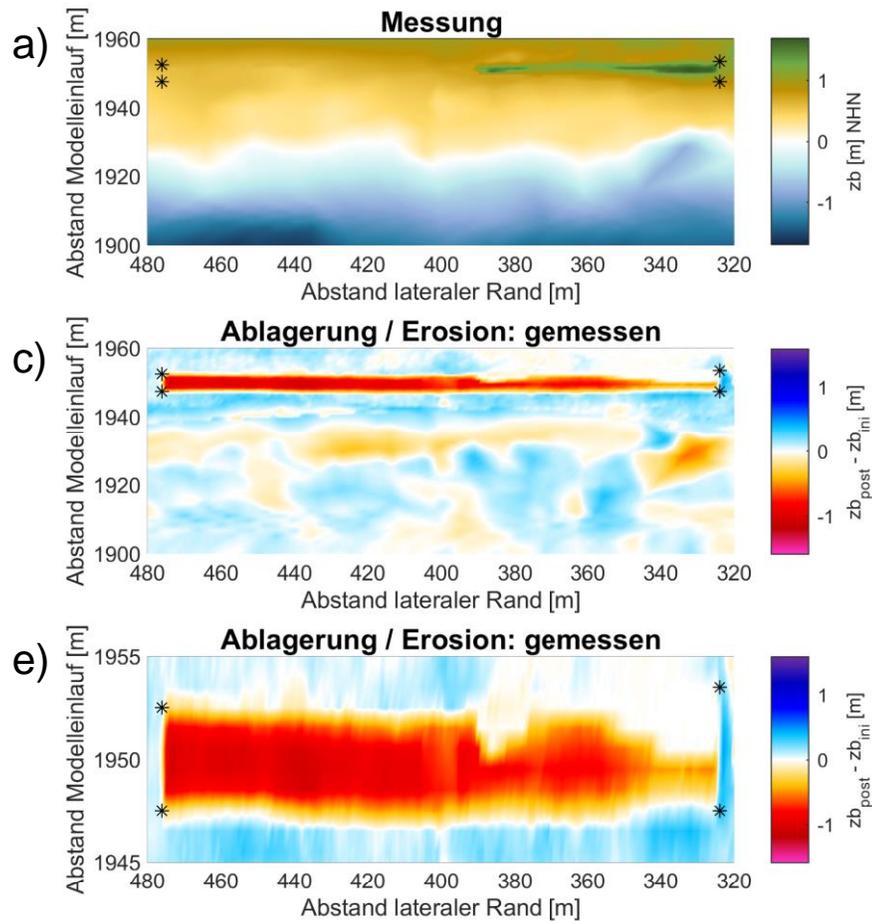
- Systematischer Fehler:

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_1^N (zb_c - zb_m)$$

BSS Wertebereich	Bewertung
$BSS < 0$	Schlecht
$0 \leq BSS < 0,3$	Schach
$0,3 \leq BSS < 0,6$	Akzeptabel
$0,6 \leq BSS < 0,8$	Gut
$0,8 \leq BSS < 1,0$	Sehr gut

s. SUTHERLAND ET AL. (2004) & VAN RIJN (2003)

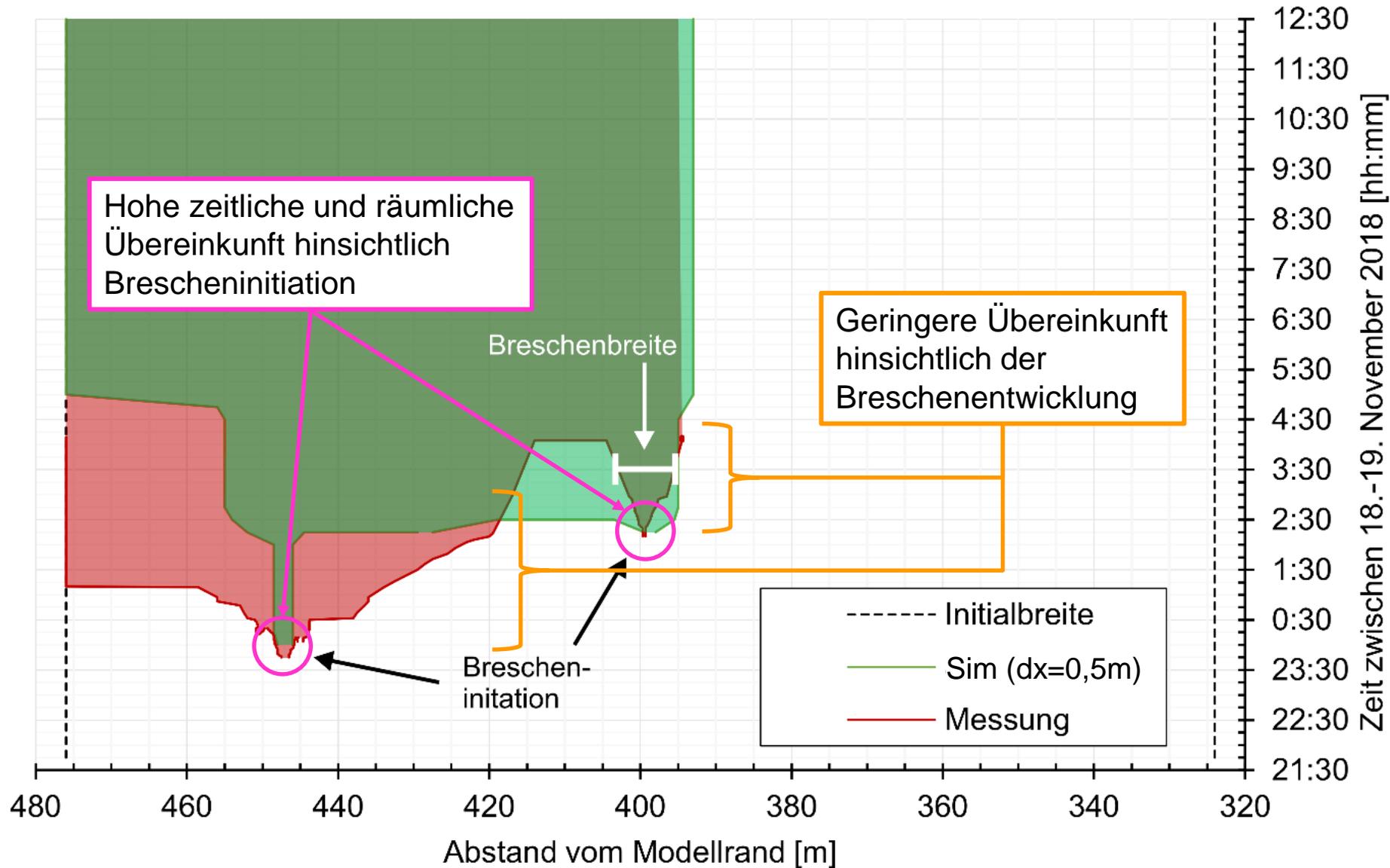
Mit  $zb_c$ : final berechnete Höhenlage,  $zb_m$ : final gemessene Höhenlage,  $zb_i$ : initiale Höhenlage,  $N$ : Anzahl Datenpunkte



Bereich	BSS	Bias	RMSE
zb < 0 m NHN	-2,63	7,87 cm	18,15 cm
zb > 0 m NHN	0,55	-8,33 cm	13,73 cm
zb (dune)	0,82	-2,75 cm	14,47 cm

