Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen

Gefördert durch:

Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt



Abschlussbericht

ResCAD - Resistance and Climate Adaptation of Dune Systems

Hydromorphologische Szenarienentwicklung des Dünenerosionsverhaltens unter Einsatz numerischer Modelle (ResCAD A)

Projektlaufzeit: 01.11.2022 – 31.12.2025

FKZ: 03F0927 A

IWD Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik

Juergen Stamm

Digital unterschrieben von Juergen Stamm
Datum: 2026.08.10 13:02:35 +02'00'

Dirk Fleischer

Digital unterschrieben von Dirk Fleischer
Datum: 2026.08.06 12:44:29 +02'00'

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm
PROJEKTLEITER

Dipl.-Ing. Dirk Fleischer
PROJEKTKOORDINATOR UND -BEARBEITER

E-Mail: dirk.fleischer1@tu-dresden.de
Web: www.tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/iwd
Adresse: TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN | D-01062 Dresden
Tel.: +49 (0)351 - 463 32399

Projektpartner im Verbund

Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik

Technische Universität Dresden

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm
Institut für Wasserbau und
Technische Hydromechanik

Hochschule RheinMain
University of Applied Sciences
Wiesbaden Rüsselsheim Geisenheim

Hochschule RheinMain

Prof. Dr. Arne Arns
Professor für Wasserbau,
Wasserwirtschaft und Hydrologie

Assoziierte Partner

Mecklenburg Vorpommern

**Staatliches Amt für
Landwirtschaft und Umwelt
Mittleres Mecklenburg**

Fachlich begleitet durch

KFKI
Kuratorium für Forschung
im Küsteningenieurwesen

Zusammenfassung

Die Küstenschutzdünen sind an der Außenküste Mecklenburg-Vorpommerns das tragende Element des Sturmflutschutzes und zugleich Verschleißbauwerke, deren Erhaltung jährlich erhebliche Aufspülmengen erfordert. Das Verbundvorhaben ResCAD (*Resistance and Climate Adaptation of Dune Systems*) untersucht, wie sich die Dünenerosion unter heutigen und zukünftigen Sturmhochwasserbedingungen quantifizieren lässt und welche Folgen der beschleunigte Meeresspiegelanstieg für Bemessung und Erhaltungsmanagement hat. Im Teilprojekt ResCAD A treiben hierzu statistisch konsistente hydraulische Randbedingungen aus dem Sturmhochwassergenerator und dem MIKE21-Ostseemodell des Teilprojektes B vollständig automatisierte, prozessbasierte XBeach-Dünenerosionsmodelle in 1D und 2DH an – kalibriert an Naturdaten des Sturmhochwassers vom Oktober 2023 am Standort Ahrenshoop (Gütewerte bis $BSS = 0{,}92$) und validiert am unabhängigen Ereignis vom Januar 2019. Aus der Hindcast-Modellierung von 83 historischen Sturmhochwassern (1941 bis 2023) und umfangreichen geometrisch-klimatischen Szenarien-Ensembles wurde mit Methoden des maschinellen Lernens ein Metamodell für die Analyse und Klimaanpassung von Küstenschutzdünen in drei Modulen abgeleitet, das Erosionsvolumen und Kronenrückgang ohne erneute numerische Simulation prognostiziert und erstmals geschlossene Bemessungsformeln in Abhängigkeit von Dünengeometrie und Meeresspiegelanstieg liefert. Die Szenarienanalysen zeigen: Wachsen die Küstenquerprofile mit dem Meeresspiegel mit, bleibt die Widerstandsfähigkeit der Dünen nahezu unverändert – für das Szenario SSP5-8.5 (+0,80 m bis 2100) sind hierfür jedoch zusätzlich rund 100 m³ Sediment je laufenden Meter erforderlich, die sich aus der Erhöhung von Düne, Strand und Teilen des Vorstrandes zusammensetzen. Die Anpassungsfähigkeit der Dünensysteme ist damit weniger eine Frage der hydraulischen Belastung als der langfristigen Sicherung ausreichender Sedimentressourcen und des landwärtigen Anpassungsraums.

Abstract

Coastal protection dunes are the primary flood defence along the outer coast of Mecklenburg-Western Pomerania and, at the same time, sacrificial structures whose maintenance requires substantial annual nourishment volumes. The joint research project ResCAD (*Resistance and Climate Adaptation of Dune Systems*) investigates how dune erosion under present and future storm surge conditions can be quantified and what consequences accelerated sea level rise has for design practice and maintenance. Within subproject ResCAD A, statistically consistent hydraulic boundary conditions from the storm surge generator and the MIKE21 Baltic Sea model of subproject B drive fully automated, process-based XBeach dune erosion models in 1D and 2DH – calibrated against field data of the October 2023 storm surge at the Ahrenshoop study site (skill scores up to $BSS = 0.92$) and validated against the independent event of January 2019. Based on the hindcast modelling of 83 historical storm surges (1941 to 2023) and extensive geometric-climatic scenario ensembles, a metamodel for the analysis and climate adaptation of coastal protection dunes was derived in three modules using machine learning techniques. It predicts erosion volume and crest retreat without further numerical simulation and, for the first time, provides closed-form design equations as a function of dune geometry and sea level rise. The scenario analyses show that if the coastal profiles grow with the rising sea level, the resistance of the dunes remains nearly unchanged – for scenario SSP5-8.5 (+0.80 m by 2100), however, this requires an additional sediment volume of about 100 m³ per running metre, composed of the elevation of the dune, the beach and parts of the shoreface. The adaptability of the dune systems is thus less a question of hydraulic loading than of securing sufficient long-term sediment resources and landward accommodation space.

Danksagung

Das Verbundvorhaben ResCAD wurde durch das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) gefördert (FKZ 03F0927 A). Wir danken dem Team des Projektpartners an der Hochschule RheinMain um Prof. Dr. Arne Arns für die vertrauensvolle und konstruktive Zusammenarbeit im Verbund.

Die größte fachliche und praktische Unterstützung erfuhr das Vorhaben durch das Staatliche Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg (StALU MM), das mit erheblichem persönlichen Einsatz seiner Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sowie durch die umfangreiche Bereitstellung von Mess- und Bestandsdaten wesentlich zum Gelingen des Projektes beigetragen hat. Dem Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) danken wir für die wissenschaftliche Begleitung des Vorhabens und insbesondere für die Möglichkeit, Zwischenergebnisse auf den KFKI-Seminaren vorzustellen und zu diskutieren. Der vom KFKI eingesetzten projektbegleitenden Gruppe – mit Vertreterinnen und Vertretern u. a. des Deutschen Wetterdienstes (DWD), der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), des StALU MM sowie des Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) – danken wir für die engagierten Diskussionen und wertvollen Hinweise über die gesamte Projektlaufzeit.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung IV

Abstract IV

Danksagung V

Abkürzungsverzeichnis IX

Symbolverzeichnis XI

Abbildungsverzeichnis XIV

Tabellenverzeichnis XXII

1. Einführung 1
- 1.1. Motivation und Zielstellung . . . 1
- 1.2. Methodik und Struktur . . . 2

2. Grundlagen 7
- 2.1. Dünenerosion bei Sturmhochwasser . . . 7
- 2.2. Küstenschutzdünen der Ostsee . . . 9
- 2.3. Bemessung und Erhaltungsmanagement . . . 10
- 2.4. Klimaanpassungsstrategie . . . 12
- 2.5. Modellierung von Sturmhochwassern mit XBeach . . . 16
  - 2.5.1. Module und Programmstruktur . . . 16
  - 2.5.2. Wellenmodelle und Einsatzbereiche . . . 17
  - 2.5.3. Hydrodynamik: Flachwassergleichungen und lange Wellen . . . 17
  - 2.5.4. Wellenenergie und Dissipation . . . 18
  - 2.5.5. Sedimenttransport und Morphodynamik . . . 19
  - 2.5.6. Berechnungsgitter . . . 19
  - 2.5.7. Seewärtige Randbedingung . . . 20
  - 2.5.8. Laterale und zyklische Randbedingungen, MPI-Parallelisierung . . . 21

3. Dokumentation und Verifizierung von Naturdaten im Untersuchungsgebiet 23
- 3.1. UAV-Befliegungen mit LiDAR und Photogrammetrie . . . 25
- 3.2. GNSS-gestützte Profil- und Bathymetrievermessung . . . 28
- 3.3. Stationäres 4D-Laserscanning . . . 30
- 3.4. Dokumentation des Sturmhochwassers vom 19.–21.10.2023 . . . 32
- 3.5. Geotechnische Untersuchungen und Sedimentparameter . . . 35
- 3.6. Erfolgskontrolle und Verifizierung . . . 36

4. Morphologische Auswertung historischer Zeitreihen im Untersuchungsgebiet 37
- 4.1. Methodik der volumetrischen Auswertung . . . 37
- 4.2. Profilentwicklung und Volumenbilanz . . . 38
- 4.3. Einfluss der Sturmhochwasser . . . 43

5. Hydro-Morphodynamisches Dünenerosionsmodell 46
- 5.1. Eingangsdaten und Modelldomain . . . 46
  - 5.1.1. Hydraulische Randbedingungen . . . 46
  - 5.1.2. Topobathymetrie des 2DH-Modells aus Naturdaten . . . 47

5.1.3. Topobathymetrie des 2DH-Modells mit standardisierten Querprofilen (Bruun-Regel) . . . 51
5.1.4. Topobathymetrie des 1D-Modells mit standardisierten Querprofilen (Bruun-Regel) . . . 53
5.1.5. Topobathymetrie des 1D-Modells mit standardisierten Querprofilen nach StALU 54
5.1.6. Topobathymetrie des 2DH-Modells mit standardisierten Querprofilen nach StALU 55
5.2. Modellaufbau und Automatisierung (1D/2DH) . . . 55
5.3. Kalibrierung und Validierung . . . 58
5.4. Sensitivitätsanalyse im 1D-Modell . . . 60
5.5. Auswertung . . . 62

6. Analyse hydraulisch-morphologischer Szenarien am Dünenkörper 68
6.1. Hydraulische Variation mit dem Sturmhochwassergenerator am Naturprofil (2DH) . . 70
6.2. Geometrische Variation mit dem Bemessungsereignis RHW am StALU-Standardprofil (1D) . . . 85
6.3. Geometrische Variation mit dem Bemessungsereignis RHW am Bruun-Standardprofil 88
6.4. Vergleich der Dünenbelastung am Bemessungsereignis RHW für steigende Meeresspiegel unter Variation der Geometrie des StALU-Standardprofils . . . 90
6.5. Vergleich der Dünenbelastung am Bemessungsereignis RHW für steigende Meeresspiegel unter Variation der Geometrie des Bruun-Standardprofils . . . 93
6.6. Metamodell zur Klimaanpassung von Küstenschutzdünen auf Basis geometrischer Variation . . . 96

7. Hindcast-Modellierung ausgewählter Sturmhochwasser an der deutschen Ostseeküste 102
7.1. Regionale Validierung des 1D-XBeach-Modells am Beispiel des Sturmhochwassers Oktober 2023 . . . 102
7.2. Modellierung historischer Sturmhochwasser im Zeitraum von 1941 bis 2023 am Standort Ahrenshoop . . . 106
7.3. Metamodell zur Analyse von Küstenschutzdünen auf Basis historischer Sturmhochwasser im Zeitraum von 1941 bis 2023 . . . 109

8. Diskussion 115
8.1. Gewählte Modellierungsmethodik . . . 115
8.2. Hydraulische Randbedingungen . . . 115
8.3. Vergleich Bemessungspraxis . . . 116
8.4. Dünenerosionsvolumen . . . 118
8.5. Meeresspiegelanstieg . . . 118
8.6. Metamodell zur Analyse und Klimaanpassung von Küstenschutzdünen . . . 119

9. Schlussbetrachtung 121
9.1. Fazit . . . 121
9.2. Ausblick und weiterführende Forschung . . . 123

Literatur 128

Anhang 134
A. Ergänzende Abbildungen . . . 134
B. Sensitivität des Bezugsniveaus der TADK-Volumenauswertung . . . 136
C. Simulationsdateien . . . 142
D. Skripte . . . 143

E. Protokolle 144
F. Digitaler Anhang 144

A. Veröffentlichungen und studentische Arbeiten aus dem Vorhaben 144

Abkürzungsverzeichnis

AH5P Referenzprofile für Ahrenshoop von 2021 - 2023. 27, 29, 48, 49, 53, 55, XV, XVI

ALS Airborne Laser Scanning. 5, 6, 29, 31, 33, 37, 39, 43, 47–49, 51, 125, 126, 136, XIV, XV, XXI

BdPts Grenzpunkte für Randbedingungen aus Ostseemodell. 53, 55

BHW Bemessungshochwasserstand. 10, 12, 46, 73–75, 116, 117, XIV, XVIII, XXII

BSH Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. 29, 39, 47–49, 51, 119, 136, XV, XXI

BSS Brier-Skill-Score. 58–62, 102, 103, 105, 115, 121, 135, 143, 144, XVII, XX–XXII

DAS Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel von 2008. 5, 46

DGM Digitales Geländemodell. 33, 51–53

DoC Depth of Closure. 8, 14, 15, 55, 119, XIV

DOP Digitales Orthophoto. 39, 136, XV, XXI

DWD Deutscher Wetterdienst. 46

EOMAP EOMAP GmbH & Co KG- Earth Observation and Mapping, `https://eomap.com/`. 5, 6, 47–49, 51, 58, 126, XIV

GLM Generalized Lagrangian Mean. 17, 62–64, 85, 88, 105, XIII, XVII, XX

GNS Global Navigation Satellite System. 5, 6, 23, 36, 126, 144, XIV

HW Max. Hochwasserstand für Referenzperiode. 10, 46

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. 5, 13

IQR Interquartilsabstand, engl. *interquartile range*. 65

KKM Küstenkilometer. 5, 11, 12, 28, 35, 37–40, 43, 48–51, 53, 55, 58–67, 70, 71, 86, 87, 89–92, 94–96, 98–100, 102–105, 114, 115, 125, 134–137, 141, 142, XV–XXII

LDC Landward Dune Crest (landseitige Dünenoberkante, LDOK). 9, XIV

LDT Landward Dune Toe (landseitige Dünenunterkante, LDUK). 9, XIV

MDE Metamodell zur Dünenentwicklung. 5, 11, 12, 68, 78, 96–98, 100, 102, 109, 113, 115, 117, 119–121, 125, 142–144, XIX, XX, XXII

MHW Mittlerer Hochwasserstand. 10, 11, 37–40, 43, 46, 57, 62, 64, 66, 68–70, 85, 88, 90–92, 97, 109, 110, 112, 118, 136–141, XII, XV–XVII, XXI, XXII

MNW Mittlerer Niedrigwasserstand. 10, 46

MPI Message Passing Interface. 21, 56, 68, 81, 115, 143

MSL Mean Sea LeveL. 13–15, 37, 43, 44, 70, 76, 85–87, 89–96, XVI

MSLR Mean Sea Level Rise. 5, 10, 13, 14, 62, 78, 93, 95, 116, 118, 121, 122, XIV

MW Mittlerer Meeresspiegel. 10, 11, 25, 46, 47

NHN Normalhöhennull des Deutschen Haupthöhennetzes seit 1993 (DHHN 2016). 6, 8, 9, 11, 12, 20, 28–30, 37, 46–48, 50, 51, 54, 66, 68, 70, 71, 85, 86, 97, 98, 101, 107, 109, 112, 113, 116–118, 122, 136–142, XIV–XVIII, XXI, XXII

NW Min. Niedrigwasserstand für Referenzperiode. 10, 11, 46

ObsPt Beobachtungspunkt für Simulationsanalysen im Berechnungsnetz. 85, 88

OET Open Earth Toolbox von Deltares. 49, 50, 55

PG Photogrammetrie. 5, 6, 36, XIV

PNP Pegelnullpunkt (absoluter Referenzwert) eines Pegels bezogen auf DHHN 2016. 10, 37, 46, XXII

RB Randbedingungen. 20, 48, 51, XVI

RCP Representive Concentration Pathway. 13

RHW Referenzhochwasserstand. 1, 5, 10–12, 46, 47, 72–75, 85–90, 93, 96, 97, 101, 113, 116, 117, 120, 122, 125, 142, 144, XIV, XVII–XIX, XXII

SDC Seaward Dune Crest (seewärtige Dünenoberkante, SDOK; entspricht der Dünenkrone D_C). 9, XIV

SDM Statistisches Dünenerosionsmodell. 2, 4, 68, 73, 78

SDT Seaward Dune Toe (seewärtige Dünenunterkante, SDUK; entspricht dem Dünenfuß D_T). 9, XIV

SedEro Sedimentation oder Erosion je Berechnungszelle. 85, 88

SHG Stochastischer Sturmhochwassergenerator. 4, 5, 20, 56, 57, 68, 70–73, 75, 77–79, 81–83, 113, 114, 116, 118, 121, 122, 124, 125, 143, 144, XVI–XVIII

SHW Sturmhochwasser. 23, 37, 43–45, 137, 140, 141, XVI, XXI

SSP Shared Socioeconomic Pathway. 5, 46, 47, 69, 85, 89, 90, 93–96, 99, 101, XIX

StALU MM Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt - Mittleres Mecklenburg. 5, 9, 11, 14, 23, 24, 37, 39, 40, 51, 54, 55, 68, 69, 71, 85, 86, 89, 106, 126, 136, XIV, XV, XVIII, XXI

TADK Teilautomatisiertes Dünenkataster. 6, 11, 37, 39, 40, 43, 69, 136, 141, XV, XVI, XXI, XXII

TLS Terrestrial Laser Scanning. 5, 6, 31, 32, 36, 144, XIV, XV

UAV Unmanned Airial Vehicle. 5, 6, 23, 25, 26, 28–31, 36, 144, XIV, XV, XXII

WSA Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt. 46, XXII

XB Xbeach. 16, 33, 34, 37, 43, 48, 49, 63, 97, 98, 100, 110, 111, 113–115, 119, 120, 134, 135, 142, 144, XIII, XX, XXI

Symbolverzeichnis

D_{50} Mittlerer Korndurchmesser in m. 11, 14, 51

D_{Bz} Höhe der Berme, bzw. vom Beginn des Vorstrandes in m NHN. 51, 54, 55, 68, 85, 87, 89–93, 97, XIX

$D_{Cx,ini}$ Position der Dünenkronen-Vorderkante in x-Richtung vor der Simulation in m. 68

D_{Cx} Position der Dünenkronen-Vorderkante in x-Richtung in m, je Küstenabschnitt als Referenz fixiert (Pendant zu $D_{Cx,ini}$ der Simulationen). 37, 38, XII, XV

$D_{Cz,ini}$ Höhe der Dünenkrone in m NHN vor Simulation. 12, 51, 55, 68, 85, 88, 89, 93, 95–98

D_{Cz} Höhe der Dünenkrone je Vermessung in m NHN (Pendant zu $D_{Cz,ini}$ der Simulationen). 37, 40, 43, 44, XVI

$D_{Tz,ini}$ Höhe Dünenfußpunkt in m NHN vor Simulation. 51, 54, 55, 68, 85, 88, 90–92, 94, 95

D_{Tz} Höhe Dünenfußpunkt in m NHN. 12, 96–98, XXII

Dur Dauer eines Sturmhochwassers, bzw. Zeit über definiertem WSt. 70, 73, 74, 77, 79, 81, 109, 112, XVIII, XX

E_{total} Gesamtenergie über die Sturmflutereignisdauer in J/m. 73

F_C Kronen-Freibord in m: Höhe der Dünenkrone über dem mitwachsenden Bezugsniveau, $F_C = D_{Cz} - (\text{MHW} + \Delta MSL)$. 97

H_D Höhe der Dünenfront in m: Höhendifferenz zwischen Dünenkrone und Dünenfußpunkt, $H_D = D_{Cz} - D_{Tz}$. 97

$H_{12h/y}$ Effektive Wellenhöhe in m, die an 12h pro Jahr überschritten wird. 51

H_{m0} Signifikante Wellenhöhe aus dem Wellenspektrum abgeleitet in m. 20, 47, 118, 142, XVI

$H_{rms,t}$ Statistische RMS-Wellenhöhe nach der *Root-Mean-Square-Methode* für einen Zeitpunkt t in m. 63, 85, 88

$H_{sig,200}$ Signifikante Wellenhöhe des Sturmhochwasserereignisses mit einem Wiederkehrintervall von 200 Jahren in m. 119

H_{sig} Signifikante Wellenhöhe in m, Mittelwert aus dem oberen Drittel der innerhalb eines Zeitraums gemessenen Wellen. 13, 15, 20, 21, 69, 70, 73, 74, 77, 79, 81, 109, 112, XVIII, XX

L Wellenlänge in m. 73

P Wellenleistungsdichte (Energiefluss je Meter Wellenfront) in W/m. 73

P_{mod} Tiefenkorrigierte Wellenleistungsdichte in W/m. 72, 73

$RMSE$ Root-Mean-Square-Error. 29, 98, 99, 113, 114

R^2 Bestimmtheitsmaß Regressionsanalyse. 37, 42, 43, 111, XVI

R^2_{adj} Korrigiertes Bestimmtheitsmaß Regressionsanalyse. 98, 99, 113, 114, 120

$T(a)$ Wiederkehrintervall bzw. Jährlichkeit in Jahren. 8, 20

T_p Peakperiode des Wellenspektrums in s. 15, 20, 21, 69, 70, 73, 74, 76, 77, 79, 81, 109, 110, 112, 118, 142, XVIII, XX

$T_{12h/y}$ Effektive Wellenperiode in s, die an 12h pro Jahr überschritten wird. 51

T_{m-10} Mittlere Wellenperiode in s. 13, 21

$V_{D,ero,obs}$ Gemessenes Dünenerosionsvolumen über MHW nach Ereignis in m/m. 59, 103

$V_{D,ero,sim}$ Dünenerosionsvolumen über MHW nach Simulation in m/m. 59–62, 85, 88, 89, 103, XVII

$V_{D,ero}$ Dünenerosionsvolumen über MHW in m/m. 37, 43, 56–58, 64, 66, 68–72, 74–83, 85, 87, 89, 90, 96–98, 105, 107, 108, 110–113, XII, XVII, XVIII, XX

V_D Verfügbares Dünenvolumen über MHW seewärts der Dünenkronen-Vorderkante D_{Cx} in m^3/m. 11, 37–40, 42–44, 136–141, XII, XV, XVI, XXI

WSt Wasserstand, bzw. Extremwasserstand in m NHN. 69, 70, 74, 76–79, 81, 109, 112, XI, XVIII, XX

ΔD_{Bz} Verschiebung der Bermenhöhe, bzw. vom Beginn des Vorstrandes in m NHN. 82

ΔD_{Cx} Rückgang der Dünenkronen-Vorderkante in x-Richtung nach der Simulation in m. 12, 62, 69, 70, 85, 87–89, 93, 95, 97, 98, 100, 101, XX

ΔD_{Tx} Horizontale Verschiebung des Dünenfußpunktes in x-Richtung nach der Simulation in m. 85, 88, 93

ΔMSL Anstieg des Meeresspiegels im Vergleich zu 2025 in m. 5, 12, 13, 15, 46, 47, 54, 55, 68, 85, 87–93, 95–99, 101, 118–120, 122, 142, XVI, XVIII, XIX, XXII

ΔV_D Änderung des verfügbaren Dünenvolumens V_D zwischen zwei aufeinanderfolgenden Vermessungen in m^3/m; negative Werte entsprechen dem Dünenerosionsvolumen $V_{D,ero}$. 37, 39, 41, 44, 45, XVI

$\Delta\theta_{n,li}$ Winkel der Wellenanlaufrichtung in rechts zur Küstennormalen. 110–112, XX

$\Delta\theta_{n,re}$ Winkel der Wellenanlaufrichtung in rechts zur Küstennormalen. 110, 111, XX

Δt Zeitschrittlänge der Eingangszeitreihe s. 73

α Orientierungswinkel im XB-Koordinatensystem in °, meist auch Winkel der Küstennormale. 53, 73, 112

$\bar{\theta}_{V,li}$ Gewichtete, mittlere Wellenanlaufrichtung in links der Küstennormalen. 110

$\bar{\theta}_{V,re}$ Gewichtete, mittlere Wellenanlaufrichtung in rechts der Küstennormalen. 110–112

η Extremwasserstand eines Sturmhochwassers, engl. *surge*. 69, 70

ϕ Böschungsreibungswinkel in °. 7

ρ Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman. 110–112

ρ Dichte des Meerwassers in kg/m^3. 73

θ Wellenangriffswinkel in °. 68, 69, 74, 118

d Wassertiefe (Summe aus Grundtiefe und aktuellem Wasserstand) in m. 69, 72, 73

g Erdbeschleunigung in $\mathrm{m/s^2}$. 73

h_{eff} Effektive Erosionshöhe in m: Verhältnis von Dünenerosionsvolumen zu Kronenrückgang, $h_{eff} = V_{D,ero}/\Delta D_{Cx}$; entspricht der mittleren Höhe der erodierten Dünenfront über dem mitwachsenden Bezugsniveau. 99

k Wellenzahl in rad/m. 73

nx Zellanzahl im XB-Berechnungsgitter in x-Richtung quer zur Küste. 48, 53, XVI

ny Zellanzahl im XB-Berechnungsgitter in y-Richtung längs zur Küste. 48, 53, XVI

r Korrelationskoeffizient nach Pearson. 110–112

r_s Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman (Symbolschreibweise der englischsprachigen Abbildungen, inhaltsgleich mit ρ). 66

t Zeitpunkt in Simulation. 86, 88, 94, XI, XIII, XVIII, XIX

u GLM-Fließgeschwindigkeiten in x-Richtung in m/s. 62, 63, 85, 88, 105, XVII, XX

v GLM-Fließgeschwindigkeiten in y-Richtung in m/s. 62, 63, 85, 88, 105, XVII, XX

x Lokale Koordinate. 48, 49, 53, 58, XVI

y Lokale Koordinate. 48–50, 53, XVI

z_{min} Minimale Einbindetiefe der seewärtigen XB-Randbedingung in m NHN. 55

$zb_{end,sim}$ Küstenprofil nach Simulation. 85, 88

$zb_{ini,base}$ Basis-Küstenprofil zur Georeferenzierung vor Simulation. 88

$zb_{ini,obs}$ Küstenprofil vor Ereignis (gemessen). 54, 85

$zb_{ini,sim}$ Eingangsküstenprofil vor Simulation. 85, 88

$zs_{t,max}$ Maximale Wasserspiegellage in m NHN des Szenarios zum Zeitpunkt t. 85, 88

Abbildungsverzeichnis

1. Größte bisherige Wiederholungsaufspülung in der Geschichte Mecklenburg-Vorpommerns bei Prerow im Oktober 2023 . . . 1
2. Modellkette, Datenfluss, Struktur und Arbeitsbeziehungen des Forschungsvorhabens ResCAD . . . 2
3. Soll-Ist-Vergleich der Arbeitspakete des Verbundvorhabens ResCAD: Antragsplanung (grau) und tatsächlicher Bearbeitungszeitraum (koloriert) mit Meilensteinen und kostenneutraler Verlängerung bis 31.12.2025 . . . 3
4. Zeitstrahl des Teilprojektes ResCAD A von 2022 bis 2026 mit Messeinsätzen, Sturmhochwasser Oktober 2023, Simulationsserien, Projekttreffen, PbG-Sitzungen und Konferenzbeiträgen (hinterlegt: Sturmflutsaisons Oktober bis April) . . . 4
5. Zeitstrahl berücksichtigter, morphologischer Datensätze (ALS, UAV, EOMAP, TLS, GNS, PG) inklusive Kennzeichnung Sturmsaison und des Oktobersturmhochwassers 2023 . 6
6. Einteilung natürlicher Faktoren von Küstenerosion in Zeit- und Raumskalen (EUROSION 2004) . . . 7
7. Regimeeinteilung der Sturmauswirkung auf die Dünenerosion vorgelagerter Inseln Sallenger (2000) . . . 8
8. Potentielle Überflutungsflächen bei Eintritt von sehr schweren Sturmfluten (hellrot, Wasserstand > 2.00 mNHN) und erosionsgefährdete Küstenabschnitte mit Angabe der beobachteten mittleren Uferlinienverlagerung in m/100 Jahre (dunkelrot, negative Werte = Küstenrückgang) (Weichbrodt u. a. 2013) . . . 9
9. Gegliedertes Standardprofil einer Vollschutzdüne nach aktuellem Regelwerk mit Sicherheits-, Reserve- und Verschleißteil (engl. safety/spare/wear part) sowie einer Kronenbreite von 30 bis 35 m (eigene Darstellung nach einer Vorlage des StALU MM, 2026). Die charakteristischen Punkte sind englisch beschriftet: LDT, LDC, SDC und SDT 9
10. Herleitung von Referenzhochwasserstand RHW und Bemessungshochwasserstand BHW für die funktionelle bzw. konstruktive Bemessung von Küstenschutzbauwerken mit dem seit 2022 geltenden Vorsorgemaß von 1,00 m/100 Jahre (eigene Darstellung nach RKMV 2022b) . . . 10
11. Tiefenbezogene Veränderung der Transformation einer auflaufenden Welle bei Sturmfluten in Abhängigkeit des MSLR für Küstendeiche (Arns u. a. 2017) . . . 13
12. Verschiebung des Strandprofils aufgrund der Bruun-Regel (Bruun 1962; Bruun 1983), resultierende Erosion im Strand- und Dünenbereich sowie Akkumulation seewärts. Demonstration einer Sandaufspülung zur Anpassung an den MSLR (Lindenberg 2023) 14
13. Profilentwicklung für verschiedene Meeresspiegel unter Variation des Seegangs und der DoC nach der Bruun-Regel (Bruun 1962) . . . 15
14. Übersicht der Module in XBeach und deren Interaktion, modifiziert nach Deltares (2023) 16
15. Grundlegendes Konzept der Berechnungsgitter in XBeach: Prinzipskizze zur Orientierung mit Randbedingungen (links) und Matrix-Notation (rechts), modifiziert nach Deltares (2023) . . . 20
16. Hydrodynamische Kriterien für die Mindestwassertiefe an der seewärtigen Randbedingung (Deltares 2023) . . . 21
17. Wirkung der lateralen Wellenrandbedingungen auf das Wellenmuster (oben) und die Küstenlängsströmungen (unten) am Beispiel des Delilah-Testmodells: NEUMANN (links) und WAVECREST (rechts) (Deltares 2023) . . . 22
18. Untersuchungsgebiet am Strandabschnitt nördlich von Ahrenshoop (Fischland-Darß), bereitgestellt durch StALU MM . . . 24

19. Standorte der ResCAD-Messkampagne an der südwestlichen Ostseeküste: Untersuchungsgebiet Ahrenshoop und UAV-Standort Prerow, Dokumentationsstandorte des Sturmhochwassers vom 19.–21.10.2023 (Binz, Juliusruh, Göhren) sowie Referenzpegel Warnemünde (Kartengrundlage: OpenStreetMap) 24
20. Verwendetes Fluggerät (DJI Matrice M300 RTK mit LiDAR-Sensorik und RGB-Kamera) für die UAV-Erkundung und zugehörige Luftbild-Aufnahme des Einsatzortes bei Ahrenshoop 25
21. Ergänzende Ausrüstung zur UAV-Erkundung (rechts: EcoFlow-Powerstation mit Ladestation und Akkus für Drohne und RTK-Base, links: Windmessgerät MiniAir2 der Fa. Schiltknecht) 26
22. Digitales Geländemodell der UAV-gestützten LiDAR-Vermessung vom 21.03.2023 mit frischer Abbruchkante der leichten Sturmflut vom 25.02.2023 (Farbskala in ellipsoidischen Höhen) 26
23. UAV-Orthomosaik des Messeinsatzes vom 21.03.2023 (RGB, 2,6 cm Bodenauflösung) mit den GNSS-Messpunkten desselben Tages (Leica GS09/CS20, RTK; Strand-/Dünenprofile und Buhnenprofile mit Lotstange, Bathymetrie zwischen den Buhnen watend aufgenommen), Buhnen-, Wasserlinien- und Dünenmarkierung aus GAIA-MV professional sowie den AH5P-Monitoringprofilen vom 19.10.2021 (KW 42); die amtlichen Buhnenlinien decken sich mit den im Luftbild sichtbaren Bauwerken (Hintergrundkarte: OpenStreetMap) 27
24. RGB-kolorierte UAV-Punktwolke der Mission ResCAD_24_C1 bei Prerow vom 03.04.2024 in Schrägansicht mit Zonierung (von links: Küstenschutzwald, Düne, Strand, Ostsee); gezeigt ist ein repräsentativer Mittelabschnitt der Punktwolke (KKM F199.5 bis F200.0); Belichtung je Flugstreifen normalisiert, Höhen näherungsweise in m NHN; Übersichtskarte oben links mit Lage des Abschnitts und amtlicher Küstenkilometrierung (Hintergrund: OpenStreetMap) 28
25. Messinstrumente für den Laserscanner der Fa. Riegl LMS-Z420i (links) im Einsatz mit Powerstation (mitte rechts) und GNSS-Positionierung (rechts) 31
26. Ansicht der TLS-Punktwolke (Riegl LMS-Z420i), aufgenommen vom Dach des Hotels „The Grand“ in Ahrenshoop am 10.07.2023, mit in rot markierten, etwas verschatteten, seeseitigem Teil der Küstenschutzdüne 32
27. Schadensbilder am 21.10.2023 bei Prerow (links) und Juliusruh (rechts) 33
28. Photogrammetrisch erstelltes und georeferenziertes 3D-Modell der Dünenabbruchkante am Standort „The Grand“ am 21.10.2023 mit Untersuchungsprofilen 34
29. Ergebnisse der leichten Rammsondierung im Untersuchungsgebiet am Dünenfuß, an der Schorre (Strand) und auf der Dünenkrone am 21.03.2023 35
30. Definitionsskizze der volumetrischen Auswertung: verfügbares Dünenvolumen V_D (schraffiert) oberhalb der MHW-Referenzlinie seewärts der Kronen-Vorderkante D_{Cx} am Beispiel des Abschnitts KKM F181.495 (Vermessung 2019AL) 38
31. Dünenprofile des Abschnitts KKM F181.495 (2012 – 2022, seewärtige Richtung links). Schwarz gestrichelte Linien: gemeinsamer Datenbereich aller Vermessungen; rot gestrichelte Linie: Kronen-Vorderkante D_{Cx}; grau gepunktete Linie: MHW-Referenzlinie; Legendenwerte: V_D je Vermessung 38
32. Lage der ausgewerteten TADK-Profile (KKM F180.235 bis F184.715) auf Grundlage der amtlichen Küstenkilometrierung mit Übersichtskarte der südwestlichen Ostsee; Färbung: linearer Trend des Dünenvolumens V_D 2012–2022 über MHW; Hintergrund: DOP (LAiV M-V) und Satellitenbild Oktober 2022 (EOMAP GmbH / StALU MM); Tiefenlinien: gemessenes Geländemodell aus ALS (09/2023), EOMAP-Satellitenbathymetrie (10/2022) und BSH-Daten 39

33. Verfügbares Dünenvolumen V_D über MHW je Küstenabschnitt und Vermessung aus den TADK-Daten (graue Zellen: keine gültigen Daten) 40
34. Änderung des Dünenvolumens ΔV_D zwischen aufeinanderfolgenden Vermessungen (blau: Akkretion, rot: Erosion); jede Zeile ist der späteren Vermessung des Intervalls zugeordnet 41
35. Mittlere Dünenvolumenänderung $\overline{\Delta V_D}$ je Küstenabschnitt über alle Messintervalle (2012 – 2022) 41
36. Mittlere Dünenvolumenänderung $\overline{\Delta V_D}$ je Vermessung über alle Küstenabschnitte . . 42
37. Linearer Trend $\mathrm{d}V_D/\mathrm{d}t$ des verfügbaren Dünenvolumens V_D je Küstenabschnitt (2012 – 2022) mit Bestimmtheitsmaß R^2 42
38. Zeitliche Entwicklung des verfügbaren Dünenvolumens V_D (oben) und der Dünenkronenhöhe D_{Cz} (unten) je Küstenabschnitt; rot gestrichelte Linien: SHW-Ereignisse am Pegel Warnemünde mit Scheitelwasserstand über MSL 44
39. Verteilung von ΔV_D für Messintervalle mit und ohne SHW-Ereignis, Wilcoxon-Rangsummentest: $p = 7{,}1 \cdot 10^{-9}$ (alle Abschnitte zusammengefasst) 44
40. Verteilung von ΔV_D über alle Küstenabschnitte je Messintervall; sturmbeeinflusste Intervalle sind markiert (SHW) 45
41. Häufigkeitsverteilung der Wellenanlaufrichtungen und signifikanten Wellenhöhen H_{m0} für Warnemünde (nahe Ahrenshoop) in der Referenzperiode von 1996 bis 2005 (RKMV 2012) 47
42. Modellbereich, inkl. RB aus MIKE21 in Pt. 302, seewärtige RB (rote Linie), Topo-Bathymetry in m NHN, Küstenlinie (WL) auf 0.2 m NHN, Berechnungsnetz (Zellanzahl: nx, ny und x,y-Dimensionen in m), Beobachtungspunkte (Grid-Obs-Pts, #1=küstennah, #2=seewärtig), gemessenes Referenzprofil X-Ref aus AH5P nach dem Ereignis (10/2023) am KKM F181.495; Tiefenlinien in m NHN (seewärts konstruktionsbedingt begradigt, -3 m = gemessene Sandbankmorphologie) 48
43. Konstruktion und Erweiterung der Topo-Bathymetrie für das 2DH-Erosionsmodell aus Naturdaten und des zugehörigen Berechnungsnetzes am KKM F181.495 49
45. Final modifizierte (erweiterte, vertiefte und abgeflachte) Topobathymetrie für KKM F181.495 im 3D-Modell 50
46. Vergleich eines linearen, standardisierten Küstenquerprofils mit einem Bruun-Profil für KKM F181.495 (Dünenfußhöhe = 2 m, Kronenhöhe = 5 m, Bermenhöhe = 0 m NHN) . . 51
47. Translation der standardisierten Bruun-Profile entlang der Küstennormalen am Dünenfußpunkt (rote Rauten-Marker) der Originalprofile (graue Punkte) in 3D für den Abschnitt Ahrenshoop (Dünenfußhöhe = 2 m, Kronenhöhe = 5 m, Bermenhöhe = 0 m NHN) 52
48. Konstruktion der Topo-Bathymetrie für das 2DH-Modell nach der Bruun-Regel (Dünenfußhöhe = 2 m, Kronenhöhe = 5 m, Bermenhöhe = 0 m NHN) 52
49. Final modifizierte (erweiterte, vertiefte und abgeflachte) Topobathymetrie des Bruun-2DH-Modells für KKM F181.495 in 3D 53
50. Konstruktion der Topo-Bathymetrie für das 1D-Modell nach der Bruun-Regel (Basisprofil: Dünenfußhöhe = 2 m, Kronenhöhe = 5 m, Bermenhöhe = 0 m NHN) 54
51. Konstruktion der 1D-Küstenquerprofile für verschiedene ΔMSL nach der Bruun-Regel (Basisprofil: Dünenfußhöhe = 2 m, Kronenhöhe = 5 m, Bermenhöhe = 0 m NHN) . . . 54
52. Vergleich eines linearen, standardisierten Küstenquerprofils mit dem gemessenen Referenzprofil für KKM F180.715 (Dünenfußhöhe = 2 m, Kronenhöhe = 5 m, Höhe Vorstrand = -1 m NHN) 55
53. Automatisierter Workflow der Szenarien-Ensembles vom SHG über den skriptgesteuerten Modellaufbau und die MPI-parallelisierte XBeach-Simulation bis zum Metamodell der Dünenerosion 57

54. Definitionsskizze der 1D-Profilauswertung des automatisierten Post-Processings: Dünenparameter der Kronen-Vorderkante (D_C), des Dünenfußes (D_T) und des Bermen-/Riffpunktes (D_B) jeweils vor (*ini*) und nach dem Ereignis (*end*), Verschiebungen (Δ) sowie Erosions- und Sedimentationszonen mit Dünenerosionsvolumen $V_{D,ero}$ oberhalb der MHW-Referenzlinie (idealisierte Profile) 57
55. Hydraulische Randbedingungen des MIKE21-Hindcasts zum Sturmhochwasser Oktober 2023 für die 1D und 2DH-Kalibrierung am KKM F180.715 (Simulation-1D: V10_03, Simulation-2DH: V8_05): Wasserstandsganglinie (oben links), signifikante Wellenhöhe und Peakperiode (unten links) sowie Wellenangriffswinkel über die Ereignisdauer (rechts) 59
56. Parameteranalyse am Beispiel des sensitivsten Parameters `facAs` (Simulation: V10_07, KKM F180.715): BSS-Verlauf über den Parameterraum mit Trendkurven und Optimum (oben), zugehöriges Dünenerosionsvolumen $V_{D,ero,sim}$ (2. Teilplot), Abweichung $\Delta V_{D,ero}$ vom beobachteten Wert (3. Teilplot) sowie Kolmogorov-Smirnov-Kriterium als Sensitivitätsmaß (unten) 61
57. Profilbezogene Auswertung der 2DH-Kalibrierungssimulation mit dem besten mittleren BSS (Simulation: V8_05_run13_007, KKM F180.715): Ausgangsprofil, simuliertes und gemessenes Nachsturmprofil mit BSS (oben), kumulierte Sedimentations- und Erosionshöhen mit $V_{D,ero,sim}$ (Mitte) sowie GLM-Geschwindigkeiten u, v zum Zeitpunkt $t = 67$ h (unten) 62
58. Georeferenzierte Momentaufnahme der signifikanten Wellenhöhe zum Zeitpunkt $t = 67{,}0$ h mit mittlerem Wellenangriffswinkel (violetter Pfeil, 346°), KKM-Stationierung und Referenzprofil X-Ref über dem Luftbild (Simulation: V8_05_run13_007, KKM F180.715) 63
59. Georeferenzierte Momentaufnahme der GLM-Geschwindigkeitsvektoren (Magnitude in m/s) zum Zeitpunkt $t = 66{,}5$ h mit dominanter Küstenlängsströmung $> 2{,}5$ m/s und vereinzeltem Wellenauflauf (Simulation: V8_05_run13_011, KKM F181.495) 64
60. Georeferenzierte kumulierte Sedimentations- (magenta) und Erosionshöhen (blau) je Berechnungszelle zum Simulationsende ($t = 96{,}2$ h) mit Detailfenster des Dünen- und Bermenbereichs am Referenzprofil (Simulation: V8_05_run13_011, KKM F181.495) . . 65
61. Küstenlängs-Verteilung des Dünenerosionsvolumens $V_{D,ero}$ über MHW (oben) sowie der horizontalen Verlagerung der 2- und 3-m-NHN-Höhenlinien (unten) je Gitterzeile der 2DH-Kalibrierungssimulation; gepunktete Vertikale: Referenzprofil X-Ref mit Perzentilangabe (Simulation: V8_05_run13_007, Domäne KKM F180.715) 66
62. Korrelationsanalyse möglicher Einflussgrößen der Küstenlängs-Variabilität: Dünenerosionsvolumen je Gitterzeile gegen Vorsturm-Dünenvolumen, maximalen Wasserstand am Strand, Wasserspiegel-Varianz am Strand (Näherungsmaß für den Infragravitationsanteil), maximale Küstenlängsströmung und küstennahe mittlere Wellenhöhe mit Rangkorrelationskoeffizienten (Simulation: V8_05_run13_007, Domäne KKM F180.715) 67
63. Erosionsprofile der XB-2DH-Modellierung (Grenzwert: $V_{D,ero} = 1$ m^3/m) basierend auf einem Naturprofil bei KKM F181.495 (Simulation: V8_06) 70
64. SHG-Szenarien aus XB sortiert nach Dünenerosionsvolumen (Grenzwert: $V_{D,ero} = 1$ m^3/m) auf Grundlage eines Naturprofils bei KKM F181.495 (Simulation: V8_06) 71
65. Erosionsprofile der XB-2DH-Modellierung (Grenzwert: $V_{D,ero} = 1$ m^3/m) mit StALU-Standardgeometrie (Simulation: V9_03) 71
66. SHG-Szenarien aus XB sortiert nach Dünenerosionsvolumen (Grenzwert: $V_{D,ero} = 1$ m^3/m) auf Grundlage eines StALU-Standardprofils (Simulation: V9_03) 72
67. Kumulierte Wellenleistungsdichte der hydraulischen Randbedingungen über die Wassertiefe für das Szenario-Ensemble V9_04 (RHW-Varianten) 72
68. Erosionsprofile der XB-2DH-Modellierung für die RHW-Szenarien (Grenzwert: $V_{D,ero} = 1$ m^3/m) mit StALU-Standardgeometrie (Simulation: V9_04) 74

69. Erosionsprofile der XB-2DH-Modellierung für die BHW-Szenarien (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m^3/m) mit StALU-Standardgeometrie (Simulation: V9_05) 74
70. SHG-Szenarien aus XB für die Extremwertanalyse (RHW / BHW) sortiert nach Dünenerosionsvolumen (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m^3/m) auf Grundlage eines StALU-Standardprofils 75
71. Parameterspannweiten der Szenarien-Ensembles für die Extremwertanalyse (RHW / BHW) als Boxplot (Simulation: V9_04 & V9_05) 75
72. Erosionsprofile der XB-2DH-Modellierung für die Szenarien (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m^3/m) mit StALU-Standardgeometrie (Simulation: V9_06) 76
73. Statistische Aufbereitung der Szenarien-Ensembles für die Extremwertanalyse als Boxplot (Simulation: V9_06) 77
74. SHG-Szenarien aus XB für die Parameterstudie (Dur, H_{sig}, T_p und WSt) sortiert nach Dünenerosionsvolumen (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m^3/m) mit StALU-Standardgeometrie (Simulation: V9_06) 77
75. Erosionsprofile der XB-2DH-Modellierung für die Szenarien (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m^3/m) mit StALU-Standardgeometrie (Simulation: V9_07) 78
76. Statistische Aufbereitung der Szenarien-Ensembles für die Extremwertanalyse als Boxplot (Simulation: V9_07) 79
77. SHG-Szenarien aus XB für die Parameterstudie (Dur, H_{sig}, T_p und WSt) sortiert nach Dünenerosionsvolumen (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m^3/m) mit StALU-Standardgeometrie (Simulation: V9_07) 79
78. Erosionsprofile der XB-2DH-Modellierung für die Szenarien (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m^3/m) mit StALU-Standardgeometrie (Simulation: V9_08) 80
79. Statistische Aufbereitung der Szenarien-Ensembles für die Extremwertanalyse als Boxplot (Simulation: V9_08) 80
80. SHG-Szenarien aus XB für die Parameterstudie (Dur, H_{sig}, T_p und WSt) sortiert nach Dünenerosionsvolumen (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m^3/m) mit StALU-Standardgeometrie (Simulation: V9_08) 81
81. Erosionsprofile der XB-2DH-Modellierung (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m^3/m) mit StALU-Standardgeometrie (Simulation: V9_09) 81
82. SHG-Szenarien aus XB sortiert nach Dünenerosionsvolumen (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m^3/m) auf Grundlage eines StALU-Standardprofils (Simulation: V9_09) 82
83. Erosionsprofile der XB-2DH-Modellierung (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m^3/m) mit StALU-Standardgeometrie (Simulation: V9_10b) 82
84. SHG-Szenarien aus XB sortiert nach Dünenerosionsvolumen (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m^3/m) auf Grundlage eines StALU-Standardprofils (Simulation: V9_10b) 83
85. Statistische Aufbereitung der Szenarien-Ensembles als Boxplot (Simulation: V9_09 & V9_10b) 84
86. Profilanalyse für das RHW-Szenario mit Morphodynamik, Wasserstand, Seegang und Fließgeschwindigkeiten (Dünenfußhöhe = 2 m, Kronenhöhe = 5 m, Bermenhöhe = -1 m NHN, t = 63.3 h) mit StALU MM-Geometrie 86
87. Vergleich des Dünenerosionsvolumens in Abhängigkeit der Höhe der Dünenkrone und variabler Dünenfußhöhen für zwei unterschiedliche Meeresspiegel bei KKM F180.715 für mitwachsenden Vorstrand 86
88. Vergleich des Rückgangs der Dünenkrone in Abhängigkeit der Höhe der Dünenkrone und variabler Dünenfußhöhen für zwei unterschiedliche Meeresspiegel bei KKM F180.715 für mitwachsenden Vorstrand 87
89. Vergleich des Dünenerosionsvolumens und des Rückgangs der Dünenkrone in Abhängigkeit der Höhe der Dünenkrone und variabler Dünenfußhöhen bei KKM F180.715 für eine konstante Vorstrandhöhe bei $\Delta MSL = 0.80m$ 87

90. Profilanalyse für das RHW-Szenario mit Morphodynamik, Wasserstand, Seegang und Fließgeschwindigkeiten (Basisprofil: Dünenfußhöhe = 2 m, Kronenhöhe = 5 m, Bermenhöhe = 0 m NHN, t = 62 h) mit Bruun-Geometrie 88
91. Vergleich des Dünenerosionsvolumens in Abhängigkeit der Höhe der Dünenkrone und variabler Dünenfußhöhen für ΔMSL = 0 m und ΔMSL = 0.8 m (SSP585) bei KKM F180715 für mitwachsenden Vorstrand 89
92. Vergleich des Rückgangs der Dünenkrone in Abhängigkeit der Höhe der Dünenkrone und variabler Dünenfußhöhen für ΔMSL = 0 m und ΔMSL = 0.8 m (SSP585) bei KKM F180.715 für mitwachsenden Vorstrand 90
93. Auswirkung der konsistenten Wellenrandbedingung auf das Dünenerosionsvolumen: 1:1-Vergleich *V10_08c* gegen *V10_08* bei KKM F180.715 über alle ausgewerteten Dünengeometrien, mit eingebettetem Vergleich der Wellenganglinien (Scheitel identisch, Sturmdauer 18 h vs. 26 h; T_p als aus H_{sig} abgeleitete Achse dargestellt) 91
94. Vergleich des Dünenerosionsvolumens in Abhängigkeit der Höhe der Dünenkrone für zwei Dünenfußhöhen und verschiedener Extremwasserstände aus Klimaszenarien bei KKM F180.715 ($D_{Bz} = f(\Delta\text{MSL})$) 91
95. Vergleich des Dünenerosionsvolumens in Abhängigkeit der Höhe der Dünenkrone für zwei Dünenfußhöhen und verschiedener Extremwasserstände aus Klimaszenarien bei KKM F180.715 ($D_{Bz} = const.$) 92
96. Vergleich des Rückgangs der Dünenkrone in Abhängigkeit der Höhe der Dünenkrone für zwei Dünenfußhöhen und verschiedener Extremwasserstände aus Klimaszenarien bei KKM F180.715 ($D_{Bz} = f(\Delta\text{MSL})$) 92
97. Vergleich Dünenerosionsvolumen und Dünenhöhe in Abhängigkeit des Meeresspiegelanstiegs für variable Dünenfußhöhen für KKM F180.715 92
98. Profilanalyse für das SSP585-Szenario mit Morphodynamik, Wasserstand, Seegang und Fließgeschwindigkeiten (Basisprofil: Dünenfußhöhe = 2.8 m, Kronenhöhe = 5.8 m, Bermenhöhe = 0.8 m NHN, t = 62 h) mit Bruun-Geometrie 94
99. Vergleich des Dünenerosionsvolumens in Abhängigkeit der Höhe der Dünenkrone für zwei Basis-Dünenfußhöhen und verschiedener Extremwasserstände aus SSP's bei KKM F180.715 94
100. Vergleich des Rückgangs der Dünenkrone in Abhängigkeit der Höhe der Dünenkrone für zwei Basis-Dünenfußhöhen und verschiedener Extremwasserstände aus SSP's bei KKM F180.715 95
101. Vergleich Dünenerosionsvolumen für zwei Kronenhöhen in Abhängigkeit des Meeresspiegelanstiegs für variable Dünenfußhöhen bei KKM F180.715 95
102. Vergleich des Rückgangs der Dünenkrone für zwei Kronenhöhen in Abhängigkeit des Meeresspiegelanstiegs für variable Dünenfußhöhen bei KKM F180.715 96
103. Korrelationsmatrizen der geometrischen und klimatischen Prädiktoren sowie der Zielgrößen des dritten MDE-Moduls auf Grundlage des geometrisch-klimatischen Ensembles am Bruun-Standardprofil (Simulation: V12_01, $n = 432$) 97
104. Vergleich des dritten MDE-Moduls mit den Simulationsergebnissen des geometrisch-klimatischen Ensembles (V12_01, KKM F180.715) 98
105. Validierung der invertierbaren Kopplung nach Gleichung (21) in beide Umrechnungsrichtungen: Kronenrückgang aus gegebenem Erosionsvolumen (links) und Erosionsvolumen aus gegebenem Kronenrückgang (rechts), koloriert nach ΔMSL (Simulation: V12_01, KKM F180.715) 99

106. Bemessungsdiagramm des dritten MDE-Moduls je Klimaszenario: Dünenerosionsvolumen (Farbfläche, Gleichung (18)) und Kronenrückgang in m (rote Isolinien, Gleichung (19)) in Abhängigkeit von Dünenfuß- und Kronenhöhe; die Stützstellen der zugrunde liegenden XB-Simulationen zeigen die Antwortflächen im Anhang (Abbildungen 121 und 122) (Simulation: V12_01, KKM F180.715) 100
107. Beispielhafte Ableitung von Pessimalprofilen für einen zulässigen Kronenrückgang $\Delta D_{Cx} \leq 12$ m: mindestens erforderliche Kronenhöhe in Abhängigkeit der Dünenfußhöhe je Klimaszenario (links) und zugehöriges Erosionsvolumen entlang der Grenzkurven (rechts) (Simulation: V12_01, KKM F180.715) 100
108. Hydraulische Randbedingungen des MIKE21-Hindcasts zum Sturmhochwasser vom 02.01.2019 am Randbedingungspunkt Pt. 302 (KKM F181.495, Simulation: V11_01): Wasserstandsganglinie (oben links), signifikante Wellenhöhe und Peakperiode (unten links) sowie Wellenangriffswinkel über die Ereignisdauer (rechts) 104
109. Profilanalyse der 1D-Validierung am Sturmhochwasser vom 02.01.2019 (KKM F181.495, Simulation: V11_01): Ausgangsprofil, simuliertes und gemessenes Profil nach dem Ereignis mit BSS (oben), kumulierte Sedimentations- und Erosionshöhen mit $V_{D,ero}$ (Mitte) sowie GLM-Geschwindigkeiten u, v zum Zeitpunkt $t = 46{,}5$ h (unten) 105
110. Aufgezeichnete historische Sturmhochwasser der südwestlichen Ostsee am Pegel Warnemünde seit 1872 (Ereignisse $\geq 1{,}25$ m über Mittelwasser, koloriert nach Scheitelwasserstand), Datengrundlage (MV-Wetter 2023) 106
111. Erosionsprofile der 2DH-Hindcast-Modellierung von 83 historischen Sturmhochwassern im Zeitraum 1941 bis 2023 (Grenzwert: $V_{D,ero} = 1$ m^3/m) mit Bruun-Geometrie (Simulation: V9_11) 107
112. Modellierte Dünenerosionsvolumen für historische Sturmhochwasser im Zeitraum von 1941 bis 2023 aufsteigend sortiert (Grenzwert: $V_{D,ero} = 1$ m^3/m) auf Grundlage eines Bruun-Standardprofils (Simulation: V9_11) 107
113. Zeitstrahl des Dünenerosionsvolumens für historische Sturmhochwasser von 1941 bis 2023 (Grenzwert: $V_{D,ero} = 1$ m^3/m) auf Grundlage eines Bruun-Standardprofils (Simulation: V9_11) 108
114. Parameterspannweiten der 2DH-Hindcast-Modellierung von 83 historischen Sturmhochwassern im Zeitraum 1941 bis 2023 als Boxplot (Simulation: V9_11) 108
115. Lineare Regressionsanalyse für die hydraulischen Randbedingungen $Dur_{WSt>MHW}$, WSt, $H_{sig,max}$ sowie $T_{p,max}$ und dem Dünenerosionsvolumen für die historischen Sturmhochwasser von 1941 bis 2023 auf Grundlage eines Bruun-Standardprofils (Simulation: V9_11) 109
116. Korrelationsmatrizen der untersuchten hydraulischen Randbedingungen und dem Dünenerosionsvolume der modellierten XB-Sturmhochwassern von 1941 bis 2023 auf Grundlage eines Bruun-Standardprofils (Simulation: V9_11) 110
117. Abgeleitete Wellenangriffswinkel $\Delta\theta_{n,re}$ und $\Delta\theta_{n,li}$ in Bezug zur Küstennormalen in Abhängigkeit des Dünenerosionsvolumens $V_{D,ero}$ der modellierten XB-Sturmhochwassern von 1941 bis 2023 auf Grundlage eines Bruun-Standardprofils (Simulation: V9_11) . . 111
118. Vergleich des Metamodells (stepwise model) mit den modellierten Sturmhochwassern 1941 bis 2023 (V9_11) 113
119. Vergleich des Metamodells (Modul 1) mit den Simulationsergebnissen synthetischer SHG-Szenarien (KKM F181.495) 114
120. Kornzusammensetzung im Untersuchungsgebiet am Dünenfuß und an der Schorre im März 2023 134
121. Antwortflächen des Dünenerosionsvolumens nach Gleichung (18) je Klimaszenario in Abhängigkeit von Dünenfuß- und Kronenhöhe; schwarze Punkte: XB-Simulationen (Simulation: V12_01, KKM F180.715) 134

122. Antwortflächen des Kronenrückgangs nach Gleichung (19) je Klimaszenario in Abhängigkeit von Dünenfuß- und Kronenhöhe; schwarze Punkte: XB-Simulationen (Simulation: V12_01, KKM F180.715) 135
123. Profilbezogene Auswertung der 2DH-Kalibrierungssimulation mit dem besten mittleren BSS am zweiten Referenzprofil (Simulation: V8_05_run13_007, KKM F181.495), Darstellung analog zu Abbildung 57 135
124. Lage der ausgewerteten TADK-Profile (KKM F180.235 bis F184.715) auf Grundlage der amtlichen Küstenkilometrierung; Färbung: linearer Trend des Dünenvolumens V_D 2012–2022 über dem pauschalen Bezugsniveau 1,00 m NHN; Hintergrund: DOP (LAiV M-V) und Satellitenbild Oktober 2022 (EOMAP GmbH / StALU MM); Tiefenlinien: gemessenes Geländemodell aus ALS (09/2023), EOMAP-Satellitenbathymetrie (10/2022) und BSH-Daten 136
125. Dünenvolumen V_D über MHW (1,19 m NHN) je Küstenabschnitt und Vermessung (Python-Auswertung, identisch zur Auswertung im Hauptteil) 137
126. Dünenvolumen V_D über dem pauschalen Bezugsniveau 1,00 m NHN je Küstenabschnitt und Vermessung 138
127. Differenz der Dünenvolumina zwischen den Bezugsniveaus 1,00 m NHN und MHW: Der Zuwachs entspricht der Querschnittsfläche des Streifens zwischen beiden Niveaus . . 138
128. Linearer Trend des Dünenvolumens V_D 2012–2022 je Küstenabschnitt, Bezugsniveau MHW 139
129. Linearer Trend des Dünenvolumens V_D 2012–2022 je Küstenabschnitt, pauschales Bezugsniveau 1,00 m NHN 139
130. Zeitreihen des Dünenvolumens V_D je Küstenabschnitt mit SHW-Ereignissen, Bezugsniveau MHW 140
131. Zeitreihen des Dünenvolumens V_D je Küstenabschnitt mit SHW-Ereignissen, pauschales Bezugsniveau 1,00 m NHN 140
132. Volumenänderung V_D in Messintervallen mit und ohne SHW für die Bezugsniveaus MHW (links, Wilcoxon-Rangsummentest $p = 7{,}1 \cdot 10^{-9}$) und pauschal 1,00 m NHN (rechts, $p = 3{,}0 \cdot 10^{-9}$) 141

Tabellenverzeichnis

1. Arbeitspakete des Teilprojektes ResCAD A (TU Dresden) mit zugehörigen Meilensteinen laut Projektantrag und Verortung im vorliegenden Bericht 3
2. Vergleichswerte des Bemessungsansatzes nach Newe (2013) für den Küstenbereich KKM F181.300 bis F185.200 (Dünenfußhöhe D_{Tz} = 2,0 m NHN) und Gegenüberstellung mit dem Kronenrückgang nach Gleichung (19) des MDE-Moduls 3 (RHW, ΔMSL = 0, KKM F180.715) 12
3. Vergleich zum Ausgleich benötigter Sedimentmengen nach Anpassungsszenario . . 15
4. In XBeach implementierte Berechnungsansätze zum Wellenbrechen (Deltares 2023) . 18
5. Messeinsätze der ResCAD-Messkampagne im Untersuchungsgebiet 23
6. Vergleich der 220 GNSS-RTK-Punkte vom 21.03.2023 mit unabhängigen Datengrundlagen: UAV-LiDAR (selber Messtag), EOMAP-Satellitenbathymetrie (drei Epochen, Datum LAT) und dem kombinierten ALS-Geländemodell vom 17.09.2023 30
7. Gemittelte geometrische Parameter der Profile P3–P13 am Standort Ahrenshoop vor dem Hotel „The Grand“ direkt nach dem Sturmhochwasser vom 19.–21.10.2023 (Lage Profil P8: 332714.72 / 6029392.95 / 1.26; EPSG: 25833) 34
8. In den Simulationen verwendete Korndurchmesser aus der Beprobung von März 2023 36
9. Mittleres Dünenvolumen über MHW und lineare Trends je Küstenabschnitt aus den TADK-Vermessungen 2012–2022 43
10. Referenzwasserstände und Messperiode für das Modellgebiet Ahrenshoop bezogen auf PNP und NHN (DHHN 2016) des WSA Ostsee aus `pegelonline.wsv.de`; RHW/BHW für die Dekade 2021–2030 nach RKMV (2022b) 46
11. Meeresspiegelanstieg für Klimaszenarien bei Ahrenshoop 47
12. Wesentliche Modell- und Kalibrierparameter der finalen XBeach-Konfiguration (Simulationsserie V9_11, Neukalibrierung 2026) 56
13. BSS-Werte der 2DH-Kalibrierung am Sturmhochwasser Oktober 2023 für vier Küstenabschnitte (Standardparameter vs. Feinjustierung von `facua` und Porosität) 58
14. Übersicht der Parameter 60
15. Übersicht der XBeach-Simulationscluster für die 2DH-Szenarienanalyse. Angegeben sind Simulationsnummer (Cluster),Geometrischer Profiltyp, Anzahl der Szenarien pro Simulation, hydr. Randbedingungen sowie deren Parameterspannweiten 69
16. Übersicht der 1D-Modellgüte: lokale Kalibrierung (V10_03) und Validierung (V11_01) am Standort Ahrenshoop sowie regionale Übertragung mit unveränderten Ahrenshoop-Parametern (V10_02) 103
17. Vergleich der TADK-Volumenauswertung für die Bezugsniveaus MHW (1,19 m NHN) und pauschal 1,00 m NHN: mittleres Dünenvolumen $\overline{V_D}$ und linearer Trend je Küstenabschnitt (2012–2022). 141

1. Einführung

1.1. Motivation und Zielstellung

Etwa 70% der ca. 376 km Außenküste des Landes Mecklenburg-Vorpommern sind vom dynamischen Rückgang der Küstenlinie betroffen (landwärtige Rezession). Im Durchschnitt beträgt die Rezessionsrate 34 m/100a und würde ohne ein kontinuierliches Küstenmanagement langfristig zu erheblicher Umgestaltung der Küstenform und zu Landverlust führen (Gurwell 2008). Damit einher geht die nachhaltige Bereitstellung von Ressourcen unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit und Aspekten des Umweltschutzes. Im Durchschnitt der letzten Jahre sind 500.000 m^3 Sand pro Jahr für Strand- und Dünenaufspülungen zu je 4 Mio. €/a in Mecklenburg-Vorpommern zur Erhaltung der Regelquerschnitte für Küstenquerprofile verwendet worden. Die bisher größte Aufspülung wurde vor Prerow (Hohe Düne) dokumentiert (Abbildung 1); dabei wurden ca. 1 Mio. m^3 Sand aufgespült. Das macht einen erheblichen Teil des Küstenschutzbudgets aus (ca. 70 %). Bisherige Untersuchungen gehen von der signifikanten Erhöhung des Dünenerosionsvolumens mit steigendem Meeresspiegel aus (RADOST 2014), was erhebliche Kostensteigerungen zur Folge hätte und im aktuellen Bemessungsansatz nach Newe (2013) noch nicht berücksichtigt wurde – wobei Küstenschutzdünen als Verschleißbauwerke mit eingeschränkter Lebensdauer planmäßig ohne Vorsorgemaß auf den Referenzhochwasserstand (RHW) bemessen werden (vgl. Unterabschnitt 2.3). Als Grundlage für die technische Planung liegt ein Sedimentmanagementkonzept vor, das Maßnahmen bis zum Jahr 2036 berücksichtigt (Siewert u. a. 2024); gegenwärtig sind etwa 150 Mio. m^3 mariner Sande in der vorgelagerten Ostsee industriell für den Küstenschutz des Landes Mecklenburg-Vorpommern verfügbar, und an der Erweiterung der Vorratsmengen wird kontinuierlich gearbeitet. Die grundsätzliche – und weiterhin offene – Frage ist die des zunehmenden Sedimentbedarfs infolge des sich beschleunigenden Meeresspiegelanstiegs.



Abbildung 1: Größte bisherige Wiederholungsaufspülung in der Geschichte Mecklenburg-Vorpommerns bei Prerow im Oktober 2023

Vor dem Hintergrund dieser Herausforderungen und Forschungsbedarfe wurde das Verbundvorhaben ResCAD – *Resistance and Climate Adaption of Dune Systems* – konzipiert. Es zielt darauf ab, über einen Planungshorizont bis 2100 den Bemessungs- und Erhaltungsprozess für Küstenschutzdünen mit datenbasierten, anwendungsfreundlichen Werkzeugen für Behörden und Planungsverantwortliche zu verbessern. Wesentlich ist dabei auch der Beitrag zu einem umfassenden Prozessverständnis des zahlreichen Faktoren unterworfenen Dünenerosionsverhaltens unter aktuellen und zukünftigen Bedingungen. Mit zeitgemäßen, numerisch-statistischen Methoden wird die aktuelle Bemessungspraxis auf ihre Anwendbarkeit im Hinblick auf den sich beschleunigenden Meeresspiegelanstieg untersucht und bewertet. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag nicht in der langfristigen

Entwicklung der Küstenlinie oder des Küstenquerprofils, sondern auf der Widerstandsfähigkeit aktueller und zukünftig anzunehmender Küsten-Topobathymetrien gegenüber Extremereignissen in der Skala und Dauer von statistisch hergeleiteten und projizierten extremen Sturmhochwassern.

1.2. Methodik und Struktur

Das Verbundvorhaben ResCAD (Resistance and Climate Adaptation of Dune Systems) kombiniert einen statistischen Sturmhochwassergenerator für die Ostsee mit lokalen hydro-morphodynamischen Küstenerosionsmodellen in 1D oder 2DH (tiefengemitteltes, horizontales 2D-Berechnungsnetz) mit Hilfe der numerischen Softwareanwendung XBeach (Deltares 2023). ResCAD gliedert sich in zwei Teilprojekte (A & B), wobei sich ResCAD B (Hochschule RheinMain) der hydrodynamischen und statistischen Analyse mittels großskaliger Modelle widmet und ResCAD A (TU Dresden, Verbundkoordination) die dadurch bereitgestellten hydrodynamischen Randbedingungen für konsistente, prozess-basierte hydro-morphodynamische Dünenerosionsmodelle nutzen kann. Die Ergebnisse wurden zur Entwicklung des Statistisches Dünenerosionsmodell (SDM) in ResCAD B verwendet. Die Abbildung 2 dient zur strukturellen Veranschaulichung des Projektablaufs, der Modellkette, des Datenflusses sowie der Arbeitspakete.

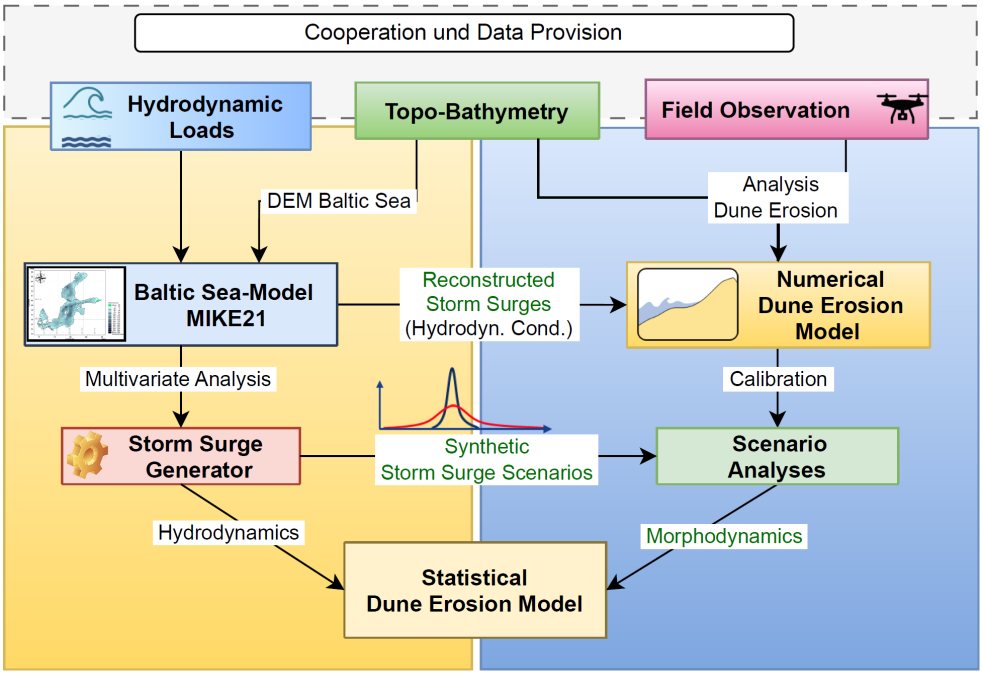


Abbildung 2: Modellkette, Datenfluss, Struktur und Arbeitsbeziehungen des Forschungsvorhabens ResCAD

Das Teilprojekt ResCAD A gliedert sich laut Projektantrag in die vier Arbeitspakete AP 3.1 bis AP 3.4 (HMN-Modellierung: Modellaufbau, Kalibrierung, Parameterraum sowie Validierung und Szenarienentwicklung). Tabelle 1 ordnet die Arbeitspakete den Kapiteln dieses Berichtes zu; zu Beginn der betreffenden Kapitel wird jeweils auf das zugehörige Arbeitspaket verwiesen.

Den zeitlichen Verlauf der Arbeitspakete im Vergleich zur Antragsplanung zeigt Abbildung 3. Die Arbeits- und Zeitplanung wurde bis auf eine kostenneutrale Verlängerung um zwei Monate (November und Dezember 2025) eingehalten, die durch den verzögerten Beginn des Teilprojektes B erforderlich wurde: Der Projektpartner wechselte zu Projektbeginn mit unverändertem Bearbeiterteam von der Universität Rostock an die Hochschule RheinMain und führte das Teilprojekt dort fort.

Tabelle 1: Arbeitspakete des Teilprojektes ResCAD A (TU Dresden) mit zugehörigen Meilensteinen laut Projektantrag und Verortung im vorliegenden Bericht

AP	Inhalt (Meilenstein)	Berichtskapitel
AP 3.1	HMN-Modellierung: Modellaufbau (M3.1)	Abschnitt 3, Abschnitt 5
AP 3.2	HMN-Modellierung: Kalibrierung (M3.2)	Abschnitt 4, Abschnitt 7
AP 3.3	HMN-Modellierung: Parameterraum (M3.3)	Unterabschnitt 5.4
AP 3.4	HMN-Modellierung: Validierung und Szenarienentwicklung (M3.4)	Abschnitt 6, Abschnitt 7

Abbildung 4 ordnet die wichtigsten Projektereignisse – Messeinsätze, das Sturmhochwasser vom Oktober 2023, die Simulationsserien sowie Projekttreffen, Sitzungen der Projektbegleitenden Gruppe und Konferenzbeiträge – chronologisch ein. Eine vollständige Übersicht der aus dem Vorhaben hervorgegangenen Veröffentlichungen, Vorträge und studentischen Arbeiten gibt Anhang A.

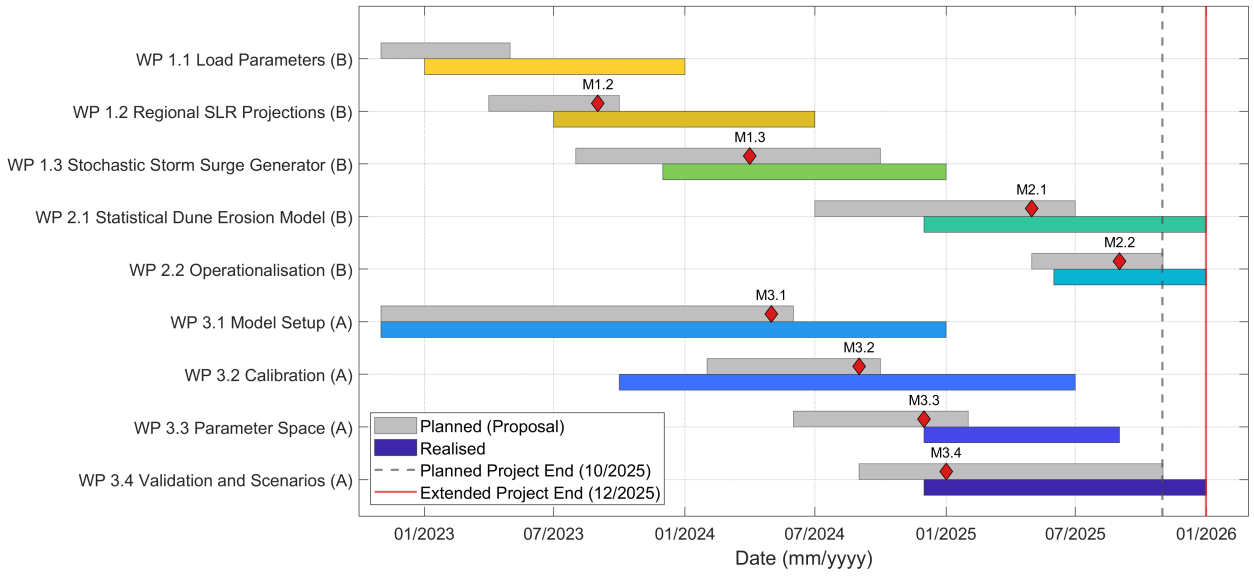


Abbildung 3: Soll-Ist-Vergleich der Arbeitspakete des Verbundvorhabens ResCAD: Antragsplanung (grau) und tatsächlicher Bearbeitungszeitraum (koloriert) mit Meilensteinen und kostenneutraler Verlängerung bis 31.12.2025

Durch die Zusammenstellung von hydraulischen Messwerten und Beobachtungen konnte eine umfassende Datenbank in ResCAD B erstellt werden. Unter Verwendung der MIKE21 - Software (DHI) konnten historische Sturmhochwasser der Ostsee mit einer hohen Genauigkeit rekonstruiert werden - so auch das im Projektzeitraum stattfindende Sturmhochwasser vom 20.-21. Oktober 2023. Damit konnte die zeitabhängige Entwicklung und Transformation des phasen-gemittelten Seegangs und die sturm-induzierte Veränderung der Wasserspiegellage über die gesamte Außenküste der südwestlichen Ostsee modelliert werden (Beckmann u. a. 2025).

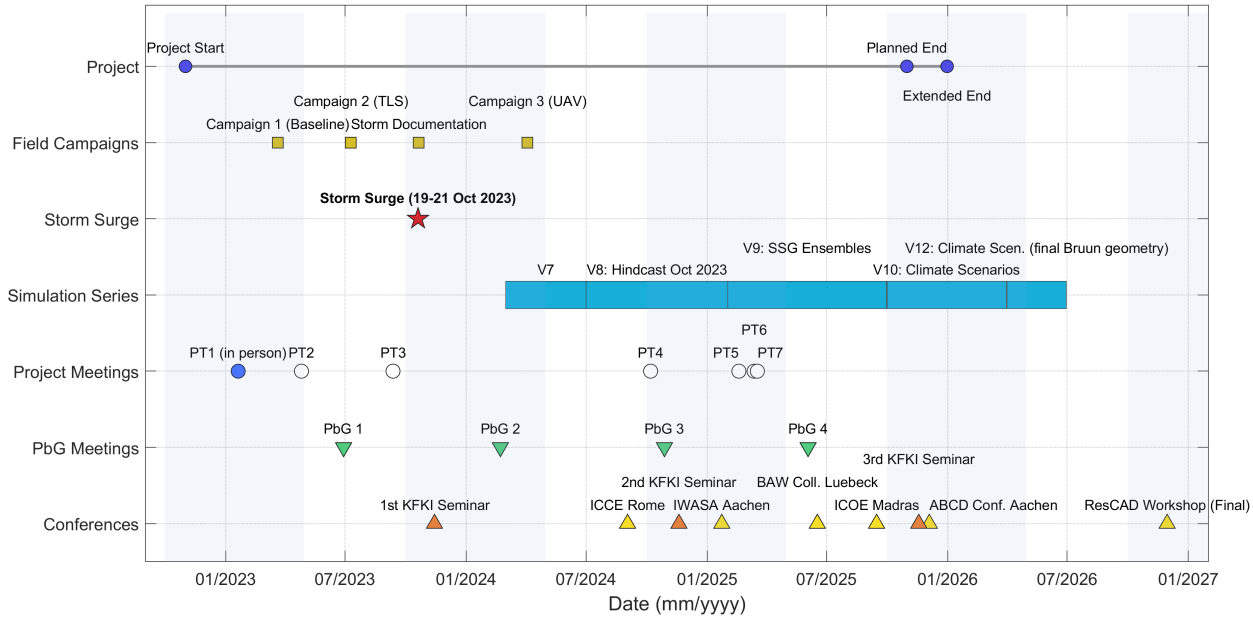


Abbildung 4: Zeitstrahl des Teilprojektes ResCAD A von 2022 bis 2026 mit Messeinsätzen, Sturmhochwasser Oktober 2023, Simulationsserien, Projekttreffen, PbG-Sitzungen und Konferenzbeiträgen (hinterlegt: Sturmflutsaisons Oktober bis April)

Auf Basis von multivariaten Analysen historischer Extremereignisse aus dem oben genannten MIKE21-Modell wurde in ResCAD B ein Stochastischer Sturmhochwassergenerator (SHG) entwickelt. Dieser liefert die hochwertigen, hydrodynamischen Eingangswerte für lokale Szenarienanalysen in einem Raster von 500 m bis 800 m Abständen in Küstenlängsrichtung. Das umfasst hochaufgelöste Zeitreihen des Wasserstandes und der Wellendynamik mit variabler Dauer, Ganglinienform und charakteristischem lokalen Seegang. Die Daten lassen sich durch ein anwenderfreundliches GUI-Werkzeug für verschiedene Küstenabschnitte und statistische Wahrscheinlichkeiten bereitstellen.

