



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

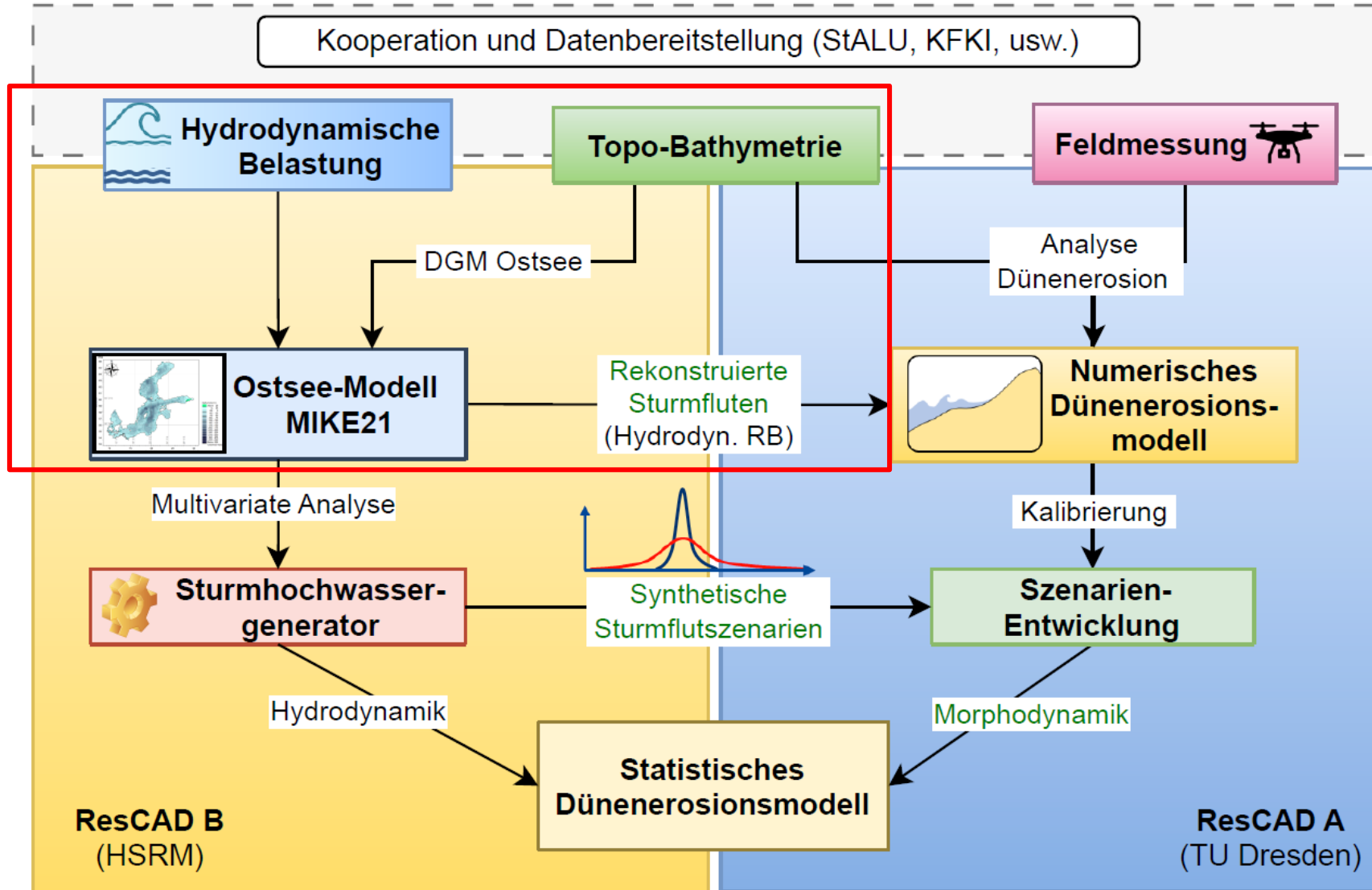
ResCAD: **Resistance** and **Climate** **Adaption** in **Dune** Systems

Zusammenfassung Projektergebnisse – 29. KFKI-Seminar

Hamburg, 18.11.2025



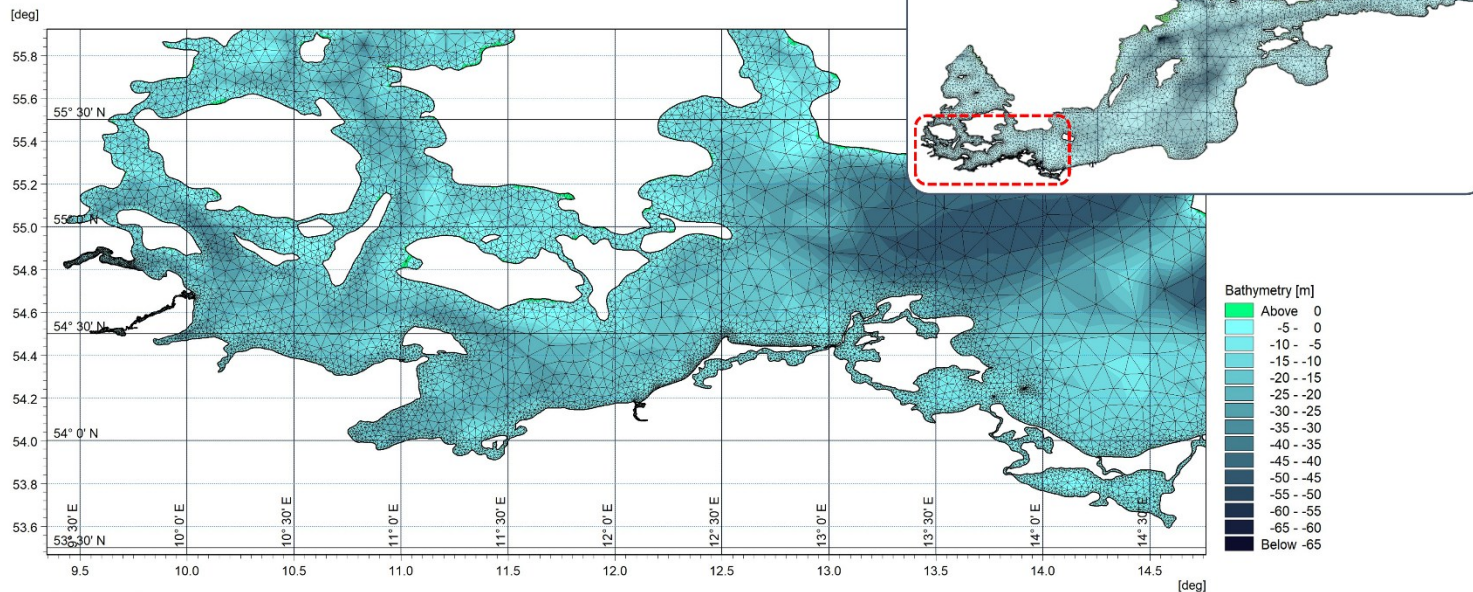
Überblick über das Gesamtvorhaben: Struktur, Modellkette und Ziele



Hydrodynamische Belastungsparameter

Modellierung und Simulation

Mike21 HD + SW (FM)



Hydrodynamik



1910

2023

- Wasserstand [m]
- Verweilzeiten [h]

Seegang (ereignisbasiert)