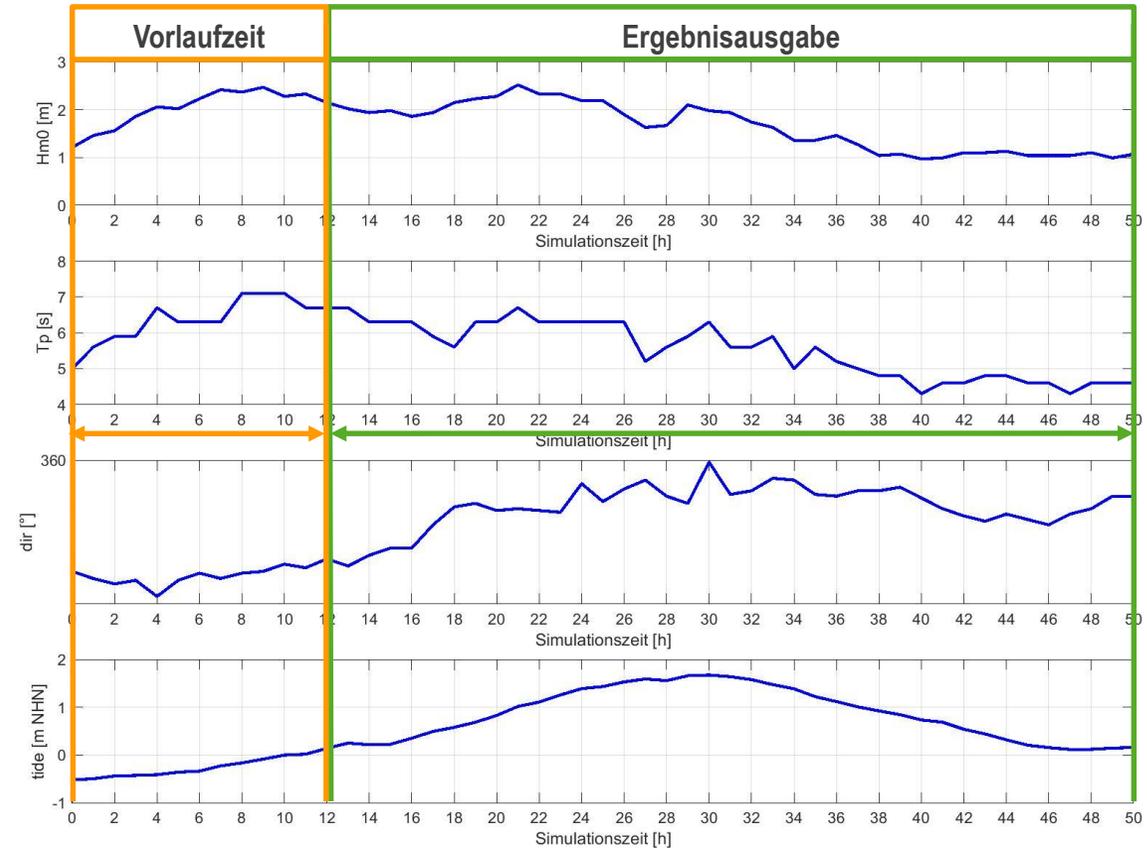
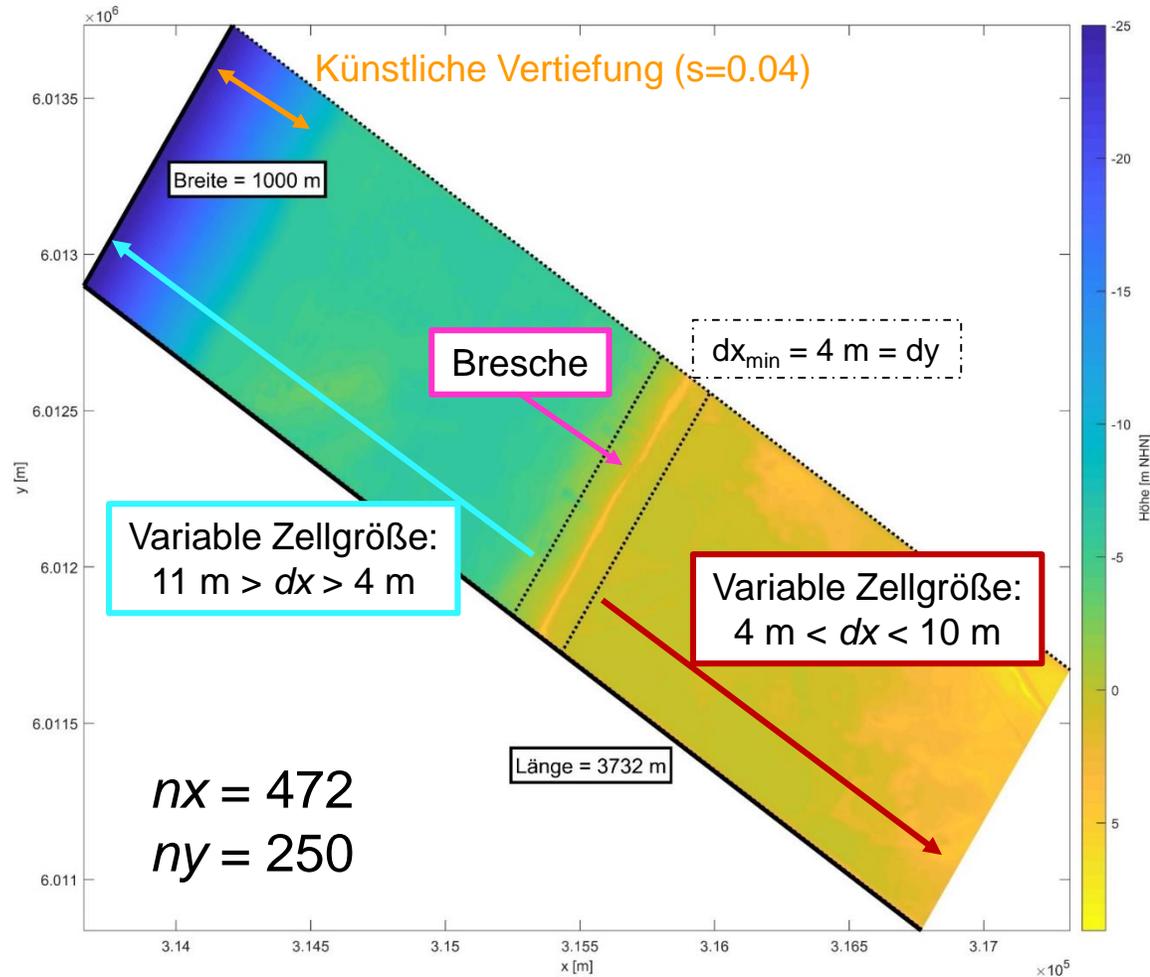
	$V_{ini} = 721 \text{ m}^3$	$V_{fin}$	$\Delta V$
Messung		$289 \text{ m}^3$	$-432 \text{ m}^3 (-60 \%)$
Simulation		$261 \text{ m}^3$	$-460 \text{ m}^3 (-64 \%)$





- Wesentliche Erkenntnisse:
  - Anwendung der default-Werte führt zu hoher Modellgenauigkeit hinsichtlich der finalen Dünenerosion (BSS = 0,82)
  - Zeitliche Analyse zeigt gute Übereinstimmung bzgl. Zeitpunkt und Entstehungsort der Breschen
  - Abweichungen hinsichtlich der Breschenentwicklung
  
- Weitere Erkenntnisse (nicht Teil dieser Präsentation):
  - Hoher Einfluss der küstennahen Bathymetrie sowie des Strandbereiches vor der Versuchsdüne (s. SCHWEIGER ET AL. 2020)
  - Geringe Verbesserung der Modellgenauigkeit durch morph. Kalibrierung
  
- *Folglich: Hohe Modellgenauigkeit, wenn aktuelle und hochaufgelöste Bathymetrie- und Geländedaten vorliegen*

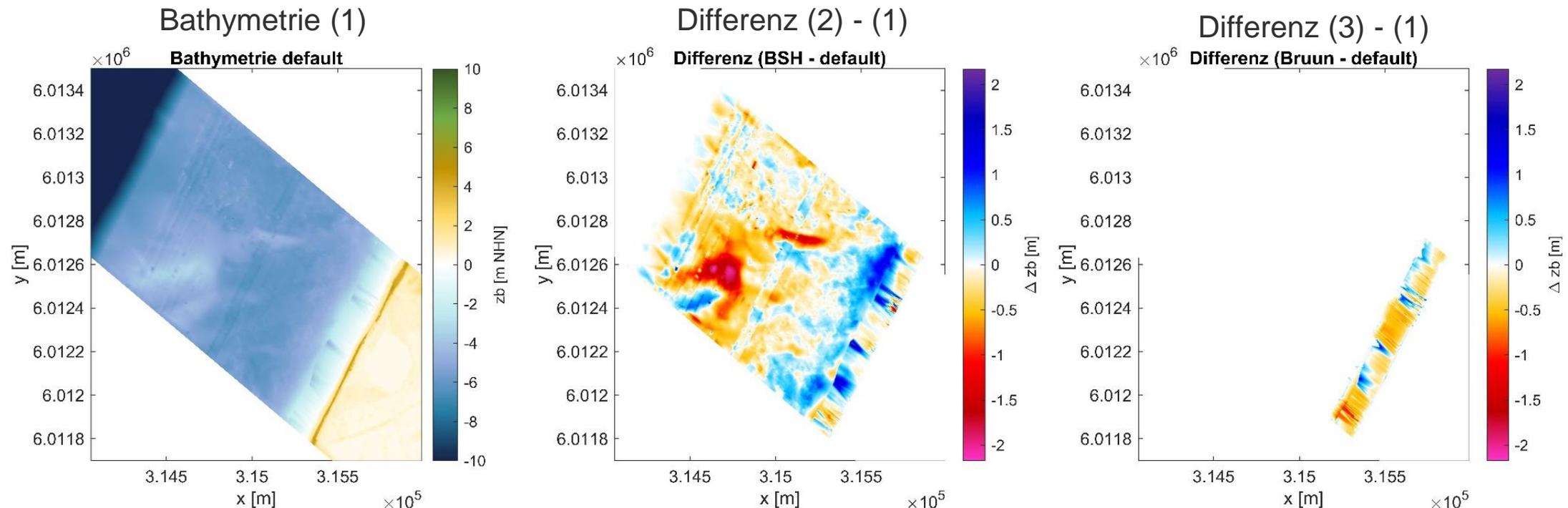




Hydrodynamische Randbedingungen (IMK-Messnetz und Pegel Rostock-Warnemünde)

➤ (U.a.) Untersuchung des Einflusses einer variierenden initialen Bathymetrie:

1. BSH\* und KREUZBERG ET AL. (2018) (default)
2. Ausschließlich BSH
3. BSH und Gleichgewichtsprofil nach BRUUN (1954) im küstennahen Bereich ( $h(x) = A \cdot x^{2/3}$ ) mit  $A = 0,13 \text{ m}^2$





## ➤ Wesentliche Erkenntnisse:

- Höchste Übereinkunft (BSS = 0,38) zwischen Modell und Messung mit default-Werten und küstennaher Bathymetrie nach KREUZBERG ET AL. (2018)
- Größten Unterschiede im Bereich der Bresche
- *Zu beachten*: räumliche Entfernung (~8 km) zwischen Messstandort der hydrodynamischen Randbedingungen und Modellgebiet