Die lokalen Dünenerosionsmodelle auf Grundlage von XBeach wurden in 1D und 2DH für den Küstenabschnitt Ahrenshoop kalibriert. Dabei sind aktuelle Messreihen der Topobathymetrie sowie der hydraulischen Randbedingungen vor und nach dem mittelschweren Sturmhochwasser im Oktober 2023 berücksichtigt worden (ResCAD A). Jedes hydraulische Szenario aus dem SHG, ob historisch oder synthetisch, wurde in ein lokales, wellengruppenauflösendes XBeach-Modell (Surfbeat-Modus, vgl. Unterabschnitt 2.5) übertragen, wobei topografische, bathymetrische und morphologische Eingangsdaten in den Aufbau des Modells integriert wurden. Durch einen umfangreichen, semi-automatisierten Prozess konnte der Einfluss von variierenden Eingangs- und Randbedingungen für ganze Szenarien-Ensembles analysiert und somit die Möglichkeiten der Bemessung und des Managements von Küstenschutzdünen deutlich erweitert werden. Damit wurde es möglich, auch statistisch konsistente Analysen zum Einfluss von zukünftigen Extremereignissen im Zusammenhang mit dem durch die Klimaerwärmung steigenden Meeresspiegel durchzuführen. Die 2DH-Modellierung quantifiziert darüber hinaus erstmals die küstenparallele Variabilität der Dünenerosion im Untersuchungsgebiet – ein für die Einordnung profilbezogener Bemessungswerte wesentlicher Befund (vgl. Unterabschnitt 5.5). XB-Simulationsergebnisse bis Simulations-Ensemble V9_10b (Unterabschnitt 6.1) konnten für die Entwicklung des SDM in ResCAD B berücksichtigt werden.

In ResCAD A wurde als anwendungsorientiertes Kernprodukt für den Praxistransfer aus den relevanten Simulationsensembles ein datenbasiertes Metamodell zur Dünenentwicklung (MDE) in drei Modulen abgeleitet – ein mit Regressionsverfahren des maschinellen Lernens trainiertes Ersatzmodell, das die Ergebnisse des prozessbasierten numerischen Modells in geschlossene, unmittelbar anwendbare Näherungsformeln überführt: Modul 1 basiert auf synthetischen SHG-Szenarien am linearen StALU-Standardprofil (2DH, Küstenkilometer (KKM) F181.495), Modul 2 auf der Hindcast-Modellierung von 83 historischen Sturmhochwassern der Jahre 1941 bis 2023 am Bruun-Standardprofil (2DH, KKM F181.495) und Modul 3 auf der geometrisch-klimatischen Variation standardisierter Bruun-Profile unter RHW-Randbedingungen für projizierte Meeresspiegel (1D, KKM F180.715). Während die Module 1 und 2 das Dünenerosionsvolumen aus den hydraulischen Kennwerten eines Ereignisses prognostizieren (vgl. Unterabschnitt 7.3), liefert Modul 3 geschlossene Bemessungsformeln in Abhängigkeit von Dünengeometrie und Meeresspiegelanstieg (vgl. Unterabschnitt 6.6). Die Überführung der drei Module in ein frei zugängliches Anwendungswerkzeug ist vorgesehen (vgl. Unterabschnitt 9.2). Im Gegensatz zum statistischen Dünenerosionsmodell aus ResCAD B stehen hier die Klimaanpassung, die sich mit dem Mean Sea Level Rise (MSLR) verändernde Geometrie der Düne und die exakte, anwendungsbezogene Wahl der numerischen Datengrundlage im Fokus; das MDE ist als praxisbezogene Transfermethode zur Verwertung der umfangreichen Ergebnisse der numerischen Szenarienentwicklung (AP 3.4) in der Verantwortung von ResCAD A entstanden.

Die Grundlage für Annahmen zum ΔMSL bildete einerseits das Klimavorsorgemaß des Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt - Mittleres Mecklenburg (StALU MM) (ΔMSL = 1.0 m), vgl. Abschnitt 2.3, aber auch die aktuellen Klimaszenarien des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Ab dem 6. IPCC-Klimastatusbericht wird ein Klimaszenario als Shared Socioeconomic Pathway (SSP) definiert (IPCC 2023). Der lokale Meeresspiegelanstieg unterscheidet sich vom globalen MSLR aufgrund von Landhebungen oder Absenkungen, hydraulischen Einflüssen, Veränderungen des Gravitationsfeldes oder auch den chemisch-thermischen Eigenschaften. Dies trifft insbesondere auf die Ostsee zu, welche stark eiszeitlich beeinflusst wurde, eine geringe mittlere Wassertiefe aufweist (52 m) und lediglich schmale Verbindungen zum Ozean besitzt. Die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel von 2008 (DAS) beinhaltet u. a. die Pflege eines Basisdienstes. Darüber konnten lokale Projektionen des MSLR in Abhängigkeit der SSP's bezogen werden.

Entscheidend für den Projekterfolg sind relevante morphologische Messdaten in ausreichender räumlicher als auch zeitlicher Auflösung (z. B. vor oder nach betrachteten Extremereignissen). Ein Zeitstrahl in Abbildung 5 gliedert die wichtigsten morphologischen Datensätze im Untersuchungsgebiet, die sich wie folgt zusammensetzen:

- Drohnenbefliegung (LiDAR + Photogrammetrie), engl. Unmanned Airial Vehicle (UAV)
- Luftgestützte LiDAR-Vermessung (Flugzeug), engl. Airborne Laser Scanning (ALS)
- Stationäre Laservermessung mittels Terrestrial Laser Scanning (TLS)
- Satellitengestützte Bathymetrie-Vermessung durch EOMAP GmbH & Co KG- Earth Observation and Mapping, `https://eomap.com/` (EOMAP)
- Manuelle Punktmessung für Küstenquerprofile mit Hilfe des Global Navigation Satellite System (GNS)
- Photogrammetrie Photogrammetrie (PG) aus Kameraaufnahmen.

In der Regel wird die geodätische Höhe in m Normalhöhennull des Deutschen Haupthöhennetzes seit 1993 (DHHN 2016) (NHN) angegeben, bzw. auf diese Höhe umgerechnet.

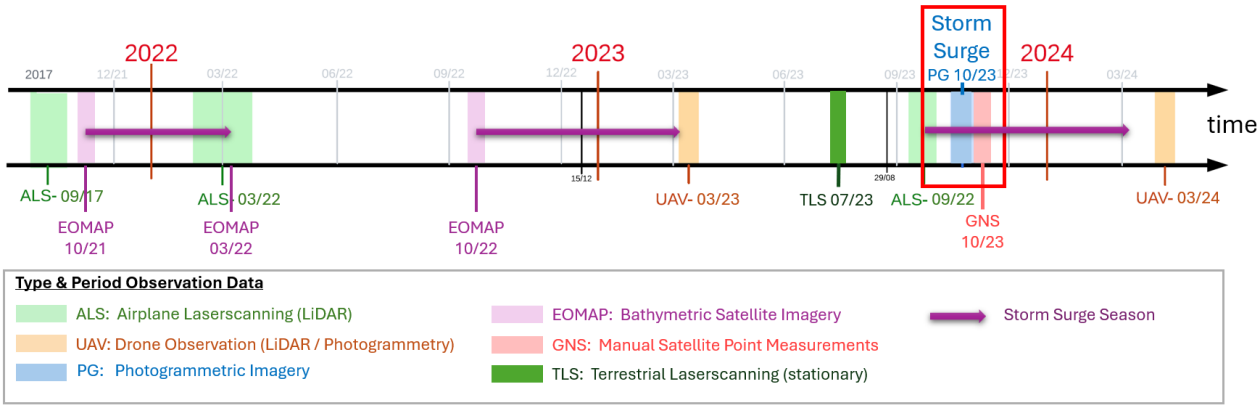


Abbildung 5: Zeitstrahl berücksichtigter, morphologischer Datensätze (ALS, UAV, EOMAP, TLS, GNS, PG) inklusive Kennzeichnung Sturmsaison und des Oktobersturmhochwassers 2023

Außerdem wurden historische Profildaten aus dem Teilautomatisiertes Dünenkataster (TADK) verwendet und beginnend ab 2013 bis 2023 analysiert. So war es beispielsweise möglich, die Spannweiten der Dünenparameter für die Szenarienentwicklung zu ermitteln und die Intensität historischer Sturmhochwasser anhand von Messdaten einzuordnen. Der Vorteil liegt darin, vorhandene hydraulische Zeitreihen mit dem tatsächlich aufgetretenen Dünenerosionsvolumen vergleichen zu können. Dies gilt unter der Annahme, dass die Messreihen eine zeitlich und lokal ausreichende Auflösung liefern. In den überwiegenden Fällen kann dies ausschließlich für oberflächliche Messungen gewährleistet werden, da unter der Wasseroberfläche kaum morphologische Zeitreihen bereitgestellt wurden.

Projektbegleitend erfolgte die Aufnahme von Naturdaten durch das IWD in 2023 und 2024. Unter Einsatz verschiedener Methoden konnten geotechnische, meteorologische und morphologische Messzeitreihen gewonnen werden. Ziel war dabei vor Allem die Verifizierung vorhandener, von Dritten bereitgestellter Daten, die Erprobung innovativer Messverfahren für den Forschungszweck sowie die Dokumentation realer Prozesse im Feld unter moderaten aber auch extremen Bedingungen, wie während des Sturmhochwassers vom Oktober 2023.

2. Grundlagen

2.1. Dünenerosion bei Sturmhochwasser

Die südliche Ostseeküste ist ein mikrotidales, sturmdominiertes System, in dem episodische Sturmhochwasser die Dünenerosion steuern, während die langfristige Küstenveränderung durch persistenten Sedimenttransport und Meeresspiegelanstieg überlagert wird (Weisse u. a. 2021; Harff, Furmańczyk und Storch 2017). Chronisch erodierende Sandküsten sind ein globales Phänomen (Luijendijk u. a. 2018; Vousdoukas u. a. 2020), das sich auch in globalen Langzeitbeobachtungen aus Satellitendaten quantifizieren lässt (Mentaschi u. a. 2018); die Kliff- und Dünenküste des Untersuchungsgebietes Ahrenshoop (Fischland-Darß) zählt zu den Abschnitten Mecklenburg-Vorpommerns mit der höchsten Schutzpriorität (Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern (MLUV M-V) 2009). Zahlreiche natürliche Faktoren treten bei der Erosion von Dünen und Stränden in unterschiedlichen, gegenseitigen Wechselwirkungen zueinander auf und beeinflussen zusammen mit anthropogenen Faktoren das Erscheinungsbild des Küstenabschnitts. Die Zeit- und Raumskalen der Morphologie von Küstensystemen wurden im Rahmen des Projektes EUROSION (2004) – einer makroskaligen, europaweiten Betrachtung, in der sich regionale Verhältnisse wie die Mecklenburg-Vorpommerns lediglich generalisiert wiederfinden – grafisch aufbereitet, vgl. Abbildung 6. Je größer diese Skalen, umso komplexer ist deren Modellierung. Im Projekt ResCAD werden Wellen-induzierte Erosionsprozesse bei Sturmhochwasser, Böschungsrutschungen und der Einfluss des Meeresspiegelanstiegs berücksichtigt.

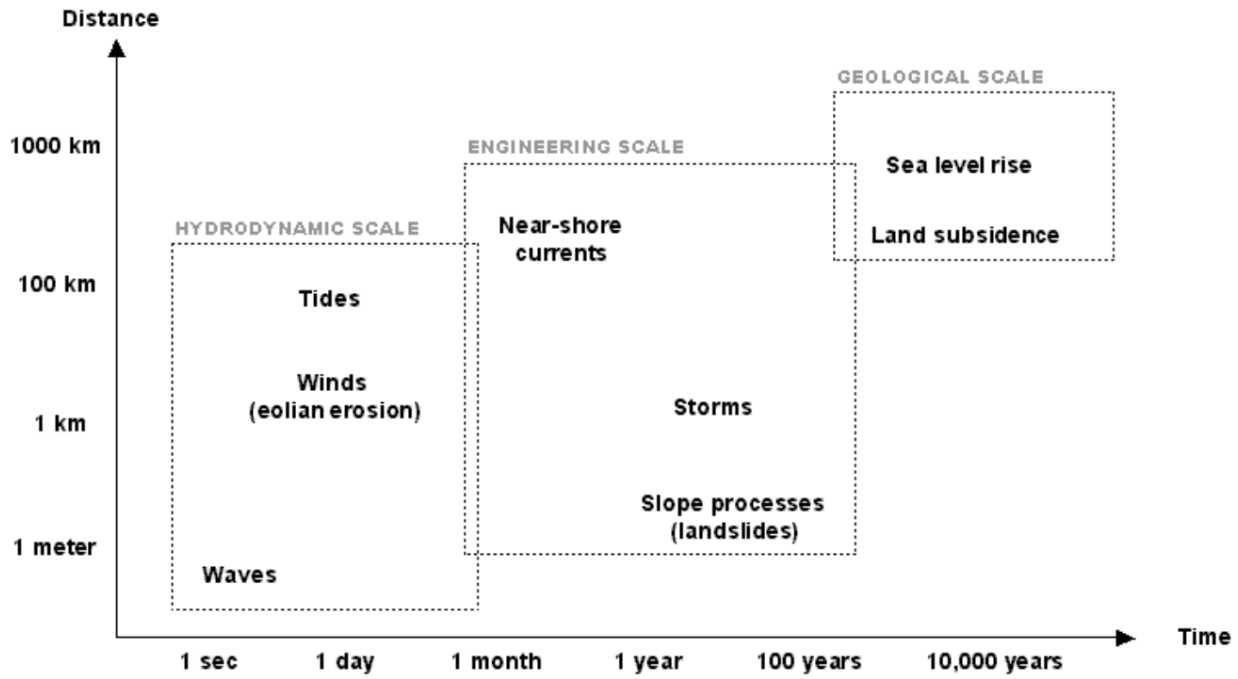


Abbildung 6: Einteilung natürlicher Faktoren von Küstenerosion in Zeit- und Raumskalen (EUROSION 2004)

Nach Sallenger (2000) wird die Intensität von Sturmhochwasser auf die Dünenerosion vorgelagerter Inseln (z. B. Darß, Halligen, etc.) in Regime eingeteilt, siehe Abbildung 7. Ist die Intensität eines Sturmhochwassers so hoch, dass der Wellenauflauf den Dünenfuß erreicht, so ist es als Kollisionsregime klassifiziert und es kommt zum Böschungsabbruch (Avalanching). Die Neigung des entstehenden Dünenkliffs ist abhängig vom Reibungswinkel ϕ, einer geotechnischen Kenngröße zur

Stabilität von Böschungen. Im SWASH-Regime sind ausschließlich Strand- oder Vorstrand betroffen. Overwash oder Inundation Regime wirken sich auch auf das Hinterland aus. Diese Regime werden in den ResCAD-Simulationen nicht berücksichtigt, da immer von Dünen ausreichender Kronenbreite und Kronenhöhe ausgegangen wird (da sonst unwirksamer Reserveteil). Über die reine Regimeeinteilung hinaus zeigen M. R. A. van Gent u. a. (2007) und M. van Gent u. a. (2008) in großmaßstäblichen Wellenkanalversuchen, dass klassische Dünenerosionsmodelle die Wellenperiode explizit berücksichtigen müssen: Bei gleicher signifikanter Wellenhöhe erzeugen langperiodische Wellen deutlich größere Erosionsvolumina als kurzperiodische – ein Befund, der sich mit der in Unterabschnitt 3.4 dokumentierten Bedeutung niederfrequenter Wellen beim Sturmhochwasser Oktober 2023 deckt.

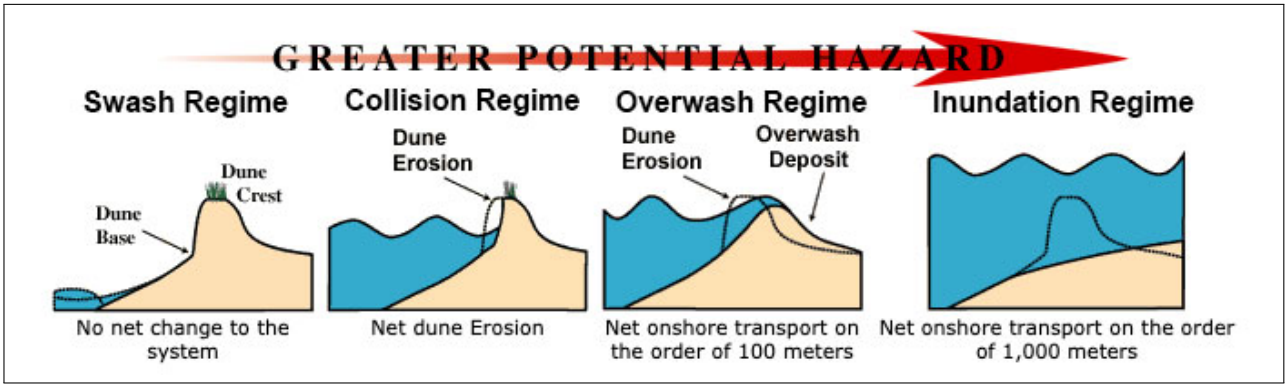


Abbildung 7: Regimeeinteilung der Sturmauswirkung auf die Dünenerosion vorgelagerter Inseln Sallenger (2000)

Für die Region stellt die Abbildung 8 die potentiellen Überflutungsflächen (ohne wirksamen Küstenschutz) einer sehr schweren Sturmflut mit einem Wasserstand > 2.00 m NHN und die bisherige, mittlere Uferlinienverlagerung in m/100 Jahre dar. Im Modellgebiet bei Ahrenshoop würde sich ohne Erhaltungsmaßnahmen, wie Sandaufspülungen, ein Küstenrückgang von -60 m/100 Jahre ergeben.

Wichtig für die Analyse, aber auch für die Wahl der richtigen Modellparameter ist die sogenannte Depth of Closure (DoC) nach Hallermeier (1981), welche die vertikale Tiefe der hydromorphodynamisch aktiven Zone darstellt. Bis dorthin wirkt sich die Wellenbelastung und der dadurch induzierte Sedimenttransport aus. Die Gleichung 1 ist wie folgt angegeben:

$$\mathrm{DoC} = 2.28 * H_{12h/y} - 68.5 * \frac{H^2_{12h/y}}{g * T^2_{12h/y}} \tag{1}$$

Dabei bezeichnet $H_{12h/y}$ die effektive (signifikante) Wellenhöhe, welche in 12h pro Jahr überschritten wird (Überschreitungswahrscheinlichkeit = 0.137%). Dies entspricht einer Jährlichkeit $T(a)$ von 2 Jahren. $T^2_{12h/y}$ beschreibt die assoziierte Wellenperiode. Stehen geeignete Wellenstatistiken lokal zur Verfügung, kann so die DoC bestimmt werden. Für die Ostsee haben Soomere, Viška und Eelsalu (2013) die räumliche Variation der Wellenbelastung und der daraus resultierenden DoC entlang der Küste dokumentiert und damit die starke Standortabhängigkeit dieser Kenngröße gezeigt.



Abbildung 8: Potentielle Überflutungsflächen bei Eintritt von sehr schweren Sturmfluten (hellrot, Wasserstand $>$ 2.00 mNHN) und erosionsgefährdete Küstenabschnitte mit Angabe der beobachteten mittleren Uferlinienverlagerung in m/100 Jahre (dunkelrot, negative Werte = Küstenrückgang) (Weichbrodt u. a. 2013)

2.2. Küstenschutzdünen der Ostsee

Erste Regelwerke zum Dünenbau an der südlichen Ostseeküste entstanden bereits im 19. Jahrhundert und dienten neben dem Küstenschutz auch der Landgewinnung durch Reduzierung der Strandflächen (Krause 2013). Heute ist für die Grundlagenarbeit im Küstenschutz und damit auch für die Küstenschutzdünen das StALU MM verantwortlich. Einen Regelquerschnitt veranschaulicht die Abbildung 9.

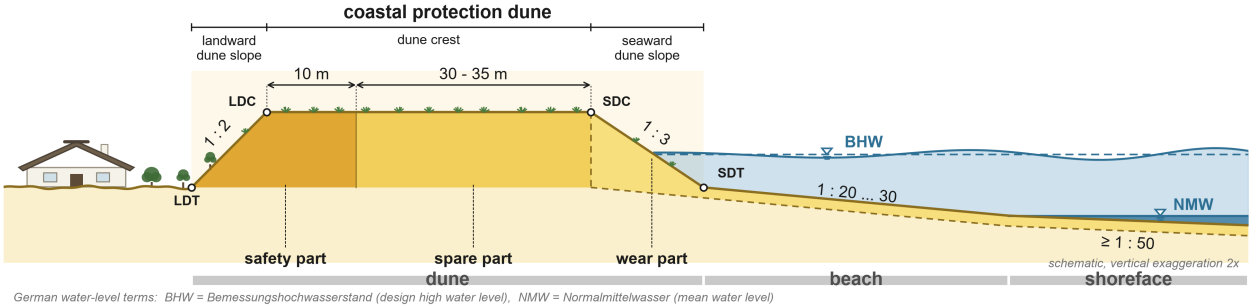


Abbildung 9: Gegliedertes Standardprofil einer Vollschutzdüne nach aktuellem Regelwerk mit Sicherheits-, Reserve- und Verschleißteil (engl. safety/spare/wear part) sowie einer Kronenbreite von 30 bis 35 m (eigene Darstellung nach einer Vorlage des StALU MM, 2026). Die charakteristischen Punkte sind englisch beschriftet: Landward Dune Toe (landseitige Dünenunterkante, LDUK) (LDT), Landward Dune Crest (landseitige Dünenoberkante, LDOK) (LDC), Seaward Dune Crest (seewärtige Dünenoberkante, SDOK; entspricht der Dünenkrone D_C) (SDC) und Seaward Dune Toe (seewärtige Dünenunterkante, SDUK; entspricht dem Dünenfuß D_T) (SDT)

2.3. Bemessung und Erhaltungsmanagement

Für die Bemessung von Küstenschutzbauwerken und der Klimamodellierung ist die Kenntnis der örtlichen Referenz- und Bemessungshochwasserstände wichtig. Dies sind:

- Pegelnullpunkt (absoluter Referenzwert) eines Pegels bezogen auf DHHN 2016 (PNP)
- Bemessungshochwasserstand (BHW)
- Referenzhochwasserstand (RHW)
- Max. Hochwasserstand für Referenzperiode (HW)
- Mittlerer Hochwasserstand (MHW)
- Mittlerer Niedrigwasserstand (MNW)
- Mittlerer Meeresspiegel (MW)
- Min. Niedrigwasserstand für Referenzperiode (NW)

In der Abbildung 10 ist die Herleitung des Referenzhochwasserstandes RHW als Funktion aus dem HW_{200} (Eintrittswahrscheinlichkeit $p = 0.005$) und dem MSLR veranschaulicht. Ausgehend von einem Beobachtungszeitraum (t_0 bis t_1) und Einbeziehung eines Überprüfungszeitraumes (t_1 bis t_2) wird der zu berücksichtigende MSLR ermittelt (RKMV 2022b). Der BHW ergibt sich seit dem Bemessungskonzept von 2022 aus dem RHW zuzüglich eines Vorsorgemaßes von 1,00 m für einen Zeitraum von 100 Jahren ab Planungszeitpunkt; das bundesweit einheitliche Vorsorgemaß (RKMV 2022a) ersetzt den zuvor angesetzten Klimazuschlag von 0,50 m/100 Jahre. Da es sich im Gegensatz zu Deichen bei Küstenschutzdünen (Vollschutz) um Verschleißbauwerke handelt, ist nach RKMV (2022a) zu prüfen, ob ein Vorsorgemaß zielführend ist – die funktionelle Bemessung der Dünen erfolgt daher auf RHW (ohne Vorsorgemaß).

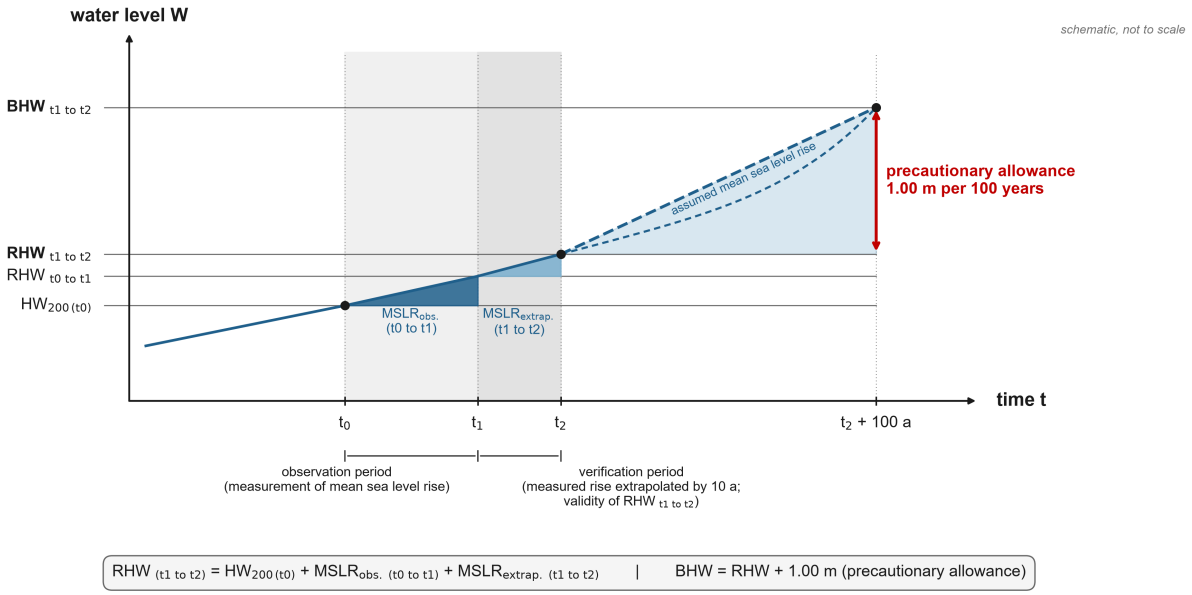


Abbildung 10: Herleitung von Referenzhochwasserstand RHW und Bemessungshochwasserstand BHW für die funktionelle bzw. konstruktive Bemessung von Küstenschutzbauwerken mit dem seit 2022 geltenden Vorsorgemaß von 1,00 m/100 Jahre (eigene Darstellung nach RKMV 2022b)

Die Erhaltung der Küstenschutzdünen wird in Mecklenburg-Vorpommern durch ein regelmäßiges Monitoring begleitet; für das Untersuchungsgebiet Ahrenshoop liegen die Profildaten des TADK des StALU MM vor (2012 – 2022). Die volumetrische Auswertung dieser Zeitreihen – einschließlich der Quantifizierung des verfügbaren Dünenvolumens V_D über MHW und des Einflusses der Sturmhochwasser – erfolgt in Abschnitt 4.

Die funktionelle Bemessung der Landesküstenschutzdünen in Mecklenburg-Vorpommern erfolgt derzeit mit dem numerischen Querprofilmodell *NewDune* (Newe und Dette 2004; Newe 2005; Newe 2013), einer Weiterentwicklung des Dünenerosionsmodells EDUNE nach Kriebel (1986). Das Verfahren beruht auf dem Konzept des gestörten Gleichgewichtsprofils nach Dean (1977) in der Form $h = A \cdot x^{2/3}$: Bei erhöhtem Wasserstand liegt das Strandprofil nicht mehr im Gleichgewicht mit der lokalen Wellenenergiedissipation, und der küstenquergerichtete Sedimenttransport q wird proportional zur Abweichung der tatsächlichen Energiedissipation D vom Gleichgewichtswert D_{GP} angesetzt ($q = K_K \cdot (D - D_{GP})$). Für die landesweite Anwendung werden seit 2004 einheitliche Grundeinstellungen verwendet: der Profilparameter $A = 0{,}13\ \mathrm{m}^{1/3}$ (entsprechend einem küstenweit einheitlichen Korndurchmesser von $D_{50} = 0{,}30$ mm), der Transportkoeffizient $K_K = 2 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{m}^4/\mathrm{N}$, die Strandneigung $\tan\beta = 0{,}05$ sowie die Neigung der Abbruchkante $\tan\delta = 1{,}0$.

Die hydraulische Belastung wird nicht aus gekoppelten Seegangsmodellen, sondern über eine empirische Beziehung aus dem Wasserstand abgeleitet: Die signifikante Wellenhöhe folgt aus $H_{m0} = 0{,}75 + 0{,}91 \cdot W$ (mit dem Windstau W; kalibriert am Sturmhochwasser vom November 1995), die mittlere Wellenperiode aus $T_m = 3{,}5 \cdot H_{m0}$; der Wellenangriff wird küstennormal angesetzt. Als Bemessungsganglinie dient eine standardisierte Ganglinienform mit 45 Stunden Gesamtdauer („Form 4“), die sich in Voruntersuchungen trotz ihres vergleichsweise niedrigen Scheitels als maßgebend erwiesen hat – ein Beleg dafür, dass neben dem Scheitelwasserstand vor allem die Verweilzeit erhöhter Wasserstände das Erosionsvolumen steuert (Newe 2013). Das Bemessungsprofil ähnelt dem gegliederten Standardprofil aus Abbildung 9: Die Dünenneigung beträgt konstant $m_D = 1{:}3$, der obere Strand wird mit $m_B = 1{:}20$ bzw. 1:40 und der untere Strand mit $m_{uB} = 1{:}100$ geneigt angesetzt; die Grenze zwischen oberem und unterem Strand liegt auf Höhe MW bzw. NW (D_{Bz}).

Die erforderliche Dünenbreite (Solldüne) ergibt sich aus dem berechneten Rückgang der Dünenoberkante zuzüglich eines Sicherheitsstreifens b_{ST} (10 m bei Vollschutzdünen, entfällt bei Systemschutzdünen) sowie – im Lastfall HW_{200} – eines Verschleißzuschlags, der die mittlere jährliche Zehrung zwischen zwei Wiederholungsaufspülungen abdeckt (bis zu 15 $\mathrm{m}^3/(\mathrm{m\,a})$). Bei der Neubemessung der Landesküstenschutzdünen wurden auf dieser Grundlage 42 Küstenabschnitte mit rund 1300 Kombinationen aus Geometrie- und Belastungsparametern untersucht; die berechneten Rückgänge liegen zwischen 13,8 und 46,4 m (Newe 2013). Tabelle 2 zeigt die Vergleichswerte für den Küstenbereich des Untersuchungsgebietes (KKM F181.300 bis F185.200) bei einer Dünenfußhöhe von 2,0 m NHN – ergänzt um den mit dem MDE-Modul 3 dieses Vorhabens berechneten Kronenrückgang für das Bemessungsereignis RHW (vgl. Unterabschnitt 6.6 sowie die vergleichende Einordnung in Unterabschnitt 8.3).

In späteren Untersuchungen wurde der Ansatz um korngrößenabhängig optimierte Strandneigungen erweitert, wodurch sich die berechneten Rückgänge um etwa 10 % reduzieren (Newe 2018). Die Verifizierung an den Sturmhochwassern vom Januar 2017 und Januar 2019 ergab eine insgesamt gute Reproduktion der Erosionsflächen, jedoch eine systematische Überschätzung des Rückgangs der Dünenfront um etwa 2 m; für die gröberen Strandsande erwiesen sich steilere Strandneigungen ($\tan\beta = 0{,}07$ bis 0,09) als geeigneter, und an einzelnen Standorten wurden Abbruchkantenneigungen bis $\tan\delta = 1{,}95$ beobachtet (Newe 2019) – konsistent zu den in diesem Vorhaben dokumentierten

Tabelle 2: Vergleichswerte des Bemessungsansatzes nach Newe (2013) für den Küstenbereich KKM F181.300 bis F185.200 (Dünenfußhöhe D_{Tz} = 2,0 m NHN) und Gegenüberstellung mit dem Kronenrückgang nach Gleichung (19) des MDE-Moduls 3 (RHW, ΔMSL = 0, KKM F180.715)

Kronenhöhe $D_{Cz,ini}$ in *m* NHN	**3.5**	**4.0**	**4.5**	**5.0**	**5.5**
Bemessungsansatz nach Newe (2013), Werte in m					
Rückgang ΔD_{Cx} (HW_{200})	17.2	13.5	11.0	9.0	7.5
Erf. Dünenbreite b_D (HW_{200} + 150 m^3 Verschleißzuschlag)	60.0	51.1	44.2	39.0	34.6
Rückgang ΔD_{Cx} = erf. Dünenbreite b_D (BHW, ohne Verschleißzuschlag und b_{ST})	36.0	31.3	27.4	24.6	21.3
MDE-Modul 3 (ResCAD), Werte in m					
Rückgang ΔD_{Cx} (RHW)	19.1	15.1	11.8	9.2	7.2

mittleren Abbruchwinkeln von 67,3° nach dem Sturmhochwasser vom Oktober 2023 (vgl. Unterabschnitt 3.4).

Neben prozessbasierten numerischen Modellen haben sich in den letzten Jahren datengetriebene Ersatzmodelle (engl. *surrogate models*) etabliert, die auf Ensembles numerischer Simulationen trainiert werden und die Sturmreaktion von Dünen ohne erneute numerische Simulation prognostizieren – etwa neuronale Metamodelle (Athanasiou u. a. 2022) oder Bayes-Netze (Plant und Stockdon 2012; Garzon, O. Ferreira u. a. 2024). Regressionsbasierte Varianten dieser Modellklasse – Verfahren des überwachten maschinellen Lernens – liefern darüber hinaus geschlossene, physikalisch interpretierbare Bemessungsformeln. Auf diesem Prinzip beruht das in diesem Vorhaben entwickelte MDE (vgl. Unterabschnitt 6.6 und Unterabschnitt 7.3). Für die Bemessung ist dabei die Unterscheidung zweier Kriterien wesentlich: Je nach örtlicher Situation ist entweder das vorzuhaltende Dünenvolumen (Verschleißreserve) oder die tolerierbare Rückverlegung der Düne (horizontaler Rückgang der Dünenkrone) maßgebend – letzteres insbesondere dort, wo landwärts der Düne aufgrund von Bebauung oder Schutzgebieten kein Anpassungsraum zur Verfügung steht. Aus dem jeweils maßgebenden Kriterium lassen sich Pessimalprofile ableiten, d. h. gerade noch zulässige Kombinationen aus Kronenhöhe, Dünenfußhöhe und Profilform für ein vorgegebenes Bemessungsereignis. Anschaulich entspricht ein Pessimalprofil damit dem Zustand, in dem Verschleiß- und Reserveteil der Vollschutzdüne durch das Bemessungsereignis gerade aufgezehrt würden, während der Sicherheitsteil unangetastet bleibt.

2.4. Klimaanpassungsstrategie

Seit 1900 ist der globale Meeresspiegel um ca. 1,3 mm/a gestiegen und damit stärker als in den 3000 Jahren zuvor. Für den Küstenschutz sind jedoch regionale Projektionen und historische Veränderungen ausschlaggebend, da sich verschiedene Prozesse (z. B. vertikale Bewegung der Landmassen oder Temperaturausdehnung) überlagern, sich ausgleichen oder verstärken können. Die Ergebnisse des Projektes AMSeL-Ostsee zeigen für die Ostsee in den letzten Jahrzehnten beschleunigte Raten von 3,2 mm/a (Dangendorf 2017). Neben technischen Erhaltungsmaßnahmen kann auch das natürliche Aufwachsen von Vordünen zum Schutzniveau beitragen; Mehrtens, Lojek u. a. (2023)

quantifizierten dieses Wachstum und das zugehörige Sturmflutschutz-Potential beispielhaft für die Halbinsel Eiderstedt.

Für Nordseedeiche wurde eine Studie zur Veränderung des Wellenklimas mit steigendem Mean Sea LeveL (MSL) von Arns u. a. (2017) durchgeführt. Die Abbildung 11 zeigt skizzenhaft die durch den MSLR hervorgerufene Veränderung der auflaufenden Welle. Die Diagramme b - d veranschaulichen die Entwicklung der Auftretenswahrscheinlichkeit für die mittlere Wellenperiode T_{m-10}, die signifikante Wellenhöhe H_{sig} und von Sturmfluten in Abhängigkeit der betrachteten Klimaszenarien vor dem 6. Klimastatusbericht des IPCC, sogenannten Representive Concentration Pathway (RCP)'s. Damit einher geht ein 48 - 56% höherer Wellenauflauf, die Entspannung des Tiefenkriteriums $H/d = 0.78$ (Wellen brechen näher an der Küste) sowie häufiger auftretende Extremwasserstände. Erosionsprozesse und Profilveränderungen wurden aufgrund der gehärteten Struktur von Deichen im Gegensatz zu Dünen nicht berücksichtigt.

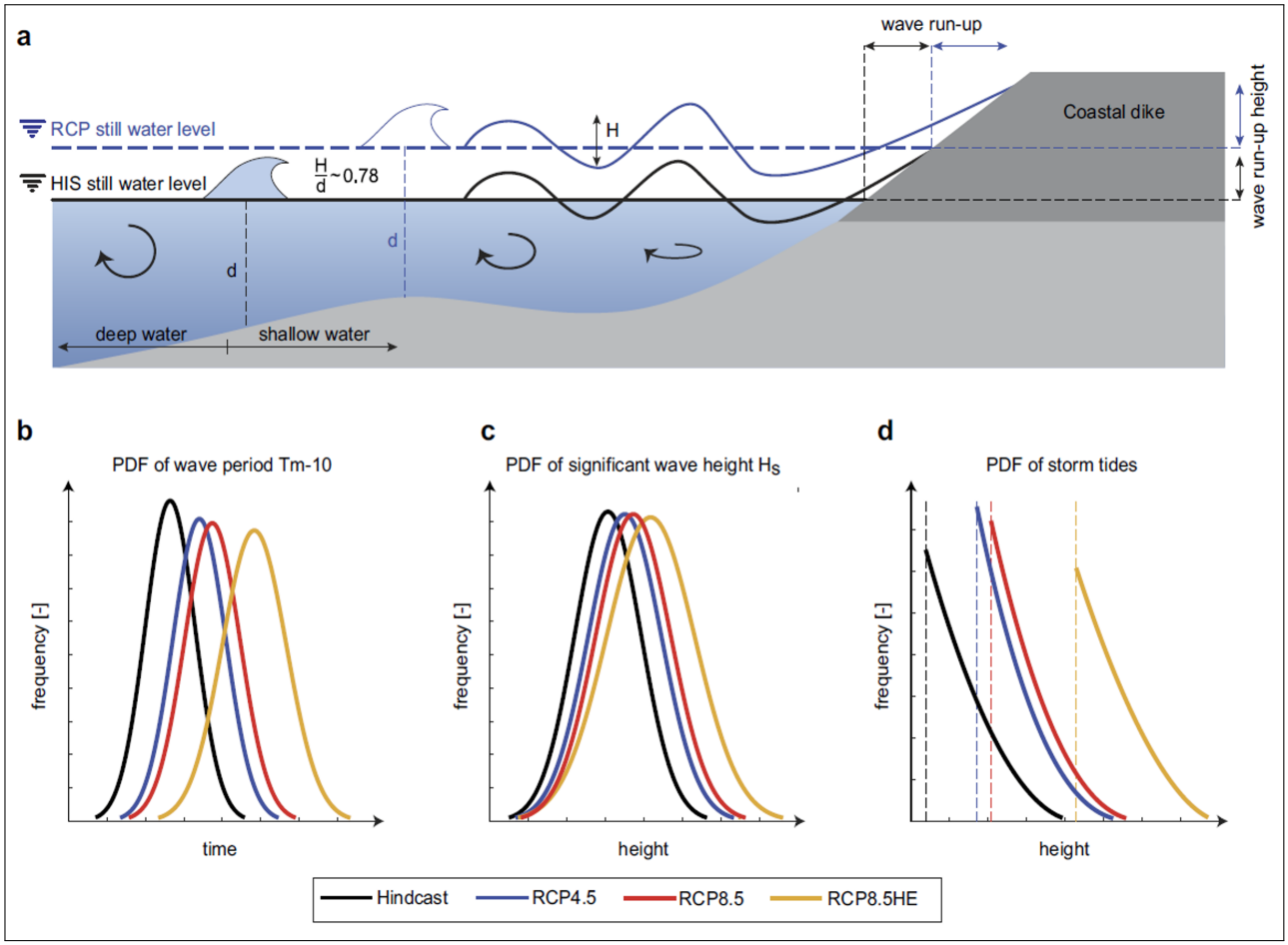


Abbildung 11: Tiefenbezogene Veränderung der Transformation einer auflaufenden Welle bei Sturmfluten in Abhängigkeit des MSLR für Küstendeiche (Arns u. a. 2017)

Mit hoher Sicherheit verändern sich jedoch die Küstenquerprofile entlang der Ostsee mit zunehmendem Meeresspiegel. Von großer Relevanz für die Simulationsergebnisse von Dünenerosionsmodellen auf Grundlage zukünftiger Sturmhochwasser ist deshalb die anzunehmende Eingangs-Bathymetrie oder das Dünenausgangsprofil. Es ist anzunehmen, dass lokal regionalplanerische Vorgaben unterschiedlich umgesetzt werden und somit verschiedene Anpassungsstrategien als Reaktion auf ΔMSL zum Tragen kommen. Je nach Anforderungen und technisch-sozioökonomischen Möglichkeiten, sind dies:

- "Hold the Line", Küstenlinie wird meist unter hohem Ressourcenbedarf gehalten - gut möglich an Küstenlinien mit positiver Sedimentbilanz bzw. erforderlich, wenn dichte, küstennahe Bebauung dies verlangt
- Küstenrückverlegung mit Landpreisgabe, bietet sich an für Bereiche ohne besonders schützenswerte Güter im Hinterland - eher geringere Spülmengen zur Anpassung eines neuen Dünenprofils nötig
- Seewärtige Verschiebung Küstenlinie - hoher frühzeitiger Aufwand, dafür wird Zeit und die Möglichkeit zur Ausbildung eines neuen Gleichgewichtsprofils gewonnen
- Technische Erhöhung des Widerstands, z. B. durch größere Korndurchmesser oder Geotextilien
- Hydraulische Reduktion der Wellenenergie, z. B. durch die Erhöhung der Wellenreflektion oder Dissipation im Vorfeld des Strandes (abgesenkte Wellenbrecher, ingenieurbiolog. Maßnahmen)

Mit dem Meeresspiegelanstieg geht gleichzeitig die Anhebung der DoC als untere Grenze des Strandprofils einher. Im Zusammenhang mit der Ausbildung eines Gleichgewichtsprofils nach Bruun (1954) mit steigendem Meeresspiegel (Bruun-Regel, Bruun 1962) wird vereinfacht die Verschiebung des Profils veranschaulicht, wie z. B. durch Lindenberg (2023) in der Abbildung 12. Durch nachträgliche Sandaufspülung kann dem so prognostizierten Küstenrückgang entgegengewirkt werden.

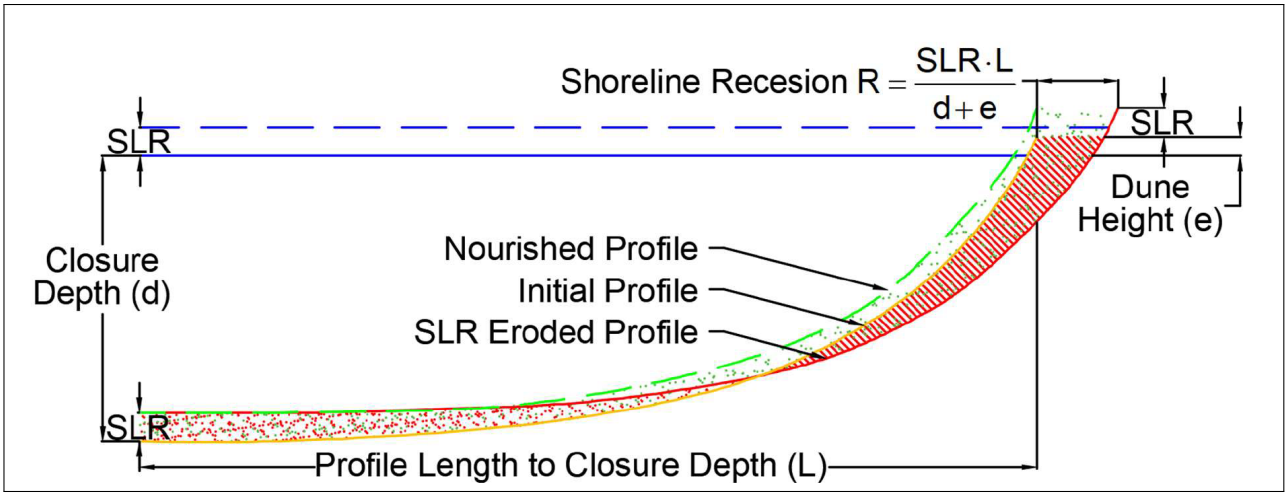
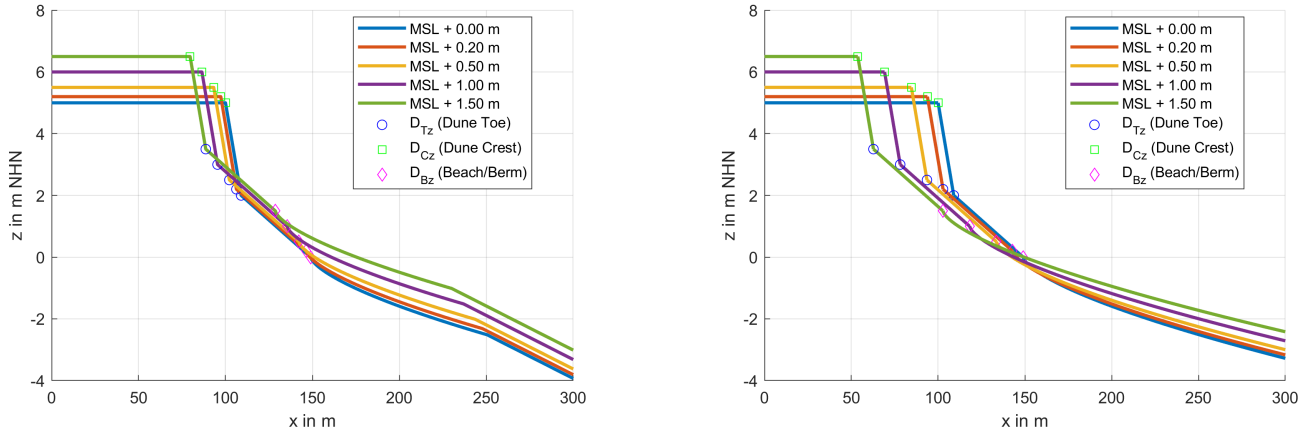


Abbildung 12: Verschiebung des Strandprofils aufgrund der Bruun-Regel (Bruun 1962; Bruun 1983), resultierende Erosion im Strand- und Dünenbereich sowie Akkumulation seewärts. Demonstration einer Sandaufspülung zur Anpassung an den MSLR (Lindenberg 2023)

Das sich mit steigendem MSL, dem mittleren Korndurchmesser D_{50} und der DoC anpassende Gleichgewichtsprofil nach Bruun (1954) und Dean (1977) kann mit einem nach den Vorgaben des StALU MM generierten Dünenprofils kombiniert werden. Je nach zugrundeliegendem Seegang verändert sich auch der Rückgang der Küstenlinie und die Verlustmenge an Sediment. Dies wird für fiktiv gewählte Meeresspiegel in der Abbildung 13 veranschaulicht. Das linke Teilbild bezieht die entsprechenden Werte des Seegangs direkt aus dem Sturmhochwassergenerator für $T(a) = 2a$.

Um die Auswirkungen verschiedener, ausgewählter Anpassungsstrategien zu veranschaulichen werden in der Tabelle 3 die Strategie „Hold the Line" und die Küstenrückverlegung nach der Bruun-Regel verglichen. Im „Hold the Line"-Szenario bleibt die Vorderkante der Dünenkrone fixiert, worauf-hin sich das seewärts gelagerte Grundniveau anheben muss. Bei der Küstenrückverlegung nach



(a) H_{sig}= 1.25m , T_p= 5.7s, DoC = 2.51m

(b) H_{sig}= 2.65m , T_p= 8.8s, DoC = 5.41m

Abbildung 13: Profilentwicklung für verschiedene Meeresspiegel unter Variation des Seegangs und der DoC nach der Bruun-Regel (Bruun 1962)

Bruun verschiebt sich das gesamte aktive Profil landwärts und wächst vertikal mit; das Ausgleichsvolumen ergibt sich hier aus der Anhebung von Düne, Strand und Teilen des Vorstrandes bis zur DoC – die in der Zusammenfassung genannten rund 100 m^3/m für das Szenario SSP5-8.5 (+0,80 m bis 2100) entsprechen der Interpolation dieser Zeile. Für beide Strategien wird in Abhängigkeit des Meeresspiegelanstiegs das nötige Ausgleichsvolumen pro m Küstenlinie ermittelt; maßgebend für die tatsächliche Menge sind darüber hinaus die Entfernung zur Küste und die Geländehöhe am Standort der neu aufzubauenden Düne.

Tabelle 3: Vergleich zum Ausgleich benötigter Sedimentmengen nach Anpassungsszenario

ΔMSL m	**"Küstenrückverlegung (Bruun)"** m^3/m	**"Hold the Line"** m^3/m	**Vergleich (Ratio)** %
MSL + 0.00	0.0	0.0	0
MSL + 0.20	28.9	91.6	31.6
MSL + 0.50	69.6	229.0	30.4
MSL + 1.00	130.2	458.0	28.4
MSL + 1.50	181.8	687.0	26.5

Es ist zu beachten, dass bei Anwendung der Bruun-Regel einige Aspekte des Meeresspiegelanstiegs unberücksichtigt bleiben. Das wären z. B. der Küstenlängstransport, der Overwash (landwärts gerichtete Sedimentumlagerung, wenn eine niedrige Düne bei hohem Seegang überströmt wird) und das äolische Wachstum durch Windtransport des Sediments. Es gilt die widerlegte Annahme, dass Sediment ausschließlich seewärts transportiert wird. Deshalb gibt es mehrere modifizierte, aber auch deutlich komplexere Varianten der Gleichgewichtsprofilermittlung für steigende MSL (Rosati, Dean und Walton 2013). Ranasinghe, Callaghan und Stive (2012) schlagen darüber hinaus einen prozessbasierten, probabilistischen Ansatz als Alternative zur Bruun-Regel vor, mit dem sich der Küstenrückgang infolge des Meeresspiegelanstiegs inklusive seiner Unsicherheiten quantifizieren lässt.

2.5. Modellierung von Sturmhochwassern mit XBeach

Die Wahl von Xbeach (XB) als HMN-Modellsystem stützt sich auf vergleichende Studien küstennaher Modellsysteme, in denen sich XBeach insbesondere für die instationäre Simulation sturminduzierter Strand- und Dünenerosion bewährt hat (Trouw u. a. 2012; Dissanayake und Winter 2020); die niederländische Wasserbaubehörde Rijkswaterstaat legt dieser Einschätzung im Rahmen des Programms *BOI Sandy Coasts* einen eigenen, umfangreichen Validierungsbericht zugrunde (Arcadis & Deltares 2022), und Abdelaal und Oumeraci (2016) geben einen Überblick zu den verschiedenen Modellierungsstrategien der Software. Erfolgreiche Anwendungen an der südlichen Ostseeküste liegen u. a. für die polnische Küste vor (Bugajny, Furmańczyk und Dudzińska-Nowak 2015); im Projekt PADO wurde XBeach bereits auf Landesschutzdünen Mecklenburg-Vorpommerns angewendet und dabei die Bedeutung der küstennahen Bathymetrie für die Erosionsprognose nachgewiesen (Schweiger u. a. 2020).

2.5.1. Module und Programmstruktur

Die Software XBeach wird am niederländischen Forschungsinstitut Deltares in Kooperation mit der TU Delft entwickelt und seit der Erstveröffentlichung durch D. Roelvink, Reniers u. a. (2009) kontinuierlich erweitert; für weiterführende Informationen wird auf das Handbuch von Deltares (2023) verwiesen. Das Programmpaket umfasst die miteinander gekoppelten Module *Wave*, *Flow*, *Sediment* und *Morphology* (Abbildung 14): Die Topo-Bathymetrie bildet die Grundlage der Wellenberechnung, aus der Welleneinwirkung, Wasserstände und Strömungen resultieren, die in das Flow-Modul einfließen. Die daraus berechneten Wasserstände und Strömungen erzeugen Sedimenttransport, der im Morphology-Modul bilanziert wird und zu einer Aktualisierung der Sohllage führt – diese wiederum wirkt auf die Wellenberechnung des nächsten Zeitschritts zurück.

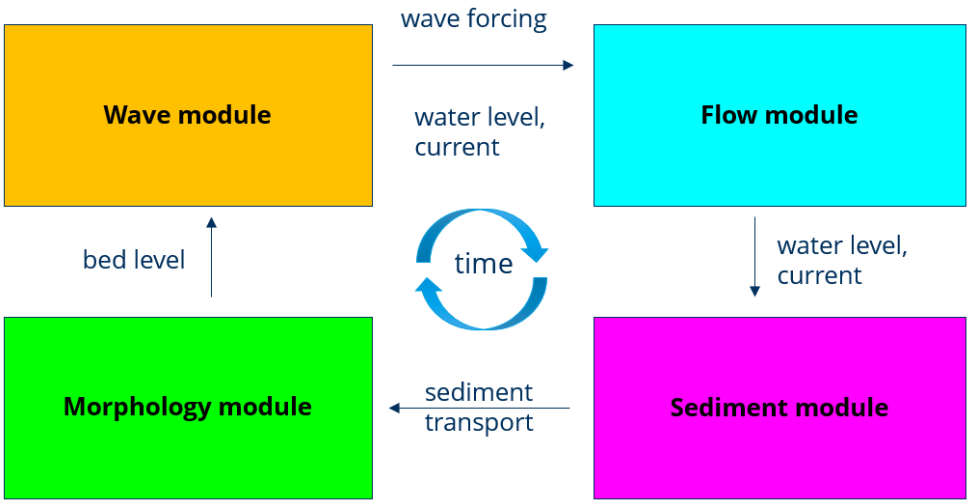


Abbildung 14: Übersicht der Module in XBeach und deren Interaktion, modifiziert nach Deltares (2023)

2.5.2. Wellenmodelle und Einsatzbereiche

XBeach wurde ursprünglich als über die kurzen Wellen gemitteltes Modell entwickelt, das Wellengruppen und die damit verbundenen langen Wellen auflösen kann. Je nach Anwendungszweck und Zeitskala stehen drei Wellenmodelle zur Auswahl (Deltares 2023):

1. *Stationäres Wellenmodell* (`wavemodel = stationary`): löst die wellengemittelten Gleichungen effizient, vernachlässigt jedoch die langen Wellen (Infragravitationswellen);
2. *Surfbeat-Modus* (instationär, `wavemodel = surfbeat`): löst die Variation der kurzen Wellen auf der Skala von Wellengruppen (Kurzwellen-Einhüllende) und die damit verbundenen langen Wellen auf;
3. *Nicht-hydrostatischer Modus* (phasenauflösend, `wavemodel = nonh`): kombiniert die nichtlinearen Flachwassergleichungen mit einem Druckkorrekturterm und modelliert Ausbreitung und Abklingen einzelner Wellen.

Der Surfbeat-Modus entfaltet seine Stärken in der Brandungs- und Wellenauflaufzone dissipativer Strände und ist damit prädestiniert für die Berechnung der Erosion von Küstenschutzdünen, bei der die langen Wellen den Sedimenttransport am Dünenfuß dominieren (D. Roelvink, Reniers u. a. 2009; Thiel de Vries 2009). Der nicht-hydrostatische Modus eignet sich für hochreflektive Küsten und hydrodynamische Detailfragen, verfügt bislang jedoch über keinen für sandige Küsten validierten Morphodynamik-Algorithmus. In ResCAD wird deshalb standardmäßig der Surfbeat-Modus verwendet. Zu beachten ist, dass alle Zeitangaben in XBeach in morphologischer Zeit erfolgen: Kommt ein morphologischer Beschleunigungsfaktor (`morfac`) zur Anwendung, werden die eingespeisten Zeitreihen intern durch diesen Faktor geteilt, sodass die Eingangsdateien in realen Zeiten verbleiben können (`morfacopt = 1`).

2.5.3. Hydrodynamik: Flachwassergleichungen und lange Wellen

Für die langen Wellen niedriger Frequenz und die gemittelten Strömungen löst das Flow-Modul die nichtlinearen, tiefengemittelten Flachwassergleichungen. Um den durch auflaufende Wellen induzierten Massenfluss und die anschließende Rückströmung zu berücksichtigen, werden diese in eine tiefengemittelte Generalized Lagrangian Mean (GLM)-Formulierung überführt (Andrews und Mcintyre 1978; Walstra, J. A. Roelvink und Groeneweg 2001). Die Impuls- und Kontinuitätsgleichungen werden dabei in Bezug auf die Lagrange'sche Geschwindigkeit u^L formuliert, die als die von einem Wasserteilchen in einer Wellenperiode zurückgelegte Strecke, geteilt durch die Periodendauer, definiert ist:

$$u^L = u^E + u^S \qquad \text{und} \qquad v^L = v^E + v^S, \tag{2}$$

wobei u^E, v^E die Euler'schen (an einem festen Punkt beobachteten, kurzwellengemittelten) Geschwindigkeiten und u^S, v^S die Stokes-Drift in x- und y-Richtung bezeichnen. Die Stokes-Drift folgt aus der auf der Wellengruppenskala variierenden Kurzwellenenergie E_w und der Wellenrichtung θ:

$$u^S = \frac{E_w \cos\theta}{\rho\, h\, c} \qquad \text{und} \qquad v^S = \frac{E_w \sin\theta}{\rho\, h\, c}. \tag{3}$$

Die resultierende GLM-Impulsgleichung lautet in küstenorthogonaler Richtung (x):

$$\frac{\partial u^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial u^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial u^L}{\partial y} - f_{cor}\, v^L - \nu_h \left(\frac{\partial^2 u^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^L}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{\tau^E_{bx}}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{F_x}{\rho h}, \tag{4}$$

analog in küstenparalleler Richtung (y); die Kontinuitätsgleichung ergibt sich zu

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (h u^L)}{\partial x} + \frac{\partial (h v^L)}{\partial y} = 0. \tag{5}$$

Dabei sind τ_{sx} die Windschubspannung, τ^E_{bx} die mit der Euler'schen Geschwindigkeit berechnete Sohlschubspannung, η der Wasserstand, F_x die durch Wellen induzierten Spannungen (radiation stress), ν_h die horizontale Viskosität und f_{cor} der Coriolis-Koeffizient (Deltares 2023).

2.5.4. Wellenenergie und Dissipation

Die Ausbreitung der kurzen Wellen wird – ähnlich dem stationären HISWA-Modell der TU Delft (Holthuijsen, Booij und Herbers 1989) – über eine zeitabhängige Wellenaktionsbilanz beschrieben, wobei die Richtungsverteilung der Aktionsdichte berücksichtigt und das Frequenzspektrum durch eine repräsentative Frequenz (spektraler Parameter $f_{m-1,0}$) dargestellt wird:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial (c_x A)}{\partial x} + \frac{\partial (c_y A)}{\partial y} + \frac{\partial (c_\theta A)}{\partial \theta} = -\frac{D_w + D_f + D_v}{\sigma}, \qquad A = \frac{S_w}{\sigma}, \tag{6}$$

mit der Wellenaktion A, der Wellenenergiedichte S_w je Richtungssektor, der intrinsischen Wellenfrequenz σ (aus der linearen Dispersionsrelation), den Ausbreitungsgeschwindigkeiten c_x, c_y, c_θ sowie den Dissipationstermen infolge Wellenbrechens (D_w), Sohlreibung (D_f) und Vegetation (D_v). Für das Wellenbrechen sind in XBeach fünf Ansätze implementiert (Tabelle 4).

Tabelle 4: In XBeach implementierte Berechnungsansätze zum Wellenbrechen (Deltares 2023)

Ansatz	Wellenmodell	Keyword
Roelvink (1993)	instationär	`roelvink1`
Roelvink (1993), erweitert	instationär	`roelvink2`
Roelvink/Daly (2010)	instationär	`roelvink_daly`
Baldock et al. (1998)	stationär	`baldock`
Janssen & Battjes (2007)	stationär	`janssen`

Im Surfbeat-Modus wird die richtungsintegrierte Dissipation standardmäßig nach J. A. Roelvink (1993) modelliert (`break = roelvink2`). Sie ergibt sich als Produkt aus dem Anteil brechender Wellen Q_b und der Dissipation je Brechereignis:

$$\bar{D}_w = \frac{2\,\alpha}{T_{rep}}\, Q_b\, E_w, \qquad Q_b = 1 - \exp\left[-\left(\frac{H_{rms}}{H_{max}}\right)^n\right], \qquad H_{max} = \gamma \cdot h, \tag{7}$$

mit dem Wellenzerfallskoeffizienten α (`alpha`), der repräsentativen Wellenperiode T_{rep}, der Wellenhöhe des quadratischen Mittels H_{rms} und dem Brecherindex γ (`gamma`). Ergänzend berücksichtigt XBeach u. a. die Dissipation durch Sohlreibung, die Energiebilanz sich überschlagender Wellen (*roller energy balance*) zur Beschreibung der Übergangszone zwischen Brechpunkt und Beginn der Brandungsströmung, die brecherinduzierte Turbulenz (relevant für das Aufwirbeln des Sediments) sowie die Entwicklung der Wellenform vom Tiefwasser zum Strand (Deltares 2023; D. Roelvink und Costas 2019).

2.5.5. Sedimenttransport und Morphodynamik

Der Sedimenttransport in der Wassersäule basiert auf der tiefenintegrierten Advektions-Diffusions-Gleichung nach Galappatti und Vreugdenhil (1985):

$$\frac{\partial (hC)}{\partial t} + \frac{\partial (hC\,u^E)}{\partial x} + \frac{\partial (hC\,v^E)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left[D_h h \frac{\partial C}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[D_h h \frac{\partial C}{\partial y}\right] = \frac{h\,C_{eq} - h\,C}{T_s}, \tag{8}$$

mit der tiefengemittelten Sedimentkonzentration C, dem Diffusionskoeffizienten D_h und der Gleichgewichtskonzentration C_{eq}. Der Quell-/Senkenterm auf der rechten Seite (*pick-up function*) beschreibt den Konzentrationsaustausch mit der Sohle; T_s ist die Adaptionszeit in Abhängigkeit von lokaler Wassertiefe und Sinkgeschwindigkeit des Sediments. Transport entlang der Sohle und in Suspension werden getrennt bilanziert; die Gleichgewichtskonzentration wird standardmäßig nach dem Ansatz von Van Thiel–Van Rijn ermittelt (Thiel de Vries 2009; Deltares 2023). Da die Wellenenergie im Surfbeat-Modus über die kurzen Wellen gemittelt wird, geht die Wellenform nicht direkt in den Transport ein. Der küstenwärts gerichtete Transportanteil infolge Wellensteilheit und -asymmetrie wird deshalb über die Kalibrierfaktoren `facSk` und `facAs` (bzw. zusammengefasst `facua`) in der Advektionsgeschwindigkeit des Sediments parametrisiert – einer der wichtigsten Kalibrierparameter des Modells (vgl. Unterabschnitt 5.4).

Die Aktualisierung der Sohllage z_b erfolgt über die Exner-Gleichung:

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{f_{mor}}{1-p}\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y}\right) = 0, \tag{9}$$

mit der Porosität p (`por`), den Sedimenttransportraten q_x, q_y und dem morphologischen Beschleunigungsfaktor f_{mor} (`morfac`), der die morphologische Reaktion gegenüber der hydrodynamischen Simulationszeit skaliert und so die Rechenzeit erheblich reduziert. Böschungsrutschungen werden über den *Avalanching*-Ansatz abgebildet: Überschreitet die lokale Sohlneigung eine kritische Neigung m_{cr},

$$\left|\frac{\partial z_b}{\partial x}\right| > m_{cr}, \tag{10}$$

wird Sediment an die tiefer liegende Zelle abgegeben. Da sich Böschungen unter Wasser flacher einstellen als über Wasser, wird zwischen den Eingangsparametern `wetslp` (nass) und `dryslp` (trocken) unterschieden; der Parameter `hswitch` (standardmäßig 0,1 m) definiert den Wasseranteil der Zelle, ab dem eine Zelle vom trockenen in den nassen Zustand übergeht. Ein `dryslp` von 1 entspricht dabei einem Neigungswinkel von 45° gegen die Horizontale. Dieser Mechanismus ist der zentrale Prozess des Dünenabbruchs im Kollisionsregime: Die langen Wellen unterspülen den Dünenfuß, bis die Abbruchkante nachrutscht und das Material dem seewärtigen Transport zugeführt wird (D. Roelvink, Reniers u. a. 2009). Die am Standort beobachteten Abbruchwinkel nach dem Sturmhochwasser vom Oktober 2023 werden in Unterabschnitt 3.4 mit den definierbaren Maximalwerten verglichen.

2.5.6. Berechnungsgitter

XBeach rechnet auf curvilinearen Netzen, wobei das rechtwinklige Berechnungsgitter einen Sonderfall darstellt; auch Delft3D-Netze können eingelesen werden. Ein Gitter besitzt vier Ränder, an denen die Zellenanzahl gegenüberliegender Seiten stets gleich ist, während die Zellgröße variieren kann: die seewärtige Randbedingung (*offshore boundary*), an der die hydraulischen Lasten eingespeist werden, die landseitige Randbedingung (*land boundary*) sowie die beiden seitlichen (lateralen)

Randbedingungen (Abbildung 15). Der Ursprungspunkt der Gitterkoordinaten (x_{ori}, y_{ori}) liegt immer an der – von Land aus gesehen – linken äußeren Ecke der seewärtigen Randbedingung; die Gitterindizes werden küstenparallel mit *m* und küstenorthogonal mit *n* bezeichnet. Der Winkel *alfa* beschreibt die Rotation des Gitters gegenüber dem globalen Koordinatensystem und ist beim georeferenzierten Einlesen von Bathymetrie- und Hydrodynamikdaten sowie bei der georeferenzierten Ergebnisausgabe von zentraler Bedeutung (vgl. den profilreferenzierten Modellaufbau in Unterabschnitt 5.2).

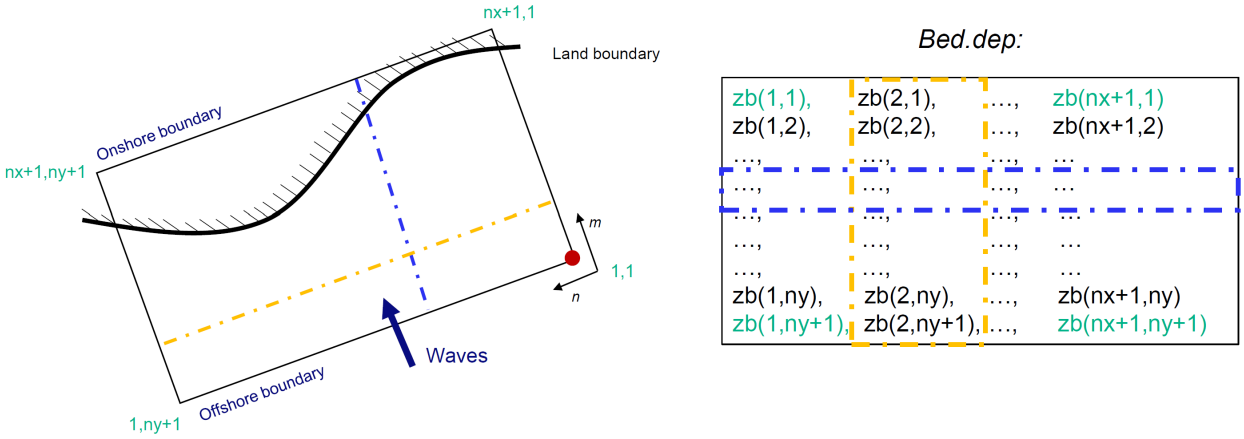
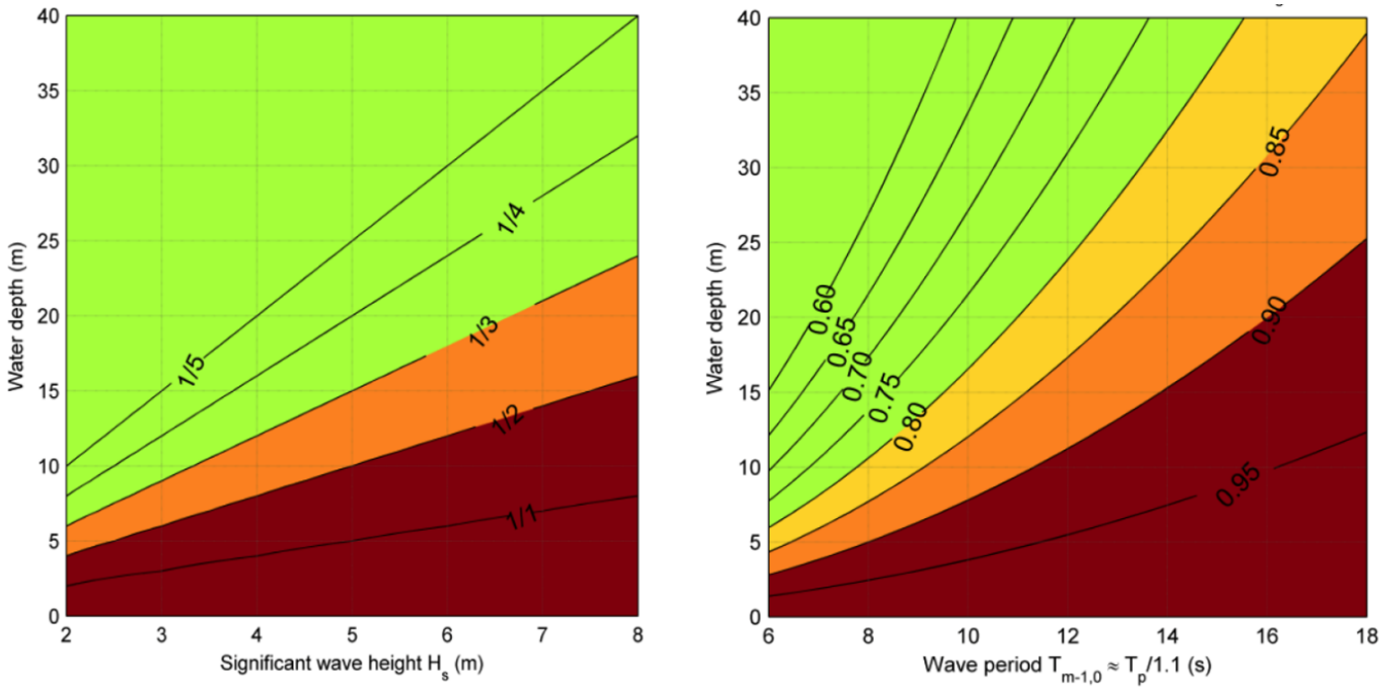


Abbildung 15: Grundlegendes Konzept der Berechnungsgitter in XBeach: Prinzipskizze zur Orientierung mit Randbedingungen (links) und Matrix-Notation (rechts), modifiziert nach Deltares (2023)

2.5.7. Seewärtige Randbedingung

Das XBeach-Modell erfordert am seewärtigen Rand eine minimale Wassertiefe und ein gleichmäßig auslaufendes Profil. Die benötigte Wassertiefe lässt sich anhand maßgeblicher, hydraulischer Randbedingungen der Simulation (lokale Extremwerte) mit Hilfe der Diagramme in Abbildung 16 bestimmen (Deltares 2023; Ridder u. a. 2020). An der seewärtigen Randbedingungen (RB) dürfen eingespeiste Wellen nicht unmittelbar brechen, ebenso ist die Zellgröße am Rand zu beachten. Innerhalb der ersten 2-3 Zellen sollte das Profil horizontal verlaufen. Für das Projekt wurde anhand einer anfänglichen Simulation der Oktobersturmflut 2023 mit MIKE21 eine Mindestwassertiefe von ca. 12.5 m als ausreichend befunden (H_{sig} = 2.5 m und T_p=10 s). Für schweren Seegang ($T(a)$ > 200 a), relevant insbesondere für die Szenarienanalyse, wurde die Tiefe des seewärtigen Modellrandes auf −20 m NHN vergrößert, was ausreichend Reserven auch für besonders lange Wellen bietet. Da diese Wassertiefe in Küstennähe natürlich nicht vorhanden ist, wird sie über eine künstliche seewärtige Verlängerung des Berechnungsprofils realisiert (vgl. Abbildung 45); sie dient ausschließlich der numerischen Welleneinsteuerung und bildet nicht die reale Schorrneigung ab.

Der Seegang wird in ResCAD über den Wellenrandbedingungstyp `wbctype = jonstable` als zeitlich veränderliche Folge parametrisierter JONSWAP-Spektren eingespeist. Da die Ausgabedaten von MIKE21 bzw. dem SHG phasengemittelt vorliegen, generiert der Surfbeat-Modus daraus randomisierte Wellengruppen und lange Wellen auf Grundlage der Varianz des jeweiligen Spektrums. Je Zeitintervall werden sieben Parameter vorgegeben: die signifikante Wellenhöhe H_{m0}, die Peakperiode T_p, der mittlere Wellenangriffswinkel (`mainang`), der Peaküberhöhungsfaktor γ_{jsp} (`gammajsp`), der Richtungsausbreitungskoeffizient *s*, die Dauer des Zeitschritts (`duration`) und die zeitliche Auflösung der generierten Wellenzeitreihe (`dtbc`, hier 1,0 s). Der Peaküberhöhungsfaktor



(a) Wellenhöhe H_{sig}

(b) Wellenperiode T_{m-10} / T_p und Verhältnis aus Wellengruppengeschwindigkeit und Beschleunigung

Abbildung 16: Hydrodynamische Kriterien für die Mindestwassertiefe an der seewärtigen Randbedingung (Deltares 2023)

skaliert die Energiedichte des Spektrums am Maximum und wird – gestützt auf die Untersuchungen im Projekt PADO (Schweiger u. a. 2020) – mit $\gamma_{jsp} = 3{,}333$ angesetzt. Der Koeffizient s steuert über den Ansatz $D = \cos^{2s}(\theta - \theta_m)$ die Richtungsverteilung der Wellenenergie um die Hauptrichtung θ_m und wird aus der zeitlich veränderlichen Standardabweichung der Richtungsausbreitung der MIKE21-Ausgabe umgerechnet. Wasserstandsganglinien können an bis zu vier Rändern eingespeist werden; da sich die Verläufe an den äußeren Ecken der seewärtigen Randbedingung minimal unterscheiden, werden die Ausgabepunkte gemittelt.

2.5.8. Laterale und zyklische Randbedingungen, MPI-Parallelisierung

An den seitlichen Rändern des Modells kann kein eigener Seegang definiert werden, wohl aber das Verhalten der dort ein- und auslaufenden Wellen und Strömungen. Im Projekt wurden vor allem zwei Typen untersucht (Abbildung 17): Bei der NEUMANN-Randbedingung (`lateralwave = neumann`) wird der Gradient längs des Randes zu Null gesetzt; es entstehen Schattenzonen, die sich weniger auf die Wellenhöhe als auf die Anordnung der Wellengruppen auswirken, welche in küstenlängs gleichförmige Muster übergehen. Bei der WAVECREST-Randbedingung wird ausschließlich der Gradient der Wellenenergie entlang der Wellenkämme zu Null gesetzt, wodurch die Orientierung der Wellengruppen besser erhalten bleibt – allerdings um den Preis überschätzter Refraktion und damit deutlich überhöhter Küstenlängsströmungen (Deltares 2023; Ridder u. a. 2020). Aufgrund der beim Ereignis vom Oktober 2023 aufgetretenen steilen Wellenangriffswinkel wurde nach vergleichenden Simulationen die NEUMANN-Randbedingung gewählt (vgl. Unterabschnitt 8.2 in der Diskussion).

Die simulierten Sturmhochwasser dauern häufig mehrere Tage, weshalb rechenintensive 2DH- Modellierungen ausschließlich mit der MPI-netcdf-Version von XBeach empfehlenswert sind. Message Passing Interface (MPI) parallelisiert die Berechnung durch Aufteilung der Modelldomain auf

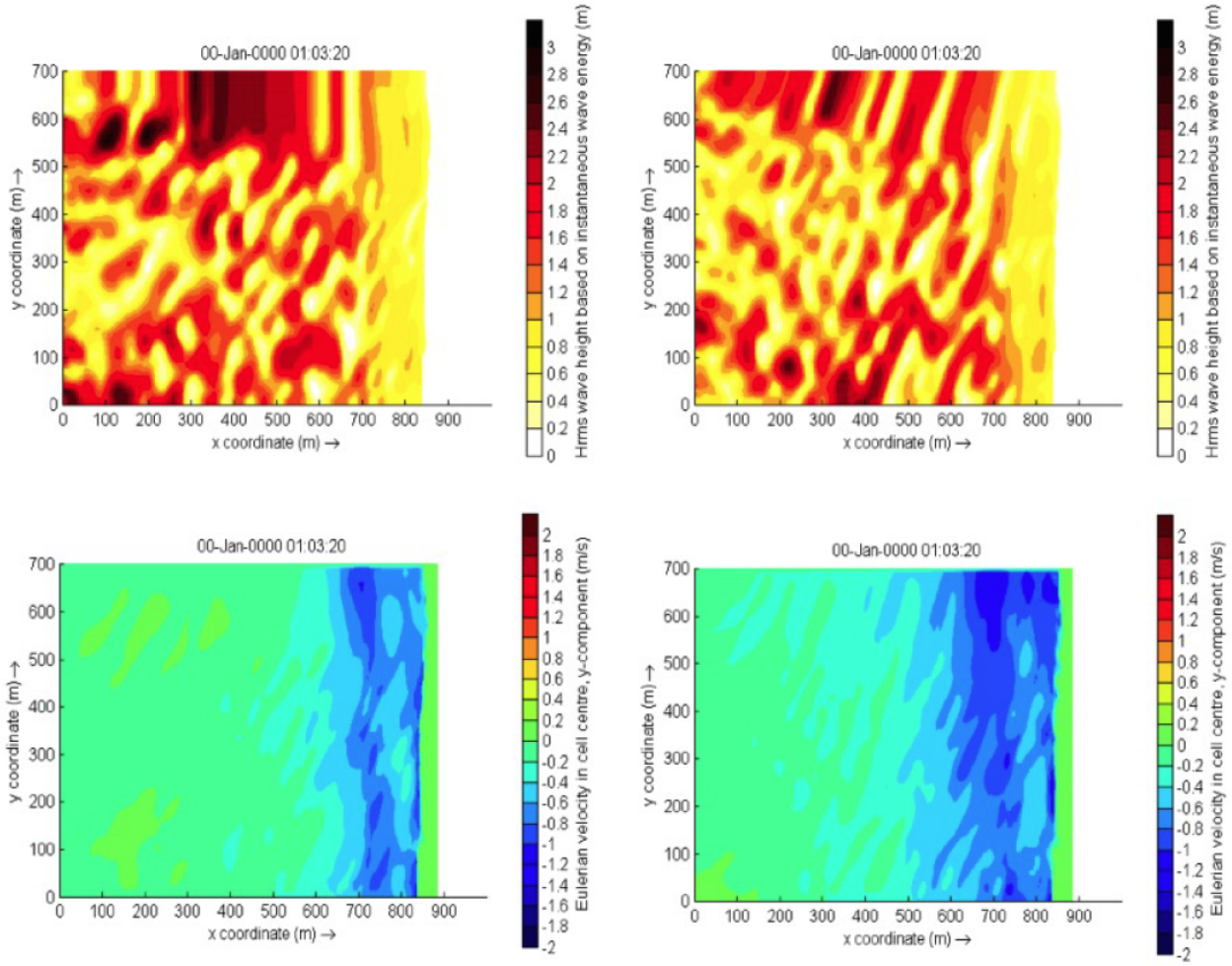


Abbildung 17: Wirkung der lateralen Wellenrandbedingungen auf das Wellenmuster (oben) und die Küstenlängsströmungen (unten) am Beispiel des Delilah-Testmodells: NEUMANN (links) und WAVECREST (rechts) (Deltares 2023)

mehrere Prozessorkerne bzw. Rechenknoten; das netCDF-Format dient dabei als kompakter Ausgabedatentyp. Zyklische laterale Randbedingungen (`cyclic = 1`), bei denen aus dem Modell auslaufende Wellen und Strömungen am gegenüberliegenden Rand wieder eintreten, lassen sich ausschließlich in der MPI-Version definieren. Sie minimieren störende Randeffekte insbesondere bei Langzeitsimulationen und steilen Wellenangriffswinkeln und wurden deshalb – in Kombination mit der NEUMANN-Randbedingung – für die Szenarien-Ensembles eingesetzt. Die praktische Umsetzung der MPI-Startbefehle und der automatisierten Simulationsketten wird in Unterabschnitt 5.2 beschrieben.