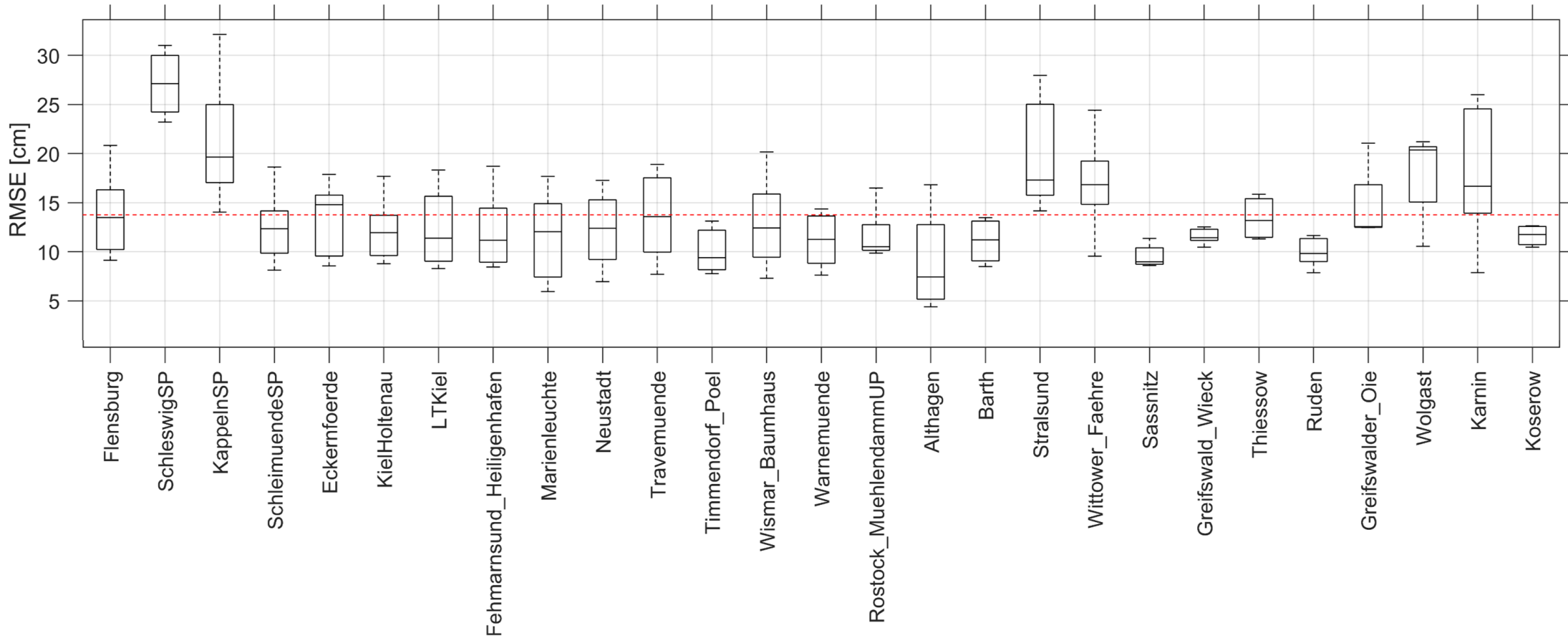
1940

2023

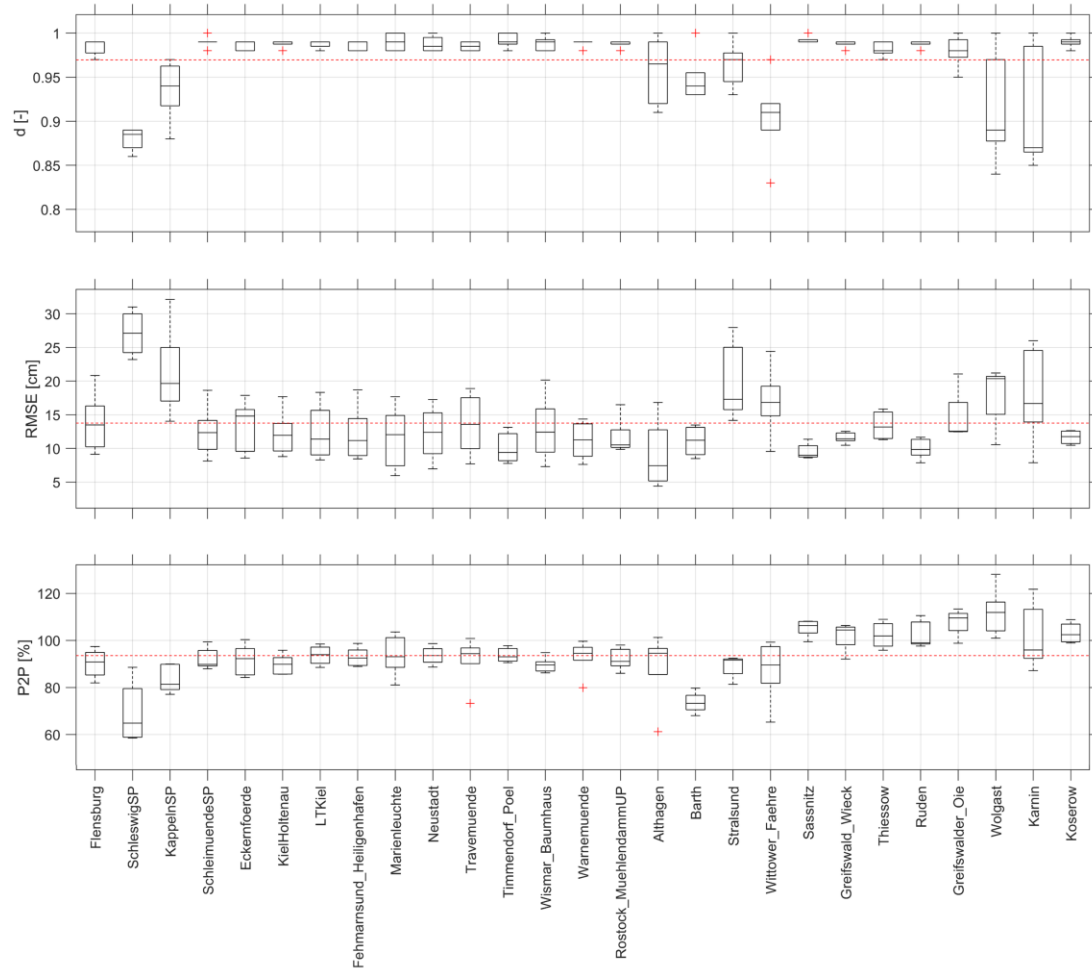
- Wellenhöhe (H_{Sig}) [m]
- Wellenperiode (T_p) [s]
- Wellenrichtung (Dir) [°]

Hydrodynamische Belastungsparameter

Validierung



Hydrodynamische Belastungsparameter Validierung



Gütekriterien (1910 – 2023)