## ➤ Weitere Erkenntnisse (nicht Teil dieser Präsentation):

- Im Rahmen der Kalibrierung konnte keine Verbesserung gegenüber den default-Einstellungen erzielt werden (s. PADO Endbericht)

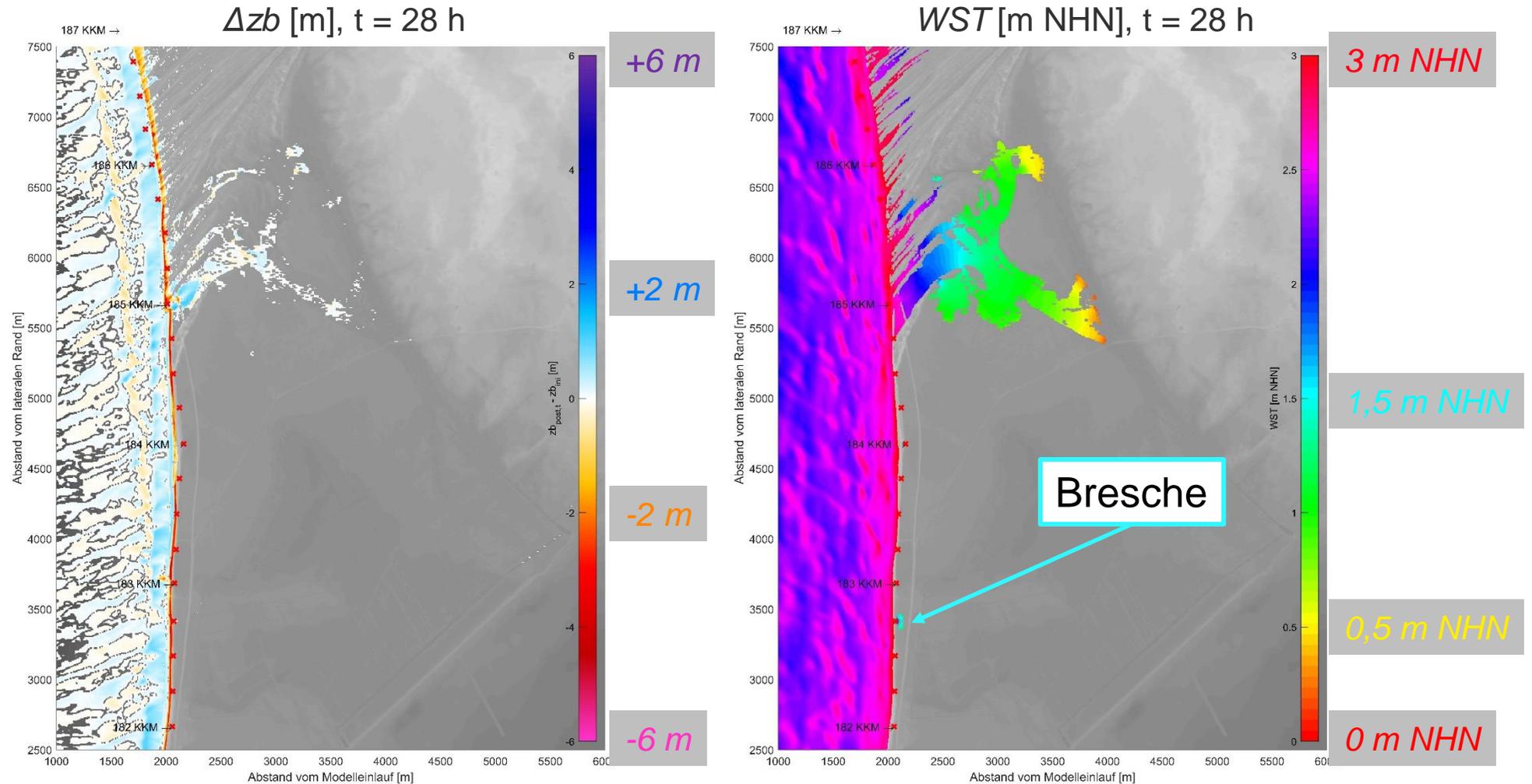
➤ *Folglich: Zufriedenstellende Modellgenauigkeit, wenn (aktuelle) und hochaufgelöste Bathymetrie- und Geländedaten vorliegen*