3. Dokumentation und Verifizierung von Naturdaten im Untersuchungsgebiet

Dieses Kapitel dokumentiert die messtechnische Erkundung des Untersuchungsgebietes als Bestandteil des Modellaufbaus in AP 3.1 sowie die Erhebung von Naturdaten zur Kalibrierung und Validierung für AP 3.2 (vgl. Tabelle 1). Das Untersuchungsgebiet wurde im Rahmen einer projektbegleitenden Messkampagne messtechnisch erkundet, um die Geländemodelle und Materialparameter der numerischen Modelle zu überprüfen und die küstennahe Topo-Bathymetrie stichpunktartig auf Aktualität zu verifizieren. Dabei wurden geodätische und bodenmechanische Verfahren kombiniert: die flächenhafte und punktuelle Aufnahme der Topographie sowie die Bestimmung von Korngrößenverteilung und Schichtaufbau. Da Küstenschutzdünen an der Ostsee fast ausschließlich im Bundesland Mecklenburg-Vorpommern zu finden sind, wurde auf einen zusätzlichen Standort in Schleswig-Holstein verzichtet. Die Kampagne umfasste drei reguläre Messeinsätze (20.–22.03.2023, 10.07.2023 und 03.04.2024) sowie einen Sondereinsatz zur Dokumentation der Dünenerosion unmittelbar nach dem Sturmhochwasser vom 19.–21.10.2023. Der erste Einsatz erfolgte bewusst direkt nach der Sturmflutsaison, um die frisch entstandenen Profile als 0-Messung für das weitere Monitoring aufnehmen zu können. Der Strandabschnitt nördlich von Ahrenshoop wurde u. a. deshalb als Untersuchungsgebiet gewählt, weil er über eine bis Dezember 2022 erneuerte Küstenschutzdüne mit Strandaufspülung verfügt und unmittelbar an Messreihen des Projektes ECAS-Baltic anschließt (Tiede u. a. 2024), sodass eine hohe Dichte an Vergleichsdaten vorliegt. Die Einsätze wurden mit dem StALU MM abgestimmt.

Eine zunächst beabsichtigte, „schnelle“ UAV-Photogrammetrie- bzw. LiDAR-Vermessung unmittelbar vor oder nach einem Sturmhochwasser wurde nicht durchgeführt, da zu hohe Windgeschwindigkeiten eine Befliegung mit dem eigenen UAV unmöglich machen. Stattdessen wurden die technischen Möglichkeiten einer sturmflutfähigen Profilmessung mit stationärem Laserscanning erkundet (Unterabschnitt 3.3) und eine Fotodokumentation unmittelbar nach dem Sturmhochwasser vom 19.–21.10.2023 an mehreren Standorten entlang der Küste Mecklenburg-Vorpommerns vorgenommen (Unterabschnitt 3.4). Somit konnten „frische“ Sturmflutprofile dokumentiert werden, die wichtige Daten für die Modellkalibrierung liefern. Tabelle 5 fasst die Einsätze und die jeweils eingesetzten Messmethoden zusammen.

Tabelle 5: Messeinsätze der ResCAD-Messkampagne im Untersuchungsgebiet

Datum	Art	Schwerpunkte
20.–22.03.2023	Regulärer Einsatz (0-Messung)	UAV-LiDAR und -Photogrammetrie, GNS-Profile, Bathymetrie, Rammsondierung, Bodenproben
10.07.2023	Regulärer Einsatz	Stationäres Laserscanning (Riegl LMS-Z420i)
19.–21.10.2023	Sondereinsatz Sturmhochwasser (SHW)	Foto-/Videodokumentation an 5 Standorten, photogrammetrische 3D-Modelle der Abbruchkanten
03.04.2024	Regulärer Einsatz	UAV-Befliegungen bei Ahrenshoop und Prerow



Abbildung 18: Untersuchungsgebiet am Strandabschnitt nördlich von Ahrenshoop (Fischland-Darß), bereitgestellt durch StALU MM

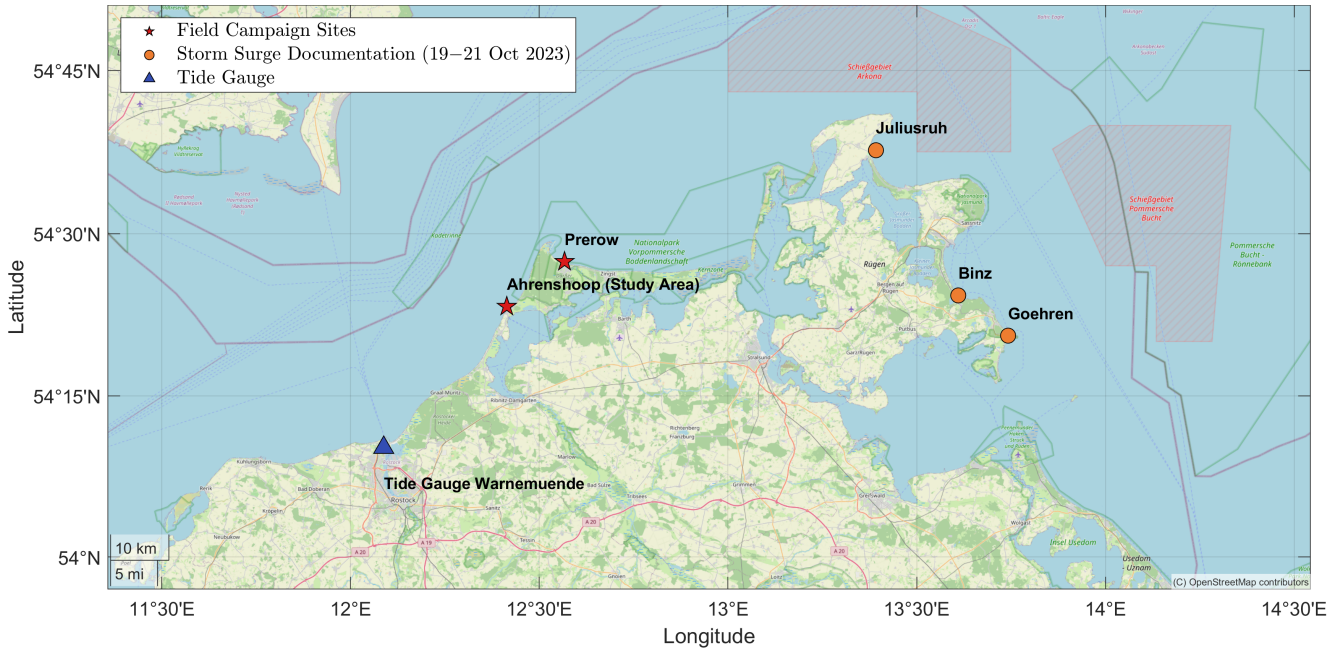


Abbildung 19: Standorte der ResCAD-Messkampagne an der südwestlichen Ostseeküste: Untersuchungsgebiet Ahrenshoop und UAV-Standort Prerow, Dokumentationsstandorte des Sturmhochwassers vom 19.–21.10.2023 (Binz, Juliusruh, Göhren) sowie Referenzpegel Warnemünde (Kartengrundlage: OpenStreetMap)

3.1. UAV-Befliegungen mit LiDAR und Photogrammetrie

Für die flächenhafte Aufnahme der Topographie wurde die institutseigene Drohne DJI Matrice M300 RTK mit LiDAR-Sensorik und RGB-Kamera eingesetzt (Abbildung 20); Wang u. a. (2023) geben einen aktuellen Überblick zur luftgestützten LiDAR-Küstenlinienerfassung, und Grenzdörffer und Naumann (2016) demonstrieren mit photogrammetrischer UAV-Bathymetrievermessung ein vergleichbares Verfahren zur Erfassung flacher Unterwasserbereiche. Beim ersten Messeinsatz vom 20.–22.03.2023 wurden vier LiDAR-Missionen in Flughöhen von 100 m und 60 m geflogen, wobei die Georeferenzierung (RTK) vergleichend über den SmartNet-Dienst – referenziert mit einer Leica GS09 GNSS-Antenne und der Bedienstation CS20 – und über die mobile GNSS-Referenzstation DJI D-RTK 2 erfolgte. Eine für das Projekt angeschaffte EcoFlow-Powerstation ermöglichte längere, netzunabhängige Einsatzzeiten im Feld von ca. 10 Flugmissionen am Tag (Abbildung 21). Da UAV-Befliegungen ab Windgeschwindigkeiten von etwa 10 m/s nicht mehr möglich sind, wurden die Windbedingungen vor jeder Mission mit einem Windmessgerät (MiniAir2, Fa. Schiltknecht) geprüft. Weiterhin waren die Seegangs- und Wasserstandsbedingungen zu beachten, um die registrierte Wasserlinie verifizieren zu können; im Befliegungszeitraum am 21.03.2023 lag der Wasserspiegel ca. 10 bis 20 cm über dem mittleren Meeresspiegel (MW).



Abbildung 20: Verwendetes Fluggerät (DJI Matrice M300 RTK mit LiDAR-Sensorik und RGB-Kamera) für die UAV-Erkundung und zugehörige Luftbild-Aufnahme des Einsatzortes bei Ahrenshoop

Das aus der LiDAR-Vermessung erzeugte digitale Geländemodell (Abbildung 22) liegt zunächst in ellipsoidischen Höhen vor, da die Auswertesoftware DJI Terra nicht direkt auf Geoidhöhen umrechnen kann. Ein praktikables Vorgehen ist das Einmessen von Höhenkorrekturpunkten, deren Höhenunterschied zwischen Geoid und Ellipsoid bekannt ist: Damit kann die Punktwolke um einen konstanten Wert entlang der z-Achse verschoben werden, der im Zentrum der Punktwolke (am Strandaufgang 1) etwa −37,64 m beträgt. Je nach horizontaler Ausdehnung der Punktwolke kann die Abweichung an den Rändern bei 1 km Länge bereits im Zentimeterbereich liegen; werden höhere Genauigkeiten benötigt, ist eine Aufteilung in kleinere Sektionen mit individueller Korrektur



Abbildung 21: Ergänzende Ausrüstung zur UAV-Erkundung (rechts: EcoFlow-Powerstation mit Ladestation und Akkus für Drohne und RTK-Base, links: Windmessgerät MiniAir2 der Fa. Schiltknecht)

zweckmäßig. Eine erste Auswertung zeigte eine frische Abbruchkante im Strandbereich, die auf die leichte Sturmflut vom 25.02.2023 zurückzuführen ist.

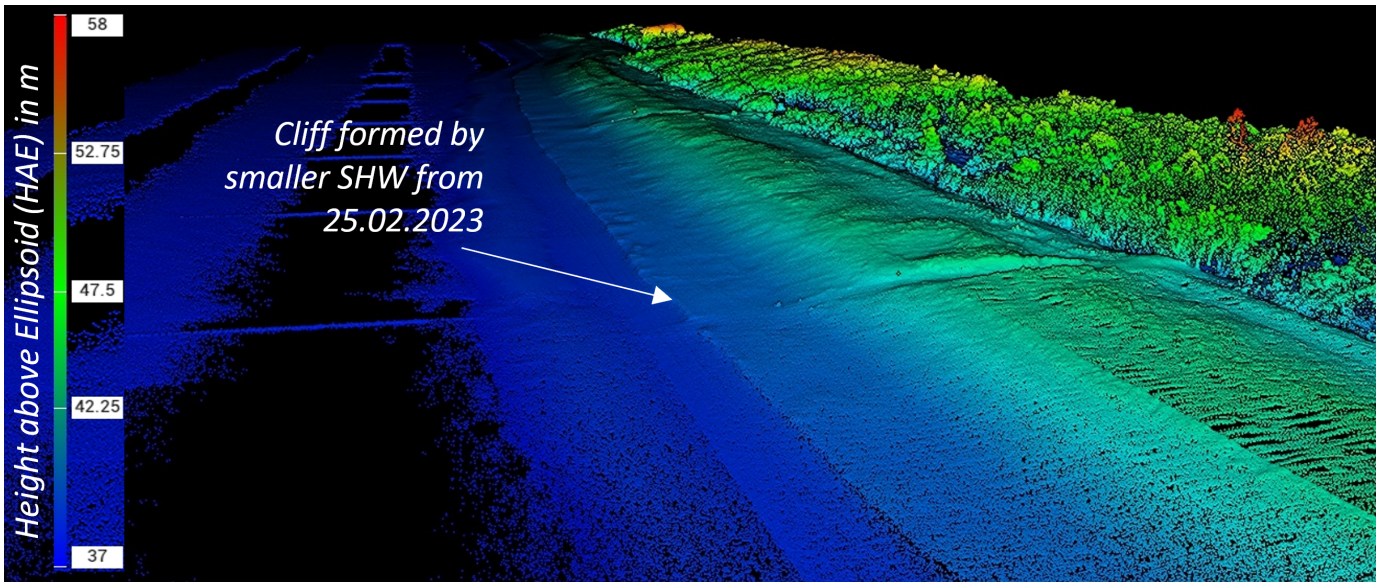


Abbildung 22: Digitales Geländemodell der UAV-gestützten LiDAR-Vermessung vom 21.03.2023 mit frischer Abbruchkante der leichten Sturmflut vom 25.02.2023 (Farbskala in ellipsoidischen Höhen)

Aus den aufgenommenen Luftbildern wurde zudem ein 2D-Orthomosaik mit RGB-Farbcodierung generiert (Abbildung 23). Die punktuellen GNSS-Messungen mit der Leica GS09 dienen dabei der Verifizierung des LiDAR-Geländemodells sowie der Höhenkorrektur; bis zu einer begehbaren Wassertiefe von etwa 1,20 m wurde auch die Bathymetrie punktuell aufgenommen. Klar aus der Luft zu erkennen ist die Kante in der Bathymetrie entlang der seeseitigen Buhnenspitzen, an der

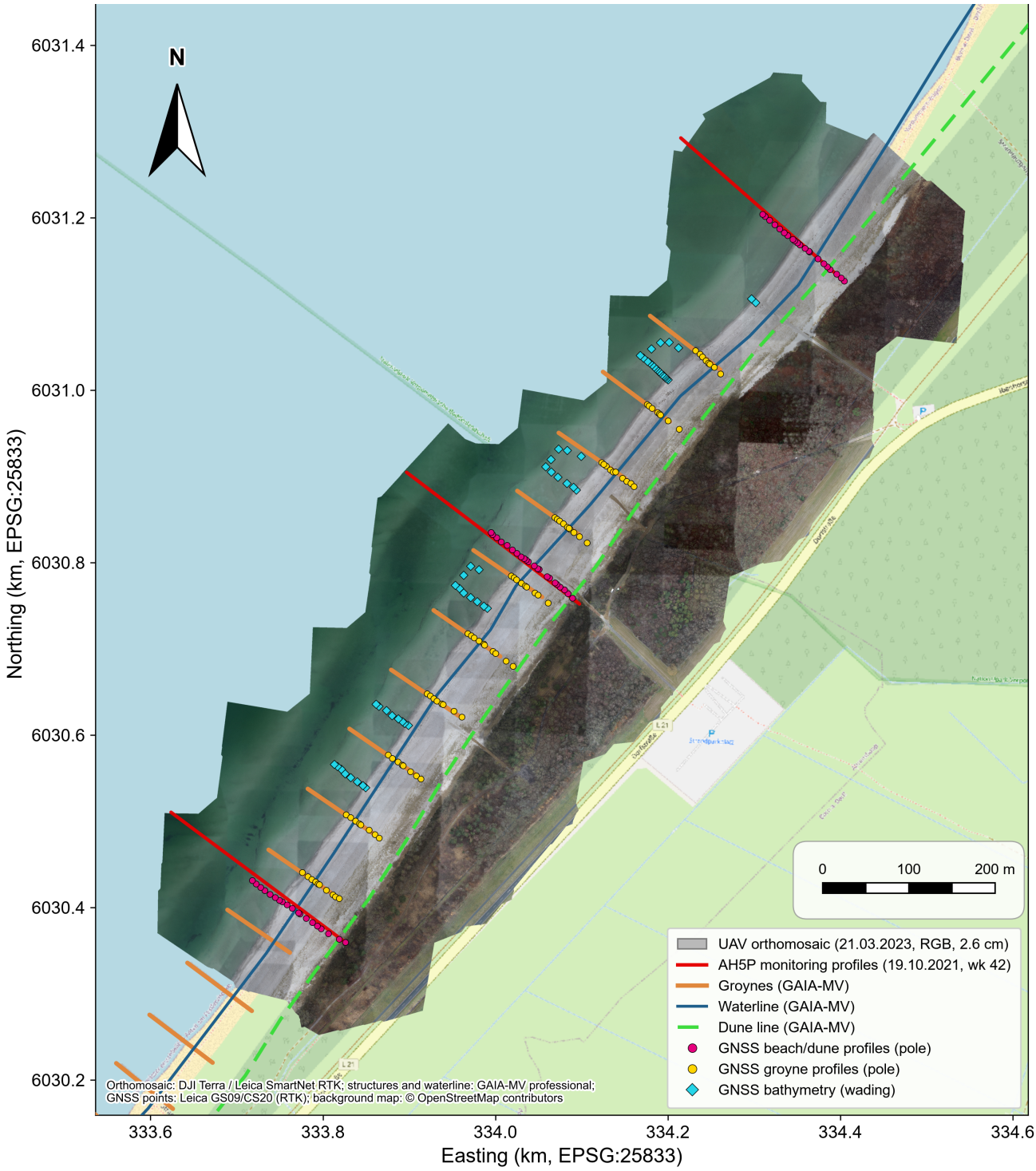


Abbildung 23: UAV-Orthomosaik des Messeinsatzes vom 21.03.2023 (RGB, 2,6 cm Bodenauflösung) mit den GNSS-Messpunkten desselben Tages (Leica GS09/CS20, RTK; Strand-/Dünenprofile und Buhnenprofile mit Lotstange, Bathymetrie zwischen den Buhnen watend aufgenommen), Buhnen-, Wasserlinien- und Dünenmarkierung aus GAIA-MV professional sowie den Referenzprofile für Ahrenshoop von 2021 - 2023 (AH5P)-Monitoringprofilen vom 19.10.2021 (KW 42); die amtlichen Buhnenlinien decken sich mit den im Luftbild sichtbaren Bauwerken (Hintergrundkarte: OpenStreetMap)

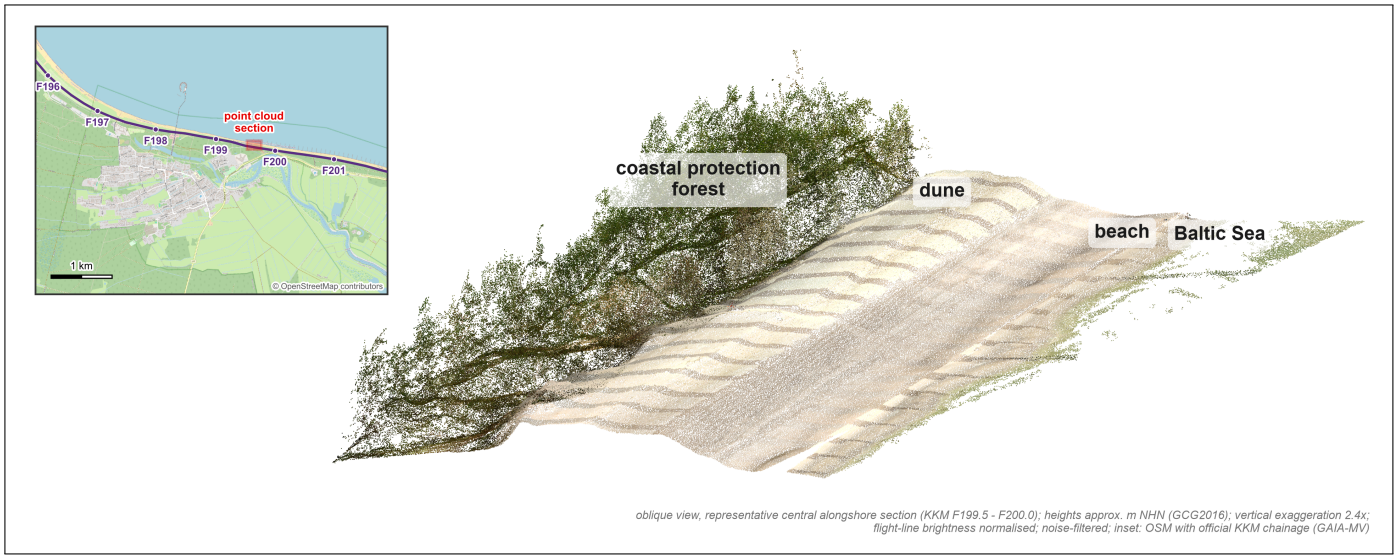


Abbildung 24: RGB-kolorierte UAV-Punktwolke der Mission ResCAD_24_C1 bei Prerow vom 03.04.2024 in Schrägansicht mit Zonierung (von links: Küstenschutzwald, Düne, Strand, Ostsee); gezeigt ist ein repräsentativer Mittelabschnitt der Punktwolke (KKM F199.5 bis F200.0); Belichtung je Flugstreifen normalisiert, Höhen näherungsweise in m NHN; Übersichtskarte oben links mit Lage des Abschnitts und amtlicher Küstenkilometrierung (Hintergrund: OpenStreetMap)

erhöhte Küstenlängsströmungen zu erwarten sind. Wasserlinie, Buhnen- und Dünenmarkierungen wurden der Geodatenbank *GAIA-MV professional* entnommen; insbesondere die Buhnen dienten zur Verifizierung der Vermessung, wobei maximale Abweichungen von 1 bis 3 cm festgestellt wurden.

Beim Einsatz am 03.04.2024 wurden ergänzende Befliegungen an drei Standorten durchgeführt: im Bereich des Kliffs am Hotel „The Grand“ (Flughöhen 50 und 80 m), am Strandübergang 10 nördlich von Ahrenshoop (60 bis 100 m) sowie am Strandübergang 39 bei Prerow (50 m). Die Aufbereitung der LiDAR-Punktwolken zu auswertbaren digitalen Geländemodellen erfolgte in einem skriptbasierten Python-Workflow (Bibliotheken *laspy* und *Open3D*), der beispielhaft an der Mission *ResCAD_24_C1* (Prerow) dokumentiert ist. Der Workflow umfasst: (1) Einlesen der *.las-Rohdaten und Filterung nach Höhenbereichen (Elimination von Wasserpunkten unterhalb ca. 0,2 m NHN), (2) statistische Ausreißerfilterung über die Nachbarschaftsdistanzen der Punkte, (3) dichtebasierte Clusteranalyse (DBSCAN) zur Entfernung von Störobjekten und Wellenreflexionen, (4) Voxel-Downsampling zur Datenreduktion, (5) Normalenschätzung und Poisson-Oberflächenrekonstruktion zum Schließen von Datenlücken sowie (6) Neuabtastung der rekonstruierten Oberfläche mit einheitlicher Punktdichte (2 Punkte/m^2) und Export als xyz-Punktdatei zur Weiterverarbeitung im GIS.

3.2. GNSS-gestützte Profil- und Bathymetrievermessung

Die punktuelle Vermessung der Strand- und Dünenprofile sowie der mit Wathose zugänglichen Bathymetrie in den Buhnenfeldern erfolgte mit der Leica GS09 GNSS-Antenne und der Bedienstation CS20. Die RTK-Korrekturdaten wurden über den SmartNet-Dienst (NTRIP-Mountpoint *DE-UTM33-NHN*) bezogen, womit je nach Satellitenabdeckung Genauigkeiten von 1 bis 3 cm erreicht wurden. Die Koordinaten wurden im System ETRS89/UTM33 (EPSG: 5650) erfasst; die Umrechnung der ellipsoidischen Höhen in Orthohöhen bezogen auf NHN erfolgte in Leica Infinity über das Geoidmodell GCG2016. Nach einer einheitlichen Umbenennung der Messpunkte (Buhnen-, Profil- und Bathy-

metriepunkte) wurden die Punktdaten als ASCII-Datei exportiert und in ein projektbezogenes QGIS-Projekt überführt.

Die 220 RTK-Punkte des Messeinsatzes vom 21.03.2023 gliedern sich in terrestrisch aufgenommene Strand- und Dünenpunkte, in Profillinien längs der AH5P-Monitoringprofile sowie in die watend erfassten Bathymetriepunkte zwischen den Buhnenfeldern; hinzu kommen der Standort der RTK-Referenz, die Lagen der Rammsondierungen und ein doppelt aufgenommener geodätischer Festpunkt. Diese Punkte bilden eine unabhängige, hochgenaue Höhenreferenz, mit der sich die flächenhaften Datensätze quantitativ prüfen lassen. Die Doppelaufnahme des Festpunktes belegt dabei eine Wiederholgenauigkeit der GNSS-Messung von unter 1 cm.

Der Abgleich mit der UAV-LiDAR-Punktwolke *desselben Messtages* – die Differenzen enthalten damit keine morphologische Veränderung, sondern ausschließlich Messkettenfehler – ergibt für die terrestrischen Strand- und Dünenpunkte eine mittlere Abweichung von +3,1 cm bei einem *RMSE* von 4,6 cm (Median der LiDAR-Höhen im Umkreis von 0,5 m je Referenzpunkt, $n = 89$). Die Kontrollpunkte an Rammsondierungen und RTK-Referenz bestätigen diesen geringen systematischen Versatz. Damit ist die Genauigkeit der UAV-Kette für die Zwecke der Modellaufbereitung nachgewiesen. In den Bathymetriepunkten zwischen den Buhnenfeldern liegt die LiDAR-Oberfläche dagegen systematisch um rund 0,5 m über den GNSS-Sohlhöhen, da der Sensor dort die Wasseroberfläche und nicht die Sohle erfasst – eine methodische Grenze, die bei der Verschneidung von LiDAR- und Bathymetriedaten entlang der Wasserlinie zu beachten ist; Roshandel u. a. (2021) zeigen, wie sich Wasseroberflächenparameter aus luftgestützten LiDAR-Punktwolken selbst extrahieren und damit dieser Versatz perspektivisch modellgestützt korrigieren ließe.

Zur weiteren Absicherung der räumlichen Datengrundlagen wurden die GNSS-Punkte zusätzlich gegen die EOMAP-Satellitenbathymetrie (drei Epochen, Höhenbezug LAT – Lowest Astronomical Tide) und gegen das kombinierte ALS-Geländemodell vom 17.09.2023 (ALS + EOMAP 10/2022 + Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), 5 m) verglichen (Tabelle 6). Für die EOMAP-Daten wurde der unbekannte Datumsversatz LAT→NHN nicht angenommen, sondern aus den überlappenden Punkten selbst als Median geschätzt; die verbleibende Streuung ist das eigentliche Gütemaß der Satellitenbathymetrie. Die Epoche 03/2022 – zur selben Jahreszeit wie die GNSS-Kampagne erhoben – erreicht dabei eine Streuung von lediglich 0,18 m und liegt damit deutlich unter der vom Hersteller angegebenen Unsicherheit (Median der Unsicherheitsraster 0,56 m); die Epoche 10/2021 weicht dagegen mit 0,57 m auffällig stark ab und sollte vor einer weiteren Verwendung gesondert geprüft werden. Der Vergleich mit dem ALS-Geländemodell vom 17.09.2023 – rund sechs Monate nach der GNSS-Kampagne erstellt und damit möglicherweise durch reale Morphodynamik über den Sommer beeinflusst – ergibt eine mittlere Abweichung von 4,6 cm bei einer Streuung von 0,44 m. Die gegenüber dem taggleichen UAV-Vergleich deutlich größere Streuung ist angesichts des Zeitversatzes sowie der heterogenen Quellenzusammensetzung des Rasters (ALS an Land, ältere Satellitendaten im Nassbereich) plausibel und bestätigt die grundsätzliche Eignung des Geländemodells für die Modellaufbereitung.

Tabelle 6: Vergleich der 220 GNSS-RTK-Punkte vom 21.03.2023 mit unabhängigen Datengrundlagen: UAV-LiDAR (selber Messtag), EOMAP-Satellitenbathymetrie (drei Epochen, Datum LAT) und dem kombinierten ALS-Geländemodell vom 17.09.2023

Vergleichsdatensatz	Kategorie	n	Bias (m)	RMSE/Std (m)	Zeitversatz
UAV-LiDAR	Strand/Düne, terrestrisch	89	+0,031	0,046	derselbe Tag
UAV-LiDAR	Bathymetrie Buhnenfelder	43	+0,541	0,654	derselbe Tag
EOMAP-SDB 03/2022	Bathymetrie u. Profile	70	−0,146[1]	0,177	12 Monate
EOMAP-SDB 10/2022	Bathymetrie u. Profile	66	−0,252[1]	0,225	5 Monate
EOMAP-SDB 10/2021	Bathymetrie u. Profile	106	−1,510[1]	0,566	17 Monate
ALS-DGM 09/2023	alle Kategorien	219	+0,046	0,443	6 Monate

[1] geschätzter Datumsversatz LAT → NHN (Median der Differenzen); die angegebene RMSE/Std-Spalte ist die Streuung NACH dieser Offsetkorrektur.

3.3. Stationäres 4D-Laserscanning

Inspiriert durch die Arbeiten von Kuschnerus u. a. (2022) und Barbero-García u. a. (2023) wurde in ResCAD A die Möglichkeit untersucht, mit stationärem 4D- bzw. permanentem Laserscanning zeitlich und räumlich hochaufgelöste, morphodynamische Messreihen der Strand- und Dünenentwicklung zu gewinnen. Ein stationärer Laserscanner bietet den Vorteil, dass auch bei starken Windgeschwindigkeiten und bei Nacht gemessen werden kann; trotz Einschränkungen durch Niederschlag rückt damit die Echtzeit-Messung der Geländeoberfläche während eines Sturmhochwassers in den Bereich des Möglichen. Ebenso lassen sich natürliche und anthropogene Einflussfaktoren auf die Sedimentumlagerung – etwa das künstliche Nachprofilieren von Abbruchkanten – besser registrieren und quantifizieren, da sich auch kleine Veränderungen unter moderaten hydrodynamischen Bedingungen über längere Zeiträume signifikant aufsummieren können. So lässt sich eine Aussage zu kumulativen Summen des transportierten Sediments zwischen zwei großflächigen, luftgestützten Scans treffen.

Im Juli 2023 ergab sich die Möglichkeit, auf dem Dach des Hotels „The Grand“ in Ahrenshoop eine Probemessung durchzuführen. Über das Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Dresden konnte ein terrestrischer Laserscanner der Fa. Riegl (Modell LMS-Z420i) genutzt werden. Die EcoFlow-Powerstation ermöglichte einen energieautarken Einsatz; die Steuerung erfolgte per Notebook über die Software RiSCAN PRO. Mit dem Werkzeug AutoHotkey wurden die Vorgänge zum Initialisieren, Einrichten, Starten und Speichern der Messung skriptbasiert automatisiert, sodass Messungen in festen Zeitintervallen sowie – bei vorhandener Internetverbindung – ferngesteuert möglich sind. Da der Zugang zum Messpunkt auf dem Hoteldach aus logistischen Gründen anschließend nicht mehr gewährt wurde, blieb es bei der einmaligen Messung vom 10.07.2023.

Die aufgenommene Punktwolke ist in Abbildung 26 dargestellt; zu erkennen sind die Hotelblöcke, die Küstenschutzdüne, der Strand, die Buhnenfelder sowie das Gelände hinter der Düne. Die seeseitig abfallende Böschung der Düne weist aufgrund ihrer Lage im Schatten des Messkegels eine geringe Punktdichte auf. Da der Laserscanner ausschließlich ein eigenes, lokales Koordinatensystem verwendet, ist eine Registrierung bzw. Georeferenzierung der Punktwolke notwendig. Zunächst wurden geometrisch gut erkennbare Objekte mit einer GNSS-Antenne eingemessen und in der Punktwolke identifiziert; da hierfür lediglich einzelne Punkte zur Verfügung standen, ließ sich die Punktwolke damit lediglich auf Genauigkeiten von ca. ±30 cm referenzieren. In der Regel werden dafür aufgestellte Reflektoren eingemessen, die der Laserscanner eindeutig identifizieren



Abbildung 25: Messinstrumente für den Laserscanner der Fa. Riegl LMS-Z420i (links) im Einsatz mit Powerstation (mitte rechts) und GNSS-Positionierung (rechts)

kann; diese standen beim Messeinsatz jedoch nicht zur Verfügung. Als dritte Methodik wurden in der TLS-Punktwolke und in bereits verfügbaren ALS-Scans geometrisch gut identifizierbare Flächen und Objekte (Straßen, Hausflächen) markiert und daraus eine Transformationsmatrix in das Referenzkoordinatensystem generiert, deren Anwendung auf die gesamte Punktwolke eine verbesserte Genauigkeit von 5 bis 10 cm erzielte; alternativ kann hierfür auch eine UAV-Befliegung als Referenzpunktwolke dienen. Über moderne Filter- und Punktwolkenanalysen konnten zudem die Strandkörbe aus dem Profil gefiltert werden. Im weiteren Verlauf von ResCAD A wurde die Methodik durch eine wetterfeste und leicht montierbare Schutzhülle für den Laserscanner zur Einsatzreife für alternative Standorte entlang der exponierten Ostseeküste gebracht. Aus den begleitenden, systematischen Laboruntersuchungen einer im Projekt betreuten Diplomarbeit lassen sich konkrete Anforderungen an einen stationären Dauereinsatz ableiten: fest installierte und koordinativ eingemessene Reflektoren bzw. Referenzpunkte im Scanbereich für die automatisierte Georeferenzierung, eine regelmäßige Validierung der Messreihen gegen amtliche ALS- und GNSS-Erhebungen sowie eine Standortwahl mit freier Sicht auf die Dünenfront – erhöhte Standorte wie das genutzte Hoteldach erzeugen im seeseitigen Böschungsbereich einen ausgeprägten Messschatten. Für den Betrieb sind zudem eine gesicherte Strom- und Datenanbindung sowie die fortlaufende Kontrolle der Schutzhülle (Drehfreiheit, Kondenswasser, Sichtfenster der Kamera) vorzusehen.

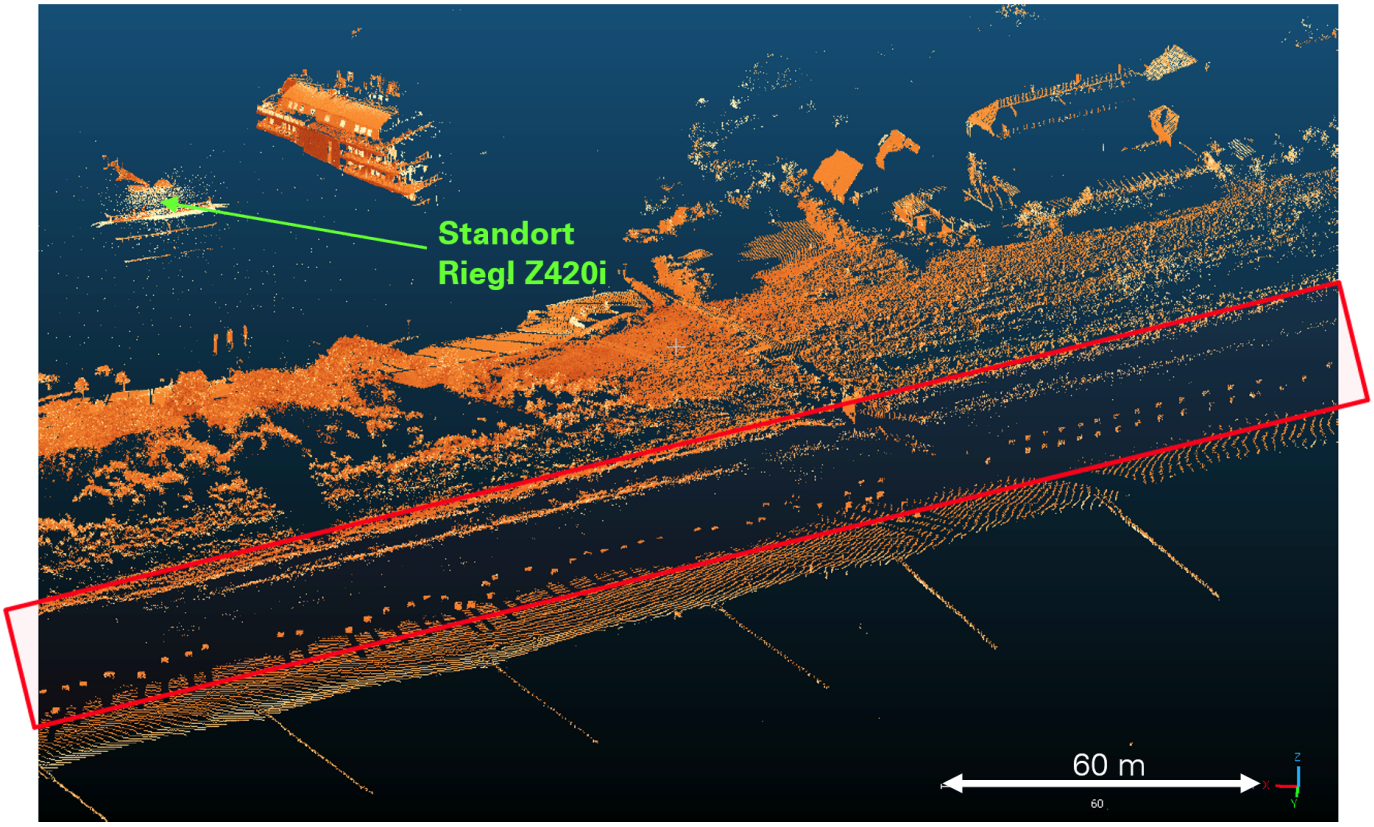


Abbildung 26: Ansicht der TLS-Punktwolke (Riegl LMS-Z420i), aufgenommen vom Dach des Hotels „The Grand“ in Ahrenshoop am 10.07.2023, mit in rot markierten, etwas verschatteten, seeseitigem Teil der Küstenschutzdüne

3.4. Dokumentation des Sturmhochwassers vom 19.–21.10.2023

Das außergewöhnliche Sturmhochwasser vom 19.–21.10.2023 konnte durch das IWD vor Ort behelfsmäßig dokumentiert werden. Aufgrund hoher Seegangsprognosen wurden Küstenschutzdünen vor Binz am Abend des 20.10.2023 beobachtet; für die Einsatzplanung wurden die prognostizierten Windgeschwindigkeiten der Online-Wetter-Applikation Windfinder (basierend auf ECMWF-Daten) verwendet, die die Exponiertheit der Ostküste Rügens deutlich zeigten (um Kap Arkona prognostizierte Windgeschwindigkeiten von 105 km/h). Direkt an der Strandpromenade von Binz wurden mit dem Windmessgerät Maximalwerte von 20 m/s in 2 m Höhe gemessen (ca. 72 km/h, nahe dem Grenzbereich des Messgerätes). Das Wasser der Ostsee wurde in die Kieler, Eckernförder und Lübecker Bucht gedrückt, was dort zu extremen Wasserständen und erheblichen Schäden an Küstenschutzanlagen führte (Hofstede und Aufderbeck 2024); Nöthel u. a. (2024) dokumentieren den meteorologisch-hydrologischen Ablauf des Ereignisses für die gesamte Ostsee. Für das Untersuchungsgebiet bei Ahrenshoop lag der Wasserstand knapp unterhalb der Schwelle eines als „schweres Sturmhochwasser“ zu bezeichnenden Extremereignisses von 1,50 m, für Binz noch niedriger. Eine Übersicht der Auswirkungen an den sandigen Flach- und Binnenküsten Mecklenburg-Vorpommerns geben Siewert u. a. (2024). Die geringeren Wasserstände bzw. der höher liegende Dünenfuß und die geringe Höhe der Abbruchkante (ca. 80 cm) ermöglichten bei Binz eine verhältnismäßig sichere Beobachtung von der Wasserseite aus. Mit einer Actionkamera (GoPro Hero 5) wurden die direkten hydrodynamischen Einwirkungen als Video aufgezeichnet. Auffällig waren besonders hoch auflaufende Wellen mit niedriger Frequenz: Ohne den Wellenauflauf dieser langen Wellen hätte der Wasserstand nicht ausgereicht, um die Küstenschutzdünen zu erreichen.

Die nach aktuellem Bemessungskonzept ausschlaggebende signifikante Wellenhöhe muss demnach in Kombination mit dem Auftreten solcher langperiodischen Wellen betrachtet werden – ein Prozess, den die gewählte Software XB explizit abbildet.

Direkt im Nachgang des Sturmhochwassers konnten an fünf Standorten (Binz, Juliusruh, Prerow, Göhren und Ahrenshoop) frische Schäden sowie Abbruchkanten an Küstenschutzdünen und Strandaufgängen dokumentiert werden. Dabei wurde deutlich, dass Strandauf- und -eingänge als Schwachstellen besonderer Sicherungsmaßnahmen bedürfen; in Juliusruh war ein keilförmiger Durchbruch bereits in ersten Ansätzen zu erkennen (Abbildung 27).



Abbildung 27: Schadensbilder am 21.10.2023 bei Prerow (links) und Juliusruh (rechts)

An mehreren Standorten wurde eine größere Menge von Bildern zur Erstellung photogrammetrischer 3D-Modelle der Dünenabbrüche aufgenommen. Pro 3D-Modell sind etwa 50 bis 70 Bilder nötig, die die Geländeoberfläche in guter Überlappung aus vielen Perspektiven abbilden; ein Stab bekannter Länge diente als Skalierungshilfe. Abbildung 28 zeigt das georeferenzierte 3D-Modell des Dünenabbruchs am Standort Ahrenshoop nahe dem Hotel „The Grand“, bei dem der davor aufgestellte DLRG-Turm als Hilfe zur Georeferenzierung diente. Empfehlenswert ist jedoch das Einmessen von im 3D-Modell wiedererkennbaren Passpunkten mit einer GNSS-Antenne, da im Dünen- und Strandbereich selten feste Punkte existieren – auch der DLRG-Turm wird in der Wintersaison abgebaut und ist deshalb auf den winterlichen ALS-Scans nicht zu erkennen. Die vertiefte Auswertung dieser Modelle im Rahmen einer projektbegleitenden Diplomarbeit bestätigt die Grenzen der behelfsmäßigen Referenzierung: Da je Modell lediglich wenige Festpunkte identifizierbar waren und die Skalierung sich auf ein einzelnes Objekt in einer Raumrichtung stützte, sind absolute Volumen- und Differenzenaussagen aus den photogrammetrischen Digitales Geländemodell (DGM)s lediglich unter Vorbehalt belastbar; für künftige Aufnahmen werden mindestens drei in Richtung der Koordinatenachsen orientierte Maßstabsobjekte sowie eingemessene Passpunkte empfohlen. Robust sind dagegen die im geschlossenen Modellraum bestimmten mittleren Profilparameter (Tabelle 7), da sie keine externe Referenzierung erfordern.

Die quer zur Küste auslesbaren Höhenprofile P3 bis P13 des 3D-Modells wurden messtechnisch ausgewertet; die gemittelten geometrischen Parameter sind in Tabelle 7 dokumentiert. Die Anstiegs- und Abbruchwinkel für Strand und Düne beziehen sich auf die horizontale Ebene, die Abbruchhöhe

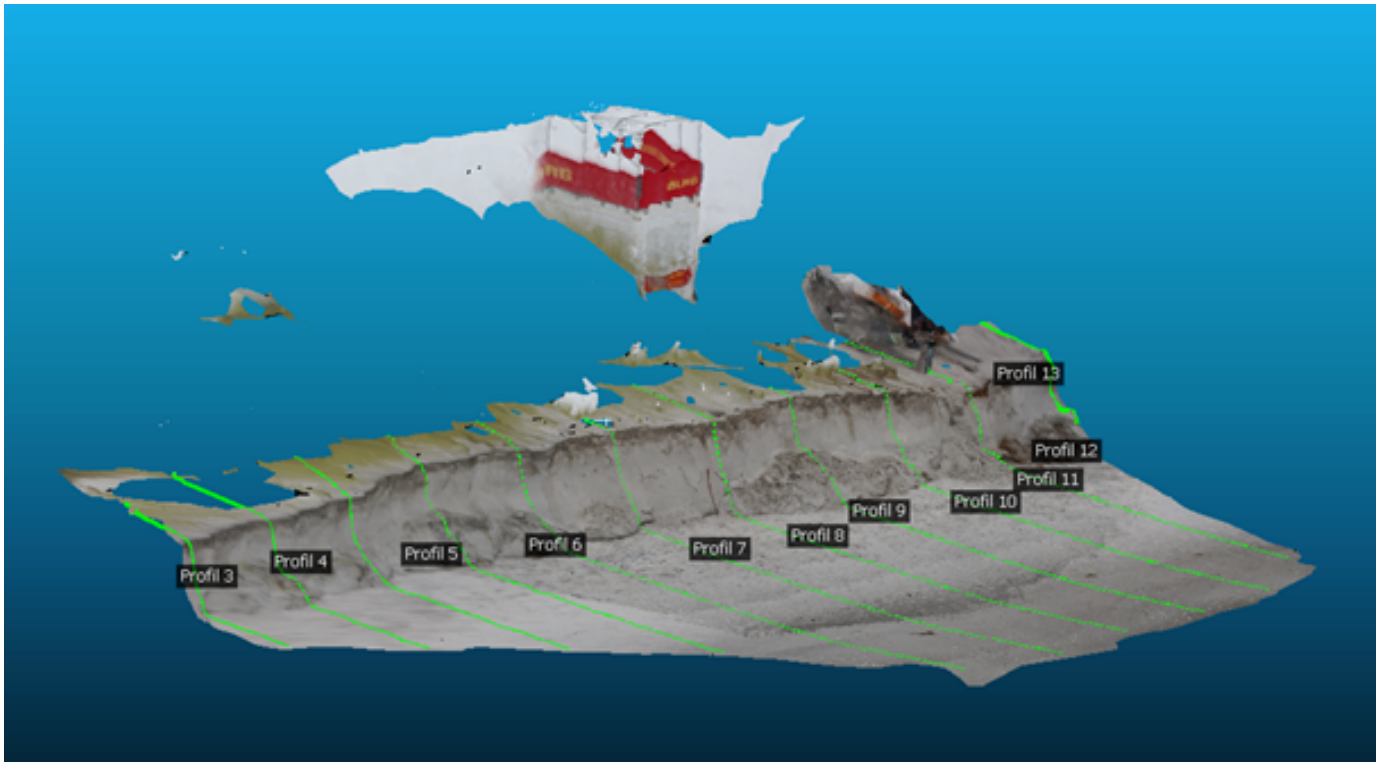


Abbildung 28: Photogrammetrisch erstelltes und georeferenziertes 3D-Modell der Dünenabbruchkante am Standort „The Grand“ am 21.10.2023 mit Untersuchungsprofilen

ist vom Dünenfuß bis zur Abbruchkante gemessen. Mit einem mittleren Abbruchwinkel von 67,3° überschreitet die Küstenschutzdüne den in XB maximal definierbaren Avalanching-Parameter $dryslp = 2$ (entspricht ca. 63°) um etwa 4°; auch die im Projekt PADO verwendeten Maximalwerte von $dryslp = 1{,}5$ (Schweiger u. a. 2020) werden durch die Messung in Frage gestellt – vergleichbar steile Abbruchwinkel dokumentieren Kaehler u. a. (2022) für den PADO-Feldversuch an einer Referenzdüne bei Rostock-Warnemünde. Für den während des Sturmhochwassers überfluteten Strand kann der Parameter $wetslp = 0{,}082$ verwendet werden, was einem Anstiegswinkel von 4,7° entspricht. Diese Naturdaten bilden zudem eine wesentliche Grundlage für die Validierung der Hindcast-Modellierung dieses Ereignisses.

Tabelle 7: Gemittelte geometrische Parameter der Profile P3–P13 am Standort Ahrenshoop vor dem Hotel „The Grand“ direkt nach dem Sturmhochwasser vom 19.–21.10.2023 (Lage Profil P8: 332714.72 / 6029392.95 / 1.26; EPSG: 25833)

Bereich	Abbruchhöhe	Anstiegs- und Abbruchwinkel	
	m	*1:m*	°
Strand	–	1:12,23	4,7
Düne	2,4	1:0,43	67,3

3.5. Geotechnische Untersuchungen und Sedimentparameter

Da sich Kornzusammensetzung, Lagerungsdichte und Schichtdicke stark auf die morphodynamischen Prozesse auswirken können, wurde das Untersuchungsgebiet geotechnisch beprobt. Länger zurückliegende Untersuchungen könnten hier fehlerhafte Ergebnisse liefern, da durch die kürzlichen Sanierungsmaßnahmen neues Material aufgespült worden ist. Zur Schichtdickenermittlung und zur Abschätzung der Lagerungsdichte wurde am 21.03.2023 eine leichte Rammsonde nach DIN EN ISO 22476-2 an drei Stellen des Küstenquerprofils bei KKM F182.750 (Strandaufgang 1) eingesetzt: am Dünenfuß, auf der Dünenkrone und auf dem Strand nahe der Wasserlinie. Die Ergebnisse sind in Abbildung 29 dargestellt. Auffällig waren die zwei- bis dreifach höheren Widerstandswerte des Sediments am Dünenfuß (Schlagzahlen N_{10} bis 39 bei 1 m Tiefe) im Vergleich zur Dünenkrone und zum Strand, deren N_{10}-Werte von überwiegend 5 bis 18 eine lockere bis mitteldichte Lagerung anzeigen. Der Bereich am Dünenfuß kommt zwar erst bei starkem Dünenrückgang in die morphodynamisch aktive Zone, kann sich dann aber stabilisierend auswirken. Die Bedeutung solcher bodenmechanischer Eigenschaften – insbesondere von Lagerungsdichte und Durchlässigkeit – für den Erosionswiderstand sandiger Küstenbarrieren wurde experimentell u. a. von Elsayed, Oumeraci und Goseberg (2024) nachgewiesen.

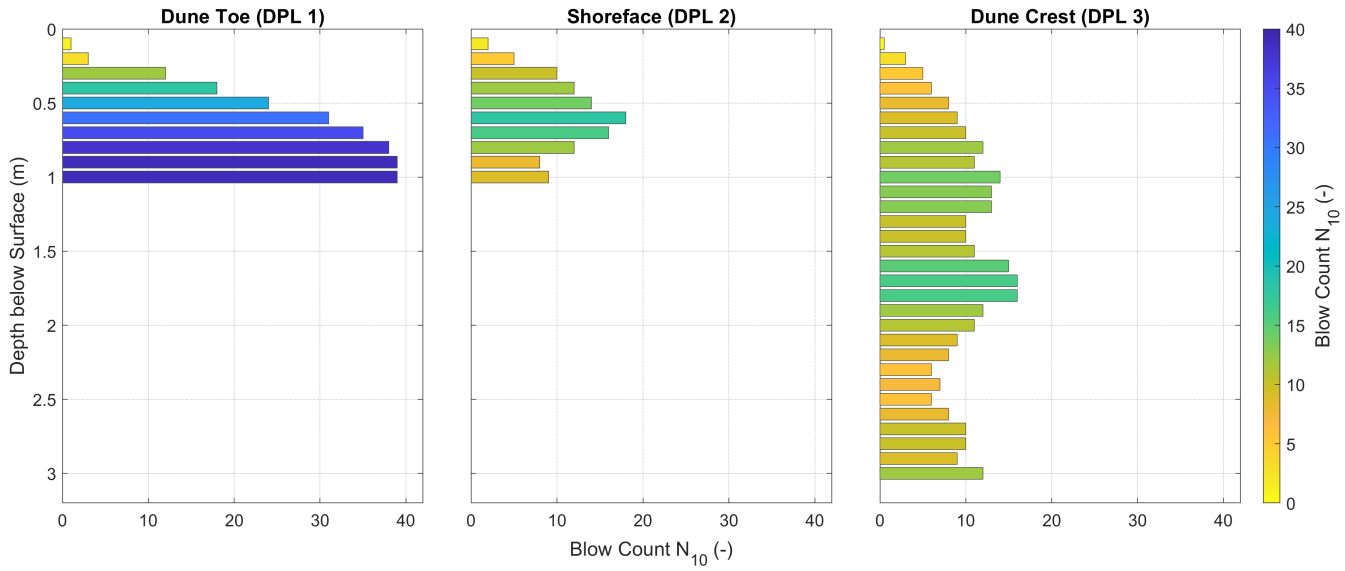


Abbildung 29: Ergebnisse der leichten Rammsondierung im Untersuchungsgebiet am Dünenfuß, an der Schorre (Strand) und auf der Dünenkrone am 21.03.2023

In unmittelbarer Nähe der Sondierpunkte wurden mit Entnahmezylindern ungestörte Sedimentproben gewonnen, um Korngrößenverteilung, Wassergehalt und Dichte zu bestimmen; die Analyse erfolgte am Institut für Geotechnik der TU Dresden. Die Korngrößenverteilungen nach DIN 18123 weisen für alle drei Entnahmestellen einen enggestuften Sand (Bodenart *sa**) aus (Abbildung 120 im Anhang). Für die Bemessung der Küstenschutzdünen wird derzeit einheitlich über die gesamte Küste ein Korndurchmesser von $d_{50} = 0{,}30$ mm angenommen; die Untersuchungen von Newe (2018) zeigten mittlere Korndurchmesser zwischen $d_{50} = 0{,}17$ und 0,35 mm. Die eigenen Beprobungen von März 2023 lieferten ähnliche Werte für das Untersuchungsgebiet (Tabelle 8). Dabei sind die Korndurchmesser in der Nähe der Wasserlinie größer als unmittelbar am Dünenfuß, was auf eine

Sortierung durch Wind und Wasser hindeuten kann. Die Werte fließen als Sedimentparameter in die hydro-morphodynamischen Simulationen ein.

Tabelle 8: In den Simulationen verwendete Korndurchmesser aus der Beprobung von März 2023

Bereich	d_{50} *mm*	d_{90} *mm*
Dünenfuß	0,26	0,45
Schorre	0,33	0,65

3.6. Erfolgskontrolle und Verifizierung

Zur Qualitätssicherung wurde noch am Abend der Messeinsätze eine erste Plausibilitätsprüfung der erhobenen Daten durchgeführt (u. a. Positionskontrolle der georeferenzierten GNSS-Punkte, Sichtung der LiDAR-Missionen in DJI Terra und Import in Leica Infinity). Die parallele Erfassung mit mehreren unabhängigen Messverfahren (GNS, UAV-LiDAR, PG, TLS) ermöglicht darüber hinaus eine gegenseitige Verifizierung der abgeleiteten Geländemodelle – ein methodisches Vorgehen, das sich mit dem systematischen Methodenvergleich zur Erfassung von Dünenerosion in physikalischen Modellversuchen nach Mehrtens, Vinkelau u. a. (2025) deckt. Die aufbereiteten Naturdaten bilden die Grundlage für die Simulationseinstellungen der Erosionsmodelle, verifizieren Messdaten Dritter und unterstützen die Validierung der Hindcast-Simulationen; die langfristige morphologische Einordnung des Untersuchungsgebietes erfolgt in Abschnitt 4.

4. Morphologische Auswertung historischer Zeitreihen im Untersuchungsgebiet

Die in diesem Kapitel dokumentierte Auswertung historischer Beobachtungsdaten liefert die morphologischen Vergleichs- und Validierungsgrößen für die Modellkalibrierung in AP 3.2 (vgl. Tabelle 1). Die morphologische Entwicklung des Untersuchungsgebietes wird anhand der Profildaten des TADK des StALU MM ausgewertet. Der betrachtete Küstenabschnitt bei Ahrenshoop (Fischland-Darß) umfasst 18 küstennormale Profile zwischen KKM F180.235 und KKM F184.715 aus 18 Messkampagnen der Jahre 2012 bis 2022: jährliche ALS-Befliegungen (Suffix *AL*; *A4* bezeichnet eine zusätzliche ALS-Befliegung im vierten Quartal 2018), terrestrische Vermessungen (numerische Datumscodes, z. B. *201701*) sowie eine Schorrevermessung im Jahr 2013 (*Sc*). Alle Höhen beziehen sich auf NHN; die vertikalen Bezugswerte des Pegels Warnemünde (PNP = −4,98 m NHN, MHW = 1,19 m NHN, MSL = 0,09 m NHN) wurden den Daten auf der Website der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) (2026) entnommen. Terrestrische Vermessungen, die die Dünenkrone nicht abdecken (2013, 201611, 201701, 201901), werden von der volumetrischen Auswertung ausgeschlossen.

4.1. Methodik der volumetrischen Auswertung

Für jeden Küstenabschnitt werden alle Vermessungen in ein gemeinsames küstennormales Koordinatensystem überführt (seewärtige Richtung links, x gespiegelt, vertikaler Maßstab 1:5 der Rohdaten entfernt). Da die einzelnen Vermessungen unterschiedliche Profilbereiche abdecken, wird je Abschnitt ein *gemeinsamer Datenbereich* bestimmt: Die landseitige Grenze x_{ref} entspricht der minimalen landwärtigen Ausdehnung, die vertikale Grenze z_{ref} der maximalen unteren Datengrenze aller berücksichtigten Vermessungen. Innerhalb dieses Fensters wird die Kronen-Vorderkante D_{Cx} als Position der maximalen Kronenhöhe D_{Cz} über alle Vermessungen definiert (Abbildung 30).

Das verfügbare Dünenvolumen V_D wird je Vermessung durch Trapezintegration des Profils oberhalb der MHW-Referenzlinie (1,19 m NHN) seewärts von D_{Cx} berechnet:

$$V_D = \int_{x \le D_{Cx}} \max\big(z(x) - \mathrm{MHW},\, 0\big)\, \mathrm{d}x. \tag{11}$$

V_D quantifiziert damit das oberhalb des mittleren Hochwasserstandes verfügbare Sedimentvolumen von Strand und Düne, vergleichbar mit Storm-Impact-Konzepten für Dünenküsten (Sallenger 2000; Larson, Erikson und Hanson 2004). Volumenänderungen zwischen aufeinanderfolgenden Vermessungen (ΔV_D, Differenz zum letzten gültigen Vorgänger je Abschnitt) werden den Messintervallen zugeordnet; negative Werte entsprechen dem in den XB-Analysen verwendeten Dünenerosionsvolumen $V_{D,ero}$. Intervalle, in die ein SHW am Pegel Warnemünde fällt (MV-Wetter 2023; Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) 2026), werden als sturmbeeinflusst klassifiziert. Die Signifikanz des Unterschieds zwischen sturmbeeinflussten und ungestörten Intervallen wird mit einem zweiseitigen Wilcoxon-Rangsummentest geprüft. Das Langzeitverhalten je Abschnitt wird über eine lineare Regression von V_D über die Zeit quantifiziert ($\mathrm{d}V_D/\mathrm{d}t$ in $\mathrm{m}^3/(\mathrm{m\,a})$) und mit dem Bestimmtheitsmaß R^2 bewertet.

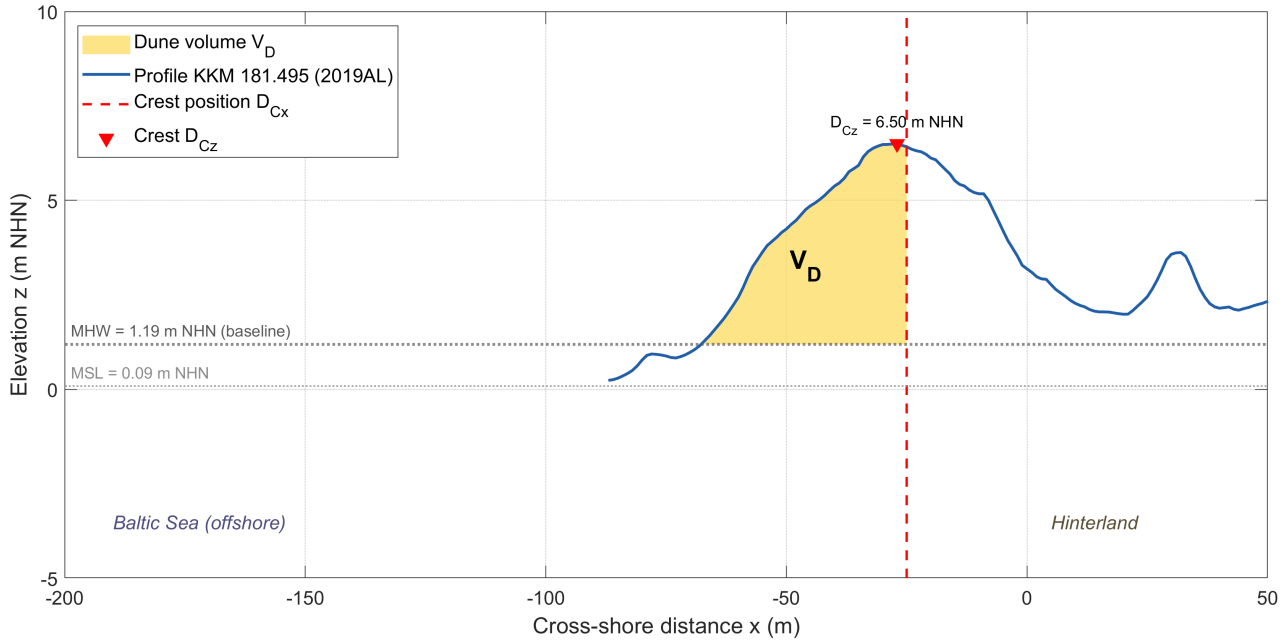


Abbildung 30: Definitionsskizze der volumetrischen Auswertung: verfügbares Dünenvolumen V_D (schraffiert) oberhalb der MHW-Referenzlinie seewärts der Kronen-Vorderkante D_{Cx} am Beispiel des Abschnitts KKM F181.495 (Vermessung 2019AL)

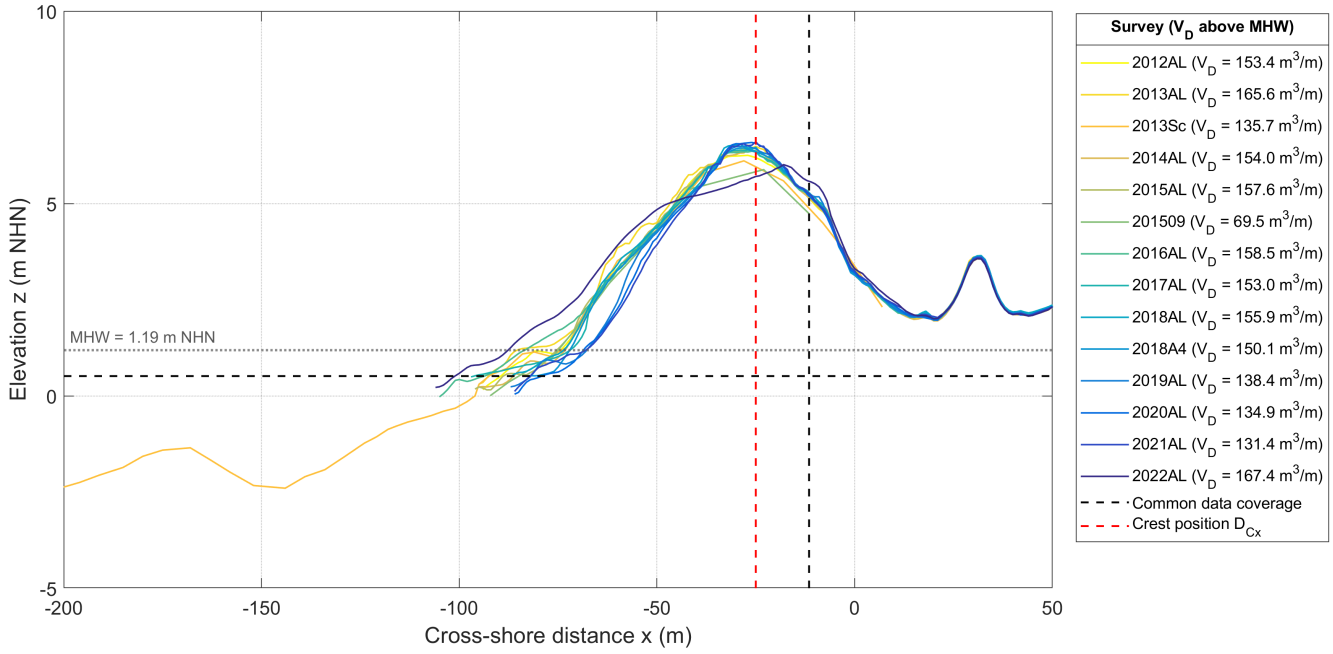


Abbildung 31: Dünenprofile des Abschnitts KKM F181.495 (2012 – 2022, seewärtige Richtung links). Schwarz gestrichelte Linien: gemeinsamer Datenbereich aller Vermessungen; rot gestrichelte Linie: Kronen-Vorderkante D_{Cx}; grau gepunktete Linie: MHW-Referenzlinie; Legendenwerte: V_D je Vermessung

4.2. Profilentwicklung und Volumenbilanz

Abbildung 31 zeigt exemplarisch die Profilentwicklung des Abschnitts KKM F181.495. Die chronologische Einfärbung (frühe Vermessungen gelb, aktuelle Vermessungen blau) zeigt einen signifikanten Wachstumstrend der Krone, gebrochen durch einen Rückgang in 2022. Der landwärtige Bereich

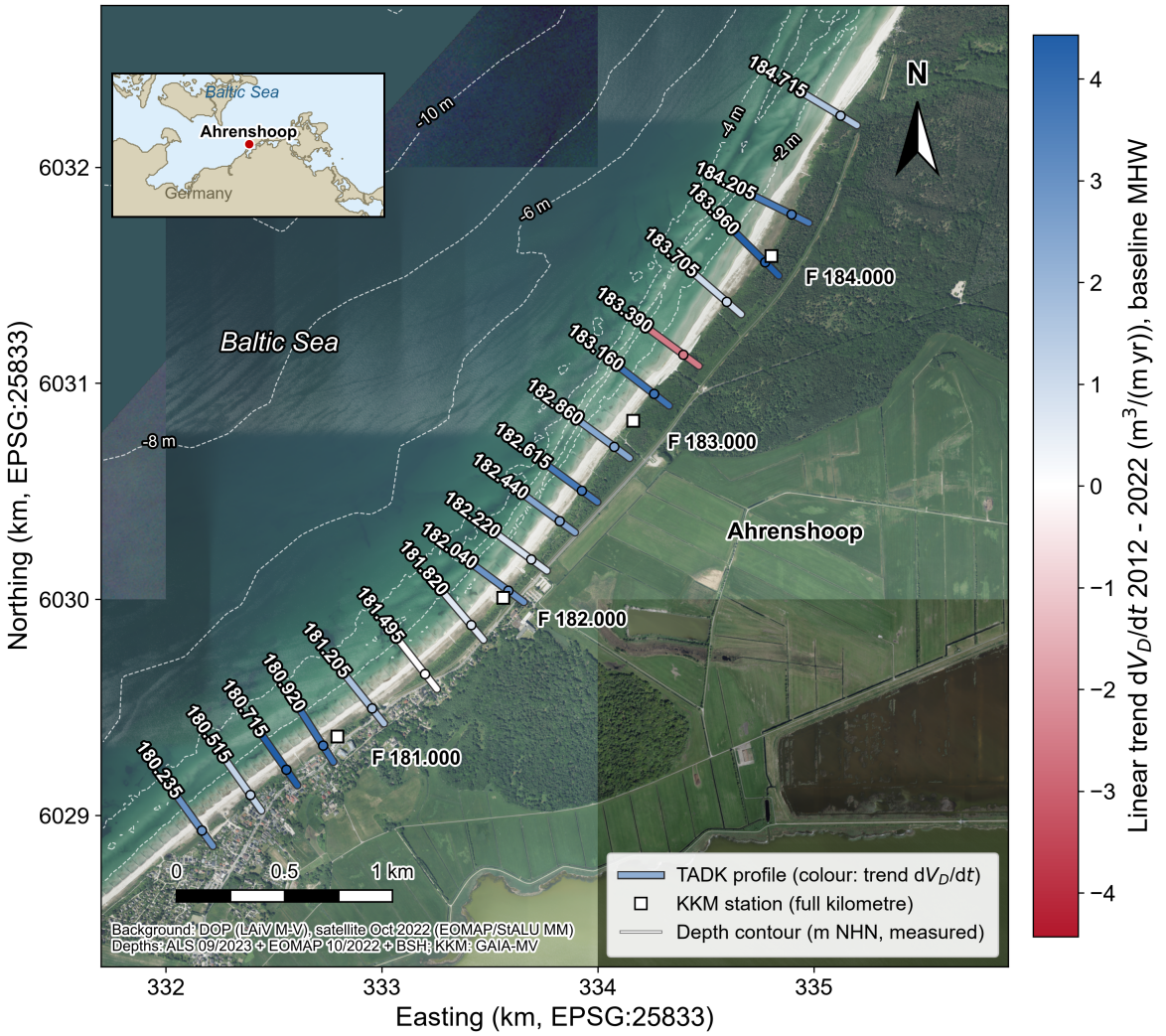


Abbildung 32: Lage der ausgewerteten TADK-Profile (KKM F180.235 bis F184.715) auf Grundlage der amtlichen Küstenkilometrierung mit Übersichtskarte der südwestlichen Ostsee; Färbung: linearer Trend des Dünenvolumens V_D 2012–2022 über MHW; Hintergrund: Digitales Orthophoto (DOP) (LAiV M-V) und Satellitenbild Oktober 2022 (EOMAP GmbH / StALU MM); Tiefenlinien: gemessenes Geländemodell aus ALS (09/2023), EOMAP-Satellitenbathymetrie (10/2022) und BSH-Daten

verändert sich kaum, während sich der Dünenfuß mit steigender Kronenhöhe landwärts verlagert. Die Ausnahme bildet hier wiederum 2022, wobei eine Akkumulation und Verschiebung seewärts erfolgte.

Die Lage der 18 ausgewerteten TADK-Profile im Küstenverlauf zeigt die Karte in Abbildung 32; die Färbung der Profile fasst dabei bereits die im Folgenden hergeleitete räumliche Entwicklung über die Messzeiträume als linearen Volumentrend 2012–2022 zusammen.

Die raum-zeitliche Verteilung des verfügbaren Dünenvolumens V_D (Abbildung 33) zeigt das für die Analyse ermittelte Referenzvolumen innerhalb der verfügbaren, räumlichen Abdeckung. Es spiegelt lediglich näherungsweise das tatsächlich vorhandene Volumen wieder. Zu erkennen ist jedoch ein küstenparalleler Gradient mit abnehmendem Dünenvolumen in nordöstlicher Richtung, was zur Topografie des Abschnittes passt. Deutlich wird auch das mit der Zeit zunehmende Dünenvolumen, insbesondere von 2021 auf 2022. Die Änderungsmatrix ΔV_D (Abbildung 34) hebt Erosionsphasen

(rot) und Akkretionsphasen (blau) hervor; letztere sind teilweise auf künstliche Strand- und Dünenaufspülungen zurückzuführen, die die sturminduzierten Verluste ausgleichen (Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern (MLUV M-V) 2009). Von 2021 auf 2022 erfolgte eine bekannte Aufspülung am Küstenabschnitt, die sich deutlich in den Daten abzeichnet. Nach Einschätzung des StALU MM unterliegt der gesamte Abschnitt – als derjenige mit der höchsten potentiellen Rückgangstendenz der Außenküste – durchgängig einer negativen natürlichen Sedimentbilanz; positive Volumenänderungen in den Zeitreihen sind demnach ausschließlich auf die direkten und indirekten Wirkungen der Aufspülungen zurückzuführen.

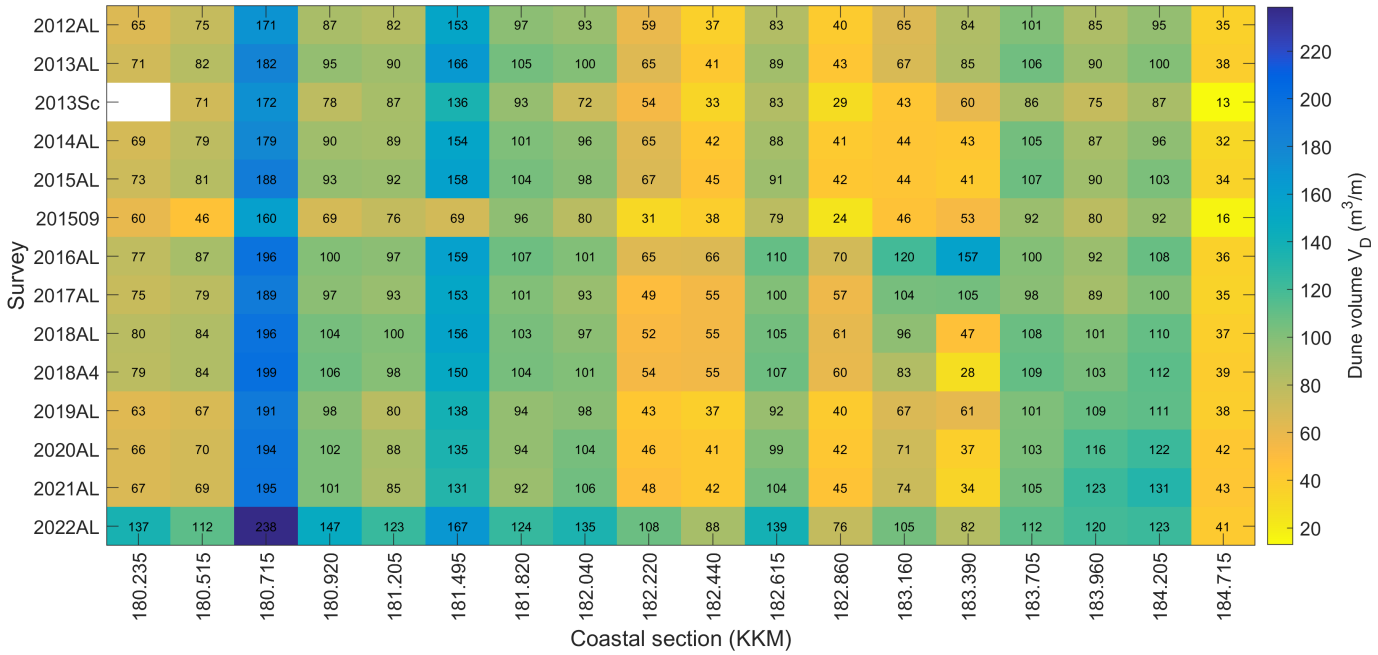


Abbildung 33: Verfügbares Dünenvolumen V_D über MHW je Küstenabschnitt und Vermessung aus den TADK-Daten (graue Zellen: keine gültigen Daten)

Das Langzeitverhalten (Abbildung 37, Tabelle 9) zeigt für die Mehrzahl der Abschnitte positive Trends von 1 bis 4,4 $m^3/(m\,a)$ – ein Effekt der regelmäßigen Aufspülungen – mit Ausnahme des Abschnitts KKM F183.390 ($-2{,}5$ $m^3/(m\,a)$), der nach 2019 zudem einen markanten Rückgang der Kronenhöhe D_{Cz} aufweist.

