



ResCAD Resistance and Climate Adaption in Dune Systems

Dirk Fleischer, TU Dresden - University of Technology
Simon Beckmann, Hochschule RheinMain
Jürgen Stamm, TU Dresden - University of Technology
Arne Arns, Hochschule RheinMain



... Welleneinwirkung an der Küstenpromenade in Binz (auf Rügen) am 20.10.2023 ~ 19:00 Uhr





Am Tag darauf: Küstenschutzdüne vor Prerow (Darß)

**Strandaufgang 39, Prerow (Hohe Düne), Foto vom 21.10.2023*

Gliederung

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Einstieg – Überblick

- Standort / Motivation / Überblick / Arbeitsstruktur

Teil 1 – Hydrodynamische Analyse (ResCAD B)

- Hydronumerisches Ostseemodell
- Rekonstruktion von Sturmfluten

Teil 2 – Morphodynamische Analyse (ResCAD A)

- Hydro-morphodynamisches Modell des Küstenabschnitts → phasen-aufgelöst, lokal
- Untersuchung Parameterraum

Teil 3 – Stochastischer Sturmflutgenerator (ResCAD B)

Teil 4 – Hydro-Morphodynamische Szenarienentwicklung (ResCAD A)

Teil 5 – Statistisches Dünenerosionsmodell (ResCAD B)

>> Ausblick für 3. Projektjahr!



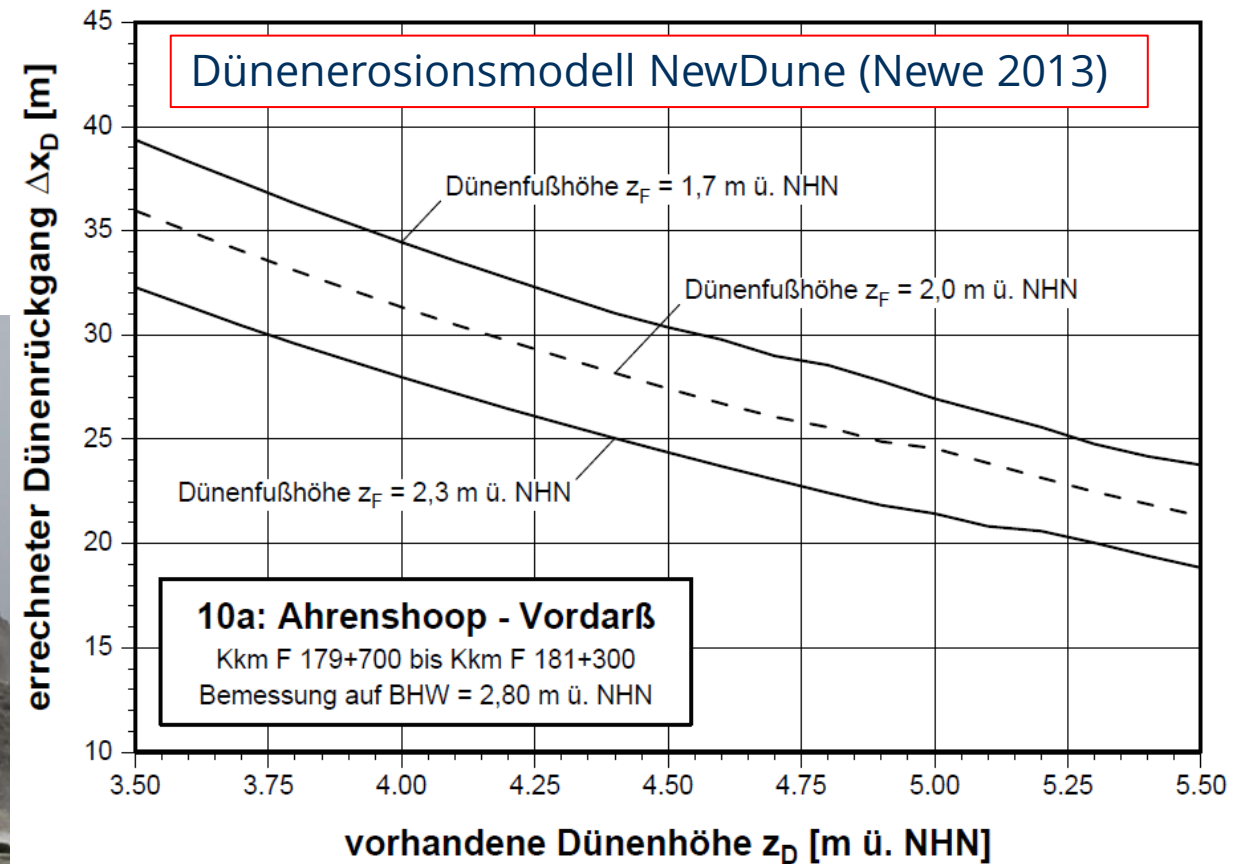
Untersuchungsgebiet



Motivation

Reaktives Küstenmanagement

- Dünenregelprofile nach Neue
- Im Durchschnitt 500.000 m³ Sand für 4 Mio. €/Jahr zur Erhaltung aufgespült



Motivation

Reaktives Küstenmanagement

- Dünenregelprofile nach Newe
- Im Durchschnitt 500.000 m³ Sand für 4 Mio. €/Jahr zur Erhaltung aufgespült



Dünenerosionsmodell NewDune (Newe 2013)

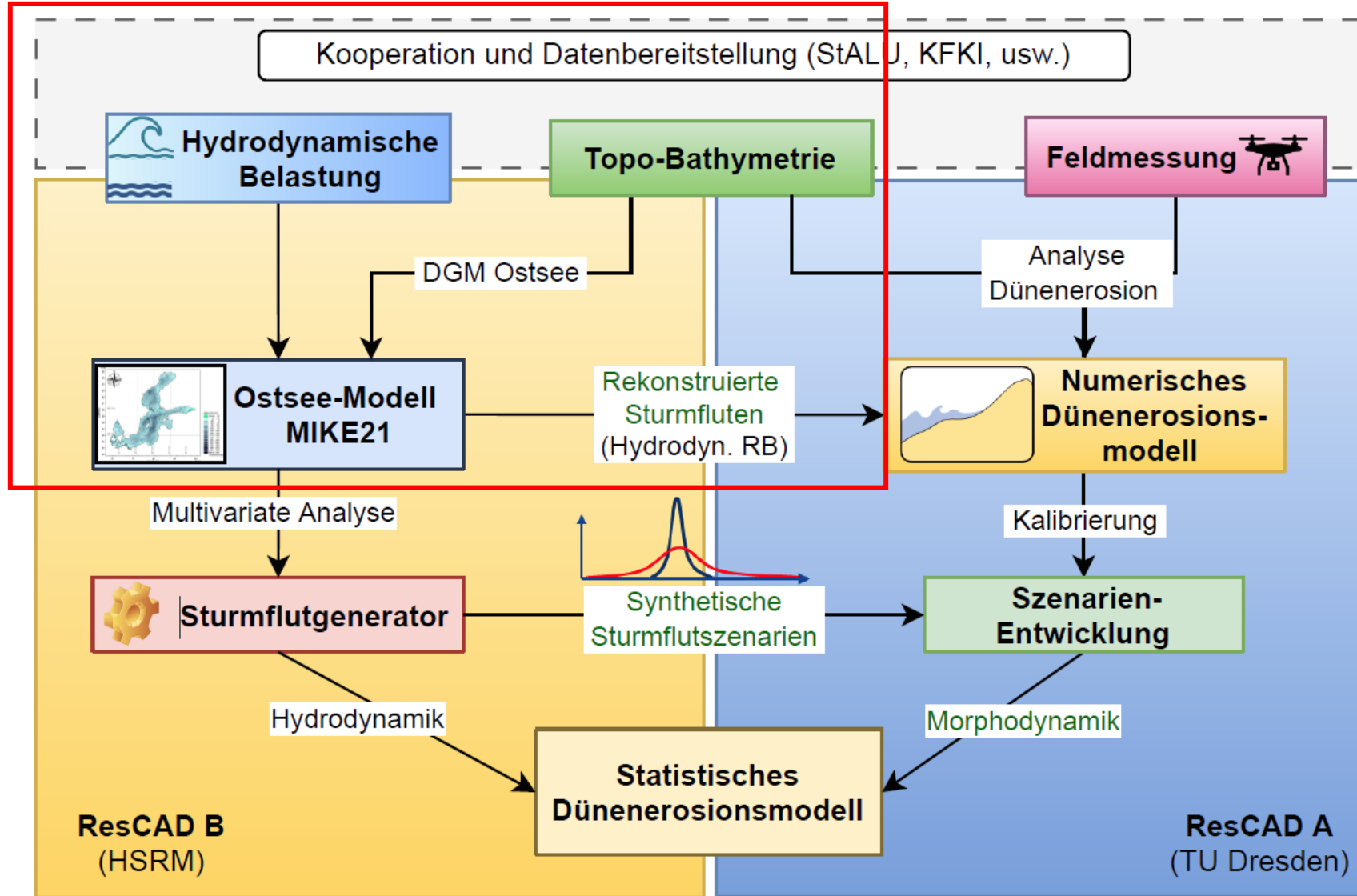
- ✓ Vorhersage 1D-Dünen- und oberes Strandprofil
- ✓ Basierend auf SF-Ganglinien nach Salecker (2013)
- ✓ Ausgewählte Bemessungsturmflut (max. Erosion)
- ✓ Inklusive lokaler Trends des Erosionsvolumens

- ✗ Gleicher Korndurchmesser über >100km Dünen
- ✗ Einfache Funktion des Seegangs (prop. zum WSt)
- ✗ Idealisierte Unterwasser-Profile (nach Brunn)
- ✗ Kein Küstenlängstransport

In ResCAD sollen zeitgemäße Bemessungswerkzeuge entwickelt werden!

©Dirk Fleischer (Prerow 2023, bisher größte Sandaufspülung)

Überblick über das Gesamtvorhaben



Teil 1 – Hydrodynamische Analyse

Belastungsgrößen an der Küste

Wasserstand

- Mittlerer Wasserstand (MSL)
- meteorologisch bedingte Schwankungen
- ggf. astronomisch bedingte Schwankungen
- MSL-Anstieg

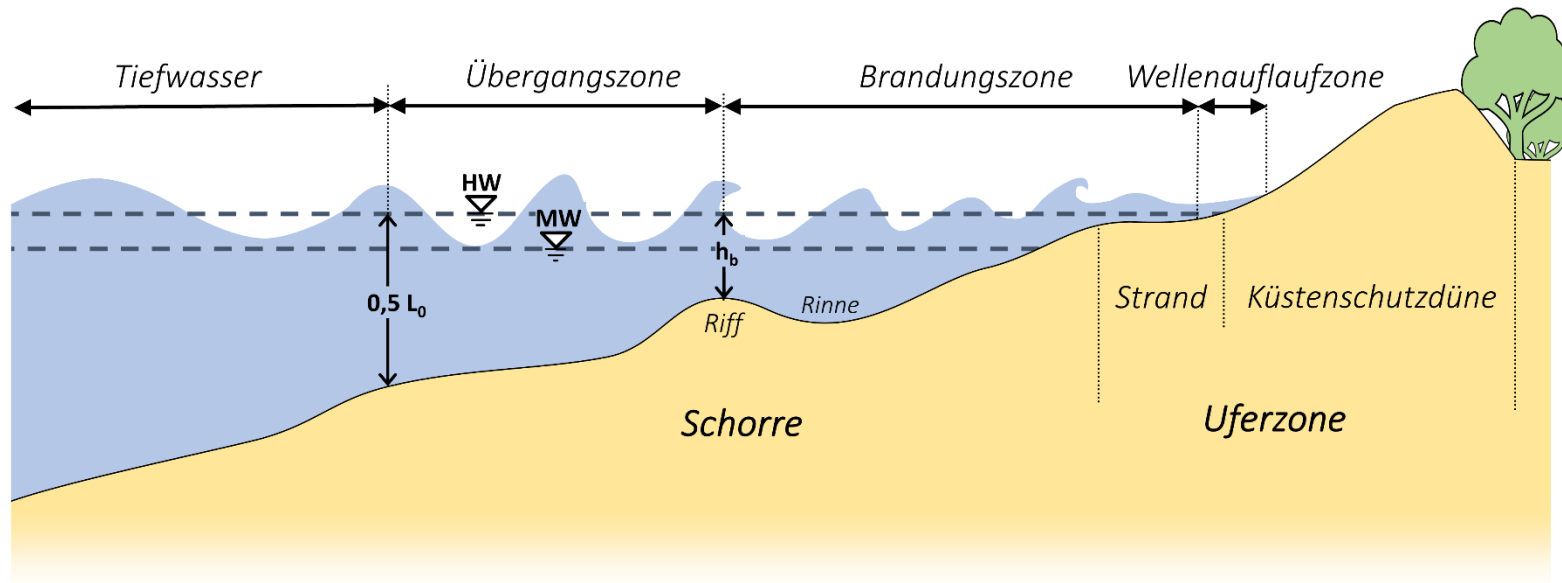
Seegang

- Wellenhöhe
- Wellenperiode
- Wellenangriffswinkel

Strömungen

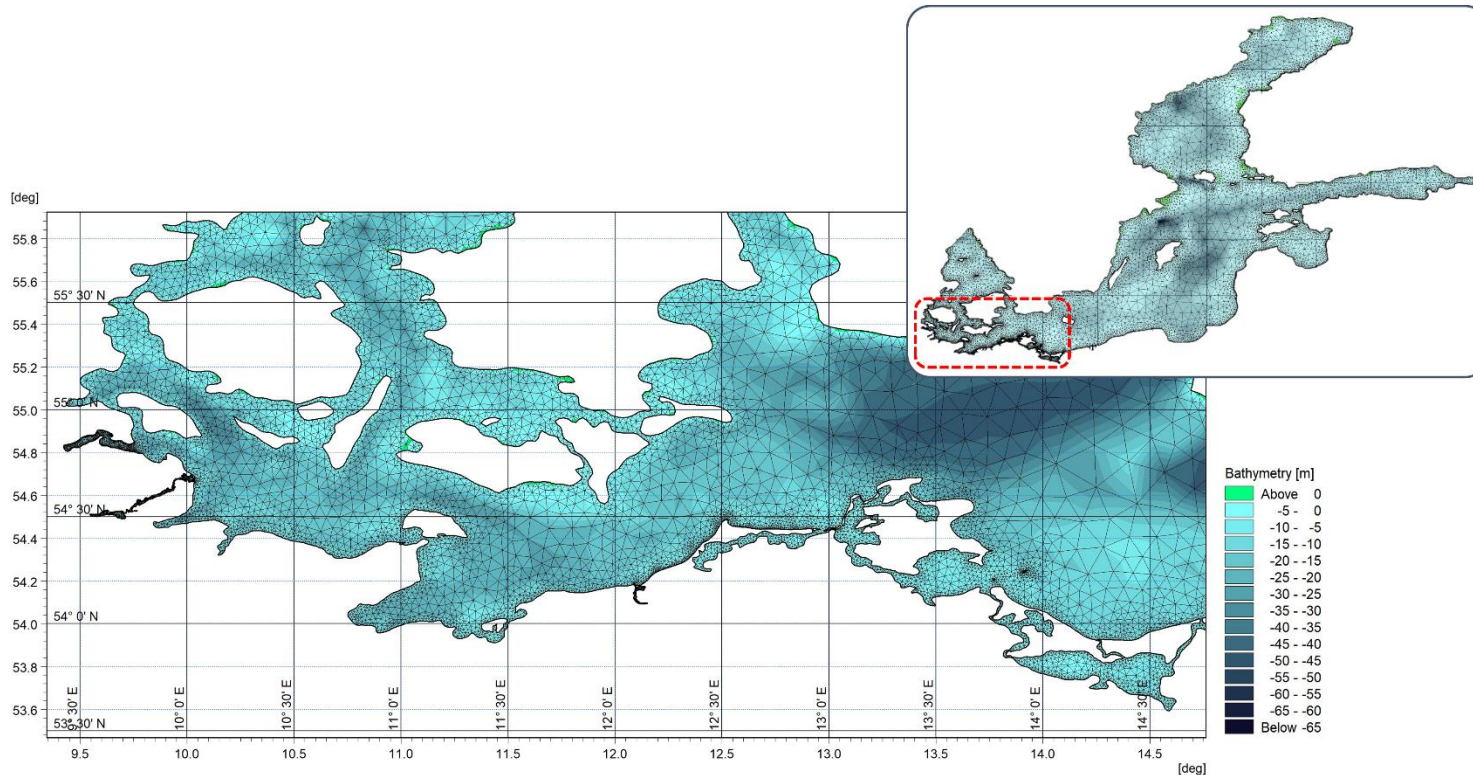
- Längsströmungen
- Querströmung

[...]



Teil 1 – Hydrodynamische Analyse

Simulation der Belastungsparameter (Mike21 HD + SW)



Hydrodynamik



1940

2023

- Wasserstand [m]
- Strömung [m/s]

Seegang (ereignisbasiert)