- $d = 0.97$
- RMSE = 14 cm
- P2P = 92 %

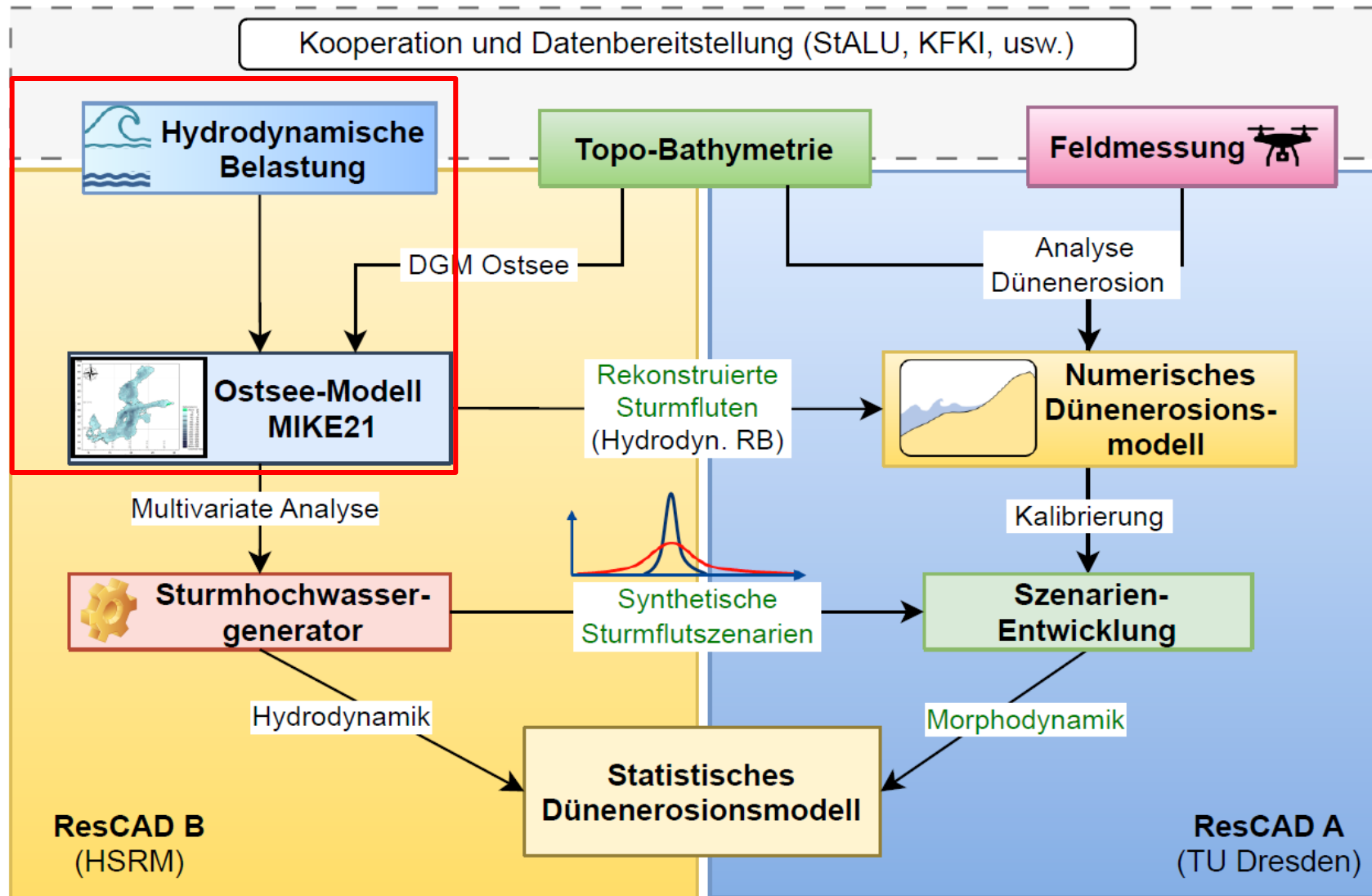
Fazit

- Hohe Übereinstimmungen an der Außenküste
- Unsicherheiten an der Binnenküste (Schlei, Bodden, Haffs)



→ **Weitreichende, hochaufgelöste
Datengrundlage, die hohen
Qualitätskriterien genügt.**

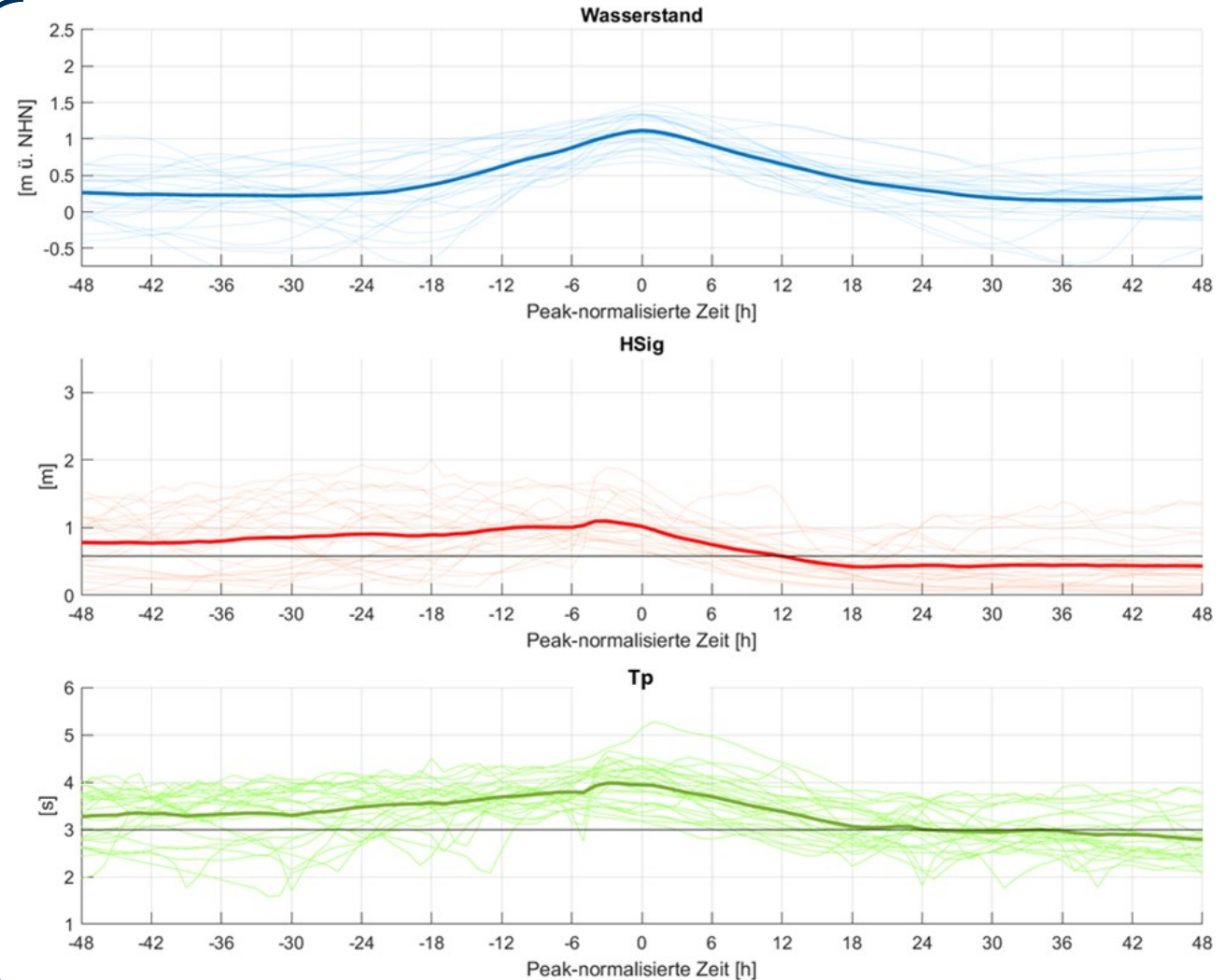
Überblick über das Gesamtvorhaben: Sturmhochwassergenerator (ResCAD B)



Sturmhochwassergenerator

Parametrisierung

Beobachtete Sturmhochwasser (AMAX)

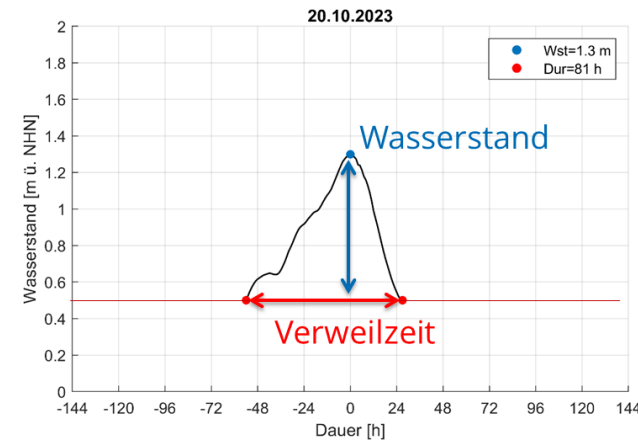


Sturmhochwassergenerator

Parametrisierung

Beobachtete Sturmhochwasser (AMAX)

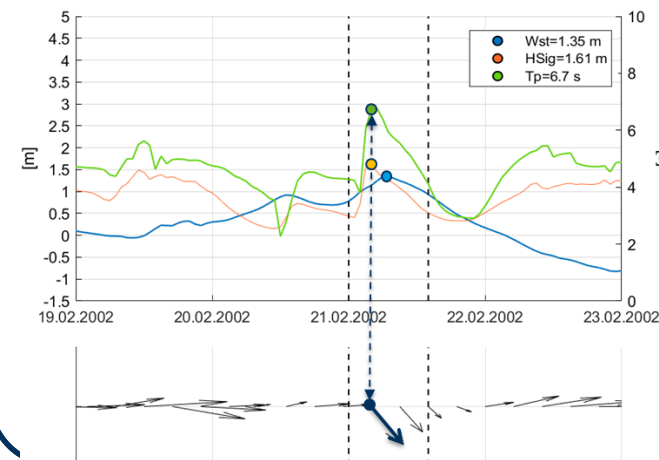
Wasserstandsverlauf



Hydrodyn. Parameter:

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

Seegangsverlauf



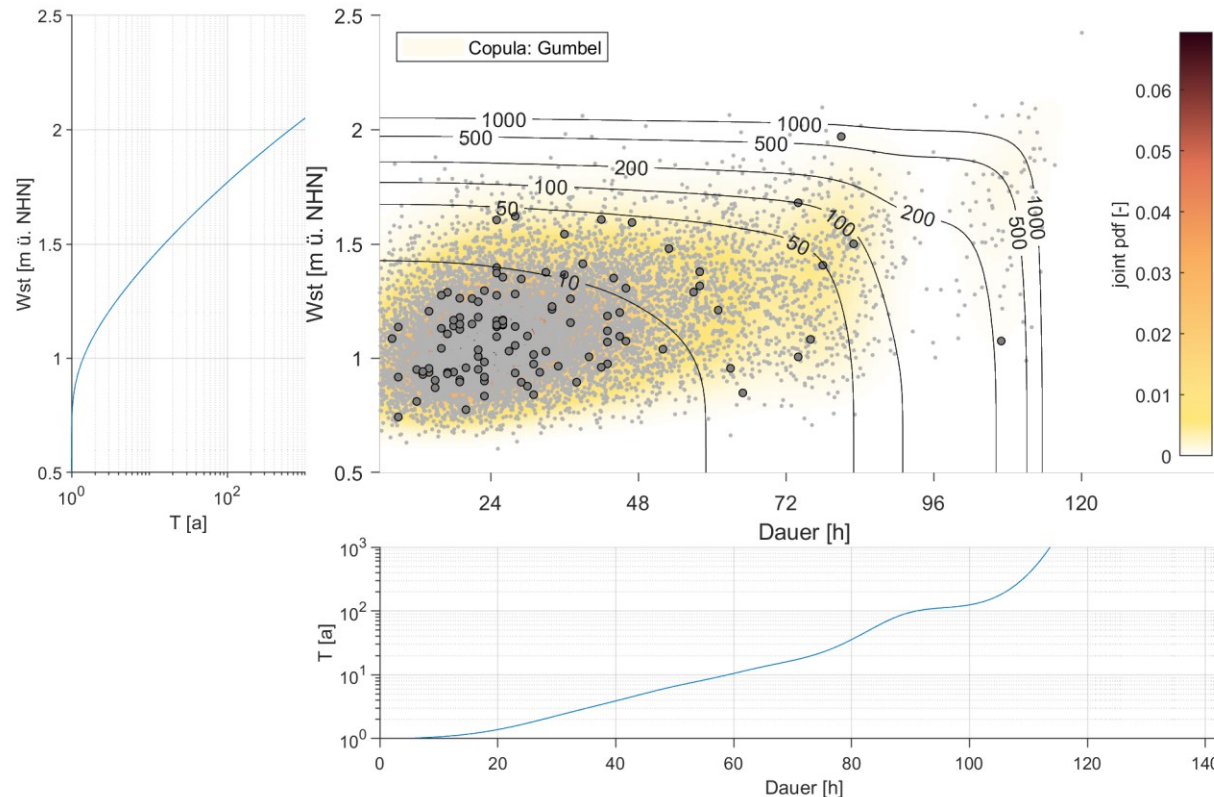
Seegangparameter (± 6 h)

- Signifikante Wellenhöhe (**HSig**)
- Wellenperiode (**Tp**)
- Wellenrichtung (**Dir**)



Sturmhochwassergenerator

Multivariate Analyse (Copula)



1. Bestimmen von Parameterkombinationen

- **Wst - Dur**
- Wst - HSig
- HSig - T_p

2. Wahl der Randverteilung

3. Wahl der Copula (joint pdf)

- Frank
- Clayton
- **Gumbel**

4. Kombinierte Jährlichkeiten

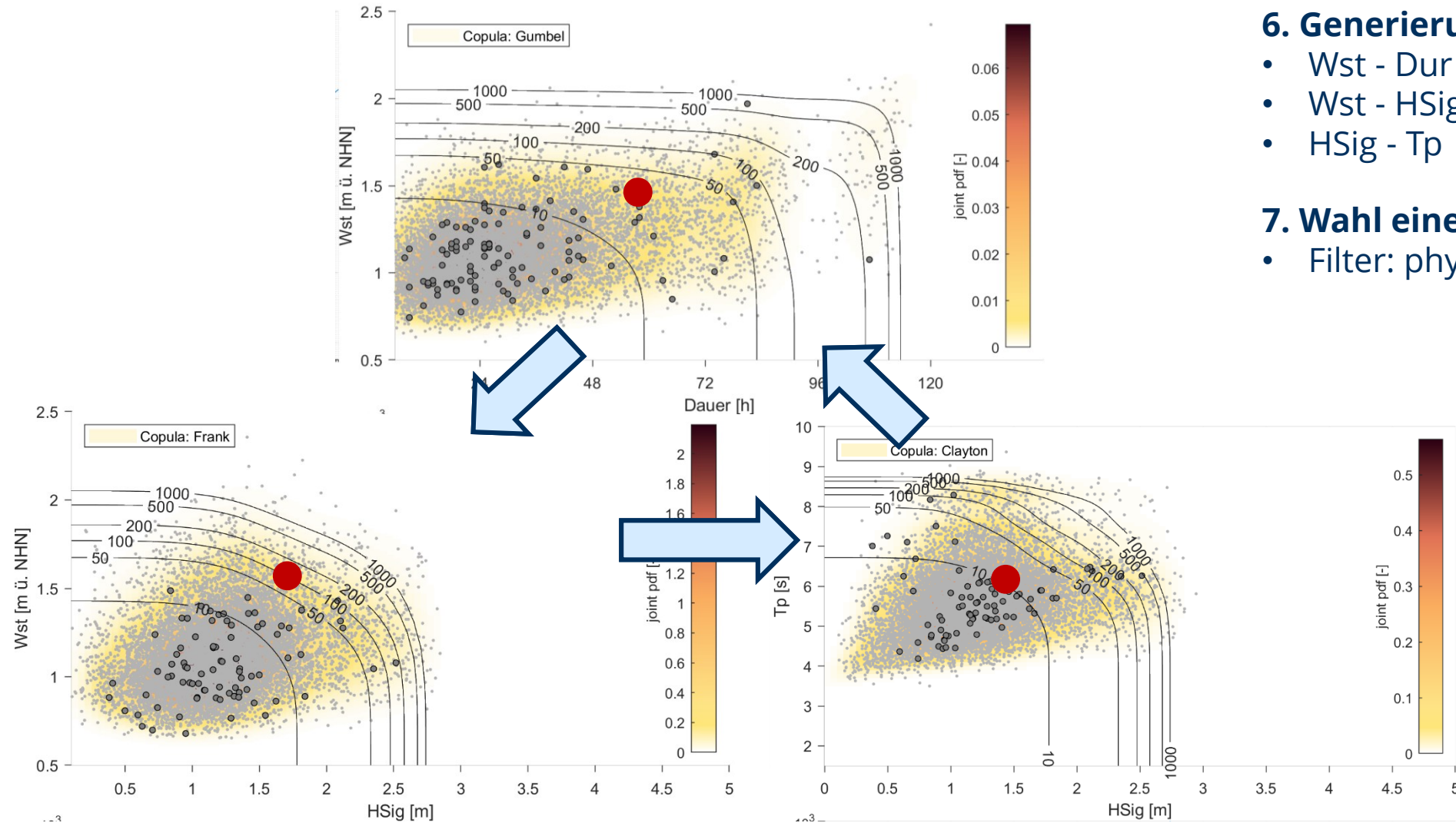
(kann von offiziellen Werten abweichen)

5. Stochastische Wertekombinationen

- statistisch möglich

Sturmhochwassergenerator

Multivariate Analyse (Copula)