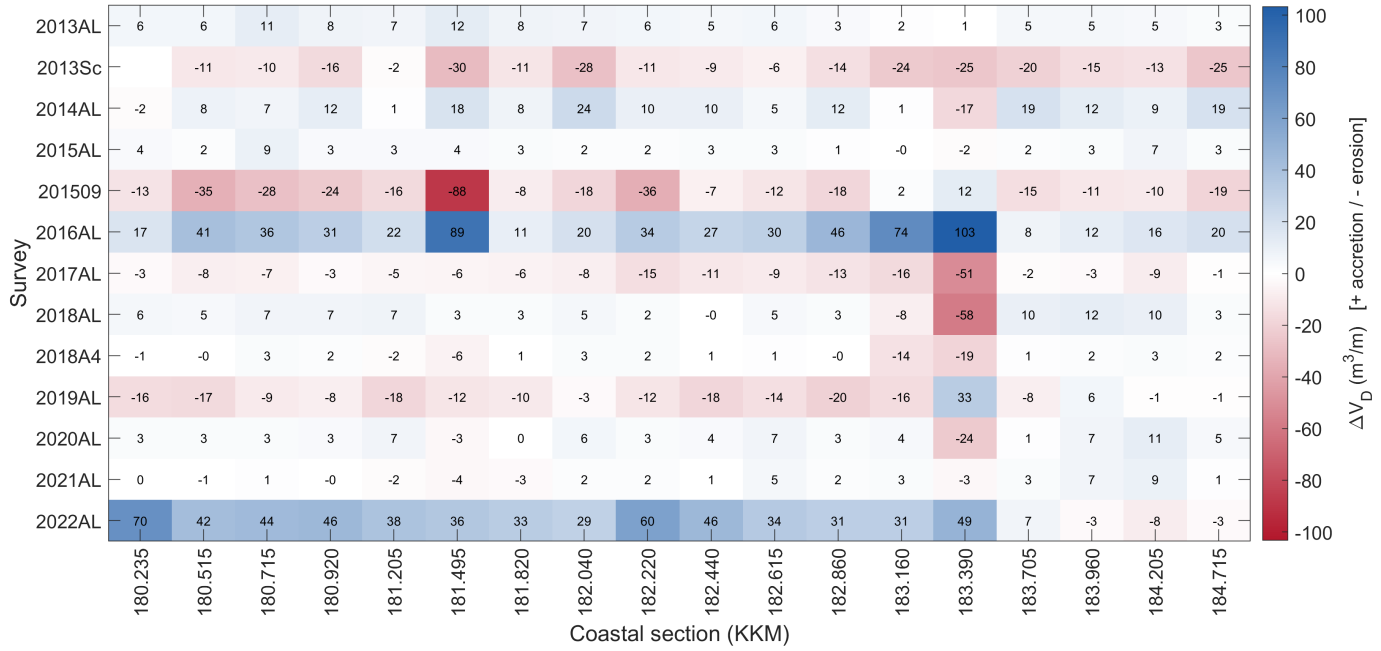


Abbildung 34: Änderung des Dünenvolumens ΔV_D zwischen aufeinanderfolgenden Vermessungen (blau: Akkretion, rot: Erosion); jede Zeile ist der späteren Vermessung des Intervalls zugeordnet

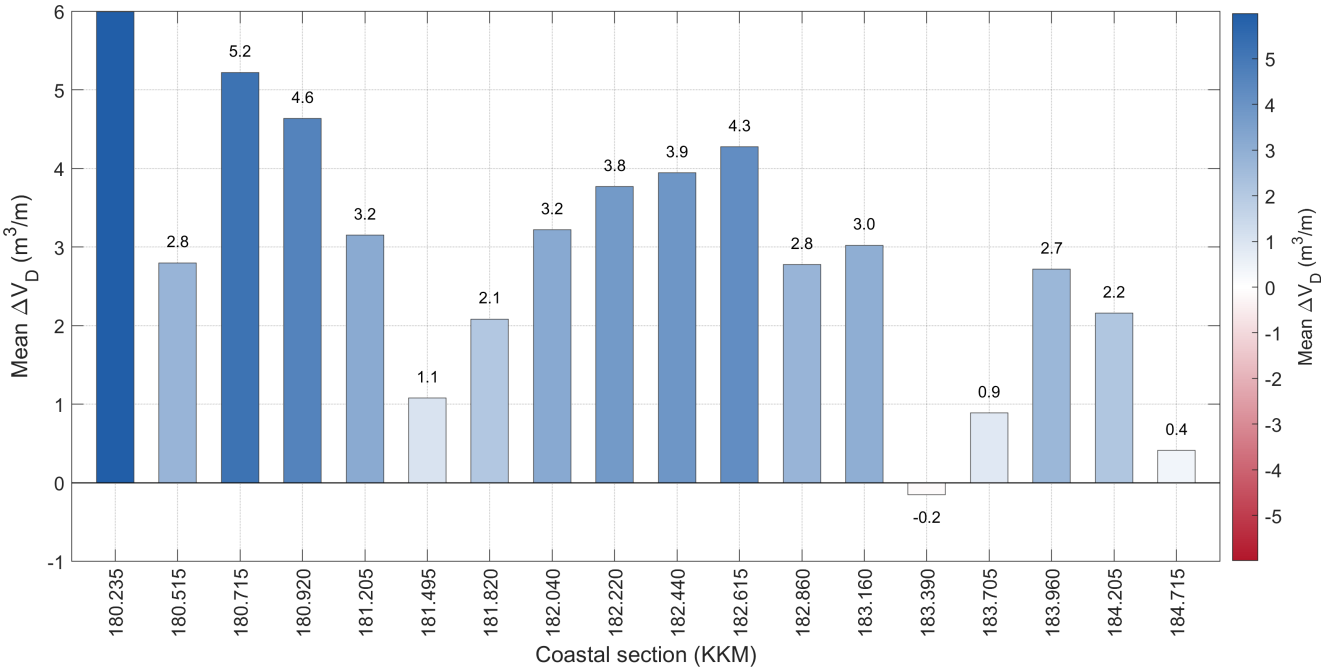


Abbildung 35: Mittlere Dünenvolumenänderung $\overline{\Delta V_D}$ je Küstenabschnitt über alle Messintervalle (2012 – 2022)

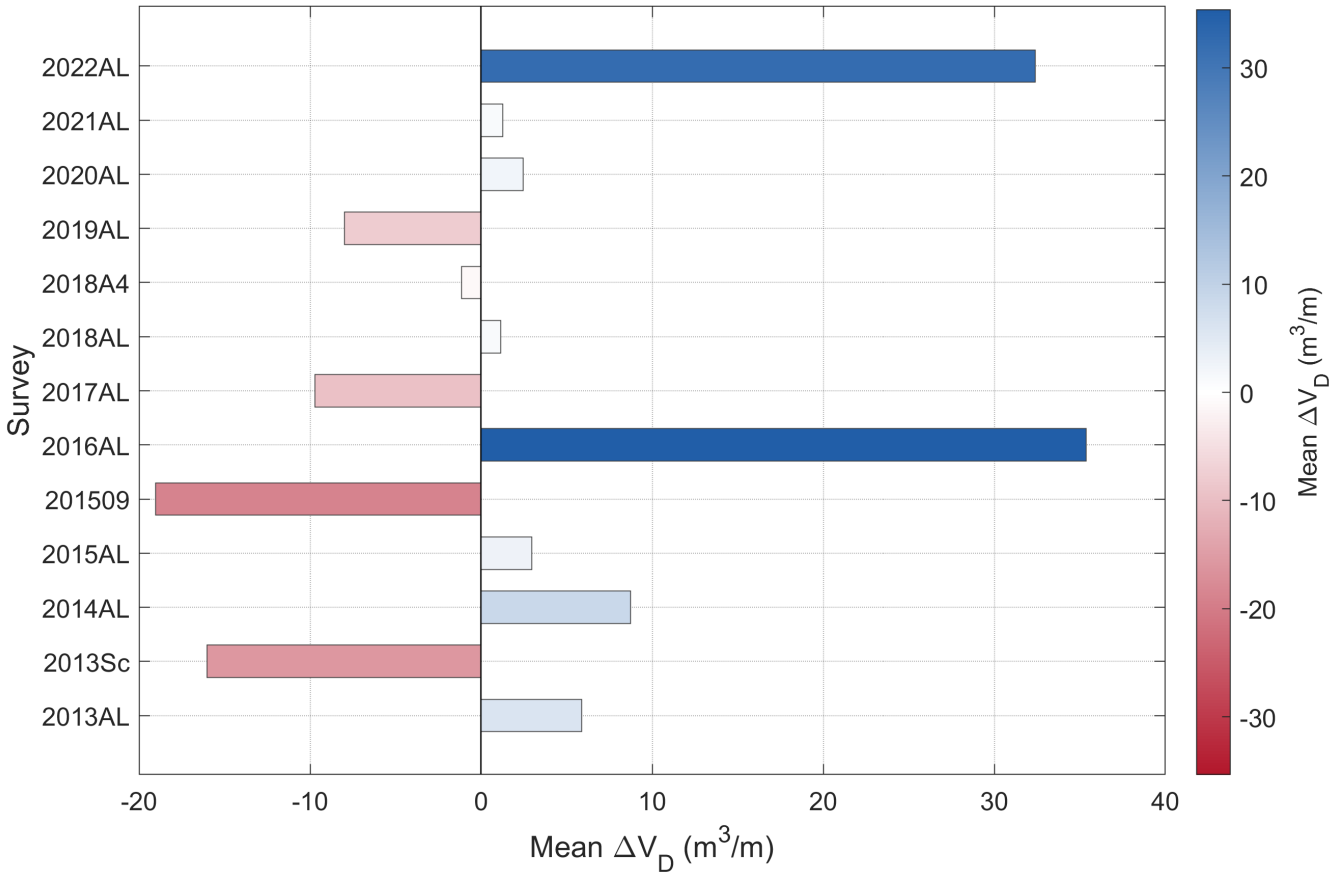


Abbildung 36: Mittlere Dünenvolumenänderung $\overline{\Delta V_D}$ je Vermessung über alle Küstenabschnitte

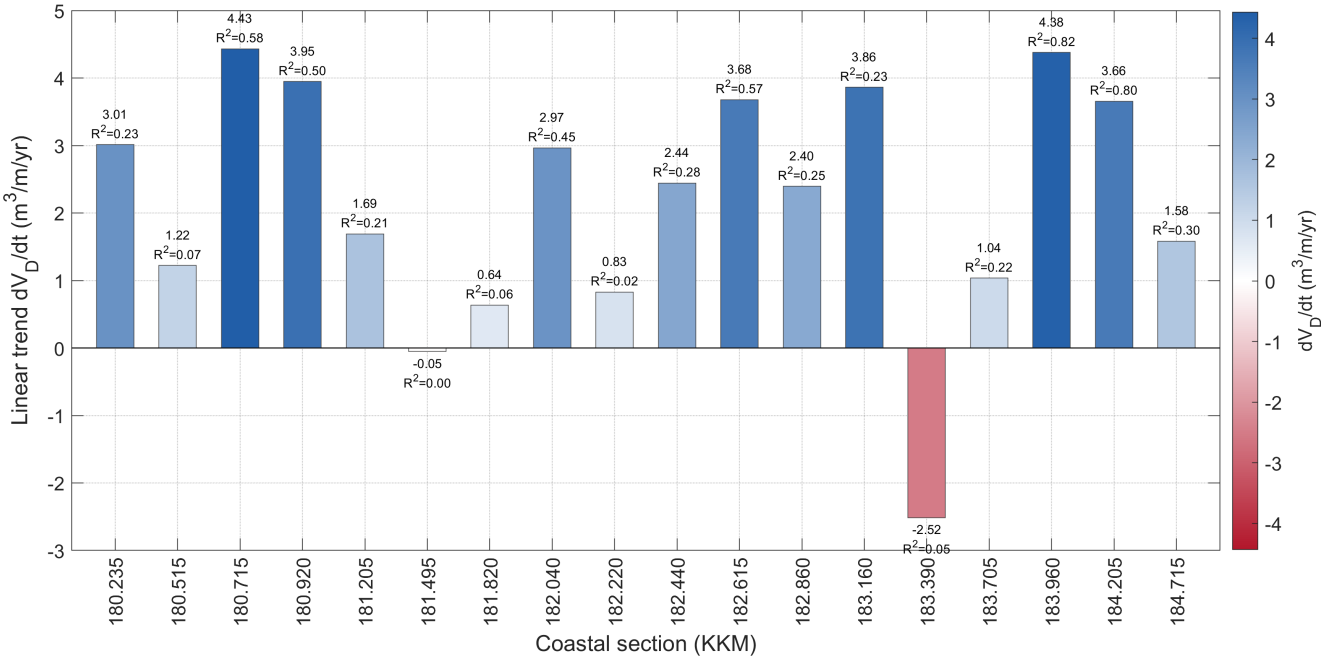


Abbildung 37: Linearer Trend $\mathrm{d}V_D/\mathrm{d}t$ des verfügbaren Dünenvolumens V_D je Küstenabschnitt (2012 – 2022) mit Bestimmtheitsmaß R^2

Tabelle 9: Mittleres Dünenvolumen V_D über MHW und lineare Trends je Küstenabschnitt (KKM 180.235–184.715, Ahrenshoop) aus den TADK-Vermessungen 2012–2022.

KKM	$\overline{V_D}$ (m³/m)	σ_{V_D} (m³/m)	$\mathrm{d}V_D/\mathrm{d}t$ (m³/(m a))	R^2 (–)
180.235	75.6	19.5	3.01	0.23
180.515	77.6	14.2	1.22	0.07
180.715	189.3	18.3	4.43	0.58
180.920	97.8	17.5	3.95	0.50
181.205	91.6	11.5	1.69	0.21
181.495	144.7	24.4	-0.05	0.00
181.820	101.1	8.3	0.64	0.06
182.040	98.1	13.9	2.97	0.45
182.220	57.5	17.7	0.83	0.02
182.440	48.2	14.6	2.44	0.28
182.615	97.9	15.3	3.68	0.57
182.860	47.8	14.9	2.40	0.25
183.160	73.5	25.1	3.86	0.23
183.390	65.5	34.9	-2.52	0.05
183.705	102.4	7.0	1.04	0.22
183.960	97.1	15.2	4.38	0.82
184.205	106.4	12.8	3.66	0.80
184.715	34.3	9.0	1.58	0.30

4.3. Einfluss der Sturmhochwasser

Die Zeitreihen von V_D und D_{Cz} (Abbildung 38) erlauben einen direkten Vergleich mit den SHW-Ereignissen am Pegel Warnemünde: 04.01.2017 (1,60 m über MSL, Sturm „Axel“) und 02.01.2019 (1,67 m über MSL, Sturm „Zeetje“) (MV-Wetter 2023; Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) 2026; Wolski u. a. 2014). Messintervalle mit SHW-Ereignis zeigen eine signifikant negativere Volumenänderung ($\overline{\Delta V_D} = -8{,}8$ m³/m, $n = 36$) als ungestörte Intervalle ($\overline{\Delta V_D} = +5{,}0$ m³/m, $n = 197$; Wilcoxon-Rangsummentest, $p = 7{,}1 \cdot 10^{-9}$), siehe Abbildung 39 und Abbildung 40.

Die aus den TADK-Vermessungen abgeleitete Volumenbilanz spiegelt damit das sturmgeprägte Verhalten der mikrotidalen südlichen Ostseeküste wider: episodische Verluste des verfügbaren Dünenvolumens V_D während der SHW-Ereignisse (Sallenger 2000; Wolski u. a. 2014), gefolgt von natürlicher Erholung und künstlichen Aufspülungen (Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern (MLUV M-V) 2009). Zu beachten ist, dass (i) der Absolutwert von V_D vom gemeinsamen Datenbereich abhängt und daher *zwischen* den Abschnitten bedingt vergleichbar ist, (ii) die exakten ALS-Befliegungstermine näherungsweise angesetzt wurden (Frühjahrsbefliegungen angenommen) und (iii) Aufspülvolumina das natürliche Signal überlagern. Die beobachteten sturminduzierten Verluste ($\Delta V_D < 0$) liefern die Validierungsgröße $V_{D,ero}$ für die XB-Simulationen in Abschnitt 5 (D. Roelvink, Reniers u. a. 2009; Larson, Erikson und Hanson 2004; Thiel de Vries 2009).

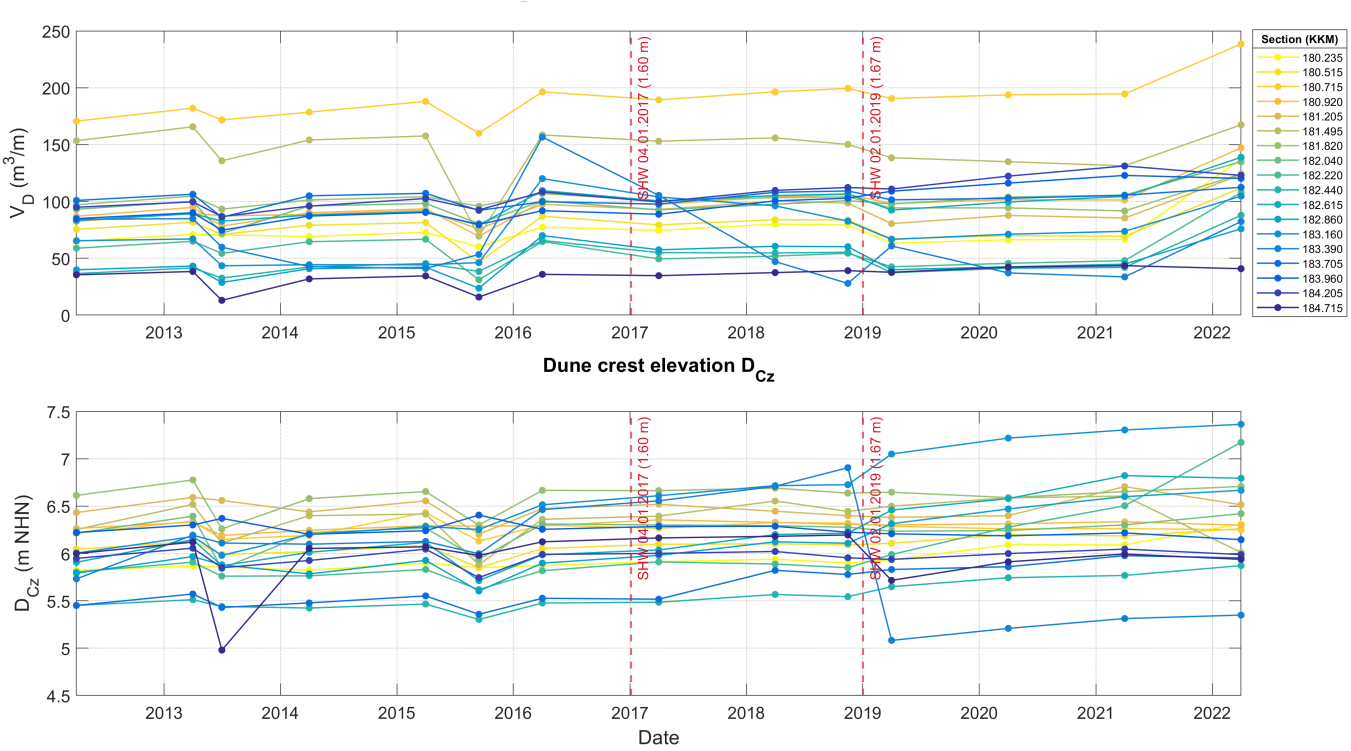


Abbildung 38: Zeitliche Entwicklung des verfügbaren Dünenvolumens V_D (oben) und der Dünenkronenhöhe D_{Cz} (unten) je Küstenabschnitt; rot gestrichelte Linien: SHW-Ereignisse am Pegel Warnemünde mit Scheitelwasserstand über MSL

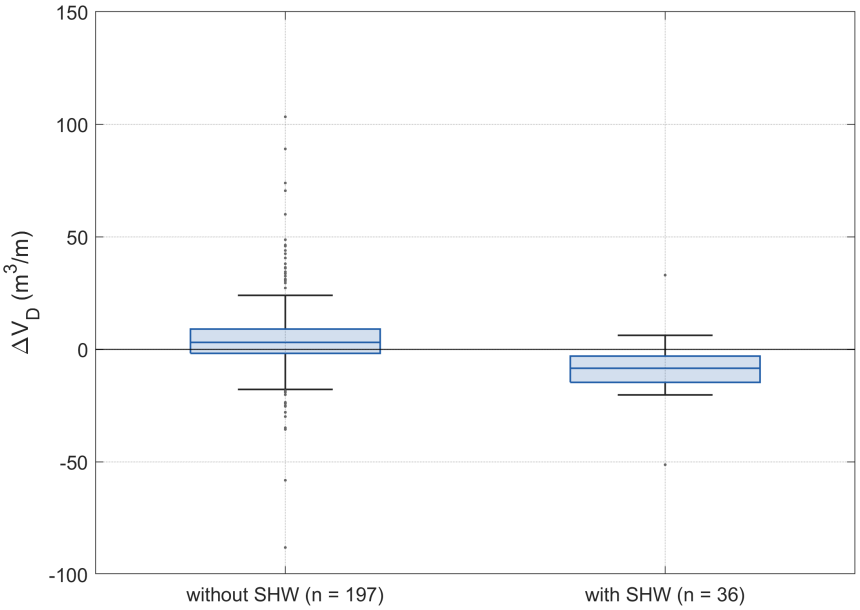


Abbildung 39: Verteilung von ΔV_D für Messintervalle mit und ohne SHW-Ereignis, Wilcoxon-Rangsummentest: $p = 7{,}1 \cdot 10^{-9}$ (alle Abschnitte zusammengefasst)

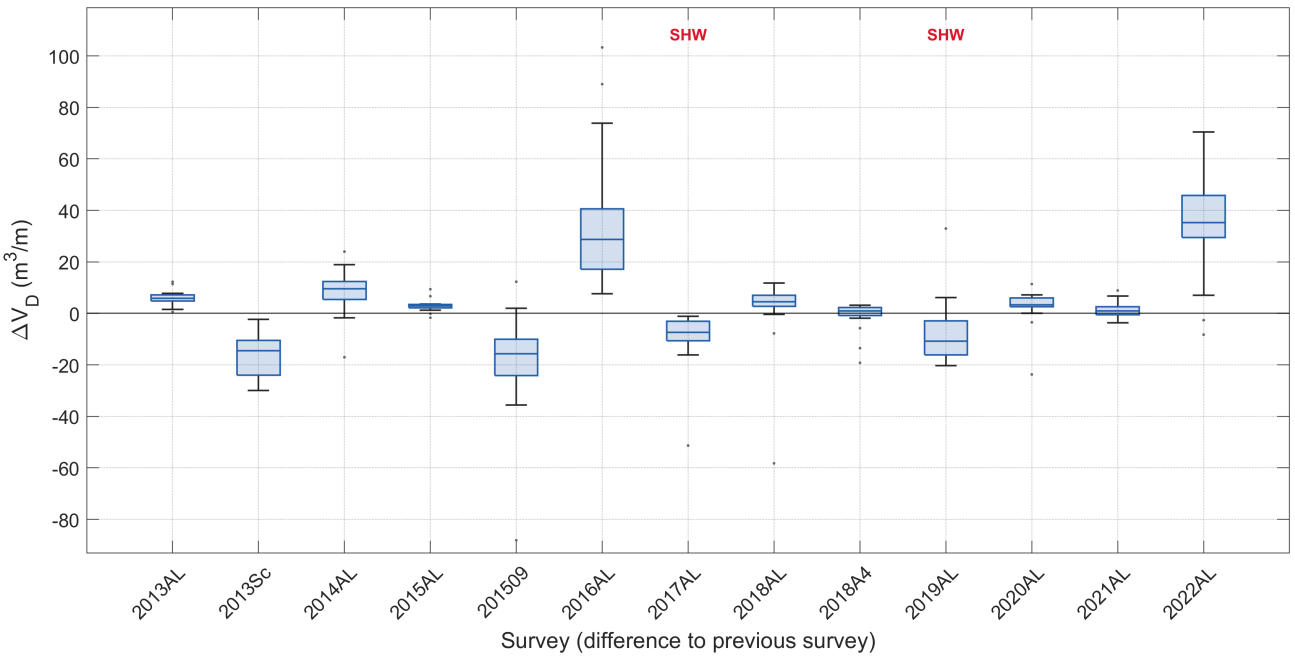


Abbildung 40: Verteilung von ΔV_D über alle Küstenabschnitte je Messintervall; sturmbeeinflusste Intervalle sind markiert (SHW)

5. Hydro-Morphodynamisches Dünenerosionsmodell

Dieses Kapitel beschreibt den Aufbau des hydro-morphodynamischen Dünenerosionsmodells gemäß AP 3.1 sowie die systematische Untersuchung des Parameterraums gemäß AP 3.3 in Unterabschnitt 5.4 (vgl. Tabelle 1).

5.1. Eingangsdaten und Modelldomain

5.1.1. Hydraulische Randbedingungen

In der Tabelle 10 sind die Referenzwasserstände der aktuellen Referenzperiode für das Modellgebiet Ahrenshoop aufgeführt (hier gewählt: Pegel Warnemünde). Die RHW- und BHW-Werte entsprechen dem für die Dekade 2021–2030 gültigen Bemessungskonzept (RKMV 2022b); der BHW beinhaltet das Vorsorgemaß von 1,00 m (RKMV 2022a). In der Modellierung wird für Höhenangaben durchgängig die Bezugshöhe NHN verwendet. Der PNP liegt hier bei −4.98 m NHN.

Tabelle 10: Referenzwasserstände und Messperiode für das Modellgebiet Ahrenshoop bezogen auf PNP und NHN (DHHN 2016) des Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt (WSA) Ostsee aus `pegelonline.wsv.de`; RHW/BHW für die Dekade 2021–2030 nach RKMV (2022b)

Wasserstand	Höhe in m PNP	Höhe in m NHN	Referenzperiode
HW	6.67	1.69	02.01.2019 (01.11.2010 - 31.10.2020)
MHW	6.17	1.19	01.11.2010 - 31.10.2020
MNW	4.07	-0.91	01.11.2010 - 31.10.2020
MW	5.07	0.09	01.11.2010 - 31.10.2020
NW	3.86	-1.12	29.11.2018 (01.11.2010 - 31.10.2020)
RHW	7.28	2.30	Dekade 2021 - 2030 (Messdaten bis 2010)
BHW	8.28	3.30	RHW + 1.00 m Vorsorgemaß

Der Polarplot in der Abbildung 41 vermittelt einen Eindruck der Seegangsverhältnisse vor Warnemünde – aufgrund der kurzen Entfernung und ähnlichen Küstenausrichtung übertragbar auf den Standort Ahrenshoop. Dargestellt ist die Häufigkeitsverteilung der Wellenanlaufrichtungen und der korrespondierenden, signifikanten Wellenhöhen aus einem phasen-gemittelten Seegangsmodell des Deutscher Wetterdienst (DWD) in der Referenzperiode von 1996 bis 2005 (RKMV 2012). Der stärkste und häufigste Seegang tritt entsprechend der Exposition sowie statistisch häufiger auftretender Westwinde von nordwestlich-westlicher Richtung auf. Die geschützte Lage in der Mecklenburger Bucht verhindert die größten Seegangseinwirkungen aus der mittleren Ostsee von Nordosten her. Entsprechend ist auch signifikanter Windstau meist erst bei Oststürmen zu erwarten, dessen Maximum jedoch erst weiter westlich Richtung Lübecker Bucht / Flensburg erreicht wird.

Wesentlich für die Analysen zur Klimaanpassung sind lokale Projektionen von ΔMSL, welche sich direkt den Entwicklungspfaden (SSP's) zuordnen lassen. Auf Grundlage der interaktiven Karte des DAS-Basisdienstes (`https://das.bsh.de`) konnten für den Standort Ahrenshoop folgende ΔMSL

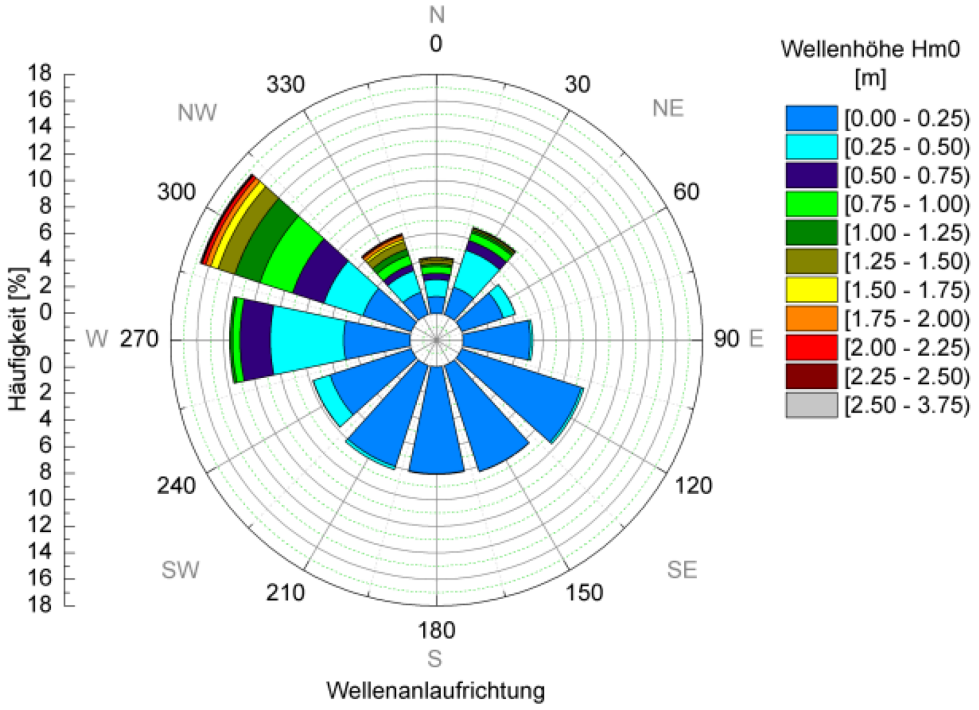


Abbildung 41: Häufigkeitsverteilung der Wellenanlaufrichtungen und signifikanten Wellenhöhen H_{m0} für Warnemünde (nahe Ahrenshoop) in der Referenzperiode von 1996 bis 2005 (RKMV 2012)

ausgelesen werden, die in Tabelle 11 aufgeführt sind. Der erste Wert steht für das Jahr 2050, der zweite für das Jahr 2100.

Tabelle 11: Meeresspiegelanstieg für Klimaszenarien bei Ahrenshoop

Szenario	ΔMSL **2050** **m**	ΔMSL **2100** **m**
SSP119	+0.21	+0.41
SSP126	+0.23	+0.46
SSP245	+0.25	+0.59
SSP370	+0.25	+0.68
SSP585	+0.27	+0.80

Der MW für die aktuelle Referenzperiode liegt bei 0.09 m NHN für 2025 und dient als Referenz für die Untersuchung von Klimaszenarien bei Ahrenshoop. Der für ein modelliertes Extremereignis angesetzte Wasserstand ist die Summe aus dem RHW und des ΔMSL für ein zugrundeliegendes SSP.

5.1.2. Topobathymetrie des 2DH-Modells aus Naturdaten

Das Modellgebiet (Domain) für die 2DH-Simulation am Abschnitt Ahrenshoop ist beispielhaft in Abb. 42 veranschaulicht. Diese umfasst eine kombinierte Darstellung der Topobathymetrie aus den Datensätzen: ALS 09/2023, EOMAP 10/2022 und BSH 1998 in Bereichen mit einer Tiefe von mehr als 4 m bezogen auf NHN. Außerdem das verwendete Berechnungsgitter und das referenzierte Profil nach dem Sturm im Okt. 2023, einschließlich der markierten Randbedingungen

aus der MIKE21-Simulation. Die Domain ist in der Küstenlängsrichtung (y) 1460 m breit und in der Küstenquerrichtung (x) 854 m (x, y im lokalen XB-Gitterkoordinatensystem). Der Ursprungspunkt (*origin point*) ist an der westlichen Ecke der seewärtigen (engl. offshore) Randbedingung definiert.

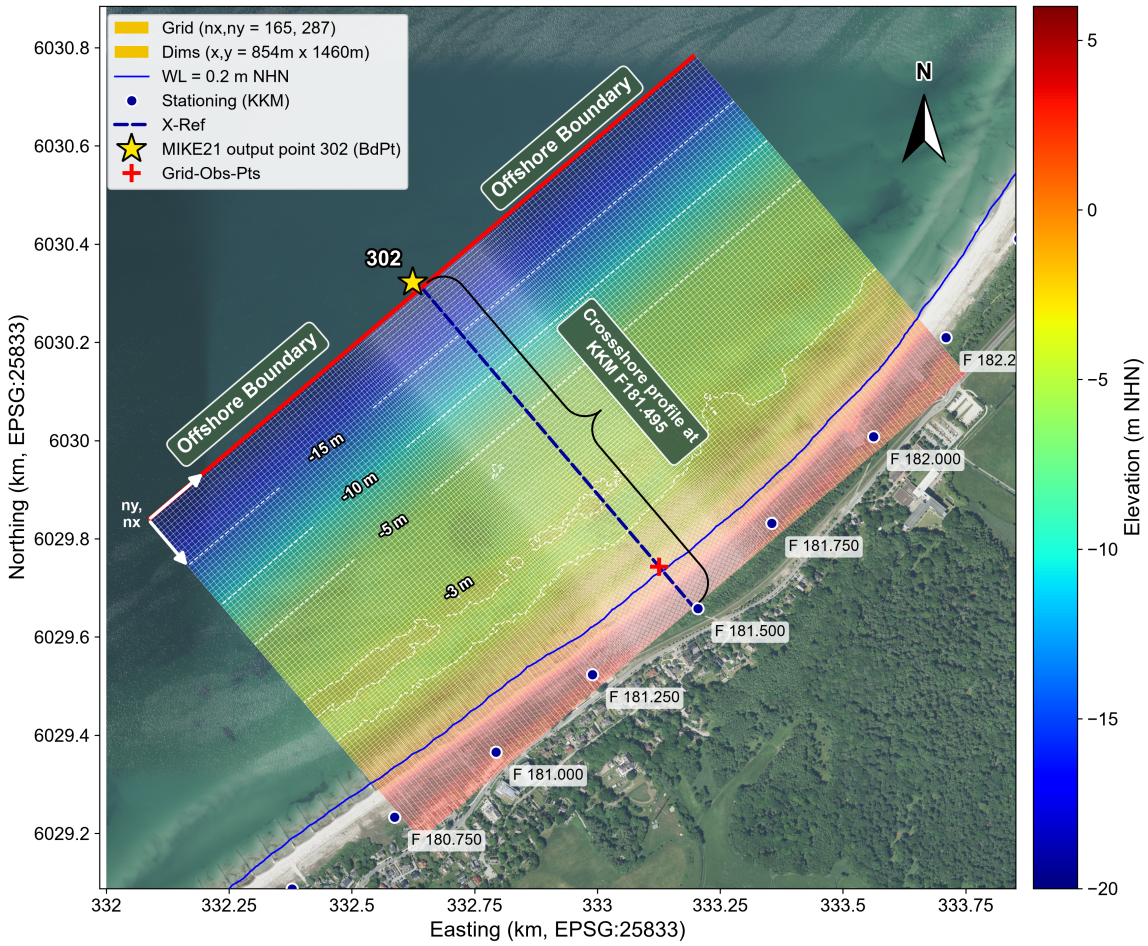
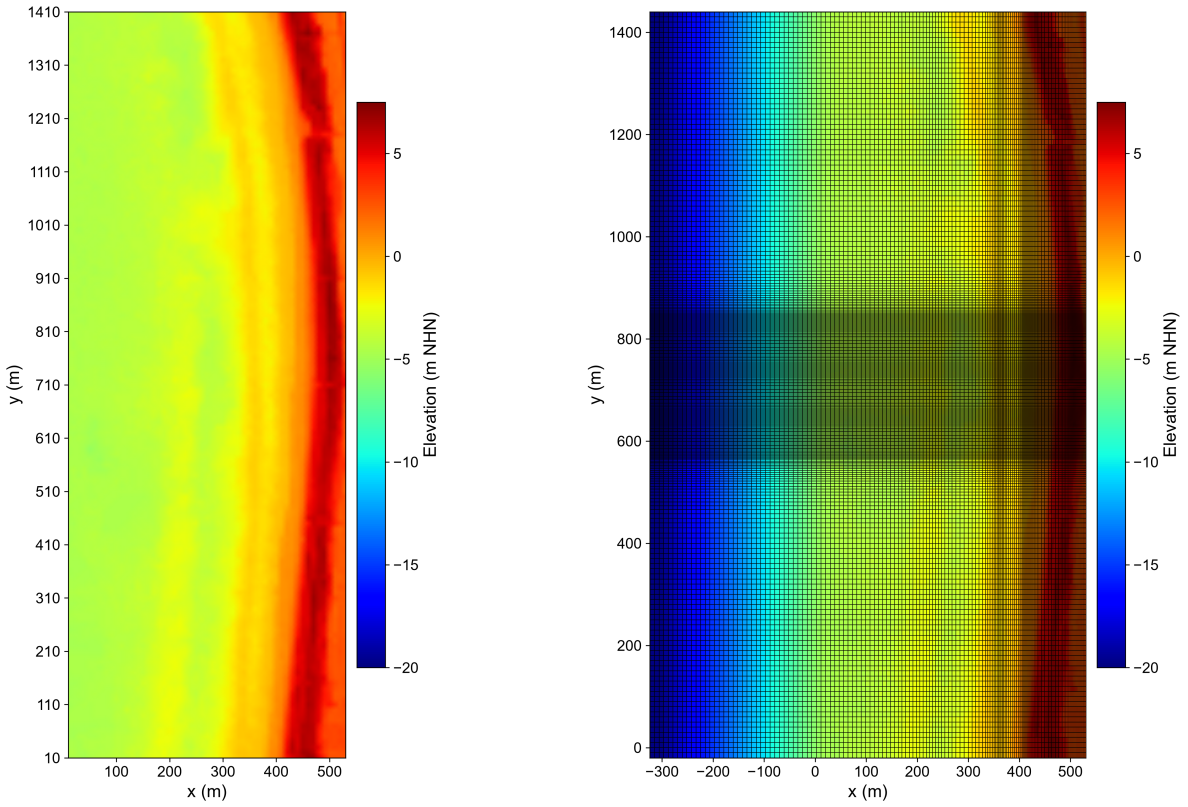


Abbildung 42: Modellbereich, inkl. RB aus MIKE21 in Pt. 302, seewärtige RB (rote Linie), Topo-Bathymetry in m NHN, Küstenlinie (WL) auf 0.2 m NHN, Berechnungsnetz (Zellanzahl: nx, ny und x, y-Dimensionen in m), Beobachtungspunkte (Grid-Obs-Pts, #1=küstennah, #2=seewärtig), gemessenes Referenzprofil X-Ref aus AH5P nach dem Ereignis (10/2023) am KKM F181.495; Tiefenlinien in m NHN (seewärts konstruktionsbedingt begradigt, −3 m = gemessene Sandbankmorphologie)

Der erste Schritt zur Topobathymetrie beinhaltete die Aufbereitung der vorhandenen Datensätze (ALS 09/2023, EOMAP 10/2022 und BSH 1998). Insbesondere das ALS erforderte zunächst ein Ausdünnen der Punktwolke, das Herausfiltern von Ausreißern, Vegetation und der Wasseroberfläche. Die Wasserlinie (hier z = 0.2 m NHN) diente dabei als Trennlinie zwischen EOMAP (wasserseitig) und dem ALS (landwärts). Für eine saubere Interpolation dürfen sich die jeweiligen Datenpunkte nicht überschneiden. Die BSH-Bathymetrie schließt sich an die seewärtige Grenzlinie von EOMAP an. Die vorhandenen Messwerte wurden so bestmöglich kombiniert. Die Abbildung 43(a) zeigt die Topobathymetrie ausschließlich auf Grundlage der Messwerte.

Die Güte des wasserseitigen Anteils dieser Topobathymetrie ließ sich nachträglich anhand der GNSS-Bathymetriepunkte quantifizieren, die beim Messeinsatz vom 21.03.2023 watend zwischen den Buhnenfeldern aufgenommen wurden (vgl. Abschnitt 3.2). Verglichen wurden die drei vorliegenden EOMAP-Epochen (10/2021, 03/2022 und 10/2022) mit den Punkten im Nassbereich; da die

Satellitenbathymetrie auf das Niedrigwasserdatum *Lowest Astronomical Tide* bezogen ist, wurde der Datumsversatz nicht angenommen, sondern aus den Punkten selbst geschätzt. Er beträgt für die beiden jüngeren Epochen −0,15 bzw. −0,25 m und liegt damit in der für die Ostsee plausiblen Größenordnung. Entscheidend ist die verbleibende Streuung: Für die Epoche 03/2022 beträgt sie lediglich 0,18 m ($n = 50$, Interquartilsabstand 0,20 m), für 10/2022 0,23 m. Die satellitengestützte Bathymetrie unterschreitet damit im küstennahen Flachwasser deutlich die vom Anbieter selbst ausgewiesene vertikale Unsicherheit von rund 0,56 m und ist für die Modellaufbereitung in diesem Tiefenbereich als belastbar einzustufen. Ein Teil der verbleibenden Differenz ist zudem nicht messtechnisch, sondern morphologisch bedingt, da zwischen Satellitenaufnahme und GNSS-Vermessung fünf bzw. zwölf Monate liegen. Die älteste Epoche 10/2021 fällt mit einem Datumsversatz von −1,51 m und einer dreifach höheren Streuung deutlich aus dem Rahmen und wurde daher für die Modellaufbereitung nicht herangezogen.



(a) Topobathymetrie basierend auf Messwerten aus ALS 09/2023, EOMAP 10/2022 und BSH 1998

(b) Konstruierte und modifizierte Topobathymetrie inklusive Berechnungsnetz für XB-2DH

Abbildung 43: Konstruktion und Erweiterung der Topo-Bathymetrie für das 2DH-Erosionsmodell aus Naturdaten und des zugehörigen Berechnungsnetzes am KKM F181.495

Das lokale x, y-Gitterkoordinatensystem wird an der Küstenlinie ausgerichtet, wobei ein Referenzprofil (mittig im Berechnungsgitter) aus AH5P den Winkel orthogonal zur Küste (parallel zur y-Achse) bestimmt. Zunächst wird ein gleichmäßiges Berechnungsnetz über das gesamte Modellgebiet gelegt, wobei der Ursprungspunkt sich an den festgelegten Dimensionen der Domain orientiert. Um Rechenzeit zu sparen und die Dünenerosionsprozesse ausreichend auflösen zu können, wurde auf Grundlage von Δx_{min}, der Courantzahl und einer angenommenen Wellenperiode das Rechennetz tiefenabhängig und variabel verfeinert. Dabei kam die Matlab-Funktion *xb_grid_xgrid.m* aus der Open Earth Toolbox von Deltares (OET) zum Einsatz. Die Stützpunkte des feineren Netzes werden nun noch einmal mit der Topobathymetrie interpoliert. Am Referenzprofil verdichten sich die

ursprünglich gleichmäßigen Gitterpunkte des groben Netzes durch die tiefenabhängige Anpassung im dünen- und strandnahen Bereich deutlich, während sie seewärts in größerem Abstand verbleiben. Außerdem wurde mit *xb_grid_ygrid.m* der mittlere Bereich der Domain in y-Richtung verfeinert. Für hochauflösende Modelle, z. B. für eine detaillierte Animation, sind Zellgrößen von 1 m x 1 m zu empfehlen. Für die Berechnung von Simulationsclustern ergab die Auflösung von 2 m x 2 m einen guten Kompromiss zwischen der Netzgrößenkonvergenz und Rechenzeit. Eine präzise Kalibrierung kann ausschließlich mit entsprechend hoher Auflösung erfolgen und ist für jede der beiden Auflösungen separat erfolgt.

In einem letzten Schritt muss die Einhaltung der Mindestwassertiefe und das horizontal auslaufende Profil an der seewärtigen Randbedingung gewährleistet werden. Über die Matlab-Funktion *xb_grid_finalise2.m* aus der OET wird zunächst das Profil von ca. -5 m NHN auf eine Tiefe von -20 m NHN hin erweitert, zur Randbedingung begradigt und mit zusätzlichen, horizontalen Stützpunkten seewärts versehen (siehe finales 3D-Modell in Abbildung 45). Diese künstliche Verlängerung ist ausdrücklich keine Abbildung der realen Schorre – eine Wassertiefe von 20 m tritt in der Natur erst deutlich weiter seewärts auf; sie dient allein der sauberen numerischen Einsteuerung der Wellenrandbedingungen und hat aufgrund des horizontalen Verlaufs im Tiefwasser keinen Einfluss auf die morphodynamischen Ergebnisse im küstennahen Bereich. Um den Grenzpunkt für die Einspeisung der hydraulischen Randbedingungen aus MIKE21 oder dem Sturmhochwassergenerator zu treffen, muss das Gitter entweder mit zusätzlichen Zellen seewärts erweitert oder eingekürzt werden. Ebenfalls war es notwendig, die Dünenkrone ca. 100 m landwärts zu erweitern, damit alle Gitterzellen am landwärtigen Rand gefüllt sind (sonst fehlerhafte Berechnung). Außerdem war es nicht von Interesse, einen Dünendurchbruch zu erzeugen, sondern das benötigte Dünenvolumen zu ermitteln. Auch deshalb ist ein künstlicher Reserveteil sinnvoll.

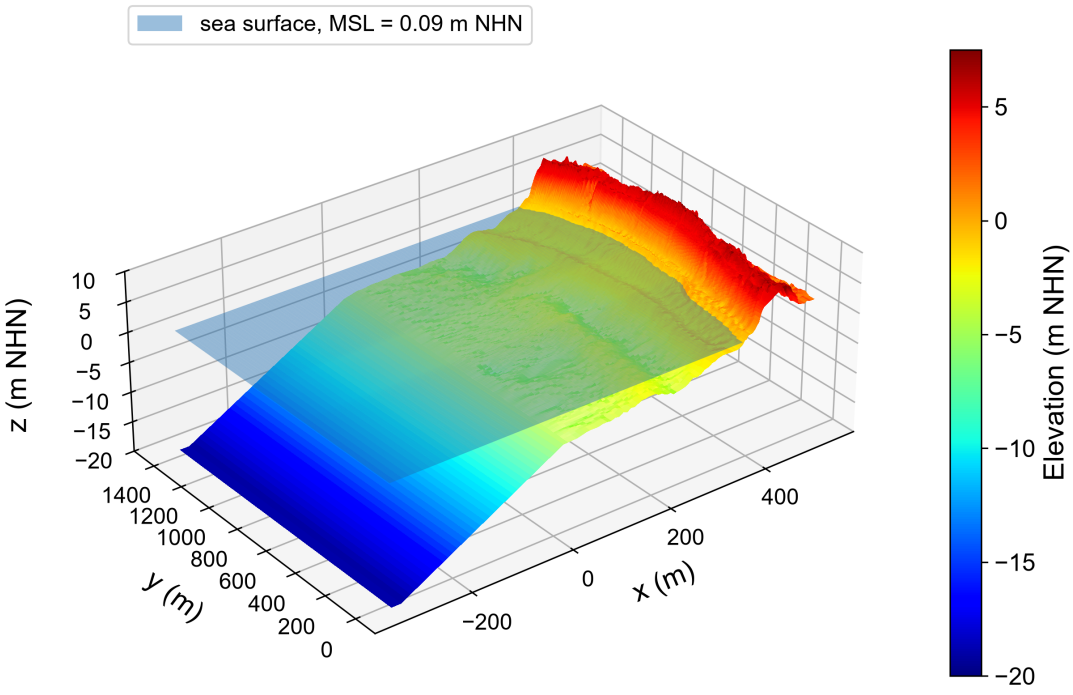


Abbildung 45: Final modifizierte (erweiterte, vertiefte und abgeflachte) Topobathymetrie für KKM F181.495 im 3D-Modell

5.1.3. Topobathymetrie des 2DH-Modells mit standardisierten Querprofilen (Bruun-Regel)

Für eine standardisierte Topobathymetrie einer 2DH-Simulation (Sim V9_11) unter Annahme von Gleichgewichtsprofilen nach der Bruun-Regel wurde ein konstruktiver Algorithmus eingeführt. Dieser nutzt die Küstennormalen für die Translation längs zur Küste und die Topobathymetrie der Messdaten aus ALS 09/2023, EOMAP 10/2022 und BSH 1998 als Referenz für die Translation orthogonal zur Küstenlinie. Unter Angabe von $D_{Tz,ini}$, $D_{Cz,ini}$, D_{Bz}, D_{50} sowie der lokalen Wellenparameter $H_{12h/y}$ und $T_{12h/y}$ wird dadurch ein standardisiertes Gleichgewichtsprofil mit einem Dünenkörper aus den geometrischen Parametern (nach StALU MM) kombiniert. Die Einbindetiefe wird auf -20 m NHN gesetzt und zur seewärtigen RB geglättet.

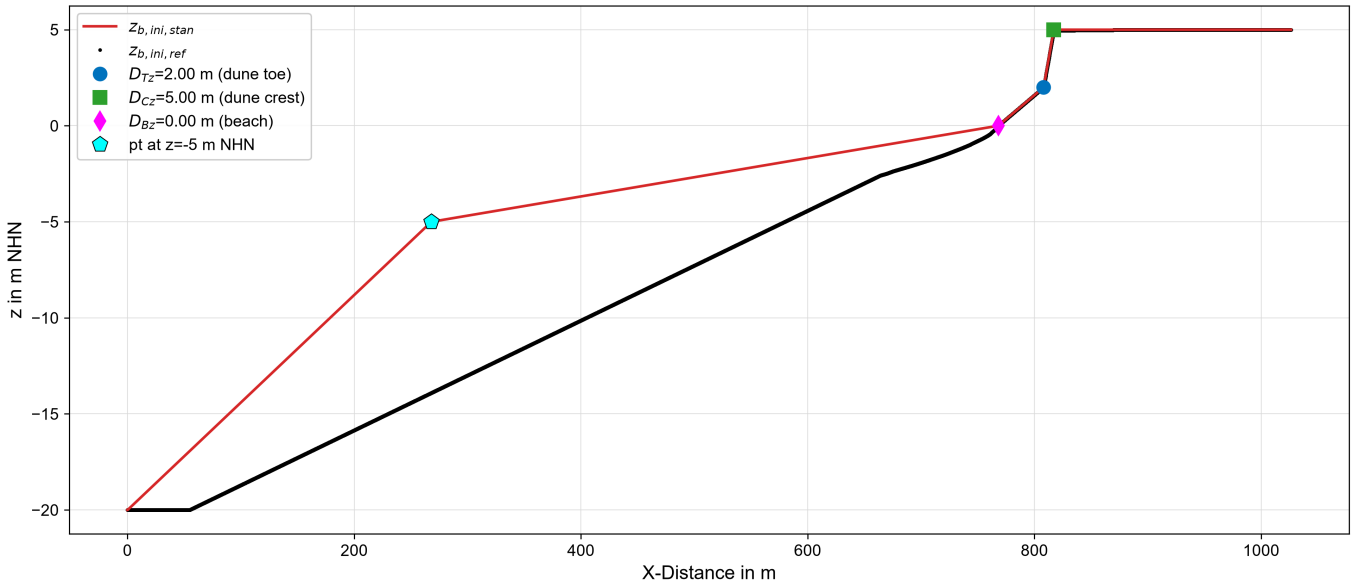


Abbildung 46: Vergleich eines linearen, standardisierten Küstenquerprofils mit einem Bruun-Profil für KKM F181.495 (Dünenfußhöhe = 2 m, Kronenhöhe = 5 m, Bermenhöhe = 0 m NHN)

Zur Veranschaulichung wird in Abbildung 46 das konstruierte Bruun-Profil mit dem ursprünglichen linearen Standardprofil verglichen und die gleichen Dünenparameter zugrunde gelegt. Es verläuft im Unterwasserbereich wesentlich stetiger, aber auch steiler.

Für jedes gemessene Profil (hier Nr. 1 -25) wird ein solches Bruun-Profil am Punkt z= 2 m NHN eingefügt und längs zur Küstennormalen ausgerichtet. In der 3D-Skizze in der Abbildung 47 ist der Referenzpunkt mit einer roten Raute markiert. In grau sind die originalen Messdaten angegeben, in bunt die neuen durchnummerierten Profile.

Jetzt liegen entlang der Küstennormalen standardisierte Bruun-Profile vor, die nun jedoch in ein DGM umgewandelt werden müssen. Bei der Interpolation spielt Abstand und die Dichte der Höhenpunkte eine große Rolle, welche jedoch noch als Küstennormalen sehr ungleichmäßig verteilt sind. Abhilfe schafft die Konstruktion von Splines als Isobaren (Höhenlinien) parallel zur Küstenlinie, wie in Abbildung 48(a) gezeigt. Die Höhe der Splines sollte manuell gewählt werden, da insbesondere im Uferbereich eine höhere Auflösung nötig ist.

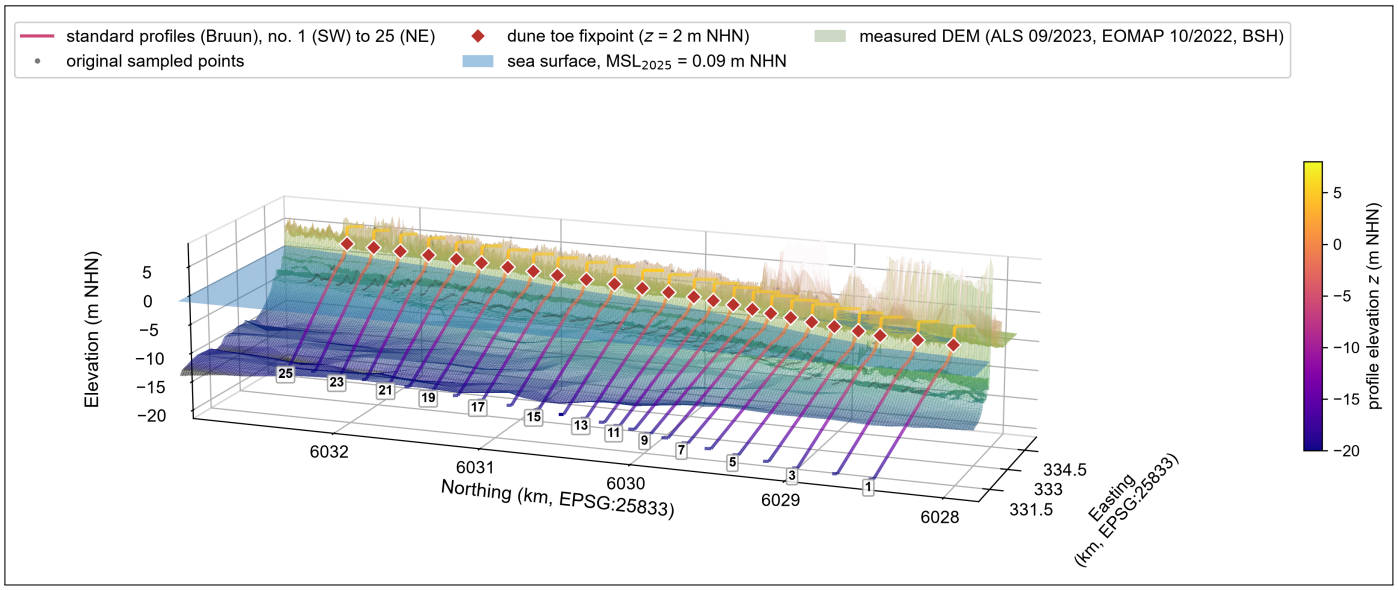
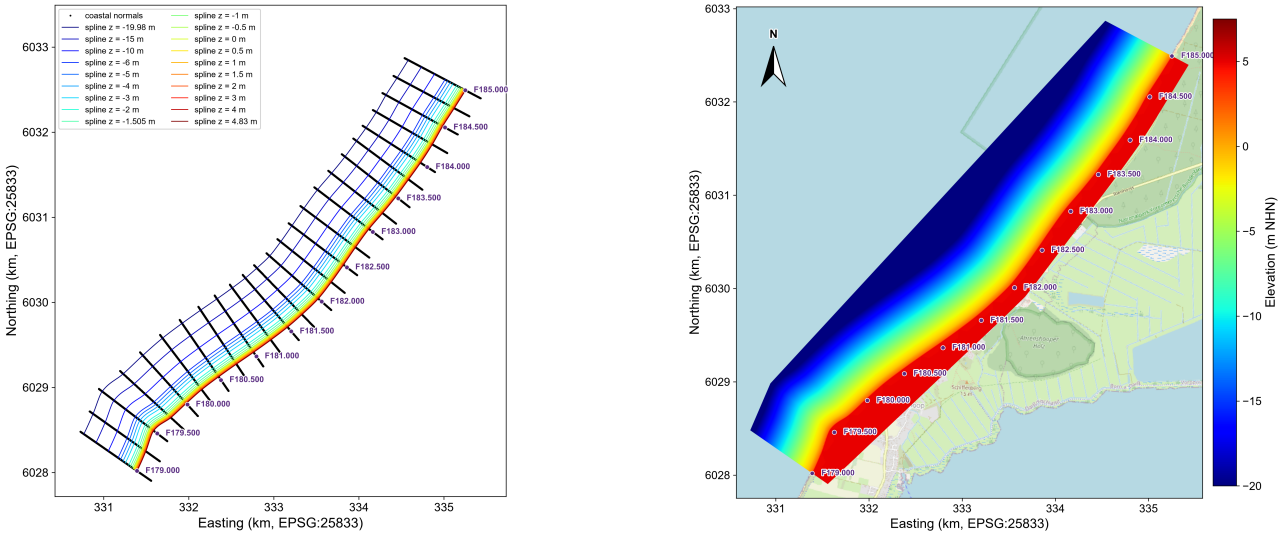


Abbildung 47: Translation der standardisierten Bruun-Profile entlang der Küstennormalen am Dünenfußpunkt (rote Rauten-Marker) der Originalprofile (graue Punkte) in 3D für den Abschnitt Ahrenshoop (Dünenfußhöhe = 2 m, Kronenhöhe = 5 m, Bermenhöhe = 0 m NHN)



(a) Konstruierte Höhenlinien im Küstenverlauf

(b) Interpoliertes DGM

Abbildung 48: Konstruktion der Topo-Bathymetrie für das 2DH-Modell nach der Bruun-Regel (Dünenfußhöhe = 2 m, Kronenhöhe = 5 m, Bermenhöhe = 0 m NHN)

Es folgt die Interpolation der Splines sowie der Küstennormalen zu einem DGM des Küstenabschnitts, dargestellt in Abbildung 48(b). Hier wurde erfolgreich die Aufteilung des Interpolationsgebietes auf 12 Prozessoren in MATLAB implementiert und so die Rechenzeit deutlich beschleunigt. Die so konstruierte Topobathymetrie wird als GeoTif mit der Auflösung 0.5 m x 0.5 m gespeichert (hier z. B. als: Bathymetrie_V9_11_Bruunprofiles.tif mit 9934x9411 Datenpunkten).

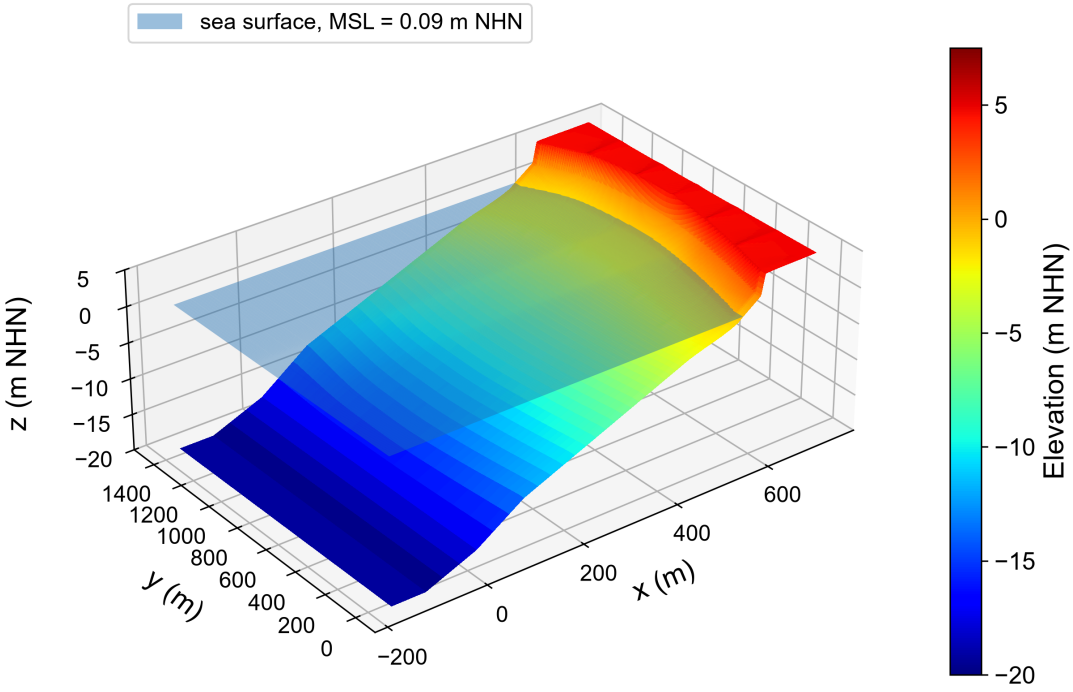


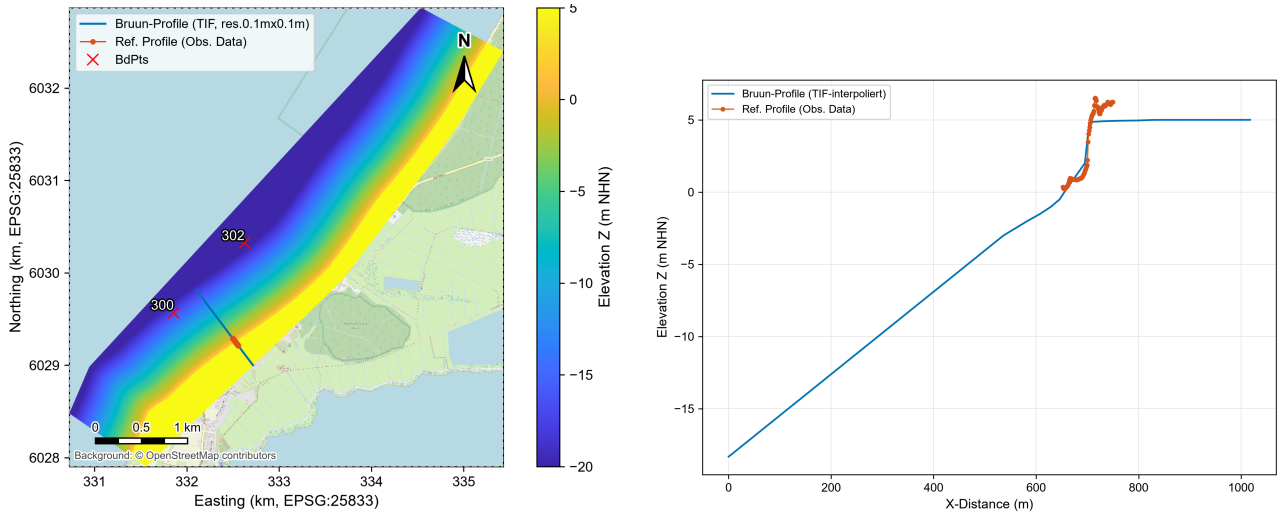
Abbildung 49: Final modifizierte (erweiterte, vertiefte und abgeflachte) Topobathymetrie des Bruun-2DH-Modells für KKM F181.495 in 3D

Analog zu Abschnitt 5.1.2 wird das GeoTif auf ein rechtwinkliges Berechnungsgitter mit der Ausdehnung x, y = 890 x 1460 m (Zellgröße: nx, ny = 126, 287) projiziert und entsprechend der Vorgaben für die Simulation modifiziert (Erweiterung, Glättung und seeseitige Vertiefung). Dargestellt ist die neue Topobathymetrie als 3D-Plot in der Abbildung 49.

5.1.4. Topobathymetrie des 1D-Modells mit standardisierten Querprofilen (Bruun-Regel)

Da sich die kurzen Rechenzeiten von 1D-XBeachprofilen (Berechnung ausschließlich im Küstenquerprofil) besser für umfangreiche Variantenuntersuchungen im Rahmen der Szenarienanalyse eignen, wurde eine Methode zur standardisierten Konstruktion unter Annahme eines sich natürlich ausbildenden Gleichgewichtsprofils entwickelt. Grundlage dafür sind die gemessenen AH5P und das in Abschnitt 5.1.3 entwickelte DGM im Tif-Format, siehe Abbildung 50(a). Zunächst ist die Wahl eines beliebigen Referenzprofils in diesem Küstenabschnitt zu treffen. Daraus werden α und die entsprechenden Grenzpunkte für Randbedingungen aus Ostseemodell (BdPts) zur Einspielung der Randbedingungen bestimmt.

Daraus lässt sich ein Bruun-Basisprofil aus dem 2D-GeoTif abtragen. Anfangspunkt ist der Punkt mit der geringsten Entfernung zu den BdPts, Endpunkt ist die landwärtige Grenze des GeoTifs mit verfügbaren Daten. Sofern, wie im Fall des in Abbildung 50(b) dargestellten Basisprofils, die Einbindetiefe von -20 m NHN nicht erreicht wird, wird auf der nächstmöglichen Einbindetiefe ein



(a) Profillage in Modelldomain (inkl. BdPts) (b) Küstenquerprofil nach Bruun aus Tif interpoliert

Abbildung 50: Konstruktion der Topo-Bathymetrie für das 1D-Modell nach der Bruun-Regel (Basisprofil: Dünenfußhöhe = 2 m, Kronenhöhe = 5 m, Bermenhöhe = 0 m NHN)

auslaufendes Plateau von mindestens 50m Länge konstruiert. Es ist zu prüfen, ob die Einbindetiefe noch die XB-Bedingung erfüllt. Hier liegt die Einbindetiefe bei -16.9 m NHN, was mehr als ausreichend ist (Deltares 2023).

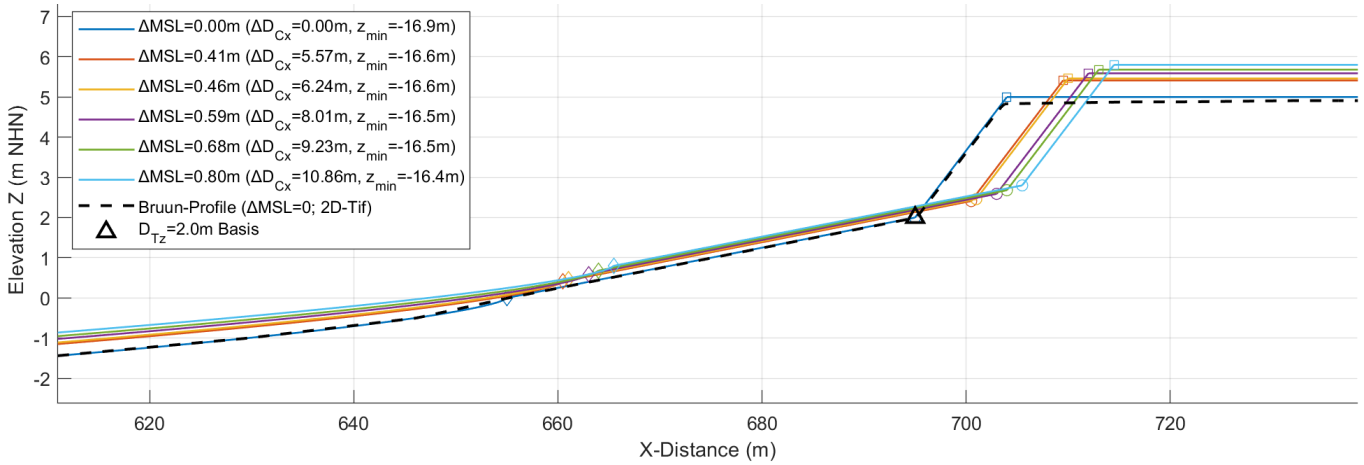


Abbildung 51: Konstruktion der 1D-Küstenquerprofile für verschiedene ΔMSL nach der Bruun-Regel (Basisprofil: Dünenfußhöhe = 2 m, Kronenhöhe = 5 m, Bermenhöhe = 0 m NHN)

5.1.5. Topobathymetrie des 1D-Modells mit standardisierten Querprofilen nach StALU

Zur Vollständigkeit wird hier zusammengefasst auf die anfängliche Konstruktion der linearen 1D-Profile nach Vorgabe des StALU MM eingegangen, wobei es auch hier zwei Varianten gibt (einmal mit und ohne mitwachsendem Vorstrand). Der Ankerpunkt für die Konstruktion war auch hier der gemeinsame Punkt mit dem gemessenen Referenzprofil $zb_{ini,obs}$ bei $z = 2.0mNHN$, wo der Dünenfußpunkt des zu konstruierenden Profils zur Georeferenzierung gesetzt wurde. Zur Orientierung dient exemplarisch die Abbildung 52 mit dem Standardprofil für die Simulation V10_18, wobei gilt $D_{Bz} = const.$(ohne wachsendem Vorstrand). Vorgegeben war die Neigung der Dünenkante mit 1:3, die Neigung des oberen Strandes mit 1:20, die Neigung des Vorstrandes bzw. Berme mit 1:100, die Höhe des Dünenfußpunktes $D_{Tz,ini}$, die Höhe der Bermenkante D_{Bz}, die Höhe der Dünenoberkante

$D_{Cz,ini}$ und die Höhe eines Punktes bei $z = -5.0$ m NHN, welcher das seeseitige Ende der Berme markiert. Außerdem musste die Einbindetiefe $z_{min} = -20.0 mNHN$ in der Nähe der BdPts (für Übergabe Randbedingungen) sichergestellt werden.

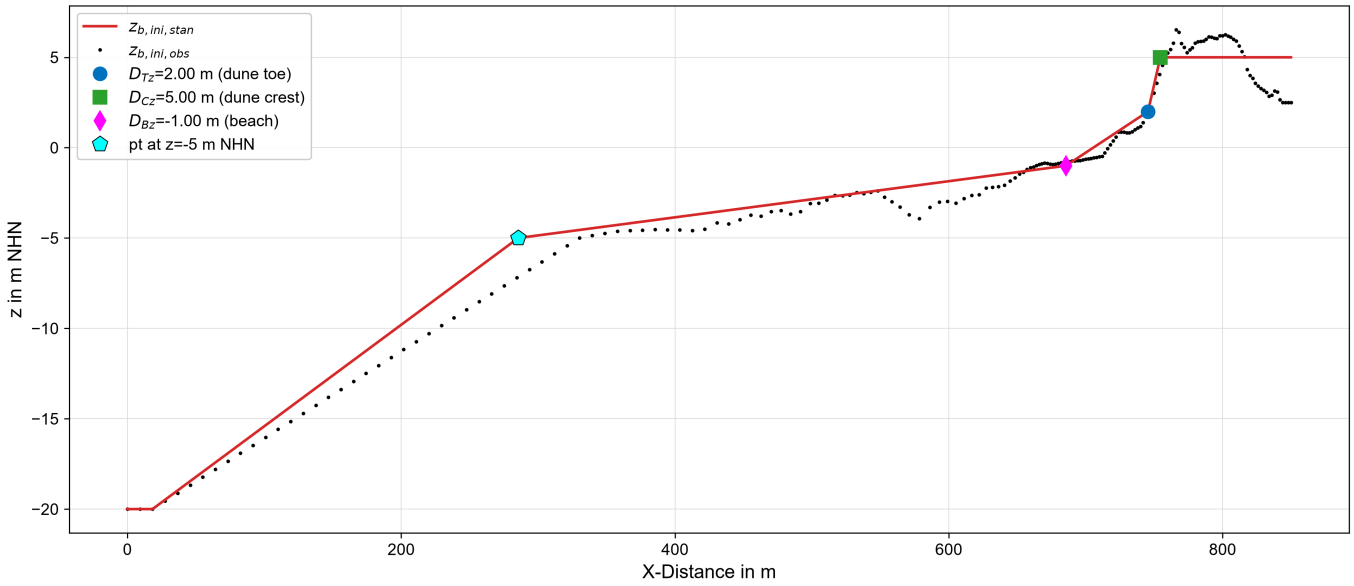


Abbildung 52: Vergleich eines linearen, standardisierten Küstenquerprofils mit dem gemessenen Referenzprofil für KKM F180.715 (Dünenfußhöhe = 2 m, Kronenhöhe = 5 m, Höhe Vorstrand = -1 m NHN)

Der wesentliche Unterschied zu den Bruun-Profilen ist das lineare Profil, wobei weder die DoC noch lokale Wellenparameter für die Ausbildung eines nicht-linearen Gleichgewichtsprofils berücksichtigt wurden. Außerdem findet keine Rückverlegung des Profils mit steigendem Meeresspiegel sowie die komplette Anhebung der Profilparameter in Abhängigkeit von ΔMSL statt. Es erfolgt lediglich eine teilweise Anhebung von $D_{Tz,ini}$ als auch des Vorstrandes über D_{Bz}. Real würde dies bedeuten, dass das Küstenmanagement in Zukunft gestört würde bzw. andere Bemessungsgrundlagen erhielte.

5.1.6. Topobathymetrie des 2DH-Modells mit standardisierten Querprofilen nach StALU

Analog zum Vorgehen in Abschnitt 5.1.3 lässt sich auch aus den linearen Standardprofil nach Vorgaben des StALU MM ein 2DH-Modell konstruieren.

5.2. Modellaufbau und Automatisierung (1D/2DH)

Jedes Simulationsszenario durchläuft denselben Ablauf aus Modellaufbau, Simulation, Post-Processing und Ergebnisanalyse. Das rechteckige Modellgebiet wird an einem gemessenen, küstenorthogonalen Referenzprofil ausgerichtet, das zugleich die Mittelachse des Berechnungsgitters bildet. So lässt sich ein 2DH-Modell direkt an einem vermessenen Küstenquerschnitt (z. B. den AH5P-Profilen) orientieren, was Auswertung und Kalibrierung wesentlich vereinfacht; im Gegensatz zur 1D-Simulation werden dabei zusätzlich Küstenlängstransport und Refraktion abgebildet. Die skriptgestützte Gittergenerierung gibt Berechnungsgitter, Rotationswinkel *alfa* und Ursprungskoordinaten aus, mit denen die als xyz-Datei vorliegende Topobathymetrie in das lokale Gitterkoordinatensystem transformiert wird. Das zunächst grob aufgelöste Netz (15 bis 20 m Zellgröße) wird anschließend mit Funktionen der OET verfeinert: In x-Richtung richtet sich die variable Zellgröße nach Wassertiefe, Peakperiode, minimaler Zellgröße und Courant-Kriterium (`xb_grid_xgrid`, CFL 0,7, $dx_{min} = 2$ m), in y-Richtung erfolgt eine lokale Verfeinerung im Untersuchungsgebiet ($dy_{min} = 2$ m). Nach der Verfeinerung

werden die Tiefeninformationen erneut mit höherer Auflösung interpoliert (*Retrofitting*) und das Gitter lateral um Pufferzellen erweitert, um Randeffekte vom Untersuchungsgebiet fernzuhalten. Zur Abbildung des Dünenabbruchs ist eine lokale Auflösung von mindestens 2 m × 2 m erforderlich; für stark variierende Küstenabschnitte empfiehlt sich 1 m × 1 m.

Die hydraulischen Randbedingungen werden je Szenario aus den beiden nächstgelegenen Ausgabepunkten des MIKE21-Modells bzw. des SHG eingelesen und über Importroutinen in die XBeach-Eingangsdateien überführt (Wasserstandsganglinie `tide.txt` sowie Seegangstabelle `waves.txt` im `jonstable`-Format); die Parameterdatei `params.txt` wird im Zuge des Modellaufbaus erzeugt. Die Importroutinen liegen inzwischen in einer quelloffenen Python-Fassung vor, die byte-identisch gegen die ursprünglich mit MATLAB erzeugten Eingangsdateien der Serien V8_05, V10_08c und V12_01 validiert wurde (vgl. Unterabschnitt D). Die wesentlichen Modell- und Kalibrierparameter der finalen Konfiguration – nach der Neukalibrierung für die Simulationsserie V9_11 – sind in Tabelle 12 zusammengefasst; die zugrunde liegende Kalibrierung wird in Unterabschnitt 5.3 beschrieben. Der mittlere Korndurchmesser entstammt dabei der eigenen Beprobung des Untersuchungsgebietes; verwendet werden die am Dünenfuß gewonnenen Werte ($d_{50} = 0{,}26$ mm), da sie das erodierende Dünen- und Strandsediment repräsentieren – die Schorre weist gröberes Material auf (vgl. Tabelle 8).

Tabelle 12: Wesentliche Modell- und Kalibrierparameter der finalen XBeach-Konfiguration (Simulationsserie V9_11, Neukalibrierung 2026)

Parameter	Prozess / Bedeutung	Wert	Standard
`gamma`	Brecherindex	0,46	0,46
`facua`	Wellensteilheit/-asymmetrie	0,13	0,10
`wetslp`	krit. Böschungsneigung (nass)	0,15	0,30
`dryslp`	krit. Böschungsneigung (trocken)	2,0	1,0
`D50` (*mm*)	mittlerer Korndurchmesser	0,26	0,20
`D90` (*mm*)	Korndurchmesser 90 %	0,45	0,30
`por`	Porosität	0,40	0,40
`bedfriccoef`	Sohlreibungskoeffizient	0,01	–
`hswitch` (*m*)	Übergang nass/trocken	0,10	0,10
`morfac`	morphologische Beschleunigung	10	1
`nmax`	max. Verhältnis c/c_g	0,80	0,80
`lateralwave`	laterale Randbedingung	`neumann`	`neumann`
`cyclic`	zyklische Randbedingung (MPI)	1	0
`back`	landseitige Randbedingung	`abs_2d`	`abs_1d`

Da je Szenarien-Ensemble 50 bis 200 Einzelsimulationen mit Laufzeiten von jeweils mehreren Stunden anfallen, wurde die gesamte Prozesskette automatisiert (Abbildung 53): Die Szenariodateien des SHG werden skriptgesteuert in Simulationsordner mit vollständigen XBeach-Eingangsdateien überführt; ein PowerShell-Steuerskript arbeitet die Ordner sequenziell ab, setzt die MPI-Startbefehle ab, überwacht die Läufe und erlaubt die Fortsetzung nach Systemabstürzen ab einer definierten Simulationsnummer. Das Post-Processing der netCDF-Ausgaben (Erosionsvolumen $V_{D,ero}$, Rückgang der Dünenkrone, Profilentwicklung, Ensemble-Statistik) erfolgt ebenfalls automatisiert; die gesamte Auswertung einschließlich der Statistik liegt inzwischen vollständig als validierte, quelloffene Python-Fassung vor, die für die Nachnutzung maßgeblich ist (vgl. Unterabschnitt D). Die dabei je Simulation extrahierten Dünenparameter sind in Abbildung 54 definiert: Erfasst werden jeweils vor (*ini*) und nach dem Ereignis (*end*) die Lage und Höhe der Kronen-Vorderkante ($D_{C,x}$, $D_{C,z}$), des

Dünenfußes ($D_{T,x}$, $D_{T,z}$) und des seewärtigen Bermen- bzw. Riffpunktes ($D_{B,x}$, $D_{B,z}$), die zugehörigen Verschiebungen ($\Delta D_{C,x}$, $\Delta D_{T,x}$, $\Delta D_{T,z}$, $\Delta D_{B,x}$) sowie das auf die MHW-Referenzlinie bezogene Dünenerosionsvolumen $V_{D,ero}$ als Fläche zwischen Vor- und Nachsturm-Profil. Für die breit angelegten Szenarienanalysen wird aus dem 2DH-Modell ein 1D-Modell entlang der küstenorthogonalen Profilachse extrahiert und separat kalibriert (Unterabschnitt 5.4); das 2DH-Modell bleibt Schlüsselszenarien mit Detailanalysebedarf vorbehalten.

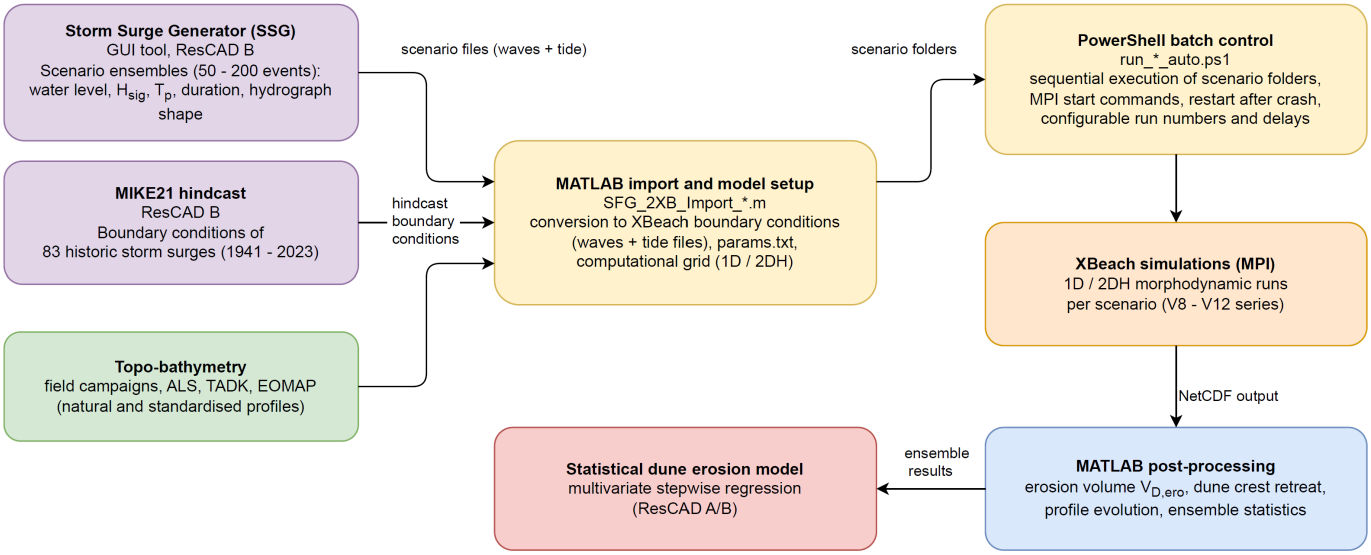


Abbildung 53: Automatisierter Workflow der Szenarien-Ensembles vom SHG über den skriptgesteuerten Modellaufbau und die MPI-parallelisierte XBeach-Simulation bis zum Metamodell der Dünenerosion

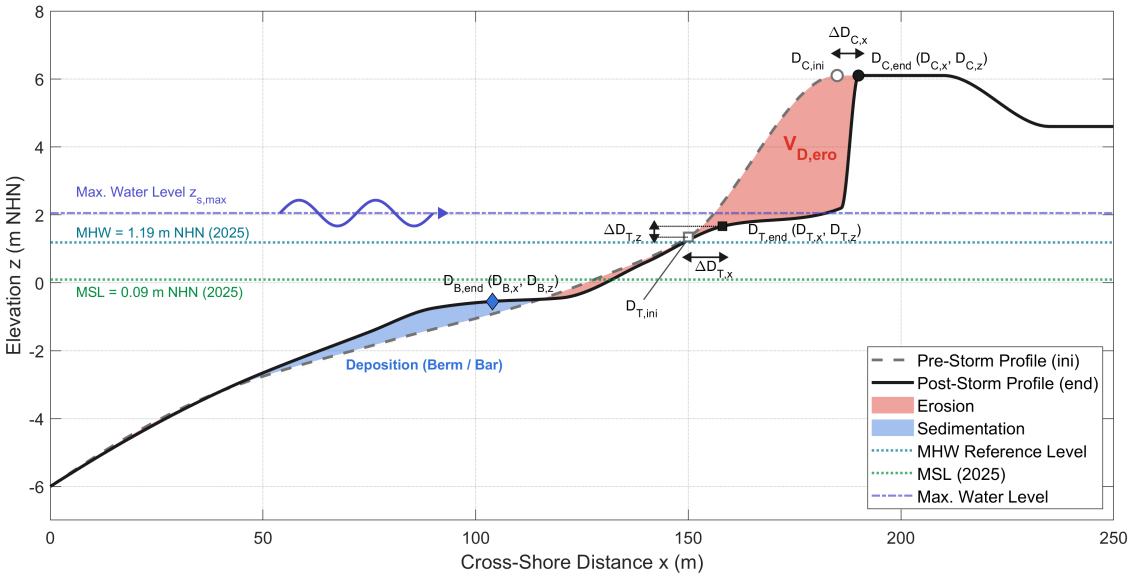


Abbildung 54: Definitionsskizze der 1D-Profilauswertung des automatisierten Post-Processings: Dünenparameter der Kronen-Vorderkante (D_C), des Dünenfußes (D_T) und des Bermen-/Riffpunktes (D_B) jeweils vor (*ini*) und nach dem Ereignis (*end*), Verschiebungen (Δ) sowie Erosions- und Sedimentationszonen mit Dünenerosionsvolumen $V_{D,ero}$ oberhalb der MHW-Referenzlinie (idealisierte Profile)

5.3. Kalibrierung und Validierung

Die Kalibrierung des 2DH-Modells erfolgte anhand des Sturmhochwassers vom Oktober 2023 (AP 3.2), für das mit den vor und nach dem Ereignis erhobenen Naturdaten (vgl. Abschnitt 3) der beste verfügbare Datensatz der jüngeren Aufzeichnungen vorlag. Die Güte jeder Simulation wird durch den Vergleich der gemessenen Profile vor (x_b) und nach dem Sturm (x_p) mit dem simulierten Endprofil (x_m) über den Brier-Skill-Score (BSS) bewertet:

$$BSS = 1 - \frac{\left\langle \left(x_m - x_p\right)^2 \right\rangle}{\left\langle \left(x_p - x_b\right)^2 \right\rangle}. \tag{12}$$

Von sechs nach dem Sturm vermessenen Profilen im Untersuchungsgebiet eigneten sich zwei (KKM F180.715 und KKM F181.495) für die Kalibrierung; die übrigen zeigten entweder lediglich minimale Dünenerosion oder große Abweichungen in der Volumenkontinuität, da die EOMAP-Bathymetrie ein Jahr vor dem Ereignis aufgenommen wurde und sich der nordöstliche Abschnitt zwischenzeitlich signifikant verändert hatte. Tabelle 13 fasst die Ergebnisse zusammen: Bereits mit Standardparametern wird eine gute Übereinstimmung erreicht ($BSS \approx 0{,}6$–$0{,}7$); durch Feinjustierung insbesondere des Parameters `facua` lassen sich exzellente Werte bis $BSS = 0{,}92$ bei einer Abweichung des Erosionsvolumens $V_{D,ero}$ unter 2 % erzielen – ein ähnliches Vorgehen (Kalibrierung von `facua`, `bermslope` und `wetslope`) beschreiben Garzon, Ó. Ferreira und Plomaritis (2022) für steile, buhnengeschützte Strände; für die niederländische Küste dokumentiert zudem de Bakker, van der Lugt und de Vet (2021) die Skalierung dimensionsbehafteter XBeach-Parameter mit der Modellauflösung. Für die Szenarienanalysen werden dennoch weitgehend robuste Standardparameter – ergänzt um gemessene Größen wie den Korndurchmesser und die beobachtete trockene Böschungsneigung – empfohlen, da fein justierte Parametersätze stärker vom Einzelereignis abhängen.