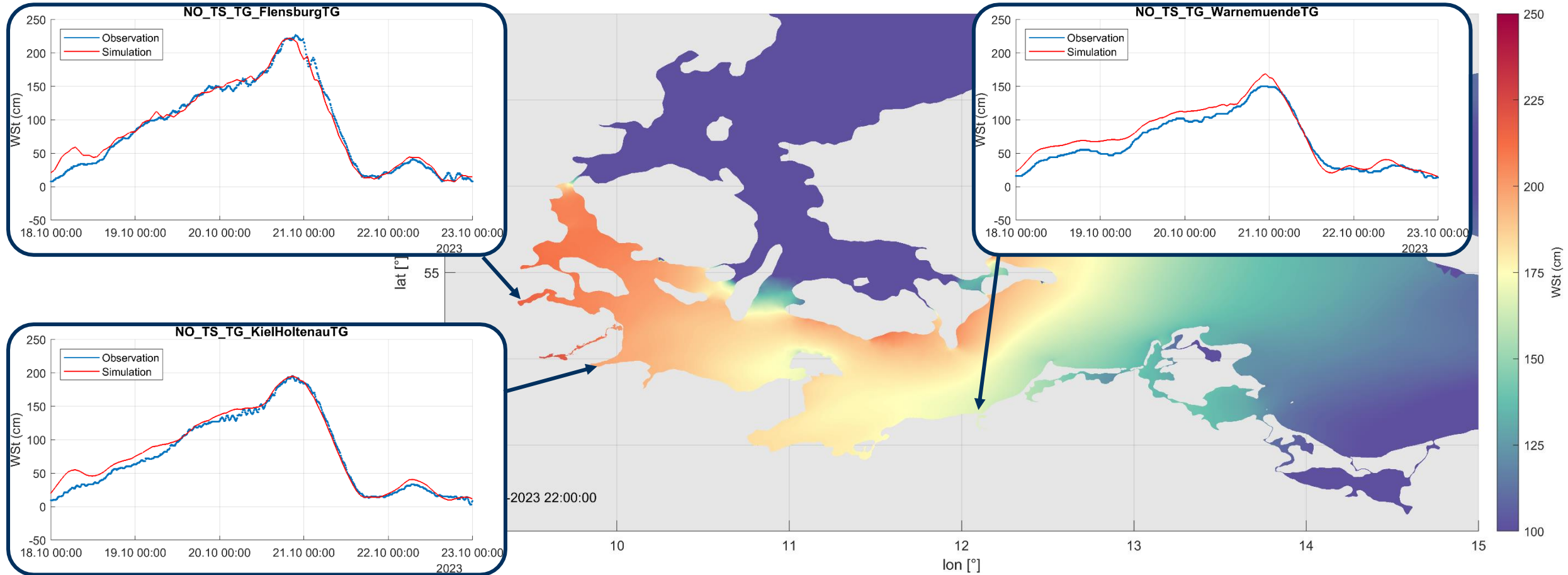
1940

2023

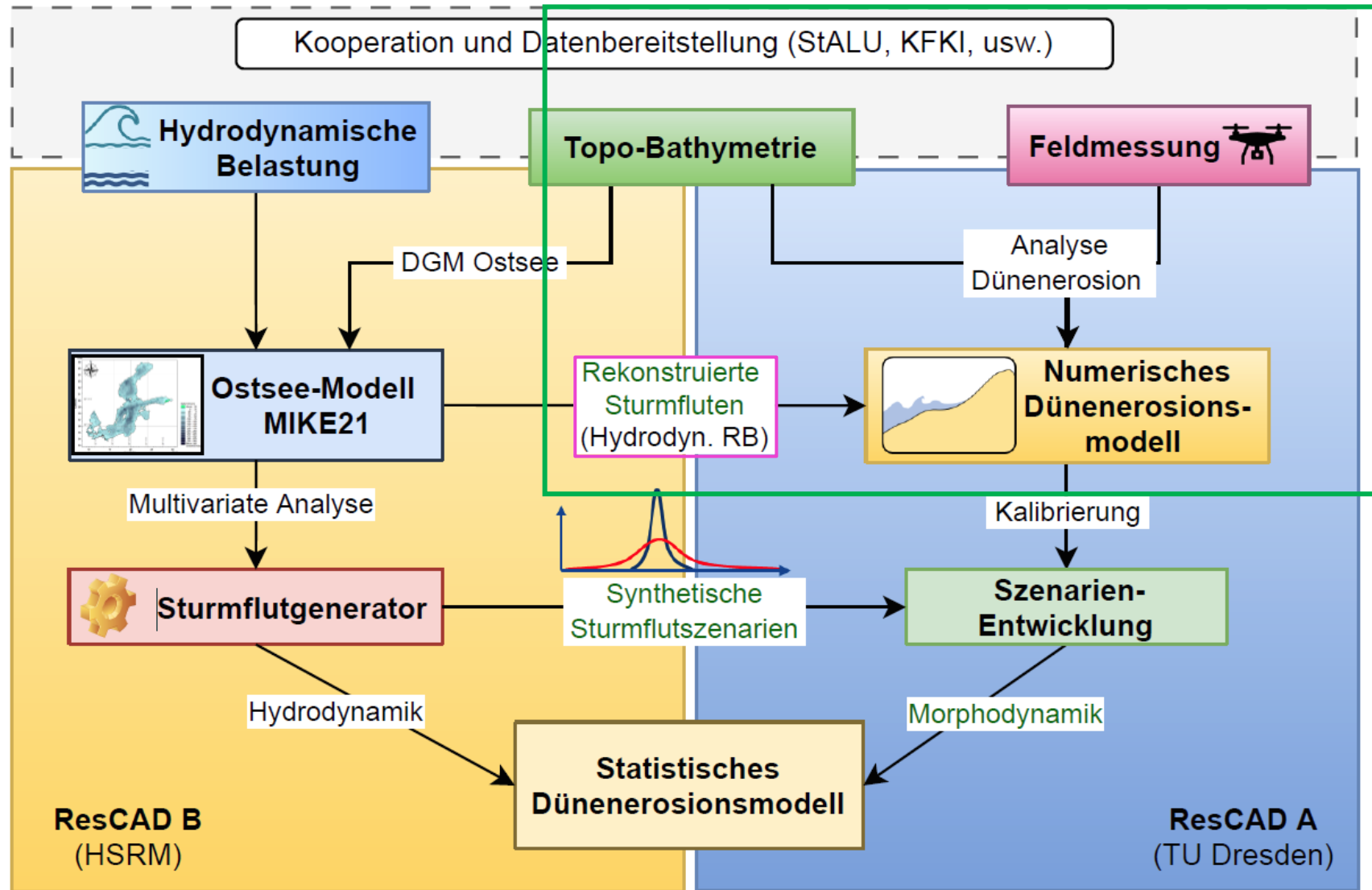
- Wellenhöhe (HSig) [m]
- Wellenperiode (Tm01) [s]
- Wellenrichtung (Dir) [°]

Teil 1 – Hydrodynamische Analyse

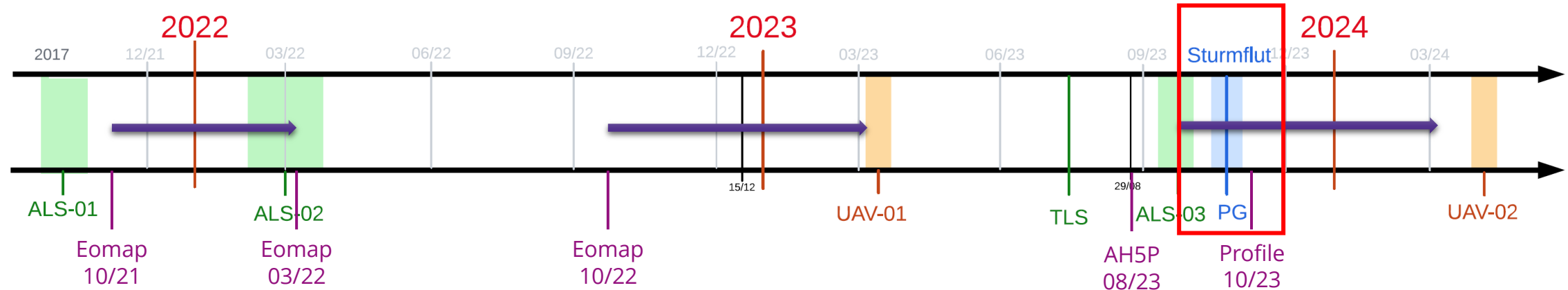
Hydrodynamische Rekonstruktion der Sturmflut vom 20./21.10.2023



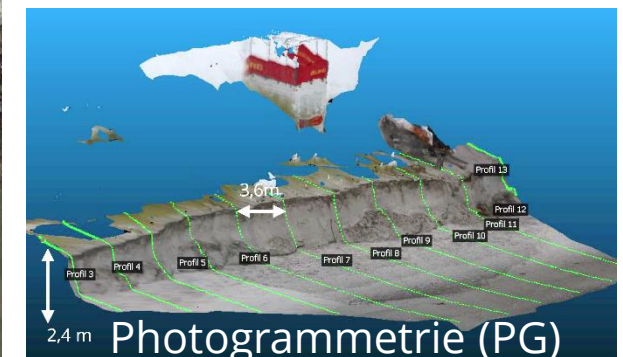
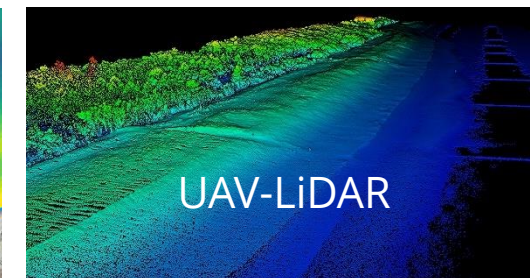
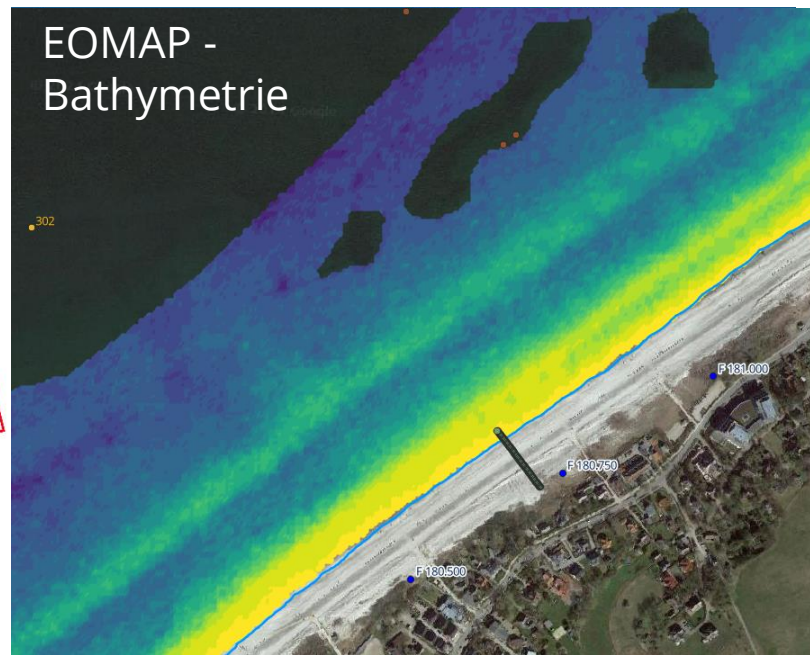
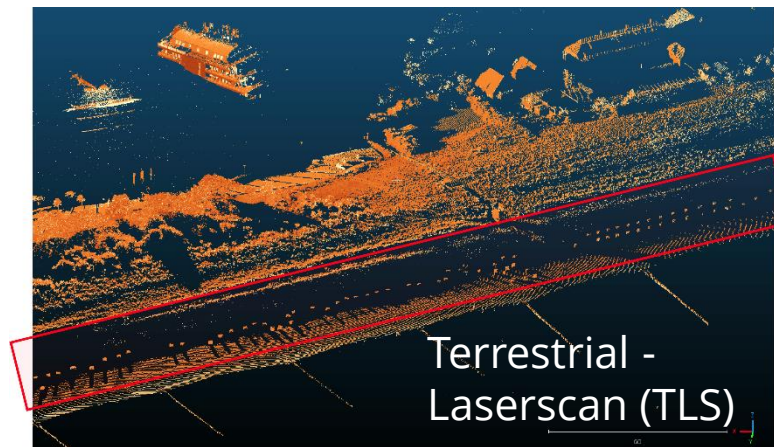
Teil 2 – Morphodynamische Analyse



Teil 2.1 – Analyse morphodynamischer Datensätze im Pilotgebiet

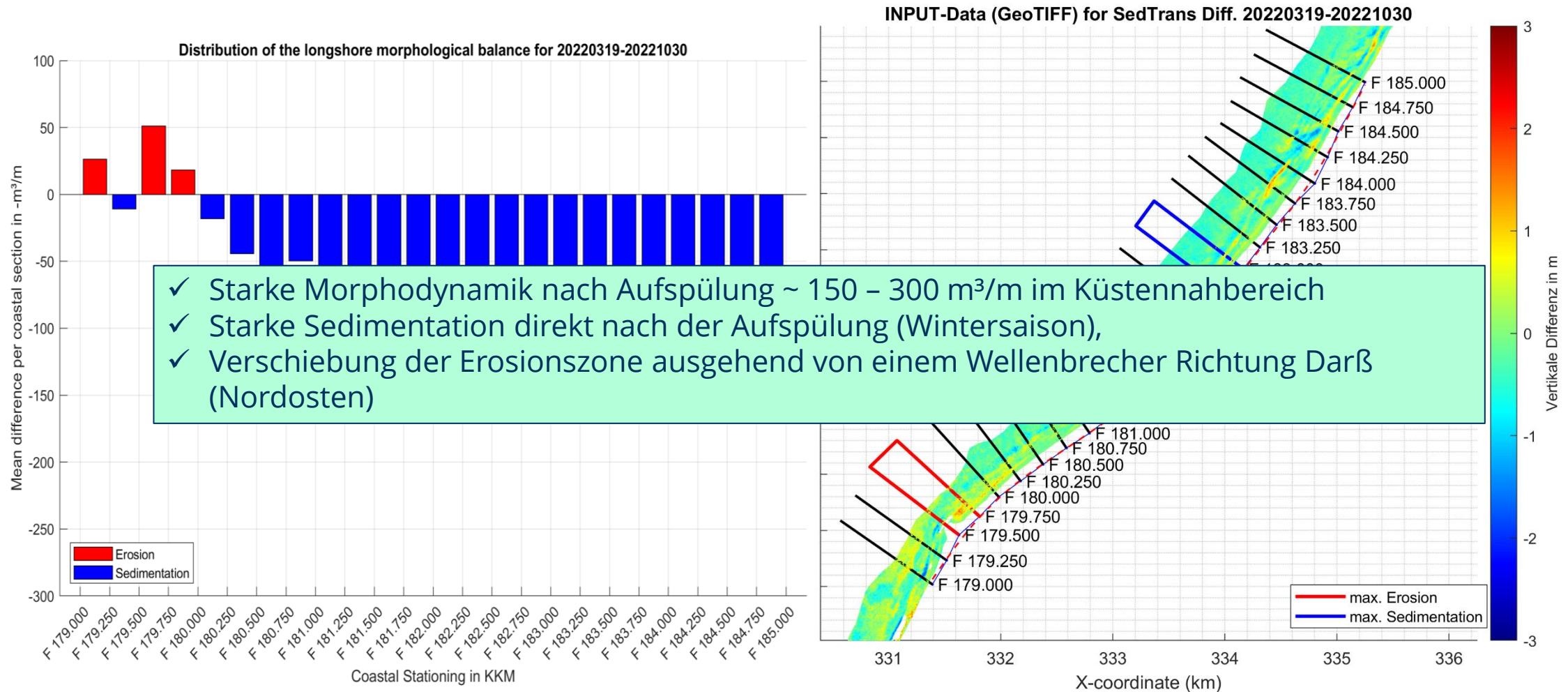


3D-Modellierung



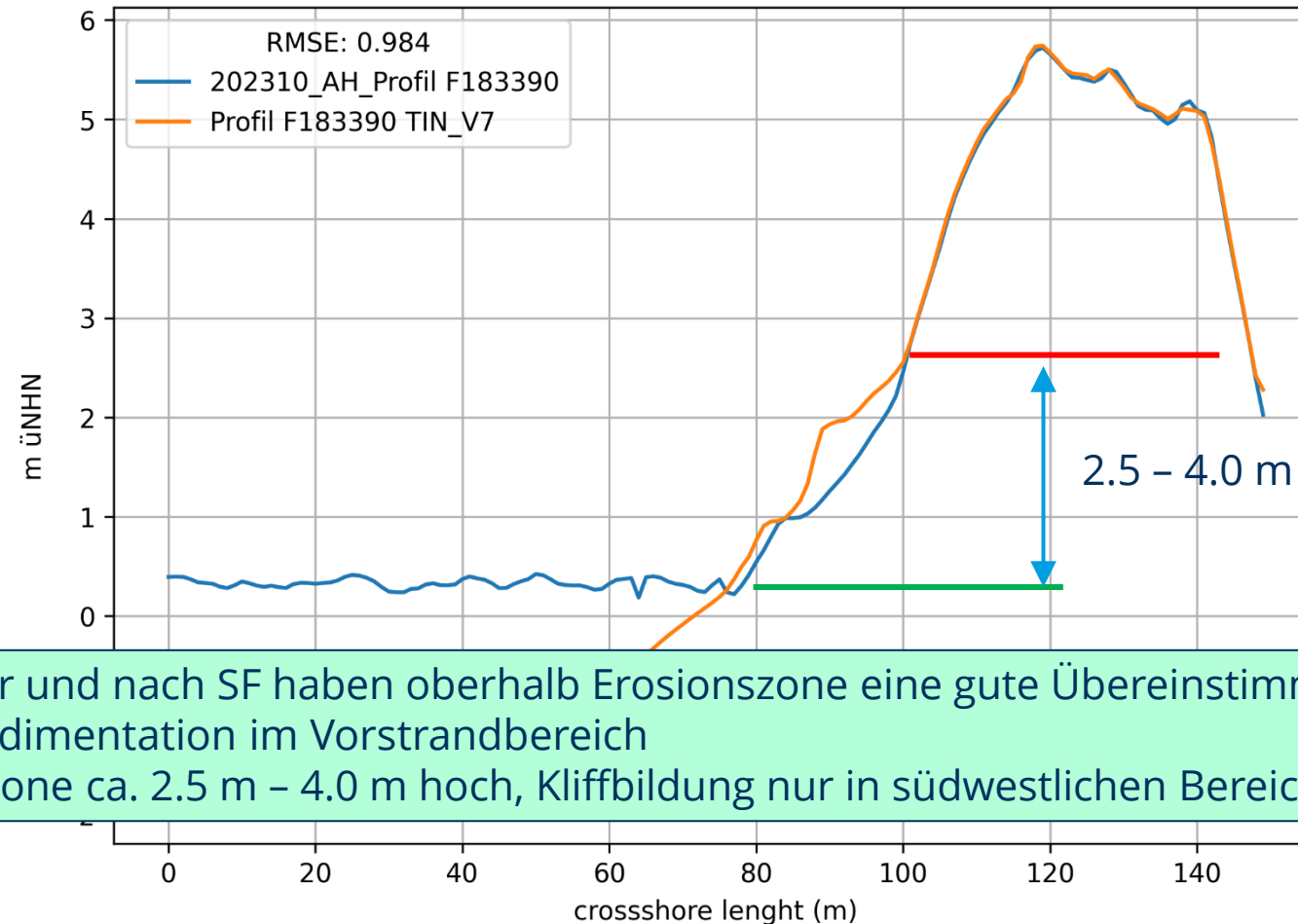
Teil 2.1 – Analyse morphodynamischer Datensätze im Pilotgebiet

Küstenlängstransport unter Wasser



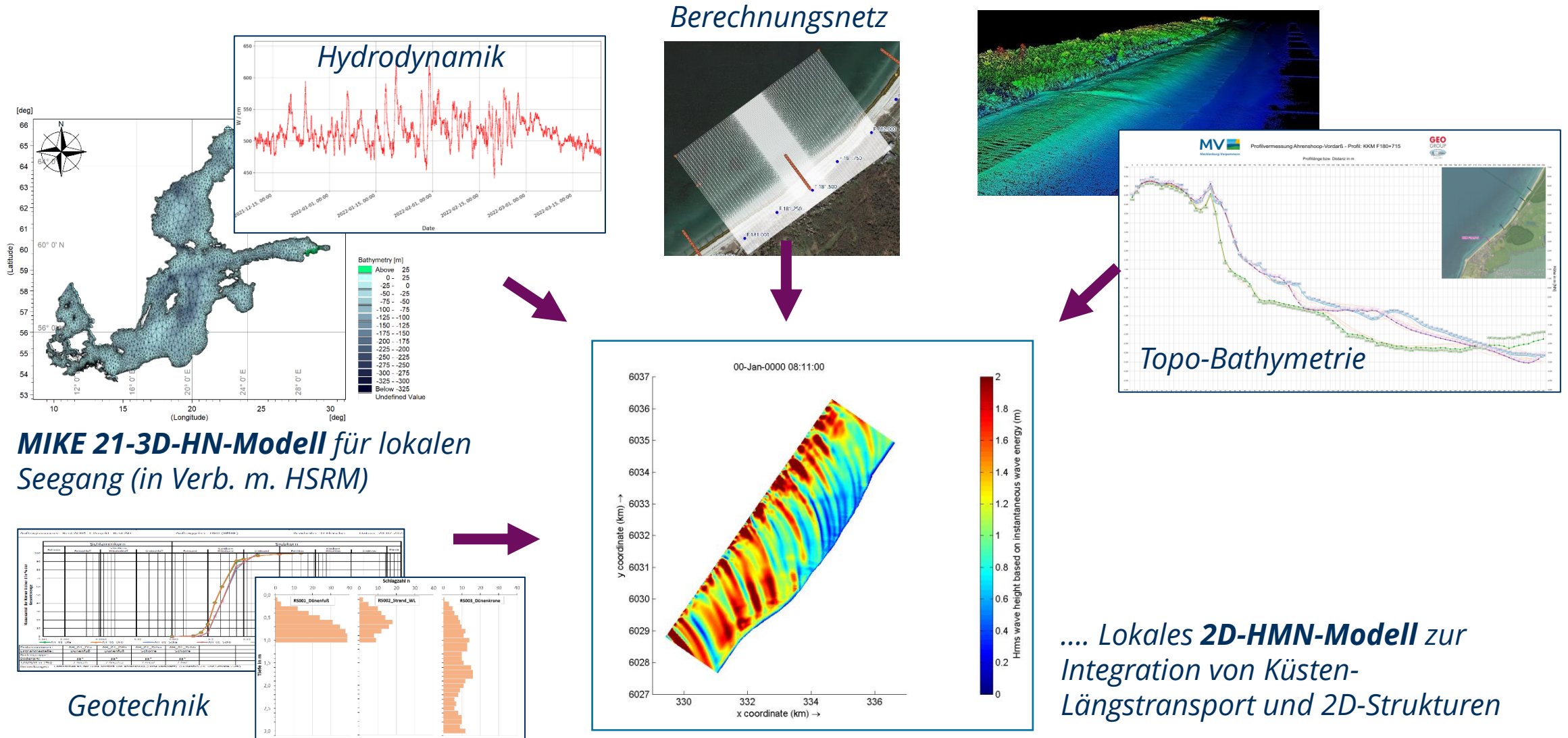
Teil 2.1 – Analyse morphodynamischer Datensätze im Pilotgebiet