6. Generierung von Copulas

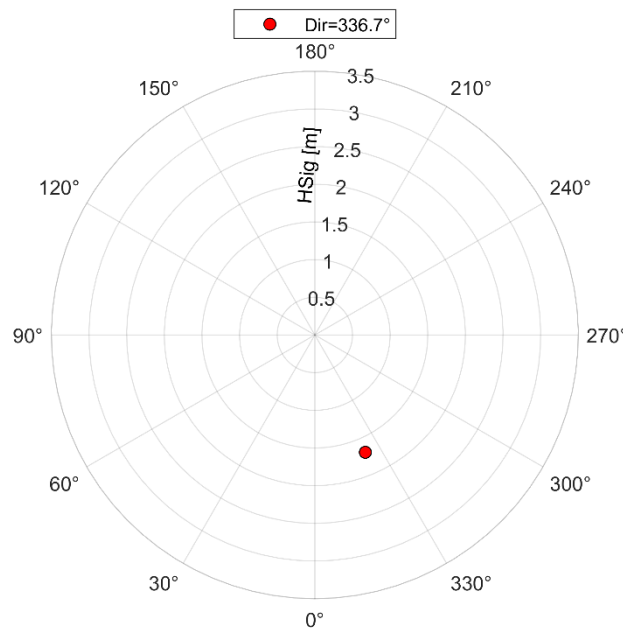
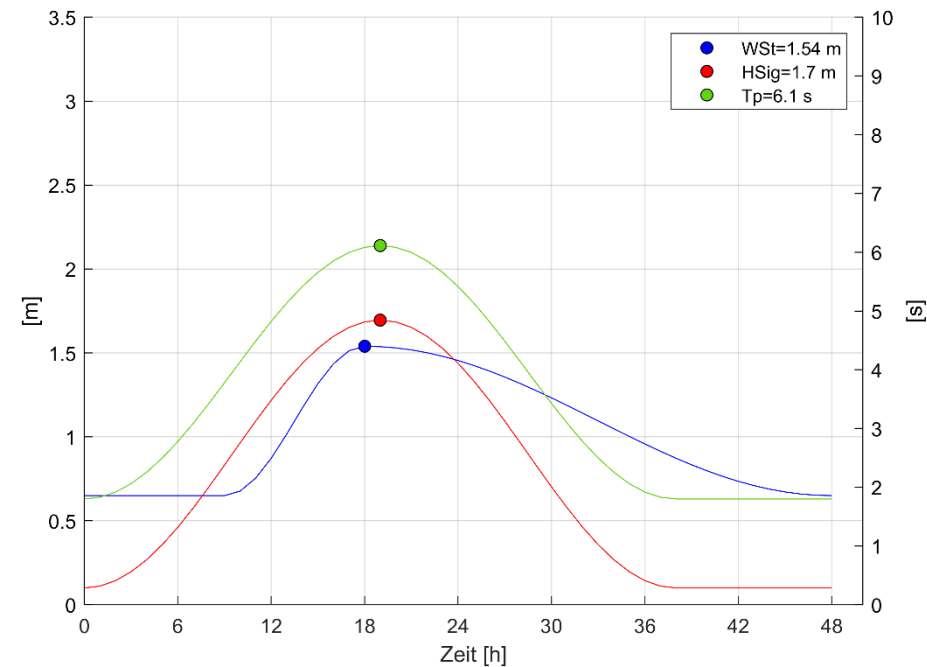
- Wst - Dur
- Wst - HSig
- HSig - Tp

7. Wahl einer Parameterkombination

- Filter: physikalisch plausibel

Sturmhochwassergenerator

Generierung synthetischer Ereignisse



6. Generierung von Copulas

- Wst - Dur
- Wst - HSig
- HSig - Tp

7. Wahl einer Parameterkombination

- Filter: physikalisch plausibel

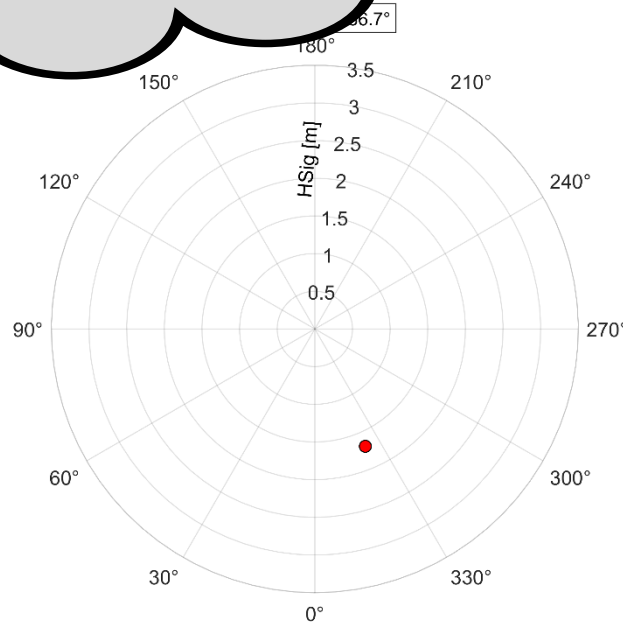
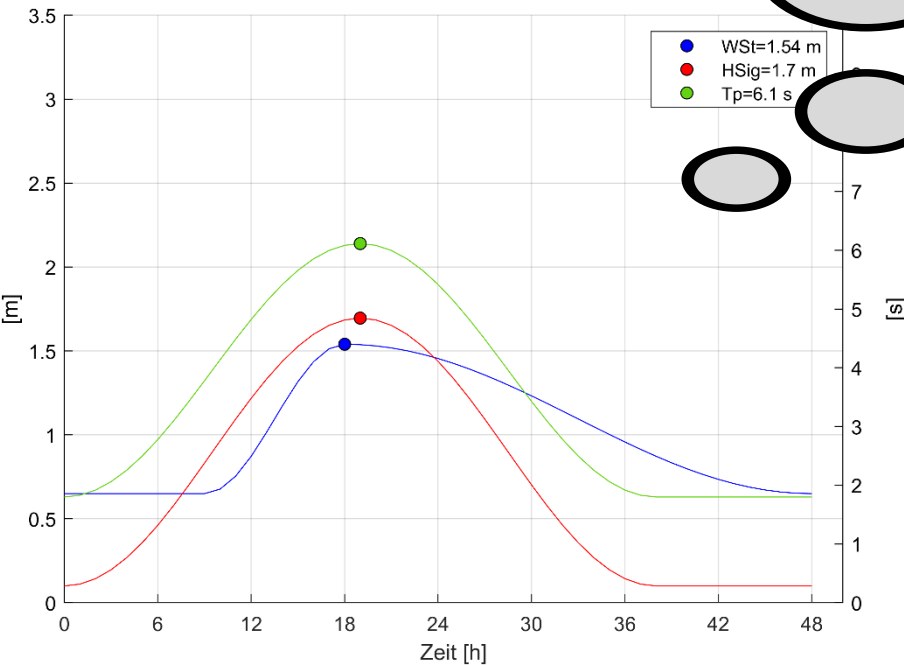
8. Ableitung von Ganglinien

mögliche, ggf. noch nicht beobachtete
Sturmhochwasser

Sturmhochwassergenerator

Generierung synthetischer Ereignisse

Was ist ein
200-jährliches
Sturmhochwasser?



6. Generierung von Copulas

- Wst - Dur
- Wst - HSig
- HSig - Tp

7. Wahl einer Parameterkombination

- Filter: physikalisch plausibel

8. Ableitung von Ganglinien

mögliche, ggf. noch nicht beobachtete
Sturmhochwasser

Sturmhochwassergenerator

Sturmhochwassergenerator

Geographische Lage

Longitude [°]: 12.421942

Latitude [°]: 54.393104

☐ Pegelstation:

☒ Univar. Randbedingungen ☐ Multivar. Randbedingungen

Wasserstand

☒ Wst [m]: 2.30 ☐ T [a]: F(x): GEV

Ereignisdauer

☐ Dur [h]: ☐ T [a]: F(x): KS-Density

Signifikante Wellenhöhe

☐ HSig [m]: ☐ T [a]: F(x): KS-Density

Wellen Peakperiode

☐ Tp [s]: ☐ T [a]: F(x): KS-Density

Klimavorsorge

☒ Klimavorsorge [m]: 1.00

Variationen

Anzahl: 1

Bestätigen

Bestimmung der geographischen Lage:

- Längen- /Breitengrad
- Auswahl an Pegel

Univariate Randbedingungen,

- Jährlichkeit/ Ausprägung
(z. B. T = 200 a/ Wst = 2,30 m)



Sturmhochwassergenerator

Sturmhochwassergenerator

Geographische Lage

Longitude [°]: 12.421942 ☐ Pegelstation:

Latitude [°]: 54.393104

☐ Univar. Randbedingungen ☒ Multivar. Randbedingungen

Wasserstand - Ereignisdauer

☒ T [a]: 200 ☐ Copula:

Wasserstand - Signifikante Wellenhöhe

☒ T [a]: 200 ☐ Copula:

Signifikante Wellenhöhe - Wellen Peakperiode

☒ T [a]: 200 ☐ Copula:

Klimavorsorge

☒ Klimavorsorge [m]: 1.00

Variationen

Anzahl: 1

Bestätigen

Bestimmung der geographischen Lage:

- Längen- /Breitengrad
- Auswahl an Pegel

Univariate Randbedingungen,

- Jährlichkeit/ Ausprägung
(z. B. T = 200 a/ Wst = 2,30 m)

Multivariate Randbedingungen

- Kombinierte Jährlichkeit

Klimavorsorge

- z. B. Vorsorgemaß 1 m

Anzahl an Variationen

Bestätigen

- Ausgabe der Verteilungsfunktionen (uni-/ multivariat) (*.png)
- Ausgabe der Ganglinien (*.csv)



Zwischenfazit: Stochastischer Sturmhochwassergenerator

Planungstool:

- Generierung von synthetischen Sturmhochwassern entlang der gesamten deutschen Ostseeküste
- Ableitung von univariaten + kombinierten Wahrscheinlichkeiten/ Jährlichkeiten.
(**Achtung**: kann von offiziellen Werten abweichen.)
- Input für verschiedene Bemessungsaufgaben, z. B. hydrodynamischen Randbedingungen; inkl. Klimavorsorge
- **Ziel: Bemessungsparameter → Bemessungsereignisse**

„**Standalone**“ – **Application** (*.exe)
(Matlab Runtime 2024a)

→ **Praxishinweise:** rescadb@gmail.com



<https://drive.google.com/drive/folders/1TpVExkrGMzvoE8pLS1bepjmTaE3n9lgb?usp=sharing>

Zwischenfazit: Stochastischer Sturmhochwassergenerator

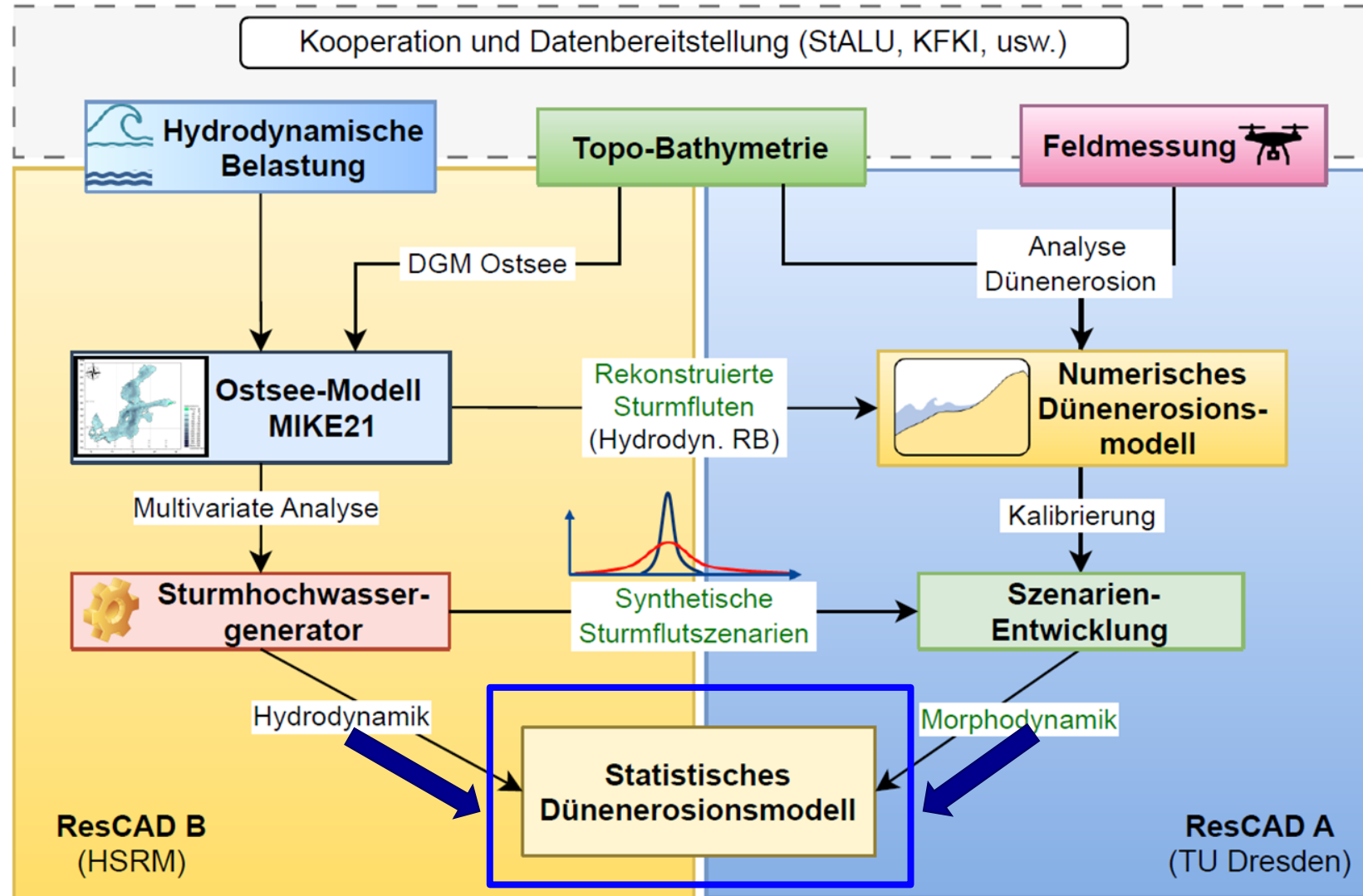
Weiterer Forschungsbedarf

- Erweiterung der Datenbasis
- Berücksichtigung von verschiedenen Sturmhochwassertypen
- Untersuchungen zur Form von Ganglinien, insb. chaotischer Seegang
- Untersuchungen zur Abhängigkeit von Seegang/Wasserstand
- Überführung in ein vollständig multivariates Model

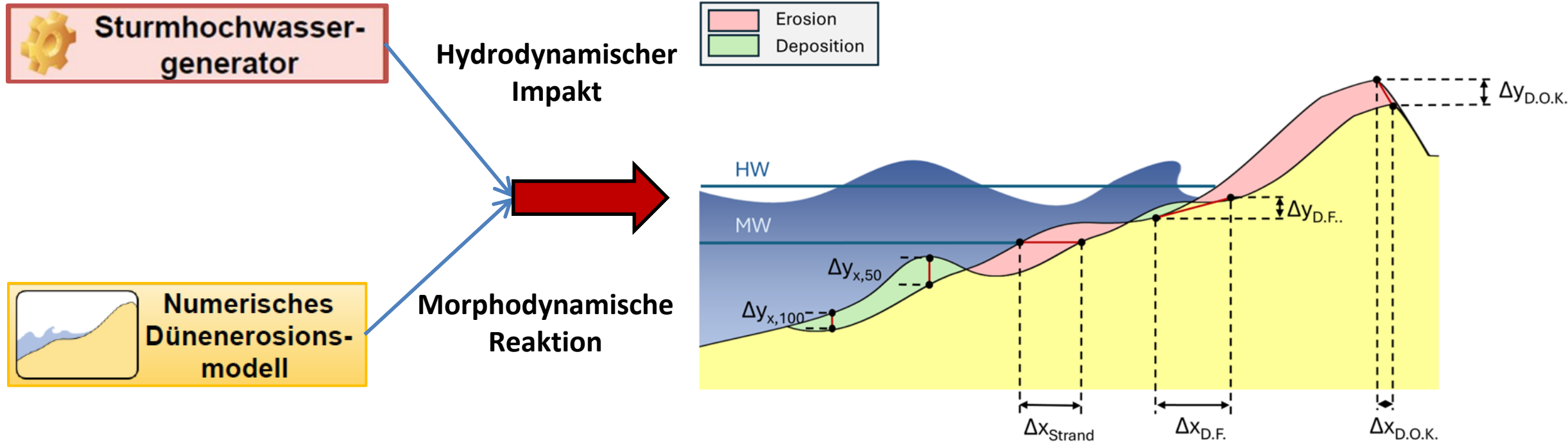


<https://drive.google.com/drive/folders/1TpVExkrGMzvoE8pLS1bepjmTaE3n9lgb?usp=sharing>

Überblick über das Gesamtvorhaben: Statistisches Erosionsmodell (ResCAD B)