Tabelle 13: BSS-Werte der 2DH-Kalibrierung am Sturmhochwasser Oktober 2023 für vier Küstenabschnitte (Standardparameter vs. Feinjustierung von `facua` und Porosität)

Küstenabschnitt	Standard	feinjustiert	Bewertung
KKM F180.715	0,67	0,86	gut bis exzellent
KKM F181.495	0,61	0,92	gut bis exzellent
KKM F182.220	0,07	0,07	unzureichend (veraltete Bathymetrie)
KKM F182.860	–	−0,12	unzureichend (veraltete Bathymetrie)

Das aus dem 2DH-Modell extrahierte 1D-Modell wurde mit demselben Ereignis separat kalibriert (Simulationsserie V10_03). Die zugehörigen hydraulischen Randbedingungen des MIKE21-Hindcasts – Wasserstands- und Seegangsganglinien sowie Wellenangriffswinkel über die viertägige Ereignisdauer – zeigt Abbildung 55 beispielhaft für das Referenzprofil KKM F180.715. In systematischen Parametervariationen (u. a. `facua`, `facAs`, `facSk`, `gamma`, `bedfriccoef`) wurde jede Parameterkombination stets an beiden Referenzprofilen (KKM F180.715 und F181.495) simuliert und der Mittelwert der beiden BSS-Werte als Zielkriterium verwendet. Mit diesem Vorgehen wird neben der Kalibrierung zugleich eine lokale Validierung erreicht, da die gewählte Einstellung nicht auf ein einzelnes Profil optimiert ist, sondern sich an zwei unabhängig vermessenen Küstenquerschnitten gleichzeitig bewähren muss. Die beste mittlere Güte (Lauf V10_03_run04_010) erreicht $BSS = 0{,}844$ am KKM F180.715 und 0,823 am KKM F181.495 (Mittelwert 0,836) – mit `facua` = 0,175, `gamma` = 0,6, `facAs` = 0,11, `facSk` = 0,15 und `bedfriccoef` = 0,01 bei ansonsten unveränderten Parametern.

Gegenüber der 2DH-Kalibrierung ist insbesondere facua deutlich erhöht, da der im 1D-Modell fehlende Küstenlängstransport über den küstenwärts gerichteten Transportanteil kompensiert wird. Das Erosionsvolumen wird dabei am KKM F181.495 gut getroffen ($V_{D,ero,sim}$= 7,1 gegenüber $V_{D,ero,obs}$= 5,2 m^3/m), am flacheren Profil KKM F180.715 jedoch überschätzt (8,7 gegenüber 3,9 m^3/m) – die Profilform selbst wird dort gleichwohl am besten reproduziert.

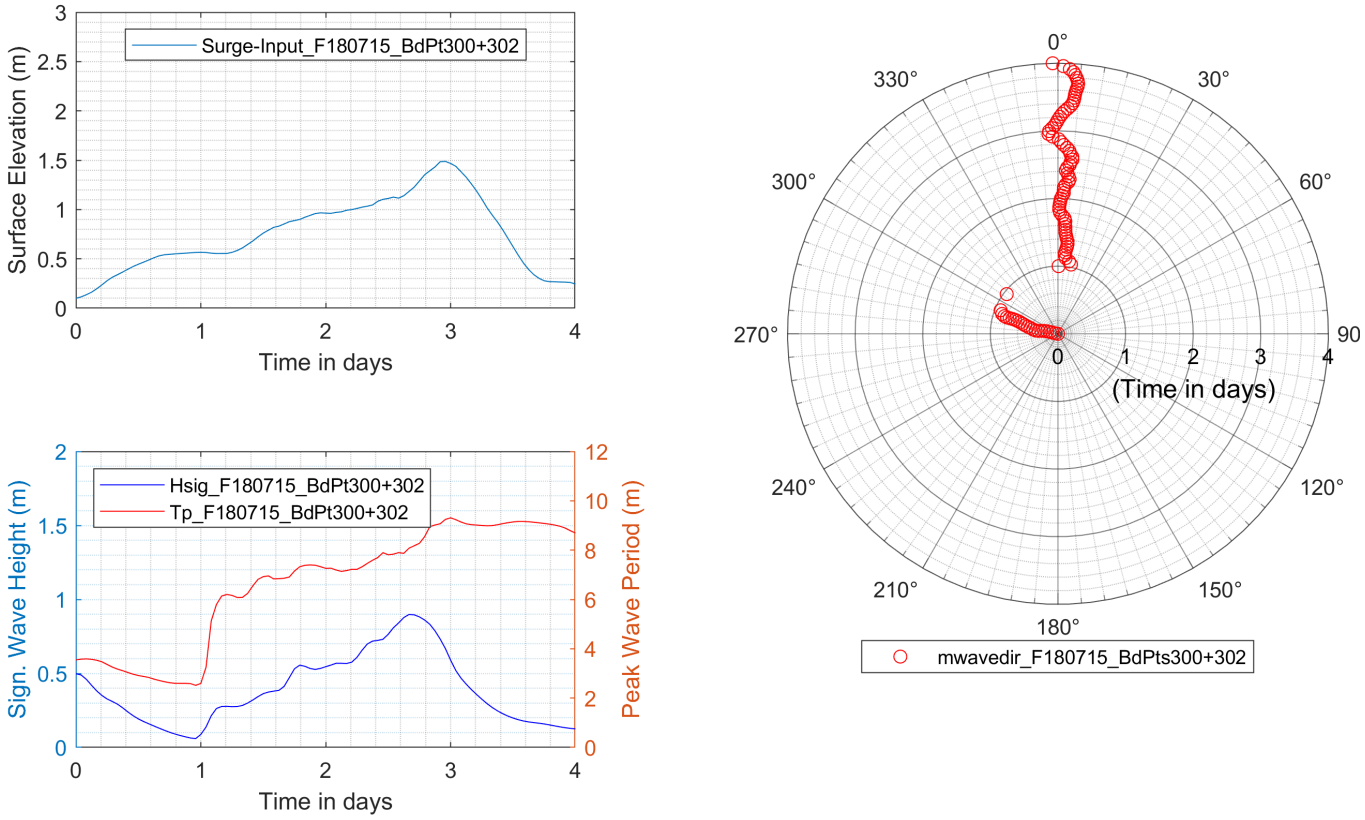


Abbildung 55: Hydraulische Randbedingungen des MIKE21-Hindcasts zum Sturmhochwasser Oktober 2023 für die 1D und 2DH-Kalibrierung am KKM F180.715 (Simulation-1D: V10_03, Simulation-2DH: V8_05): Wasserstandsganglinie (oben links), signifikante Wellenhöhe und Peakperiode (unten links) sowie Wellenangriffswinkel über die Ereignisdauer (rechts)

Die Validierung des kalibrierten 1D-Modells erfolgte anhand eines unabhängigen Extremereignisses, des Sturmhochwassers vom Januar 2019 (Simulationsserie V11_01, vgl. Unterabschnitt 7.1). Dabei wurde ein BSS = 0,447 erreicht – angesichts der für dieses Ereignis lediglich grob interpolierbaren Vorsturm-Bathymetrie ein zufriedenstellendes Ergebnis. Eine Validierung an weiteren Standorten und Ereignissen ist vorgesehen, sobald vergleichbare Datensätze mit aktueller Bathymetrie verfügbar sind; hierfür wird die Auswertung satellitengestützter Bathymetrie unmittelbar vor und nach signifikanten Ereignissen empfohlen (vgl. Unterabschnitt 9.2).

5.4. Sensitivitätsanalyse im 1D-Modell

Die Sensitivitätsanalyse bildet den Kern der systematischen Untersuchung des Parameterraums in AP 3.3. Der Nachteil langer Rechenzeiten bei der 2DH-Simulation schränkt deren Einsatz für breit angelegte Anwendungen, wie beispielsweise synthetische Klimaszenarien und eine große Anzahl geometrischer Variationen des Ausgangsprofils, erheblich ein. Dementsprechend wird ein 1D-XB-Modell kalibriert, validiert und einer umfassenden Sensitivitätsanalyse unterzogen, um die Voraussetzungen für eine erste umfassende Studie zu schaffen. Tabelle 14 bietet einen Überblick über die im 1D-Modell untersuchten Parameter, einschließlich einer kurzen Beschreibung, des physikalischen Prozesses, der Kolmogorov-Smirnov-D-Kriterien (KS-D) nach Guthrie (2020), des kalibrierten Werts und des Standardwerts. Ein vergleichbarer Ansatz zur systematischen Eingrenzung optimaler XBeach-Parameterbereiche über die GLUE-Methodik (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) findet sich bei Bae u. a. (2022).

Tabelle 14: Übersicht der Parameter

Prozess	Parameter	KS-D	Kal.	Def.
Wellen-Asymmetrie	facAs	0.688	0.12	0.2
Wellen-Steilheit	facSk	0.175	0.11	0.15
Brechungspunkt	Gamma	0.147	0.47	0.46
Sohlreibung	bedfriccoef	0.040	0.011	0.01
Roller-/Brecherverh. (slp)	Beta	0.177	0.08	0.08
Strandneigung UW	Wetslp	0.005	0.23	0.15
Wellen-Dissipation	Alpha	0.148	1.36	1.38
Max Verhältnis. H/d	gammax	0.042	1.3	2.0

Das Vorgehen der Parameteranalyse ist in Abbildung 56 beispielhaft für den sensitivsten Parameter `facAs` dargestellt (Simulationsserie V10_07, Feinrasterung des Parameterraums am Kalibrierereignis Oktober 2023): Der oberste Teilplot zeigt den Verlauf des BSS über den untersuchten Parameterraum – je Parameterwert als Mittelwert über beide Referenzprofile sowie für KKM F180.715 einzeln – mit verschiedenen angelegten Trendkurven (Polynom- und Spline-Fit) zur robusten Bestimmung des Optimums (hier $\max BSS_{mean}$ bei `facAs` $= 0{,}104$). Der zweite Teilplot stellt das zugehörige simulierte Dünenerosionsvolumen $V_{D,ero,sim}$ dar, der dritte die Abweichung $\Delta V_{D,ero}$ vom beobachteten Wert, deren Nulldurchgang (hier bei `facAs` $= 0{,}131$) nicht zwingend mit dem BSS-Optimum zusammenfällt – die Profilform- und die Volumen-Optimierung liefern also leicht unterschiedliche Parameterwerte. Der unterste Teilplot zeigt das Kolmogorov-Smirnov-Kriterium nach Guthrie (2020): Aufgetragen ist die mit dem BSS gewichtete kumulative Verteilungsfunktion über dem Parameterraum; deren maximale Abweichung (KS-D) von der Gleichverteilung CDF_{uni} (rote Linie) quantifiziert die Sensitivität des Parameters. Mit $KS\text{-}D = 0{,}69$ ist `facAs` der mit Abstand sensitivste der untersuchten Parameter (vgl. Tabelle 14).

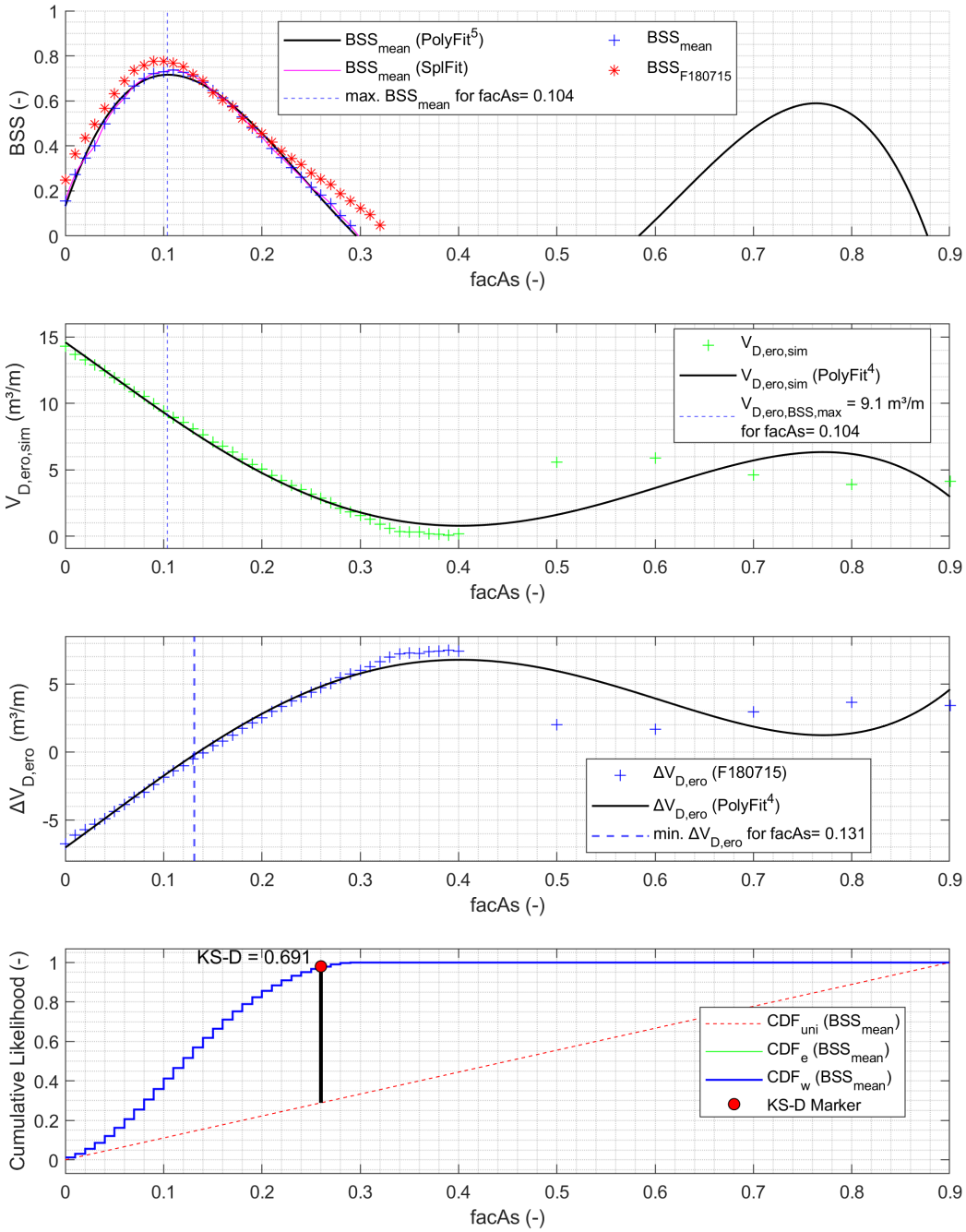


Abbildung 56: Parameteranalyse am Beispiel des sensitivsten Parameters `facAs` (Simulation: V10_07, KKM F180.715): BSS-Verlauf über den Parameterraum mit Trendkurven und Optimum (oben), zugehöriges Dünenerosionsvolumen $V_{D,ero,sim}$ (2. Teilplot), Abweichung $\Delta V_{D,ero}$ vom beobachteten Wert (3. Teilplot) sowie Kolmogorov-Smirnov-Kriterium als Sensitivitätsmaß (unten)

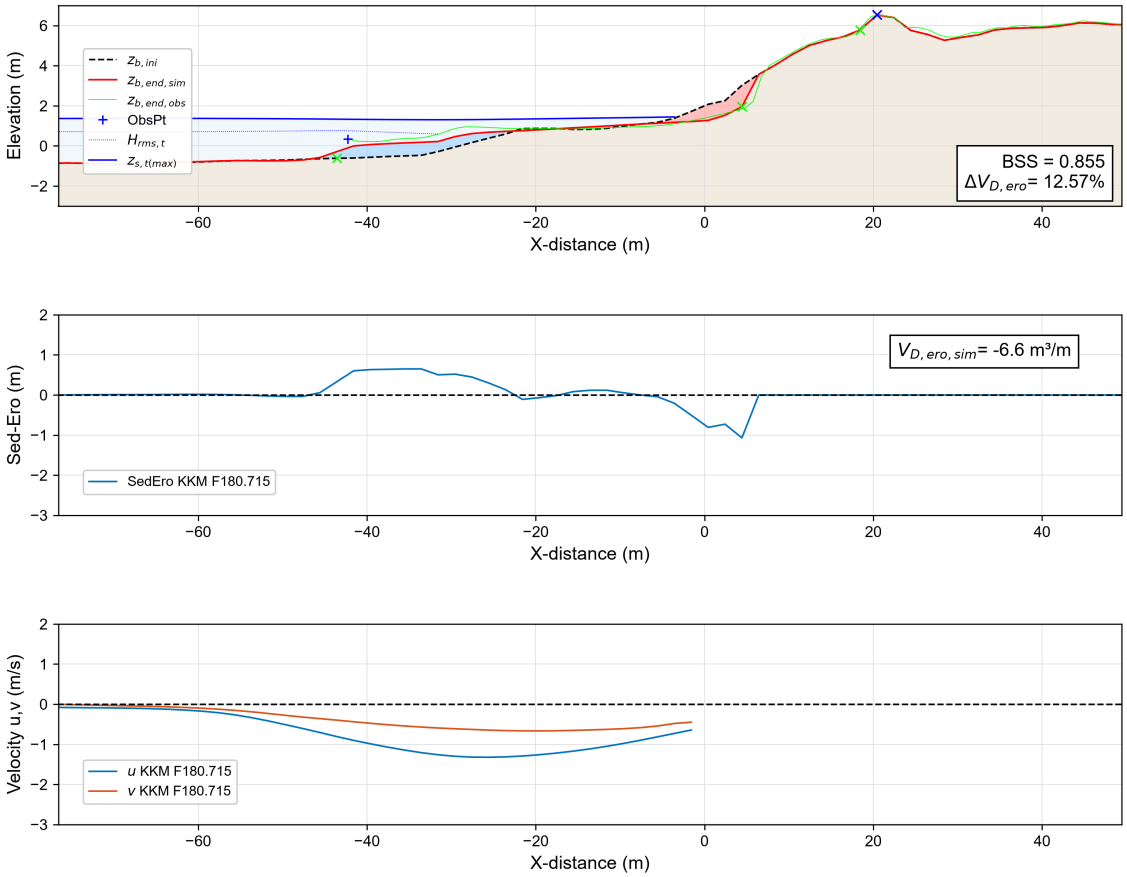


Abbildung 57: Profilbezogene Auswertung der 2DH-Kalibrierungssimulation mit dem besten mittleren BSS (Simulation: V8_05_run13_007, KKM F180.715): Ausgangsprofil, simuliertes und gemessenes Nachsturmprofil mit BSS (oben), kumulierte Sedimentations- und Erosionshöhen mit $V_{D,ero,sim}$ (Mitte) sowie GLM-Geschwindigkeiten u, v zum Zeitpunkt t = 67 h (unten)

5.5. Auswertung

Das automatisierte Post-Processing stellt für jede Simulation zwei sich ergänzende Auswertungsebenen bereit: die profilbezogene Auswertung entlang des küstenorthogonalen Referenzprofils und – im 2DH-Modell – die georeferenzierte, flächenhafte Auswertung der Simulationsergebnisse über dem Luftbild.

Die profilbezogene Auswertung umfasst neben dem BSS nach Gleichung (12) das auf die MHW-Referenzlinie bezogene Dünenerosionsvolumen $V_{D,ero,sim}$ (in den Klimaszenarien wächst das Bezugsniveau theoretisch mit dem MSLR mit, vgl. Abschnitt 6), dessen absolute bzw. relative Abweichung $\Delta V_{D,ero}$ vom beobachteten Wert, den Dünenrückgang als Horizontalverschiebung ΔD_{Cx} der Kronen-Vorderkante sowie die Verschiebung des Dünenfußpunktes, der im Vor- wie im Nachsturmprofil als Punkt der größten Krümmung identifiziert wird (vgl. die Definitionsskizze in Abbildung 54). Abbildung 57 zeigt den zugehörigen Profilplot am Beispiel der 2DH-Kalibrierungssimulation V8_05_run13_007, die nach dem mittleren BSS über beide Referenzprofile die beste Übereinstimmung des Kalibrierclusters erreicht – durch die Mittelwertbildung ist neben der Kalibrierung zugleich eine lokale Validierung sichergestellt (vgl. Unterabschnitt 5.3). Am KKM F180.715 wird $BSS = 0{,}855$ bei einem Erosionsvolumen von $V_{D,ero,sim}$= 6,6 m^3/m erreicht: Der obere Teilplot stellt Ausgangs-

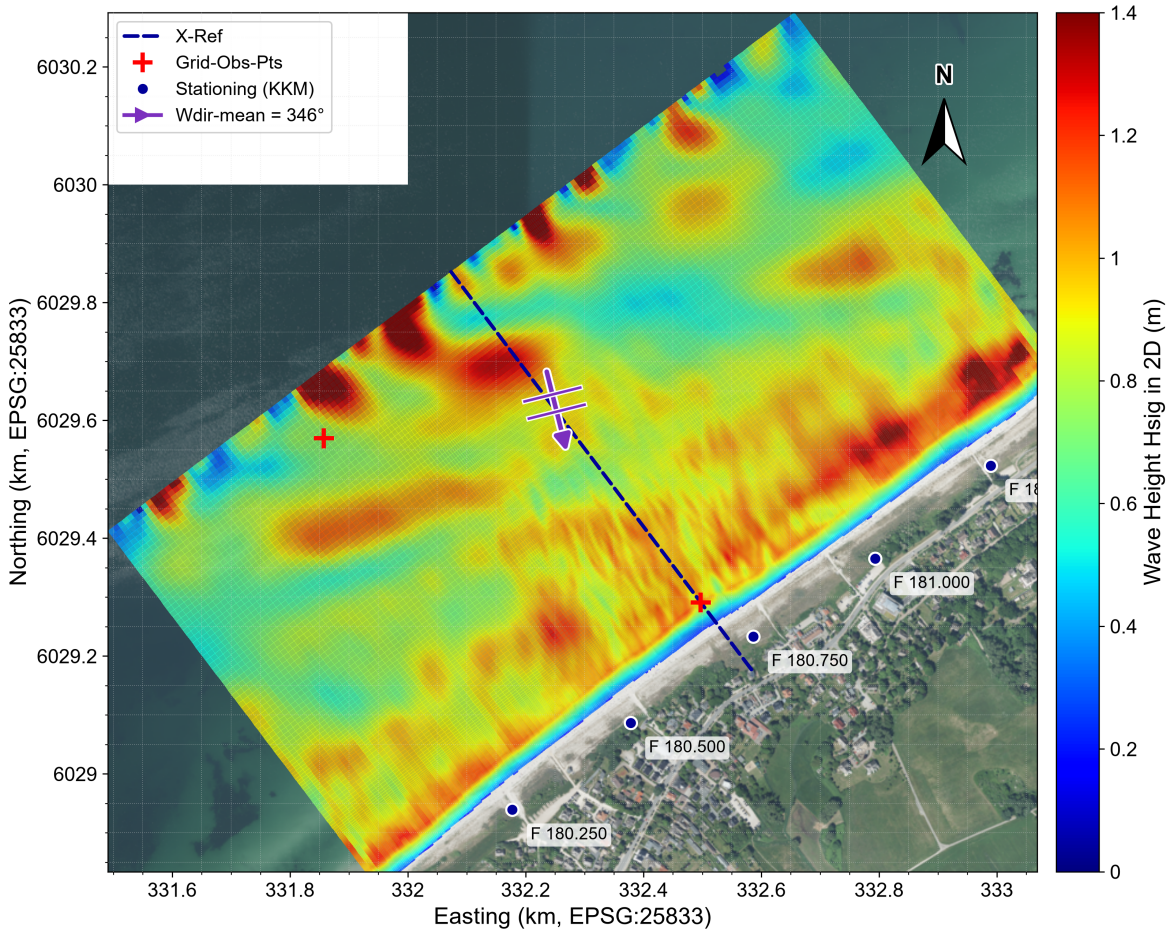


Abbildung 58: Georeferenzierte Momentaufnahme der signifikanten Wellenhöhe zum Zeitpunkt t = 67,0 h mit mittlerem Wellenangriffswinkel (violetter Pfeil, 346°), KKM-Stationierung und Referenzprofil X-Ref über dem Luftbild (Simulation: V8_05_run13_007, KKM F180.715)

profil, simuliertes und gemessenes Nachsturmprofil einschließlich des maximalen Wasserstands und der Wellenhöhenverteilung $H_{rms,t}$ gegenüber, der mittlere die kumulierten Sedimentations- und Erosionshöhen entlang des Profils (Erosion an Dünenkliff und Vorstrand, Sedimentation im Buhnenfeld), der untere die GLM-Geschwindigkeiten u und v zum dargestellten Zeitpunkt. Der entsprechende Profilplot für das zweite Referenzprofil KKM F181.495 ist im Anhang dokumentiert (Abbildung 123).

Die georeferenzierte 2DH-Auswertung projiziert die Simulationsergebnisse zellgenau in das übergeordnete Koordinatensystem (ETRS89/UTM 33N, EPSG:25833) und legt sie über das aktuelle Luftbild; KKM-Stationierung, Referenzprofil, Beobachtungspunkte und der mittlere Wellenangriffswinkel werden eingeblendet. Damit lassen sich die simulierten Prozesse unmittelbar realen Strukturen wie Buhnenfeldern, Strandabschnitten und Dünenkliff zuordnen – eine Darstellungsform, die die Leistungsfähigkeit des XB-2DH-Modells für detaillierte Analysen im Küstennahbereich demonstriert. Abbildung 58 zeigt eine Momentaufnahme der signifikanten Wellenhöhe zum Zeitpunkt t = 67 h nahe des Wasserstandsscheitels: Mit dem eingezeichneten mittleren Wellenangriffswinkel (346°) lassen sich die dazu orthogonal verlaufenden Wellenkämme der hier sichtbaren langen Wellen gut erkennen. Die Maximalwerte von rund 1,4 m treten am oberen lateralen Rand sowie an der seewärtigen Randbedingung auf; deutlich zeichnet sich die Brecherzone im Bereich der Buhnen ab, in der die Wellen mit hartem Übergang an Höhe verlieren.

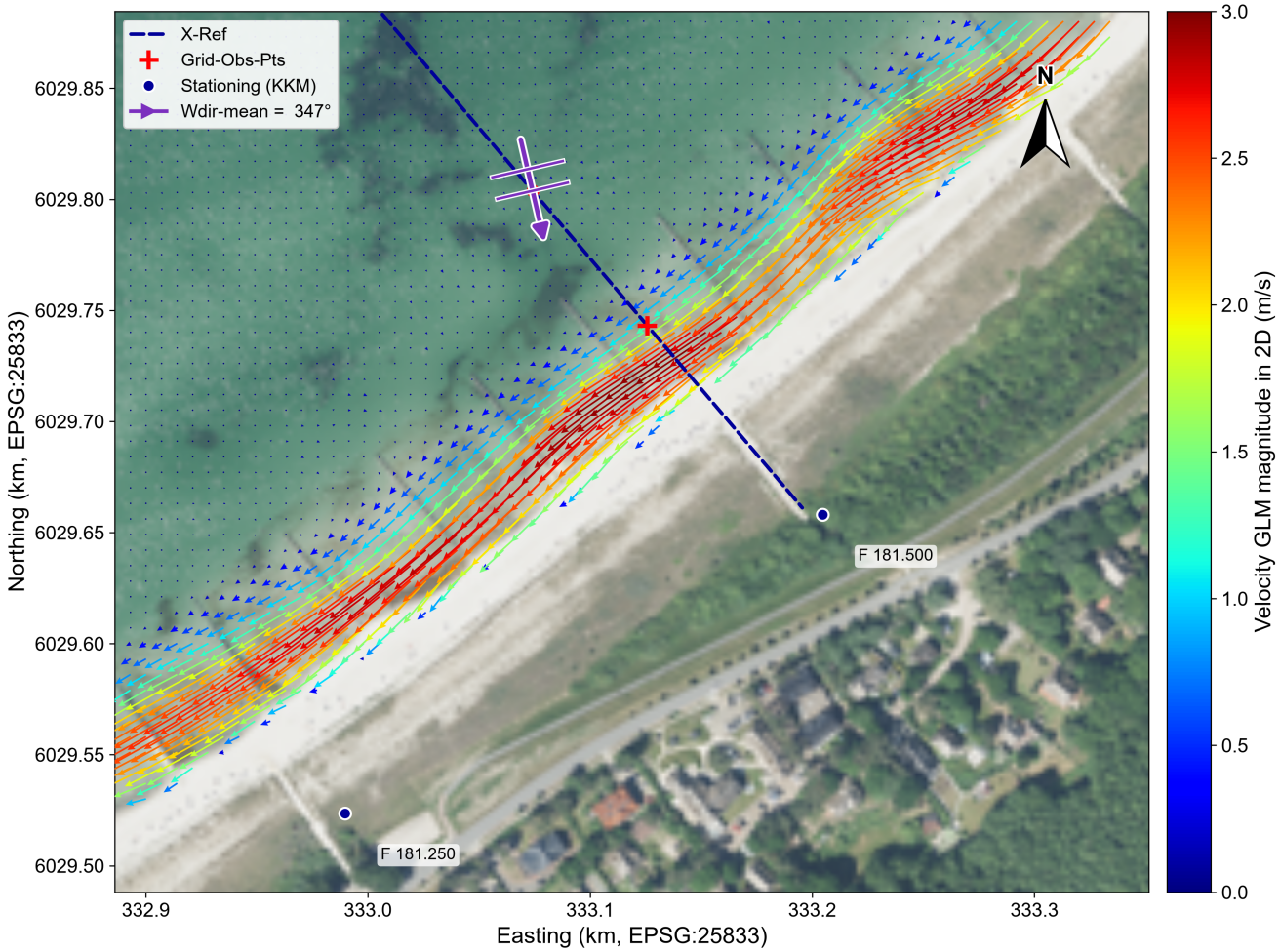


Abbildung 59: Georeferenzierte Momentaufnahme der GLM-Geschwindigkeitsvektoren (Magnitude in m/s) zum Zeitpunkt $t = 66{,}5$ h mit dominanter Küstenlängsströmung $> 2{,}5$ m/s und vereinzeltem Wellenauflauf (Simulation: V8_05_run13_011, KKM F181.495)

Die zugehörigen Strömungsverhältnisse verdeutlicht Abbildung 59 mit den GLM-Geschwindigkeitsvektoren zum Zeitpunkt $t = 66{,}5$ h: Es dominiert eine schmale, buhnenüberströmende Küstenlängsströmung mit Magnituden über 2,5 m/s entlang der Brandungszone, während sich vereinzelt der Wellenauflauf auf dem Strand abzeichnet. Diese Längsströmung überschreitet über weite Teile des Ereignisses die kritische Geschwindigkeit des Sedimenttransports und stellt damit einen im 1D-Modell nicht abbildbaren Verlustpfad dar (vgl. Unterabschnitt 8.3).

Das morphodynamische Gesamtergebnis fasst Abbildung 60 als kumulierte Sedimentations- und Erosionshöhe je Berechnungszelle am Ende der Simulation zusammen. Das integrierte Detailfenster vergrößert den Bereich von Düne und Berme am Referenzprofil: Landseitig verläuft das durchgehende Erosionsband entlang des Dünenkliffs (blau), unmittelbar seewärts davon die Sedimentationszone der Berme (magenta), auf der das abgebrochene Dünenmaterial zwischengelagert wird. Die georeferenzierte Darstellung macht dabei auch die küstenparallele Kontinuität der Erosions- und Sedimentationsmuster über die Buhnenfelder hinweg sichtbar.

Die profilbezogene Auswertung ist dabei als Stichprobe einer küstenparallel variablen Erosionsreaktion zu verstehen. Zur Einordnung ihrer Repräsentativität wurde das Dünenerosionsvolumen $V_{D,ero}$ zeilenweise über die volle Modelllänge ausgewertet – mit derselben Metrik wie in der 1D-Auswertung (Erosionsintegral oberhalb der MHW-Referenzlinie), je Modelldomäne 257 Küstenlängsprofile im

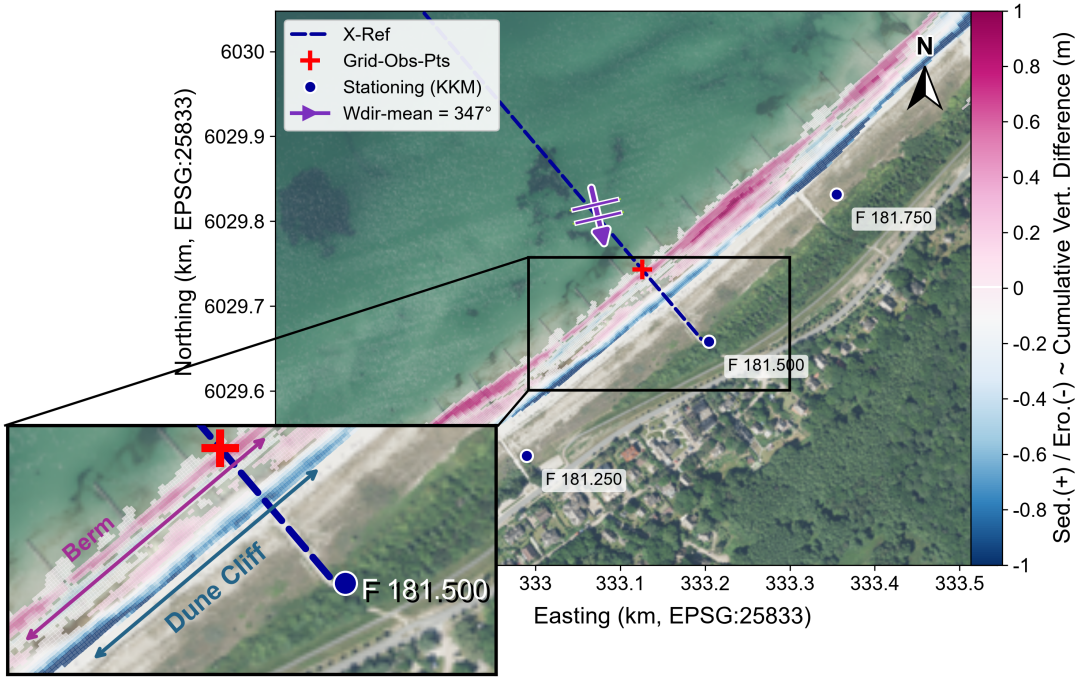


Abbildung 60: Georeferenzierte kumulierte Sedimentations- (magenta) und Erosionshöhen (blau) je Berechnungszelle zum Simulationsende (t = 96,2 h) mit Detailfenster des Dünen- und Bermenbereichs am Referenzprofil (Simulation: V8_05_run13_011, KKM F181.495)

2,2-m-Raster unter Ausschluss der lateralen Randzonen. Betrachtet wurden die Kalibrierungssimulation V8_05_run13_007 in beiden Modelldomänen (KKM F180.715 und F181.495) sowie die Parametervariante run13_011; die Auswerteskripte sind im digitalen Anhang dokumentiert.

Die Längsverteilung (Abbildung 61) zeigt zunächst, wie stark die simulierte Erosion entlang der Küste schwankt: Zwischen den am schwächsten und am stärksten belasteten Küstenlängsprofilen liegen Spannweiten von rund 4 bis 26 m^3/m. Als Streumaß dient der Variationskoeffizient, also die Standardabweichung bezogen auf den Mittelwert: Er beträgt 47 % in der F180.715-Domäne (F181.495: 77 %; Parametervariante run13_011: 30 %) – die örtliche Erosion weicht damit typischerweise um knapp die Hälfte des Mittelwerts nach oben oder unten ab. Ergänzend markiert der Interquartilsabstand, engl. *interquartile range* (IQR) in der Abbildung das Band, in dem die mittleren 50 % aller Werte liegen. Wie weit benachbarte Profile noch ähnlich reagieren, beschreibt die Autokorrelationslänge; sie beträgt hier etwa 70 m bzw. gut 20 m – erst jenseits dieser Distanz sind die Erosionswerte als weitgehend unabhängig voneinander anzusehen. Das Referenzprofil KKM F180.715 liegt in einem lokalen Erosionsminimum: Lediglich rund ein Fünftel der Küstenlängsprofile des Abschnitts erodiert schwächer (21. Perzentil; F181.495: 58. Perzentil, also nahe der Mitte der Verteilung). Innerhalb eines 50- bis 100-m-Fensters weicht das Referenzprofil weniger als 6 % vom dortigen Median (dem mittleren Wert) ab und ist damit für seine unmittelbare Umgebung hochrepräsentativ; gegenüber dem Median des gesamten Kilometerabschnitts unterschätzt es die Erosion in der F180.715-Domäne jedoch um rund die Hälfte. Für abschnittsbezogene Aussagen wird daher empfohlen, statt eines Einzelprofils den Median über ein Fenster von etwa 200 m (≈ drei Autokorrelationslängen) zu verwenden; für Kalibrierung und Validierung bleibt das Referenzprofil uneingeschränkt geeignet, da Messung und Simulation dort ortsgleich verglichen werden.

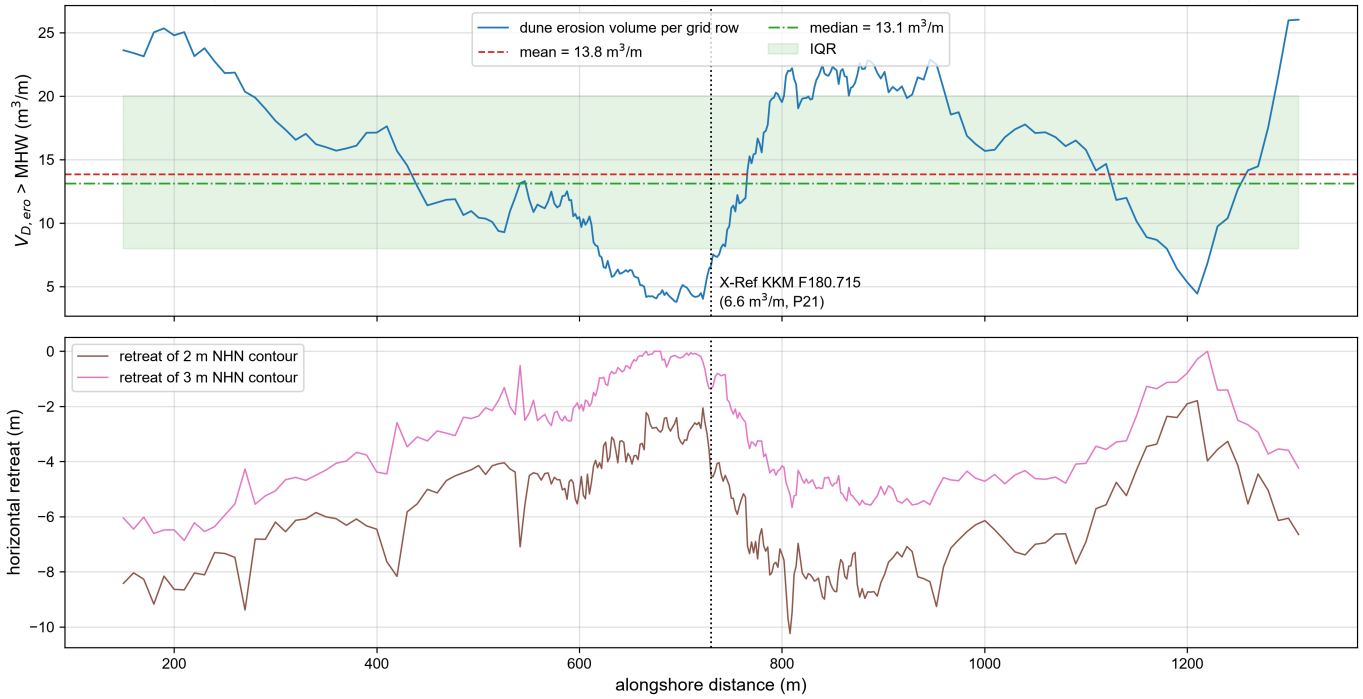


Abbildung 61: Küstenlängs-Verteilung des Dünenerosionsvolumens $V_{D,ero}$ über MHW (oben) sowie der horizontalen Verlagerung der 2- und 3-m-NHN-Höhenlinien (unten) je Gitterzeile der 2DH-Kalibrierungssimulation; gepunktete Vertikale: Referenzprofil X-Ref mit Perzentilangabe (Simulation: V8_05_run13_007, Domäne KKM F180.715)

Um die Ursachen des küstenparallelen Musters einzugrenzen, wurden in einer Korrelationsanalyse (Abbildung 62) mögliche Einflussgrößen je Gitterzeile dem dort simulierten Erosionsvolumen gegenübergestellt. Als Maß für die Stärke des Zusammenhangs dient der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman r_s: Er prüft, ob größere Werte der einen Größe durchgängig mit größeren (bzw. kleineren) Werten der anderen einhergehen, setzt dabei keinen linearen Verlauf voraus und ist robust gegenüber Ausreißern; Werte nahe ±1 bedeuten einen engen, Werte nahe 0 keinen erkennbaren Zusammenhang. Das deutlichste Ergebnis: Das Längsmuster folgt dominant der maximalen Varianz des Wasserspiegels am Strand (r_s= +0,82; run13_011: +0,65; F181.495-Domäne: +0,82). Diese Größe ist ein Indikator (Proxy) für Infragravitationswellen – langperiodische Wasserspiegelschwankungen im Brandungsbereich, die den Wellenauflauf an der Düne unmittelbar modulieren; unter dem schrägen mittleren Wellenangriff (346°) bilden sie küstenparallel strukturierte Auflaufmuster. Vorsturm-Dünenvolumen, maximaler Wasserstand, Küstenlängsströmung und küstennahe Wellenhöhe zeigen demgegenüber lediglich schwache Zusammenhänge ($|r_s| \leq 0{,}4$). Zu betonen ist, dass diese Zuordnung auf Korrelationsebene erfolgt – sie belegt Gleichläufigkeit, aber noch keine Ursache-Wirkungs-Beziehung; ein strenger Kausalitätsnachweis (etwa über Kontrollläufe mit küstennormalem Wellenangriff) steht aus und wird im Ausblick empfohlen (vgl. Unterabschnitt 9.2).

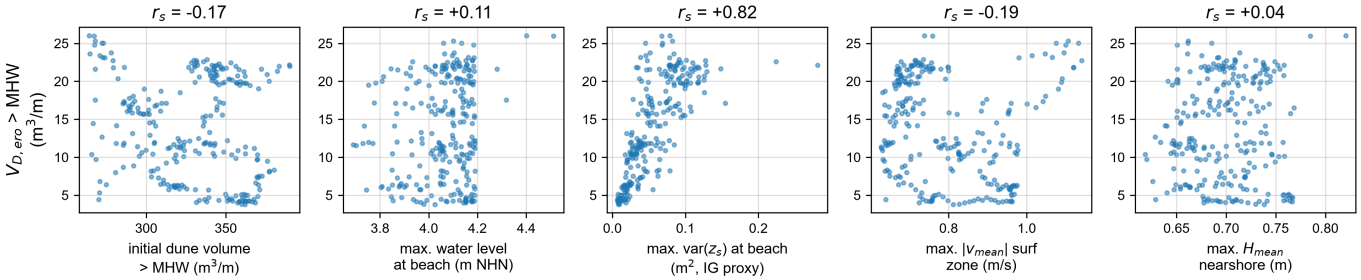


Abbildung 62: Korrelationsanalyse möglicher Einflussgrößen der Küstenlängs-Variabilität: Dünenerosionsvolumen je Gitterzeile gegen Vorsturm-Dünenvolumen, maximalen Wasserstand am Strand, Wasserspiegel-Varianz am Strand (Näherungsmaß für den Infragravitationsanteil), maximale Küstenlängsströmung und küstennahe mittlere Wellenhöhe mit Rangkorrelationskoeffizienten (Simulation: V8_05_run13_007, Domäne KKM F180.715)

6. Analyse hydraulisch-morphologischer Szenarien am Dünenkörper

Die Szenarienentwicklung (AP 3.4, vgl. Tabelle 1) dient dem Prozessverständnis und der direkten Simulation der morphologischen Dünenbelastung für die Entwicklung des SDM in ResCAD B. Darüber hinaus ließen sich geeignete Trainingsdaten für ein leistungsfähiges, datenbasiertes MDE erzeugen. Das Arbeitspaket gliedert sich grob in drei Teile:

- XB(2DH) - Hydraulische Variation am Naturprofil
- XB(2DH) - Hydraulische Variation am Regelprofil des StALU MM (Profilvarianten StALU Stan 1 & 2)
- XB(1D) - Variation Klimaszenarien und Dünengeometrie für mitwachsende Standardprofile (StALU Stan 2 & Gleichgewichtsprofil nach Bruun/Dean)

Für alle Szenarien wurden synthetische, hydraulische Randbedingungen in Form von typischen Sturmhochwasserganglinien aus dem SHG erzeugt. Die 2DH-Simulationen bilden die Datengrundlage der Module 1 und 2 des MDE; Modul 3 basiert auf den 1D-Simulationen der Serie V12_01 (vgl. Unterabschnitt 6.6). Wesentliche Simulationseinstellungen wurden aus dem am Sturmhochwasser Oktober 2023 kalibrierten XB-Modell V8_05 entnommen. Im Verlauf der Szenarienentwicklung erfolgten jedoch noch einige kleinere Anpassungen, z. B. die MPI-Domain und Prozessaufteilung, das Setzen eines maximal wirksamen Wellenangriffswinkels θ oder die Größe der Wellensektoren $\Delta\theta$. Eine Übersicht aller berücksichtigten 2DH-Simulationscluster – einschließlich der Kalibrierung V8_05 und des Hindcasts V9_11 – ist in der Tabelle 15 gegeben.

Für die Volumenberechnung der Klimaszenarien ist das Bezugsniveau des Dünenerosionsvolumens $V_{D,ero}$ zu beachten: Die MHW-Referenzlinie von 1,19 m NHN beschreibt den Referenzzustand 2025 und steigt in den Klimaszenarien mit dem Meeresspiegel an (MHW + ΔMSL). Ab der Simulationsserie V12 wird die Referenzlinie deshalb konsistent mit dem Meeresspiegelanstieg mitgeführt; in den vorangegangenen Serien wurde vereinfachend ein konstantes MHW angesetzt, was für steigende Meeresspiegel keine stimmige Annahme darstellt. Die dort berechneten Erosionsvolumina fallen infolge des niedrigeren Bezugsniveaus systematisch größer aus, was beim Vergleich der Serien untereinander zu berücksichtigen ist.

Einer der Vorteile von standardisierten Profilen im Gegensatz zu Naturprofilen liegt in den besseren Möglichkeiten der Parametrisierung. Diese dienen nicht nur der eleganten Auswertung sondern können auch gezielt für die regelbasierte Konstruktion variabler, aber realistischer Dünen- und Strandprofile angewendet werden. Für die Analyse und Profilentwicklung sind Parameter zur Beschreibung der Dünenmorphologie definiert, die hier zu Beginn erläutert werden:

- D_{Bz} bezeichnet die Höhe des Vorstrandes
- $D_{Tz,ini}$ steht für die Höhe des Dünenfußpunktes vor der Simulation bzw. dem Ereignis und grenzt die Düne vom Vorstrand ab. In der Regel ist es der Punkt am seewärtigen Profil mit der größten Krümmung. Niedrig gelegene $D_{Tz,ini}$ sind abhängig vom Mittleren Meeresspiegel.
- $D_{Cz,ini}$ stellt die Höhe der Dünenkrone dar (Vorderkante seewärts)
- $D_{Cx,ini}$ bezeichnet den x-Wert der Dünenkrone (Vorderkante seewärts)

Tabelle 15: Übersicht der XBeach-Simulationscluster für die 2DH-Szenarienanalyse. Angegeben sind Simulationsnummer (Cluster),Geometrischer Profiltyp, Anzahl der Szenarien pro Simulation, hydr. Randbedingungen sowie deren Parameterspannweiten

Sim-Nr.	Profil	Anz. Szen.	Randbedingungen	Parameterspannweiten				
				$\eta \approx WSt$ (m NHN)	d (h)	H_{sig} (m)	T_p (s)	Schiefe (–)
V8_05	Natur	Kal.	MIKE21 10/2023	1,48	96	≤ 0,9	≤ 9,3	–
V9_11	Bruun	83	MIKE21-Hindcast 1941–2023	hist. variabel	–	–	–	–
V8_06	Natur	49	SHG-V1	0,92 – 2,00	17 – 104	0,9 – 3,0	4,5 – 8,4	–
V9_02	StALU Stan1	49	SHG-V1	0,92 – 2,00	17 – 104	0,9 – 3,0	4,5 – 8,4	–
V9_03	StALU Stan2	49	SHG-V1	0,92 – 2,00	17 – 104	0,9 – 3,0	4,5 – 8,4	–
V9_04	StALU Stan2	32	SHG-V1-RHW (ab hier P_{mod}-Sortierung)	2,30	11 – 216	0,9 – 2,5	4,3 – 8,6	–
V9_05	StALU Stan2	43	SHG-V1-BHW (+11 zus. RHW)	3,30	11 – 216	0,9 – 2,5	4,3 – 8,6	–
V9_06-run01	StALU Stan2	11	SHG-V2, *Dur_var*	3,30	20 – 120	2,60	8,50	–
V9_06-run02	StALU Stan2	9	SHG-V2, *Hsig_var*	3,30	106	1,0 – 3,0	8,50	–
V9_06-run03	StALU Stan2	8	SHG-V2, *Tp_var*	3,30	106	2,60	4,5 – 9,5	–
V9_06-run04	StALU Stan2	15	SHG-V2, *WSt_var*	2,0 – 3,4	106	2,60	8,50	–
V9_07	StALU Stan2	–	≈ V9_06 $\Delta\theta$= 10° statt 20°	–	–	–	–	–
V9_08-run01	StALU Stan2	13	SHG-V2-BHW *Schiefe_Klima_var*	3,30	106	2,60	8,50	0,17 – 0,83
V9_08-run02	StALU Stan2	13	SHG-V2-RHW *Schiefe_var*	2,30	106	2,60	8,50	0,18 – 0,84
V9_08-run03	StALU Stan2	16	SHG-RHW *WSt_var*	0,7 – 2,2	106	2,60	8,50	0,16 – 0,81
V9_09	StALU Stan2	200	SHG-V2 (o. MSLR)	0,80 – 1,92	7 – 109	0,34 – 2,77	4,1 – 8,4	0,16 – 0,85
V9_10a (o. MPI)	StALU Stan2	15	SHG-V2	0,95 – 2,38	11 – 118	0,65 – 2,52	4,3 – 8,7	0,18 – 0,64
V9_10b (MPI)	StALU Stan2	15	SHG-V2	0,95 – 2,38	11 – 118	0,65 – 2,52	4,3 – 8,7	0,18 – 0,64

- $V_{D,ero}$ ist das Erosionsvolumen nach der Simulation bzw. nach dem Ereignis oberhalb der horizontalen Referenzlinie des MHW. Die Analyse der Profile aus den Daten des TADK in Abschnitt 4 zeigt, dass die meisten Dünen erst oberhalb dieses Referenzwertes beginnen.
- ΔD_{Cx} ist der horizontale Rückgang der Dünenkrone nach einer Simulation

Aufgrund der großen möglichen Anzahl von geometrischen Variationen in Kombination mit Klimaszenarien (SSP's) zugeordneten Extremwasserständen erfolgte die umfangreiche Neukalibrierung eines 1D-XBeach-Modells für die Simulationsensembles der Serien V10 und V12 (vgl. Unterabschnitt 5.3). Die auf Grundlage von Naturdaten des Sturmhochwassers 10/2023 kalibrierten Simulationseinstellungen wurden nun sowohl mit modifizierten Standardprofilen nach Vorgaben des StALU MM (StALU Stan 2) als auch mit Gleichgewichtsprofilen nach Bruun/Dean kombiniert. Daraus sollen sich Klimaanpassungs- und Bemessungsmaßnahmen für die Küstenschutzdünen ableiten lassen.

6.1. Hydraulische Variation mit dem Sturmhochwassergenerator am Naturprofil (2DH)

Im ersten Anlauf der Szenarienanalyse wurde das Simulationsensemble V8_06 – mit dem Naturprofil und den Simulationsparametern des kalibrierten 2DH-Hindcast-Modells aus V8_05 (Kapitel 5.1.2) – mit insgesamt 50 synthetischen Szenarien aus dem SHG beaufschlagt. Die hydraulischen Randbedingungen setzen sich aus Variationen des maximalen Extremwasserstandes (WSt / η), der Dauer des Sturmhochwassers (Dur), der signifikanten Wellenhöhe (H_{sig}) und der Peakperiode (T_p) zusammen. Die Zeitreihen für die einzelnen Simulationen wurden mit dem Sturmhochwassergenerator generiert und nach dem Extremwasserstand geordnet und nummeriert (Nr. 1 steht für den niedrigsten WSt). Es galt zunächst die Annahme, dass WSt proportional zur Intensität des Sturmhochwassers ist. Die sich ergebenden Erosionsprofile aller Simulationen von V8_06 über dem Grenzwert $V_{D,ero}$ = 1 m^3/m sind in einer gemeinsamen Grafik für den Küstenquerschnitt bei KKM F181495 dokumentiert (Abbildung 63). Alle Profile wurden entsprechend so verschoben, dass der Nulldurchgang in x-Richtung genau bei z = 2 m NHN das Ausgangsprofil trifft. Außerdem ist der für die Berechnung des Dünenerosionsvolumens wichtige MHW-Horizont und der MSL eingezeichnet.

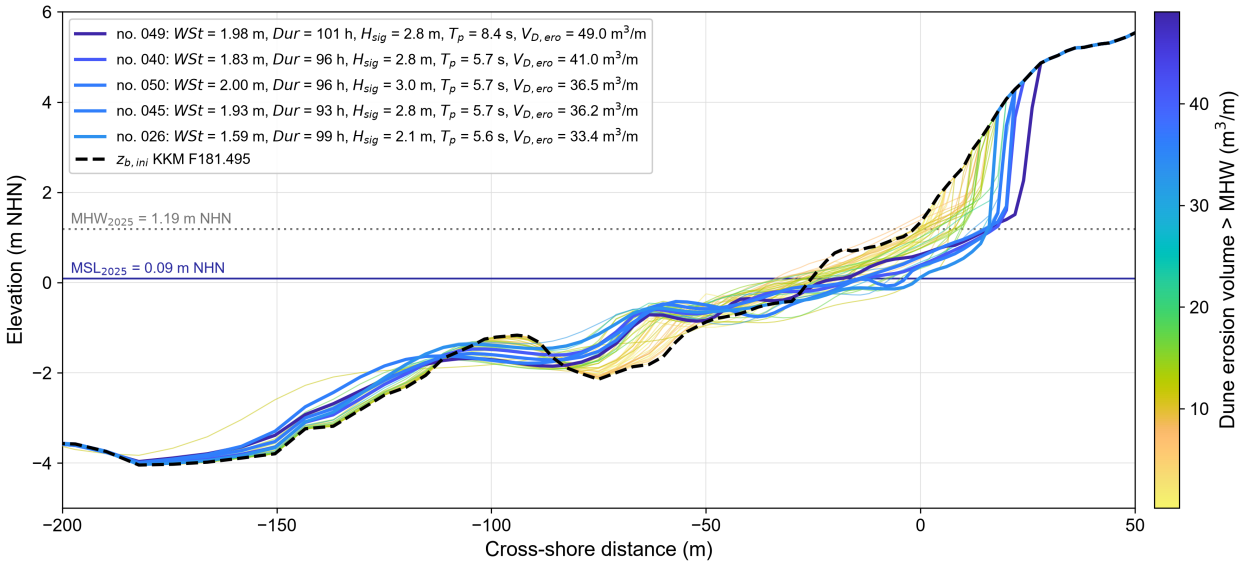


Abbildung 63: Erosionsprofile der XB-2DH-Modellierung (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m^3/m) basierend auf einem Naturprofil bei KKM F181.495 (Simulation: V8_06)

Die 5 Szenarien mit dem größten Dünenerosionsvolumen sind in der Legende und in der Grafik hervorgehoben. Daraus ergaben beispielsweise das größte Erosionsvolumen $V_{D,ero}$ für das Ereignis Nr. 49 (WSt=1.98 m, Dur=101 h, H_{sig}=2.8 m, T_p=8.4 s), korrespondierend mit dem größten Dünenrückgang ΔD_{Cx} von ca. 20 m. Der maximale Wasserstand und die Wellenperiode (beide für Nr. 49 im Maximalbereich) scheinen hier besonders ausschlaggebend zu sein. Der erkennbare Dünenfußpunkt im Erosionsprofil liegt in allen Fällen in der Nähe, aber über dem MHW-Horizont. Dies zeigt, dass der Horizont gut zur Berechnung des Dünenerosionsvolumens gewählt wurde. Für alle Profile findet außerdem eine Abflachung des Strandes und die Ausbildung einer Sandbank statt.

In der Abbildung 64 sind die Simulationen geordnet nach dem Sedimentations- bzw. Erosionsvolumen aufgetragen. Daraus ergibt sich, dass die analytische Berechnung der Intensität nach dem Wasserstand lediglich geringfügig korreliert.

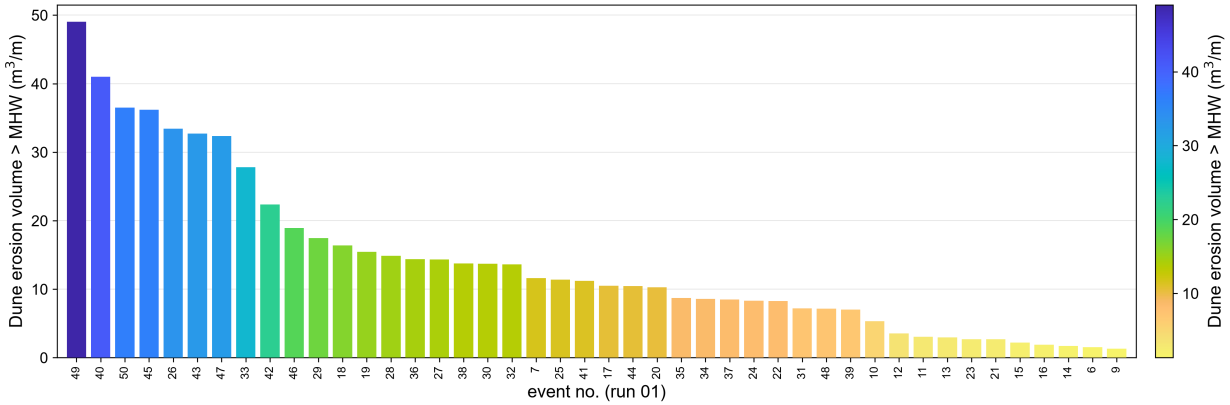


Abbildung 64: SHG-Szenarien aus XB sortiert nach Dünenerosionsvolumen (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m^3/m) auf Grundlage eines Naturprofils bei KKM F181.495 (Simulation: V8_06)

Im Simulationsensemble V9_03 wurde in Absprache mit dem StALU MM die 2DH-Topobathymetrie an ein lineares Standardprofil angepasst (vgl. Abschnitt 5.1.6). Im Vergleich zu V9_02 (hier ausgelassen) verläuft die hier verwendete 2. Variante (StALU Stan2) mit einem flacheren Anstieg des Vorstrandes von 1:100 von z = -5 m bis -1 m NHN um sich dem Naturprofil aus V8_06 besser anzunähern. Die Erosionsprofile und zugehörigen Erosionsvolumina sind in der Abbildung 65 und der Abbildung 66 dargestellt.

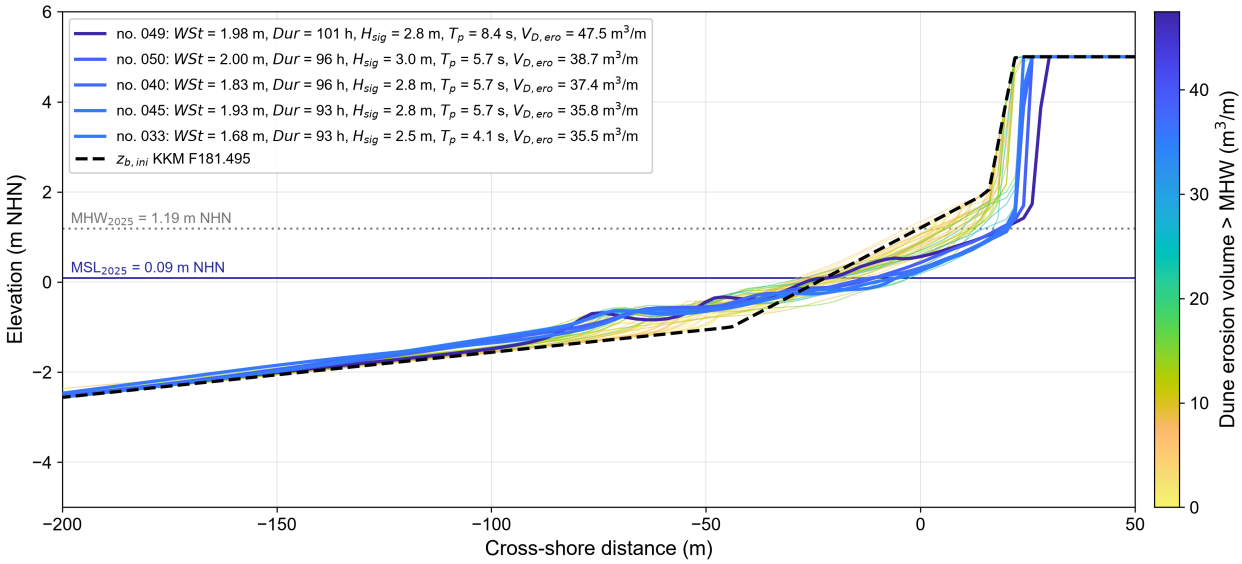


Abbildung 65: Erosionsprofile der XB-2DH-Modellierung (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m^3/m) mit StALU-Standardgeometrie (Simulation: V9_03)

Es fällt auf, dass die Größenordnung der Dünenerosionsvolumen sowohl für das Standard- wie auch das Naturprofil eine ähnliche Verteilung aufweisen. Unterschiede treten dabei meist im Ranking der einzelnen Simulationen auf. Für das Standardprofil fallen die Erosionsvolumina etwas geringer aus. Die Analyse bzw. die effiziente Approximation von komplexen Naturprofilen hin zu Standardprofilen ist Teil laufender Untersuchungen.

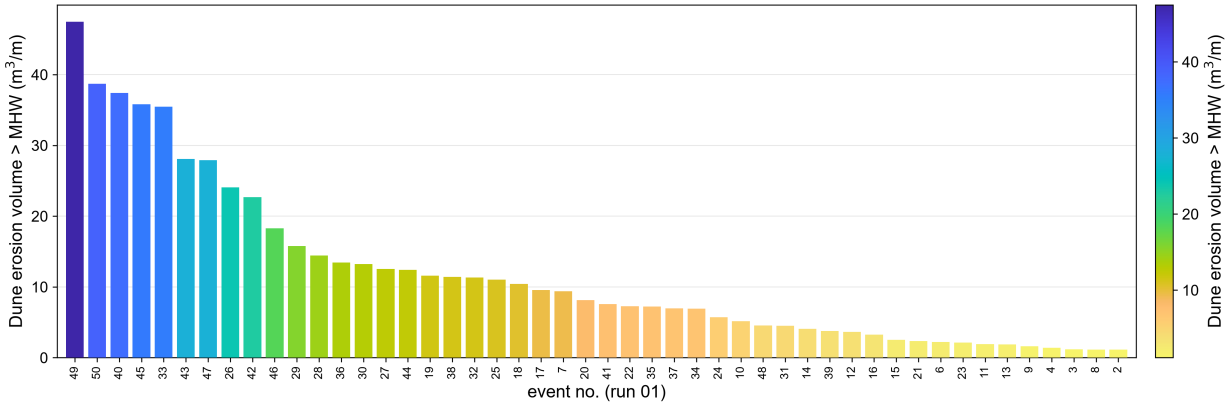


Abbildung 66: SHG-Szenarien aus XB sortiert nach Dünenerosionsvolumen (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m^3/m) auf Grundlage eines StALU-Standardprofils (Simulation: V9_03)

Da die vorläufigen Ergebnisse aus V8_06 und V9_03 nicht eindeutig mit dem Wasserstand korrelieren (siehe Abbildung 64) sollten Seegang, Wassertiefe und Dauer des Sturmhochwassers in eine erste, analytische Approximationsmethode zur Intensität des Sturmhochwassers einfließen. Ab Simulationsensemble V9_04 wurde angenommen, dass die Intensität eines Sturmhochwassers mit der kumulierten Wellenleistungsdichte P_{mod} einhergeht und die Simulationen entsprechend durchnummeriert. In der Abbildung 67 ist P_{mod} für jedes Szenario in Abhängigkeit zur Wassertiefe aufgetragen. Je flacher und näher am Ufer, umso mehr Energie ist bereits umgewandelt – daher die zunehmenden, unterschiedlich gekrümmten Kurven über die Wassertiefe. Maßgebend für die Sortierung war eine Wassertiefe von d = 2 m.

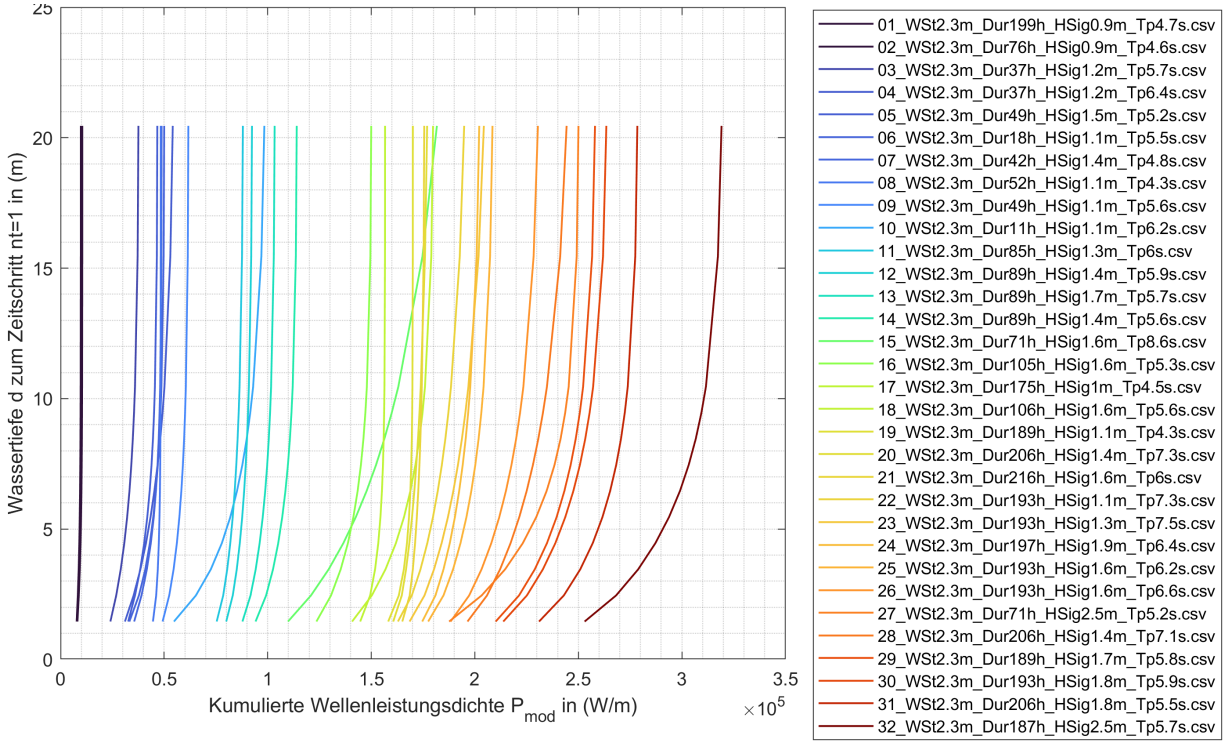


Abbildung 67: Kumulierte Wellenleistungsdichte der hydraulischen Randbedingungen über die Wassertiefe für das Szenario-Ensemble V9_04 (RHW-Varianten)

Die Wellenleistungsdichte P – definiert als der Energiefluss je Meter Wellenfront – lässt sich nach der in der Küsteningenieurpraxis etablierten Beziehung

$$P = \frac{\rho\, g^2}{64\pi}\, H_{sig}^2\, T_p \tag{13}$$

abschätzen (Holthuijsen 2007). Hierin bezeichnen ρ die Dichte des Meerwassers, g die Erdbeschleunigung, H_{sig} die signifikante Wellenhöhe sowie T_p die Peakperiode des Wellenspektrums. Die Gleichung (13) beschreibt den durch den Seegang pro Meter Küstenlinie transportierten Energiefluss und bildet die Grundlage der nachfolgenden Energiebilanzierung. Die über die Dauer eines Sturmflutereignisses akkumulierte Wellenenergie E_{total} ergibt sich durch zeitliche Summation der in jedem Zeitschritt vorliegenden Leistungsdichte P:

$$E_{\text{total}} = \sum_i P_i \cdot \Delta t \tag{14}$$

wobei P_i die Leistungsdichte zum i-ten Zeitschritt und Δt die konstante Zeitschrittlänge der Eingangszeitreihe bezeichnen, vgl. Gl. (13). Soll der Einfluss der Wassertiefe auf die Energieübertragung explizit berücksichtigt werden, ist das Verhältnis der lokalen Wassertiefe d zur Wellenlänge L von entscheidender Bedeutung. Die Wellenzahl k ist definiert als

$$k = \frac{2\pi}{L} \tag{15}$$

und mit der Wassertiefe d über die *Dispersionsrelation* verknüpft (o. D.):

$$\omega^2 = g\, k\, \tanh(k\, d) \tag{16}$$

Aus Gleichung (16) ergibt sich eine tiefenabhängige Modifikation der Wellenleistungsdichte P_{mod} gemäß

$$P_{mod} = P \cdot \tanh(k\, d) \tag{17}$$

Da der Faktor $\tanh(kd)$ mit zunehmender Wassertiefe asymptotisch gegen den Wert 1 strebt, ist der in Gleichung (17) beschriebene Tiefeneffekt vor allem unter Flachwasserbedingungen ($kd \ll 1$) von praktischer Relevanz. Der Wellenangriffswinkel α war zunächst nicht vorgegeben und variiert leicht in der SHG-Ausgabedatei.

Für die erste Version des SDM und eine vertiefte Analyse extremer Wasserstände wurden mit dem SHG jeweils unter Variation von Dur, H_{sig} und T_p 32 Szenarien für RHW- und BHW-Wasserstände simuliert. Für das Simulations-Ensemble V9_04 (RHW) sind in der Abbildung 68 und für V9_05 (BHW) in der Abbildung 69 die Erosionsprofile aufgetragen.

Ebenfalls können die Dünenerosionsvolumina über die Balkendiagramme in Abbildung 70 miteinander verglichen werden.

Für die Extremwertanalyse wurde ebenfalls eine statistische Zusammenstellung der Parameterspannweiten in Form eines Boxplots in der Abbildung 71 erstellt. Eine Erklärung der Symbolik ist hier nachzulesen: `https://de.mathworks.com/help/stats/boxplot.html`. Die rote Linie stellt den Median dar, die roten Kreuze sind Ausreißer (engl. *outlier*). Gestrichelte Linien stellen das mit einem Faktor versehene Verhältnis vom 75% zum 25%-Quantil dar.

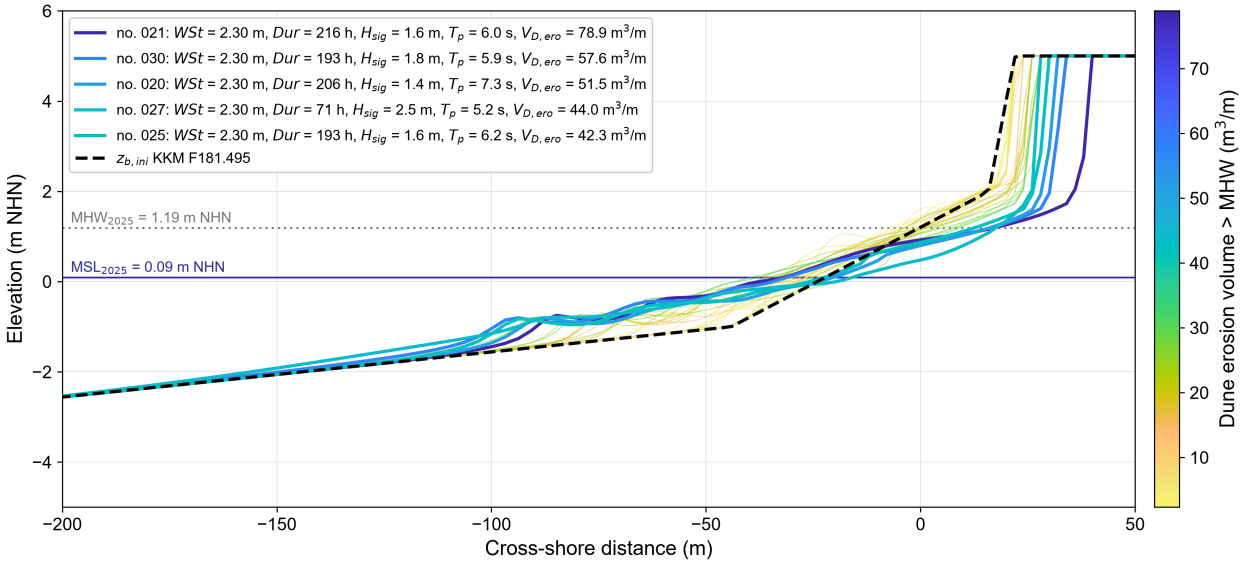


Abbildung 68: Erosionsprofile der XB-2DH-Modellierung für die RHW-Szenarien (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m^3/m) mit StALU-Standardgeometrie (Simulation: V9_04)

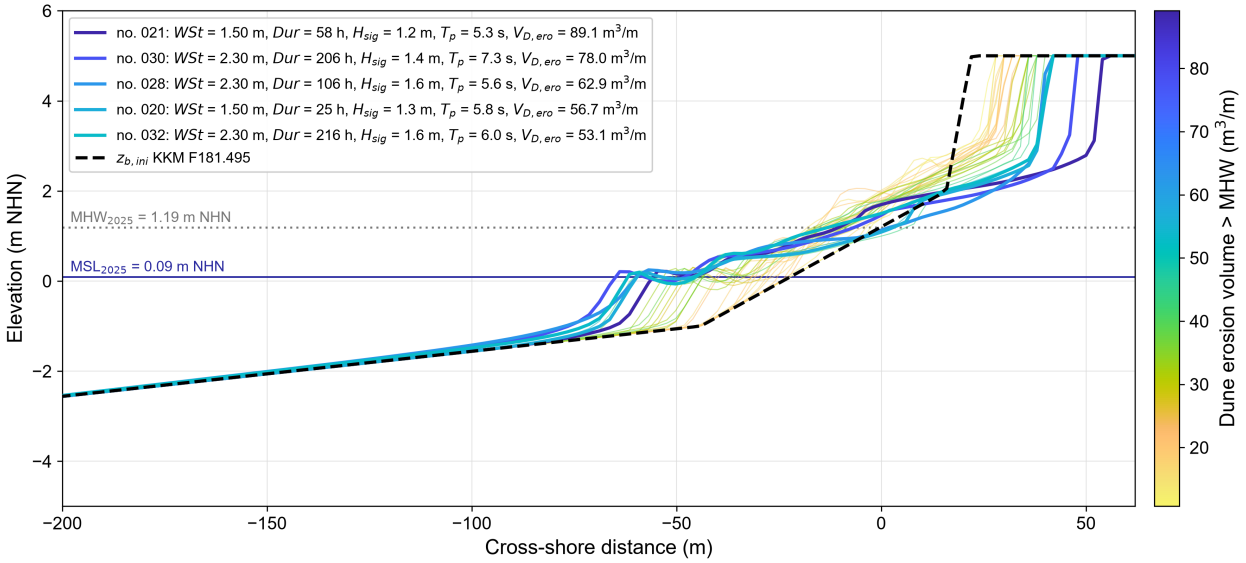
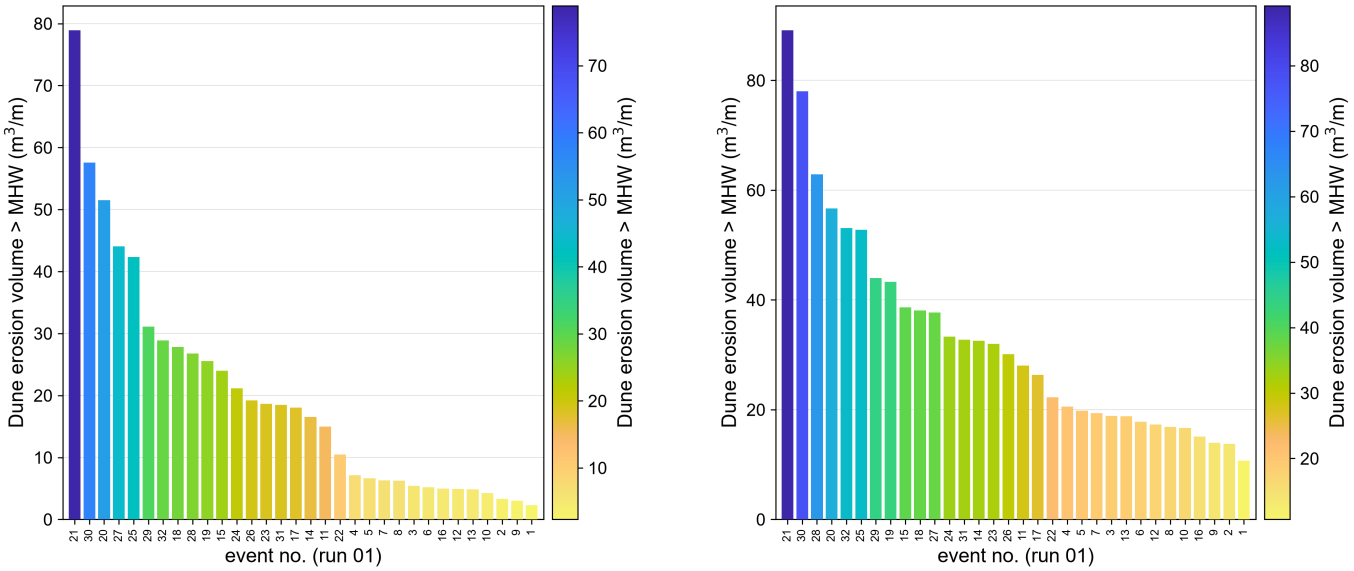


Abbildung 69: Erosionsprofile der XB-2DH-Modellierung für die BHW-Szenarien (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m^3/m) mit StALU-Standardgeometrie (Simulation: V9_05)

Das Szenarien-Ensemble V9_06 diente der vertieften Parameterstudie der charakteristischen Maximalwerte von Dur, H_{sig}, T_p und WSt. Für jeden Run wurden eine Anzahl Simulationen durchgeführt, in der jeweils ausschließlich die genannten Parameter variiert wurden. Die sich ergebenden Erosionsprofile je Run inklusive der jeweiligen Maximalergebnisse sind in der Abbildung 72 dargestellt.