Profile nach der Sturmflut: 202310_StALU_AH

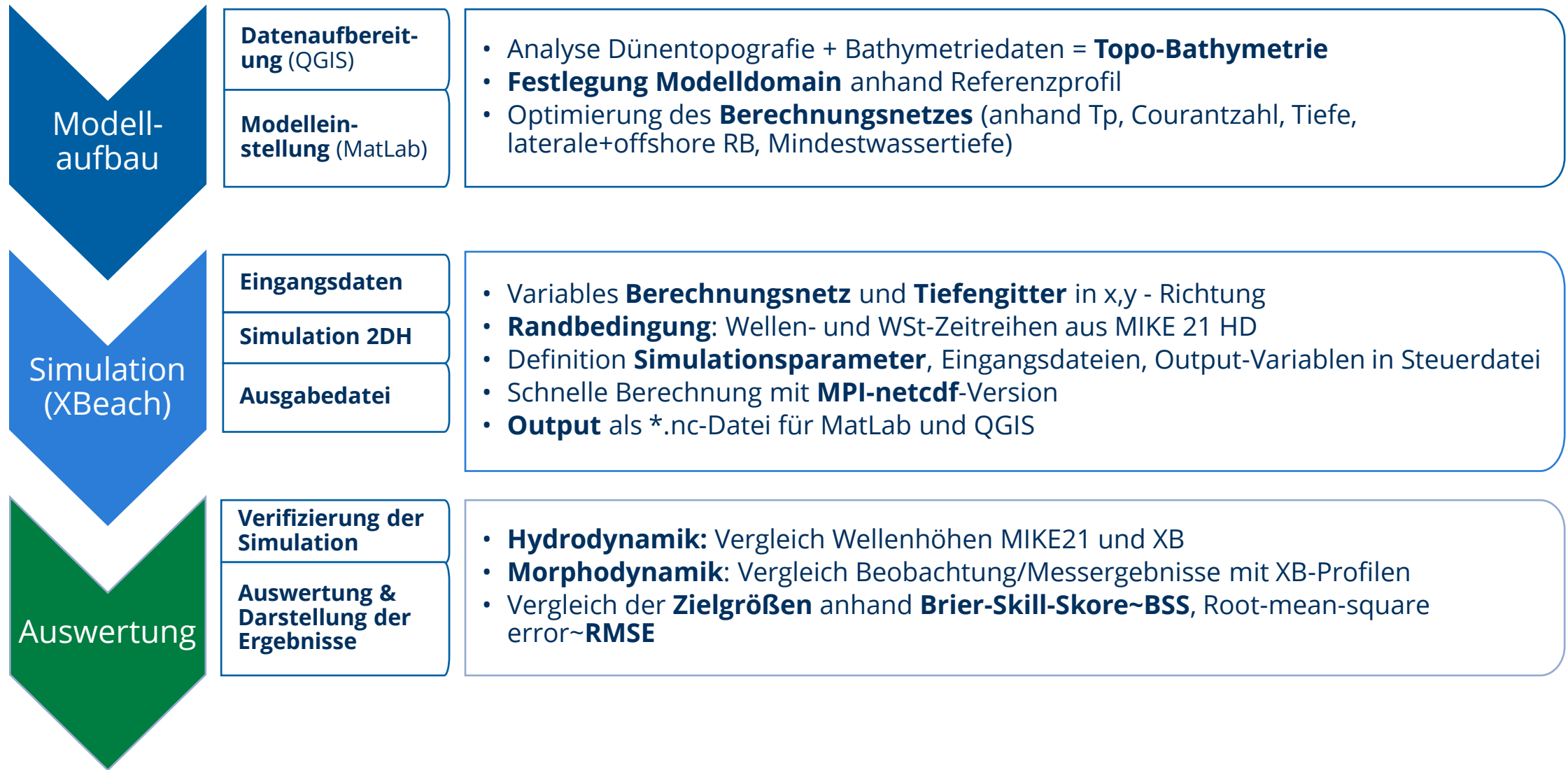


- ✓ Profile vor und nach SF haben oberhalb Erosionszone eine gute Übereinstimmung
- ✓ Starke Sedimentation im Vorstrandbereich
- ✓ Erosionszone ca. 2.5 m – 4.0 m hoch, Kliffbildung nur in südwestlichen Bereichen

Teil 2.1 – Hydro-morphodynamische Modellierung

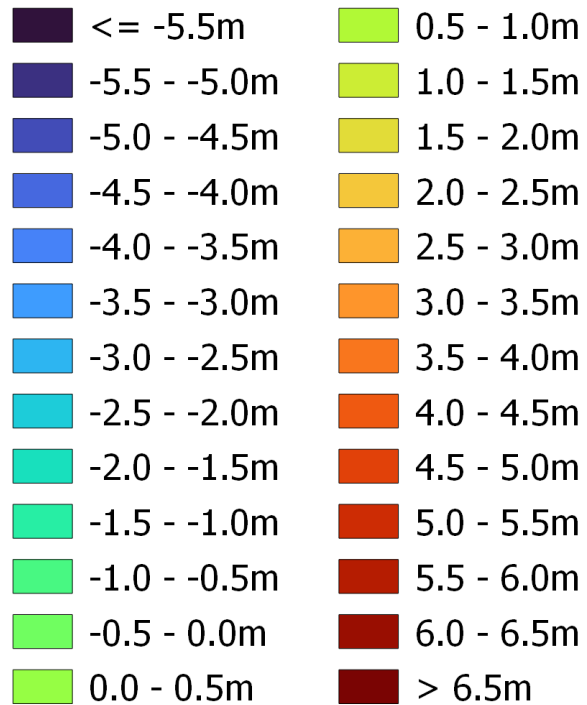


Teil 2.1 – Modellierungsprozess



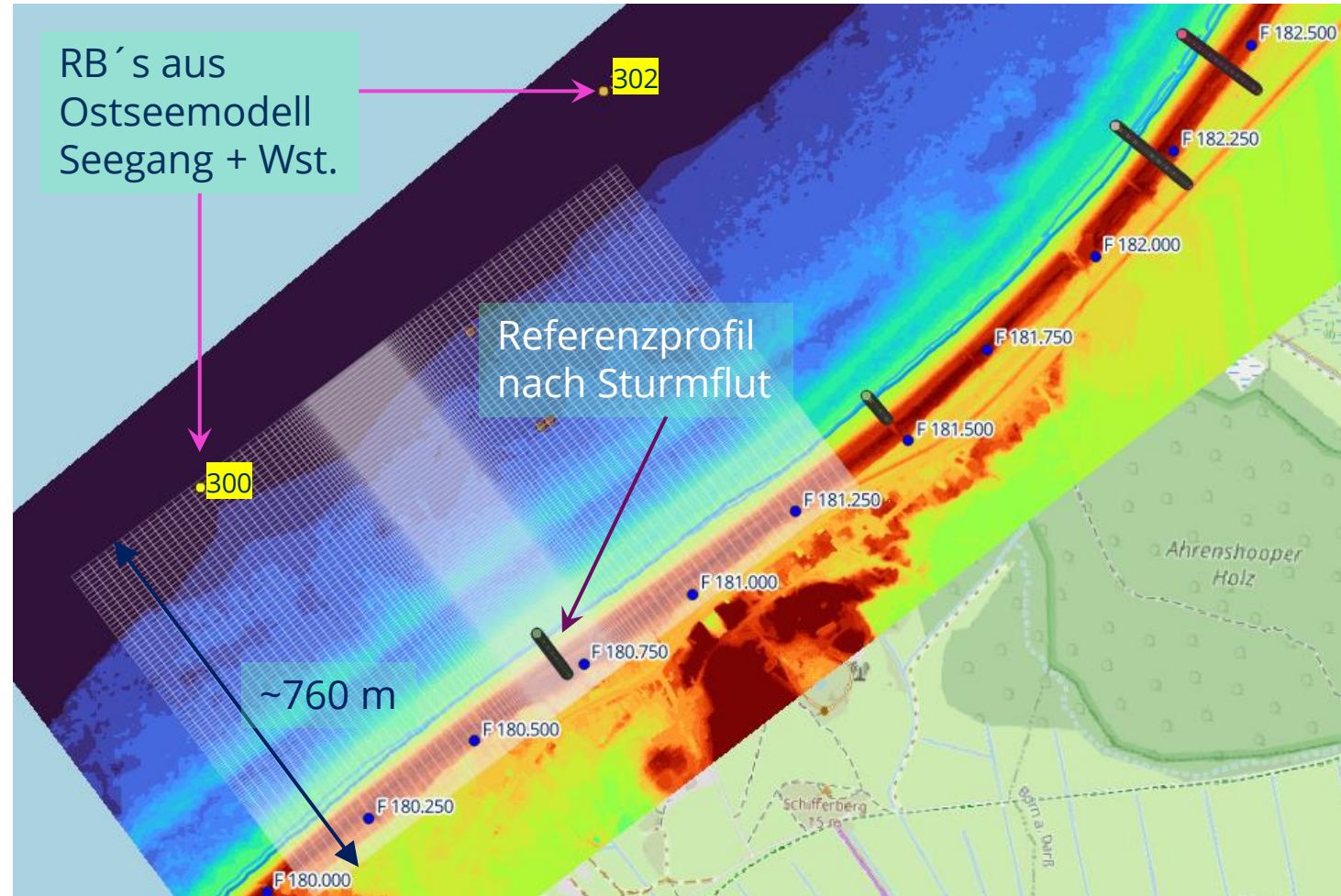
Teil 2.1 – Modellierungsprozess

Topo-Bathymetrie



in m ü NHN

- Wasserlinie aus ALS202203 ~ 0.2 m ü NHN
- Stationierung_KKM_neu

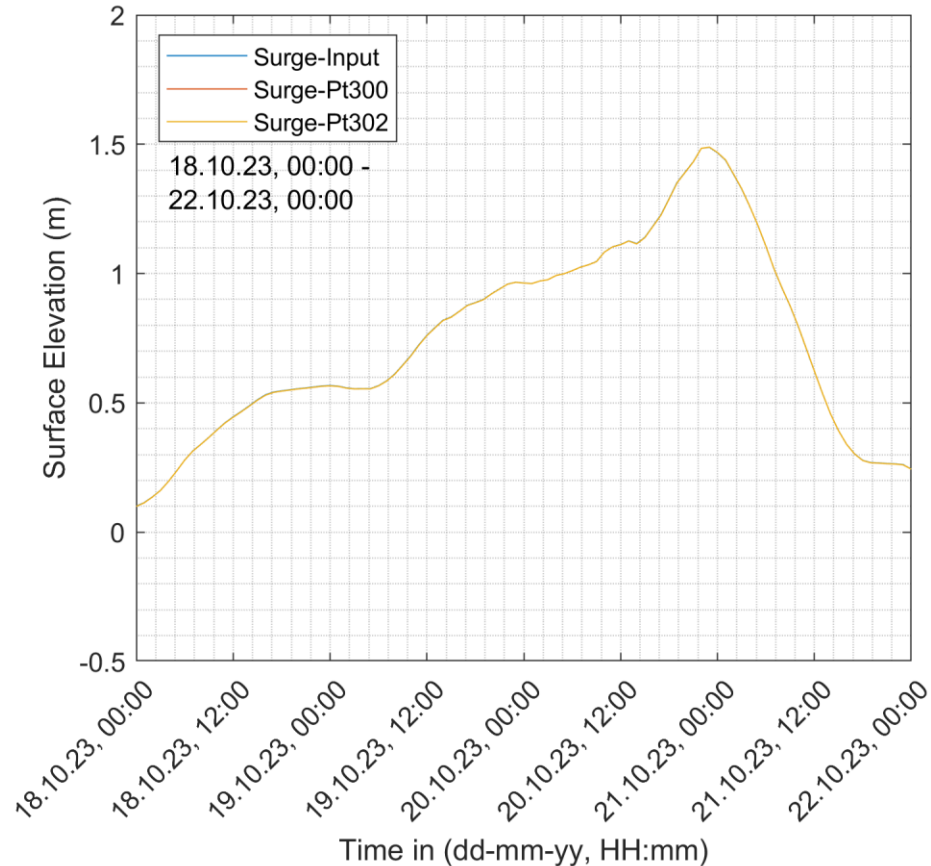


Teil 2.1 – Modellierungsprozess

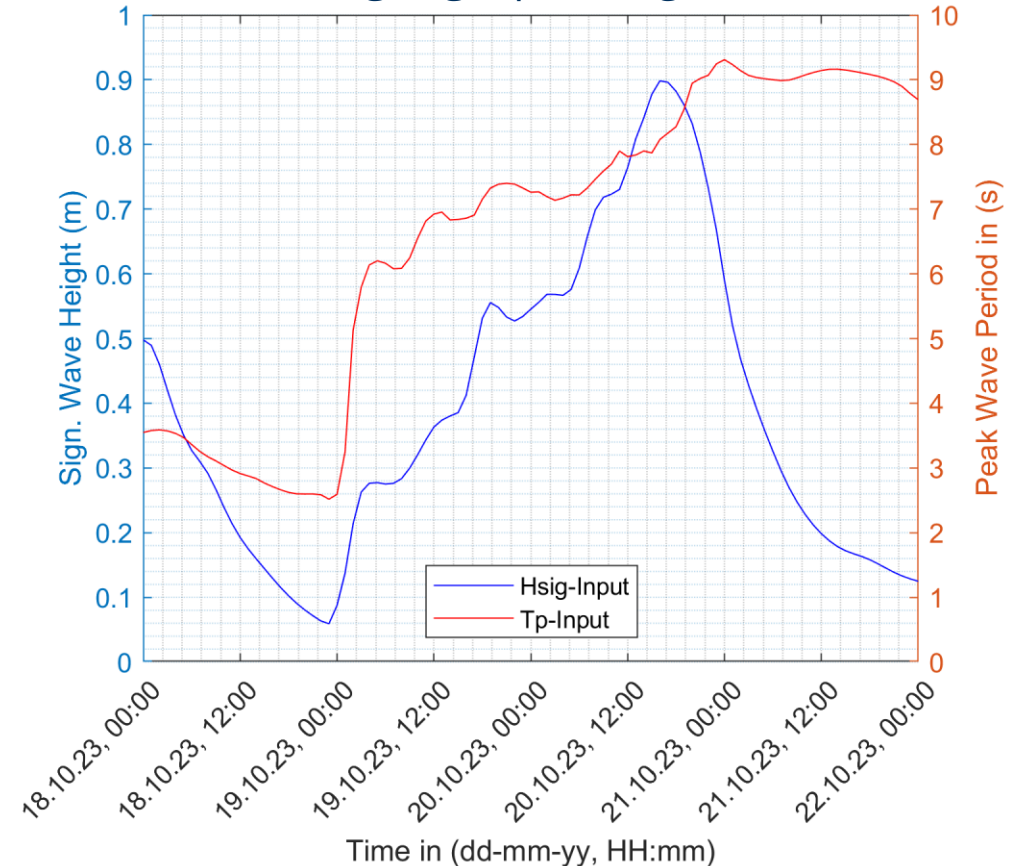
Hydraulische Randbedingungen (aus MIKE 21 HD)

Oktobersturmflut 2023

Wasserstand

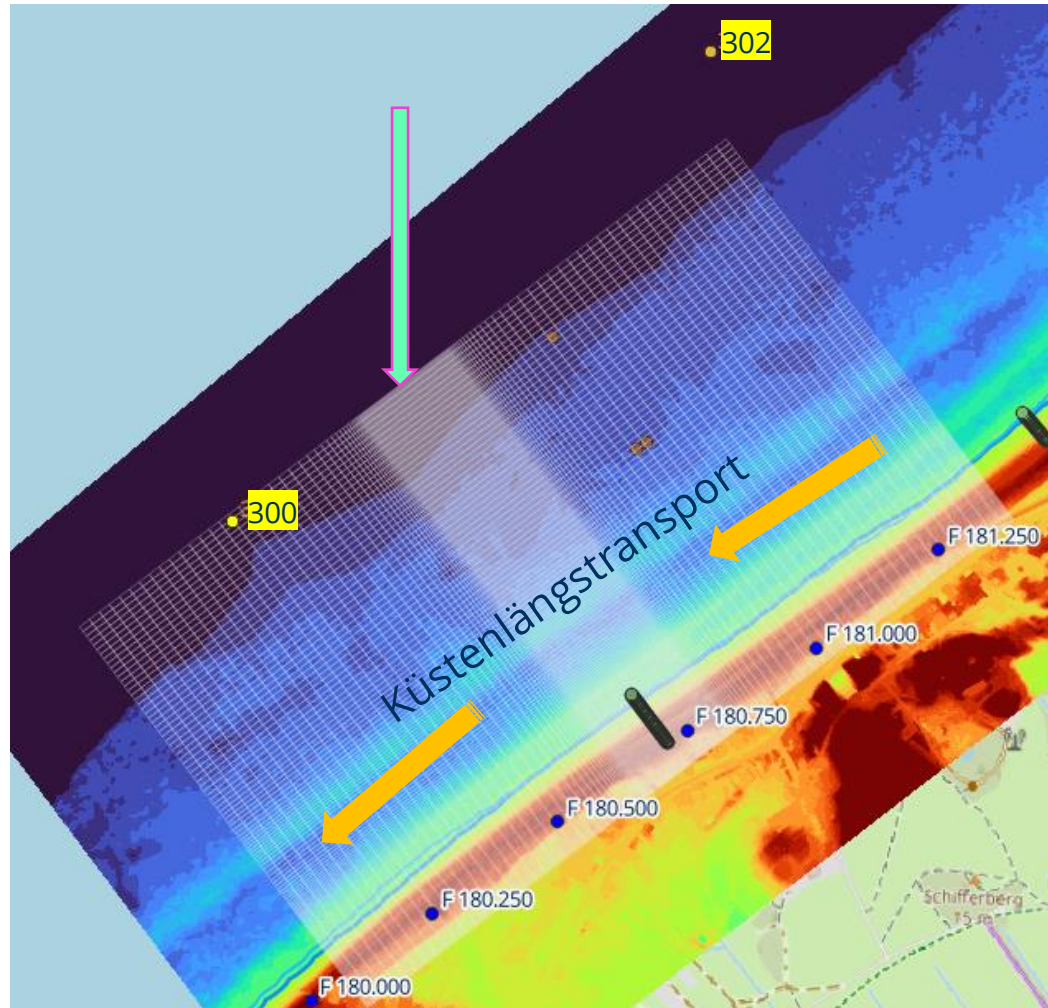


Seegang (Tp & Hsig)

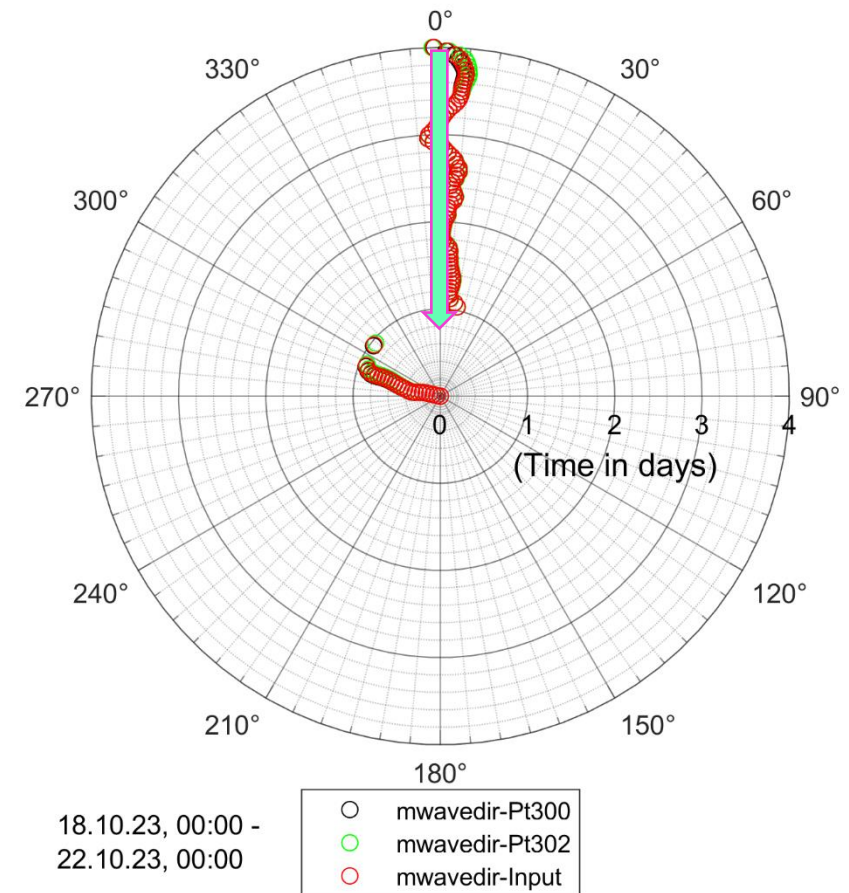


Teil 2.1 – Modellierungsprozess

Hydraulische Randbedingungen (aus MIKE 21 HD)