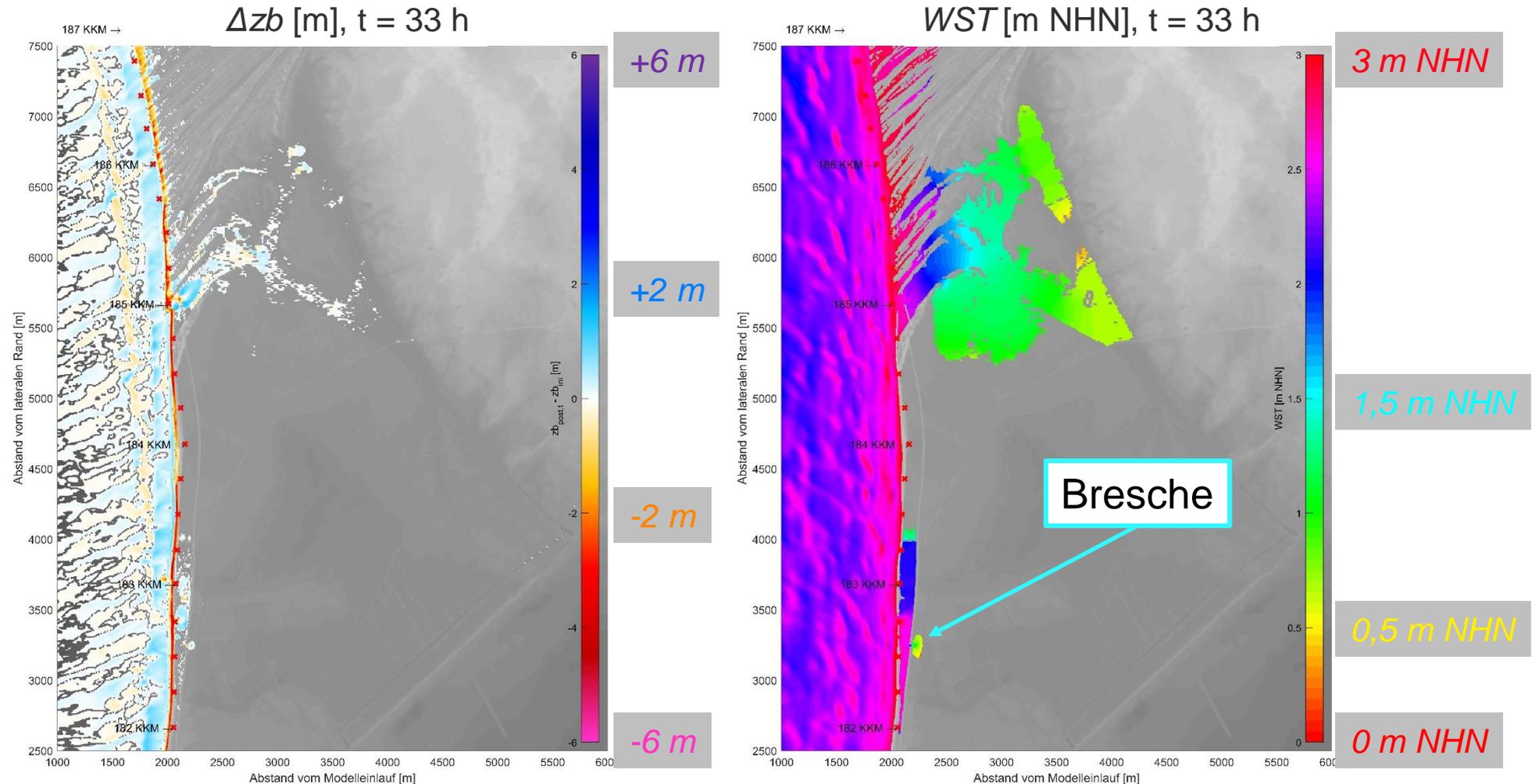




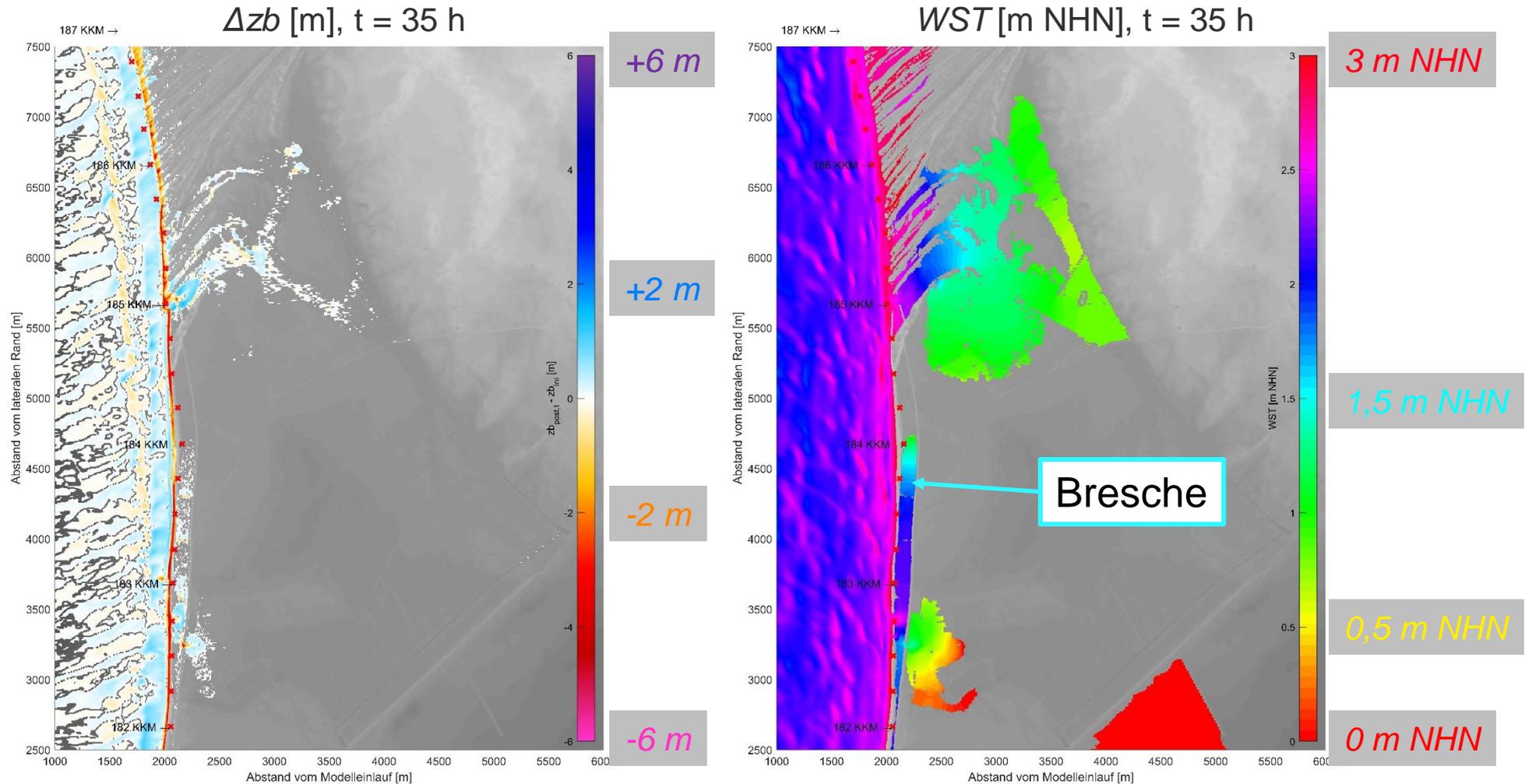
- $t = 28$  h: Erste Bresche bei KKM 182,75 mit  $h = 230$  cm, fortan Füllung des Polders



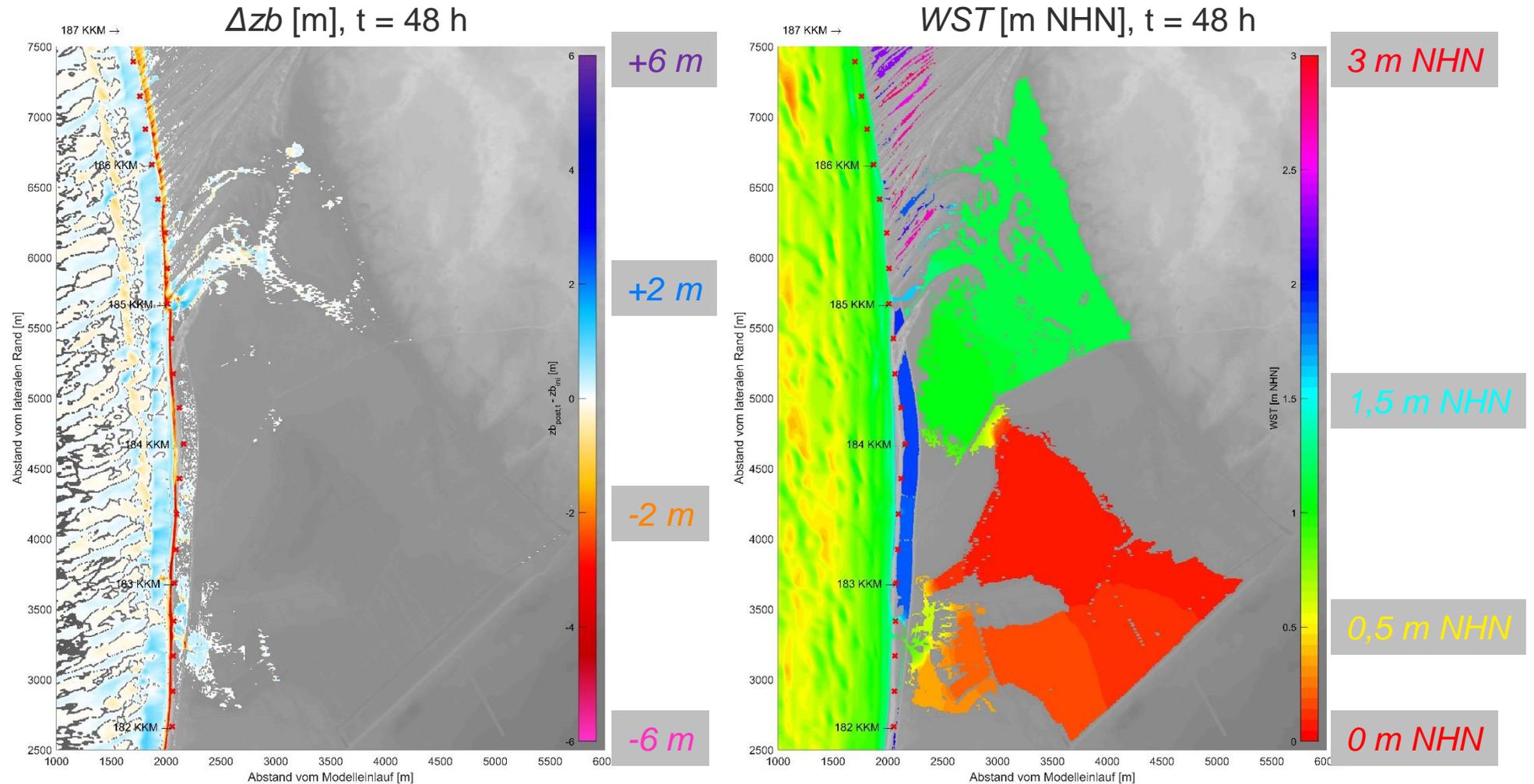
- $t = 33$  h: Zweite Bresche bei KKM 182,65 sowie Bresche im Binnendeich auf Höhe KKM 182,6 auf Höhe KKM 182,6



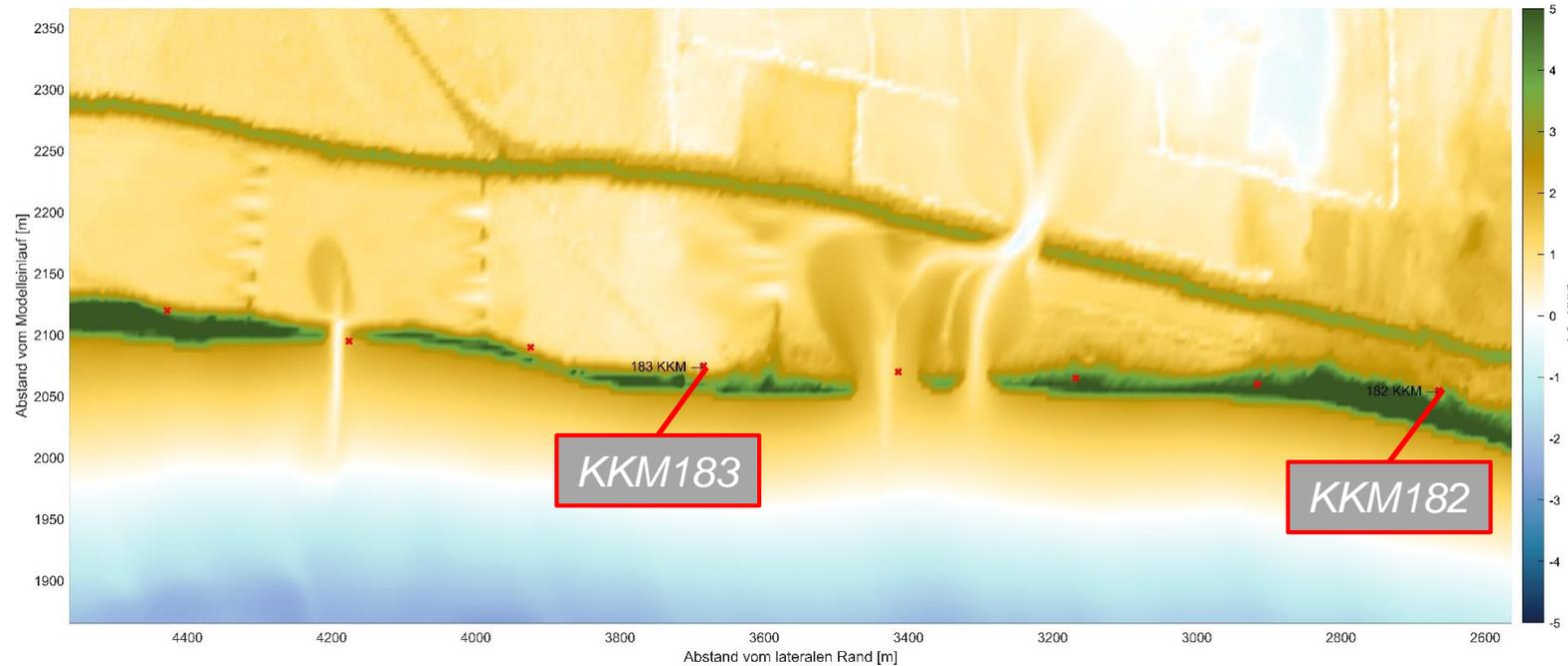
➤  $t = 35$  h: Dritte Bresche bei KKM 183,5