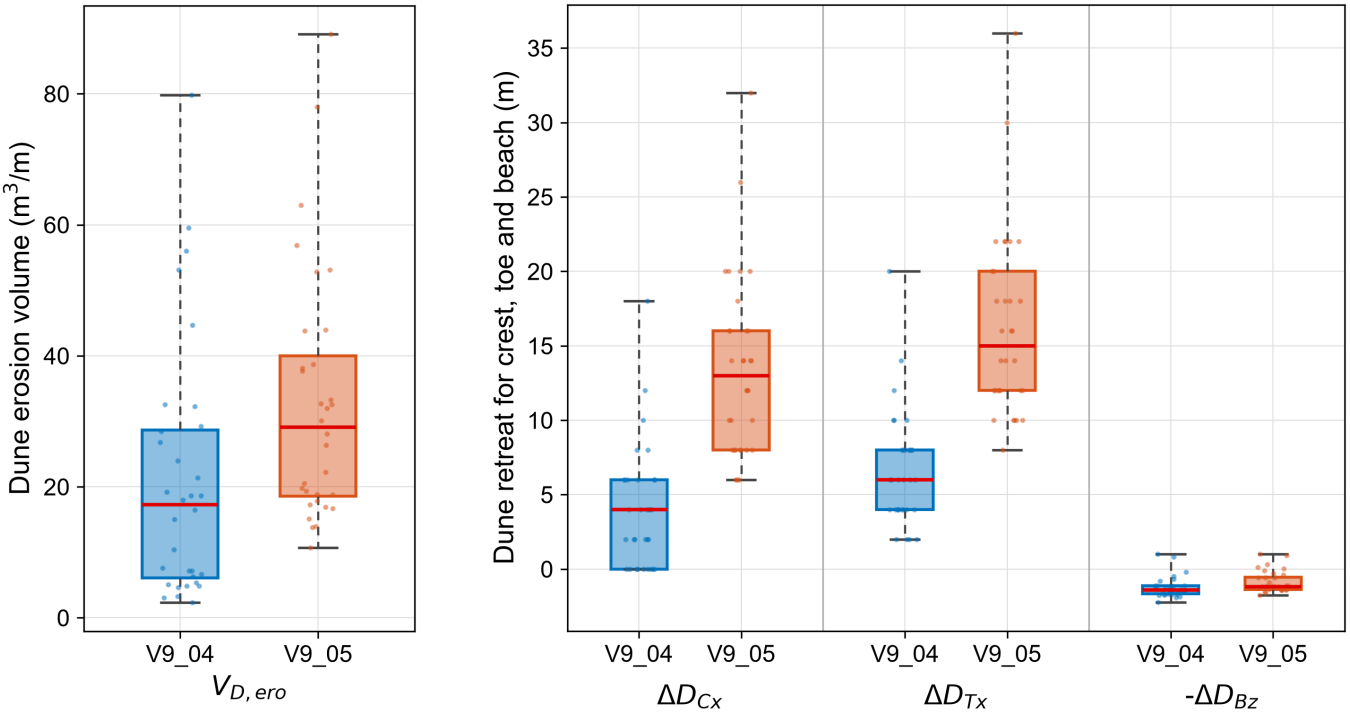
Die statistische Aufbereitung der Parameterspannweiten für V9_06 ist in Form eines Boxplots in Abbildung 73 dokumentiert; die Zusammenstellung der sortierten Dünenerosionsvolumina, geordnet nach dem jeweils variierten Parameter, zeigt Abbildung 74.

Das Szenarien-Ensemble V9_07 war ein Test der Auswirkungen einer veränderten Auflösung der Wellensektoren, die ein wichtiger Bestandteil der numerischen Seegangsberechnung sind. Im Vergleich zu V9_06 wurde hier $\Delta\theta$ auf 10° reduziert, was auch mit verlängerten Rechenzeiten einherging.



(a) $V_{D,ero}$ für V9_04 (b) $V_{D,ero}$ für V9_05

Abbildung 70: SHG-Szenarien aus XB für die Extremwertanalyse (RHW / BHW) sortiert nach Dünenerosionsvolumen (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m^3/m) auf Grundlage eines StALU-Standardprofils



(a) Dünenerosionsvolumen (b) Dünenrückgang (Krone, Fuß und Strand)

Abbildung 71: Parameterspannweiten der Szenarien-Ensembles für die Extremwertanalyse (RHW / BHW) als Boxplot (Simulation: V9_04 & V9_05)

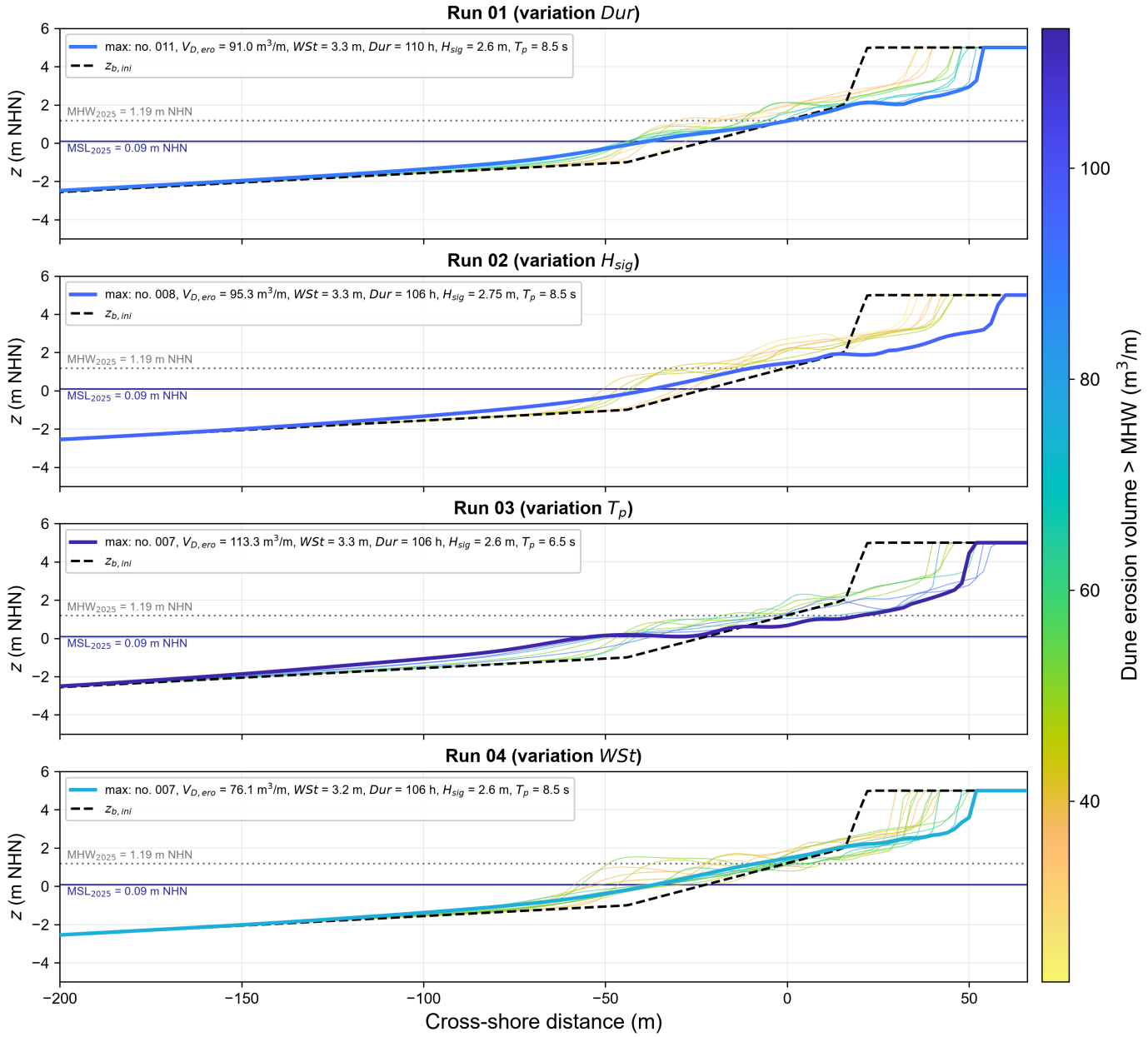
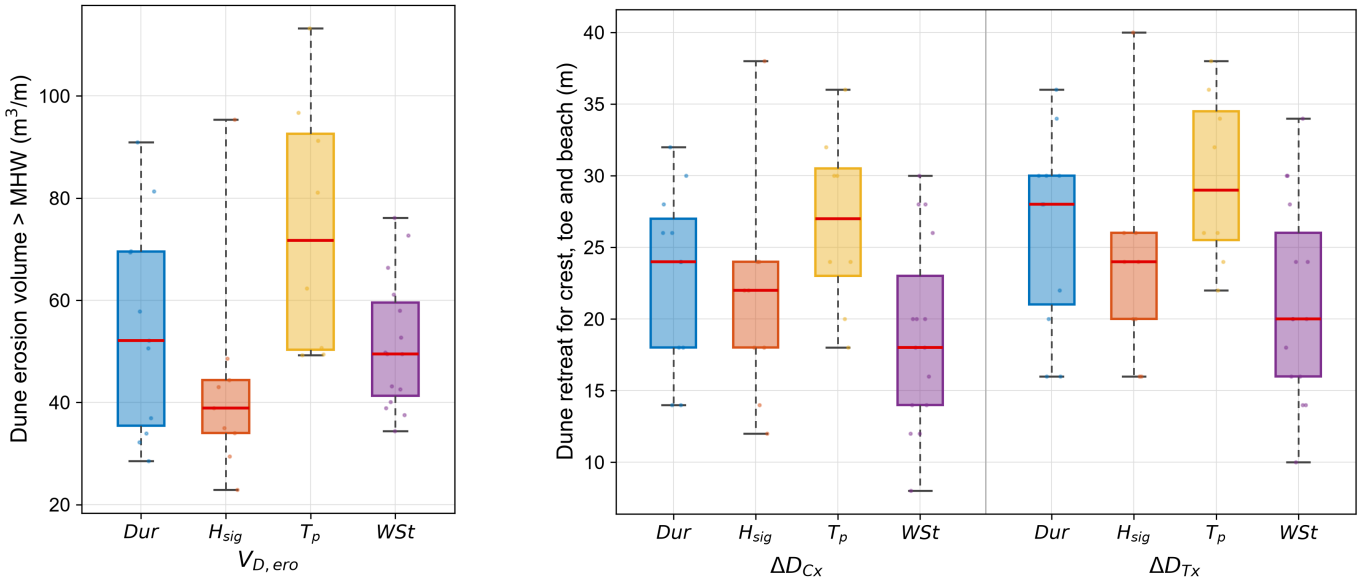


Abbildung 72: Erosionsprofile der XB-2DH-Modellierung für die Szenarien (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m^3/m) mit StALU-Standardgeometrie (Simulation: V9_06)

Die sich ergebenden Erosionsprofile je Run inklusive der jeweiligen Maximalergebnisse sind wieder in der Abbildung 75 dargestellt. Dabei ergaben sich kleinere, aber merkliche Unterschiede zu V9_06. Am deutlichsten treten sie bei der Variation des *WSt* in Run 04 auf, wo sich das Erosionsvolumen um etwa 10% erhöht.

Die statistische Aufbereitung für V9_07 ist in Form eines Boxplots in Abbildung 76 dokumentiert. Im Vergleich zu V9_06 lässt sich hier auch die signifikante Erhöhung des Dünenrückgangs für die Variation von T_p in Run 03 erkennen; die Zusammenstellung der sortierten Dünenerosionsvolumina, geordnet nach dem jeweils variierten Parameter, zeigt Abbildung 77.

Nicht betrachtet wurden in der Parameteranalyse bisher die Schiefe (Asymmetrie der Ganglinie bei gleichen Extremwerten) und die Auswirkungen eines erhöhten MSL durch die Einführung eines Klimavorsorgemaßes von MSL + 1 m. Dafür wurde das Szenarien-Ensemble V9_08 entwickelt und



(a) Dünenerosionsvolumen (b) Dünenrückgang (Krone, Fuß und Strand)

Abbildung 73: Statistische Aufbereitung der Szenarien-Ensembles für die Extremwertanalyse als Boxplot (Simulation: V9_06)

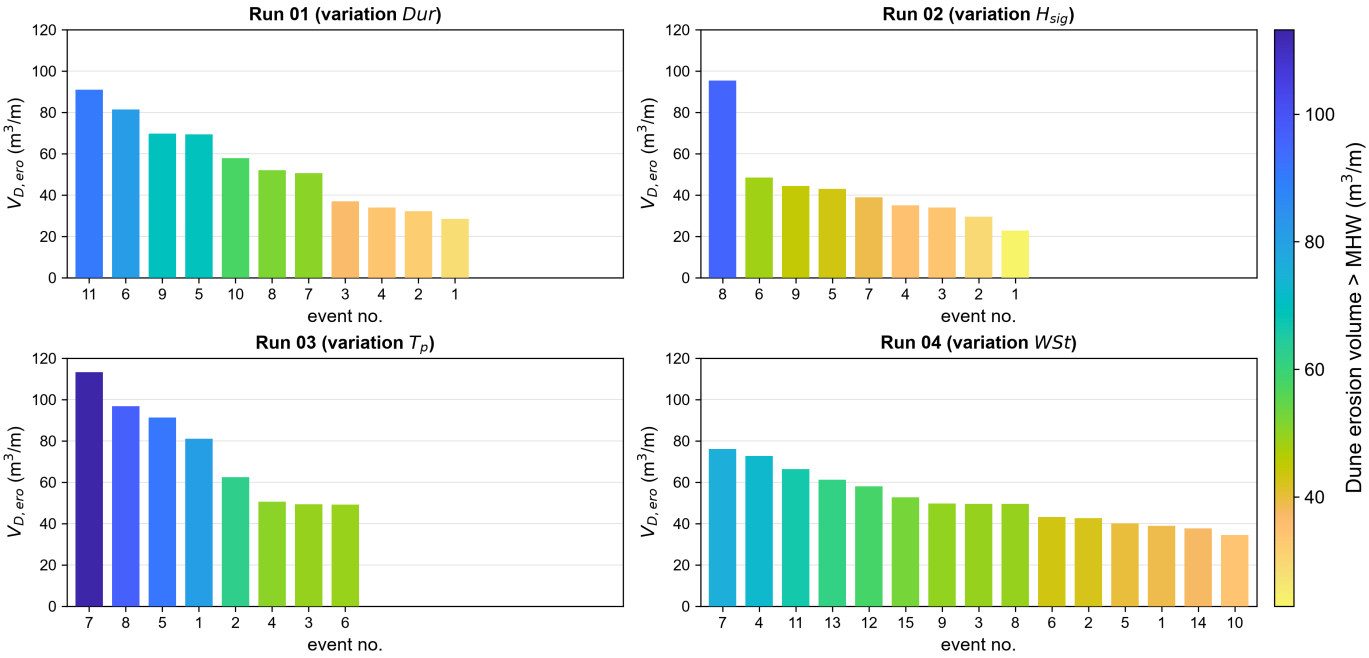


Abbildung 74: SHG-Szenarien aus XB für die Parameterstudie (Dur, H_{sig}, T_p und WSt) sortiert nach Dünenerosionsvolumen (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m³/m) mit StALU-Standardgeometrie (Simulation: V9_06)

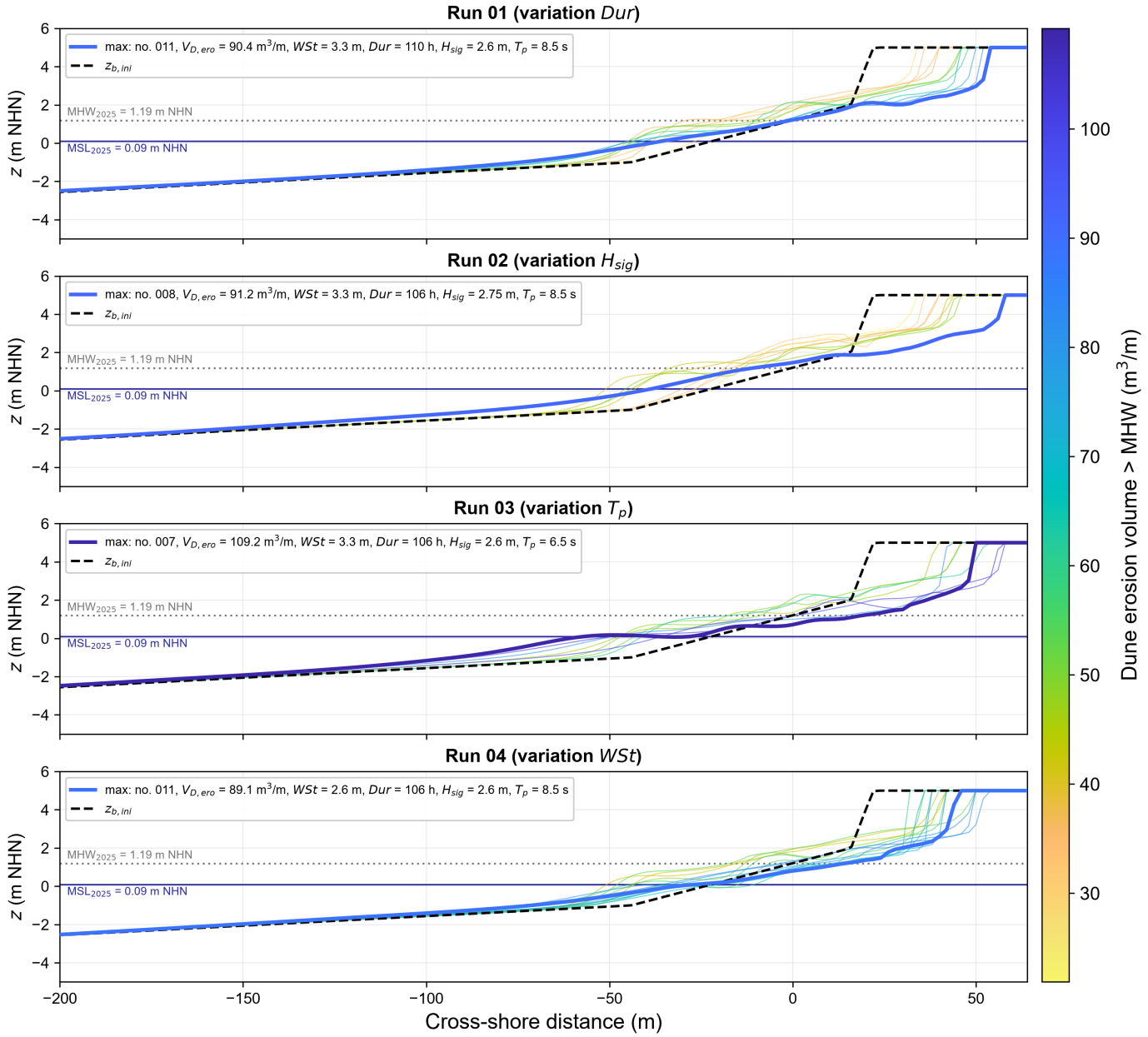
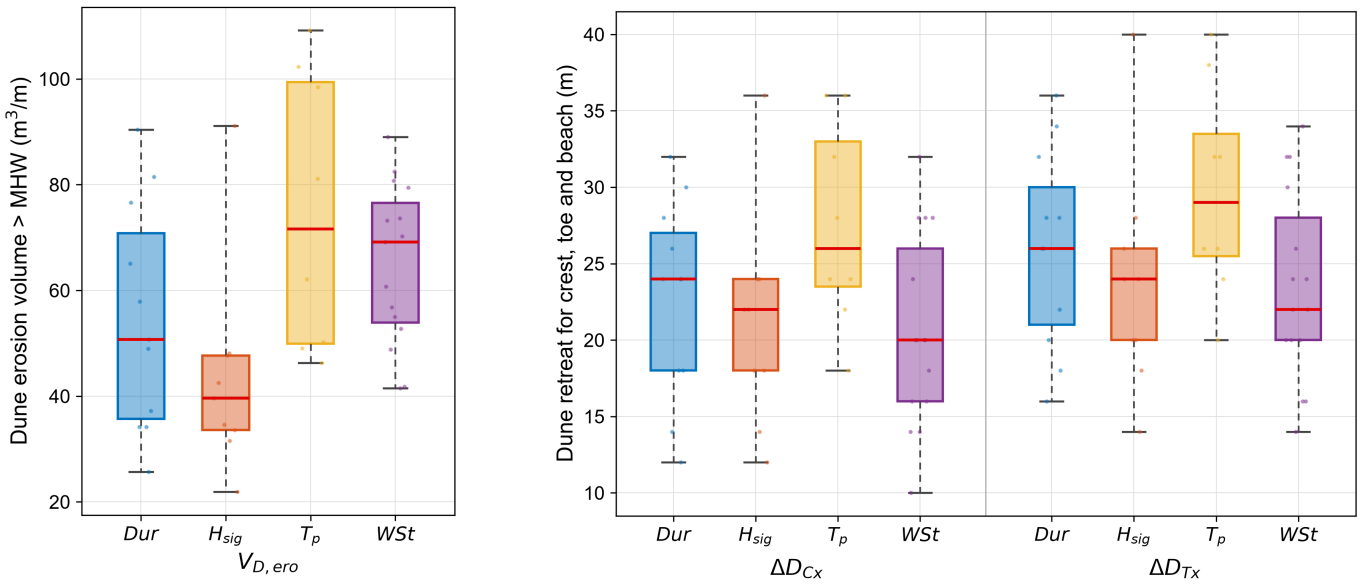


Abbildung 75: Erosionsprofile der XB-2DH-Modellierung für die Szenarien (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m^3/m) mit StALU-Standardgeometrie (Simulation: V9_07)

in 3 Runs aufgeteilt, wobei der erste Run die Schiefe + den MSLR, der zweite ausschließlich die Schiefe und der dritte Run ausschließlich die Variation von *WSt* als Referenz beinhaltet. Die sich ergebenden Erosionsprofile je Run inklusive der jeweiligen Maximalergebnisse sind in der Abbildung 78 dargestellt.

Die statistische Aufbereitung für V9_08 ist in Form eines Boxplots in Abbildung 79 dokumentiert; die Zusammenstellung der sortierten Dünenerosionsvolumina, geordnet nach dem jeweils variierten Parameter, zeigt Abbildung 80.

Die Ensembles V9_09 und V9_10b liefern die finale Datengrundlage für das SDM sowie simulierte Trainingsdaten für das MDE-Modul 1: Zunächst wurden 200 Szenarien geordnet nach Eintrittswahrscheinlichkeit mit dem SHG generiert (Simulationsensemble V9_09) und durch weitere 15 Simulationen fehlender Ereignisse ergänzt, um statistische Lücken zu schließen (Simulationsensem-



(a) Dünenerosionsvolumen (b) Dünenrückgang (Krone, Fuß und Strand)

Abbildung 76: Statistische Aufbereitung der Szenarien-Ensembles für die Extremwertanalyse als Boxplot (Simulation: V9_07)

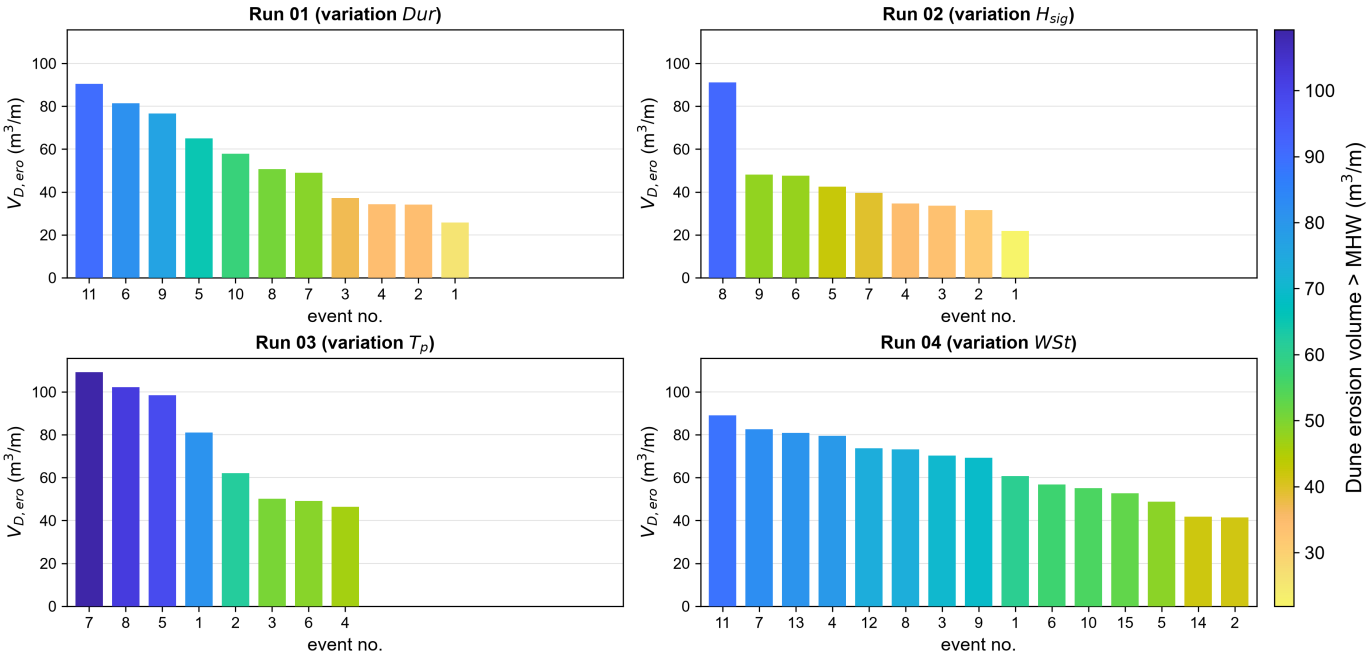


Abbildung 77: SHG-Szenarien aus XB für die Parameterstudie (*Dur*, H_{sig}, T_p und *WSt*) sortiert nach Dünenerosionsvolumen (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m³/m) mit StALU-Standardgeometrie (Simulation: V9_07)

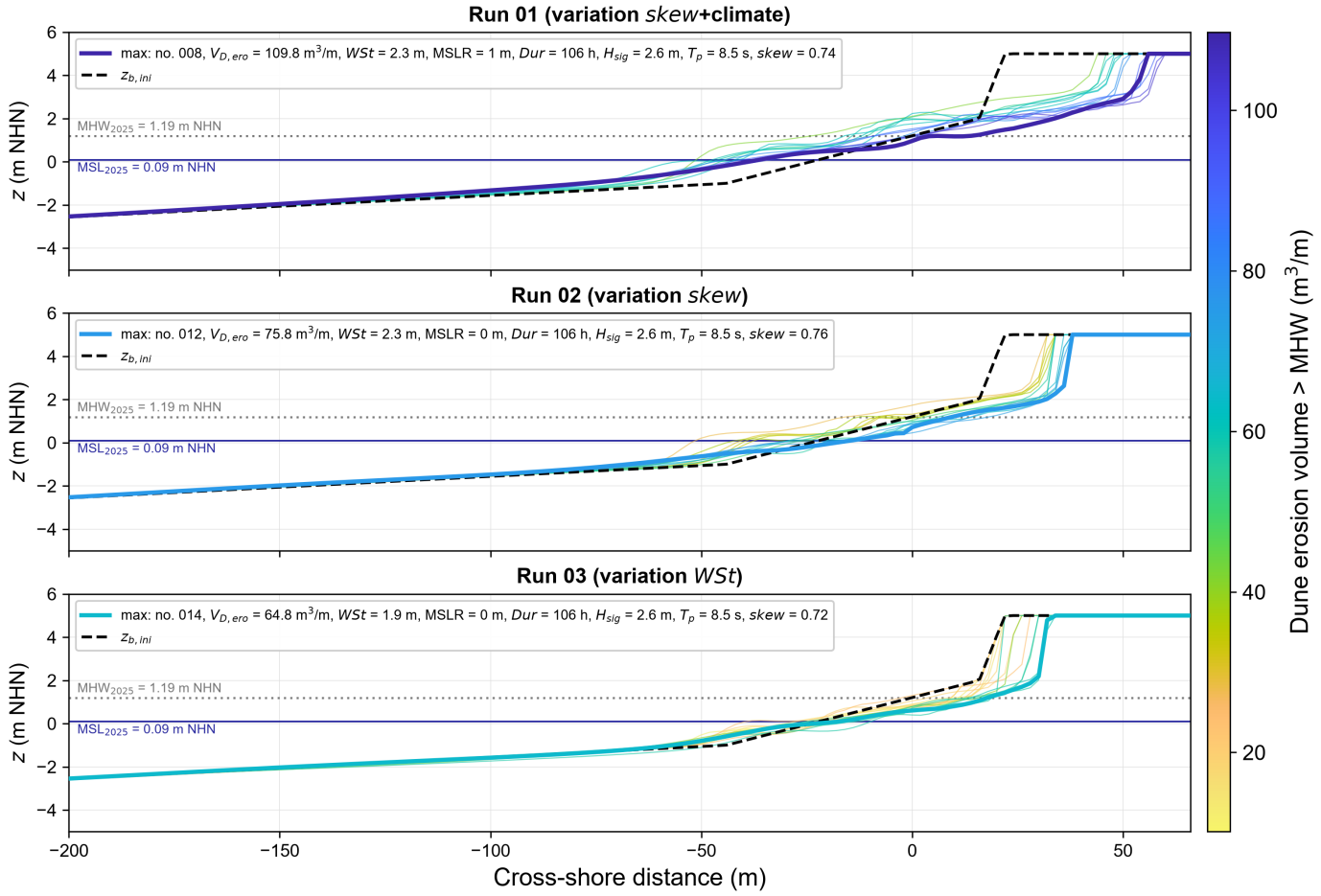
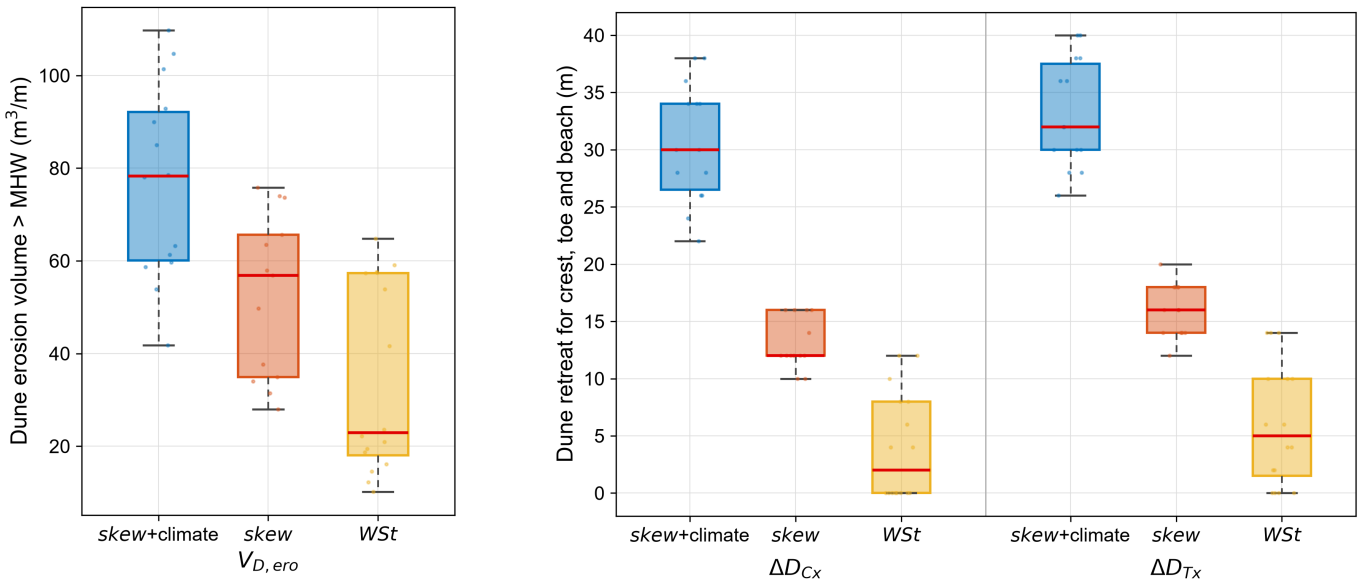


Abbildung 78: Erosionsprofile der XB-2DH-Modellierung für die Szenarien (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m^3/m) mit StALU-Standardgeometrie (Simulation: V9_08)



(a) Dünenerosionsvolumen (b) Dünenrückgang (Krone, Fuß und Strand)

Abbildung 79: Statistische Aufbereitung der Szenarien-Ensembles für die Extremwertanalyse als Boxplot (Simulation: V9_08)

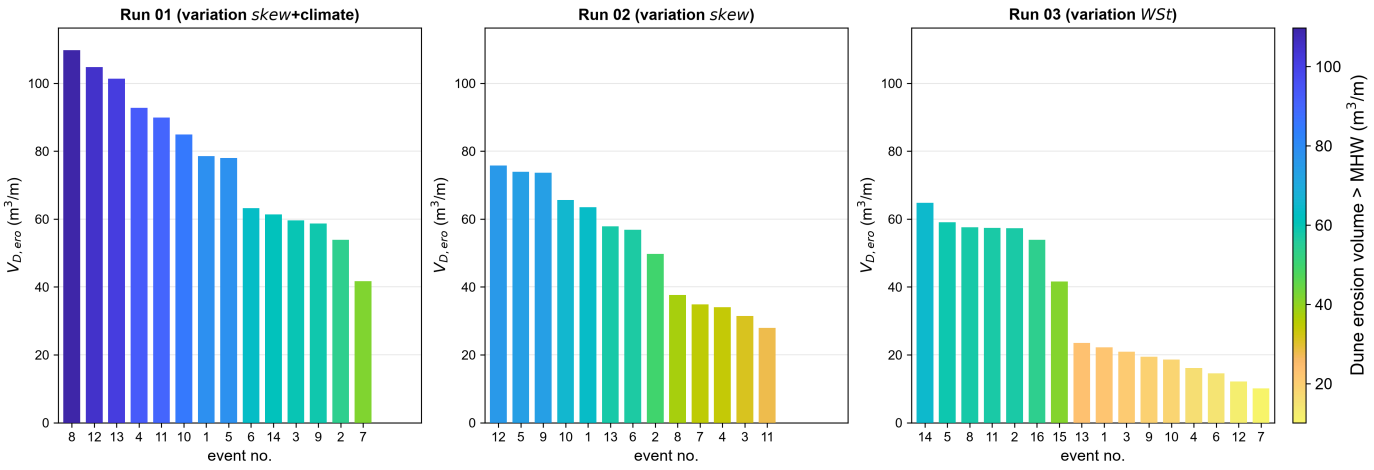


Abbildung 80: SHG-Szenarien aus XB für die Parameterstudie (Dur, H_{sig}, T_p und WSt) sortiert nach Dünenerosionsvolumen (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m³/m) mit StALU-Standardgeometrie (Simulation: V9_08)

ble V9_10b). Die Erosionsprofile aller Simulationen mit einem $V_{D,ero} \geq 1$ m³/m und die zugehörigen Erosionsvolumina von V9_09 sind in Abbildung 81 und Abbildung 82 dargestellt.

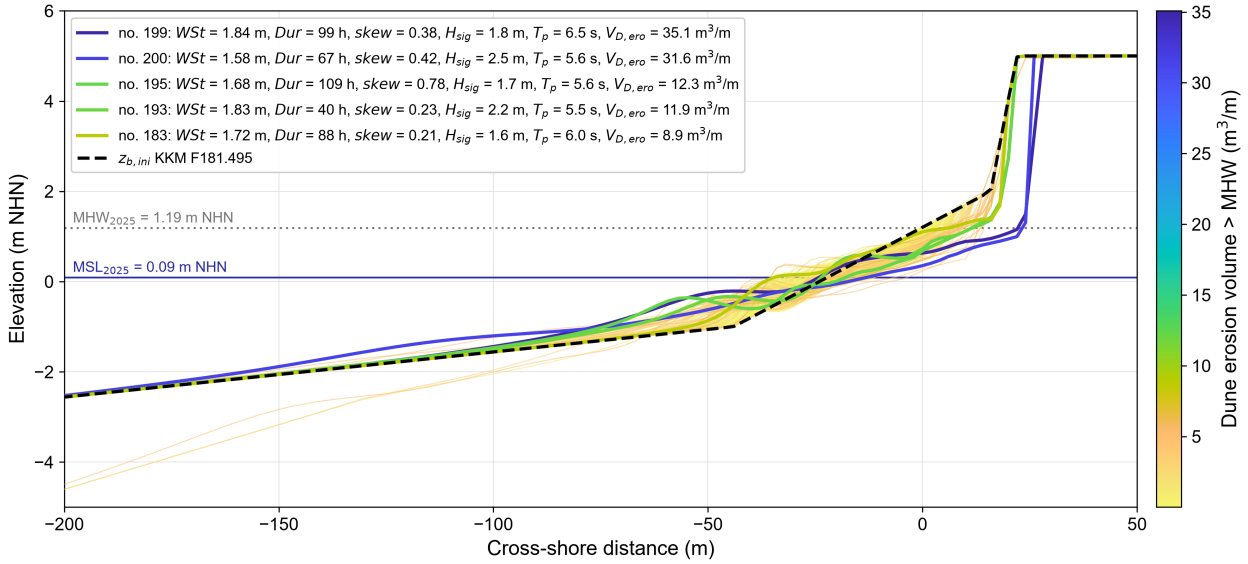


Abbildung 81: Erosionsprofile der XB-2DH-Modellierung (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m³/m) mit StALU-Standardgeometrie (Simulation: V9_09)

Die Erosionsprofile und zugehörigen Erosionsvolumina von V9_10b sind in der Abbildung 83 und in der Abbildung 84 dargestellt. Das ursprüngliche Ensemble V9_10 war ohne MPI-Parallelisierung und damit ohne zyklische laterale Randbedingungen gerechnet worden, was zu erheblichen Abweichungen führte; es wurde deshalb durch das konsistent konfigurierte Ensemble V9_10b ersetzt und hier nicht weiter ausgewertet.

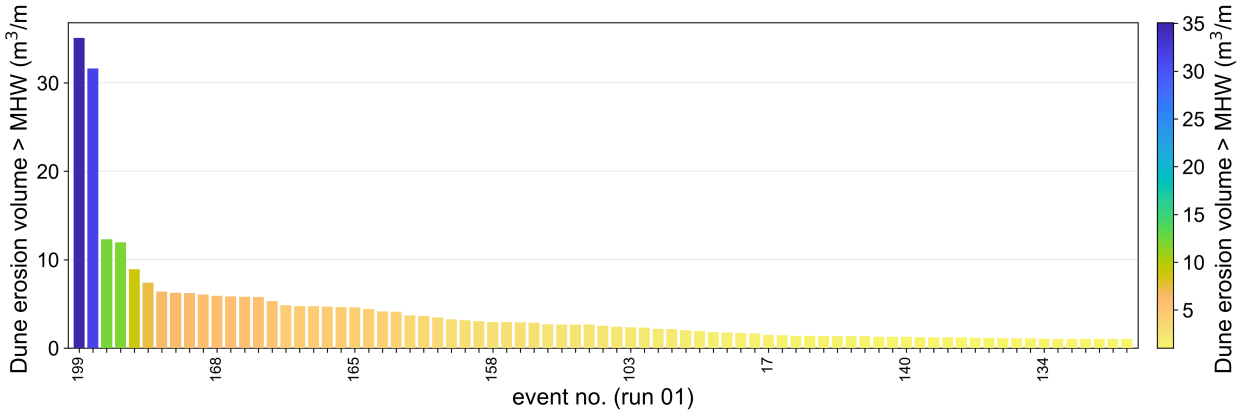


Abbildung 82: SHG-Szenarien aus XB sortiert nach Dünenerosionsvolumen (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m^3/m) auf Grundlage eines StALU-Standardprofils (Simulation: V9_09)

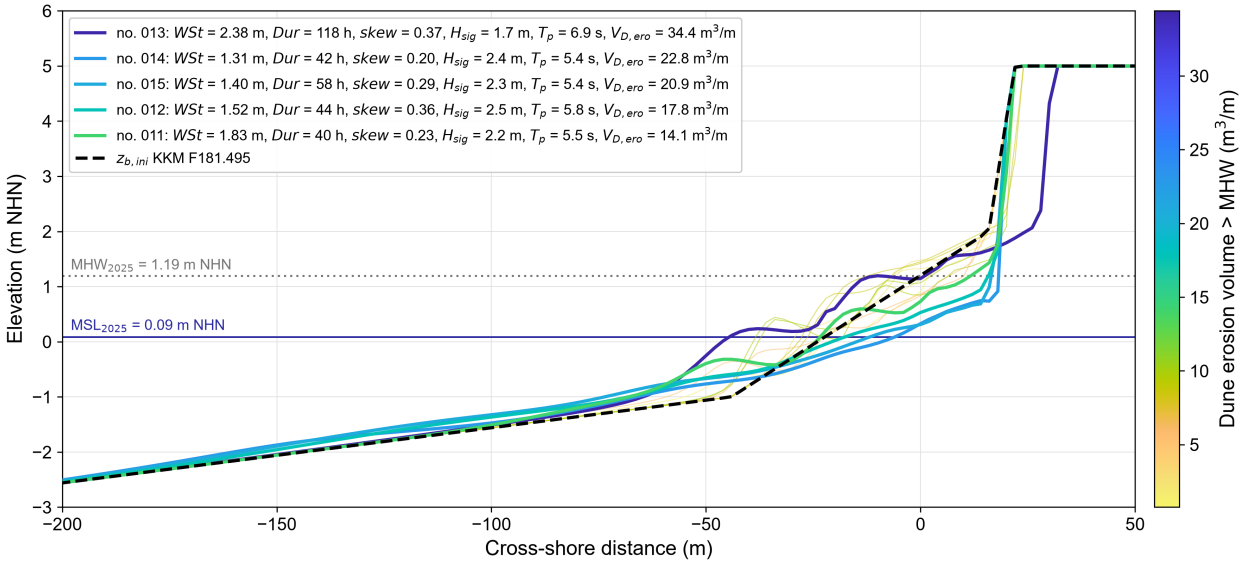


Abbildung 83: Erosionsprofile der XB-2DH-Modellierung (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m^3/m) mit StALU-Standardgeometrie (Simulation: V9_10b)

Die Abbildung 85 stellt eine statistische Auswertung der Simulationen V9_09 und V9_10b in Form von Boxplots dar. Wie bereits in den vorangegangenen Grafiken zeigt sich das meist geringe Dünenerosionsvolumen dieser Ensembles mit einigen wenigen Ausnahmen. Die meisten Daten lassen sich für die Veränderung des Vorstrandes ΔD_{Bz} erfassen.

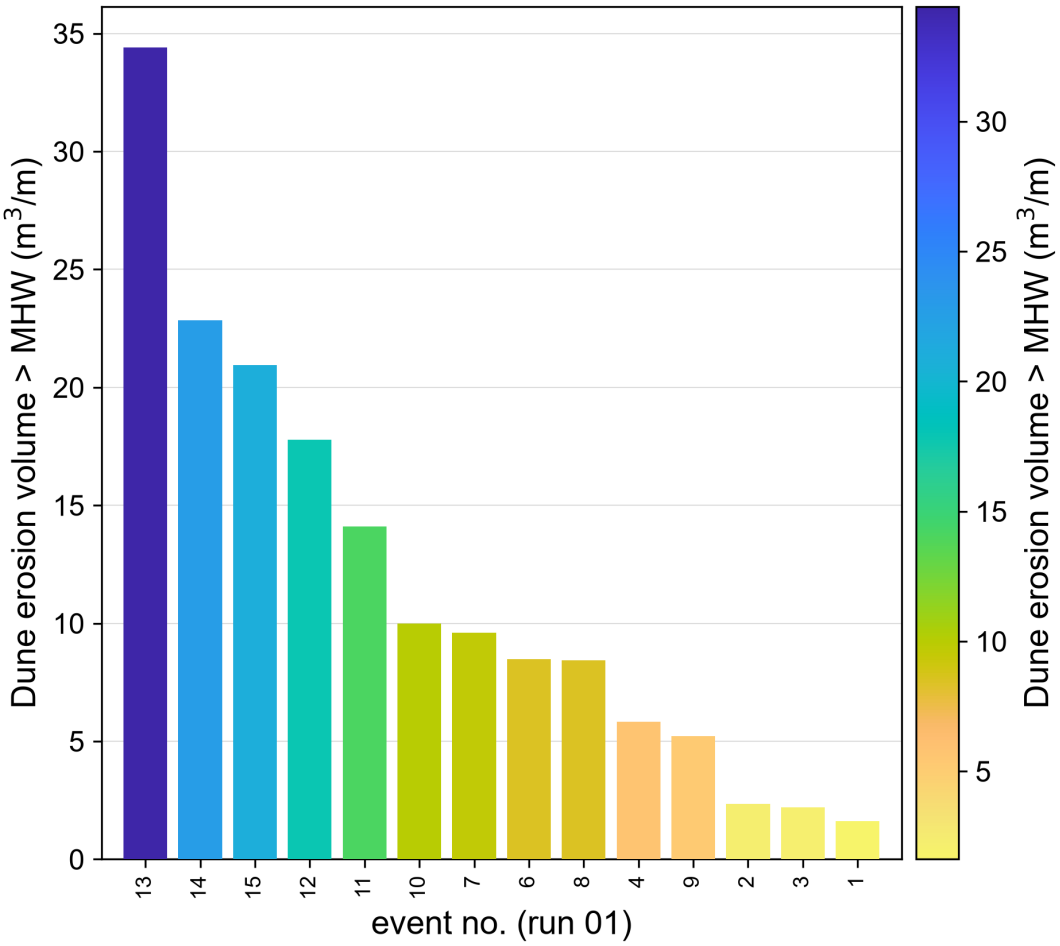
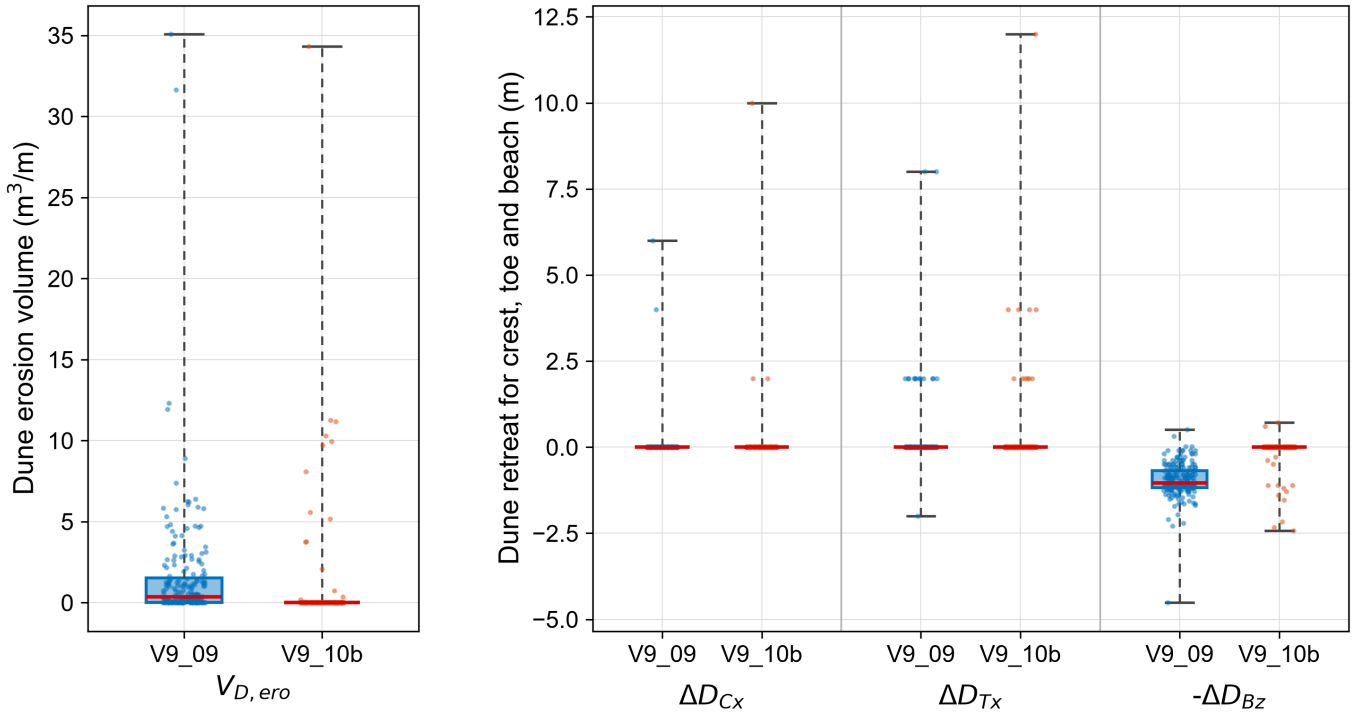


Abbildung 84: SHG-Szenarien aus XB sortiert nach Dünenerosionsvolumen (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m^3/m) auf Grundlage eines StALU-Standardprofils (Simulation: V9_10b)



(a) Dünenerosionsvolumen

(b) Dünenrückgang (Krone, Fuß und Strand)

Abbildung 85: Statistische Aufbereitung der Szenarien-Ensembles als Boxplot (Simulation: V9_09 & V9_10b)

6.2. Geometrische Variation mit dem Bemessungsereignis RHW am StALU-Standardprofil (1D)

Im Folgenden wird eine vergleichende Analyse der geometrischen Variation der Dünenparameter ($D_{Cz,ini}$ und $D_{Tz,ini}$) für das RHW-Szenario (ΔMSL = 0) mit den modifizierten Standardprofilen nach Vorgabe des StALU MM (Abschnitt 5.1.5) vorgenommen. Insgesamt werden in einem Simulationsensemble 6 verschiedene $D_{Tz,ini}$ betrachtet. Die 3 niedrigsten $D_{Tz,ini}$ werden in Abhängigkeit des MSL und des MHW definiert. Aufgrund der natürlichen oder künstlichen Ausbildung eines Gleichgewichtsprofils wird angenommen, dass sie sich gleichfalls um ΔMSL erhöhen:

- $D_{Tz,ini}(1) = MSL$ (m NHN)
- $D_{Tz,ini}(2) = MSL + (MHW - MSL)/2$ (m NHN)
- $D_{Tz,ini}(3) = MHW$ (m NHN)

Exemplarisch sind die Ergebnisse für ein Profil in der Abbildung 86 dargestellt. Im ersten Subplot sind die Verläufe der Küstenquerprofile $zb_{ini,sim}$ (Eingangsprofil), $zb_{ini,obs}$ (gemessenes Profil zur Georeferenzierung) und $zb_{end,sim}$ (Endprofil) aufgetragen. Weiterhin ist der Verlauf der Wasserspiegellage $zs_{t,max}$ sowie die Wellenhöhe $H_{rms,t}$ dokumentiert. In der Abbildung lassen sich außerdem der Beobachtungspunkt (Beobachtungspunkt für Simulationsanalysen im Berechnungsnetz (ObsPt)) identifizieren, die Dünenfußpunkte (grün) und Dünenkronen-Vorderkanten (blau) sowie die zugehörigen Verschiebungen ΔD_{Tx} und ΔD_{Cx}. In Blau sind hier die Bereiche mit Sedimentation, in Rot die Bereiche mit Erosion hervorgehoben. Diese lassen sich im zweiten Subplot als Sedimentation oder Erosion je Berechnungszelle (SedEro) quantifizieren. Die Nulldurchgänge liegen auf den Schnittpunkten von $zb_{ini,sim}$ und $zb_{end,sim}$. In diesem Subplot wird auch das Dünenerosionsvolumen $V_{D,ero,sim}$ pro Meter Küstenlinie ausgegeben. Es wird ausschließlich das Erosionsvolumen oberhalb des MHW-Horizonts berücksichtigt. Im dritten Subplot sind die GLM-Geschwindigkeiten u und v aufgezeichnet.

Auffällig ist der doppelte Knick im Geschwindigkeitsprofil, der entlang von Erosionszonen auftritt. Der landwärtige Bereich ist geprägt von abrutschendem Material und bildet daher eine zweite Erosionszone aus. Die erhöhten Geschwindigkeiten (max. 3 m/s) treten zwischen der großen Sedimentationszone (seewärtige Sandbank) und der benetzten Dünenkante auf und lassen sich mit den schräg anlaufenden Wellen sowie den zugehörigen Transformationsprozessen erklären. Das unebene Strandprofil bildet sich erst mit abnehmendem Seegang bei kleiner Welle aus und zeigt die Entwicklung eines neuen Gleichgewichtsprofils für normale Verhältnisse nach dem Extremereignis. Bei niedrigem Wasserstand und hohem Seegang würde sich die große Sandbank weiter seewärts abflachen, bzw. auch wieder zumindest teilweise den ausgehobenen Vorstrand auffüllen.

Die Abbildung 87 vergleicht das Dünenerosionsvolumen $V_{D,ero}$ für ein RHW-Ereignis beim heutigen MSL mit einem ΔMSL von 80 cm, welches dem Szenario SSP5-8.5 entspricht. Es ist dabei in Abhängigkeit zur Höhe der Dünenkrone $D_{Cz,ini}$ gesetzt. Für dieses Profil wurde die Höhe des Vorstrandes D_{Bz} um ΔMSL erhöht.

Die Abbildung 88 vergleicht den horizontalen Rückgang der Dünenkrone ΔD_{Cx} für den heutigen MSL bei einem RHW-Ereignis mit einem ΔMSL von 80 cm, welches dem Szenario SSP5-8.5 entspricht. Es ist dabei in Abhängigkeit zur Höhe der Dünenkrone $D_{Cz,ini}$ gesetzt. Für dieses Profil wurde die Höhe des Vorstrandes D_{Bz} um ΔMSL erhöht.

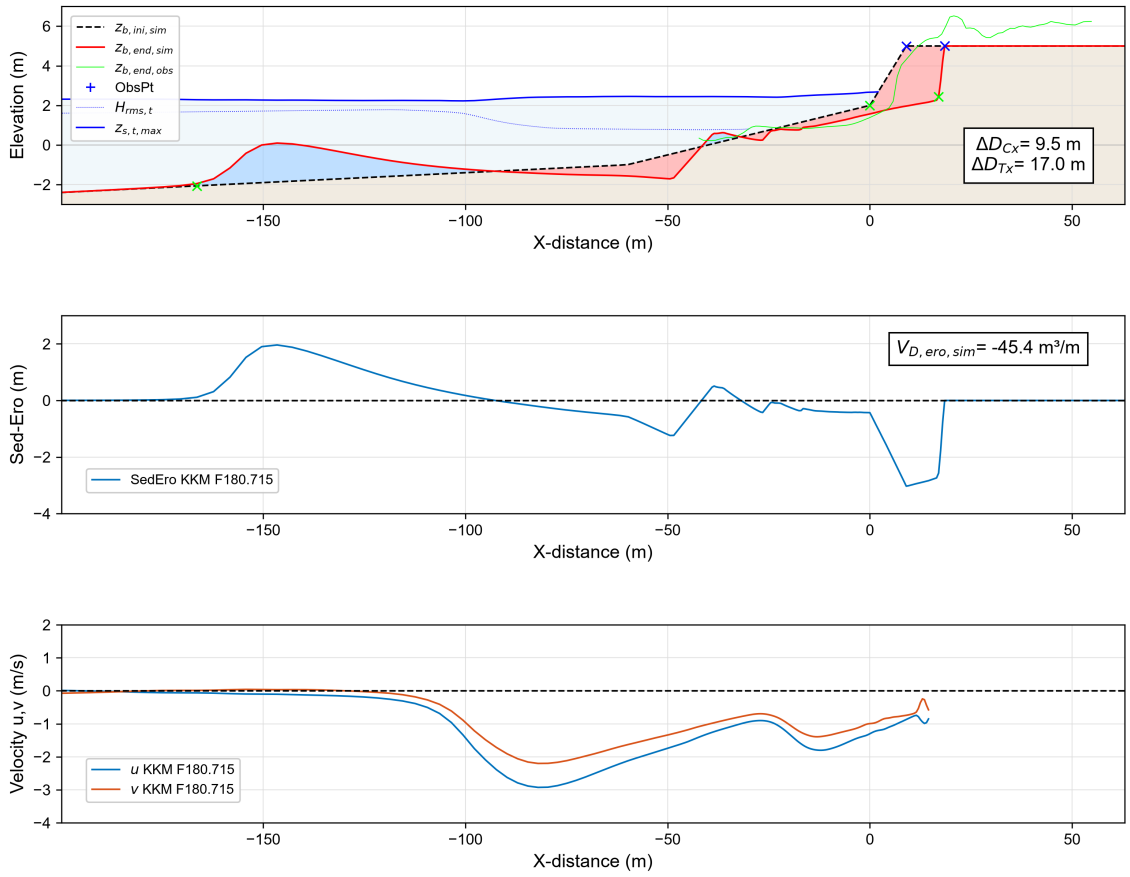
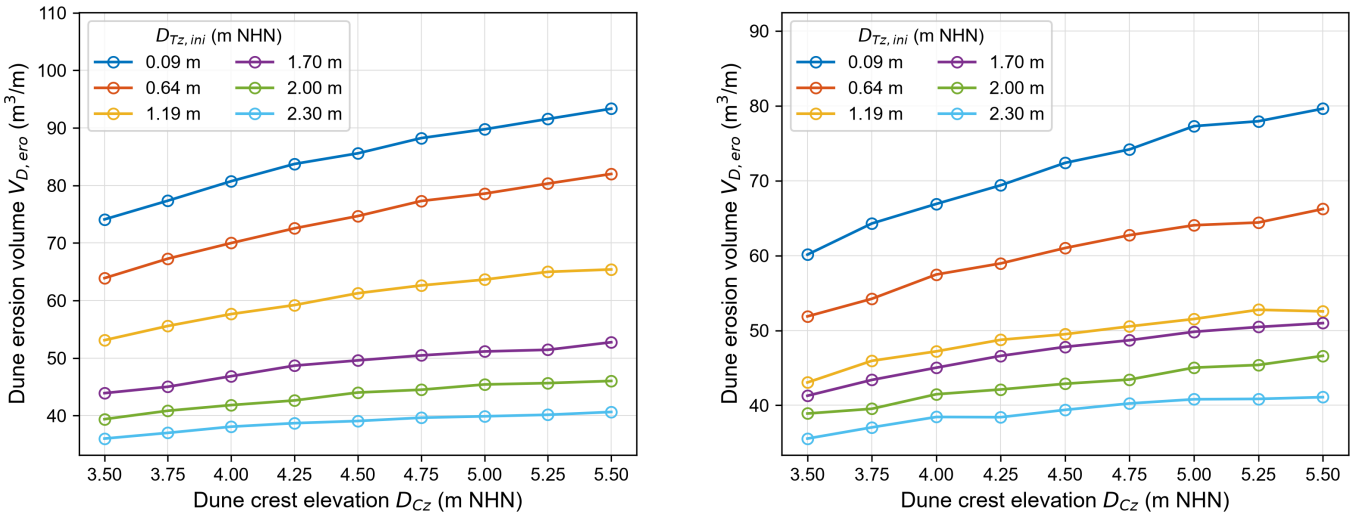


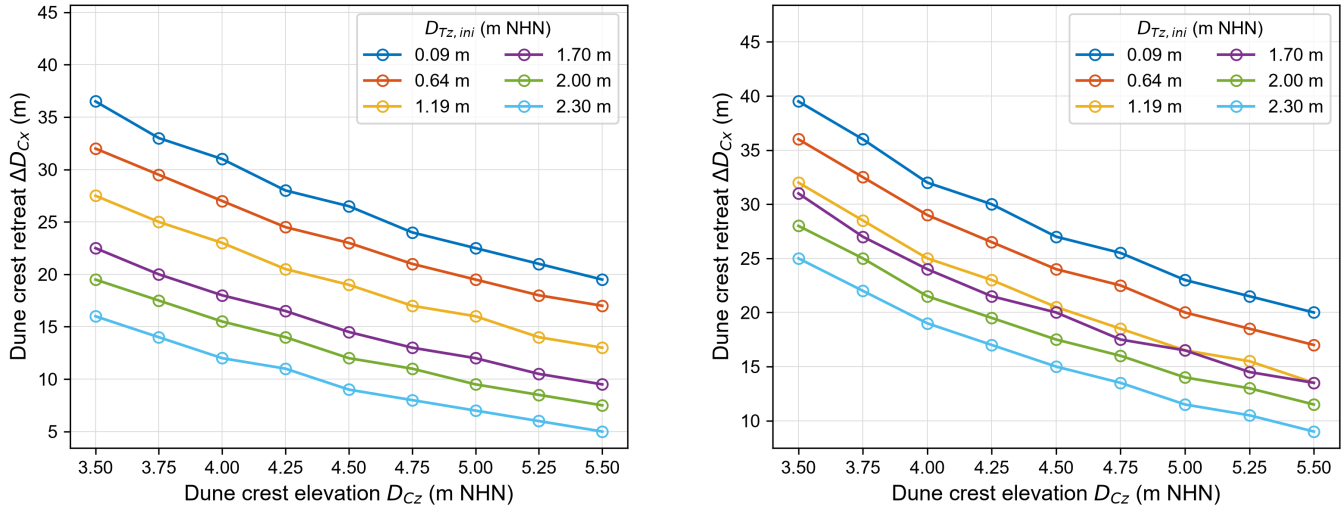
Abbildung 86: Profilanalyse für das RHW-Szenario mit Morphodynamik, Wasserstand, Seegang und Fließgeschwindigkeiten (Dünenfußhöhe = 2 m, Kronenhöhe = 5 m, Bermenhöhe = -1 m NHN, t = 63.3 h) mit StALU MM-Geometrie



(a) $MSL = RHW + 0m$

(b) $MSL = RHW + 0.80m$

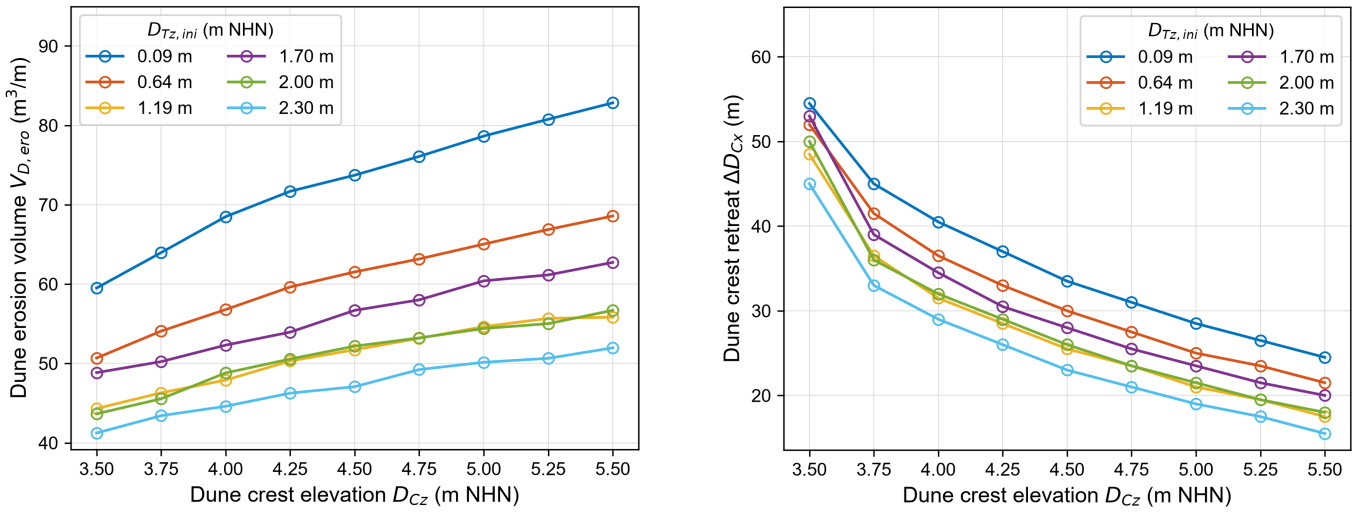
Abbildung 87: Vergleich des Dünenerosionsvolumens in Abhängigkeit der Höhe der Dünenkrone und variabler Dünenfußhöhen für zwei unterschiedliche Meeresspiegel bei KKM F180.715 für mitwachsenden Vorstrand



(a) $MSL = RHW + 0m$ (b) $MSL = RHW + 0.80m$

Abbildung 88: Vergleich des Rückgangs der Dünenkrone in Abhängigkeit der Höhe der Dünenkrone und variabler Dünenfußhöhen für zwei unterschiedliche Meeresspiegel bei KKM F180.715 für mitwachsenden Vorstrand

Die Annahme eines mit ΔMSL mitwachsenden Vorstrandes D_{Bz} setzt für die gewählte Profilierungsmethode große, zusätzliche Sedimentmengen voraus. Dies resultiert gemeinsam mit anderen Faktoren auch in mit ΔMSL verringerten $V_{D,ero}$. Zum Vergleich ist in Abbildung 89 das Dünenerosionsvolumen und der Dünenrückgang für eine weitere Profilierungsmethode dargestellt, wobei $D_{Bz} = const$.



(a) $MSL = RHW + 0.80m$; $V_{D,ero}$ (b) $MSL = RHW + 0.80m$; ΔD_{Cx}

Abbildung 89: Vergleich des Dünenerosionsvolumens und des Rückgangs der Dünenkrone in Abhängigkeit der Höhe der Dünenkrone und variabler Dünenfußhöhen bei KKM F180.715 für eine konstante Vorstrandhöhe bei $\Delta MSL = 0.80m$

6.3. Geometrische Variation mit dem Bemessungsereignis RHW am Bruun-Standardprofil

Im Folgenden wird eine vergleichende Analyse der geometrischen Variation der Dünenparameter ($D_{Cz,ini}$ und $D_{Tz,ini}$) für das RHW-Szenario (ΔMSL = 0) mit den modifizierten Bruun-Standardprofilen (Abschnitt 5.1.4) vorgenommen. Exemplarisch sind die Ergebnisse für das Basisprofil in der Abbildung 90 dargestellt. Im ersten Subplot sind die Verläufe der Küstenquerprofile $zb_{ini,sim}$ (Eingangsprofil), $zb_{ini,base}$ (Basisprofil zur Georeferenzierung) und $zb_{end,sim}$ (Endprofil) aufgetragen. Weiterhin ist der Verlauf der Wasserspiegellage $zs_{t,max}$ sowie die Wellenhöhe $H_{rms,t}$ dokumentiert. In der Abbildung lassen sich außerdem der Beobachtungspunkt (ObsPt) identifizieren, die Dünenfußpunkte (grün) und Dünenkronen-Vorderkanten (blau) sowie die zugehörigen Verschiebungen ΔD_{Tx} und ΔD_{Cx}. In Blau sind hier die Bereiche mit Sedimentation, in Rot die Bereiche mit Erosion hervorgehoben. Diese lassen sich im zweiten Subplot als SedEro quantifizieren. Die Nulldurchgänge liegen auf den Schnittpunkten von $zb_{ini,sim}$ und $zb_{end,sim}$. In diesem Subplot wird auch das Dünenerosionsvolumen $V_{D,ero,sim}$ pro Meter Küstenlinie ausgegeben. Es wird ausschließlich das Erosionsvolumen oberhalb des MHW-Horizonts berücksichtigt. Im dritten Subplot sind die GLM-Geschwindigkeiten u und v aufgezeichnet.

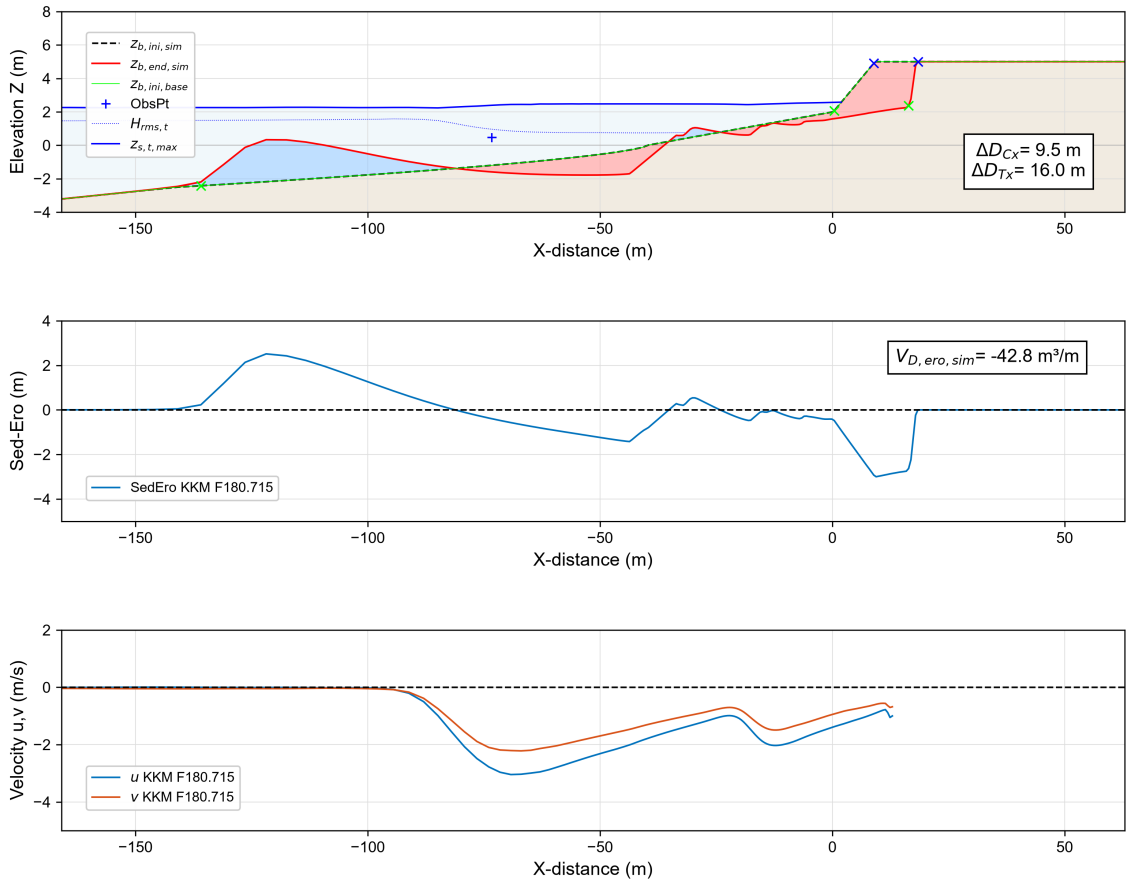
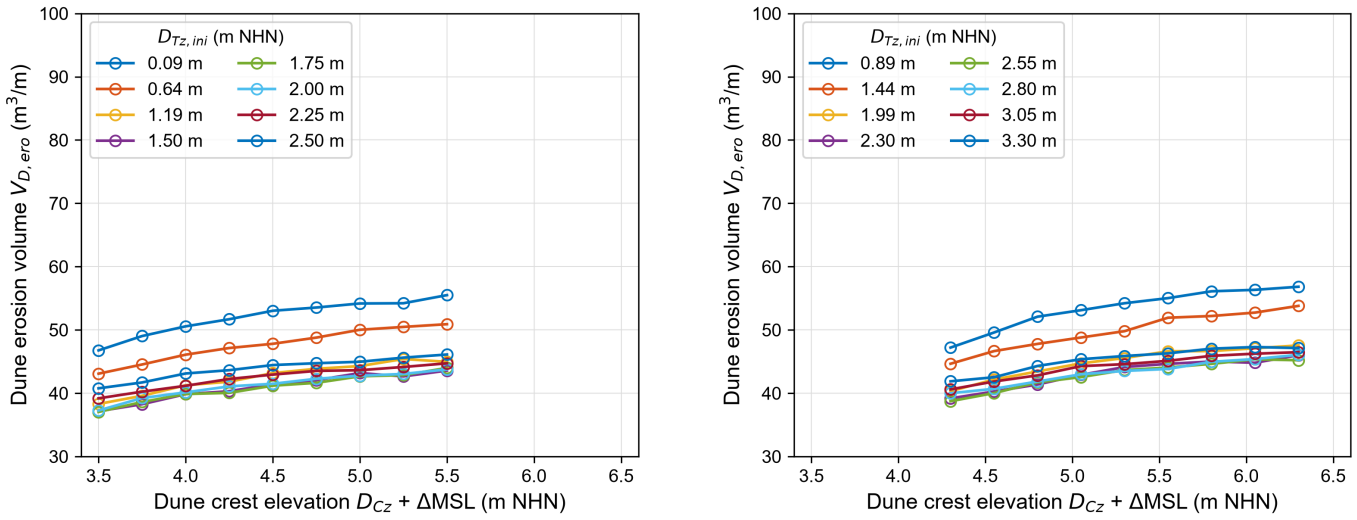


Abbildung 90: Profilanalyse für das RHW-Szenario mit Morphodynamik, Wasserstand, Seegang und Fließgeschwindigkeiten (Basisprofil: Dünenfußhöhe = 2 m, Kronenhöhe = 5 m, Bermenhöhe = 0 m NHN, t = 62 h) mit Bruun-Geometrie

Auffällig ist wieder der doppelte Knick im Geschwindigkeitsprofil, der entlang von Erosionszonen auftritt. Der landwärtige Bereich ist geprägt von abrutschendem Material und bildet daher eine zweite Erosionszone aus. Die erhöhten Geschwindigkeiten (max. 3 m/s) treten zwischen der großen Sedimentationszone (seewärtige Sandbank) und der benetzten Dünenkante auf und lassen sich mit den schräg anlaufenden Wellen sowie den zugehörigen Transformationsprozessen erklären. Das unebene Strandprofil bildet sich erst mit abnehmendem Seegang bei kleiner Welle aus und zeigt die Entwicklung eines neuen Gleichgewichtsprofils für normale Verhältnisse nach dem Extremereignis. Bei niedrigem Wasserstand und hohem Seegang würde sich die große Sandbank weiter seewärts abflachen, bzw. auch wieder zumindest teilweise den ausgehobenen Vorstrand auffüllen. Das sich nach dem Sturm ausbildende Profil weist große Ähnlichkeit mit dem StALU MM - Standardprofil auf. Das Erosionsvolumen $V_{D,ero,sim}$ ist etwas größer. Die aktivierte Zone erstreckt sich über ca. 200 m in x-Richtung.

Die Abbildung 91 vergleicht das Dünenerosionsvolumen $V_{D,ero}$ für den heutigen MSL mit einem RHW-Ereignis für ΔMSL = 0 m und einem RHW-Ereignis für ein ΔMSL = 0.8 m (entspricht SSP585). Es ist dabei in Abhängigkeit zur Höhe der Dünenkrone $D_{Cz,ini}$ gesetzt.

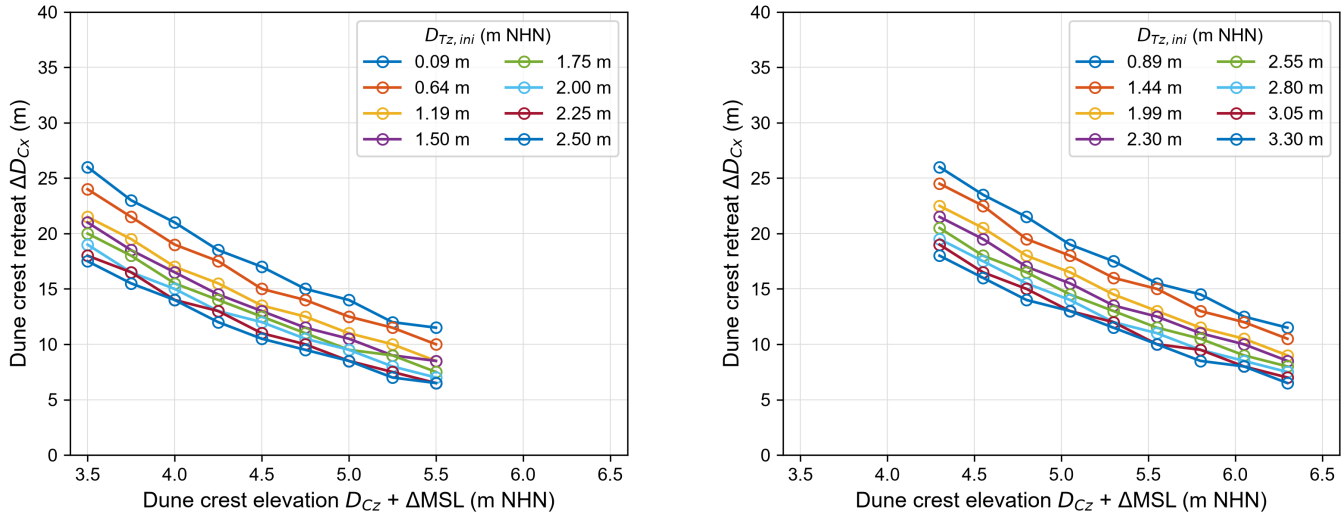


(a) RHW-Ereignis bei $\Delta MSL = 0$ m (MSL 2025)

(b) RHW-Ereignis bei $\Delta MSL = 0{,}80$ m (SSP5-8.5)

Abbildung 91: Vergleich des Dünenerosionsvolumens in Abhängigkeit der Höhe der Dünenkrone und variabler Dünenfußhöhen für ΔMSL = 0 m und ΔMSL = 0.8 m (SSP585) bei KKM F180715 für mitwachsenden Vorstrand

Die Abbildung 92 vergleicht den horizontalen Rückgang der Dünenkrone ΔD_{Cx} für den heutigen MSL bei einem RHW-Ereignis mit einem ΔMSL von 80 cm, welches dem Szenario SSP5-8.5 entspricht. Es ist dabei in Abhängigkeit zur Höhe der Dünenkrone $D_{Cz,ini}$ gesetzt. Für dieses Profil wurde die Höhe des Vorstrandes D_{Bz} um ΔMSL erhöht.