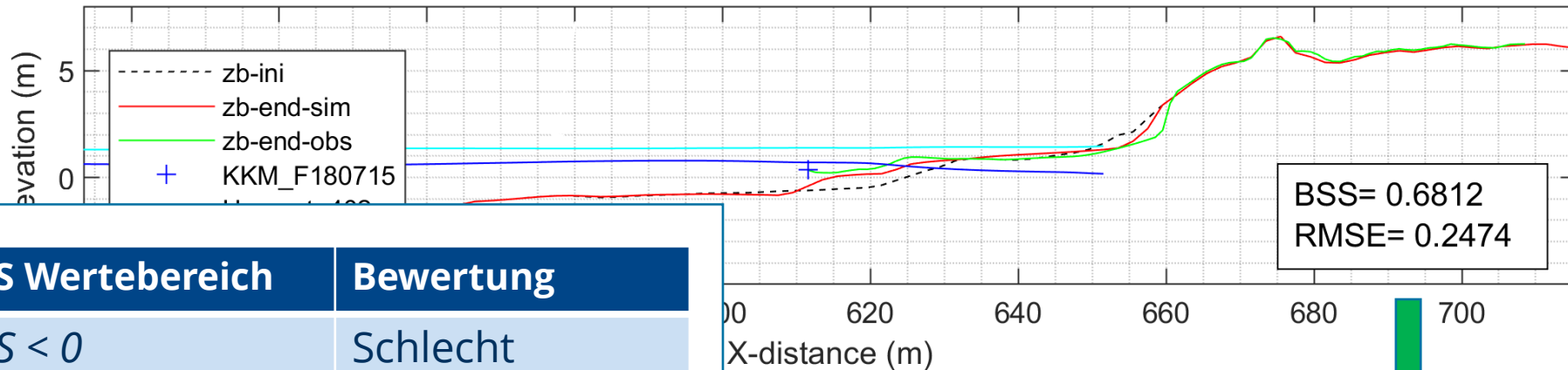
Wellenangriffswinkel



Teil 2.1 – Modellierungsprozess

Kalibrierung

Profile Analysis Plot:
zb & SedEro (start-end) / zs, Hrms, u, v (nt=402) in KKM_F180715

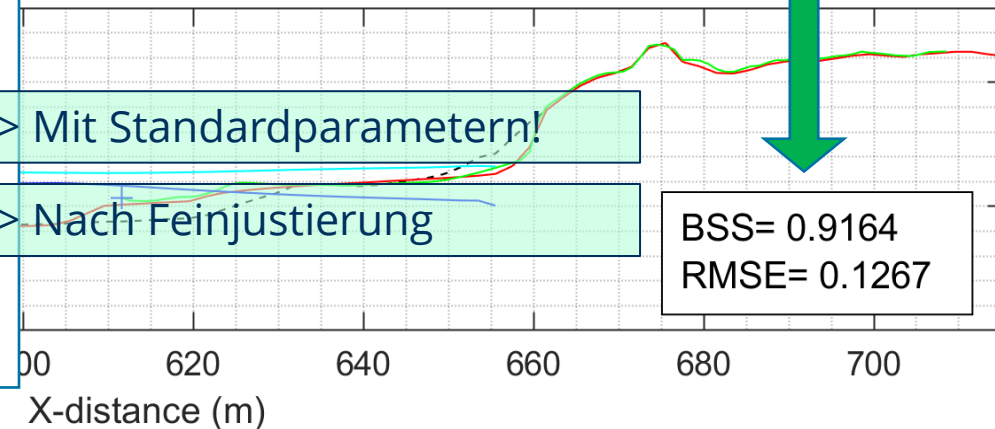


BSS Wertebereich	Bewertung
$BSS < 0$	Schlecht
$0 \leq BSS < 0.3$	Schwach
$0.3 \leq BSS < 0.6$	Akzeptabel
$0.6 \leq BSS < 0.8$	Gut
$0.8 \leq BSS < 1.0$	Sehr gut

s. Sutherland et al. (2004) & Van Rijn (2003)

>> Mit Standardparametern!

>> Nach Feinjustierung



Teil 2.1 – Modellierungsprozess

Untersuchung des Parameterraums

1. Laterale Randbedingungen

- Zyklisch
- Neumann

2. Rückwärtige Randbedingung

- absorbierend

3. Wellenbelastung

- Wellenlänge
- Wellensteilheit
- Wellenbrechen

4. Rauhigkeit

- Sohlrreibungskoeff.
- Vegetation

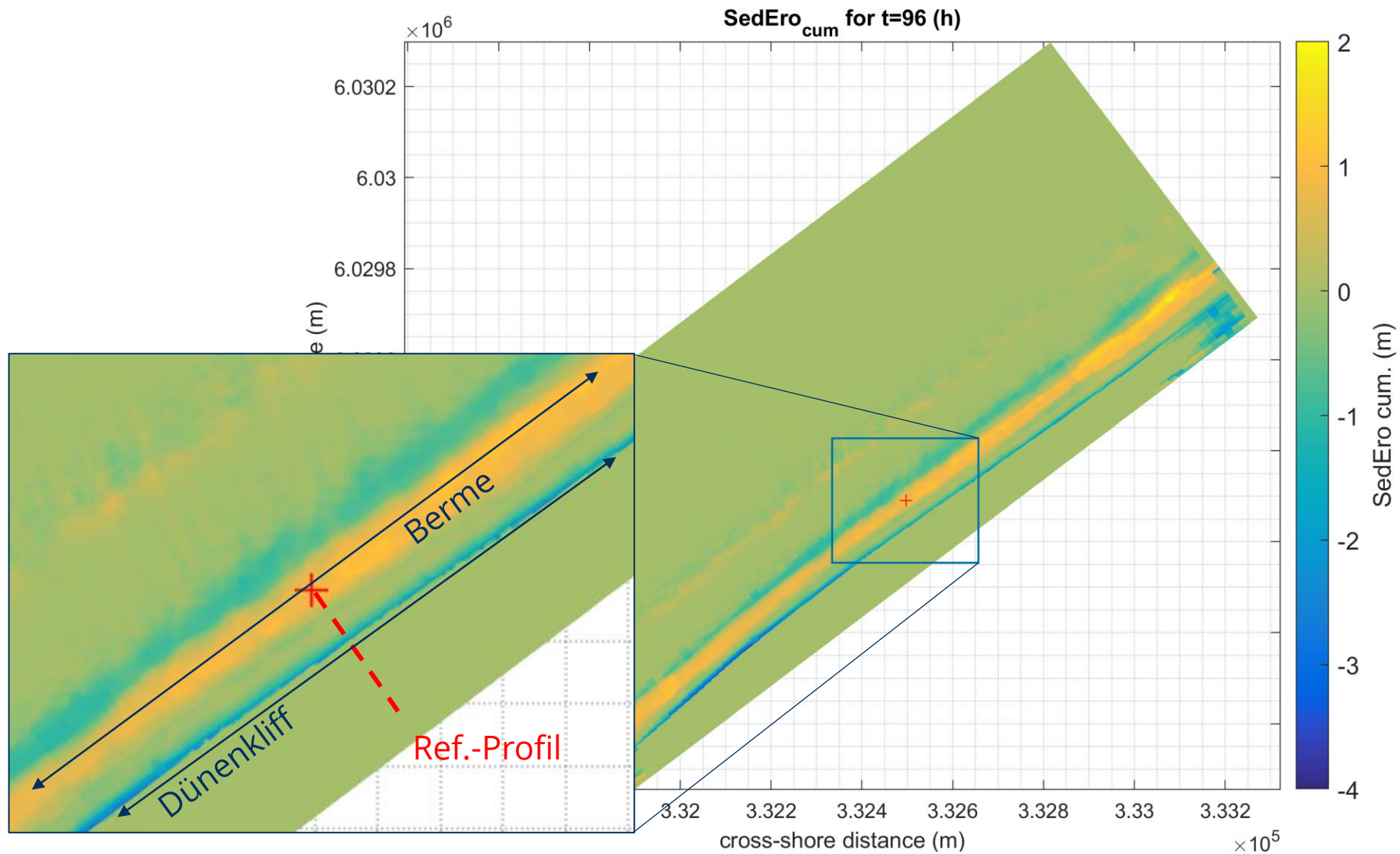
5. Morphodynamik

- Böschungsneigung, morphodyn, Auflösung, Porosität

6. Netzparameter

- Minimale Auflösung (1x1m, 2x2m)
- laterale Ausdehnung
- Böschungsneigung Offshore

Teil 2.2 – Ergebnisse



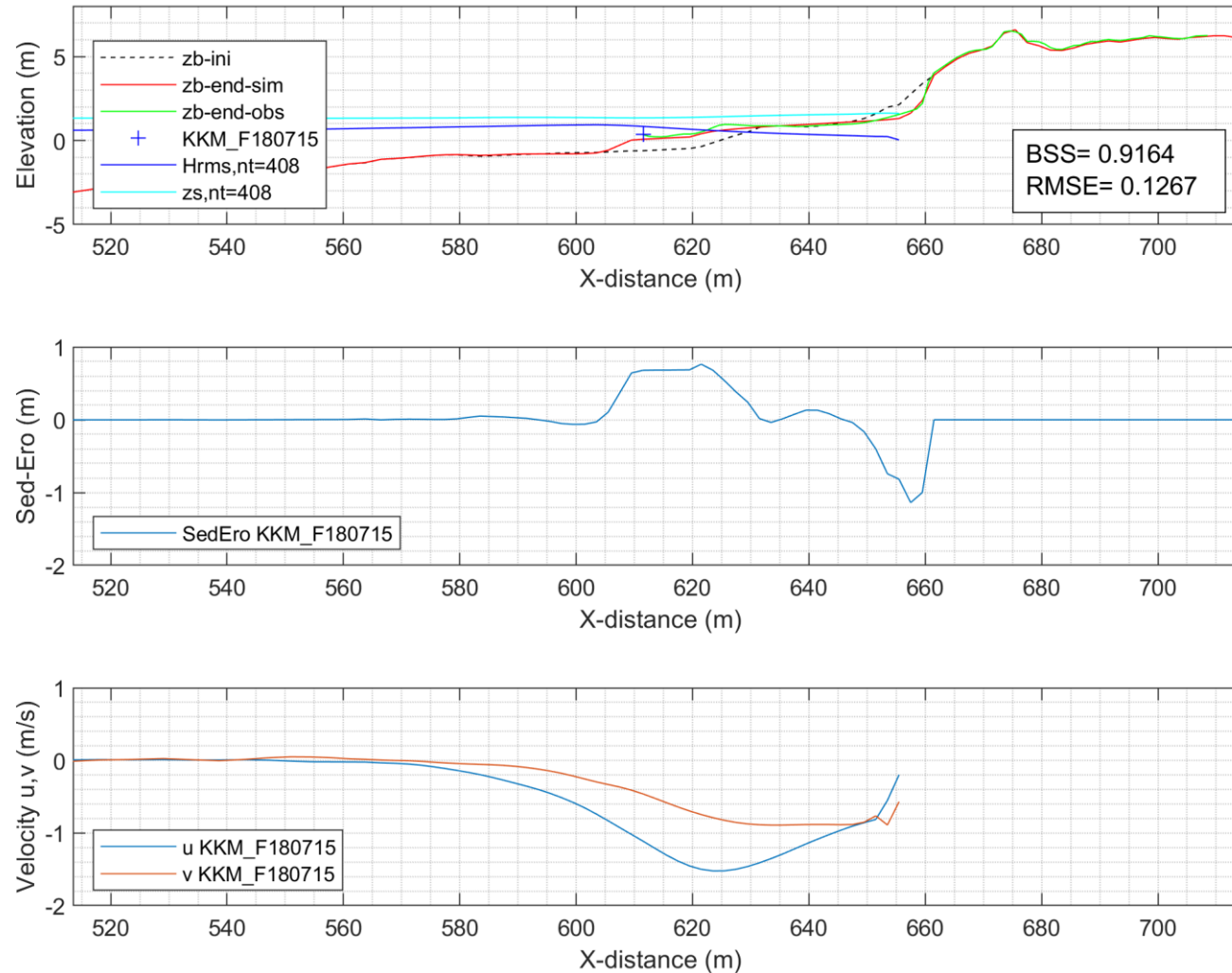
Teil 2.2 – Ergebnisse Küstenquerprofile 1D

Profile + Hydraulik

Sedimentation-Erosion

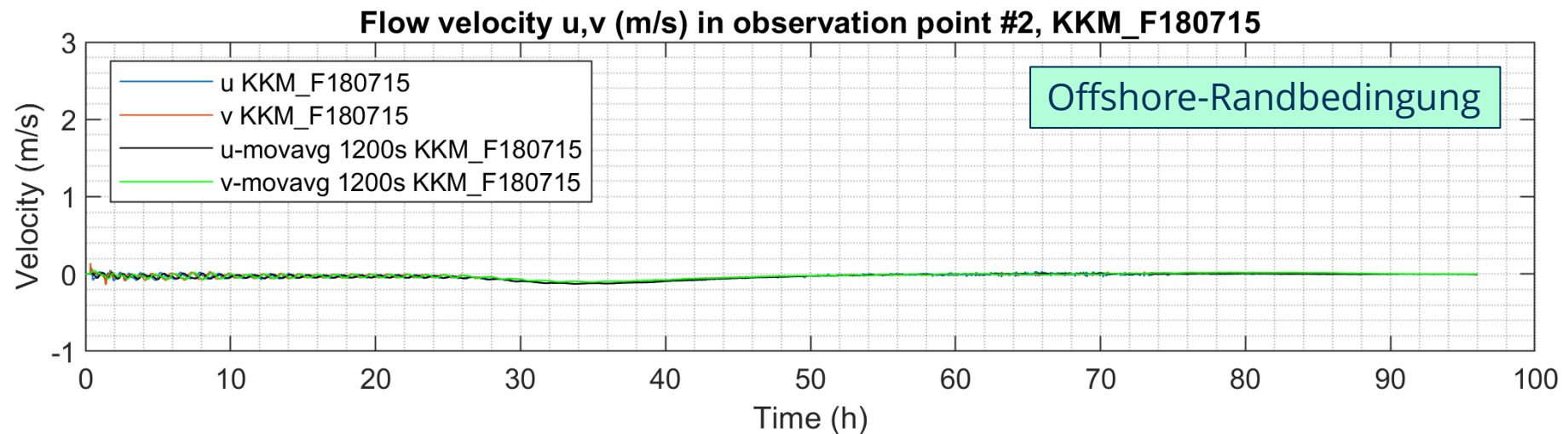
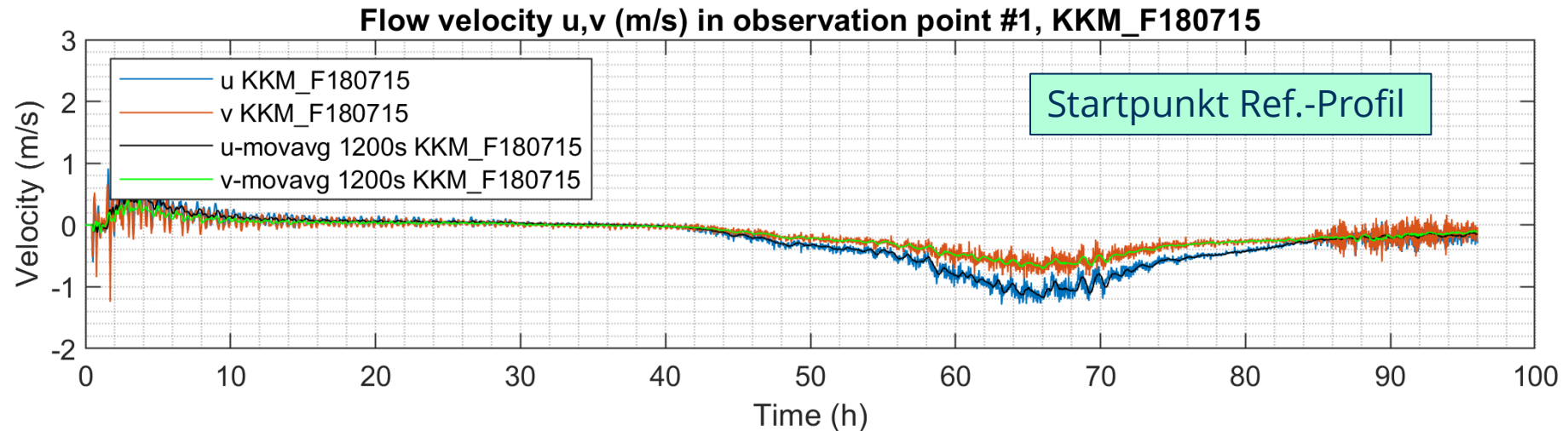
Geschwindigkeiten

Profile Analysis Plot:
zb & SedEro (start-end) / zs, Hrms, u, v (nt=408) in KKM_F180715