Statistisches Dünenerosionsmodell

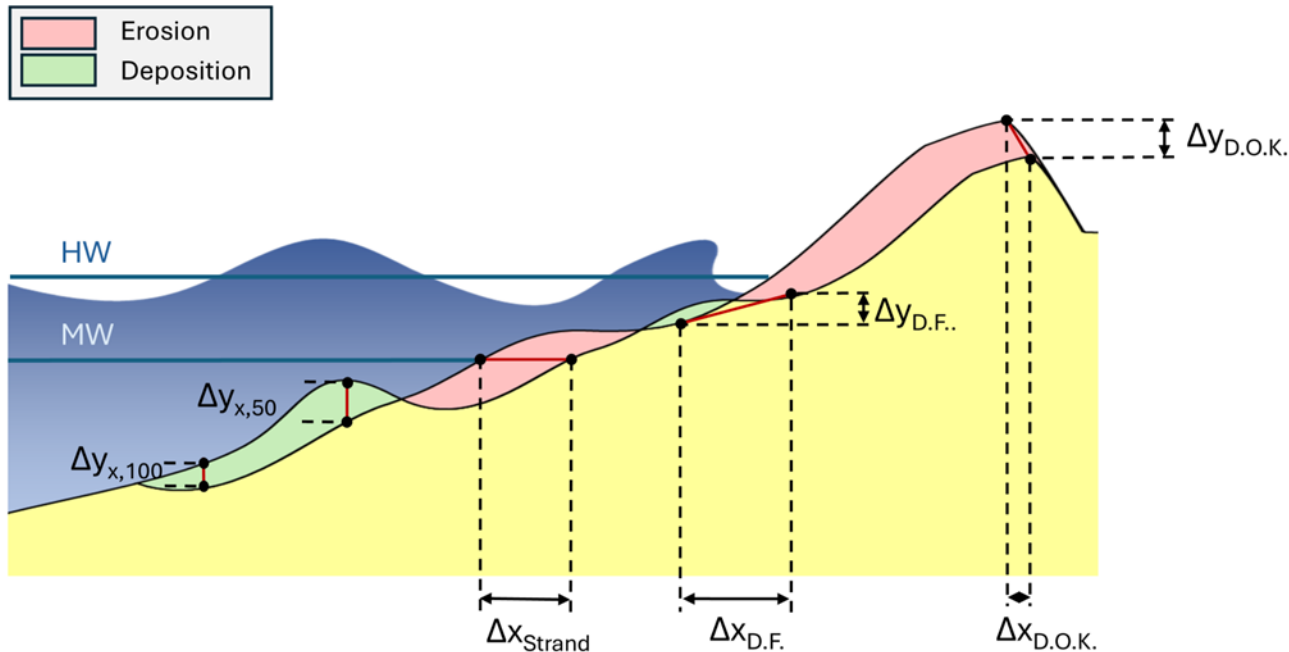


Ziel:

- Schnelle Vorhersage von potentiellen Erosionsmengen unter gegebenen hydrodynamischen Bedingungen.
- Quantifizierung der Unsicherheit

Statistisches Dünenerosionsmodell

Parametrisierung



Erosionsvolumen:

- Veränderung des Dünenvolumens (ΔV_D)

Knotenverschiebungen:

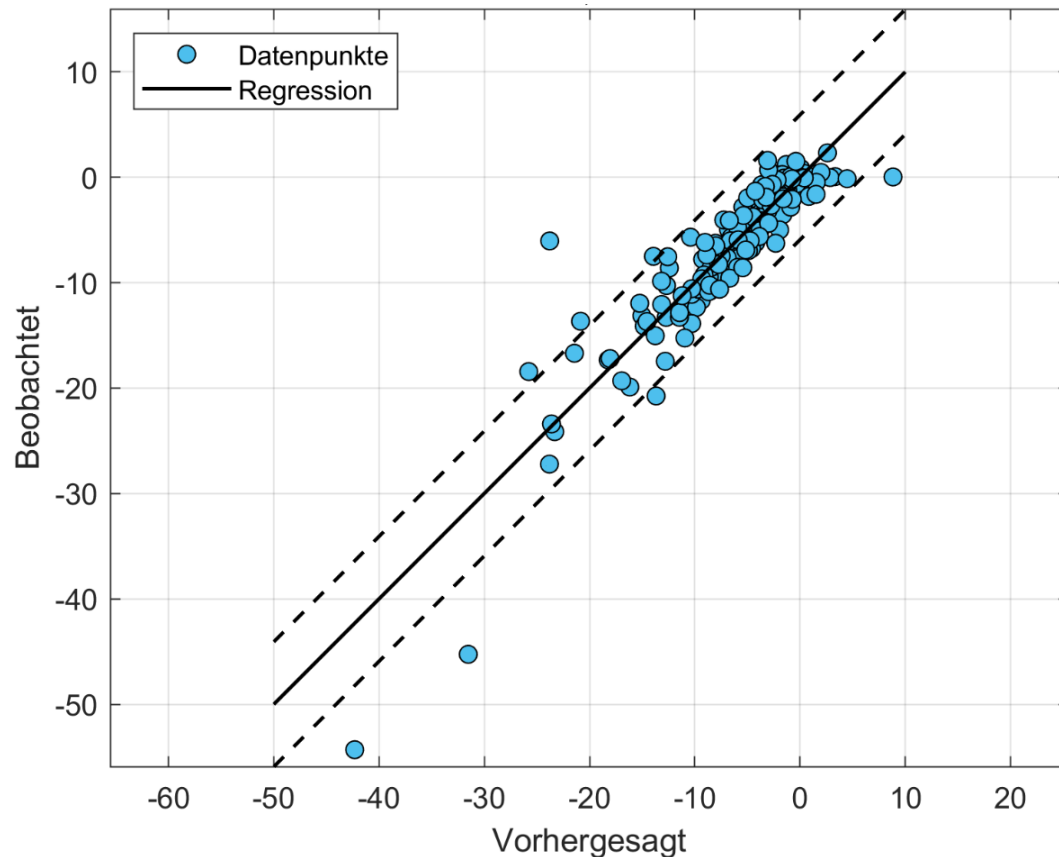
- Verschiebung der Dünenoberkante ($\Delta x_{\text{D.O.K.}} / \Delta y_{\text{D.O.K.}}$)
- Verschiebung des Dünenfußes ($\Delta x_{\text{D.F.}} / \Delta y_{\text{D.F.}}$)
- Verschiebung der Standlinie (Δx_{Strand})
- vertikale Verschiebung bei $x = 50$ m ($\Delta y_{x,50}$)
- vertikale Verschiebung des bei $x = 100$ m ($\Delta y_{x,100}$)

Ziel: Beschreibung der Erosion unter gegebenen hydrodynamischen Einflüssen

Statistisches Dünenerosionsmodell

Multiples Regressionsmodell:

- Veränderung des Dünenvolumens (ΔV_D)



Mengenmodell:

→ Beschreibung der Erosionsmengen unter gegebenen hydrodynamischen Einwirkungen:

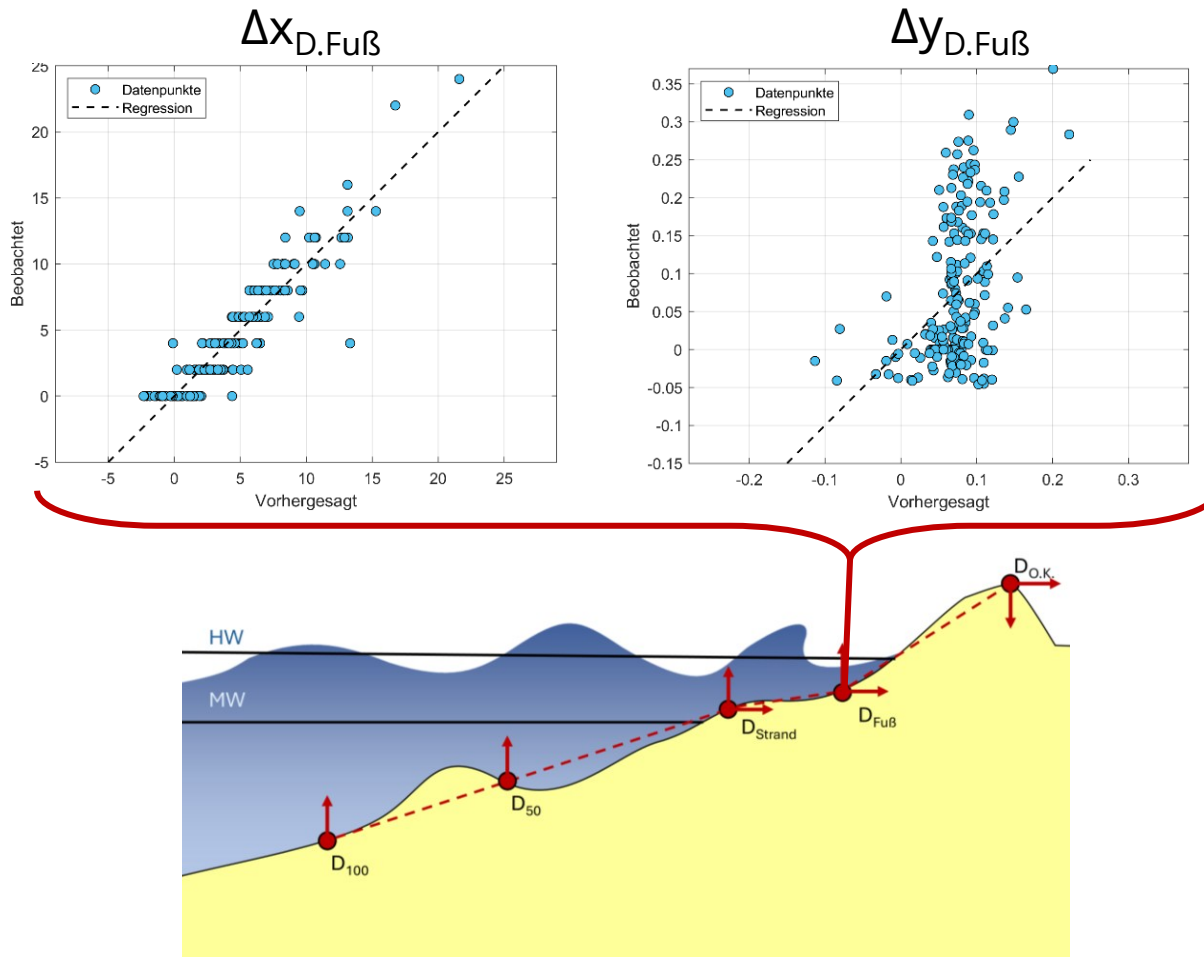
$$\Delta V_D(Wst, Dur, H_{Sig}, T_p, Dir)$$

Parameter	R ²	RMSE [m ³ /m]
ΔV_D	0.84	2.96

→ **zuverlässige Prognose der Erosionsmengen in wenigen Sekunden !**

Statistisches Dünenerosionsmodell

Multiples Regressionsmodell:



Knotenmodell

→ Beschreibung der Knotenverschiebung (Δx bzw. Δy) unter gegebenen hydrodynamischen Einwirkungen:

$$\Delta x(Wst, Dur, H_{Sig}, T_p, Dir)$$

$$\Delta y(Wst, Dur, H_{Sig}, T_p, Dir)$$

Parameter	R ²	RMSE [m]
$\Delta y_{D.100}$	0.62	0.02
$\Delta y_{D.50}$	0.65	0.05
$\Delta x_{D.Strand}$	0.58	3.23
$\Delta x_{D.Fuß}$	0.71	0.44
$\Delta y_{D.Fuß}$	0.18	0.09
$\Delta x_{D.OK}$	0.48	0.24
$\Delta y_{D.OK}$	-	-

→ **Prognose des Post-Profils in wenigen Sekunden !**

Statistisches Dünenerosionsmodell



ResDune

Erosionsmodell: SanDrA LM

Hydrodyn. Parameter

Wasserstand [m]:	1.5
Dur [h]	90
HSig [m]	2.3
Tp [s]	7
mDir:	-8

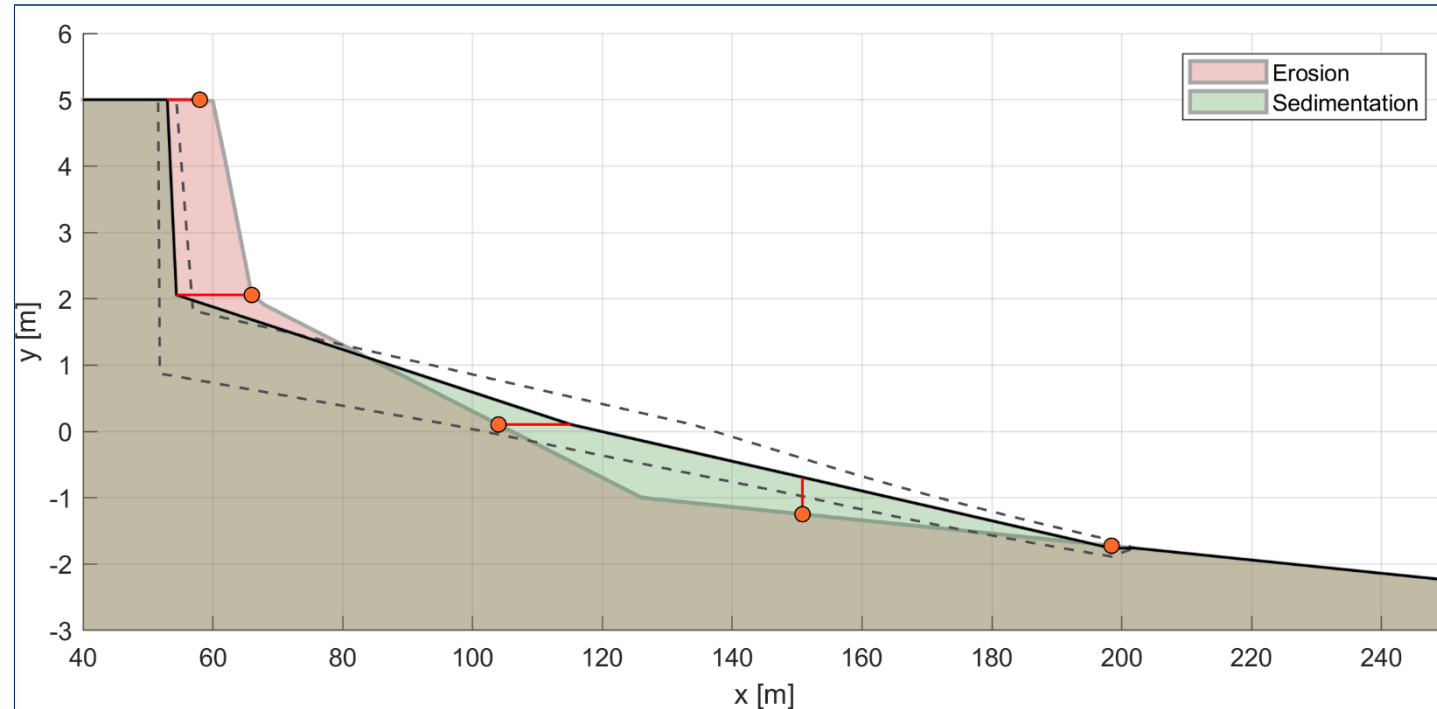
Bestätigen

„Standalone“ – Application
(* .exe) (Matlab Runtime)

Mengenmodell:

ΔV : -51.922 [m³/m]
 $CI(\Delta V)$: [-69.068 ... -34.776] [m³/m]

Knotenmodell:



Zwischenfazit: Statistisches Dünenerosionsmodell

Planungstool:

- Schnelle Vorhersage von potentiellen Erosionsmengen unter gegebenen hydrodynamischen Bedingungen.

Fazit:

- Schnelle, erste Abschätzung der potentiellen Erosion
 - Gute Vorhersage der Erosionsmengen
 - Unsicherheit in der Vorhersage der Profilveränderungen



Zwischenfazit: Statistisches Dünenerosionsmodell

Weiterer Forschungsbedarf:

- Erweiterung der Datenbasis
- Berücksichtigung von geometrischen/geologischen Parametern
- Adaptierung auf weitere Standorte
- Kombination mit bedingten Wahrscheinlichkeiten (z. B. Bayes'sches Netz)
- Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufes der hydrodynamischen Parameter



Zusammenfassung: Projektergebnisse ResCAD B

1. **Sturmhochwassergenerator**

- Generierung von synthetischen Sturmhochwassern entlang der gesamten deutschen Ostseeküste

2. **Statistisches Dünenerosionsmodell**

- Schnelle Vorhersage von potentiellen Erosionsmengen unter gegebenen hydrodynamischen Bedingungen.