(a) RHW-Ereignis bei $\Delta MSL = 0$ m (MSL 2025)

(b) RHW-Ereignis bei $\Delta MSL = 0{,}80$ m (SSP5-8.5)

Abbildung 92: Vergleich des Rückgangs der Dünenkrone in Abhängigkeit der Höhe der Dünenkrone und variabler Dünenfußhöhen für ΔMSL = 0 m und ΔMSL = 0.8 m (SSP585) bei KKM F180.715 für mitwachsenden Vorstrand

6.4. Vergleich der Dünenbelastung am Bemessungsereignis RHW für steigende Meeresspiegel unter Variation der Geometrie des StALU-Standardprofils

Als RHW-Basis für die nachfolgenden Auswertungen dient die Simulation *V10_08c* anstelle der ursprünglichen *V10_08*: Beide Simulationen setzen denselben Bemessungswasserstand (2,30 m NHN) an, unterscheiden sich jedoch in der Wellenrandbedingung, da *V10_08* mit einem 26-stündigen Sturmereignis gerechnet wurde, während die übrige Klimareihe ($\Delta MSL > 0$) durchgängig ein 18-stündiges Sturmereignis nutzt. *V10_08c* wiederholt *V10_08* mit der kürzeren Wellenrandbedingung der übrigen Klimareihe und bildet damit die tatsächlich vergleichbare RHW-Basis. Die Abbildung 93 zeigt den Effekt anhand eines 1:1-Vergleichs des Dünenerosionsvolumens $V_{D,ero}$ über alle ausgewerteten Dünengeometrien: Das kürzere, reihenkonsistente Sturmereignis führt im Mittel zu einem um etwa die Hälfte reduzierten Erosionsvolumen gegenüber der ursprünglichen RHW-Simulation. Der eingebettete Vergleich der Wellenganglinien zeigt beide Sturmereignisse mit identischem Scheitelwert, aber unterschiedlicher Dauer; da T_p in diesem Forcing eine feste lineare Funktion von H_{sig} ist (konstante Wellensteilheit), wird lediglich eine Kurve je Simulation dargestellt und T_p als abgeleitete zweite Achse mitgeführt – die Übereinstimmung von T_p und H_{sig} ist damit eine Modelleigenschaft des Forcings und keine unabhängig geprüfte Größe.

Die Abbildung 95 vergleicht beispielhaft das Dünenerosionsvolumen in Abhängigkeit der Höhe der Dünenkrone für zwei Dünenfußhöhen und verschiedener ΔMSL für ausgewählte Klimaszenarien (SSP's). Die Höhe des Vorstrandes verändert sich nicht, d. h. $D_{Bz} = const.$. Ausschließlich der niedrigere Dünenfußpunkt erhöht sich um den zuvor genannten Wert von $\Delta z(MHW, MSL)$. Insgesamt wird der Strand somit steiler, je höher ΔMSL. Für den niedrigen Dünenfußpunkt mit kaum vorhandenem Vorstrand fällt das Dünenerosionsvolumen sehr hoch aus (bereits für RHW und $\Delta MSL = 0.00$ m). Für den höheren Dünenfußpunkt hingegen steigt das Erosionsvolumen proportional zu ΔMSL und fällt generell um 1/3 niedriger aus. Die Höhe von $D_{Tz,ini}$ entscheidet offensichtlich, ob sich ein steigender Meeresspiegel positiv oder negativ auf das Dünenerosionsvolumen auswirkt.

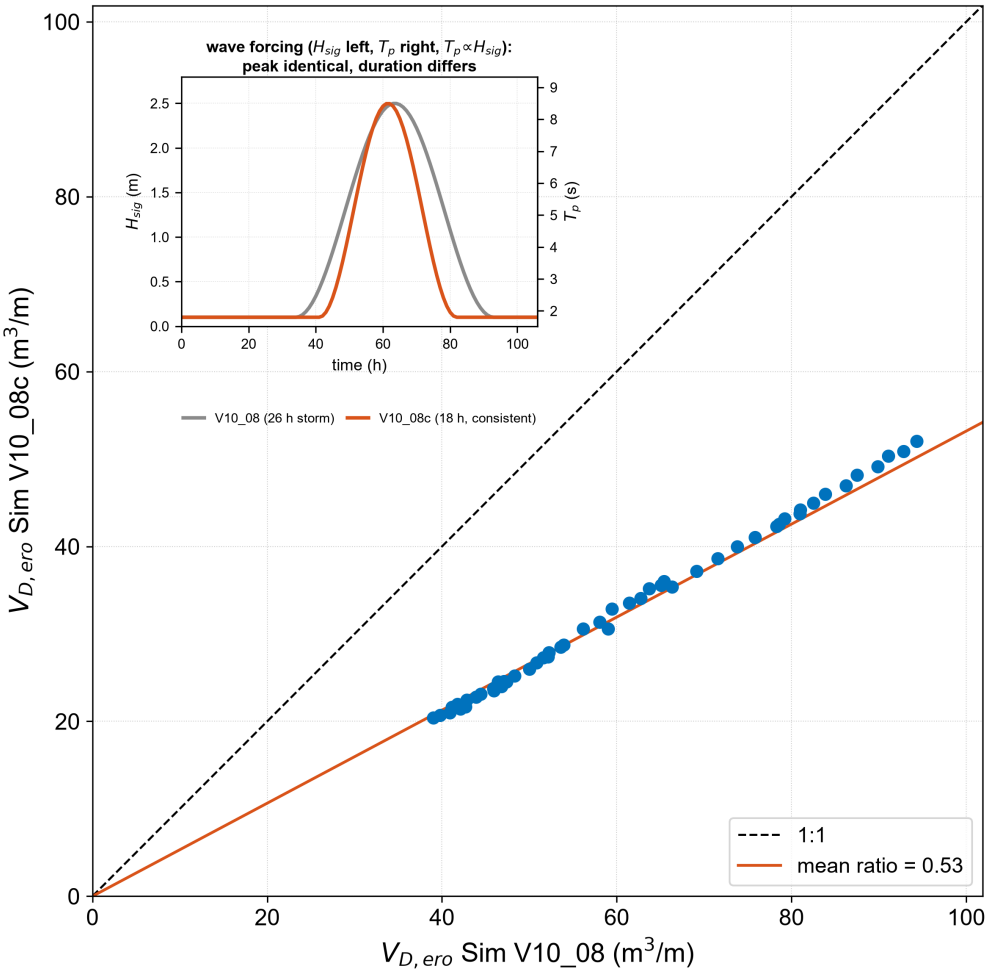
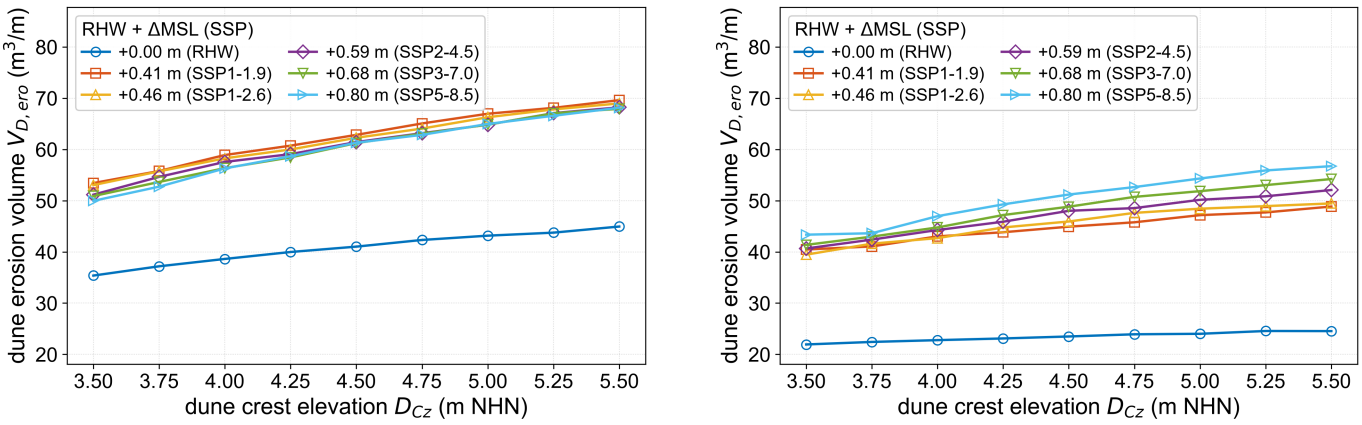
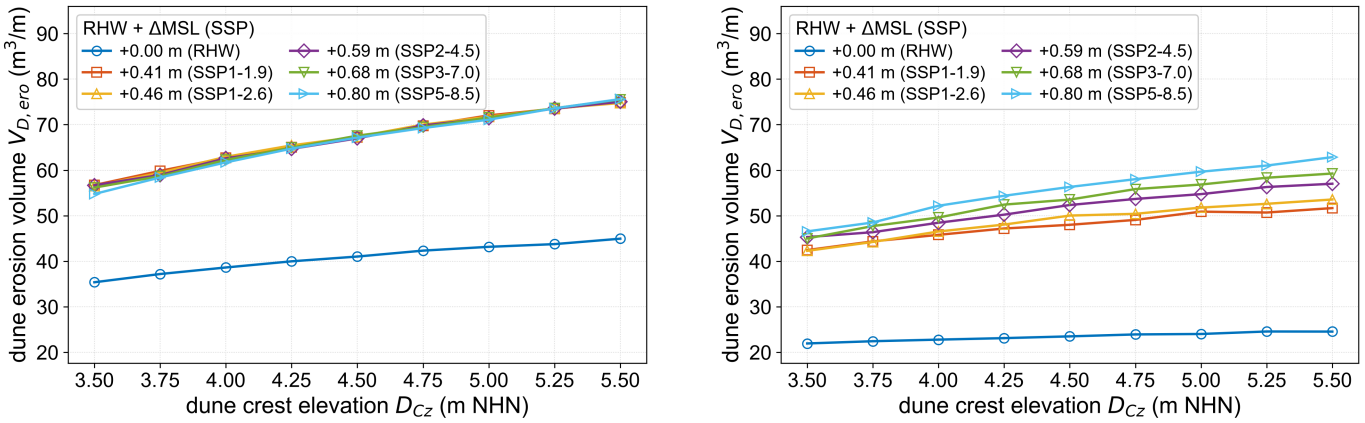


Abbildung 93: Auswirkung der konsistenten Wellenrandbedingung auf das Dünenerosionsvolumen: 1:1-Vergleich *V10_08c* gegen *V10_08* bei KKM F180.715 über alle ausgewerteten Dünengeometrien, mit eingebettetem Vergleich der Wellenganglinien (Scheitel identisch, Sturmdauer 18 h vs. 26 h; T_p als aus H_{sig} abgeleitete Achse dargestellt)



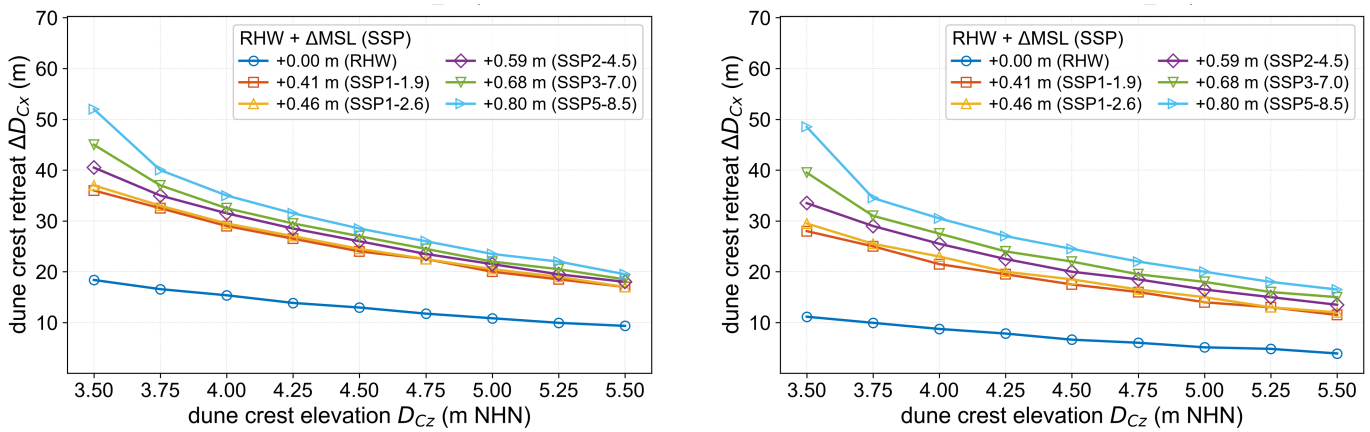
(a) $D_{Tz,ini} = 0.64m + \Delta z(MHW, MSL)$ (b) $D_{Tz,ini}$ = 2.00 m

Abbildung 94: Vergleich des Dünenerosionsvolumens in Abhängigkeit der Höhe der Dünenkrone für zwei Dünenfußhöhen und verschiedener Extremwasserstände aus Klimaszenarien bei KKM F180.715 ($D_{Bz} = f(\Delta MSL)$)



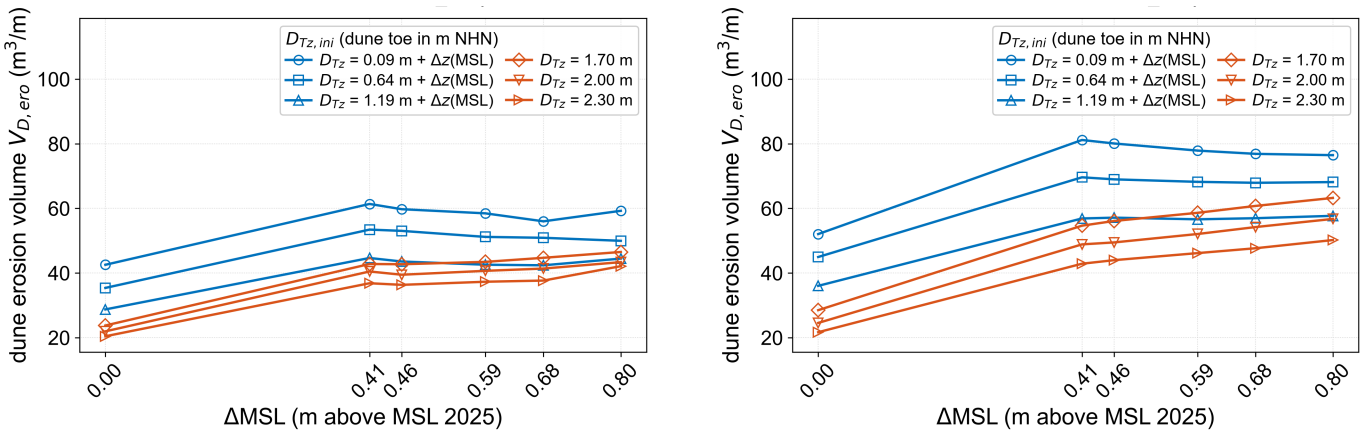
(a) $D_{Tz,ini}$= 0.64m + $\Delta z(MHW, MSL)$ (b) $D_{Tz,ini}$ = 2.00 m

Abbildung 95: Vergleich des Dünenerosionsvolumens in Abhängigkeit der Höhe der Dünenkrone für zwei Dünenfußhöhen und verschiedener Extremwasserstände aus Klimaszenarien bei KKM F180.715 (D_{Bz}= $const.$)



(a) $D_{Tz,ini}$= 0.64m + $\Delta z(MHW, MSL)$ (b) $D_{Tz,ini}$ = 2.00 m

Abbildung 96: Vergleich des Rückgangs der Dünenkrone in Abhängigkeit der Höhe der Dünenkrone für zwei Dünenfußhöhen und verschiedener Extremwasserstände aus Klimaszenarien bei KKM F180.715 (D_{Bz}= f(ΔMSL))



(a) Dünenkrone = 3.50 m (b) Dünenkrone = 5.50 m

Abbildung 97: Vergleich Dünenerosionsvolumen und Dünenhöhe in Abhängigkeit des Meeresspiegelanstiegs für variable Dünenfußhöhen für KKM F180.715

Die gleichen Zusammenhänge wie in Abbildung 95 sind auch in der Abbildung 94 veranschaulicht, jedoch für einen Vorstrand D_{Bz}, der in Abhängigkeit von ΔMSL mitwächst. Qualitativ sind sich die Verläufe ähnlich, das Dünenerosionsvolumen fällt jedoch für $\Delta MSL > 0.00$ m geringfügig niedriger aus. Für höhere Dünenfußpunkte ist eine geringere Streuung festzustellen und die Kurven liegen näher beieinander. Die geringeren Erosionsvolumina stehen aber in keinem Verhältnis zu den deutlich größeren Spülmengen, die von Nöten wären, um den Vorstrand in dieser Größenordnung mitwachsen zu lassen.

Die Auswirkungen verschiedener ΔMSL für ausgewählte Klimaszenarien (SSP's) auf den Rückgang der Dünenkrone ΔD_{Cx} sind in Abhängigkeit von der Höhe $D_{Cz,ini}$ in der Abbildung 96 dargestellt. Dabei werden zwei verschiedene Dünenfußhöhen verglichen; der Vorstrand wächst hier – wie in Abbildung 94 – mit dem Meeresspiegel mit ($D_{Bz} = f(\Delta\text{MSL})$). Der Dünenrückgang nimmt proportional mit ΔMSL zu und fällt für höhere Dünenfußpunkte signifikant niedriger aus. Am stärksten unterscheidet sich ΔD_{Cx} bei niedrigen Dünenkronen und dem RHW-Bemessungsereignis mit $\Delta MSL = 0.00$ m.

Die Abbildung 97 zeigt die Veränderung des Dünenerosionsvolumens mit steigendem Meeresspiegel für unterschiedliche Dünenfußhöhen und zieht den Vergleich mit zwei gewählten Höhen der Dünenkrone. Gegenüber dem RHW-Bemessungsereignis ($\Delta MSL = 0{,}00$ m, Basis *V10_08c* mit einheitlicher Wellenrandbedingung) liegen die Erosionsvolumina aller Klimaszenarien deutlich höher. Innerhalb der Klimaszenarien ($\Delta MSL \geq 0{,}41$ m) führt ein mit dem Meeresspiegelanstieg angehobener Dünenfußpunkt (und damit Vorstrand) hingegen zu leicht abnehmenden Erosionsvolumina, während sie bei festem Dünenfußpunkt weiter ansteigen. Dabei wird deutlich, dass hohe Dünen auch signifikant höhere Erosionsvolumina aufweisen.

6.5. Vergleich der Dünenbelastung am Bemessungsereignis RHW für steigende Meeresspiegel unter Variation der Geometrie des Bruun-Standardprofils

Eine unter heutigen Annahmen möglichst realistische Szenarienentwicklung zur geometrisch-hydraulischen Analyse von Extremereignissen bei steigendem MSL ist für die beiden Klimaanpassungs-Ensembles V12_01 und V12_02 durchgeführt worden. Beide Szenarien weisen ein standardisiertes Bruun-Profil mit den gleichen Basisparametern auf (vgl. Abschnitt 5.1.4), unterscheiden sich jedoch in der Form der Ganglinie des Seegangs (Wellenrandbedingung). V12_02 hat eine etwas breitere Ganglinie und somit eine längere Einwirkzeit von ca. 10 h. Im Plot des Küstenquerprofils mit den Simulationsergebnissen für eine beispielhafte Dünengeometrie und einem MSLR von 80 cm entsprechend dem SSP585 in der Abbildung 98 sind insbesondere im Vergleich mit der Abbildung 90 des RHW-Szenarios klar die geometrischen Veränderungen zu erkennen. Die grundsätzliche Strand- und Dünenform ist erhalten geblieben, jedoch haben sich unter der Annahme eines aktiven Küstenschutzes der Dünenfuß, die Dünenkrone und die Berme um 80 cm erhöht. Ebenfalls leicht erhöht haben sich das Erosionsvolumen und der Rückgang des Dünenfußes ΔD_{Tx}.

Die vorgelagerte, große Sandbank verschiebt sich entsprechend strandaufwärts. Außerdem lässt sich eine Verlängerung der Zone höherer Fließgeschwindigkeiten beobachten.

Die Abbildung 99 vergleicht beispielhaft das Dünenerosionsvolumen in Abhängigkeit der Höhe der Dünenkrone für zwei Basis-Dünenfußhöhen (für ΔMSL = 0 m) und verschiedener ΔMSL für ausgewählte Klimaszenarien (SSP's). Im Gegensatz zur Variante „StALU-Standardprofil" wächst sowohl der

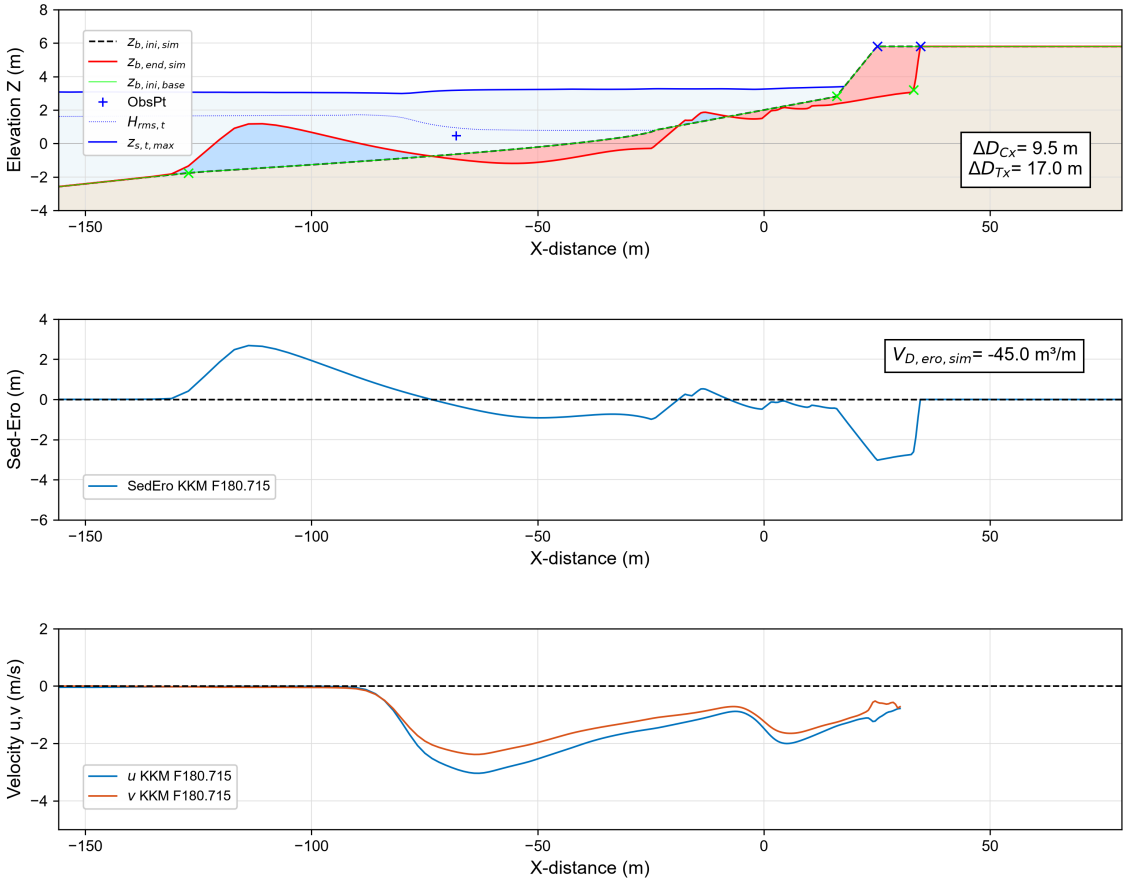
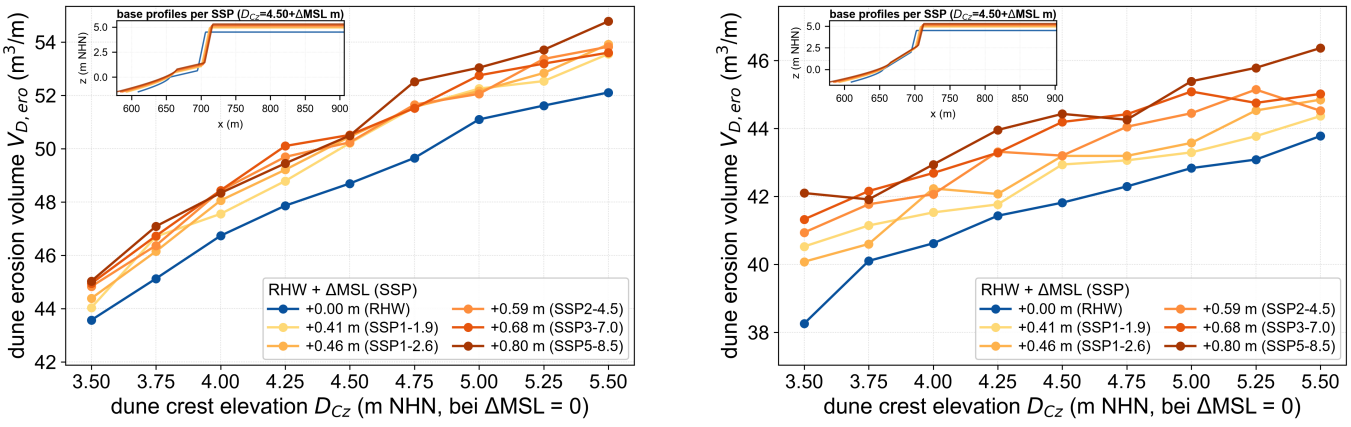
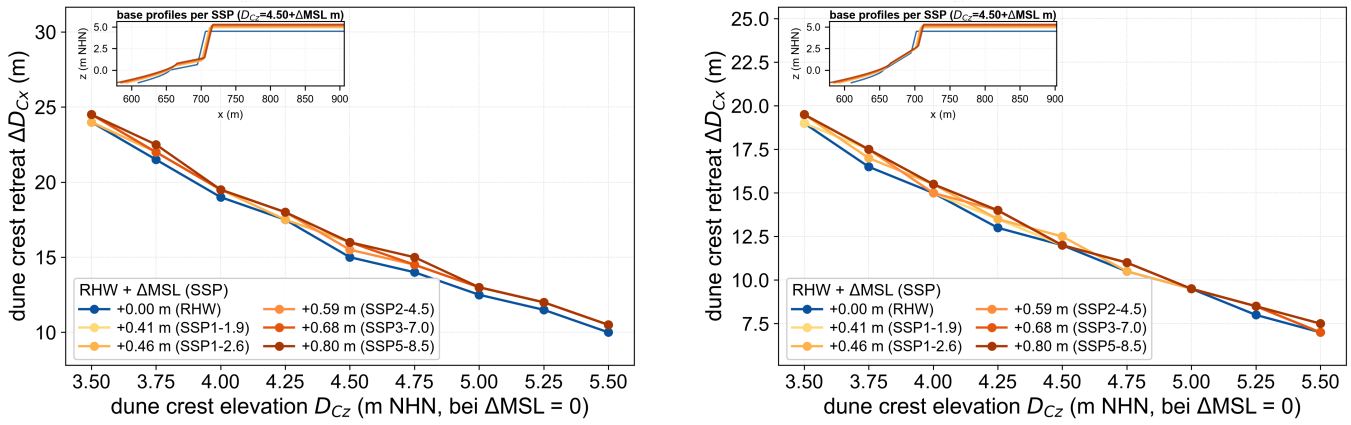


Abbildung 98: Profilanalyse für das SSP585-Szenario mit Morphodynamik, Wasserstand, Seegang und Fließgeschwindigkeiten (Basisprofil: Dünenfußhöhe = 2.8 m, Kronenhöhe = 5.8 m, Bermenhöhe = 0.8 m NHN, t = 62 h) mit Bruun-Geometrie



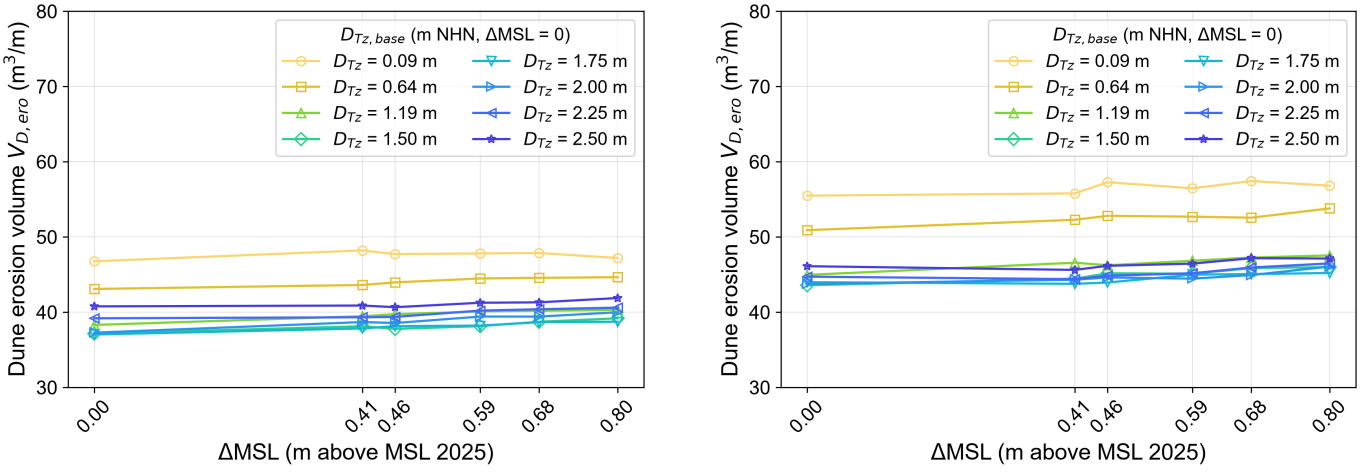
(a) $D_{Tz,ini}$= 0.64m + $\Delta z(MSL)$ (b) $D_{Tz,ini}$= 2.00m + $\Delta z(MSL)$

Abbildung 99: Vergleich des Dünenerosionsvolumens in Abhängigkeit der Höhe der Dünenkrone für zwei Basis-Dünenfußhöhen und verschiedener Extremwasserstände aus SSP's bei KKM F180.715



(a) $D_{Tz,ini}$= 0.64m + $\Delta z(MSL)$ (b) $D_{Tz,ini}$= 2.00m + $\Delta z(MSL)$

Abbildung 100: Vergleich des Rückgangs der Dünenkrone in Abhängigkeit der Höhe der Dünenkrone für zwei Basis-Dünenfußhöhen und verschiedener Extremwasserstände aus SSP's bei KKM F180.715

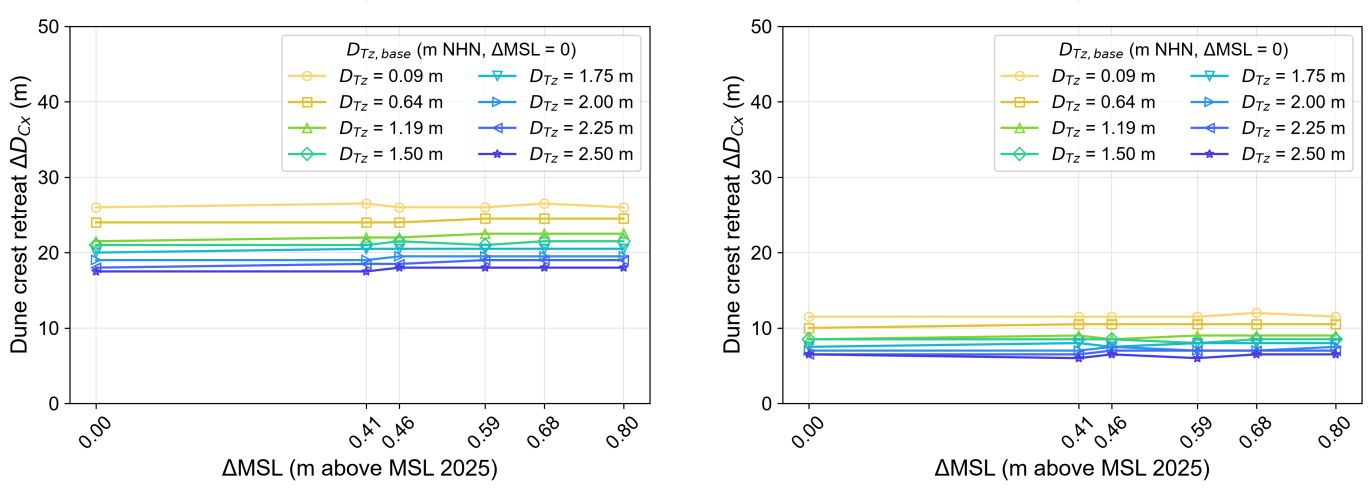


(a) Dünenkrone = 3.50 m (b) Dünenkrone = 5.50 m

Abbildung 101: Vergleich Dünenerosionsvolumen für zwei Kronenhöhen in Abhängigkeit des Meeresspiegelanstiegs für variable Dünenfußhöhen bei KKM F180.715

Dünenfußpunkt als auch die Dünenkrone mit dem MSLR. Gleichzeitig findet eine Anhebung des seewärtigen Gleichgewichtsprofils und eine Rückverlagerung nach der Bruun-Regel statt. In der Praxis handelt es sich also um ein mitwachsendes, bereits voll ausgebildetes Gleichgewichtsprofil. Ein nicht voll ausgebildetes Gleichgewichtsprofil hätte aufgrund der aktuellen Aufspülungsmethode (hauptsächlich auf Strand und Düne) ein Volumendefizit im Unterwasserbereich. Für den niedrigeren Dünenfußpunkt mit kaum vorhandenem Vorstrand fällt das Dünenerosionsvolumen etwa 10 - 15 % höher aus. Das Dünenerosionsvolumen steigt in jedem Fall mit zunehmender Dünenkrone. Bezogen auf die Meeresspiegellage für ein SSP lägen die Dünenkronen auf den gleichen x-Werten, verschieben sich jedoch aufgrund der Erhöhung mit dem MSL. Hier lässt sich bereits erkennen, dass der MSLR keinen signifikanten Einfluss hat.

Die Auswirkungen verschiedener ΔMSL für ausgewählte Klimaszenarien (SSP's) auf den Rückgang der Dünenkrone ΔD_{Cx} sind in Abhängigkeit von der Höhe $D_{Cz,ini}$ in der Abbildung 100 dargestellt. Dabei werden zwei verschiedene Basis-Dünenfußhöhen (für ΔMSL = 0 m) verglichen. Hier ist bereits



(a) Dünenkrone = 3.50 m

(b) Dünenkrone = 5.50 m

Abbildung 102: Vergleich des Rückgangs der Dünenkrone für zwei Kronenhöhen in Abhängigkeit des Meeresspiegelanstiegs für variable Dünenfußhöhen bei KKM F180.715

zu erkennen, dass der Dünenrückgang sich kaum in Abhängigkeit zu ΔMSL für die SSP's verändert. Ein höherer Basis-Dünenfußpunkt hat einen deutlich geringeren Dünenrückgang zur Folge (hier eine Reduzierung um 20%).

Die Abbildung 101 zeigt die Veränderung des Dünenerosionsvolumens mit steigendem Meeresspiegel für unterschiedliche Basis-Dünenfußhöhen (für ΔMSL = 0 m) und zieht den Vergleich mit zwei gewählten Höhen der Dünenkrone. Eine höhere Dünenkrone führt auch hier zu höheren Erosionsvolumina. Bemerkenswert ist der nahezu konstante Verlauf, d. h. keine deutlich erkennbare Zunahme des Dünenerosionsvolumens für das gewählte Extremereignis mit dem Meeresspiegelanstieg.

Die Abbildung 102 zeigt die Veränderung des horizontalen Dünenrückgangs mit steigendem Meeresspiegel für unterschiedliche Basis-Dünenfußhöhen (für ΔMSL = 0 m) und zieht den Vergleich von zwei gewählten Höhen der Dünenkrone. Eine höhere Dünenkrone führt auch hier zu geringerem Dünenrückgang (2 m Unterschied halbieren den Rückgang). Bemerkenswert ist wieder der nahezu konstante Verlauf, d. h. keine deutlich erkennbare Zunahme des Dünenrückgangs für das gewählte Extremereignis mit dem Meeresspiegelanstieg.

6.6. Metamodell zur Klimaanpassung von Küstenschutzdünen auf Basis geometrischer Variation

Die in den Abschnitten 6.3 und 6.5 dargestellten Ergebnisse zeigen einen systematischen, nichtlinearen Zusammenhang zwischen der Dünengeometrie, dem Meeresspiegelanstieg und der resultierenden Dünenbelastung. Das Ensemble V12_01 bildet mit sechs ΔMSL-Stufen (Wasserstandsrandbedingung RHW für den heutigen MSL sowie für fünf SSP-Klimaszenarien), neun Kronenhöhen $D_{Cz,ini}$ und acht Dünenfußhöhen D_{Tz} ein vollständiges Faktorial aus $n = 432$ Simulationen und damit eine geeignete Datengrundlage, um diesen Zusammenhang in geschlossene Bemessungsformeln zu überführen. Diese bilden das dritte Modul des MDE: Während die Module 1 und 2 das Dünenerosionsvolumen aus den hydraulischen Kennwerten eines Ereignisses prognostizieren (vgl. Unterabschnitt 7.3), beschreibt Modul 3 das Dünenerosionsvolumen $V_{D,ero}$ und den horizontalen

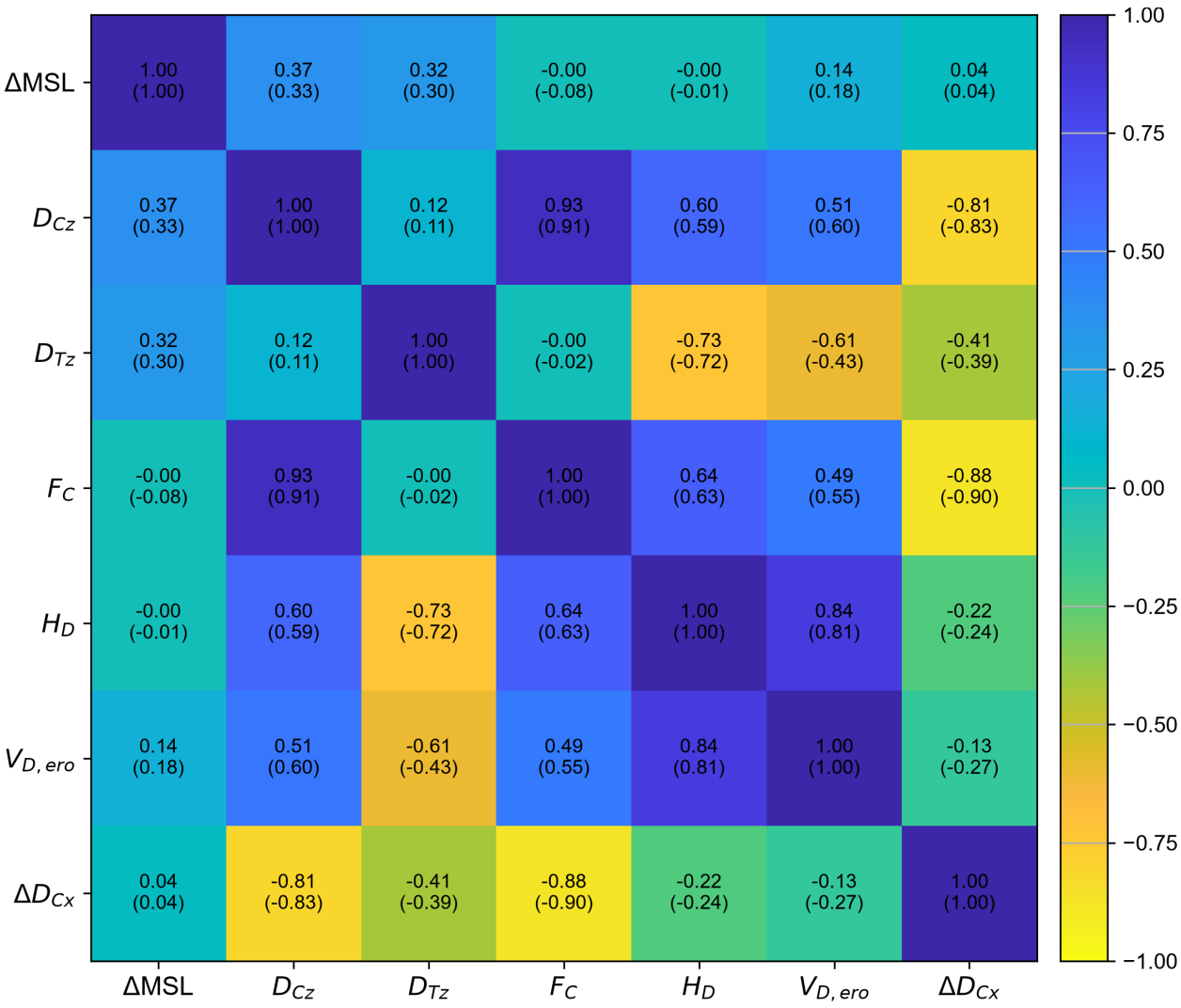
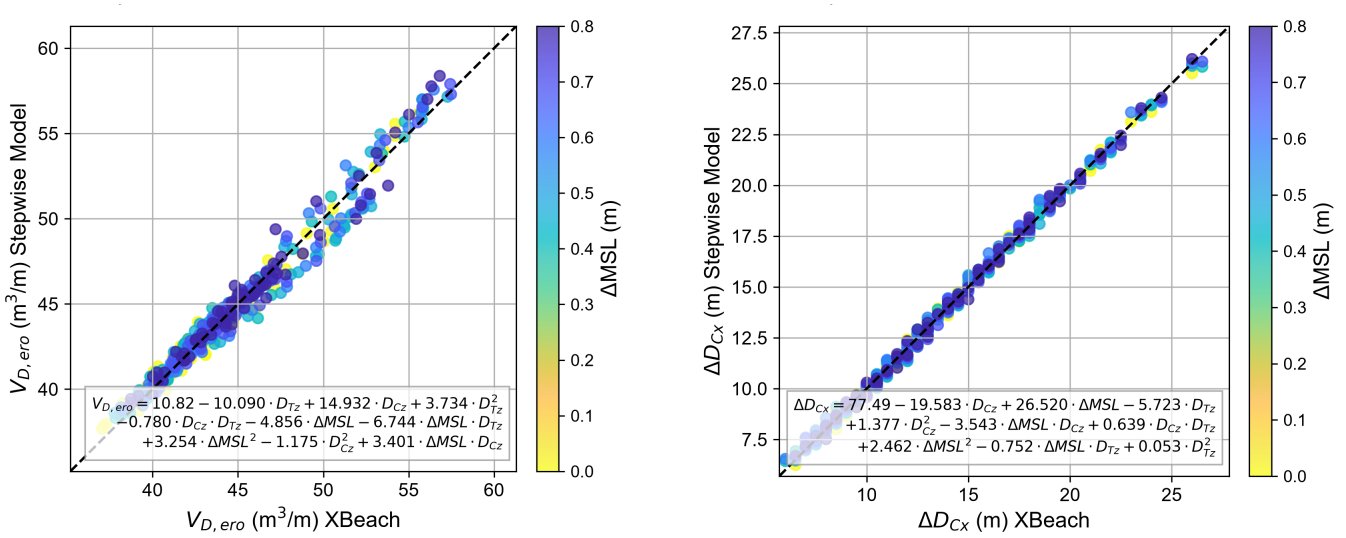


Abbildung 103: Korrelationsmatrizen der geometrischen und klimatischen Prädiktoren sowie der Zielgrößen des dritten MDE-Moduls auf Grundlage des geometrisch-klimatischen Ensembles am Bruun-Standardprofil (Simulation: V12_01, $n = 432$)

Rückgang der Dünenkrone ΔD_{Cx} als Funktion der Dünengeometrie und des Meeresspiegelanstiegs beim Bemessungsereignis RHW – eine wesentliche Erweiterung des aktuellen Bemessungsansatzes.

Als Prädiktoren dienen ΔMSL sowie die absoluten Höhen $D_{Cz,ini}$ und D_{Tz} (jeweils in m NHN). Die Bermenhöhe D_{Bz} ist im Ensemble konstruktionsbedingt exakt an den Meeresspiegelanstieg gekoppelt ($D_{Bz} = \Delta MSL$, mitwachsendes Gleichgewichtsprofil nach der Bruun-Regel) und daher nicht als eigenständiger Prädiktor identifizierbar; ihr Einfluss geht vollständig in ΔMSL auf. Das Bezugsniveau für $V_{D,ero}$ wächst konsistent mit dem Meeresspiegel mit (MHW + ΔMSL); ΔD_{Cx} ist durch die Gitterauflösung des XB-Modells auf 0,5 m quantisiert. Die Korrelationsmatrix in Abbildung 103 zeigt neben den Basisprädiktoren die abgeleiteten Größen Kronen-Freibord $F_C = D_{Cz} - (\text{MHW} + \Delta MSL)$ und Höhe der Dünenfront $H_D = D_{Cz} - D_{Tz}$: Der Kronenrückgang wird dominant durch die Kronenhöhe gesteuert (negativ korreliert), das Erosionsvolumen steigt mit der Kronenhöhe und sinkt mit der Dünenfußhöhe, während ΔMSL in beiden Fällen untergeordnet eingeht – konsistent zum Befund der mitwachsenden Profile aus dem vorangegangenen Abschnitt.



(a) Dünenerosionsvolumen $V_{D,ero}$

(b) Kronenrückgang ΔD_{Cx}

Abbildung 104: Vergleich des dritten MDE-Moduls (Gleichungen (18) und (19)) mit den XB-Simulationsergebnissen des geometrisch-klimatischen Ensembles, koloriert nach ΔMSL (Simulation: V12_01, KKM F180.715)

Die Modellbildung folgt der Methodik der Module 1 und 2 (bidirektionale *stepwise regression* mittels `stepwiselm`; Aufnahme bei $p < 0{,}05$, Ausschluss bei $p > 0{,}10$, Hierarchieprinzip, vgl. Unterabschnitt 7.3 sowie (Draper und Smith 1998; The MathWorks, Inc. 2024)). Da die Zielgrößen erkennbar nichtlinear über der Geometrie verlaufen, wurden zusätzlich zu den paarweisen Interaktionstermen auch quadratische Terme als Kandidaten zugelassen. Für beide Zielgrößen verbleiben sämtliche Kandidatenterme hochsignifikant im Modell. Das Modell für das Dünenerosionsvolumen lautet:

$$\begin{aligned} V_{D,ero} &= 10{,}823 - 4{,}856 \cdot \Delta MSL + 14{,}932 \cdot D_{Cz} - 10{,}090 \cdot D_{Tz} \\ &+3{,}401 \cdot \Delta MSL \cdot D_{Cz} - 6{,}744 \cdot \Delta MSL \cdot D_{Tz} - 0{,}780 \cdot D_{Cz} \cdot D_{Tz} \\ &+3{,}254 \cdot \Delta MSL^2 - 1{,}175 \cdot D_{Cz}^2 + 3{,}734 \cdot D_{Tz}^2 \end{aligned} \tag{18}$$

und das Modell für den Kronenrückgang:

$$\begin{aligned} \Delta D_{Cx} &= 77{,}494 + 26{,}520 \cdot \Delta MSL - 19{,}583 \cdot D_{Cz} - 5{,}723 \cdot D_{Tz} \\ &-3{,}543 \cdot \Delta MSL \cdot D_{Cz} - 0{,}752 \cdot \Delta MSL \cdot D_{Tz} + 0{,}639 \cdot D_{Cz} \cdot D_{Tz} \\ &+2{,}462 \cdot \Delta MSL^2 + 1{,}377 \cdot D_{Cz}^2 + 0{,}053 \cdot D_{Tz}^2 \end{aligned} \tag{19}$$

mit $V_{D,ero}$ in m^3/m, ΔD_{Cx} in m, ΔMSL in m sowie $D_{Cz,ini}$ und D_{Tz} als absolute Höhen in m NHN. Das Volumenmodell erreicht $R^2_{adj} = 0{,}97$ bei $RMSE = 0.72\mathrm{m}^3/\mathrm{m}$, das Rückgangsmodell $R^2_{adj} = 0{,}997$ bei $RMSE = 0.26\mathrm{m}$ – letzteres liegt damit praktisch an der Auflösungsgrenze der auf 0,5 m quantisierten Zielgröße (Abbildung 104). Die gegenüber den Modulen 1 und 2 deutlich höhere Modellgüte erklärt sich daraus, dass das volle Faktorial eine glatte, deterministische Antwortfläche abtastet, während die hydraulisch getriebenen Module die Variabilität realer bzw. synthetischer Ereignisse abbilden.

Für die Bemessung ist neben der direkten Prognose auch die Umrechnung zwischen beiden Zielgrößen erforderlich – etwa wenn für einen vorgegebenen zulässigen Kronenrückgang das zugehörige Erosionsvolumen bestimmt werden soll oder umgekehrt. Zwei unabhängige Regressionsmodelle

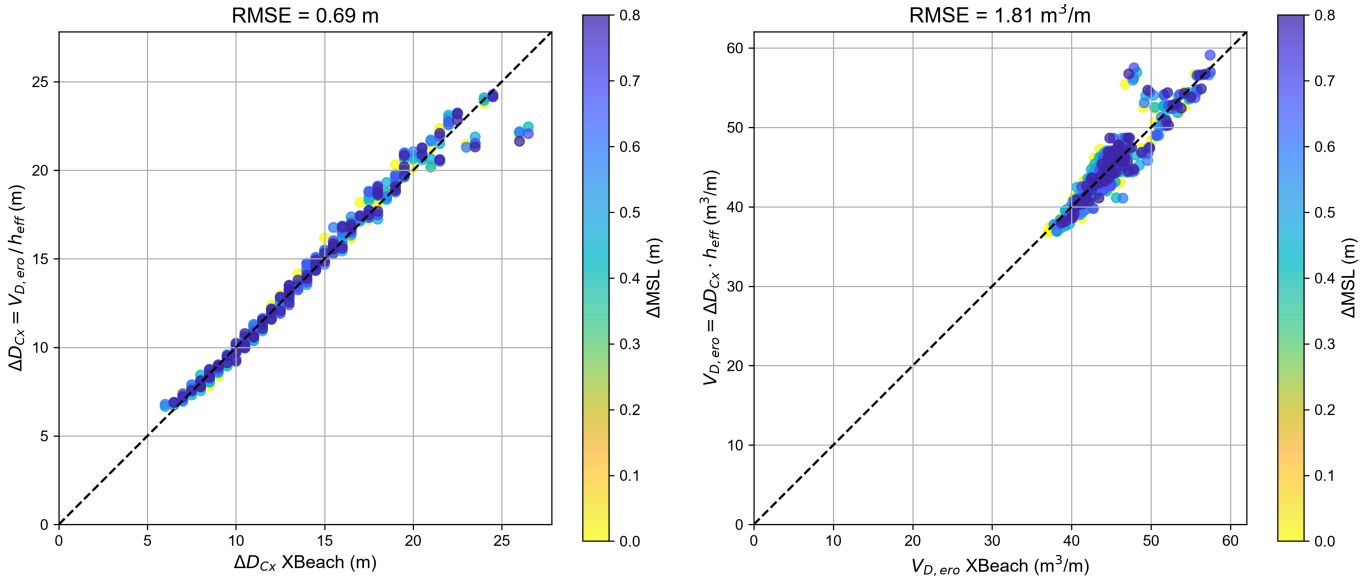


Abbildung 105: Validierung der invertierbaren Kopplung nach Gleichung (21) in beide Umrechnungsrichtungen: Kronenrückgang aus gegebenem Erosionsvolumen (links) und Erosionsvolumen aus gegebenem Kronenrückgang (rechts), koloriert nach ΔMSL (Simulation: V12_01, KKM F180.715)

garantieren jedoch keine gegenseitige Konsistenz. Deshalb wurde ergänzend die effektive Erosionshöhe h_{eff} als dritte Zielgröße mit identischer Methodik modelliert:

$$\begin{aligned} h_{eff} = \frac{V_{D,ero}}{\Delta D_{Cx}} = 6{,}156 + 4{,}941 \cdot \Delta MSL - 2{,}716 \cdot D_{Cz} - 2{,}102 \cdot D_{Tz} \\ -1{,}295 \cdot \Delta MSL \cdot D_{Cz} - 1{,}116 \cdot \Delta MSL \cdot D_{Tz} + 0{,}358 \cdot D_{Cz} \cdot D_{Tz} \\ +1{,}292 \cdot \Delta MSL^2 + 0{,}454 \cdot D_{Cz}^2 + 0{,}366 \cdot D_{Tz}^2 \end{aligned} \tag{20}$$

mit R^2_{adj}= 0,99 bei $RMSE$= 0.14m. Physikalisch entspricht h_{eff} der mittleren Höhe der erodierten Dünenfront über dem mitwachsenden Bezugsniveau. Damit gilt die exakt invertierbare Kopplung

$$\Delta D_{Cx} = \frac{V_{D,ero}}{h_{eff}\,(\Delta MSL,\, D_{Cz},\, D_{Tz})} \quad \Leftrightarrow \quad V_{D,ero} = \Delta D_{Cx} \cdot h_{eff}\,(\Delta MSL,\, D_{Cz},\, D_{Tz}) \tag{21}$$

sodass aus einem gegebenen Erosionsvolumen der zugehörige Kronenrückgang berechnet werden kann und umgekehrt – jeweils in Abhängigkeit der Dünengeometrie und des Meeresspiegelanstiegs. Die Validierung der Kopplung in beide Richtungen (Abbildung 105) ergibt $RMSE$-Werte von 0.69 m für den Kronenrückgang bzw. 1.81 m^3/m für das Erosionsvolumen; die größten Abweichungen treten am Rand des Parameterraums (niedrigste Krone bei niedrigstem Dünenfuß) auf. Für die reine Prognose sind daher die direkten Modelle nach den Gleichungen (18) und (19) vorzuziehen; die Kopplung nach Gleichung (21) stellt die Konsistenz sicher, wenn eine der beiden Zielgrößen vorgegeben ist.

Abbildung 106 verknüpft beide Zielgrößen zu einem Bemessungsdiagramm: Je SSP-Szenario zeigt die Farbfläche das Erosionsvolumen nach Gleichung (18) und die roten Isolinien den Kronenrückgang nach Gleichung (19) über der Ebene aus Dünenfuß- und Kronenhöhe (die vollständigen Antwortflächen beider Zielgrößen sind im Anhang in den Abbildungen 121 und 122 dokumentiert). Damit lassen sich Pessimalprofile unmittelbar ablesen (vgl. Unterabschnitt 2.3): Ist der tolerierbare Kronenrückgang maßgebend, liefert die zugehörige Isolinie die mindestens erforderliche

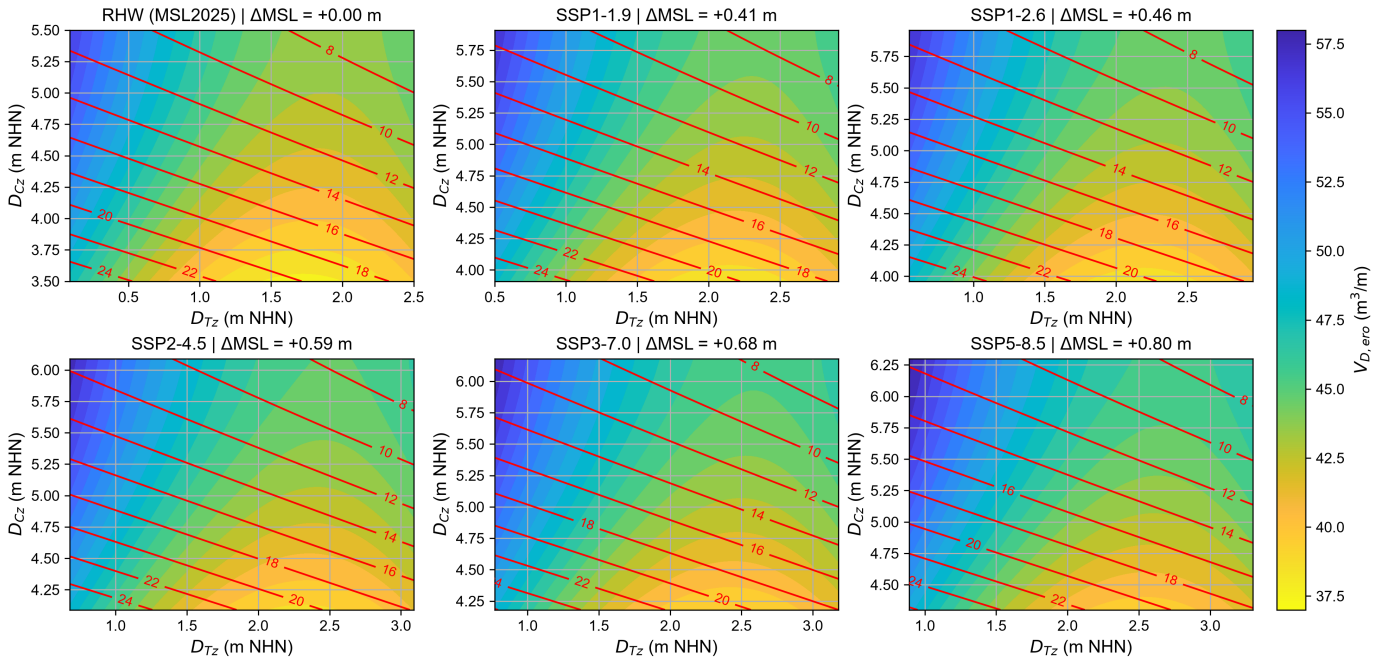


Abbildung 106: Bemessungsdiagramm des dritten MDE-Moduls je Klimaszenario: Dünenerosionsvolumen (Farbfläche, Gleichung (18)) und Kronenrückgang in m (rote Isolinien, Gleichung (19)) in Abhängigkeit von Dünenfuß- und Kronenhöhe; die Stützstellen der zugrunde liegenden XB-Simulationen zeigen die Antwortflächen im Anhang (Abbildungen 121 und 122) (Simulation: V12_01, KKM F180.715)

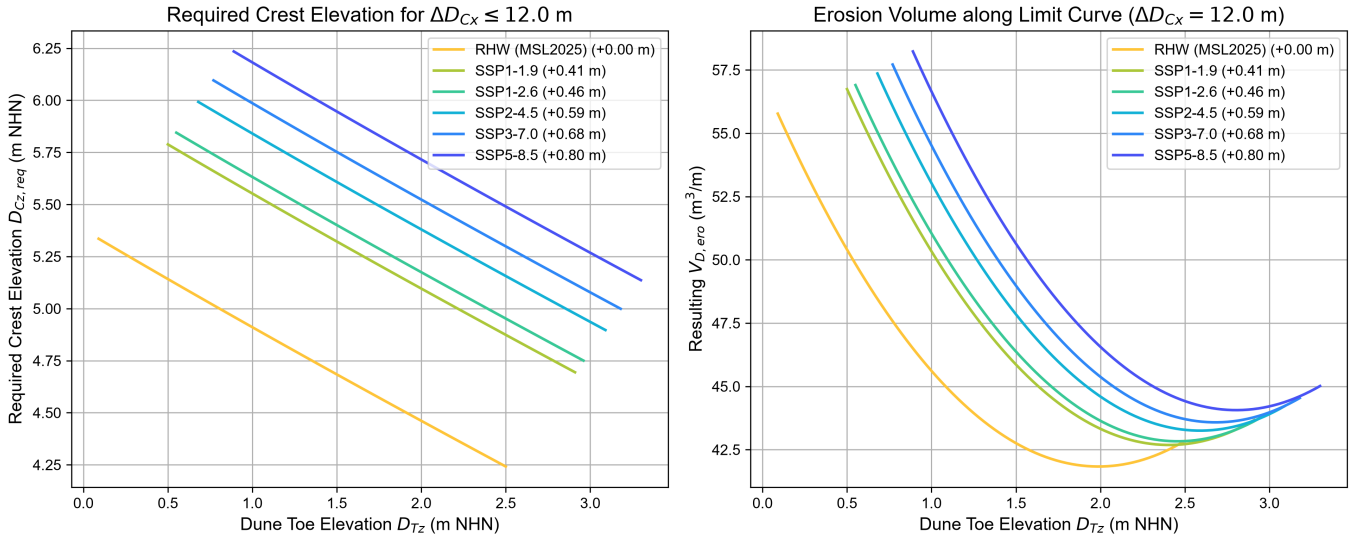


Abbildung 107: Beispielhafte Ableitung von Pessimalprofilen für einen zulässigen Kronenrückgang $\Delta D_{Cx} \leq 12$ m: mindestens erforderliche Kronenhöhe in Abhängigkeit der Dünenfußhöhe je Klimaszenario (links) und zugehöriges Erosionsvolumen entlang der Grenzkurven (rechts) (Simulation: V12_01, KKM F180.715)

Kronenhöhe in Abhängigkeit der Dünenfußhöhe; das Farbfeld gibt zugleich das dabei vorzuhaltende Erosionsvolumen an. Die beiden Kriterien verhalten sich dabei gegenläufig: Eine höhere Dünenkrone reduziert den Rückgang deutlich, erhöht jedoch das über dem Bezugsniveau mobilisierte Erosionsvolumen. Abbildung 107 zeigt die Anwendung beispielhaft für einen zulässigen Kronenrückgang von $\Delta D_{Cx} \leq 12$ m: Links ist die aus Gleichung (19) invertierte, mindestens erforderliche Kronenhöhe über der Dünenfußhöhe je Klimaszenario aufgetragen, rechts das zugehörige Erosionsvolumen entlang dieser Grenzkurven.

Der Gültigkeitsbereich des Moduls umfasst ΔMSL von 0 bis 0,80 m, Kronenhöhen von 3,50 bis 5,50 m NHN zuzüglich ΔMSL sowie Dünenfußhöhen von 0,09 bis 2,50 m NHN zuzüglich ΔMSL; als Wasserstandsrandbedingung liegt ausschließlich das RHW-Ereignis (zuzüglich ΔMSL je SSP) zugrunde. Eine Extrapolation über diesen Parameterraum hinaus, insbesondere auf andere Eintrittswahrscheinlichkeiten, ist nicht zulässig; hierfür ist das Modul mit den hydraulisch getriebenen Modulen 1 und 2 zu kombinieren oder das Ensemble entsprechend zu erweitern. Die Sensitivität der Ergebnisse gegenüber veränderten Wellenrandbedingungen wird mit dem Ensemble V12_02 separat untersucht.

Für die praktische Anwendung liegen die Gleichungen (18) bis (21) gemeinsam mit den Modulen 1 und 2 als dokumentierte Näherungsformeln mit definierten Gültigkeitsbereichen vor; ihre Bündelung in einem anwenderfreundlichen Prognosewerkzeug wird in Unterabschnitt 9.2 skizziert.

7. Hindcast-Modellierung ausgewählter Sturmhochwasser an der deutschen Ostseeküste

Die Hindcast-Modellierung umfasst die Validierung des kalibrierten Modells an unabhängigen Beobachtungsdaten (AP 3.2) sowie die szenarienbasierte Anwendung auf historische Ereignisse als Grundlage des MDE (AP 3.4, vgl. Tabelle 1).

7.1. Regionale Validierung des 1D-XBeach-Modells am Beispiel des Sturmhochwassers Oktober 2023

Aufbauend auf der lokalen Kalibrierung und Validierung des 1D-Modells (vgl. Abschnitt 5.3) wurde geprüft, inwieweit sich das auf Ahrenshoop kalibrierte Modell auf weitere Küstenabschnitte der deutschen Ostseeküste übertragen lässt (Simulationsserie V10_02). Hierzu wurden mit den hydraulischen Randbedingungen des MIKE21-Hindcasts zum Sturmhochwasser Oktober 2023 zusätzliche 1D-Modelle für Abschnitte westlich des Untersuchungsgebietes bei Rerik (KKM F111.910), auf Rügen (KKM R100.590, R101.755 und R102.630) sowie auf Usedom (KKM U017.815, U019.075 und U020.505) aufgesetzt. Standortspezifisch angepasst werden dabei ausschließlich die Topobathymetrie, die Gitterausrichtung und die lokalen Randbedingungspunkte, während die Modellparameter zunächst unverändert aus der Ahrenshoop-Kalibrierung übernommen wurden.

Die Übertragung erforderte mehrere methodische Erweiterungen des automatisierten 1D-Modellaufbaus: Liegen zwei MIKE21-Randbedingungspunkte vor, wird der Ursprung des Simulationsprofils mittig zwischen beiden Punkten definiert; die Definition des Gitter-Rotationswinkels *alfa* wurde allgemeingültig formuliert, da dieser bei südlich orientierten Küstenabschnitten (Usedom) das Vorzeichen wechselt. Als wesentliche Neuerung wurde der mittlere Wellenangriffswinkel je Standort eingeführt, anhand dessen die Wellensektoren (`thetamin`/`thetamax`) automatisch ausgerichtet werden und mit der lokalen Küstenorientierung „mitdrehen“. Damit konnten Wellenenergieverluste außerhalb der definierten Sektoren, die sich in ersten Testläufen als wesentliche Fehlerquelle erwiesen hatten, weitgehend vermieden werden; die Sektorauflösung wurde zugleich von $\Delta\theta = 10°$ auf 20° vergröbert, was die Rechenzeit deutlich reduziert.

Die Ergebnisse zeigen, dass die unveränderte Übernahme der Ahrenshoop-Parameter nicht ausreicht: Am Abschnitt KKM F111.910 wurde trotz der Sektorkorrekturen lediglich ein BSS von 0,31 erreicht, und auch an den Rügener Profilen führten die Standardparameter zu keinen zufriedenstellenden Ergebnissen. Als hochsensitiv und zugleich standortabhängig erwies sich erneut der Parameter `facua` (vgl. Abschnitt 5.4). Als Konsequenz wurde eine automatisierte 1D-Kalibrierungsroutine aufgebaut: Ein Skript erzeugt die vollständige Simulationsstruktur inklusive Batch-Steuerung für systematisch variierte Parameterbereiche (u. a. `facua`, `bedfriccoef`) an mehreren Profilen gleichzeitig und fasst alle untersuchten Parameterkombinationen automatisch in einer Übersichtstabelle zusammen. Limitierend bleibt – wie bereits bei der Validierung am Ereignis Januar 2019 – die Verfügbarkeit aktueller Vorsturm-Bathymetrien an den Vergleichsstandorten. Für eine belastbare regionale Anwendung ist somit je Standort eine lokale Nachkalibrierung erforderlich, die mit der entwickelten Pipeline jedoch weitgehend automatisiert erfolgen kann – eine wesentliche Voraussetzung für die im Ausblick skizzierte Skalierung des Ansatzes auf die gesamte Außenküste

(vgl. Abschnitt 9.2). Tabelle 16 fasst die Gütewerte der 1D-Modellierung aus Kalibrierung, Validierung und regionaler Übertragung zusammen.

Tabelle 16: Übersicht der 1D-Modellgüte: lokale Kalibrierung (V10_03) und Validierung (V11_01) am Standort Ahrenshoop sowie regionale Übertragung mit unveränderten Ahrenshoop-Parametern (V10_02)

Serie	Ereignis	KKM	BSS –	$V_{D,ero,sim}$ / $V_{D,ero,obs}$ m^3/m	Bewertung
V10_03	Okt. 2023	F180.715	0,844	8,7 / 3,9	Kalibrierung, exzellent
V10_03	Okt. 2023	F181.495	0,823	7,1 / 5,2	Kalibrierung, exzellent
V11_01	Jan. 2019	F181.495	0,447	10,9 / 12,6	Validierung, zufriedenstellend
V10_02	Okt. 2023	F111.910	0,31	–	Übertragung, unzureichend
V10_02	Okt. 2023	R100.590 – R102.630	–	–	Nachkalibrierung erforderlich
V10_02	Okt. 2023	U017.815 – U020.505	–	–	Nachkalibrierung erforderlich

Die lokale Validierung des kalibrierten 1D-Modells erfolgte mit der Simulation V11_01 am unabhängigen Sturmhochwasser vom 02.01.2019 am KKM F181.495. Als Randbedingungen dienten wiederum die Ganglinien des MIKE21-Hindcasts aus ResCAD B (Abbildung 108): Der Wasserstand erreichte einen Scheitel von rund 1,3 m über Ruhewasserspiegel bei signifikanten Wellenhöhen bis knapp 1,9 m und Peakperioden um 5,5 s; der Wellenangriff erfolgte über weite Teile des Ereignisses nahezu küstennormal aus nördlicher Richtung. Die Modellparameter entsprechen unverändert dem am Ereignis Oktober 2023 kalibrierten Parametersatz.

Das Ergebnis der Validierung zeigt der Profilplot in Abbildung 109: Mit $BSS = 0{,}447$ wird das gemessene Nachsturmprofil zufriedenstellend reproduziert; das simulierte Dünenerosionsvolumen von $V_{D,ero,sim} = 10{,}9\ m^3/m$ unterschätzt den beobachteten Wert ($V_{D,ero,obs} = 12{,}6\ m^3/m$) um lediglich 1,7 m^3/m bzw. rund 14 %. Die Lage der Abbruchkante und die Ausdehnung der Erosionszone am Dünenfuß werden gut getroffen; die größten Abweichungen treten im Bereich der Umlagerungen auf dem Vorstrand auf, was maßgeblich der lediglich grob interpolierbaren Vorsturm-Bathymetrie dieses Ereignisses zuzuschreiben ist. Angesichts dieser Datenlage bestätigt die Validierung die Übertragbarkeit des kalibrierten Parametersatzes auf ein unabhängiges Extremereignis am selben Standort.

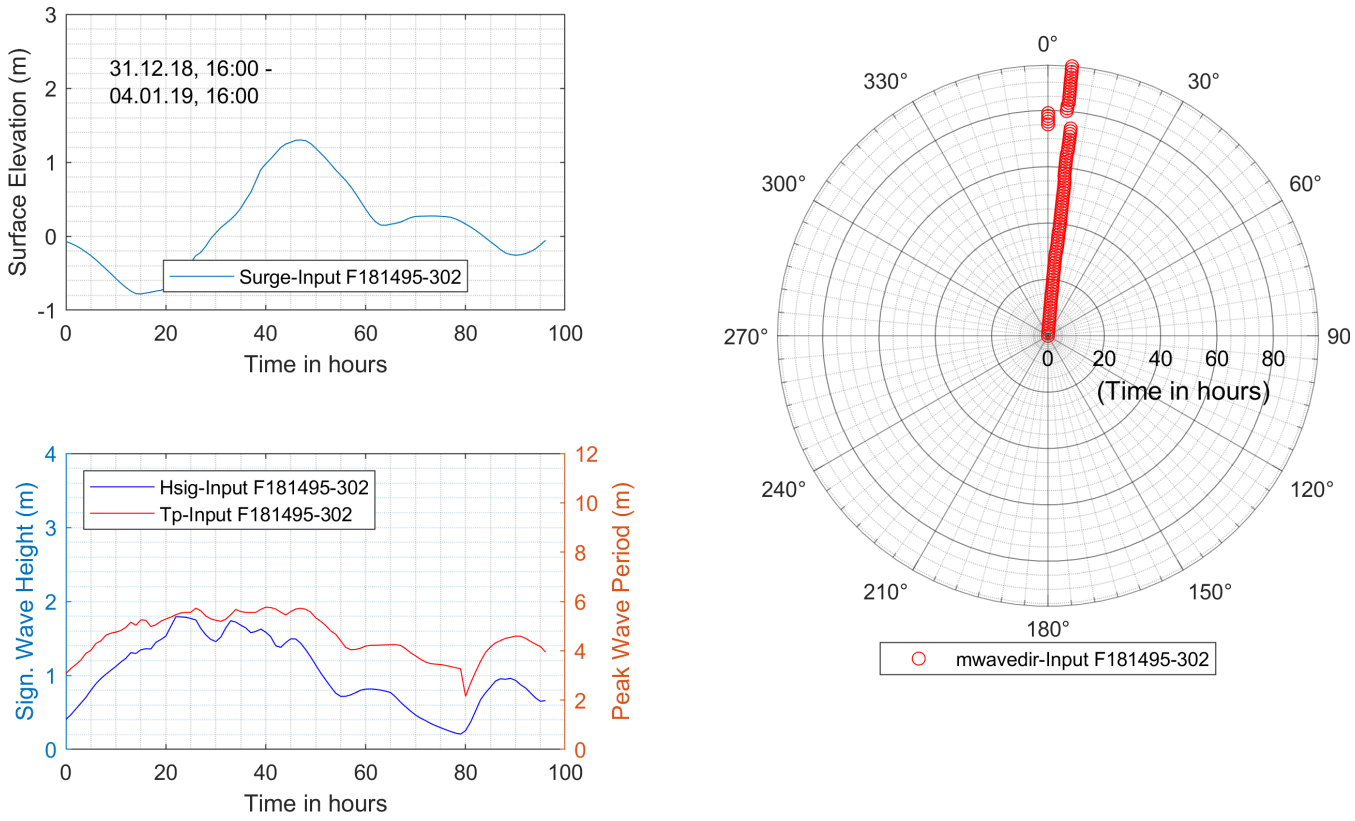


Abbildung 108: Hydraulische Randbedingungen des MIKE21-Hindcasts zum Sturmhochwasser vom 02.01.2019 am Randbedingungspunkt Pt. 302 (KKM F181.495, Simulation: V11_01): Wasserstandsganglinie (oben links), signifikante Wellenhöhe und Peakperiode (unten links) sowie Wellenangriffswinkel über die Ereignisdauer (rechts)

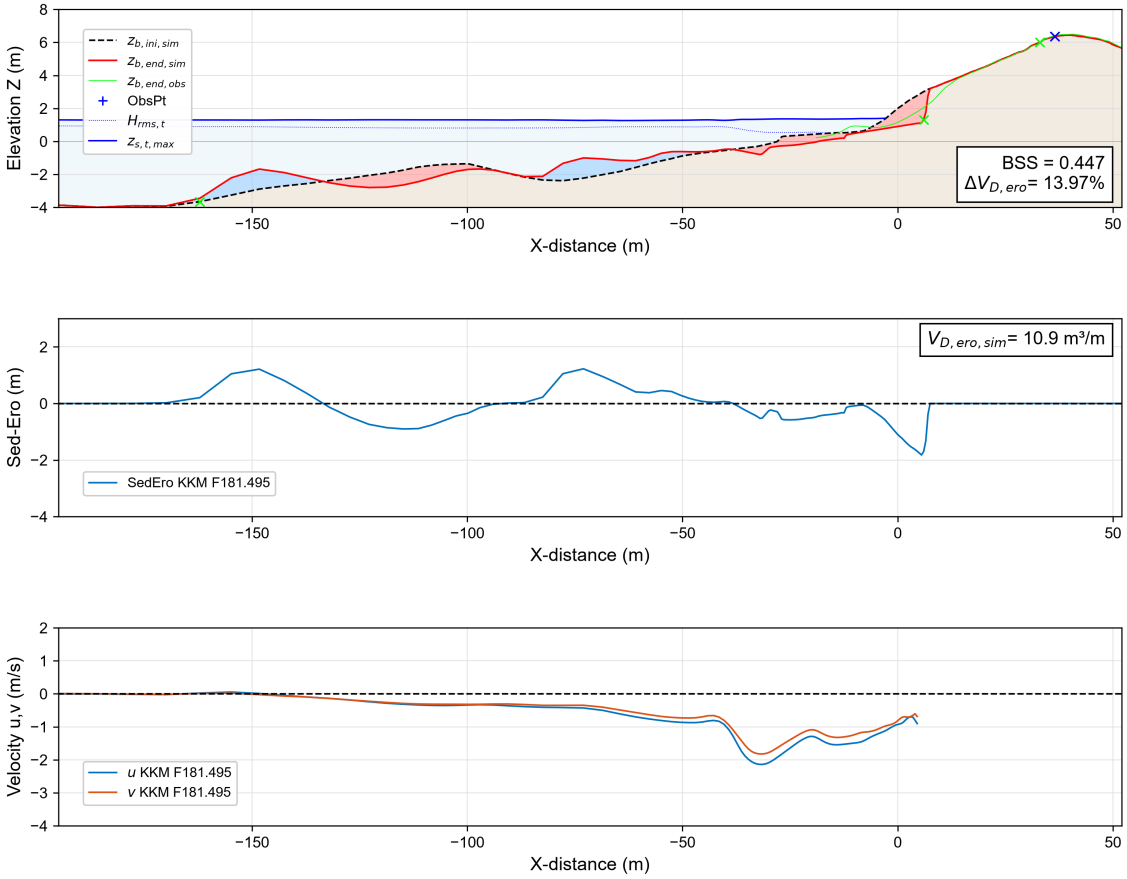


Abbildung 109: Profilanalyse der 1D-Validierung am Sturmhochwasser vom 02.01.2019 (KKM F181.495, Simulation: V11_01): Ausgangsprofil, simuliertes und gemessenes Profil nach dem Ereignis mit BSS (oben), kumulierte Sedimentations- und Erosionshöhen mit $V_{D,ero}$ (Mitte) sowie GLM-Geschwindigkeiten u, v zum Zeitpunkt t = 46,5 h (unten)

7.2. Modellierung historischer Sturmhochwasser im Zeitraum von 1941 bis 2023 am Standort Ahrenshoop

Die instrumentell aufgezeichneten Sturmhochwasser am Pegel Warnemünde seit 1872 sind in Abbildung 110 dargestellt und verdeutlichen die Datengrundlage, aus der die nachfolgend modellierten Ereignisse ausgewählt wurden: 34 Ereignisse erreichten oder überschritten die Schwelle von 1,25 m über dem mittleren Wasserstand, darunter das Extremereignis von 1872 (2,45 m) und das im Projektzeitraum dokumentierte Sturmhochwasser vom Oktober 2023 (1,48 m). Die meteorologische Rekonstruktion der Sturmwetterlage von 1872 geben Rosenhagen und Bork (2009); anlässlich des 150. Jahrestages fasst der Sonderband KFKI (2022) den aktuellen Kenntnisstand zu diesem bis heute unerreichten Referenzereignis der südwestlichen Ostsee zusammen.

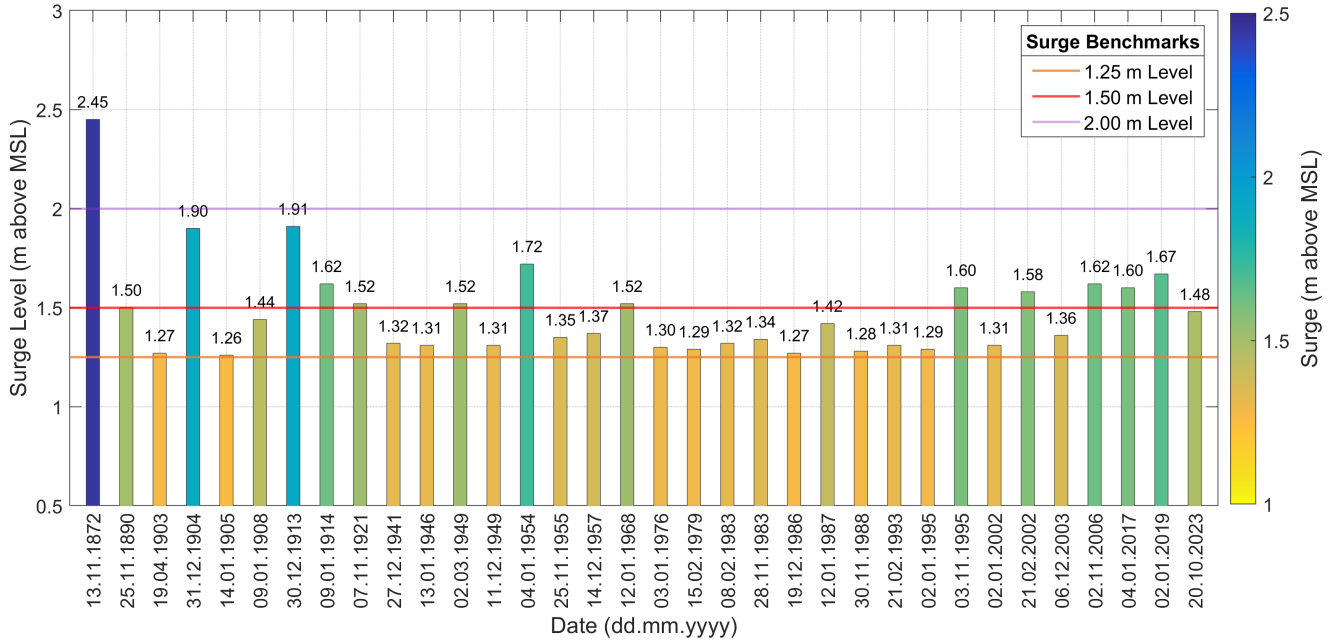


Abbildung 110: Aufgezeichnete historische Sturmhochwasser der südwestlichen Ostsee am Pegel Warnemünde seit 1872 (Ereignisse ≥ 1,25 m über Mittelwasser, koloriert nach Scheitelwasserstand), Datengrundlage (MV-Wetter 2023)

Mit dem anhand von Naturdaten kalibrierten 2DH-XB-Modell des Sturmhochwassers 10/2023 (Version: V8_05) lassen sich unter der Annahme projizierbarer Simulationseinstellungen zumindest hydraulisch auch weitere, historische Sturmhochwasser untersuchen. Dazu lieferte das MIKE21-Modell aus ResCAD B für 83 individuelle Ereignisse im Zeitraum von 1941 bis 2023 entsprechende hydraulische Randbedingungen. Allerdings treten für die Ganglinien des Wasserstandes hier Abweichungen von +/- 30 cm auf, was eine direkte Vergleichbarkeit erschwert.