Teil 2.2 – Ergebnisse

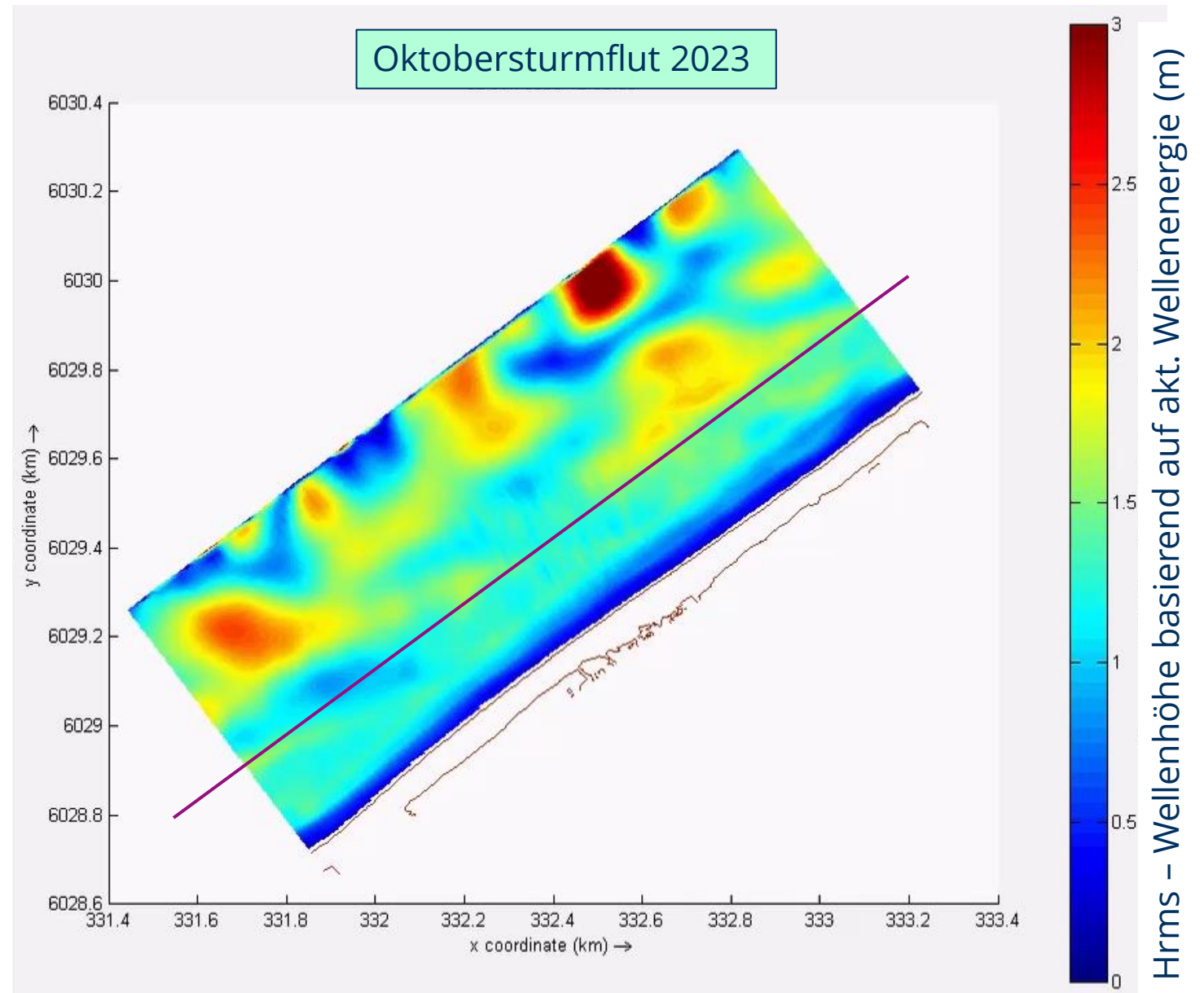
Massentransport 1D



Teil 2.2 – Ergebnisse

Wellenbild 2D

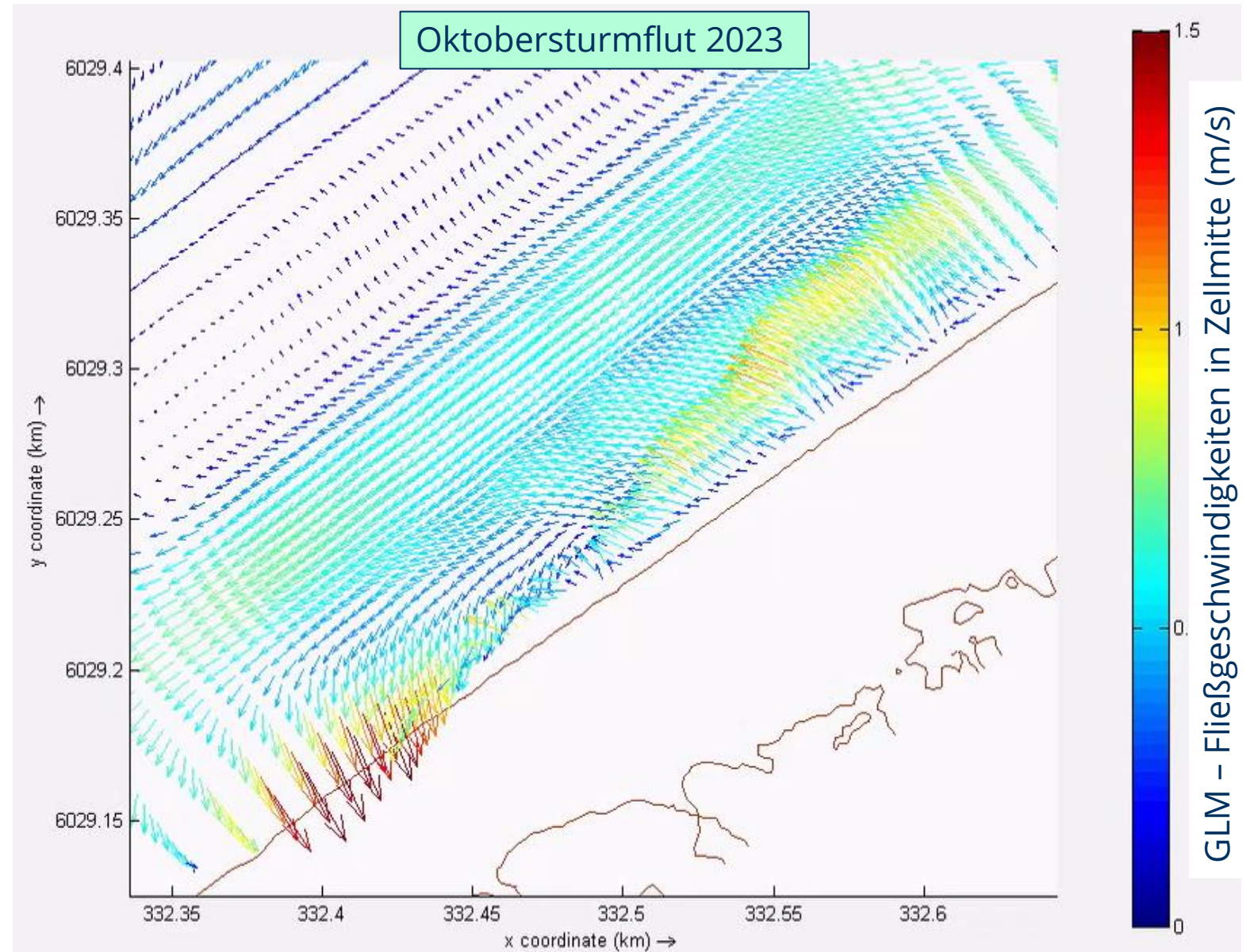
Animation Hrms –
Wasserspiegelauslenkung



Teil 2.2 – Ergebnisse

Strömungsbild 2D

Animation GLM Velocities -
Geschwindigkeitsvektoren



Teil 2 – Morphodynamische Analyse (ResCAD A)

Zwischenfazit

1. Leistungsfähige Modellierungssoftware

- MPI-Version von XBeach, Surfbeat Mode
- Beschleunigte, komplexe Modellerstellung via Matlab / QGIS

2. Automatisierte Netzerstellung

- Angepasst an georeferenziertes Profil und Ausgabepunkte für seeseitige RB´s aus **MIKE21**

3. Topo-Bathymetrie

- Bisher kaum ereignisbezogene Datensätze für Dünen und Vorstrand verfügbar
- Oktobersturmflut 2023: **ALS (24.09.2023)** + **EOMAP (2022/03)** + **BSH (1998)**

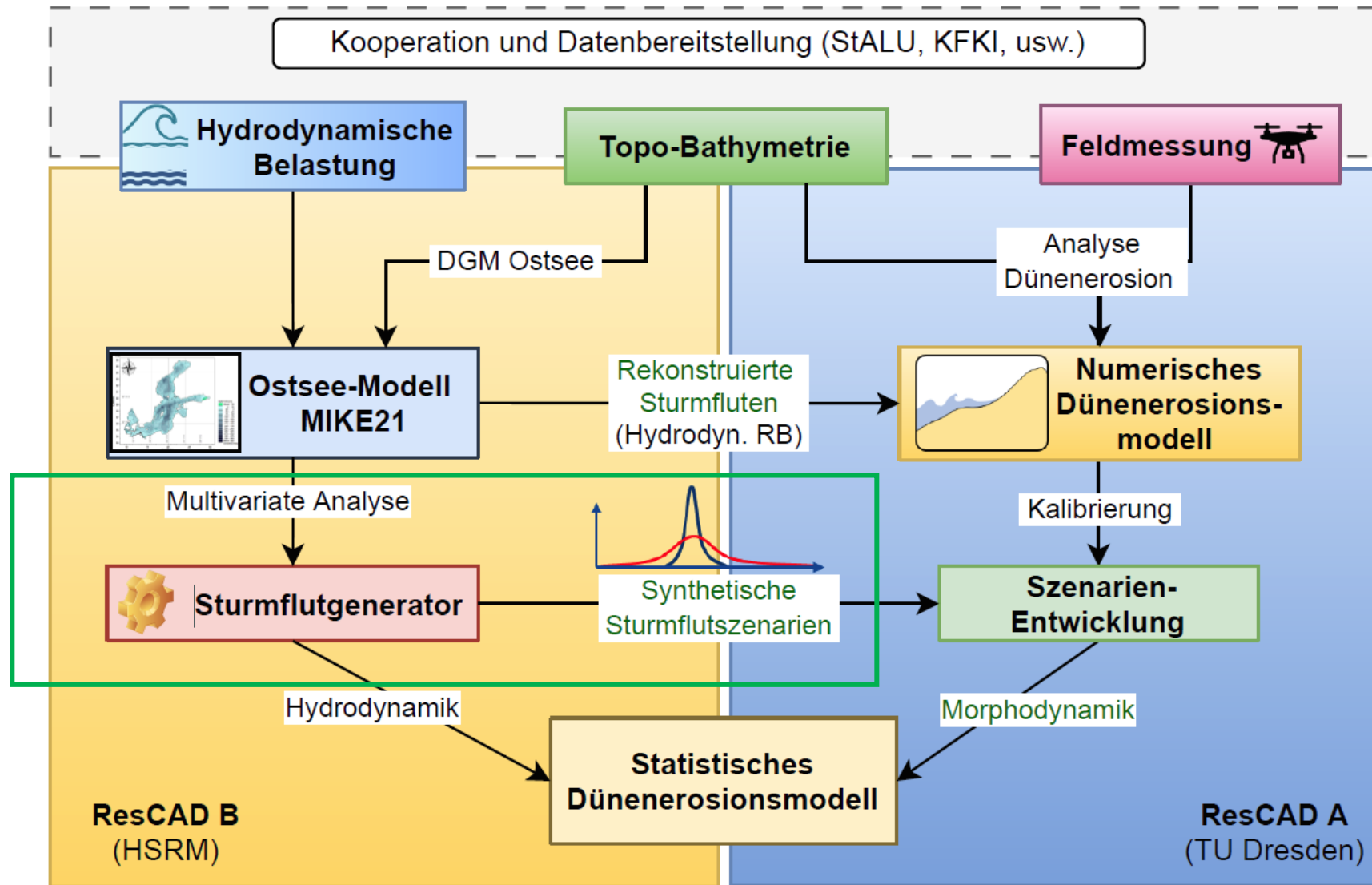
5. Kalibrierung erfolgreich (BSS: > 0.9)

- Validierung erfolgt an weiteren Abschnitten und Ereignissen

6. Bisherige Ergebnisse

- Default-Parameter zeigen gute Übereinstimmung, Kalibrierung mit sehr guten Ergebnissen
- Komplexe Auswertung durch phasen-aufgelöstes Xbeach-Modell möglich

Teil 3 – Stochastischer Sturmflutgenerator



Teil 3 – Stochastischer Sturmflutgenerator

Multivariate Extremwertanalyse

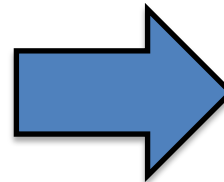
In der **multivariaten** Extremwertanalyse werden die **kombinierten Eintrittswahrscheinlichkeiten** von **zwei oder mehreren** Variablen bestimmt.

→ Ermittlung einer gemeinsamen Verteilungsfunktion (Copula):

$$C[F_1(x_1), \dots, F_n(x_n)]$$

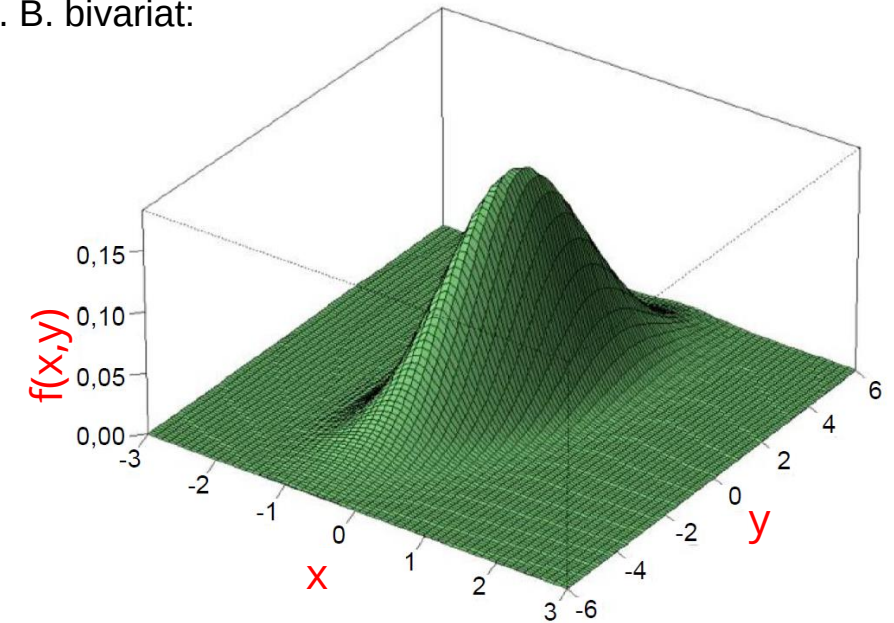
Ableitung der kombinierten Wahrscheinlichkeiten zwischen:

- Wasserstand - Verweilzeit
- Wasserstand - Wellenhöhe
- Wellenhöhe - Wellenperiode



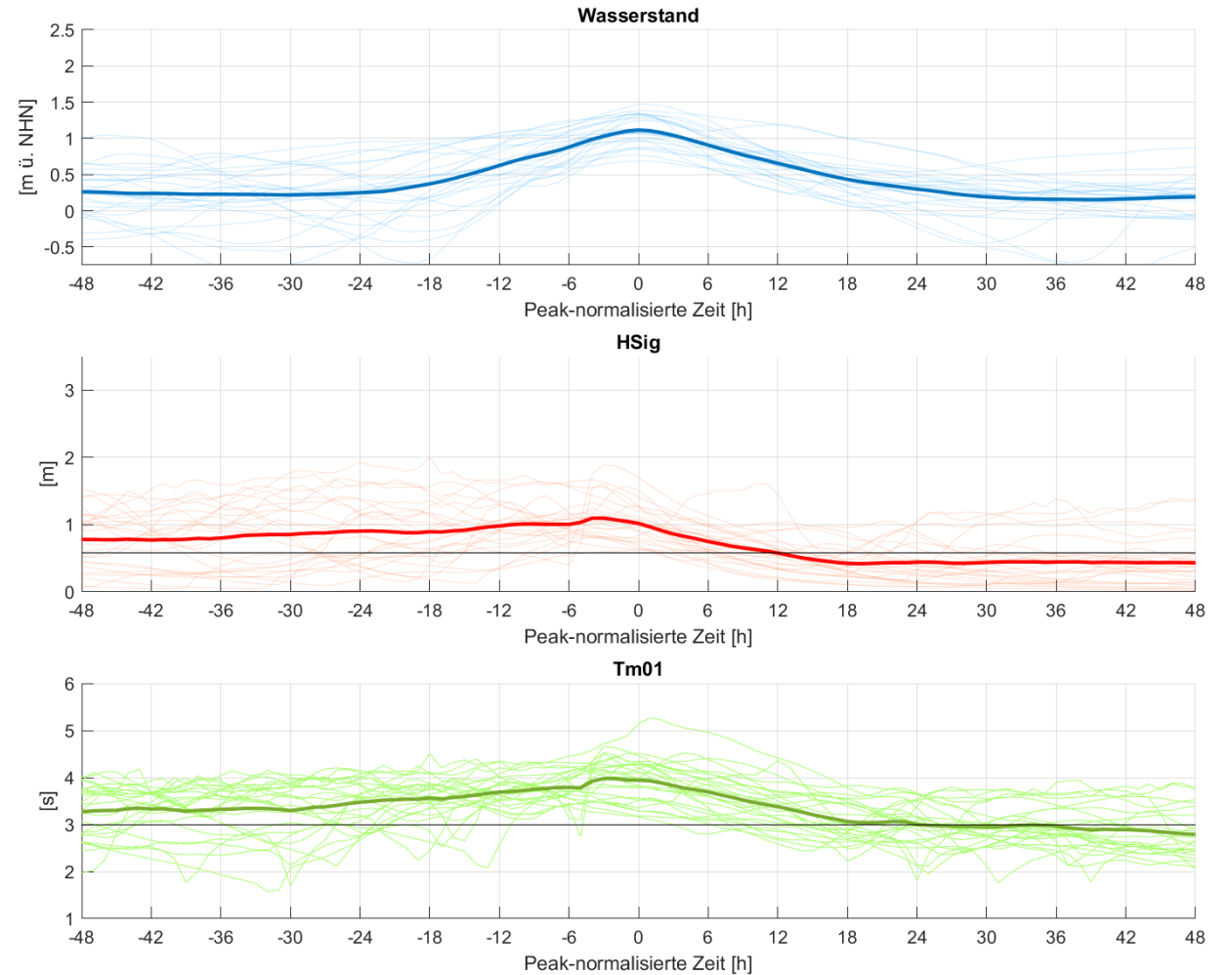
Stochastische Generierung von plausiblen Wertekombinationen

z. B. bivariat:



Teil 3 – Stochastischer Sturmflutgenerator

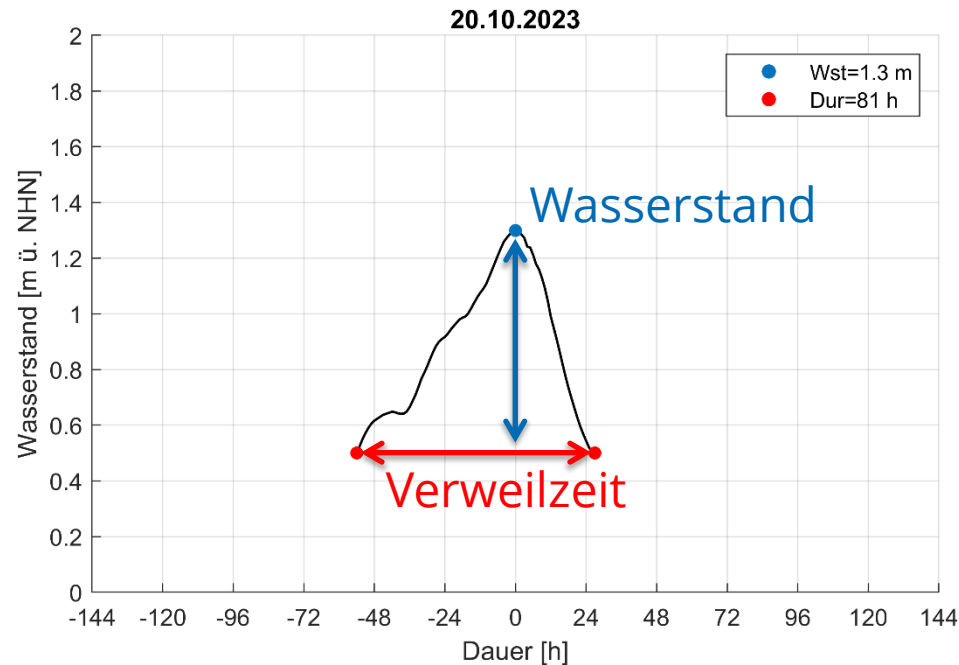
Hindcast (1940-2023)



Teil 3 – Stochastischer Sturmflutgenerator

Parametrisierung von Sturmfluten

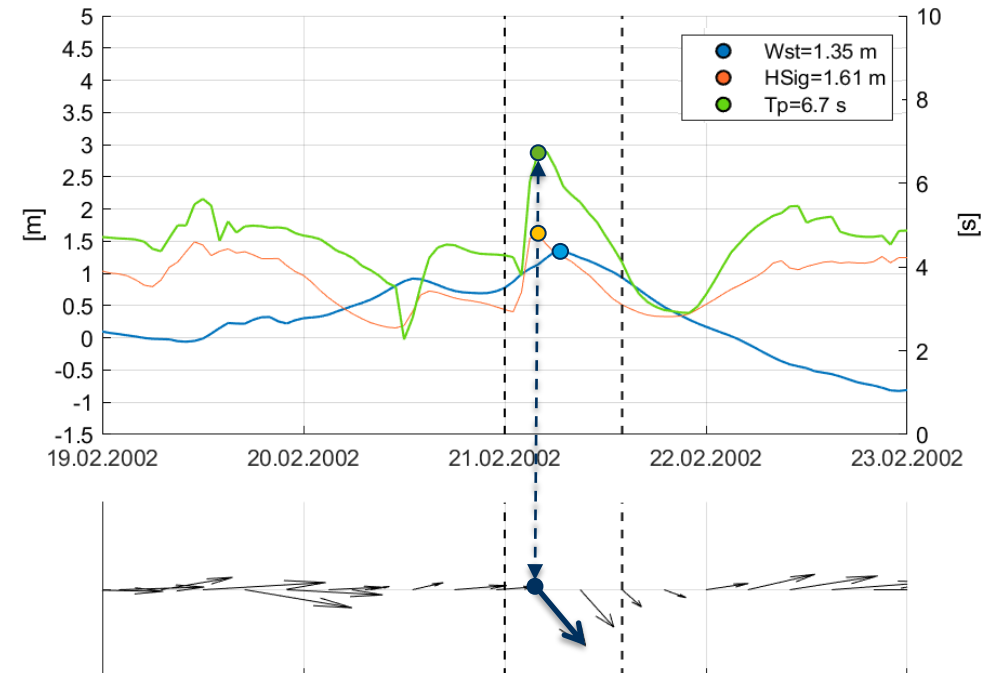
Wasserstandsverlauf:



Ermittlung von hydrodyn. Parametern:

- Scheitelwasserstand [m] (**Wst**)
- Verweilzeit [h] (**Dur**)

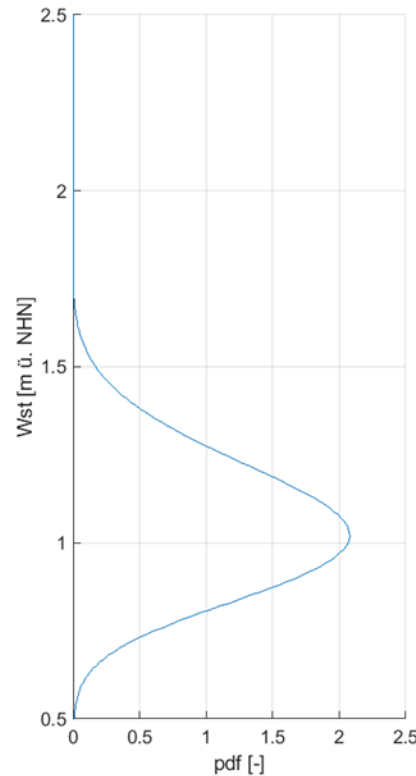
Seegangsverlauf:



Ermittlung von Seegangparametern:

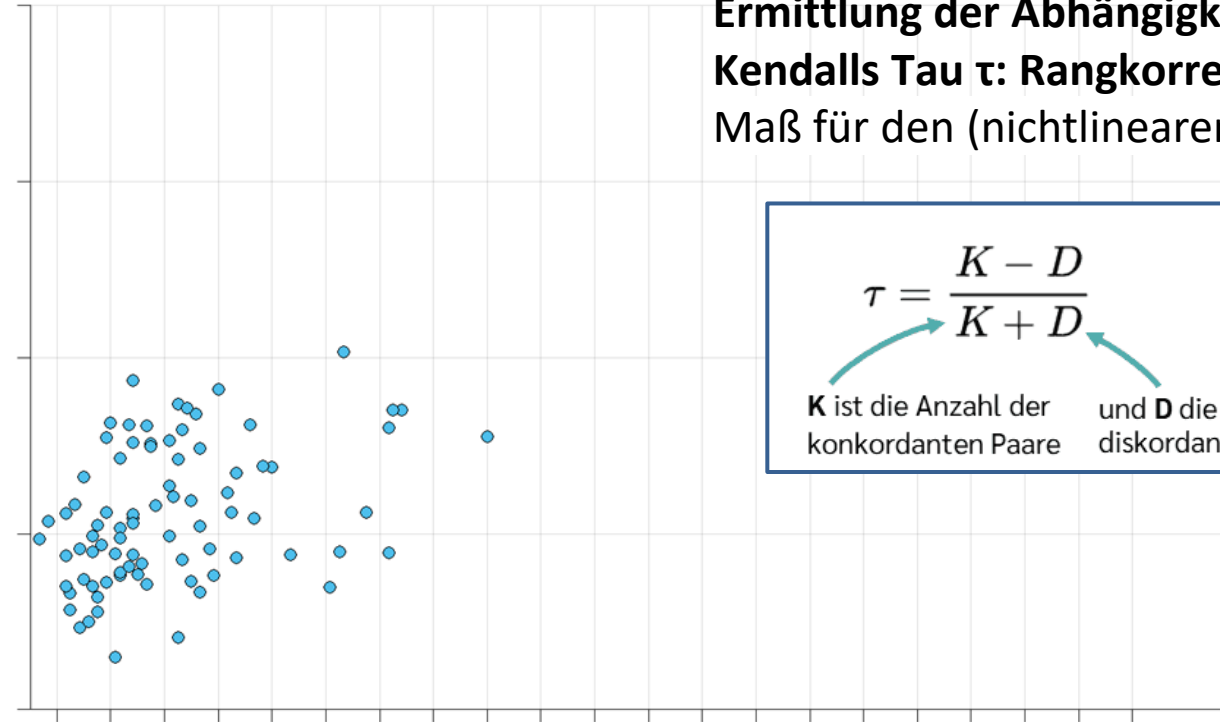
- Maximale Wellenhöhe (**HSig**)
- Wellenperiode (**Tm01**)
- Wellenrichtung (**Dir**)

Teil 3 – Stochastischer Sturmflutgenerator



Ermittlung univariaten
Verteilungsfunktionen

Wasserstand [m]



Verweilzeit [h]



Ermittlung der Abhängigkeitsstruktur:

Kendalls Tau τ : Rangkorrelation

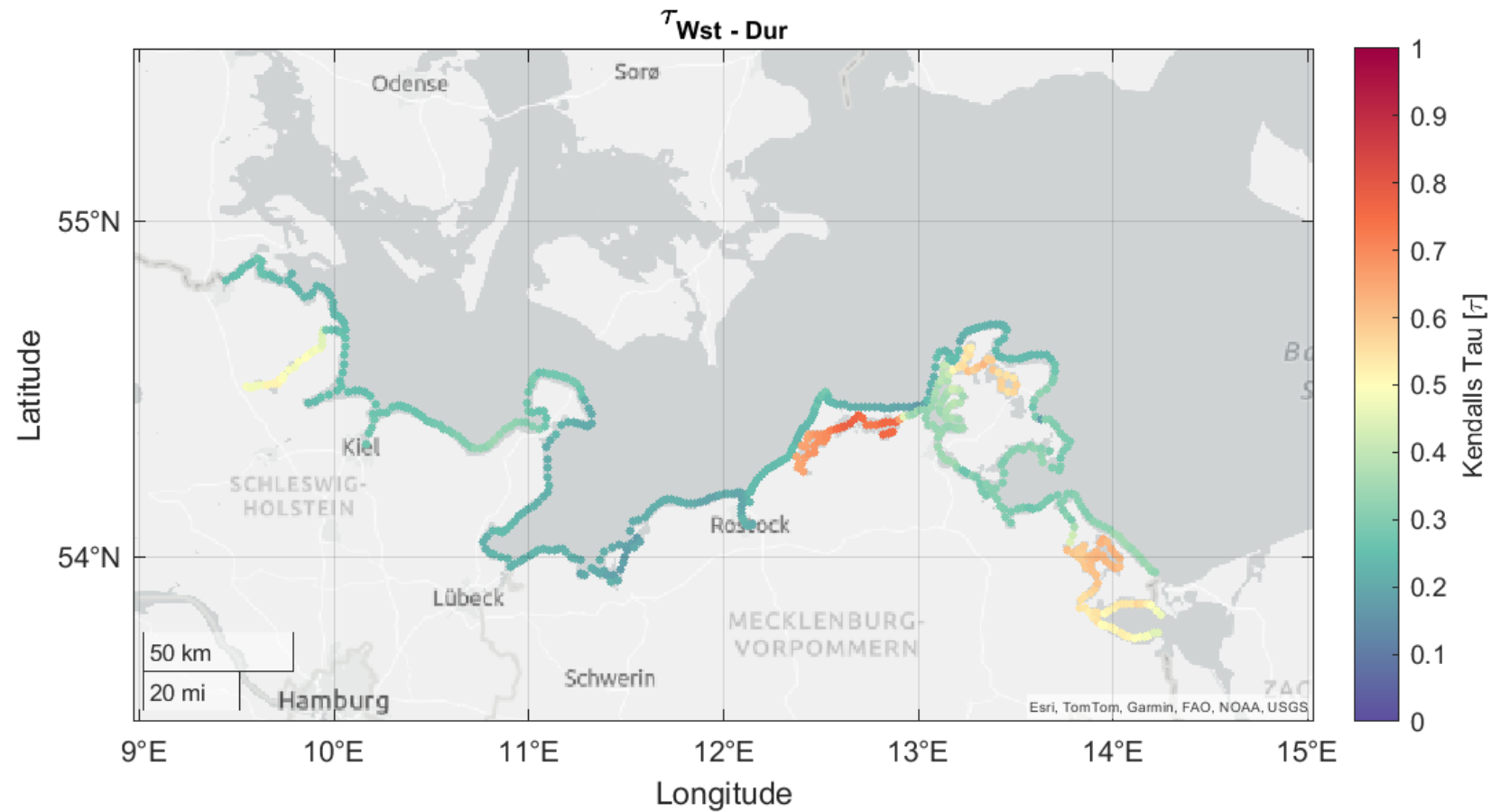
Maß für den (nichtlinearen) Zusammenhang

$$\tau = \frac{K - D}{K + D}$$

K ist die Anzahl der
konkordanten Paare

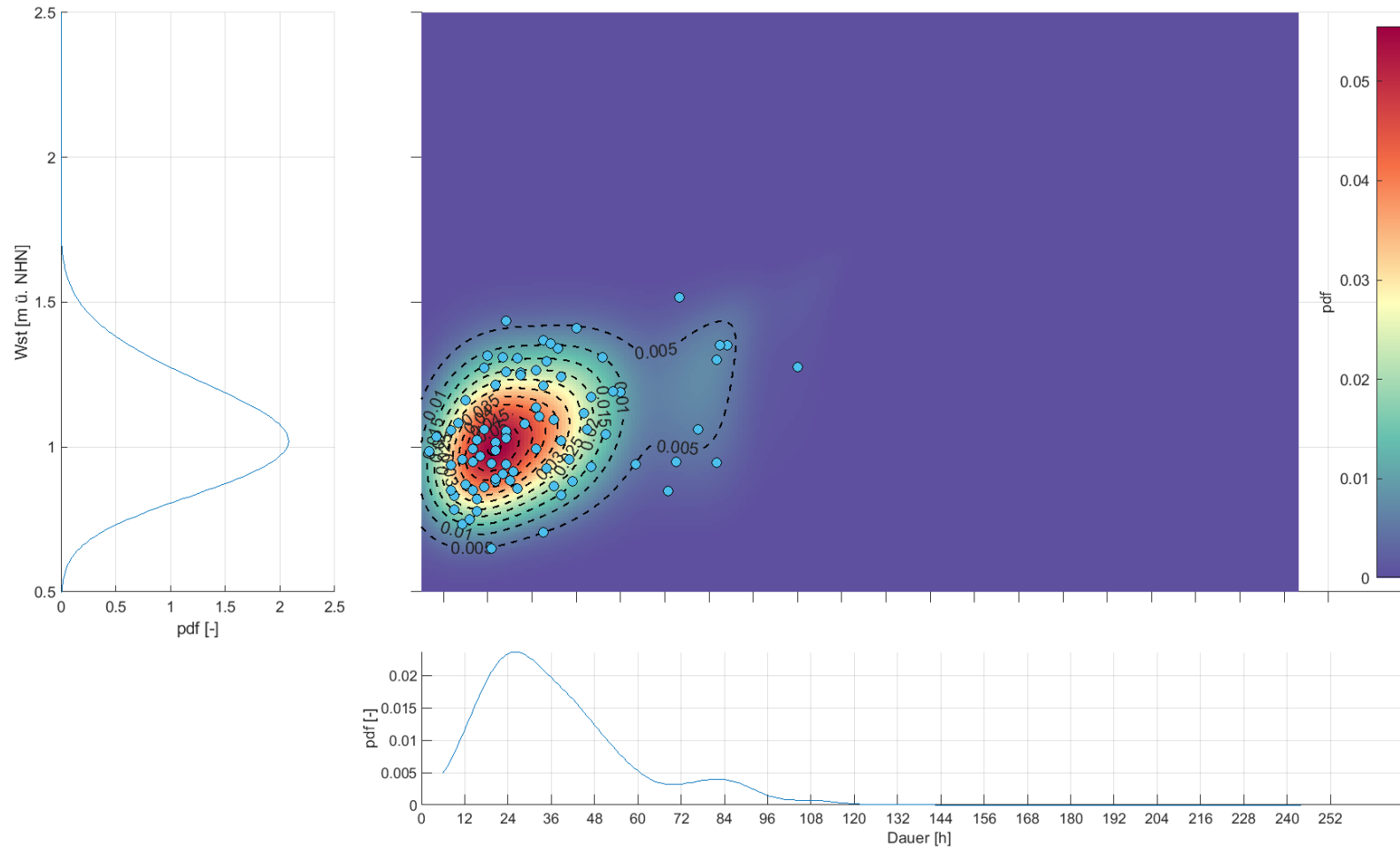
und **D** die Anzahl der
diskordanten Paare.

Teil 3 – Stochastischer Sturmflutgenerator



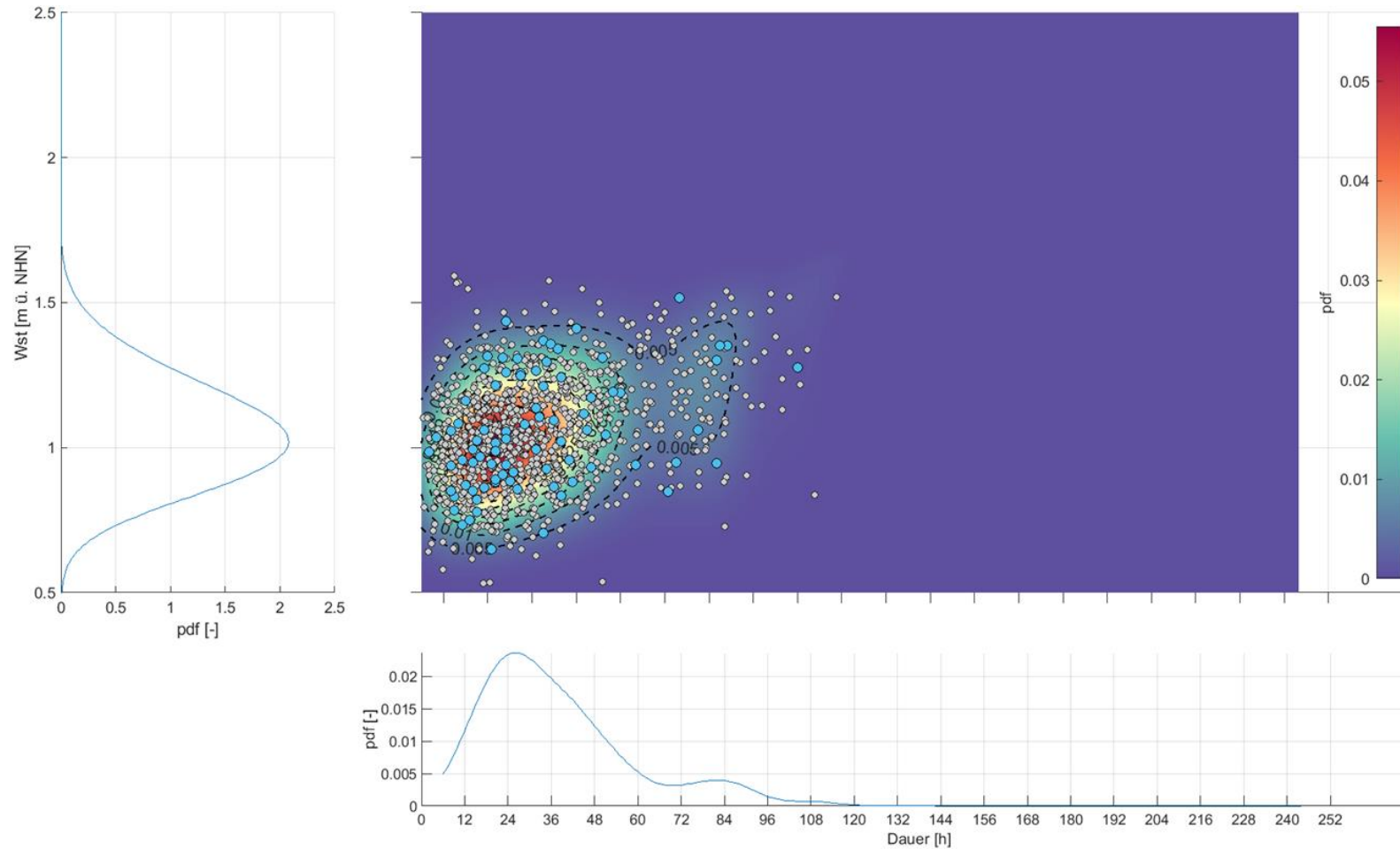
Teil 3 – Stochastischer Sturmflutgenerator

Ermittlung der bivariaten Verteilungsfunktion pdf (f_{xy})



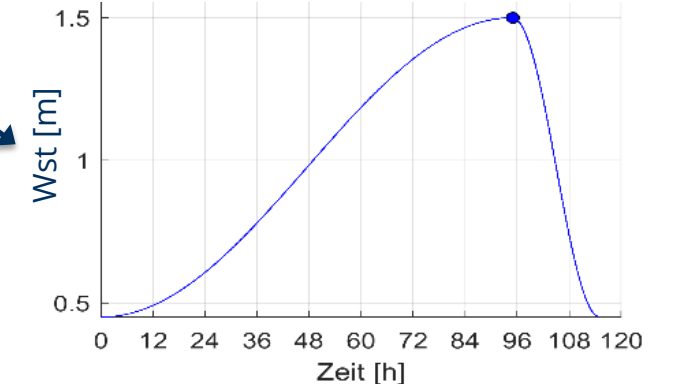
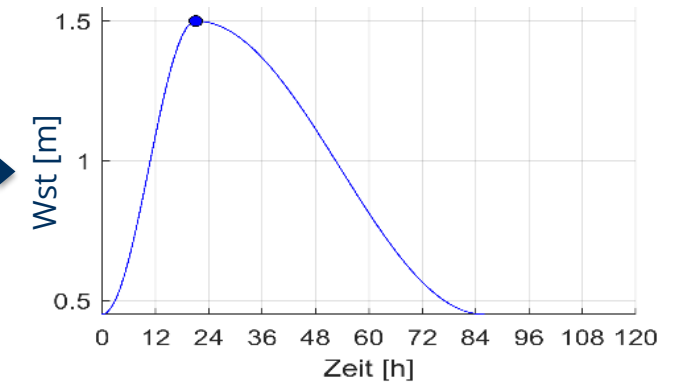
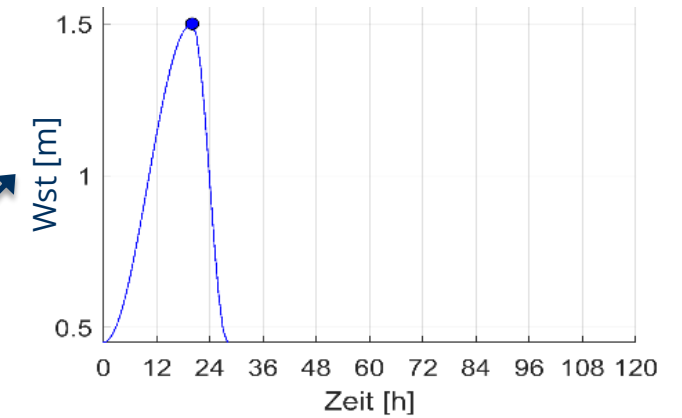
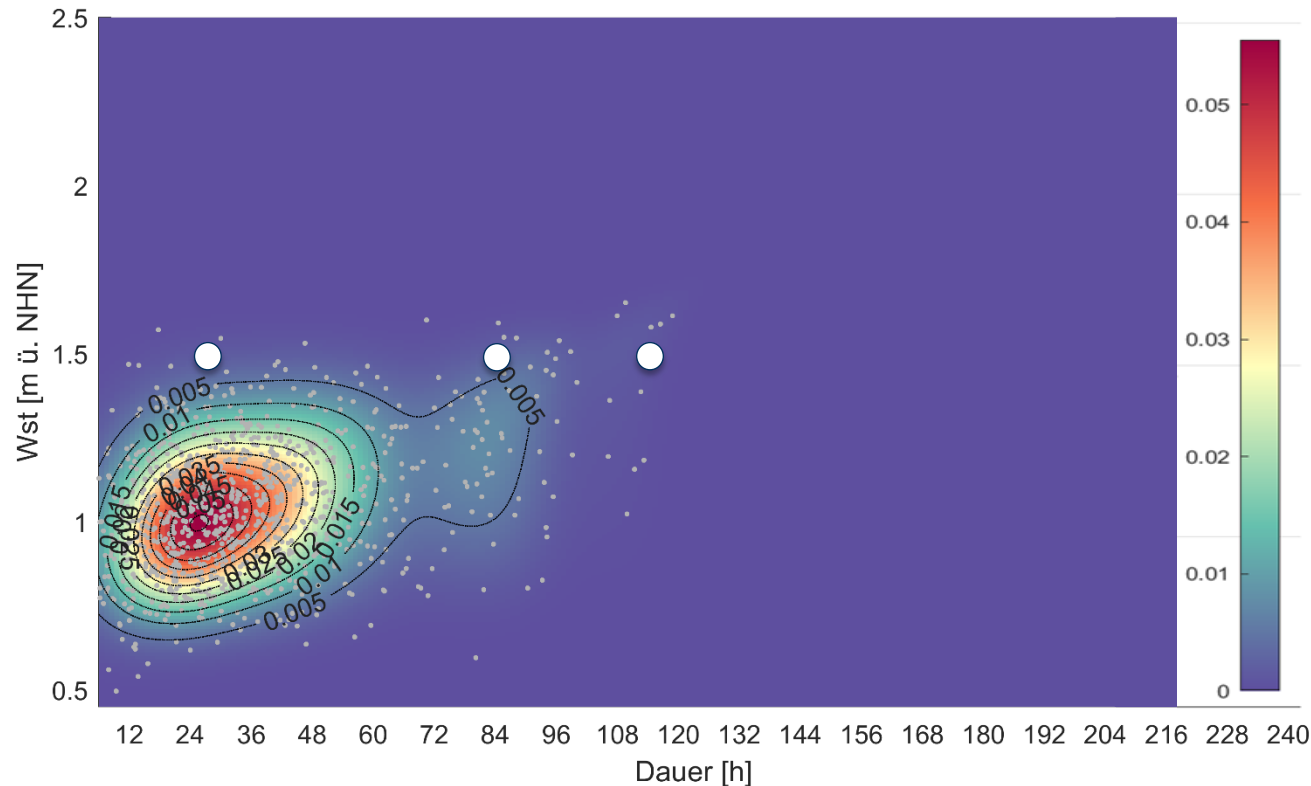
Teil 3 – Stochastischer Sturmflutgenerator