➤  $t = 48\text{h}$ : Finaler Wasserstand im Hinterland zwischen 0 – 0,5 m NHN



➤ Finale Höhenlage im Bereich der Küstenschutzdüne



Position	Initiale Höhenlage	Finale Höhenlage	Finale Breschenbreite
KKM 182,75	~ 5,6 m NHN	~ 0,8 m NHN	~ 90 m
KKM 182,65	~ 5,5 m NHN	~ 0,9 m NHN	~ 60 m
KKM 183,5	~ 6,5 m NHN	~ 0,05 m NHN	~ 60 m
Deich	~2,6 m NHN	~ -0,4 m NHN	~ 72 m

## ➤ Wesentliche Erkenntnisse:

- Zweimalige Belastung notwendig, damit Bresche(n) in Küstenschutzdüne entsteht
- Versagen der Küstenschutzdüne und resultierende Überflutung plausibel
- Zu beachten:
  - Konstante Rauheit im gesamten Modell und somit keine Unterscheidung im Hinterland zwischen Wald-/Wiesenflächen, Straßen, etc.
  - Großteil des Hinterlandes wurde mit maximaler Zellgröße ( $dx = 15 * dy = 6 \text{ m}$ ) diskretisiert
  - Höhenlage unter 0 m NHN im Hinterland problematisch aufgrund der Pfützenbildung in hydraulisch nicht angeschlossenen Bereichen
  - Modellungenauigkeiten erwartet, da keine aktuellen und hochaufgelösten küstennahen Bathymetriedaten vorlagen

## ➤ Weitere Erkenntnisse (nicht Teil dieser Präsentation):

- (Mehrmalige) Modellanwendung auf PG-Graal-Müritz führte zu keinem Durchbruch der Küstenschutzdüne

- Die küstennahe Bathymetrie und Strandbereich haben einen signifikanten Einfluss auf die simulierte Dünenerosion
  - Gute Übereinkunft zwischen Simulation und Messung, wenn aktuelle und hochaufgelöste Eingangsdaten vorliegen (s. Modellversuch und Hütelmoor)
- Hohe (räumliche) Genauigkeit der *default* Parameter, wenn aktuelle und hochaufgelöste Eingangsdaten vorliegen
  - Ort der Breschenentstehung unabhängig von den Modellparametern und der räumlichen Auflösung
  - Zeitpunkt der Breschenentstehung abhängig von den Modelleinstellungen und der räumlichen Auflösung

- Anwendung des Modells auf das PG-Ahrenshoop liefert plausible Ergebnisse, Unsicherheiten sind jedoch vorhanden
  - ➔ *Option*: Kopplung mit 2D-Oberflächenmodell (bspw. hinter Polder) hinsichtlich feinerer Diskretisierung, variierenden Rauheiten (Wald-/Wiesenflächen, Straßen)
- Weiterer Forschungsbedarf:
  - Einfluss von Dünenvegetation auf die sturmflutbedingte Dünenerosion
  - Weitere Untersuchungen zum Einfluss der küstennahen Bathymetrie



Die Anwendung des XBeach Modells erfordert eine (regelmäßige) Beschaffung von küstennahen Bathymetrie- und Geländedaten (Strandbereich) in hoher räumlicher (und zeitlicher) Auflösung. Ist dies gegeben, kann das XBeach Modell eine sinnvoll Ergänzung im Küstenschutz und -management sein.

- ❖ Holthuijsen, L.H., 2007. *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge: Cambridge University Press, 1 online resource (xvi, 387).
- ❖ Kreuzburg, M., Ibenthal, M., Janssen, M., Rehder, G., Voss, M., Naumann, M., Feldens, P. (2018): Sub-marine Continuation of Peat Deposits From a Coastal Peatland in the Southern Baltic Sea and its Holocene Development. *Front. Earth Sci.* 6, 309. doi:10.3389/feart.2018.00103.
- ❖ Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R., Lescinski, J., 2009. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering* 56 (11-12), 1133–1152. doi:10.1016/j.coastaleng.2009.08.006.
- ❖ Saathoff, Fokke; Schlamkow, Christian; Dimke, Steffi; Völker, Anita (2013): Aktualisierung des Bemessungsseegangs für die Außenküste von Mecklenburg-Vorpommern.
- ❖ Salecker, Dörte (2013): Sturmflutganglinie für Aussenpegel an der Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommerns.
- ❖ Schweiger, C., Kaehler, C., Koldrack, N., Schuettrumpf, H., 2020. Spatial and temporal evaluation of storm-induced erosion modelling based on a two-dimensional field case including an artificial unvegetated research dune. *Coastal Engineering* 161, 103752. doi:10.1016/j.coastaleng.2020.103752.
- ❖ Sutherland, J.; Peet, A.H., and Soulsby, R.L., 2004. Evaluating the performance of morphological models. *Coastal Engineering*, 51(8-9), 917–939. doi:10.1016/j.coastaleng.2004.07.015.
- ❖ van Rijn, L.C.; Walstra, D.J.R.; Grasmeijer, B.; Sutherland, J.; Pan, S., and Sierra, J.P., 2003. The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based Profile models. *Coastal Engineering*, 47(3), 295–327. doi:10.1016/S0378-3839(02)00120-5.

# Anhang – Kalibrierung



# Übersicht zu sensitiven Modellparametern



Literatur	Parameter	facua+		form		bedfriction		bedfriccoef		dryslp		wetslp		break		gamma		por		morfac	
		Bandbreite	Finaler Wert	Bandbreite	Finaler Wert	Bandbreite	Finaler Wert	Bandbreite	Finaler Wert	Bandbreite	Finaler Wert	Bandbreite	Finaler Wert	Bandbreite	Finaler Wert	Bandbreite	Finaler Wert	Bandbreite	Finaler Wert	Bandbreite	Finaler Wert
	<b>DEFAULT</b>	0.0 - 1.0	0.1	1, 2, 3	2	1, 2, 3, 4, 5	1	3.se-05 - 0.9	0.01	0.1 - 2.0	1.0	0.1 - 1.0	0.3	1, 2, 3, 4, 5	3	0.4 - 0.9	0.55	0.3 - 0.3	0.4	0.0 - 1000.0	1.0
McCall (2008)		-	-	-	-	-	1	-	40	-	1.0	-	0.15	-	1	-	0.55	-	-	-	1.0
Raelvink et al. (2009)		-	-	-	-	-	1	-	50, 65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Van Dongeren et al. (2009)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Van Thiel de Vries (2009)		-	0.1	-	3	-	-	-	-	0.25 - 2.0	1.0	0.1 - 0.3	0.1	-	3	-	0.5	-	-	-	1.0, 10.0
Brandenburg (2010)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Jacobs (2010)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bolle et al. (2011)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
De Vries (2011)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	0.54	-	-	-	1.0
Harley et al. (2011)		-	-	-	-	-	-	-	-	0.5, 2.0	0.5	0.1 - 0.5	0.5	-	-	-	-	-	-	0.0, 10.0	10.0
Riesenkamp (2011)		-	-	-	-	-	-	-	-	0.6 - 1.4	1.0	0.25 - 0.45	0.3	1, 3	3	0.35 - 0.55	0.35	-	-	-	-
Splinter et al. (2011)		-	0.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	0.4	-	10.0
Van Raaijen (2011)		-	0.0	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Van Thiel de Vries (2011)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.0, 10.0
McCall et al. (2012)		-	-	-	-	-	1	-	37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.0
Splinter & Palmsten (2012)		0.075 - 0.3	0.15	-	-	-	-	-	-	-	1.0	-	0.3	1, 2, 3	1	-	-	-	-	-	-
Van Thiel de Vries (2012)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vousdoukas et al. (2012)		0.1, 0.3	0.3	1, 2	2	-	-	-	-	-	-	0.2, 0.4	0.4	-	-	-	-	-	-	-	5.0, 10.0
Williams et al. (2012)		-	0.5	-	2	-	2	0.005 - 0.007	0.007	-	1	-	1	-	3	-	0.9	-	-	-	1.0
Armaroli et al. (2013)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.5	-	-	-	-	-	-	-	-
Bugajny et al. (2013)		0.0 - 0.5	0.3 (0.1 - 0.5)	-	-	-	-	-	-	0.5 - 1.5	1.0, 1.5	0.1 - 1.0	0.4 (0.3)	-	1	-	-	-	-	-	10.0
Den Heijer (2013)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.0
Li et al. (2013)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Terlauw (2013)		-	-	-	-	-	1	-	65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
De Vet et al. (2014)		-	0.2	-	-	-	4	0.02, 0.04	0.02, 0.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.0
De Vet (2014)		-	0.2	-	-	1, 4	1, 4	-	35, 0.04	-	-	-	0.1	-	-	-	-	-	-	-	10.0, 10.0
Disanayake et al. (2014)		0, 0.5, 1.0	-	1, 2	2	-	1	30, 57, 90	90	-	-	0.3, 0.15, 0.6	-	-	-	-	-	-	-	-	1.0 - 5.0
Nederhoff (2014)		0 - 0.4	0.25	-	-	-	1	15 - 55	30	-	1.0	0.1 - 0.3	0.1	-	-	-	-	-	-	-	10.0, 10.0
Stuij (2014)		-	-	-	-	-	1	20 - 40	35	-	-	-	0.1	-	-	-	-	-	-	-	-
Van Geer et al. (2014)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aretxabala (2015)		0.1 - 0.35	0.1 / 0.15	-	-	-	1	-	25, 55	0.85 - 1.0	0.85 / 1.0	0.2 - 0.3	0.2	-	-	-	0.541	-	-	-	1.0 - 5.0
Bendon (2015)		-	-	-	-	-	1	-	75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.0
Disanayake et al. (2015)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Miani et al. (2015)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Raelvink et al. (2015)		0, 0.2, 0.5	0.2 (0.25)	-	-	-	1	30, 55	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.0
Van Raaijen et al. (2015)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bertin & Olabarrieta (2016)		-	-	-	-	-	1	-	30	-	-	-	-	-	-	-	0.4	-	-	-	-
Elsayed & Oumeraci (2016)		-	-	-	2	-	4	-	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.0
Koudstaal (2016)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	0.5	-	-	-	-
Muller et al. (2016)		-	-	-	-	-	2	-	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.0
Palmsten & Splinter (2016)		-	-	-	-	-	2	0.001 - 0.020	-	-	4 (?)	0.15 - 0.3	-	-	-	-	0.50 - 0.55	-	-	-	1.0
Van Raaijen et al. (2016)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Caichac (2017)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2, 4	-	0.55 / 0.78	-	-	-	3.0
Daly et al. (2017)		-	-	-	1	1, 4	1, 4	-	55, 0.02	-	-	-	0.3	-	-	-	-	-	-	-	1.0
De Beer (2017)		-	-	-	-	1, 3, 4	1, 3, 4	-	56/57, 0.1442, 0.0184	-	-	-	-	-	-	-	0.32 - 0.60	0.42	-	-	-
Elsayed & Oumeraci (2017a)		-	-	-	2	-	4	-	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.0
Elsayed & Oumeraci (2017b)		0.1 - 0.5	> 0.1	-	2	-	2	-	0.00062	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.0
Elsayed & Oumeraci (2017c)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Elsayed (2017)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.0
Harter & Figlus (2017)		-	-	1, 2, 3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0 - 20.0
Hewageegana (2017)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Jongedijk (2017)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Phillips et al. (2017)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Suh (2017)		-	-	-	-	-	-	-	-	0.2 - 1.8	-	-	-	-	-	-	0.44 - 0.88	-	-	-	-
Van Gronau (2017)		-	-	-	-	-	2	-	0.001	-	-	-	0.26	-	-	-	0.541	-	-	-	-
Wesselman et al. (2017)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	0.4 - 0.9	0.45	-	-	-	-
Jiménez et al. (2018)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Karunaratna et al. (2018)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Klaver (2018)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lashley et al. (2018)		-	-	-	-	-	1	50, 75	75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Passeri et al. (2018)		-	-	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Raelvink et al. (2018)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	0.55	-	-	-	-
Storazzi et al. (2018)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Disanayake et al. (2019)		-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.0
Raelvink & Costas (2019)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Van Der Graaf (2019)		-	-	1, 2	2	-	-	-	-	-	-	0.1, 0.3	0.3	-	-	-	-	-	-	-	1.0