Ermittlung der bivariaten Verteilungsfunktion pdf (f_{xy})



Teil 3 – Stochastischer Sturmflutgenerator

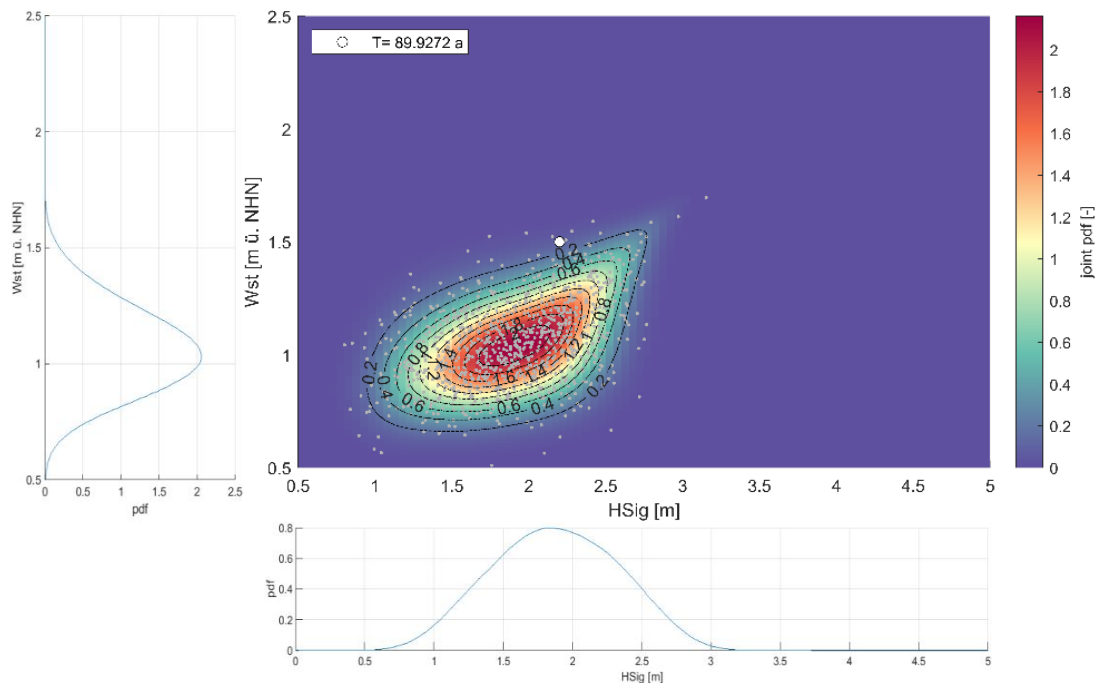
Generierung von synthetischen Hydrographen



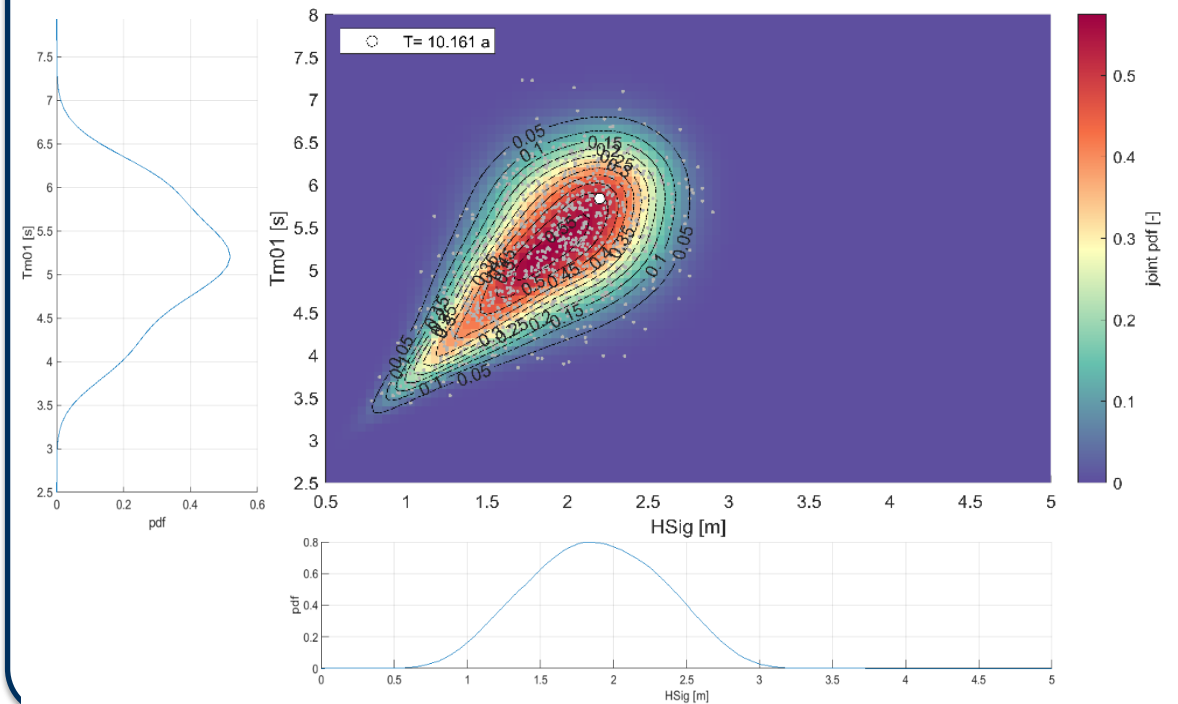
→ Stochastische Generierung von statistisch-plausiblen Kombinationen

Teil 3 – Stochastischer Sturmflutgenerator

c[WSt, HSig]



c[Tm01, HSig]



Teil 3 – Stochastischer Sturmflutgenerator

Sturmflutgenerator

Geographische Lage

Longitude [°]:

Latitude [°]:

Hydrodynamische Randbedingungen

☒ Wasserstand..

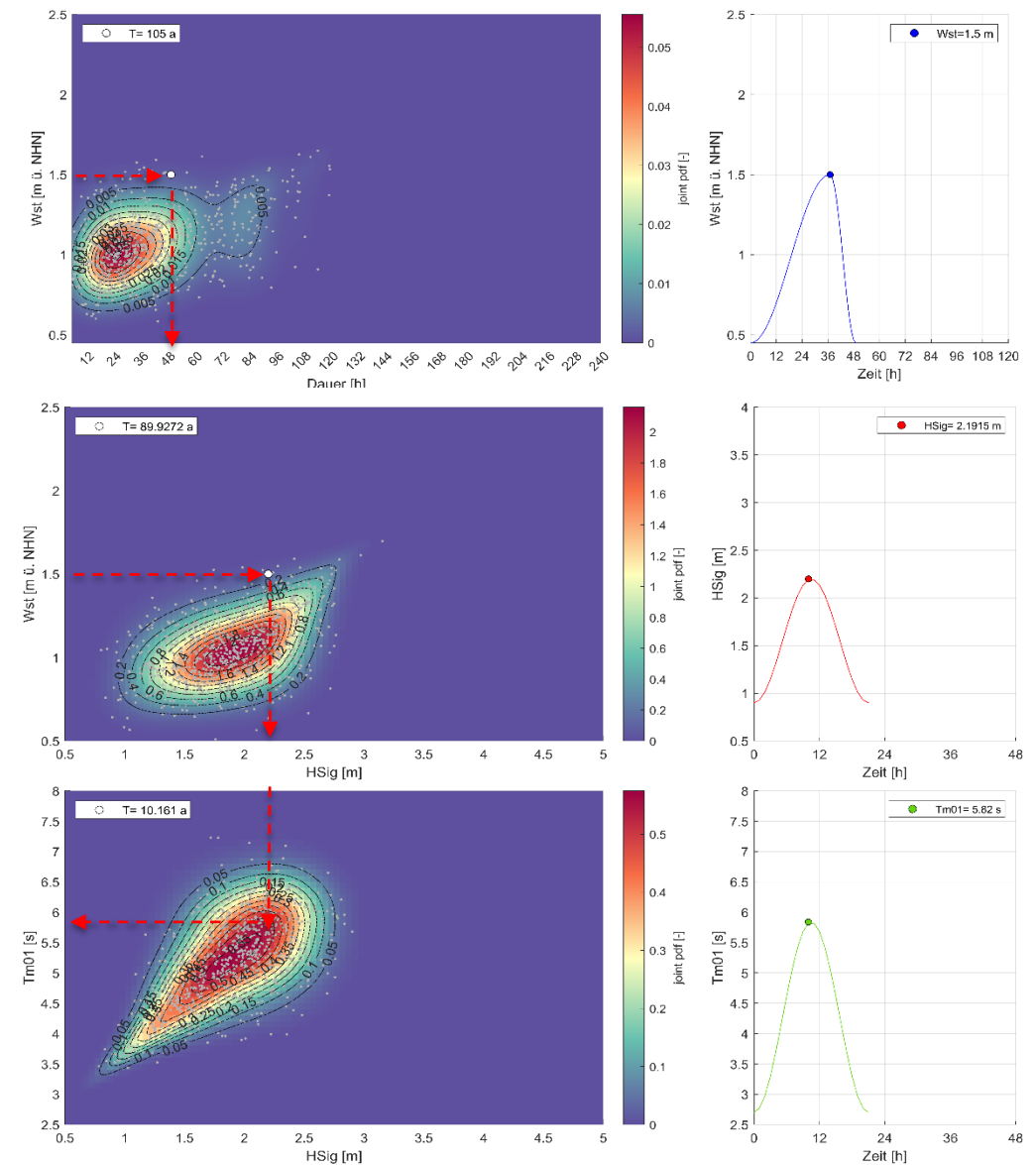
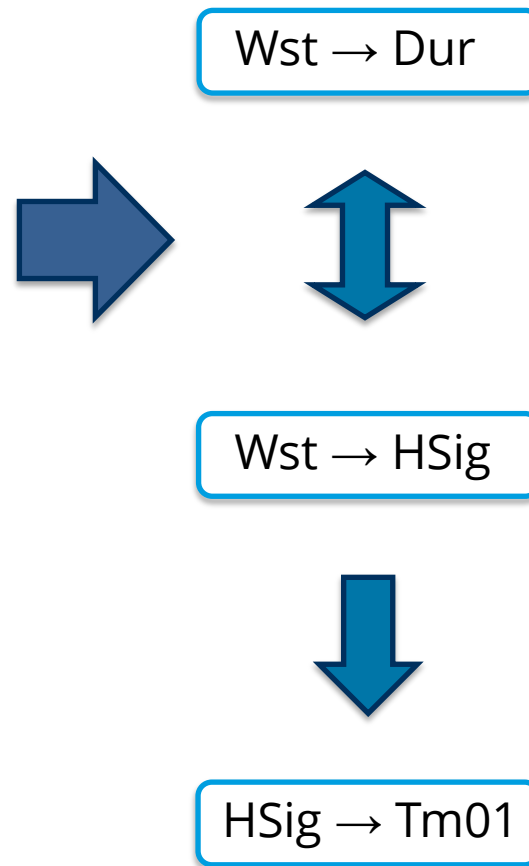
☐ Verweilzeit [h]:

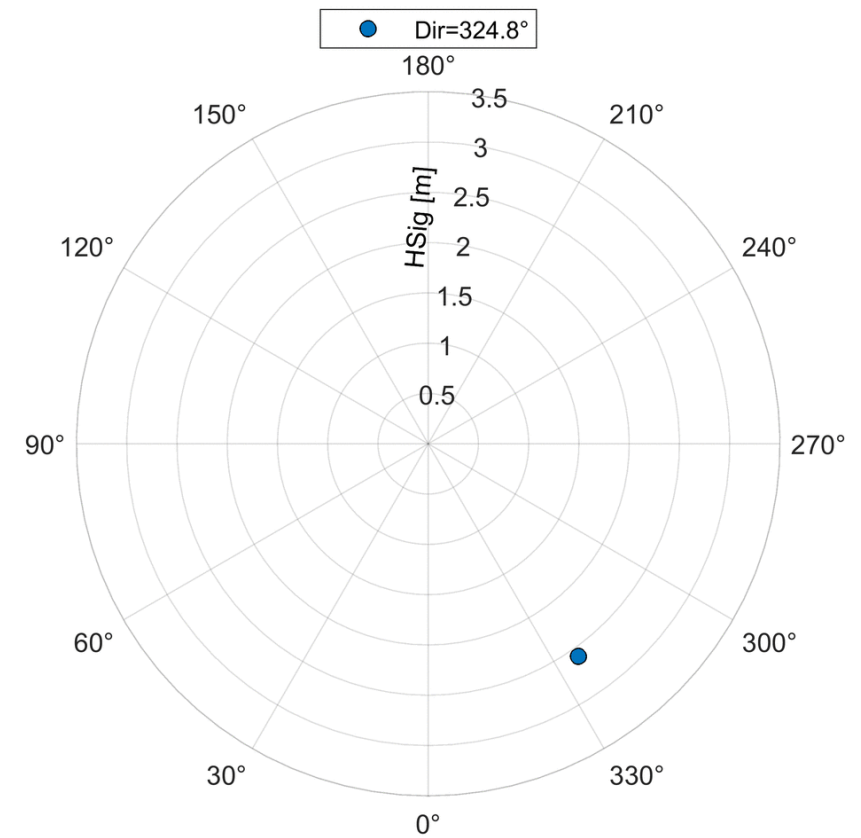
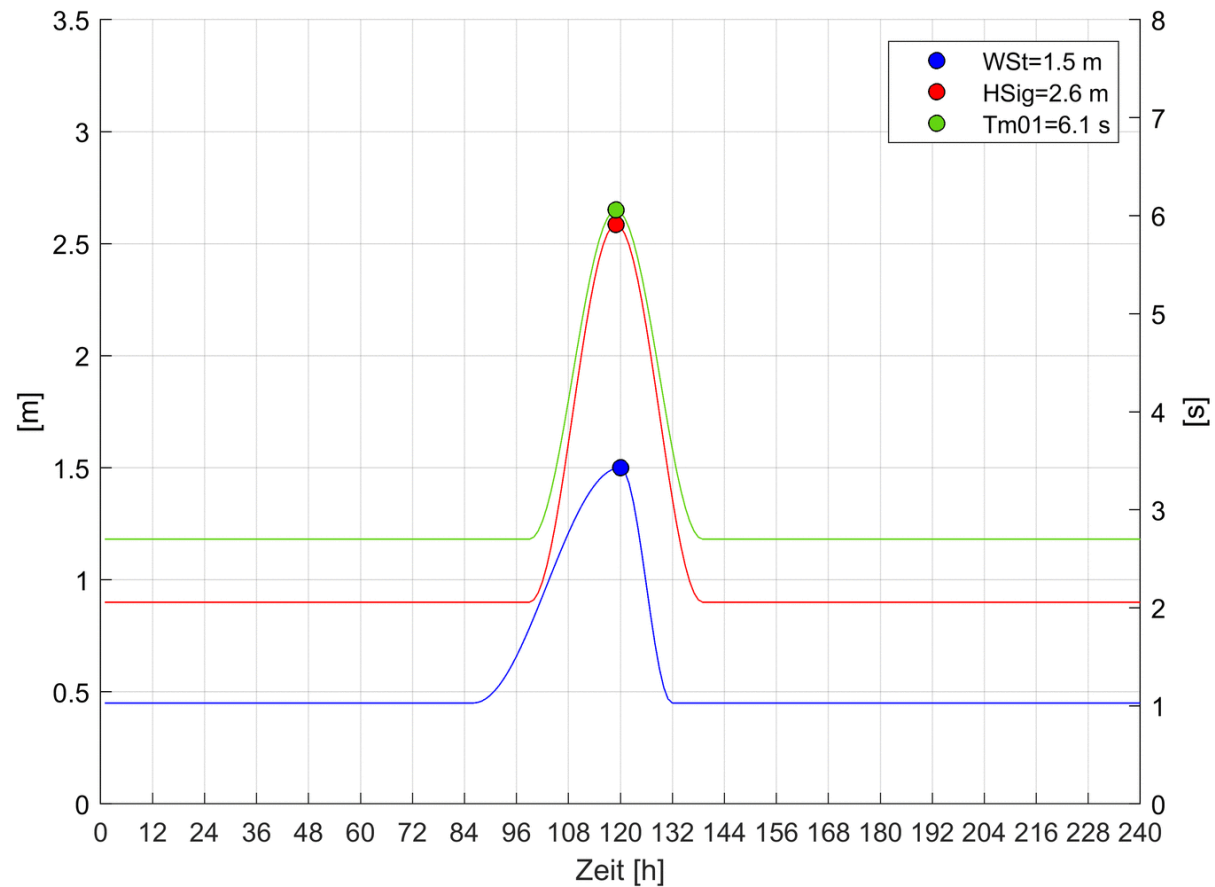
Seegang

☐ HSig [m]:

☐ Tm01 [s]:

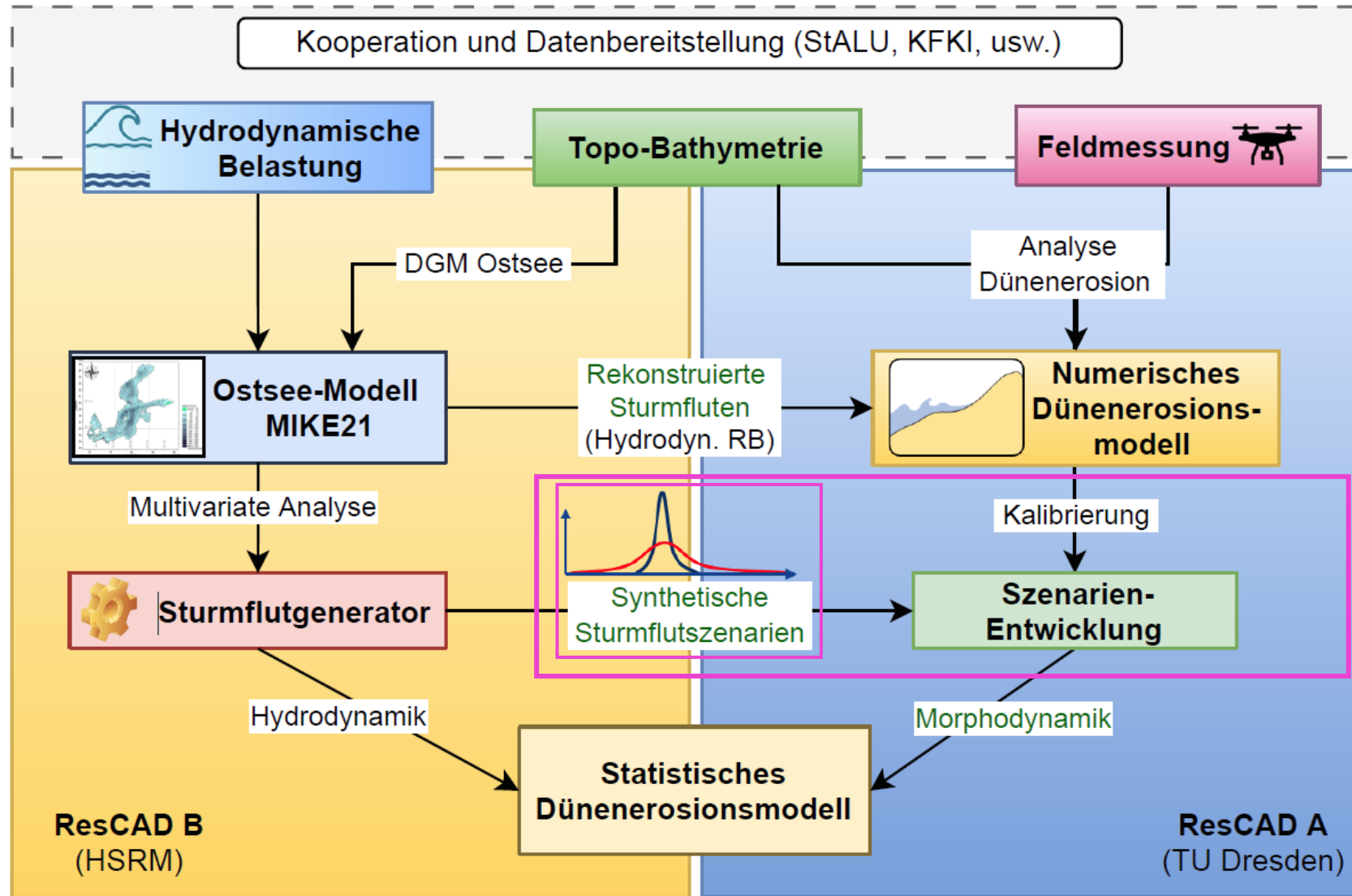
Variationen:





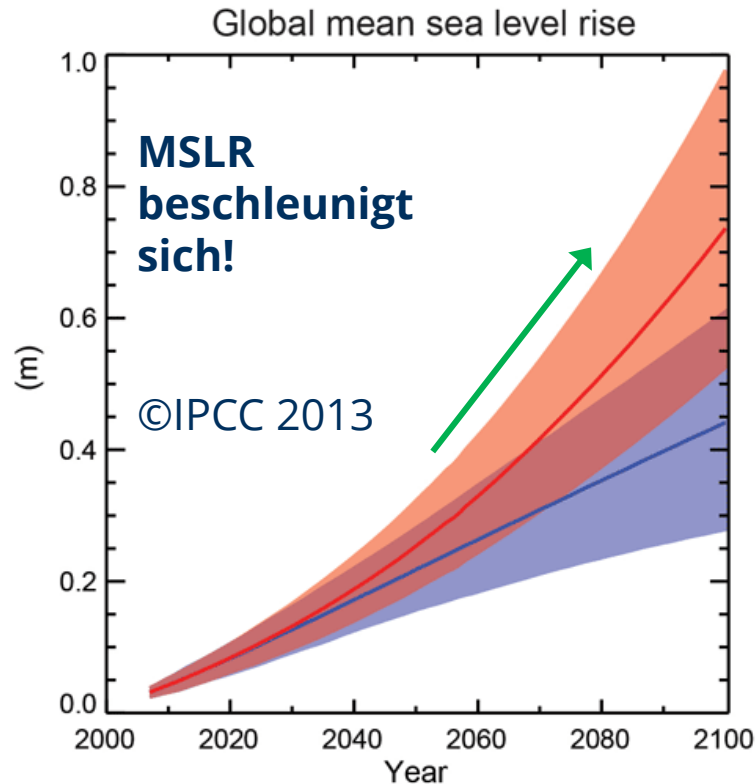
➔ Statistisch plausible, synthetische Sturmflutganglinien (so noch nicht beobachtet, aber theoretisch möglich)

Teil 4 – Ausblick: Szenarienentwicklung



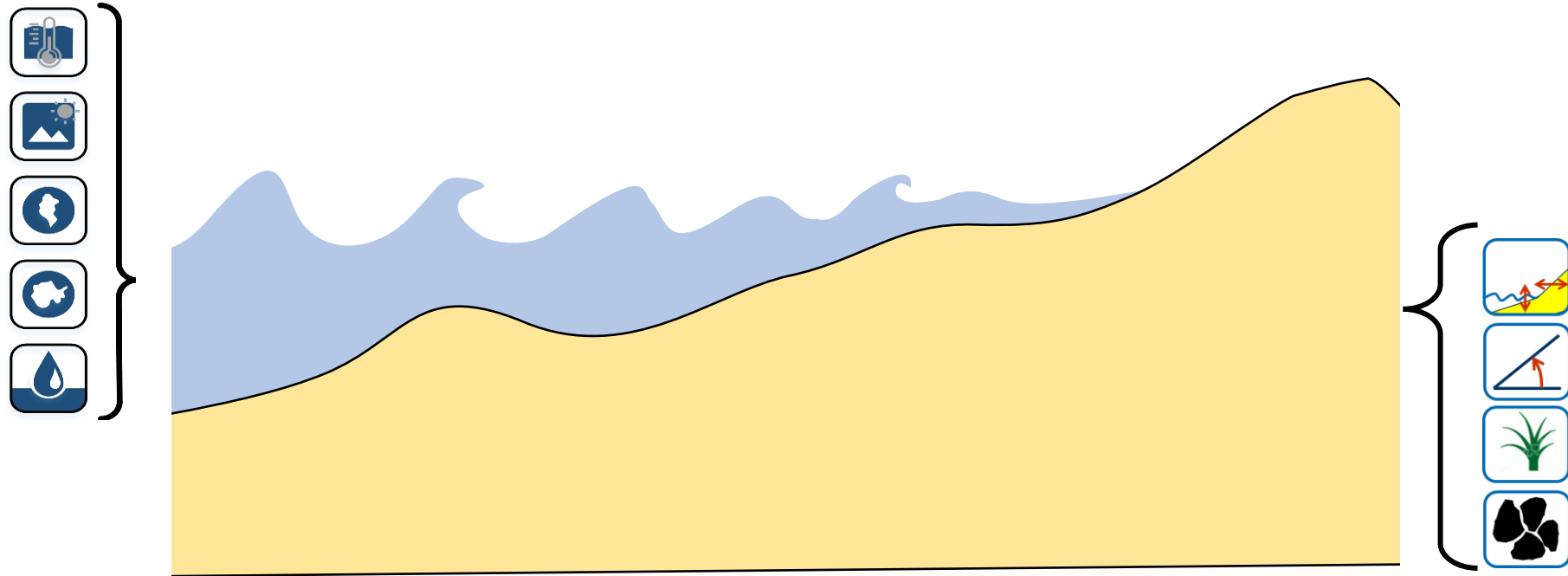
Teil 4 - Ausblick: Szenarienentwicklung

Meeresspiegelanstieg



- Analyse von mehreren Stufen ab heute (+0.5 m , +0.8 m , +1.0 m)
- Beachtung eines veränderten Gleichgewichtsprofils

Teil 4 - Ausblick: Szenarienentwicklung



Hydrodynamische Szenarien:

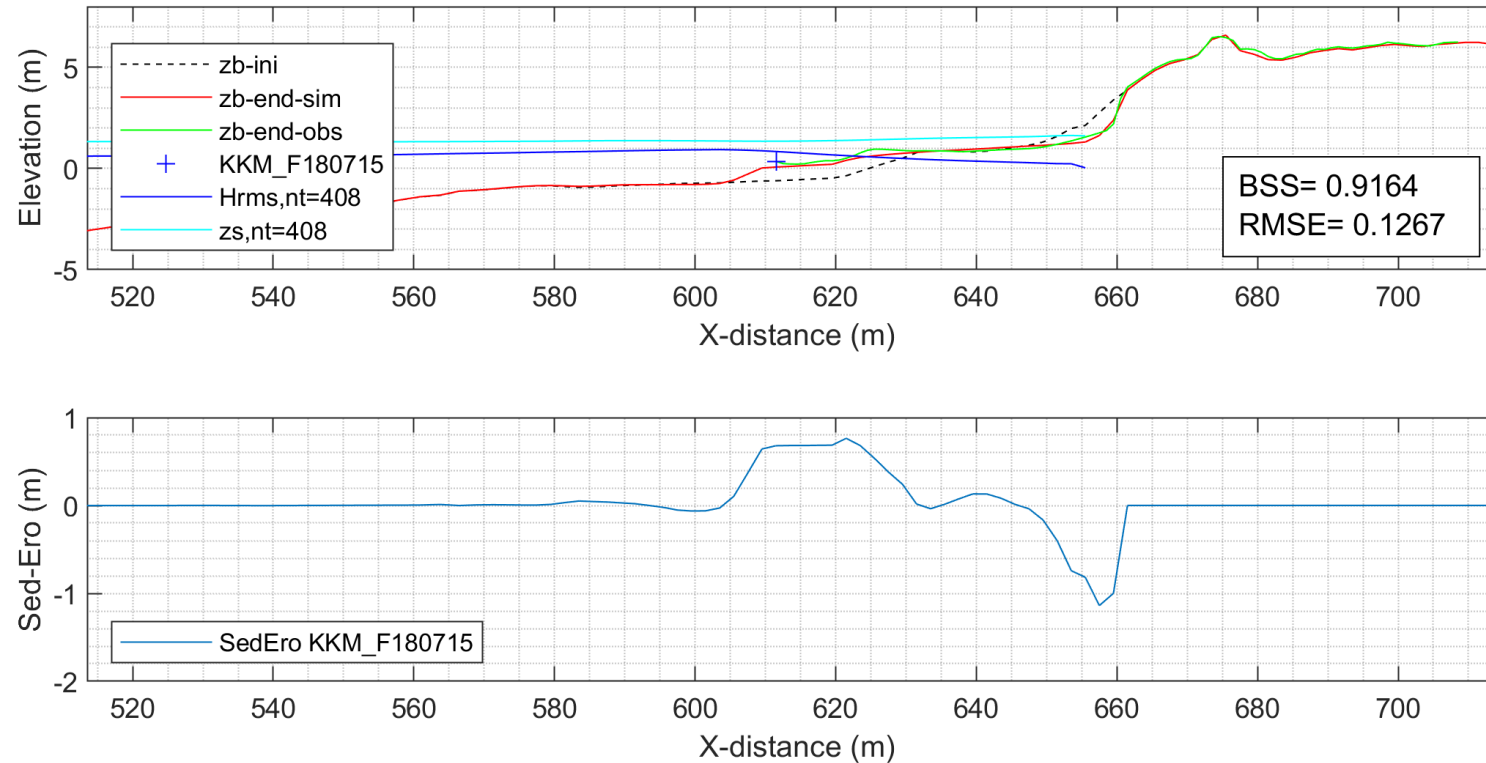
- Untersuchung zur Sensitivität der hydrodynamischen Parameter
- Untersuchungen zum Einfluss des Anstiegs des mittleren Meeresspiegels



Morphodynamische Szenarien:

- Untersuchung zur Sensitivität der Geometrie
- Überprüfung/Anpassung des Regelprofiles
- Ggf. Parametrisierung von Vegetation und Buhnen

Teil 4 - Ausblick: Szenarienentwicklung



Hydrodynamische Szenarien:

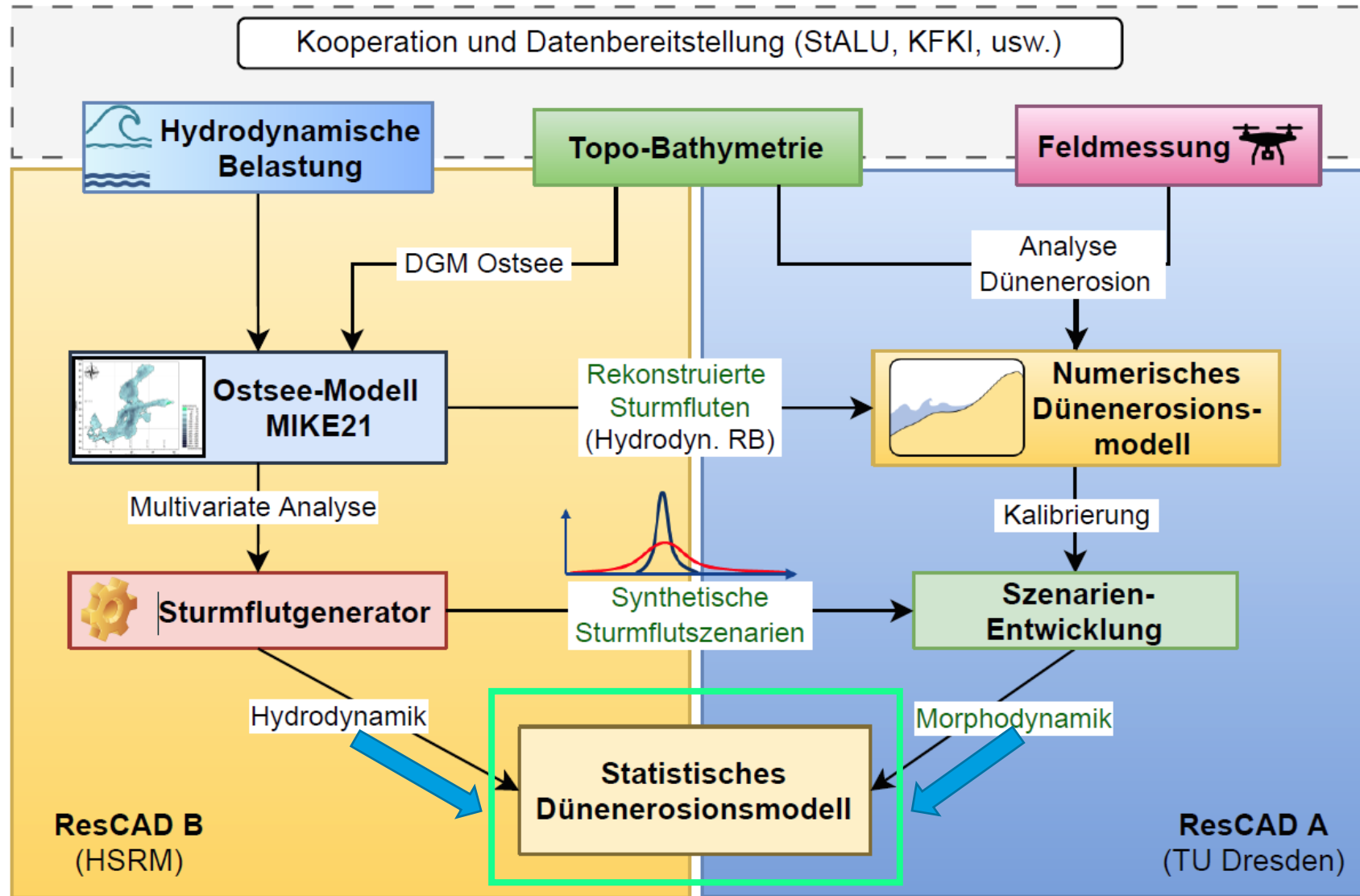
- Untersuchung zur Sensitivität der hydrodynamischen Parameter
- Untersuchungen zum Einfluss des Anstiegs des mittleren Meeresspiegels



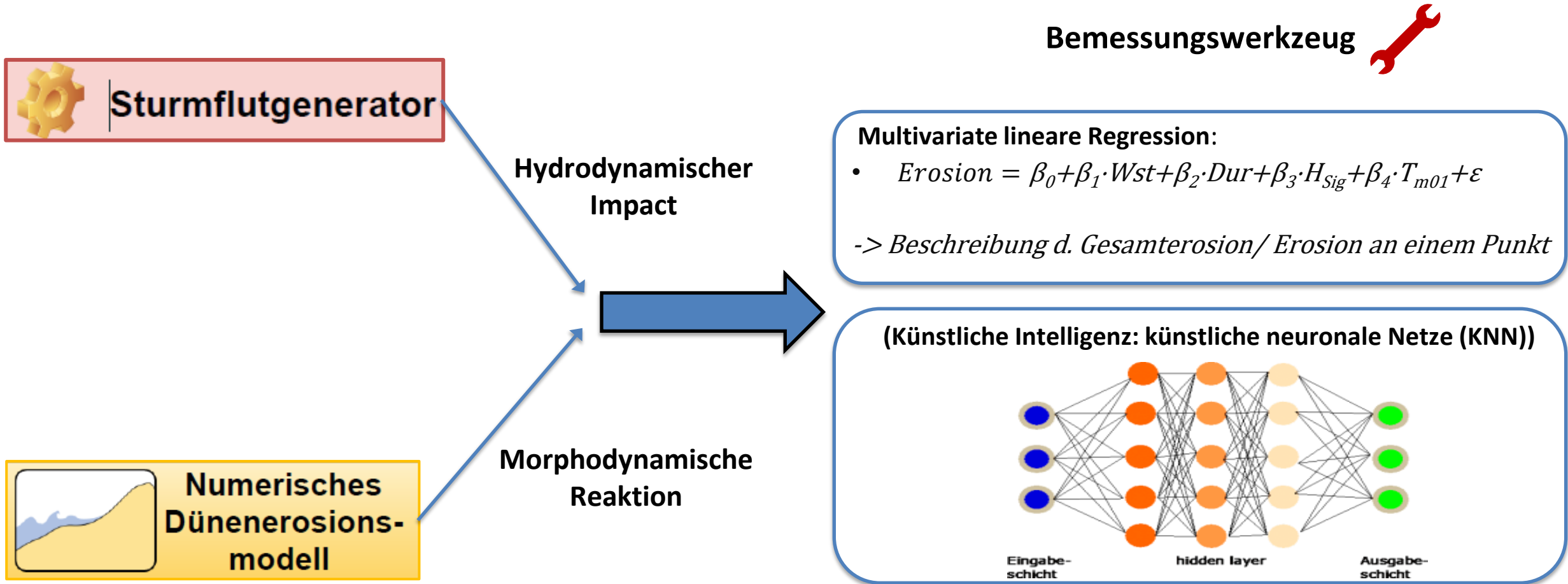
Morphodynamische Szenarien:

- Untersuchung zur Sensitivität der Geometrie
- Überprüfung/Anpassung des Regelprofils
- Ggf. Parametrisierung von Vegetation und Buhnen

Teil 5 – Ausblick: Statistisches Dünenerosionsmodell



Teil 5 – Ausblick: Statistisches Dünenerosionsmodell



Zusammenfassung ResCAD

1. Sturmflutgenerator

- Bemessungswerkzeug zur lokalen Generation synthetischer Sturmfluten (statistisch und numerisch validiert)
- Wasserstand, Verweilzeit und Seegangparameter für einen Küstenabschnitt

2. Statistisches Dünenerosionsmodell

- Prozessbasiertes, statistisches Ersatzmodell zur schnellen Abschätzung des lokalen Dünenerosionsvolumens
- Generiert Dünenprofile aus gegebener Hydraulischen Belastung (Sturmflut) und einem Ausgangsprofil

3. Szenarienanalyse

- Einbindung von synthetischen, hydraulischen Belastungen aus Sturmflutgenerator
- Vergleich verschiedener Einwirkungen und Bathymetrien, Analyse des Einflusses von MSLR!

Kontakt:

Dipl.-Ing. Dirk Fleischer, dirk.fleischer1@tu-dresden.de

Dipl.-Ing. Simon Beckmann, Simon.Beckmann@hs-rm.de



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Hochschule RheinMain



Institut für
Wasserbau und
Technische Hydromechanik



Kuratorium für Forschung
im Küsteningenieurwesen

FONA

Forschung für Nachhaltigkeit