- Folgende Parameter wurden im Rahmen der Kalibrierung detailliert untersucht:

Parameter	Beschreibung	Bandbreite
<i>facua</i>	Einfluss von Wellensteilheit und –asymmetrie auf Sedimenttransport	0,1 – 0,2
<i>dryslp</i>	Kritische Sohlneigung (trocken) <i>Avalanching</i>	0,8 – 1,6
<i>wetslp</i>	Kritische Sohlneigung (nass) <i>Avalanching</i>	0,1 – 0,8
<i>friction</i>	Rauheitsgesetz (Chézy oder Manning)	C: 45 – 65 m <sup>1/2</sup> /s n: 0,02 – 0,04 s/m <sup>1/3</sup>
<i>form</i>	Formel f. Gleichgewichtssedimentkonz.	1 – 3
<i>porosity</i>	Sedimentporosität	0,3 – 0,5
<i>break</i>	Ansatz für Einfluss des Wellenbrechens	1 – 3
<i>gamma</i>	Kalibrierungsparameter für Wellenbrechen	0,35 – 0,85

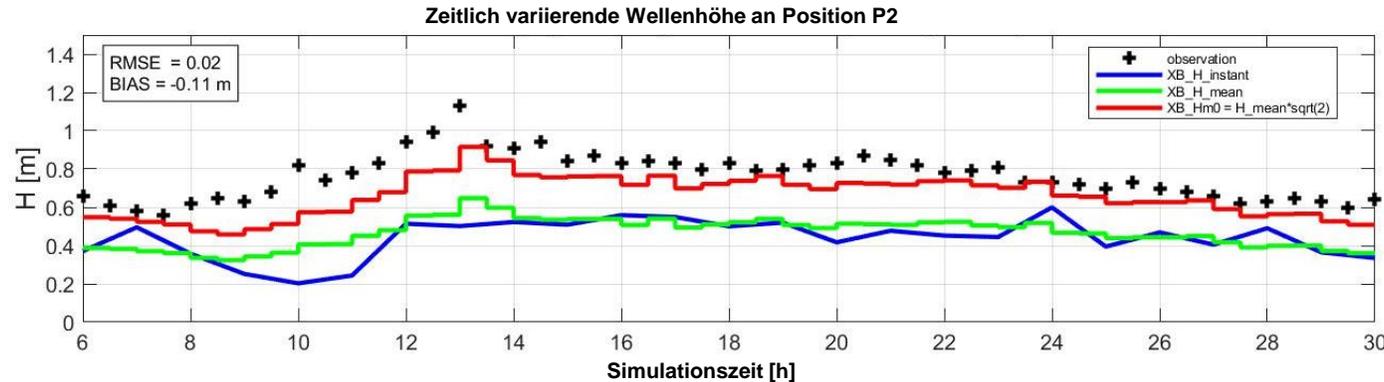
- Sowie Kombinationen sensibler Parameter:
  - *facua*, *wetslp*, *gamma*, *n*, (*por*)

## Anhang – Modellierung *Modellversuch*

	Parameter	Eingangswerte
<b>Modellgitter</b>	nx	279 (~ 2000 m)
	ny	324 (~ 800 m)
	dx	$dx_{\min} = 1 \text{ m}$ , $dx_{\max} \sim 15 \text{ m}$
	dy	$dy_{\min} = 1 \text{ m}$ , $dy_{\max} = 10 \text{ m}$
	Offshore Wassertiefe	-20 m
	Offshore Sohlneigung	~ 0,04
<b>Wellen</b>	thetamin / thetamax	280° / 40°
	wavemodel / wbctype	surfbeat / jonstable
<b>Sediment</b>	D50 / D90	0,3 mm* / 0,5 mm *
	morfac	10 (Default)
	Manning	0,02
<b>Sonstige</b>	cyclic [ <i>boundaries</i> ]	1
	tintg / tintm	3600 s / 1800 s

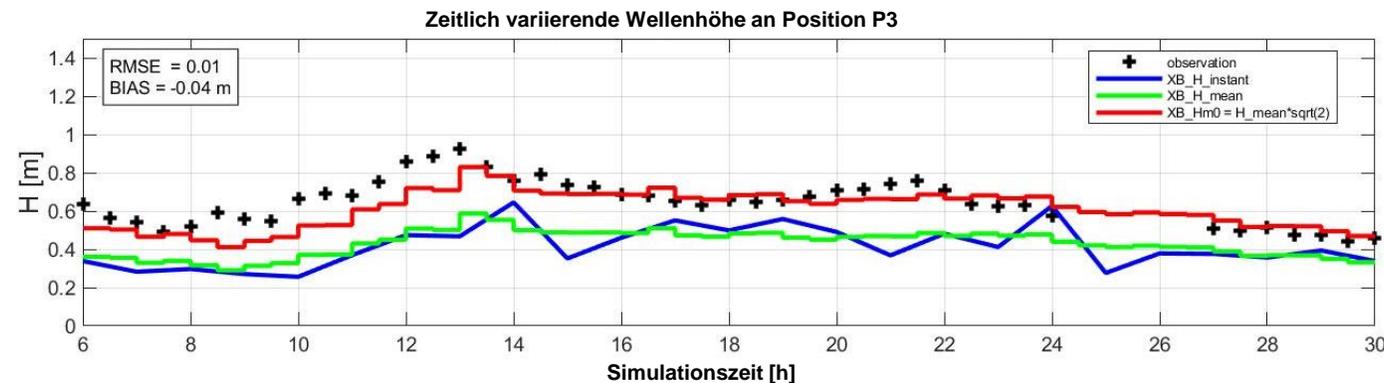
## ➤ Hydrodynamische Kalibrierung:

- Vergleich zwischen Messung ( $H_{m0}$ , alle 30 Min.) mit Simulation ( $H_{mean}$ , alle 30 Min.)
- Zu beachten:  $H_{mean} = H_{rms} \sim H_{m0} / \sqrt{2}$  (HOLTHUIJSEN 2007)



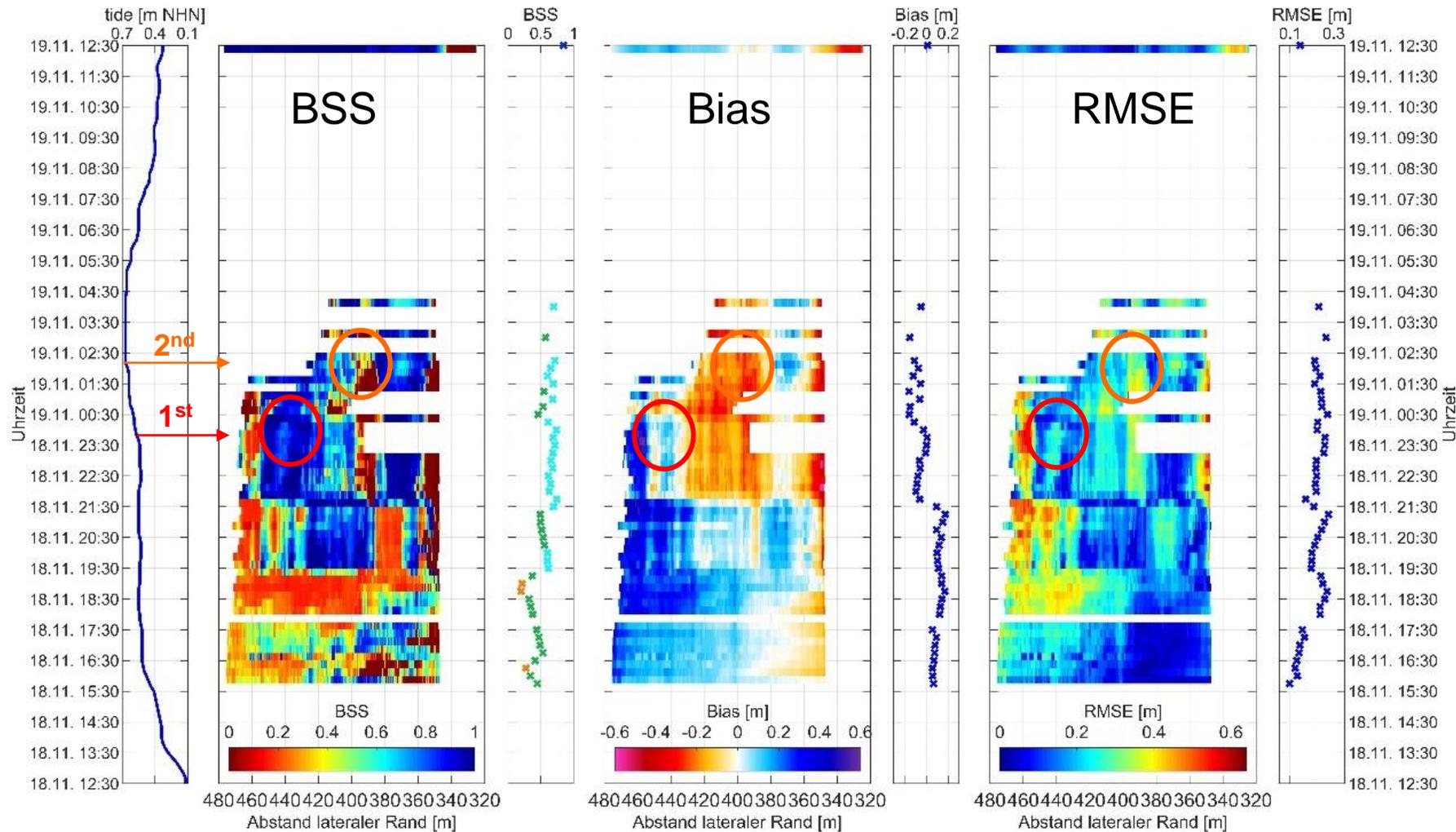
### Anwendung der default-Parameter:

- Unterschätzung der gemessenen Wellenhöhe an Position P2 ( $h \sim 4$  m) mit Bias = -0.11 m



- Gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation (v.a. für  $t > 14$  h) an Position P3 ( $h \sim 3$  m) mit Bias = -0.04 m

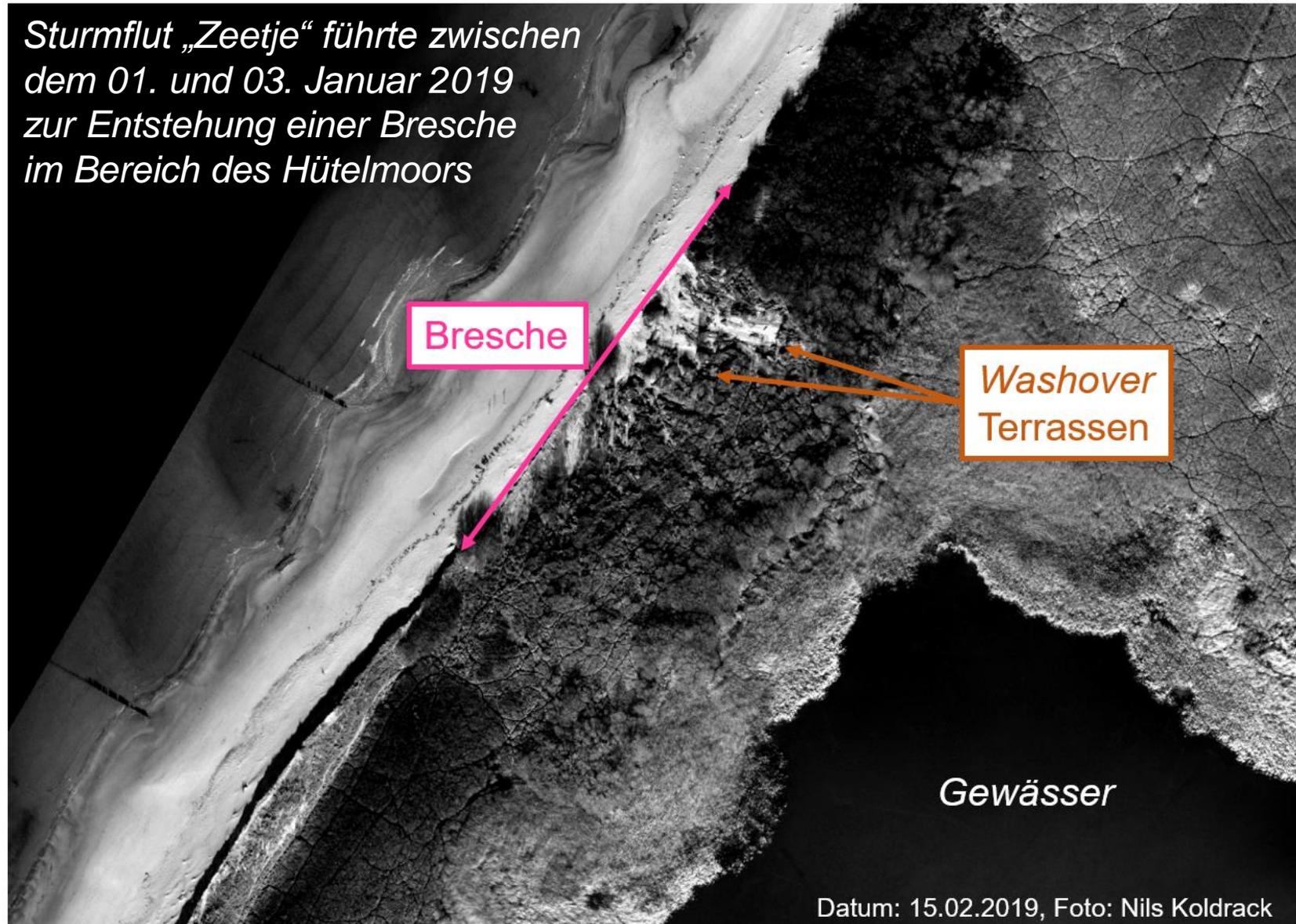




- **1. Bresche:** gute Übereinstimmung (hoher BSS, niedriger Bias & RMSE)
- **2. Bresche:** geringere Übereinstimmung (niedriger BSS, höhere Bias & RMSE)

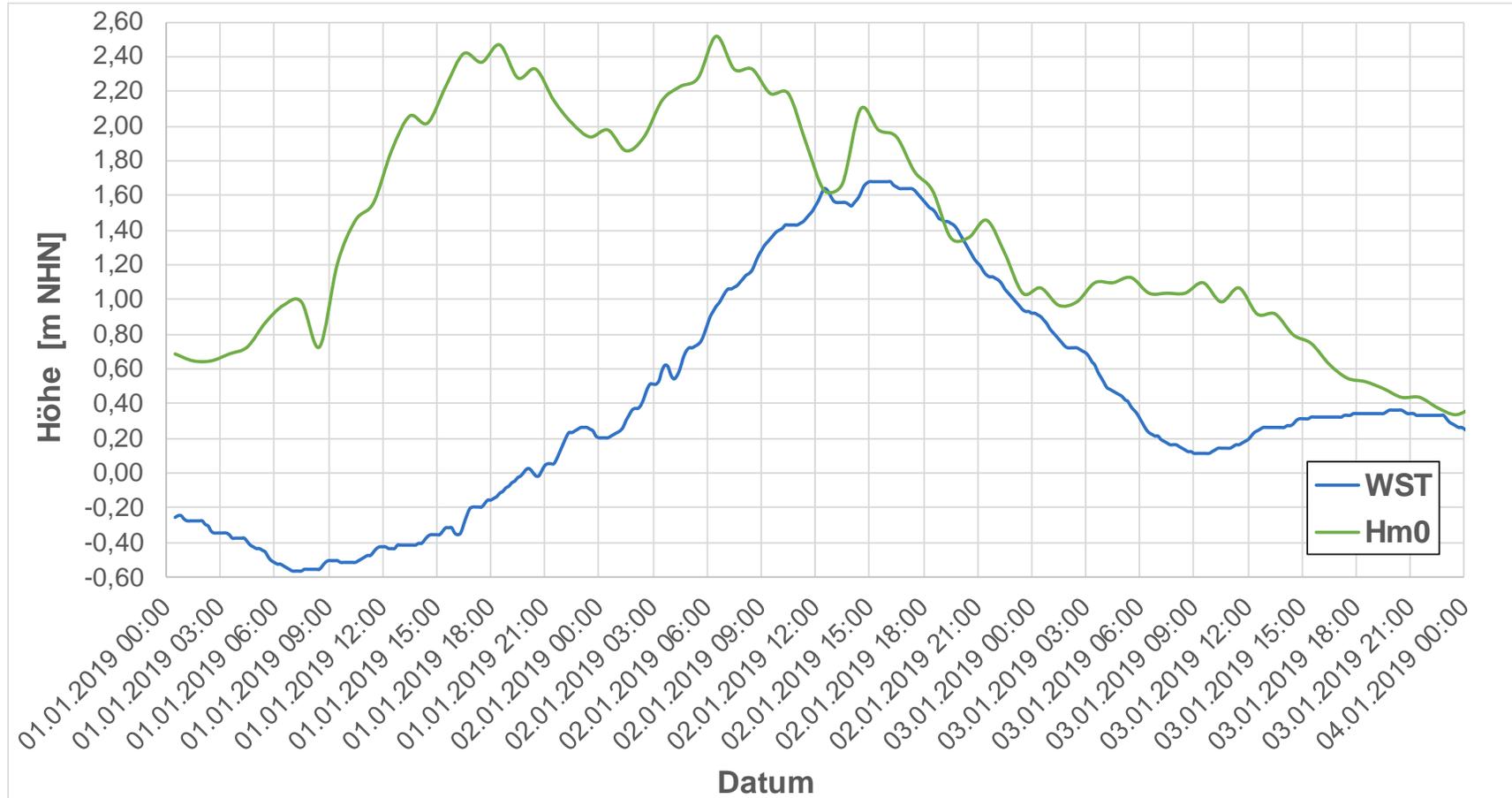
## Anhang – Modellierung *Hütelmoor*

*Sturmflut „Zeeetje“ führte zwischen dem 01. und 03. Januar 2019 zur Entstehung einer Bresche im Bereich des Hütelmoors*



Datum: 15.02.2019, Foto: Nils Koldrack



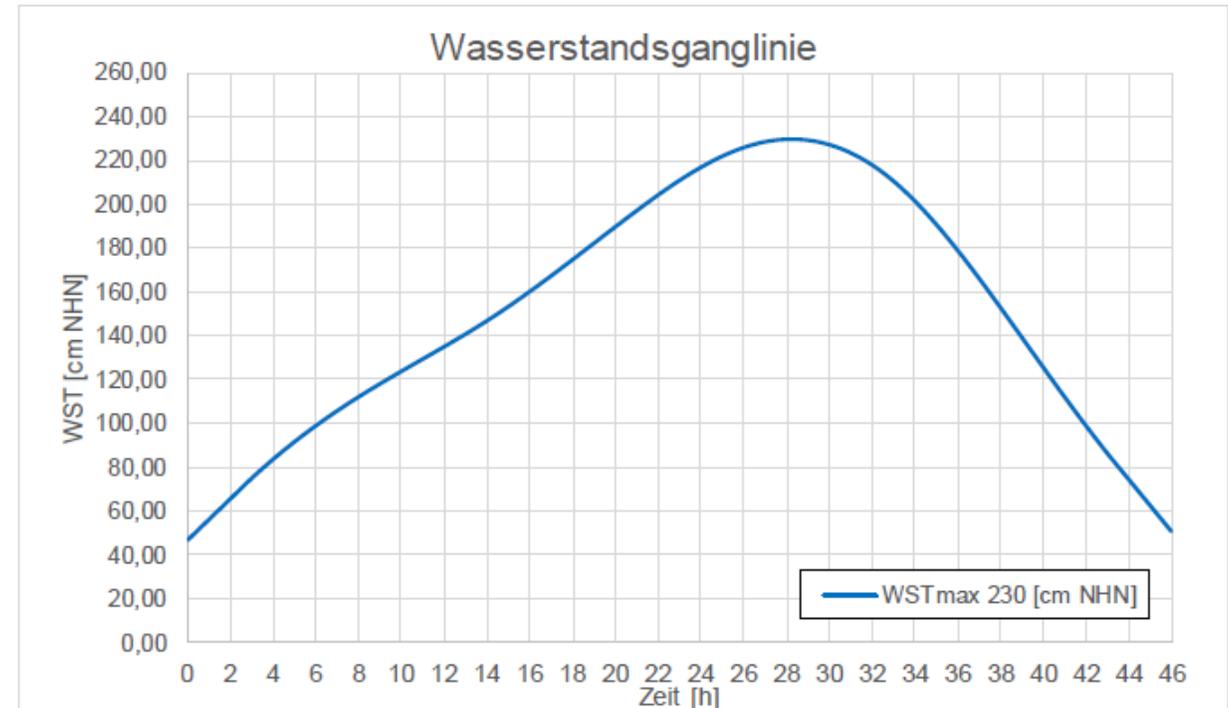




	Parameter	Eingangswerte
<b>Modellgitter</b>	$n_x$	402 (3732 m)
	$n_y$	250 (1000 m)
	$dx_{\max, \text{Off}} - dx_{\min} - dx_{\max, \text{On}}$	11 m – 4 m – 10 m
	$dy$	$dy = 4 \text{ m} = \text{konstant}$
	Offshore Wassertiefe	-20 m
	Offshore Sohlneigung	~ 0,04
<b>Wellen</b>	thetamin / thetamax	260° / 10°
	wavemodel / wbctype	surfbeat / jonstable
<b>Sediment</b>	D50 / D90	0,3 mm / 0,5 mm
	morfac	10 (Default)
	Manning	0,02
<b>Sonstige</b>	cyclic [ <i>boundaries</i> ]	1
	tintg / tintm	3600 s / 1800 s

## Anhang – Modellanwendung Ahrenshoop

XBeach Modellparameter			
Untersuchung: Pilotgebiet Ahrenshoop			
Kategorie	Variable	Wert	Kommentar
Modellgitter	nx	582	
	ny	1501	
	dx_min	5 m	
	dx_max	15 m	Modelllänge ~ 6114 m
	dy_min	6 m	
	dy_max	6 m	Modelbreite ~ 9000 m
	Offshore wd	-20 m	
Offshore slope	2/100		
Wellengitter	thetamin	240	
	thetamax	360	
	single_dir	1	
	dtheta	thetamin-thetamax	
Sediment	D50	0.0003 m	
	D90	0.0005 m	
	morfac	10	
	Korndichte	2650 kg/m <sup>3</sup>	
	Porosität	0,35	s. XBeach Kalibrierung anhand 2. MV.
	Rauheitsgesetz	Manning	
Rauheitswert	0.03	s. XBeach Kalibrierung anhand 2. MV.	
hydrodynamische Randbedingungen	instat	jons	JONSWAP Spektrum (konstant)
	Hrms	5,57 m	Saathoff et. al (2013): Aktualisierung des Bemessungsseegangs für die Außenküste von Mecklenburg-Vorpommern. Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau
	Tp	10 s	
	dir0	295°	
	h_max	2,3 m	Salecker, Dörte (2013): Sturmflutganglinie für Aussenpegel an der Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommerns. Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Wasserbau.
zeitliche Diskretisierung	tstop	169200 s	
	tstart	0 s	Start Modell-Output
	tintg	360 s	Zeitintervall für globalen Output
	tintm	1800 s	Zeitintervall für gemittelten Output
	tintp	360 s	Zeitintervall für Punkt-Output
	CFL	0.7	maximal zulässige Courant-Zahl
Globaler Output	x	globale x-Koordinaten	
	y	globale y-Koordinaten	
	H	Hrms	
	zb	Sohllage	
	zs	Wasserspiegellage	
	hh	Wassertiefe	
	thetamean	mittlere Wellenrichtung	
	umean	mittlere Fließgeschwindigkeit (x-Ri.)	
	ue	eulersche Fließgeschwindigkeit (x-Ri.)	
	Sutot	integrierter Sedimenttransport (Geschiebe und suspensiert)	
theta	Wellenrichtung (w.r.t. x-Achse)		
Weiteres	cyclic	1	cyclic Boundaries, da Wellen schräg ins Modell einlaufen: Wellen, die das Modell am Rand verlassen, laufen ggü wieder ins Modell ein.
	wetslp	0,2	s. XBeach Kalibrierung anhand 2. MV.



## Anhang – Verschiedenes

Modellierung	Größe Modellgitter	$dx_{\min}$	Sturmflutdauer	Anzahl CPU Kerne	Rechendauer
Versuchsdüne	$nx = 279, ny = 324$	1 m	30 h	3	~10 h
Hütelmoor	$nx = 402, ny = 250$	4 m	50 h	3	~7,2 h
PG-Ahrenshoop	$nx = 582, ny = 1501$	5 m	47 h	7	~44,9 h

➤ *Zu beachten:*

- Zeitschritt wird vom XBeach Modell anhand einer maximal zulässigen Courant-Zahl bestimmt:

$$CFL = \frac{c \cdot \Delta t}{\Delta x}$$

mit  $CFL = 0.7$  (default).

- Minimale Zellgröße hat somit Einfluss auf Simulationszeit!