Über diesen langen Zeithorizont liegen lediglich sehr lückenhaft morphologische Zeitreihen und Erosionsprofile vor, welche direkt einem Sturmhochwasser zugeordnet werden können. Aufgrund dessen kam eine in Abschnitt 5.1.3 entwickelte, standardisierte Topobathymetrie bestehend aus einem Bruun-Gleichgewichtsprofil sowie einem Standardprofil für Strand und Düne nach Vorgabe des StALU MM. Dies hatte sich bereits bei der Modellierung von Klimaanpassungsszenarien in Abschnitt 6.5 bewährt und stellt so die Vergleichbarkeit mit anderen Simulationsdurchläufen sicher. Nicht berücksichtigt wurde jedoch die sich kontinuierliche, theoretisch verschiebende Höhenlage des Gleichgewichtsprofils über den sich veränderten Meeresspiegel von 1941 bis 2023. Die Ergebnisse sind daher als „Was-wäre-wenn“-Belastungsvergleich am heutigen Regelprofil zu

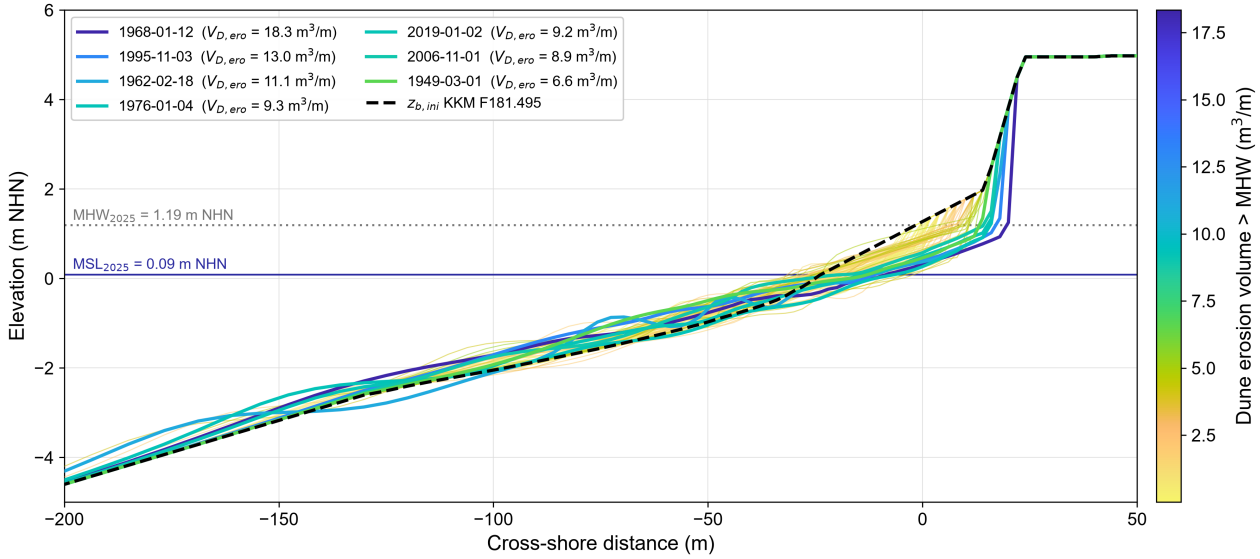


Abbildung 111: Erosionsprofile der 2DH-Hindcast-Modellierung von 83 historischen Sturmhochwassern im Zeitraum 1941 bis 2023 (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m^3/m) mit Bruun-Geometrie (Simulation: V9_11)

interpretieren, nicht als Rekonstruktion der tatsächlichen historischen Erosion: Die realen Profile zum Ereigniszeitpunkt wichen teilweise erheblich vom heutigen Zustand ab – so lag beispielsweise beim Sturmhochwasser 1995 der Dünenfuß noch nicht auf dem heutigen Niveau von rund 2 m NHN. Dass einzelne namhafte schwere Sturmhochwasser am standardisierten Profil lediglich geringe oder keine Kronenrückgänge erzeugen, spiegelt somit die Robustheit des heutigen Ausbauzustands wider und ist nicht mit den seinerzeit beobachteten Schäden vergleichbar.

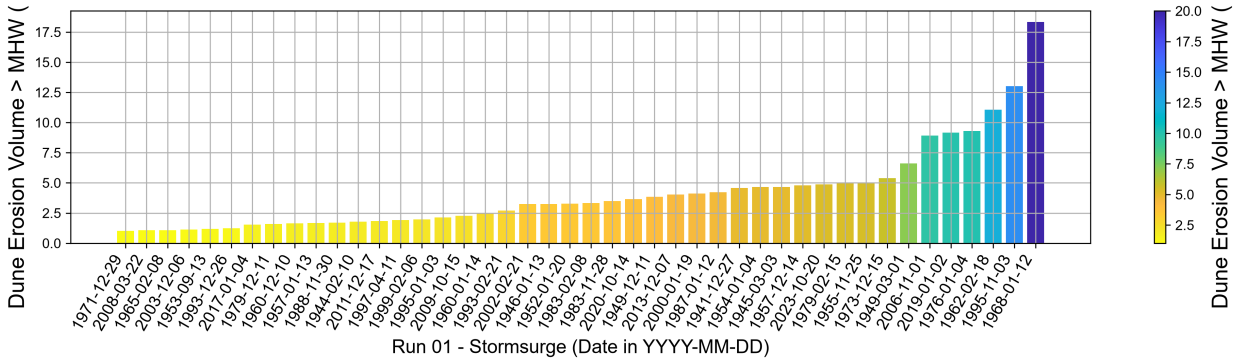


Abbildung 112: Modellierte Dünenerosionsvolumen für historische Sturmhochwasser im Zeitraum von 1941 bis 2023 aufsteigend sortiert (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m^3/m) auf Grundlage eines Bruun-Standardprofils (Simulation: V9_11)

Alle Erosionsprofile der untersuchten Sturmhochwasser über einem Grenzwert von $V_{D,ero}$ >= 1 m^3/m sind einmal grafisch in der Abbildung 111 über das Küstenquerprofil aufgetragen. Das auf Grundlage der Modellierung stärkste Sturmhochwasser fand im Januar 1998 statt, auf Platz 2 ist das Novembersturmhochwasser von 1995. In der Abbildung 112 sind die Ereignisse über dem Grenzwert aufsteigend nach Dünenerosionsvolumen sortiert.

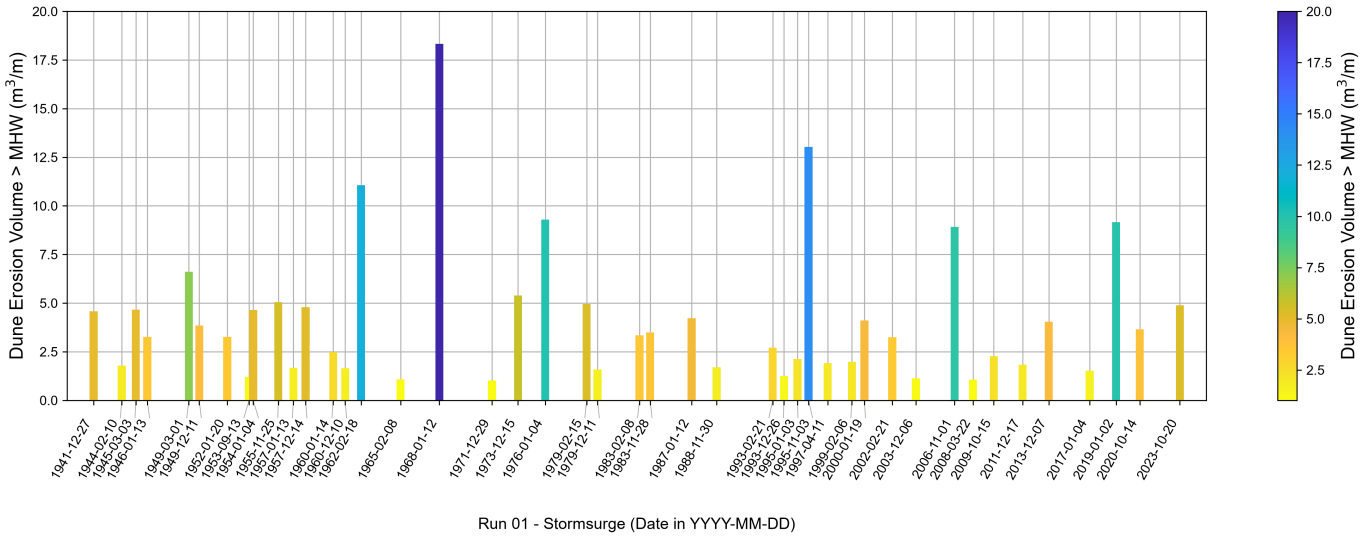
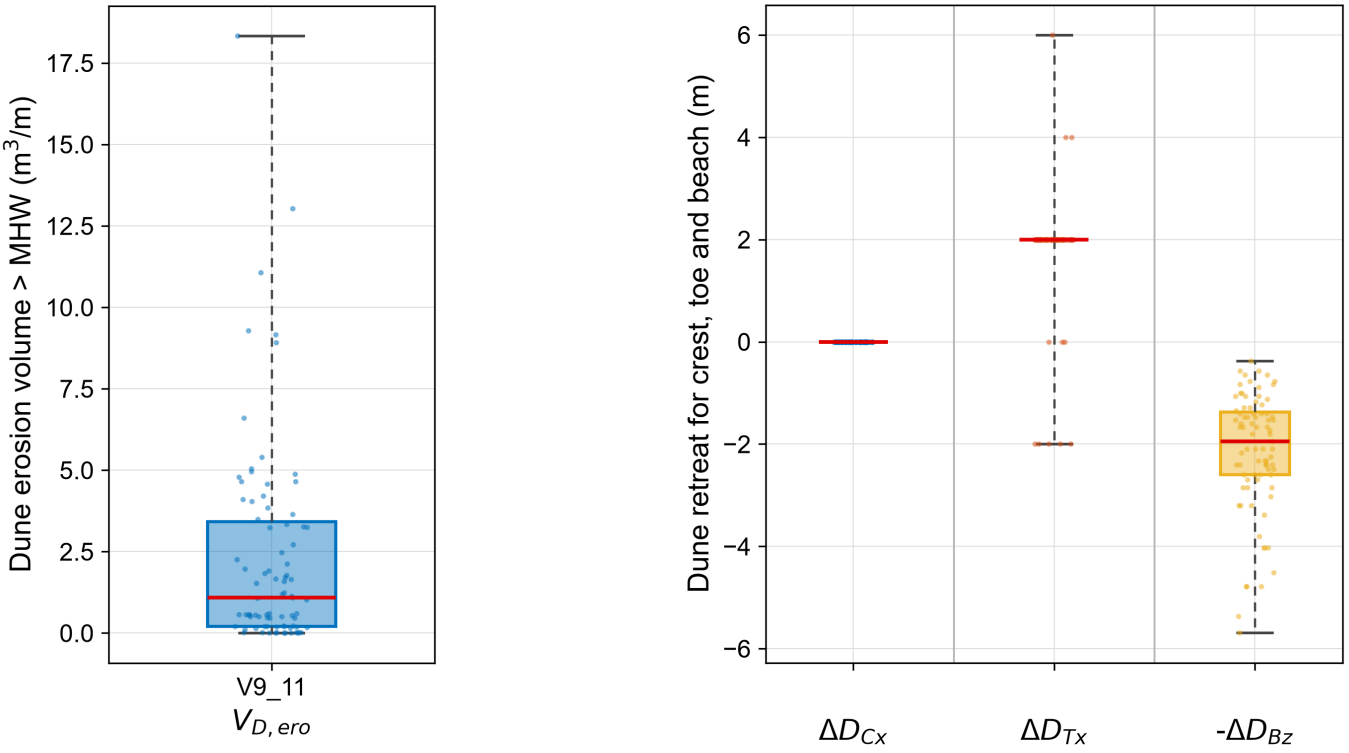


Abbildung 113: Zeitstrahl des Dünenerosionsvolumens für historische Sturmhochwasser von 1941 bis 2023 (Grenzwert: $V_{D,ero}$ = 1 m^3/m) auf Grundlage eines Bruun-Standardprofils (Simulation: V9_11)

Für eine bessere zeitliche Einordnung und den Vergleich mit den tatsächlich aufgetretenen Extremereignissen ist in der Abbildung 113 das Dünenerosionsvolumen für die einzelnen Sturmhochwasser auf einem Zeitstrahl aufgetragen.



(a) Dünenerosionsvolumen (b) Dünenrückgang (Krone, Fuß und Vorstrand)

Abbildung 114: Parameterspannweiten der 2DH-Hindcast-Modellierung von 83 historischen Sturmhochwassern im Zeitraum 1941 bis 2023 als Boxplot (Simulation: V9_11)

In der Abbildung 114 werden die Spannweiten der beobachteten Dünenparameter aus der Hindcast-Simulationsreihe dargestellt.

7.3. Metamodell zur Analyse von Küstenschutzdünen auf Basis historischer Sturmhochwasser im Zeitraum von 1941 bis 2023

Aufgrund der hohen Anzahl von Simulationen und variierender, hydraulischer Randbedingungen bietet sich für den Hindcast V9_11 von 1941 bis 2023 aus Abschnitt 7.2 eine strukturierte Aufbereitung der Simulationsergebnisse an. Daraus konnte ein datenbasiertes Prognosemodell der Dünenerosion für den Standort Ahrenshoop auf Grundlage eines standardisierten Bruun-Gleichgewichtsprofils sowie historischer Sturmhochwasser erstellt werden (Modul 2 des MDE, vgl. Unterabschnitt 1.2).

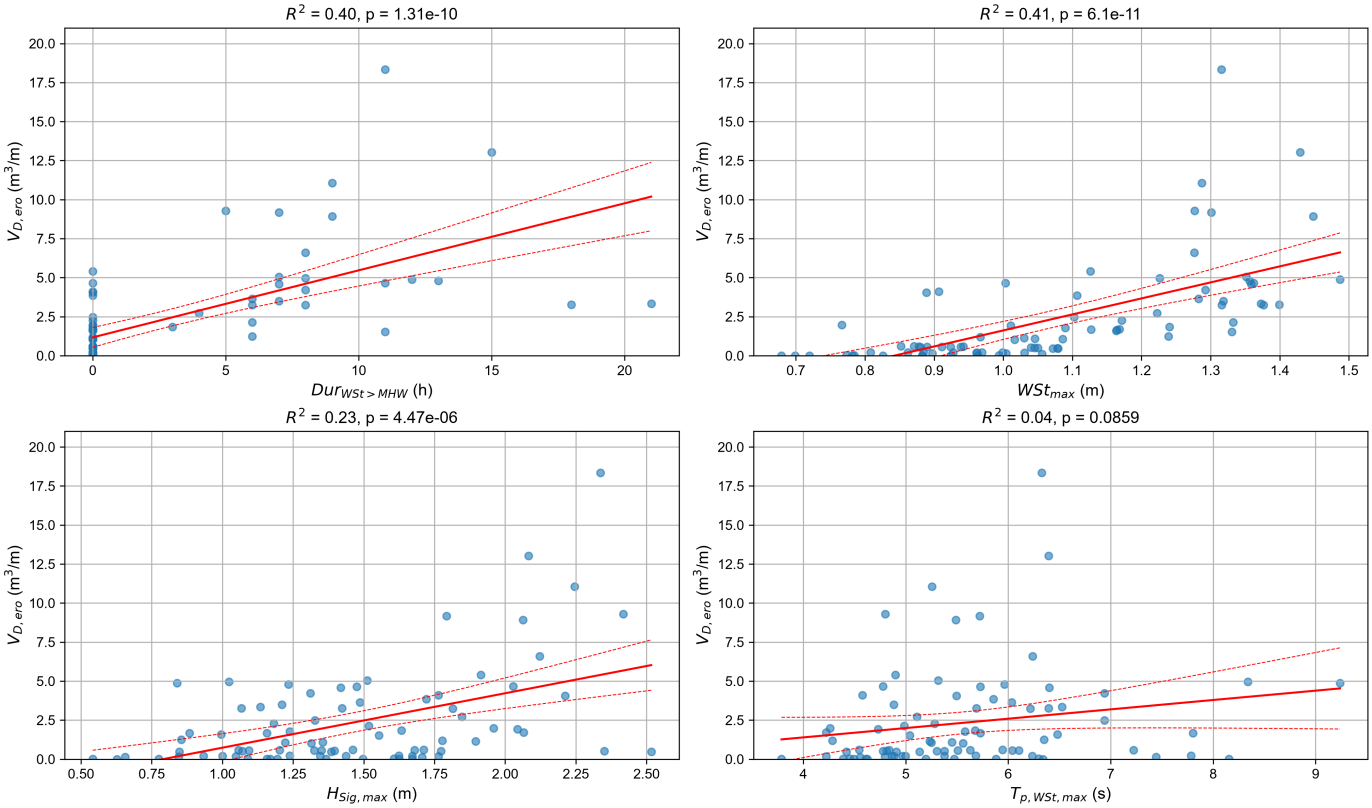


Abbildung 115: Lineare Regressionsanalyse für die hydraulischen Randbedingungen $Dur_{WSt>MHW}$, WSt, $H_{sig,max}$ sowie $T_{p,max}$ und dem Dünenerosionsvolumen für die historischen Sturmhochwasser von 1941 bis 2023 auf Grundlage eines Bruun-Standardprofils (Simulation: V9_11)

Die Abbildung 115 zeigt die Ergebnisse einer linearen Regressionsanalyse aller Szenarien mit Fokus auf die (maximalen) hydraulischen Randbedingungen je Ereignis. Dies sind hier: $Dur_{WSt>MHW}$, WSt, $H_{sig,max}$ sowie $T_{p,max}$. Die Dauer $Dur_{WSt>MHW}$ wurde entsprechend der kumulierten Überschreitungsdauer über dem Schwellenwert definiert, in welcher die WSt-Ganglinie den Wert für MHW bei 1.1mNHN überschreitet. $T_{p,max}$ ist die Peakperiode zum Zeitpunkt des maximalen Wasserstandes,

nicht zwingend das Maximum von T_p. Am besten korrelieren hier der maximale Wasserstand, die Verweilzeit über MHW sowie die maximale, signifikante Wellenhöhe.

Zur Voruntersuchung der Zusammenhänge zwischen den hydraulischen Randbedingungen und dem Dünenerosionsvolumen $V_{D,ero}$ sowie der wechselseitigen Abhängigkeiten der Prädiktoren untereinander wurden paarweise Korrelationskoeffizienten berechnet (Abbildung 116); die Richtungsabhängigkeit des Erosionsvolumens ist ergänzend in Abbildung 117 als Polardiagramm dargestellt. Der Korrelationskoeffizient nach Pearson r quantifiziert die Stärke des *linearen* Zusammenhangs zweier Größen, während der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman ρ die Stärke eines allgemein *monotonen* Zusammenhangs erfasst und robust gegenüber Ausreißern ist (Fahrmeir u. a. 2016).

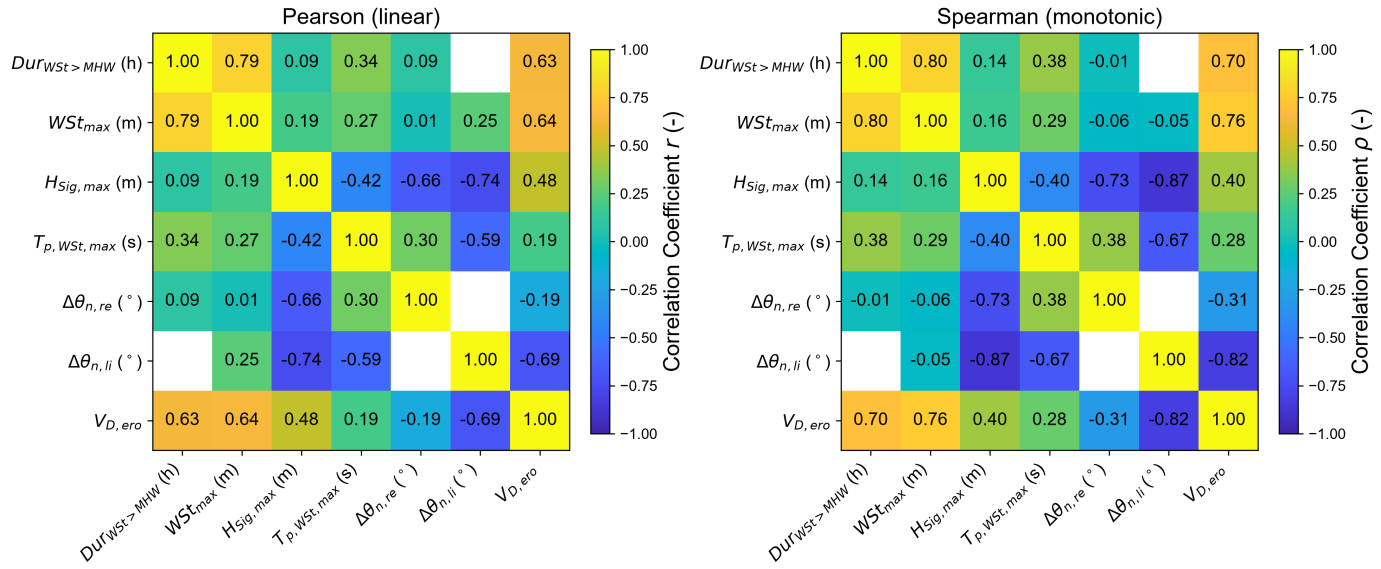


Abbildung 116: Korrelationsmatrizen der untersuchten hydraulischen Randbedingungen und dem Dünenerosionsvolume der modellierten XB-Sturmhochwassern von 1941 bis 2023 auf Grundlage eines Bruun-Standardprofils (Simulation: V9_11)

Deutlich höhere Beträge von ρ gegenüber r deuten folglich auf einen nichtlinearen monotonen Zusammenhang hin. Der Wellenangriffswinkel wurde als Abweichung $\Delta\theta_n$ von der Küstennormalen ($\alpha = 310.4°$) zum Zeitpunkt des Wasserstandsmaximums ausgewertet und nach Anlaufrichtung rechts ($\Delta\theta_{n,re}$, $n = 78$) bzw. links ($\Delta\theta_{n,li}$, $n = 5$) der Normalen getrennt betrachtet. Da beide Winkelvariablen je Ereignis lediglich einseitig definiert sind, wurden die Koeffizienten paarweise über die jeweils gemeinsam verfügbaren Ereignisse berechnet (*pairwise deletion*); strukturell nicht berechenbare Kombinationen sind in der Matrix als NaN gekennzeichnet.

Im Polardiagramm ist jedes Ereignis mit seiner Anlaufrichtung (Winkel) und seinem Erosionsvolumen (Radius, Farbskala) dargestellt; die eingezeichneten Strahlen markieren die mit dem Erosionsvolumen gewichteten mittleren Anlaufrichtungen $\bar{\theta}_{V,li} = 352.9°$ und $\bar{\theta}_{V,re} = 297.3°$ beider Seiten.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Erosionsvolumen am stärksten mit der Überschreitungsdauer des Wasserstands ($r = 0{,}62$; $\rho = 0{,}77$) und dem maximalen Wasserstand ($r = 0{,}64$; $\rho = 0{,}76$) korreliert; die maximale signifikante Wellenhöhe folgt mit moderater ($r = 0{,}48$; $\rho = 0{,}40$), die Peakperiode mit schwacher Korrelation ($r = 0{,}19$; $\rho = 0{,}28$). Die durchweg höheren Spearman-Koeffizienten für Dauer

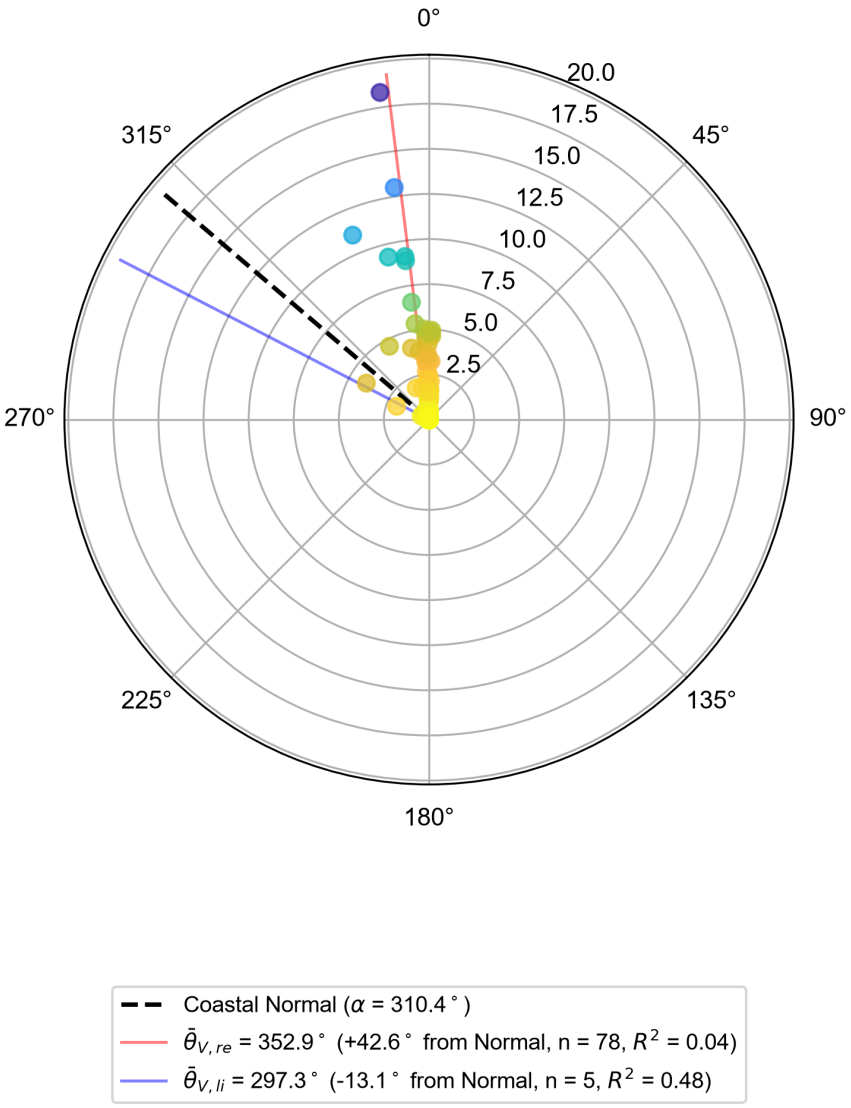


Abbildung 117: Abgeleitete Wellenangriffswinkel $\Delta\theta_{n,re}$ und $\Delta\theta_{n,li}$ in Bezug zur Küstennormalen in Abhängigkeit des Dünenerosionsvolumens $V_{D,ero}$ der modellierten XB-Sturmhochwassern von 1941 bis 2023 auf Grundlage eines Bruun-Standardprofils (Simulation: V9_11)

und Wasserstand stützen die Annahme eines nichtlinearen, monoton wachsenden Zusammenhangs, wie er für Schwellenwert-gesteuerte Erosionsprozesse zu erwarten ist. Hervorzuheben ist zugleich die starke Kollinearität zwischen Überschreitungsdauer und maximalem Wasserstand ($r = 0{,}84$; $\rho = 0{,}86$), die bei der Interpretation multivariater Modelle zu berücksichtigen ist. Das Polardiagramm verdeutlicht die ausgeprägt asymmetrische Richtungsverteilung: Die weit überwiegende Zahl der Ereignisse ($n = 78$) läuft rechts der Küstennormalen an, darunter sämtliche Ereignisse mit großen Erosionsvolumina; die gewichtete Mittelrichtung $\bar{\theta}_{V,re}$ liegt mit +42.6° deutlich rechts der Normalen. Innerhalb dieses Sektors ist die Erosionshöhe jedoch nahezu unabhängig vom Angriffswinkel ($R^2 = 0{,}04$) und wird primär durch Wasserstand, Dauer und Wellenhöhe gesteuert. Links der Normalen treten lediglich fünf, ausnahmslos schwache Ereignisse auf; die dort formal hohen Korrelationswerte ($r = -0{,}69$; $\rho = -0{,}82$; $R^2 = 0{,}48$) sind angesichts des geringen Stichprobenumfangs nicht belastbar.

Physikalisch erklärt sich die Asymmetrie aus dem Zusammenwirken von Windstau und Seegang am Standort: Erhöhte Wasserstände treten an der südwestlichen Ostseeküste vorrangig bei Wind aus östlichen bis nordöstlichen Richtungen auf, während westliche bis nordwestliche Windlagen trotz der

dort größeren Streichlänge häufiger, hohe Seegangsereignisse verursachen (RKMV 2012) – erzeugen sie selten nennenswerten Windstau am Standort. Da die Dünenerosion Schwellenwert-gesteuert erst über dem Bereich der Dünenfußhöhe einsetzt (Ausnahme: Wellenauflauf durch hohen Seegang) und maßgeblich von Wasserstand und Überschreitungsdauer abhängt (vgl. die Korrelationskoeffizienten oben), dominieren folglich Ereignisse mit nordöstlicher Windkomponente das Erosionsgeschehen. Deren Wellenanlaufrichtungen liegen rechts der Küstennormalen, was sowohl die Konzentration sämtlicher starker Ereignisse in diesem Sektor als auch die Lage der gewichteten Mittelrichtung ($\bar{\theta}_{V,re}$= 352.9°, +42.6° zur Normalen) erklärt. Die Windrichtung geht dabei mit der Wellenanlaufrichtung einher. Der scheinbare Richtungseffekt der fünf linksseitigen, ausnahmslos schwachen Ereignisse – erkennbar auch an der starken negativen Korrelation von $\Delta\theta_{n,li}$ mit der Wellenhöhe (r= −0,74; ρ= −0,87) – ist somit überwiegend als indirekte Folge des fehlenden Windstaus bei westlichen Anlaufrichtungen zu verstehen und nicht als eigenständige Winkelabhängigkeit der Dünenerosion.

Zur Quantifizierung des Zusammenhangs zwischen den hydraulischen Randbedingungen und dem Dünenerosionsvolumen $V_{D,ero}$ wurde eine multiple lineare Regression mit schrittweiser Variablenselektion (*stepwise regression*) durchgeführt. Als Prädiktoren wurden aus den Zeitreihen der Hindcast-Ereignisse (n = 83) je Ereignis die Maximalwerte des Wasserstands WSt_{max}, der signifikanten Wellenhöhe $H_{sig,max}$ und der Peakperiode $T_{p,max}$ sowie die Überschreitungsdauer Dur des Wasserstands über der MHW-Referenzlinie (1,19 m NHN, Stand 2025) extrahiert. Der Wellenangriffswinkel wurde als Abweichung von der Küstennormalen (α= 310.39°) zum Zeitpunkt des Wasserstandsmaximums berücksichtigt. Die Variablenselektion erfolgte anhand des p-Werts der partiellen F-Statistik: Ausgehend von einem Startmodell wird in jedem Iterationsschritt geprüft, ob die Hinzunahme eines weiteren Terms die Residualvarianz signifikant reduziert (Aufnahme bei $p < 0{,}05$) bzw. ob ein bereits enthaltener Term ohne signifikanten Erklärungsverlust entfernt werden kann (Ausschluss bei $p > 0{,}10$).

Die partielle F-Statistik vergleicht dabei die Residuenquadratsummen des Modells mit und ohne den betrachteten Term und bewertet somit dessen zusätzlichen Erklärungsbeitrag unter Berücksichtigung aller übrigen Modellterme (Draper und Smith 1998). Das Verfahren kombiniert Vorwärtsselektion und Rückwärtselimination (*bidirectional stepwise regression*) und wurde mit der Funktion `stepwiselm` der MATLAB Statistics and Machine Learning Toolbox umgesetzt (The MathWorks, Inc. 2024); sie ist inzwischen zusätzlich in einer unabhängigen, quelloffenen Python-Implementierung reproduziert und validiert (vgl. Unterabschnitt D). Neben den Haupteffekten wurden paarweise Interaktionsterme als Kandidaten zugelassen, wobei das Hierarchieprinzip eingehalten wurde: Ein Interaktionsterm kann ausschließlich gemeinsam mit seinen zugehörigen Haupteffekten im Modell verbleiben. Das resultierende Modell lautet:

$$\begin{aligned} V_{D,ero} = {} & -5{,}167 - 1{,}565 \cdot Dur + 2{,}972 \cdot WSt_{max} + 1{,}349 \cdot H_{Sig,max} \\ & +0{,}253 \cdot T_{p,max} + 0{,}752 \cdot Dur \cdot H_{Sig,max} + 0{,}123 \cdot Dur \cdot T_{p,max} \end{aligned} \tag{22}$$

mit $V_{D,ero}$ in m^3/m, Dur in h, WSt_{max} und $H_{sig,max}$ in m sowie $T_{p,max}$ in s. Der Wellenangriffswinkel wurde im Zuge der Selektion nicht in das Modell aufgenommen. Hervorzuheben ist, dass der negative Koeffizient des Haupteffekts von Dur nicht isoliert interpretierbar ist, da die erosionsverstärkende Wirkung der Ereignisdauer über die positiven Interaktionsterme $Dur{\cdot}H_{sig,max}$ und $Dur{\cdot}T_{p,max}$ abgebildet wird: Lange Ereignisdauern wirken demnach vor allem in Kombination mit hohen Wellen und langen Wellenperioden erosionsfördernd, während der maximale Wasserstand als stärkster Einzelprädiktor direkt positiv eingeht.

Abbildung 118 stellt die mit Gleichung (22) berechneten Erosionsvolumina den XB-Ergebnissen gegenüber. Das Modell erreicht ein korrigiertes Bestimmtheitsmaß von R^2_{adj} = 0,82 bei einem mittleren quadratischen Fehler von $RMSE$ = 1.32 m³/m und verschwindender systematischer Abweichung ($Bias$ = 0.00 m³/m). Im Bereich kleiner bis mittlerer Erosionsvolumina ($V_{D,ero}$ < 6 m³/m), der die Mehrzahl der Ereignisse umfasst, streuen die Punkte eng um die 1:1-Linie. Bei den seltenen Extremereignissen zeigen sich hingegen größere Abweichungen:

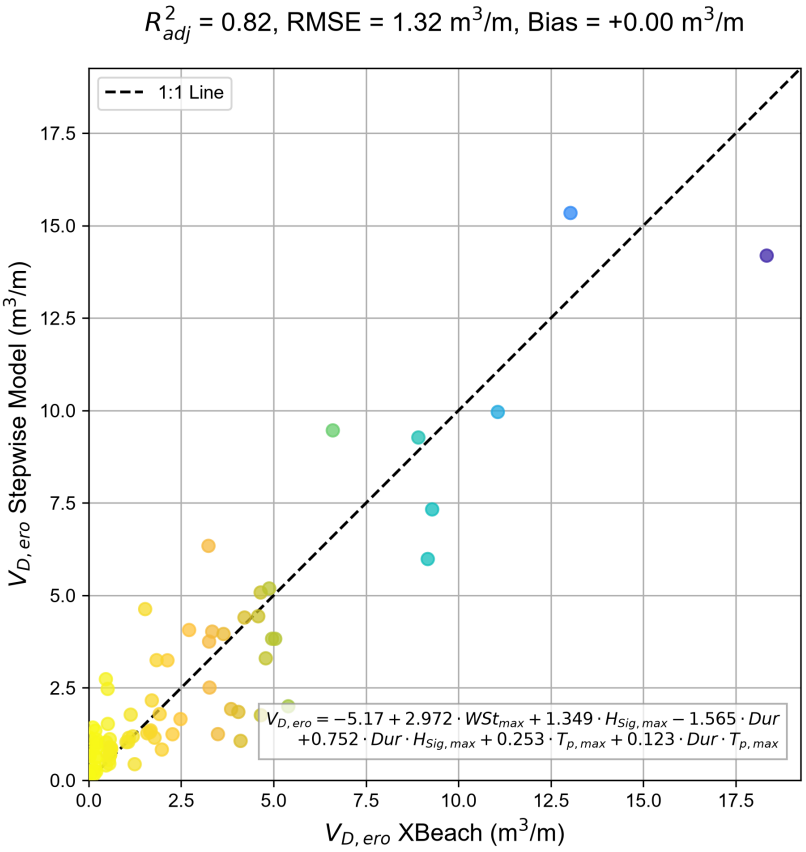


Abbildung 118: Vergleich des Metamodells (Version: *stepwise model*) mit den modellierten XB-Sturmhochwassern von 1941 bis 2023 auf Grundlage eines Bruun-Standardprofils (Simulation: V9_11)

Das stärkste Ereignis ($V_{D,ero} \approx$ 18 m³/m) wird vom Modell deutlich unterschätzt, während ein mittleres Ereignis ($V_{D,ero} \approx$ 6.5 m³/m) erheblich überschätzt wird. Dieses Verhalten ist typisch für lineare Regressionsansätze, die nichtlineare Prozesse wie das Schwellenwert-gesteuerte Einsetzen der Dünenerosion lediglich näherungsweise abbilden können. Für eine überschlägige Abschätzung des Erosionsvolumens aus den hydraulischen Randbedingungen ist das Modell im kalibrierten Parameterbereich gleichwohl geeignet; eine Extrapolation über diesen Bereich hinaus, insbesondere auf Verhältnisse unter Klimaänderungszuschlägen, ist nicht zulässig.

Ergänzend zum Modell auf Grundlage der historischen Randbedingungen wurde mit identischer Methodik ein zweites Regressionsmodell auf Grundlage synthetischer SHG-Szenarien erstellt (Modul 1 des MDE). Hierfür wurden die Szenarien-Ensembles V9_09 (n = 200) und V9_10b (n = 15 Extremszenarien) kombiniert, wodurch sich der abgedeckte Parameterraum gegenüber dem Hindcast deutlich erweitert (maximale Wasserstände bis 2,12 m NHN und damit bis nahe an das Bemessungsniveau RHW). Die Prädiktoren entstammen hier den statistisch generierten Szenarioparametern des SHG (Scheitelwasserstand, Ereignisdauer, Ganglinienschiefe, signifikante Wellenhöhe, Peakperiode); die

Ganglinienschiefe wurde im Zuge der Variablenselektion nicht in das Modell aufgenommen. Das resultierende Modell lautet:

$$V_{D,ero} = 30{,}37 - 0{,}193 \cdot Dur - 18{,}555 \cdot WSt_{max} - 17{,}637 \cdot H_{Sig,max} - 3{,}970 \cdot T_{p,max} + 0{,}184 \cdot Dur \cdot H_{Sig,max} + 6{,}229 \cdot WSt_{max} \cdot H_{Sig,max} + 2{,}828 \cdot WSt_{max} \cdot T_{p,max} + 1{,}176 \cdot H_{Sig,max} \cdot T_{p,max} \quad (23)$$

mit einem korrigierten Bestimmtheitsmaß von R^2_{adj}= 0,79 bei $RMSE$= 2.04m^3/m und verschwindender systematischer Abweichung (n = 215, Abbildung 119). Die Modellstruktur gleicht dem historischen Modell aus Gleichung (22): Auch hier sind die negativen Haupteffekte nicht isoliert interpretierbar, da die erosionsverstärkende Wirkung über die durchweg positiven Interaktionsterme abgebildet wird – hohe Wasserstände und lange Ereignisdauern wirken vor allem in Kombination mit hohen Wellen und langen Wellenperioden. Der etwas höhere $RMSE$ erklärt sich aus dem größeren Wertebereich des Erosionsvolumens (bis ca. 35 m^3/m gegenüber ca. 18 m^3/m im Hindcast). Hervorzuheben ist, dass die Extremszenarien aus V9_10b eng an der 1:1-Linie liegen: Die gezielte Erweiterung des Parameterraums um seltene, schwere Ereignisse stabilisiert das Regressionsmodell gerade in dem für die Bemessung relevanten Bereich, der durch die historischen Beobachtungen allein nicht abgedeckt wird. Die Konsistenz beider unabhängig hergeleiteter Modelle – einmal auf Basis historischer, einmal auf Basis synthetischer Randbedingungen – stützt die Belastbarkeit des gewählten Ansatzes und die beabsichtigte Kopplung mit dem SHG zu einem durchgängigen Prognosewerkzeug.

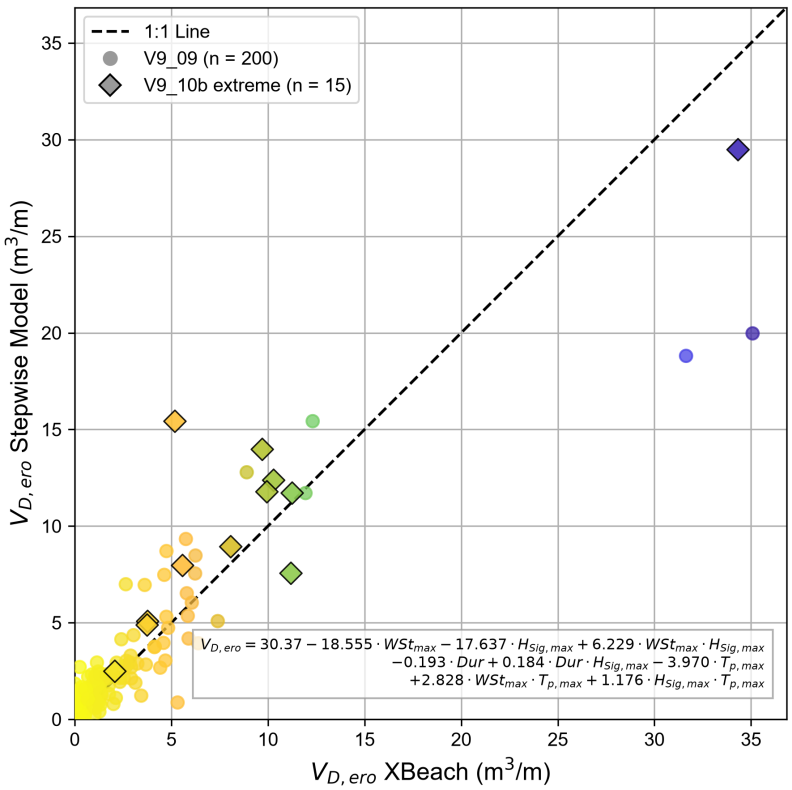


Abbildung 119: Vergleich des Metamodells (Modul 1) auf Grundlage synthetischer SHG-Szenarien (V9_09, n = 200, Punkte; V9_10b Extremszenarien, n = 15, Rauten) mit den XB-Simulationsergebnissen am KKM F181.495

8. Diskussion

Die folgende Diskussion ordnet die Ergebnisse des Vorhabens methodisch und fachlich ein. Zunächst werden die gewählte Modellierungsmethodik (Unterabschnitt 8.1) und die hydraulischen Randbedingungen (Unterabschnitt 8.2) kritisch beleuchtet. Es folgen der Vergleich mit der bisherigen Bemessungspraxis (Unterabschnitt 8.3) sowie Definitions- und Methodenfragen des Dünenerosionsvolumens (Unterabschnitt 8.4). Abschließend werden die Wirkungen des Meeresspiegelanstiegs auf Hydraulik und Profilentwicklung (Unterabschnitt 8.5) sowie die Einordnung und die Grenzen des MDE (Unterabschnitt 8.6) diskutiert.

8.1. Gewählte Modellierungsmethodik

Die gewählte numerische Softwareanwendung XBeach für den Küstennahbereich hat sich bewährt und als sehr leistungsstark erwiesen – auch mit weitgehend unveränderten Standardparametern (vgl. Unterabschnitt 5.3). Bei der Interpretation der Gütekriterien ist jedoch zu beachten, dass der BSS von der Ausdehnung des berücksichtigten Profilbereichs abhängt und dieser nicht über die hydro-morphodynamisch aktive Zone hinausgehen sollte. Die hohen Rechenzeiten der 2DH-Simulationen schränken die Anzahl möglicher Kalibrierläufe deutlich ein; zusätzlich beeinflusst die Gitterauflösung das Ergebnis: Je steiler die Dünenkante (vgl. Parameter `dryslp`), desto stärker wirkt sich das „Springen“ der Abbruchkante zum nächsten Gitterpunkt auf das berechnete Dünenerosionsvolumen und den BSS aus. Das 2DH-Modell bildet zwar komplexere Prozesse wie Küstenlängstransport und Refraktion ab, ist aber entsprechend aufwendig zu kalibrieren – ein sorgfältig kalibriertes 1D-Modell kann daher im Einzelfall sogar bessere Genauigkeitswerte erreichen. Dass diese Vereinfachung nicht unerheblich ist, zeigt Den Heijer (2013): Für niederländische Küstenabschnitte erhöhen Küstenkrümmung und schräger Wellenangriff das simulierte Dünenerosionsvolumen gegenüber der 1D-Betrachtung um bis zu 30 bis 50 % – ein Hinweis darauf, dass die hier für das 1D-Modul des MDE getroffene Wahl repräsentativer, küstennormaler Referenzprofile (KKM F180.715/F181.495) die tatsächliche Bandbreite lokal unterschätzen könnte. Ein bislang ungenutztes Potential der gewählten Software liegt in der Gitterdiskretisierung: XB unterstützt nativ kurvilineare, randangepasste Rechengitter (einschließlich des Delft3D-Gitterformats), die sich mit der automatischen MPI-Domänenzerlegung kombinieren lassen. Im Vorhaben wurden gedrehte, rechteckige Gitter verwendet; eine kurvilineare Diskretisierung würde künftig eine deutlich bessere Anpassung an die gekrümmte Topobathymetrie – etwa an Küstenbögen oder um Buhnenfelder – bei gleicher Zellenzahl erlauben und damit Auflösung gezielt dorthin lenken, wo die morphodynamisch aktive Zone liegt. Weiterhin gehen die notwendige künstliche Vertiefung und Begradigung der Topobathymetrie an der seewärtigen Randbedingung als methodische Vereinfachung in alle Simulationen ein. Für die Bewirtschaftung der Rechenressourcen erwies sich bei den Szenarien-Ensembles die parallele Ausführung mehrerer MPI-Simulationen mit jeweils moderater Kernanzahl als effizienter als die maximale Parallelisierung weniger Einzelläufe, da die Skalierung von MPI mit zunehmender Domänenteilung abnimmt.

8.2. Hydraulische Randbedingungen

Es gibt keine lokalen Aufzeichnungen zu küstennahen Wellen und Strömungen am Standort Ahrenshoop, weshalb das sich verändernde Wellenbild bisher ausschließlich durch das numerische Modell dargestellt werden kann. Für die Kalibrierung konnten ausschließlich die morphologischen Messreihen zugrunde gelegt werden, wodurch das hydraulische Modell lediglich indirekt kalibriert

wurde. Die simulierten Strömungsgeschwindigkeiten und Wellenhöhen erscheinen plausibel, sind mangels lokaler Messdaten jedoch nicht direkt überprüfbar. Zudem ist nicht auszuschließen, dass unterschiedliche hydrodynamische Parameterkombinationen zu einer ähnlichen morphodynamischen Antwort führen (Äquifinalität) – die gute morphologische Übereinstimmung legt die Hydrodynamik also nicht eindeutig fest. Hinzu kommt, dass für die datengestützte Hindcast-Modellierung ausschließlich relativ kleine Ereignisse zur Verfügung stehen: Das Kalibrierereignis vom Oktober 2023 (ca. 1,5 m NHN) liegt deutlich unter dem Bemessungsereignis (RHW = 2,30 m, BHW = 3,30 m NHN), für das ein Vielfaches des Erosionsvolumens ermittelt wurde. Je größer diese Extrapolation, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass bisher unberücksichtigte Faktoren die Fehlertoleranz überschreiten. Schließlich wurde nicht immer exakt der MIKE21-Ausgabepunkt als Beginn des XBeach-Berechnungsgitters gewählt; das hat im Tiefwasser wenig Einfluss, dennoch passen sich die eingespeisten Wellen nach dem Verlassen der erzwungenen Form erst mit zunehmendem Abstand zur Randbedingung an die örtlichen physikalischen Bedingungen des Modells an.

Schräge Wellenangriffswinkel erschweren die korrekte Simulation des lokalen Seegangs durch den Schatten der lateralen Randbedingungen. Eine Wavecrest-Randbedingung stellt zwar ein realistischeres Wellenbild dar, führt aber zu deutlich erhöhten Küstenlängsströmungen, welche die Simulation stark beeinflussen können (vgl. Unterunterabschnitt 2.5.8). Aus diesem Grund fiel die Entscheidung letztlich auf eine Neumann-Randbedingung in Kombination mit zyklischen Randbedingungen. Offen bleibt dabei, wie stark die zyklischen Randbedingungen die Strömungsverhältnisse im Modell beeinflussen und ob – wie im Projekt PADO – eine Höhenanpassung der lateralen Bathymetrie hätte berücksichtigt werden müssen (Schweiger u. a. 2020). Der Wellenangriffswinkel ist in der statistischen Datenbasis des SHG bislang nicht als Ausgabegröße enthalten; nach den vorliegenden Ergebnissen hat er signifikanten Einfluss auf Längstransport und Erosionsverteilung und wäre damit ein lohnender Kandidat für künftige Erweiterungen der gemeinsamen Modellkette (vgl. Unterabschnitt 9.2).

Für die Klimaanpassungsmodellierung in ResCAD A wurden synthetische, statistisch abgeleitete Szenarien generiert. Die klimawandelgetriebene Meeresspiegelerhöhung (MSLR) wurde in der vorliegenden Modellprozesskette über eine dem MSLR entsprechende Translation der Sturmhochwasserganglinie abgebildet. Ein Ostseemodell, das die klimaszenarienspezifisch veränderte Wellendynamik unmittelbar als Randbedingung für die Szenarienentwicklung bereitstellt, stand nicht zur Verfügung: Die in ResCAD B durchgeführten Simulationen mit pauschal um 1 m erhöhtem mittleren Meeresspiegel quantifizieren die Reaktion von Sturmhochwasserständen und Seegang zwar erstmals für die deutsche Ostseeküste (vgl. Unterabschnitt 8.5), wurden jedoch nicht in die statistische Datenbasis des SHG und die hier genutzten Szenarien-Exporte überführt. Die durchgängige Einbindung klimaszenarienspezifischer Randbedingungen in die Modellkette erfordert zudem eine hohe räumliche Auflösung zur Abbildung der in der Ostsee maßgebenden Flachwassereffekte sowie die Berücksichtigung der sich mit dem MSLR verändernden Topobathymetrie nach dem Prinzip der hydro-morphodynamischen Gleichgewichtsprofile – eine eigenständige, anspruchsvolle Forschungsaufgabe.

8.3. Vergleich Bemessungspraxis

Im Vergleich zum bisherigen Bemessungsansatz nach Newe (2013) werden statistisch konsistente Daten aus dem Sturmhochwasser-Generator, vgl. ResCAD (Teil B), verwendet. Der bisherige Ansatz berücksichtigt weder die Peakperiode noch den Wellenangriffswinkel oder räumlich und zeitlich variable Wellenparameter; Wasserstände und Wellenhöhen werden aus wenigen, weit

auseinanderliegenden Pegeln abgeleitet und die Wellenhöhe als Funktion des Wasserstandes behandelt, obwohl es sich um grundsätzlich unabhängige Größen handelt. Insbesondere bei schweren Sturmhochwassern führt dies zu einer signifikanten Überschätzung des Seegangs. Die prozessbasierte Modellierung erfasst darüber hinaus den Küstenlängstransport, dessen kritische Strömungsgeschwindigkeit beim Ereignis Oktober 2023 über ca. 20 Stunden überschritten wurde – ein in den konventionellen Querprofilmodellen nicht abgebildeter Verlustpfad.

Ein quantitativer Vergleich ist über die Vergleichswerte der Neubemessung für den Küstenbereich des Untersuchungsgebietes möglich (Tabelle 2 in Unterabschnitt 2.3): Die mit dem MDE-Modul 3 für das Bemessungsereignis RHW berechneten Kronenrückgänge (19,1 bis 7,2 m für Kronenhöhen von 3,5 bis 5,5 m NHN) stimmen trotz grundlegend verschiedener Methodik bemerkenswert gut mit den HW_{200}-Rückgängen nach Newe (2013) überein (17,2 bis 7,5 m; Abweichungen unter 2 m). Beide Ansätze zeigen zudem eine nahezu identische Sensitivität gegenüber der Kronenhöhe. Die Übereinstimmung stützt die Größenordnung der bisherigen Bemessungspraxis in diesem Lastbereich – zumal das RHW über dem HW_{200} liegt und sich Profilgeometrie (Bruun-Gleichgewichtsprofil gegenüber linearem Strandprofil), Seegangsansatz und Bemessungsganglinie deutlich unterscheiden. Der Lastfall BHW nach Newe (2013) liefert mit 21,3 bis 36,0 m dagegen etwa doppelt so große Rückgänge, was neben dem um den damaligen Klimazuschlag (heute: Vorsorgemaß, vgl. RKMV 2022a) erhöhten Wasserstand auch der langen 45-Stunden-Bemessungsganglinie und der wasserstandsgekoppelten Seegangsüberschätzung zuzuschreiben ist.

Der hier verfolgte, deterministische Bemessungsansatz auf Grundlage des RHW steht komplementär neben probabilistischen Bemessungskonzepten: Gruhn, Salecker und Fröhle (2017) entwickeln ein Versagenswahrscheinlichkeits-Framework für Hochwasserschutzdünen, und für die niederländische Küste operationalisiert Arcadis & Deltares (2023) ein semi-probabilistisches XBeach-Bemessungsverfahren im Rahmen des Programms *BOI Sandy Flood Defences* – eine methodische Weiterentwicklung, die auch für die hier entwickelten Klimaanpassungsszenarien perspektivisch relevant sein könnte (vgl. Unterabschnitt 9.2).

Ein nicht voll ausgebildetes Gleichgewichtsprofil hätte aufgrund der aktuellen Aufspülungsmethode (hauptsächlich auf Strand und Düne) ein Volumendefizit im Unterwasserbereich. Da während laufender Aufspülungen häufig keine aktuellen Bathymetriedaten vorliegen, kann der untergetauchte Profilteil erheblich von der idealisierten Form abweichen; das ideale Standardprofil bewegt sich dabei zwischen einem Optimum der Wellenenergiedissipation und einem Minimum des Erosionsvolumens.

8.4. Dünenerosionsvolumen

Das Dünenerosionsvolumen ist keine einheitlich definierte Größe, da unterschiedliche Ermittlungsmethoden existieren; ausschlaggebend ist vor allem die Wahl eines einheitlichen Grundniveaus (hier: MHW-Referenzlinie von 1,19 m NHN, Stand 2025, vgl. Unterabschnitt 4.1). In den Klimaszenarien wandert dieses Bezugsniveau mit dem Meeresspiegel mit (MHW + ΔMSL, konsistent ab Serie V12, vgl. Abschnitt 6). Auch der Zeitpunkt der Aufnahme des Post-Sturm-Profils spielt eine Rolle: Je größer die zeitliche Differenz zum Ereignis, desto stärker flacht die Abbruchkante durch nachfolgende Umlagerung ab oder wird aus Sicherheitsgründen für die touristische Nutzung künstlich abgeflacht.

Der Winkel `dryslp` ist als XB-Eingangsparameter bedeutend für den Erosionsprozess des Avalanching. Sein standardmäßig definierbarer Maximalwert von $dryslp = 2$ ist flacher als die nach dem Sturmhochwasser im Oktober 2023 beobachteten Dünenkliffs mit mittleren Abbruchwinkeln von 67,3° (vgl. Tabelle 7). Die temporäre Stabilität der Dünen, die einen vergleichsweise hohen temporären Reibungswinkel besitzen, wirkt sich unmittelbar auf das Erosionsvolumen aus. Im Gegensatz zur klassischen Böschungsbemessung der Geotechnik ist im Fall von Sturmhochwasser daher der temporäre, oft höhere Reibungswinkel zur Ermittlung der Böschungsneigung zu berücksichtigen; die bodenmechanischen Eigenschaften des Dünenkörpers (Lagerungsdichte, Durchlässigkeit) beeinflussen den Erosionswiderstand zusätzlich (Elsayed, Oumeraci und Goseberg 2024).

8.5. Meeresspiegelanstieg

Der Meeresspiegelanstieg geht ebenfalls mit der Veränderung des Wellenangriffswinkels θ einher. In Nuyts u. a. (2026) wurde festgestellt, dass dies erhebliche Auswirkungen auf die Stranderosion haben kann.
Die zugrundeliegende Profilierungsmethodik für mit dem Meeresspiegel wachsende Küstenprofile hat einen signifikanten Einfluss. Es gibt bereits für einen Standort theoretisch nahezu unendlich viele geometrische Varianten und es wird komplexer, je mehr Dünenparameter oder hydraulische Randbedingungen hinzukommen. Die gewählten Methoden verdeutlichen das.

Der SHG bildet ein angegebenes Klimavorsorgemaß (bzw. ΔMSL) als klimawandelbedingte Translation der Sturmhochwasserganglinie um den MSLR ab – die Ganglinienform bleibt dabei unverändert; die Seegangsstatistik entstammt dem statistisch konsistenten Grundszenario und bleibt davon konzeptgemäß unberührt.[1] Für die hier entwickelten Klimaszenarien gilt damit die Annahme, dass ein höherer Wasserstand im Tiefenwasser des Ausgabepunktes keinen Einfluss auf die Wellenrandbedingung hat. Die tiefenabhängigen Wellenprozesse der Reflektion und Refraktion treten jedoch gerade bei Oststürmen vor Ahrenshoop auf, wie die Dokumentation des Sturmhochwassers 10/2023 ergeben hat: Hierbei werden beispielsweise die einlaufenden Wellen durch die Flachwasserzone nordwestlich vom Darß beeinflusst. Eine klimasensitive Erweiterung der Seegangsstatistik wäre daher ein folgerichtiger nächster Entwicklungsschritt der gemeinsamen Modellkette (vgl. Unterabschnitt 9.2).

[1] Anhand der Szenarien-Exporte und der Datenbasis des SHG belegt: In den fünf SSP-Szenarien-Exporten (Klimavorsorgemaß 0,41 bis 0,80 m) sind die Wellenparameter (H_{m0}, T_p, Anlaufrichtung, Richtungsstreuung) je Randpunkt identisch, während die Wasserstandsganglinie an jedem Zeitschritt exakt um die Differenz der Vorsorgemaße verschoben ist; die statistische Datenbasis enthält ausschließlich punktweise Verteilungs- und Copula-Fits ohne Klimadimension. Das Vorsorgemaß wirkt somit als reine vertikale Translation der Wasserstandsganglinie, ohne Rückkopplung in die Seegangsstatistik – die Kopplung zwischen Seegang und Wasserstand wird ausschließlich beim statistischen Sampling des Grundszenarios wirksam.

Die für die Nordsee nachgewiesene Verstärkung von Seegang und Wellenauflauf mit steigendem Meeresspiegel (Arns u. a. 2017) war eine wesentliche Motivation des Vorhabens (vgl. Abbildung 11). Für die nahezu tidefreie Ostsee liefert ResCAD B hierzu die regionale Entsprechung: Simulationen mit flächig um 1 m erhöhtem mittleren Meeresspiegel zeigen räumlich stark differenzierte Reaktionen der Sturmhochwasser; die signifikanten Wellenhöhen ($H_{sig,200}$) steigen an der Außenküste um bis zu 0,45 m – am stärksten vor der Darß-Zingster Boddenkette und damit unmittelbar vor dem hier betrachteten Küstenabschnitt. Als Mechanismus wird der spätere Grundkontakt benannt: Energiedissipierende Flachwassereffekte setzen später ein, vorgelagerte Sandbänke und Flachwasserzonen verlieren an Schutzwirkung. Die oben getroffene Annahme unveränderter Wellenrandbedingungen ist damit als pragmatische Vereinfachung einzuordnen, die die Wellenbelastung für hohe ΔMSL am Standort eher unterschätzt – zumal die Ausgabepunkte bei sturmtypischen Wellenlängen formal keine Tiefwasserbedingungen erfüllen. Bei der Quantifizierung ist die Modellgrundlage zu beachten (phasengemitteltes spektrales Wellenmodell; Bathymetrie-Basis nach Seifert, Tauber und Kayser (2001) mit 1 bis 2 km Auflösung, in den deutschen Küstengewässern durch 50-m-Daten des BSH ergänzt); eine höher aufgelöste Nachrechnung des Transformationspfades über die Flachwasserzone nordwestlich des Darß wird zur Überprüfung empfohlen (vgl. Unterabschnitt 9.2).

Aus der Hindcast-Analyse lassen sich zudem Hypothesen für steigende Meeresspiegel ableiten: Bei begrenzten Aufspülmengen wird sich die Unterwasserböschung retardierender Sandküsten mit hoher Wahrscheinlichkeit versteilen. Damit verschieben sich Brechpunkt und DoC landwärts, die Energieumwandlungszone wird komprimiert, und mit steigendem mittleren Böschungswinkel nimmt der Anteil reflektierter Wellenenergie zu. Wird weniger Energie im Vorstrand dissipiert, können die Strömungsgeschwindigkeiten und damit der Sedimenttransport lokal sogar abnehmen – ein Befund, der der pauschalen Annahme widerspricht, dass Meeresspiegelanstieg stets mit verstärkter Erosion einhergeht. Der Übergang vom dissipativen zum reflektiven Brechverhalten lässt sich über die Brecherkennzahl (Iribarren-Zahl) ξ charakterisieren; ab $\xi > 3{,}3$ ist mit reflektivem Wellenauflauf zu rechnen. Diese Charakterisierung gilt streng genommen für idealisierte, feste Querschnitte; die sandige Küste ist dagegen ein räumlich-zeitliches Mosaik in ständiger Veränderung, sodass sich ein solches Brechverhalten im Naturraum lediglich eingeschränkt und lokal einstellen dürfte. Eine reflexionsbasierte Anpassungsstrategie mit gezielt steileren, ggf. stabilisierten Profilen könnte insgesamt Material einsparen, sofern steilere Böschungen – begrenzt durch Verflüssigungsneigung und den Reibungswinkel des Sediments unter Auftrieb – akzeptiert werden. Das vorgestellte 2DH-Modell bietet das Werkzeug, solche Strategien quantitativ zu prüfen.

8.6. Metamodell zur Analyse und Klimaanpassung von Küstenschutzdünen

Aus den Ergebnissen der Hindcast-Modellierung der historischen Sturmhochwasser von 1941 bis 2023 konnte über eine multivariate, lineare Regressionsanalyse ein MDE mit der *stepwise regression*-Methode ermittelt werden. Es ist nicht mit dem statistischen Dünenerosionsmodell zu verwechseln, dessen Entwicklung dem Teilprojekt ResCAD B obliegt, sondern verfolgt als datenbasiertes Ersatzmodell des prozessbasierten XB-Modells einen ergänzenden Ansatz für den wissenschaftlichen Transfer in die Praxis, u. a. der Klimaanpassung von Küstenschutzdünen. Hierbei konnten zufriedenstellende Gütekriterien im Vergleich zur XB-Modellierung erreicht werden.

Methodisch ist das MDE dem überwachten maschinellen Lernen zuzuordnen: Die Simulationsensembles bilden die Trainingsdaten, aus denen die Modellstruktur über die schrittweise Variablenselektion der *MATLAB Statistics and Machine Learning Toolbox* datengetrieben identifiziert wird

(The MathWorks, Inc. 2024). Gegenüber komplexeren Verfahren wie neuronalen Netzen wurde dabei bewusst eine einfache, physikalisch interpretierbare Modellklasse gewählt: Die resultierenden Näherungsformeln bleiben nachvollziehbar, ihre Koeffizienten lassen sich fachlich plausibilisieren, und das Risiko einer Überanpassung an die begrenzten Stichprobenumfänge bleibt kontrollierbar – im Sinne erklärbarer KI-Verfahren (engl. *explainable AI*) ein wesentlicher Vorteil für die Akzeptanz in der Bemessungspraxis. Zugleich reduziert das Metamodell die Antwortzeit von mehreren Stunden XB-Rechenzeit je Szenario auf Sekundenbruchteile und eröffnet damit Anwendungen, die mit dem numerischen Modell allein nicht praktikabel wären, etwa flächenhafte Voruntersuchungen, Unsicherheitsanalysen oder operationelle Prognosen.

Mit dem dritten Modul auf Grundlage des geometrisch-klimatischen Ensembles V12_01 (vgl. Unterabschnitt 6.6) wurde der statistische Ansatz von hydraulischen auf geometrische und klimatische Prädiktoren erweitert. Die dort erreichte, deutlich höhere Modellgüte (R^2_{adj} bis 0,997) ist methodisch bedingt: Das vollständige Faktorial tastet eine glatte, deterministische Antwortfläche ab, während die hydraulisch getriebenen Module 1 und 2 die natürliche Variabilität realer bzw. synthetischer Ereignisse abbilden – die Gütemaße der Module sind daher nicht unmittelbar vergleichbar. Inhaltlich bestätigt Modul 3 den zentralen Befund der Szenarienanalysen: Bei mitwachsenden Bruun-Profilen wird die Dünenbelastung dominant durch die Geometrie (insbesondere die Kronenhöhe) und lediglich untergeordnet durch den Meeresspiegelanstieg gesteuert. Zu beachten bleiben drei Einschränkungen: Erstens ist die Bermenhöhe konstruktionsbedingt vollständig mit ΔMSL kollinear und daher nicht als eigenständiger Einflussfaktor identifizierbar. Zweitens gilt das Modul ausschließlich für das RHW-Bemessungsereignis; eine Übertragung auf andere Eintrittswahrscheinlichkeiten erfordert die Kopplung mit den hydraulisch getriebenen Modulen oder eine Erweiterung des Ensembles. Drittens begrenzt die Gitterquantisierung des Kronenrückgangs (0,5 m) die erreichbare Genauigkeit der Rückgangsprognose. Die gegenläufige Abhängigkeit beider Zielgrößen von der Kronenhöhe unterstreicht zugleich den praktischen Nutzen der invertierbaren Kopplung über die effektive Erosionshöhe: Je nachdem, ob das vorzuhaltende Dünenvolumen oder der tolerierbare Kronenrückgang maßgebend ist, lassen sich konsistente Pessimalprofile ableiten.

Der Ansatz reiht sich in aktuelle Entwicklungen datengetriebener Ersatzmodelle der Dünenerosion ein: Athanasiou u. a. (2022) trainierten ein neuronales Metamodell auf XBeach-Ensembles repräsentativer Küstenprofile der Niederlande, Plant und Stockdon (2012) prognostizierten die Sturmreaktion von Barriere-Inseln probabilistisch mit Bayes-Netzen und Garzon, O. Ferreira u. a. (2024) entwickelten daraus ein Frühwarnsystem für sturminduzierte Küstenerosion. Perspektivisch ließe sich das hier entwickelte Regressionsmodell durch solche Verfahren erweitern (vgl. Unterabschnitt 9.2).

Begleitend zum Projektabschluss wird an der TU Dresden derzeit eine strukturierte Wissens- und Simulationsdatenbank für den Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommerns aufgebaut, die über einen lokal eingesetzten, LLM-basierten Coding-Assistenten gesteuert wird und wissenschaftliche Dokumentation, Datenstrukturierung, Modellierung und Auswertung in einer durchgängigen, skriptbasierten Arbeitsumgebung verbindet. Methodisch erweist sich dieser Ansatz bereits jetzt als wirksames Instrument der Qualitätssicherung: Im Zuge des Datenbankaufbaus wurden sämtliche Module des MDE unabhängig in quelloffener Software (Python) reproduziert, die zugrundeliegenden Bathymetrien und Randbedingungen systematisch überprüft und dabei aufgedeckte Inkonsistenzen früherer Simulationsstände dokumentiert und korrigiert. Die Kombination aus versionierter Datenhaltung, automatisierten Validierungsnachweisen und natürlichsprachlicher Steuerung senkt die Einstiegshürde für die Nachnutzung der Projektergebnisse erheblich.

9. Schlussbetrachtung

Die Schlussbetrachtung fasst die zentralen Ergebnisse und Kernaussagen des Vorhabens zusammen (Unterabschnitt 9.1) und leitet daraus Handlungsfelder und Perspektiven für die weiterführende Forschung und Anwendung ab (Unterabschnitt 9.2).

9.1. Fazit

Das Verbundvorhaben ResCAD hat die im Antrag formulierten Ziele erreicht: Mit der Kombination aus statistischem Sturmhochwassergenerator (ResCAD B) und prozessbasierter hydro- morphodynamischer Modellierung (ResCAD A) steht erstmals eine durchgängige, statistisch konsistente Modellkette für die Bemessung und das Erhaltungsmanagement von Küstenschutzdünen an der deutschen Ostseeküste zur Verfügung. Das am Sturmhochwasser vom Oktober 2023 kalibrierte 2DH-XBeach-Modell erreicht Gütewerte bis BSS = 0,92 bei einer Abweichung des Erosionsvolumens unter 2 % und wurde an einem unabhängigen Ereignis (Januar 2019) validiert. Der automatisierte Workflow vom Szenario-Ensemble bis zur statistischen Auswertung ermöglichte die Hindcast-Modellierung von 83 historischen Sturmhochwassern (1941–2023) sowie umfangreiche geometrische und klimatische Szenarienanalysen, aus denen mit Regressionsverfahren des maschinellen Lernens ein MDE in drei Modulen abgeleitet wurde: auf Basis historischer Ereignisse, synthetischer SHG-Szenarien sowie geometrisch-klimatischer Profilvariation. Letzteres liefert erstmals geschlossene, invertierbar gekoppelte Bemessungsformeln für Dünenerosionsvolumen und Kronenrückgang in Abhängigkeit von Dünengeometrie und Meeresspiegelanstieg. Alle drei Module liegen als dokumentierte Näherungsformeln mit definierten Gültigkeitsbereichen vor; ihre Bündelung in einem anwenderfreundlichen Prognosewerkzeug wurde zum Projektabschluss prototypisch vorbereitet (vgl. Unterabschnitt 9.2).

Die zentrale quantitative Aussage der Szenarienanalyse lässt sich wie folgt zusammenfassen: Werden bei einem Meeresspiegelanstieg von +0,80 m bis 2100 (SSP585) zusätzlich rund 100 m^3 Sediment je laufenden Meter auf die Küstenquerprofile aufgebracht, behalten die Küstenschutzdünen nahezu ihre heutige Widerstandsfähigkeit. Hochgerechnet auf ca. 100 km Dünenküste entspricht dies im Mittel etwa 135.000 m^3 zusätzlichem Aufspülvolumen pro Jahr über 74 Jahre – zeitlich voraussichtlich nicht linear, sondern mit dem beschleunigten Meeresspiegelanstieg exponentiell zunehmend verteilt. Das jährliche Aufspülbudget müsste damit um etwa ein Drittel aufgestockt werden, während die Bemessungspraxis selbst lediglich geringfügig zu modifizieren wäre. In der Erhaltungspraxis erfolgen Wiederholungsaufspülungen standortabhängig etwa alle 5 bis 15 Jahre, wobei der erforderliche Querschnitt sukzessive angepasst wird – für einen dynamischen Standort wie Ahrenshoop ergeben sich über den betrachteten Zeitraum von 74 Jahren ca. 15 Aufspülungen, für ruhigere Abschnitte wie Boltenhagen dagegen lediglich etwa 3 (StALU MM). Steht abschnittsweise landwärts kein Raum für das erforderliche Zurückweichen der Dünenoberkante zur Verfügung, steigen die benötigten Ausgleichsmengen dagegen um ein Vielfaches (vgl. Tabelle 3).

Bei einer Anhebung des Grundniveaus nach der Bruun-Regel – bei der Vorstrand, Dünenhöhe und Dünenfußpunkt an den steigenden Meeresspiegel angepasst werden („mitwachsen“) – lassen sich hingegen keine Auswirkungen des MSLR auf die Dünenbelastung feststellen. Die Widerstandsfähigkeit der Dünen ist damit weniger eine Frage der hydraulischen Belastung als der langfristigen Sicherung ausreichender Sedimentressourcen und des landwärtigen Anpassungsraums. Mit den Bemessungsformeln des dritten MDE-Moduls (vgl. Unterabschnitt 6.6) steht dieser Befund quantifiziert für die Praxis zur Verfügung: Je nach maßgebendem Kriterium – vorzuhaltendes Dünenvolumen

oder tolerierbarer Kronenrückgang – lassen sich daraus Sollprofile für vorgegebene Klimaszenarien ableiten (methodisch als Pessimalprofile, d. h. gerade noch zulässige Geometrien, hergeleitet).

Die Größenordnung dieses Anpassungseffektes lässt sich anhand prozessbasierter Studien aus der Literatur einordnen. Für die holländische Nordseeküste ermittelten de Winter und Ruessink (2017) mit XBeach für das *heutige, nicht angepasste* Dünenprofil einen linearen Anstieg des Erosionsvolumens von 52 bis 80 m^3/m je Meter Meeresspiegelanstieg; maßgebender Prozess ist dabei der höhere Wasserstand an der Düne, nicht eine Veränderung des küstennahen Seegangs. Werden die Szenarienergebnisse des V12-Ensembles entsprechend ausgewertet, verbleibt bei den *mitwachsenden* Bemessungsprofilen (je ΔMSL neu konstruiertes Basis-Gleichgewichtsprofil mit Dünenbasisprofil, vgl. Unterunterabschnitt 5.1.4) im Mittel lediglich eine Reststeigung von rund 2 bis 4 m^3/m je Meter ΔMSL (Median +2,3; Referenzdüne $D_{Cz} = 5{,}0$ m: +2,7). Die Gegenüberstellung quantifiziert den Befund um mehr als eine Größenordnung: Ein mit dem Meeresspiegel mitgeführtes Bemessungsprofil neutralisiert die klimabedingte Zusatzerosion nahezu vollständig, während ein statisch belassenes Profil den vollen Belastungszuwachs erfährt. Ergänzend weisen de Winter und Ruessink (2017) darauf hin, dass eine sturmzugbahnbedingte Drehung der Wellenanlaufrichtung um etwa 30° das Erosionsvolumen in ähnlicher Größenordnung beeinflussen kann wie 0,4 m Meeresspiegelanstieg – ein Aspekt, der bei künftigen Szenarienrechnungen mit veränderlicher Seegangsrichtung Berücksichtigung finden sollte.

Für die Klimaszenarien gilt dabei die in Unterabschnitt 8.5 diskutierte Annahme, dass der Einfluss des MSLR auf die lokalen Wellenrandbedingungen unberücksichtigt bleibt. Wie stark dies das Ergebnis in Form von Dünenerosion tatsächlich beeinflusst, ist bisher nicht untersucht; lokal sinnvolle Annahmen sind anspruchsvoll, da an den flachen Außenküsten häufig keine Tiefwasserbedingungen und damit kein ungestörter Seegang vorliegen. Ebenso bleibt die Extrapolation vom moderaten Kalibrierereignis (ca. 1,5 m NHN) auf das Bemessungsereignis (RHW = 2,30 m NHN) mit Unsicherheiten behaftet, solange keine Naturdaten vergleichbarer Größenordnung vorliegen (vgl. Unterabschnitt 9.2).

Die in Unterabschnitt 6.4 beschriebene Nachrechnung der Reihe V10_08 mit den Wellenrandbedingungen der übrigen Klimaszenarien (*V10_08c*) betrifft ausschließlich die in ResCAD A bearbeiteten Geometrie- und Klimaszenarien dieses Berichts. Die Datengrundlage des statistischen Dünenerosionsmodells *SanDrA* („Sandy Dune Erosion Assessment“, Liefergegenstand ResCAD B; vgl. den Projektvortrag zum 29. KFKI-Seminar 2025) bilden die 215 SHG-getriebenen Simulationen der Hindcast-Schnittstelle; sie ist von der Korrektur nicht berührt. Die gemäß AP 3.4 ergänzend übergebenen geometrischen Szenarien-Ensembles konnten innerhalb der Projektlaufzeit nicht mehr in das statistische Modell einbezogen werden; ihre Einbindung – in der korrigierten Fassung *V10_08c* bzw. über die gemeinsame Wissens- und Simulationsdatenbank – wird als naheliegender Weiterentwicklungsschritt empfohlen (vgl. Unterabschnitt 9.2).

Über die fachlichen Einzelergebnisse hinaus ist mit der im Aufbau befindlichen, per LLM-Coding-Assistent steuerbaren Wissens- und Simulationsdatenbank der TU Dresden eine bleibende Infrastruktur entstanden, die die vollständigen Daten-, Skript- und Simulationsbestände des Vorhabens strukturiert, qualitätsgeprüft und reproduzierbar verfügbar hält. Damit bleiben die Projektergebnisse nicht nur dokumentiert, sondern unmittelbar weiterverwendbar – von der erneuten Ausführung einzelner Auswertungen bis zur Erweiterung der Modellketten auf neue Standorte und Fragestellungen.

9.2. Ausblick und weiterführende Forschung

Datenlage und Monitoring. Grundlage jeder Modellverbesserung bleibt die Datenlage. Die satellitengestützte Bathymetrievermessung unmittelbar vor und nach Extremereignissen bietet – kombiniert mit LiDAR-Scans der Geländeoberfläche – die beste Voraussetzung für die Kalibrierung jeglicher Erosionsmodelle und sollte als Standardauswertung etabliert werden. Eine wesentliche Verbesserung verspricht zudem die lokale Messung der Wellenrandbedingungen: Am Standort Ahrenshoop existieren bislang keine Aufzeichnungen zu küstennahen Wellen und Strömungen, sodass das hydraulische Modell ausschließlich indirekt über die Morphologie kalibriert werden konnte (vgl. Abschnitt 8.2). Empfohlen wird eine Messkampagne zur ufernahen Wellentransformation bei bekannter Bathymetrie, etwa durch eine Wellenboje oder photogrammetrische Verfahren an geeigneten Standorten wie Seebrücken, ergänzt um Messungen der küstenparallelen, wellenin-duzierten Strömungen bei Extremereignissen zur Klärung des Einflusses des Wellenangriffswinkels. Von zentraler Bedeutung sind ferner Naturdaten zu Ereignissen in der Größenordnung des Bemessungsereignisses: Hierfür sollte ein detailliertes, langfristig vorgehaltenes Messkonzept für den Eintrittsfall existieren – präzise Vorhersagen mit 2–3 Tagen Vorlauf würden die Aufnahme der Strand- und Dünenprofile unmittelbar *vor* dem Sturmhochwasser sowie die schnelle Installation sturmresistenter, terrestrischer Laserscanner mit hoher zeitlicher Auflösung ermöglichen (vgl. Abschnitt 3.3).

Prozessverständnis und Modellentwicklung. Einen Ausblick auf aktuelle Forschungsfragen gibt Wilmink u. a. (2023): XBeach berechnet für schräg einfallende Wellen größere Erosionsvolumina als für küstenorthogonalen Wellenangriff – im Gegensatz zu den meisten konzeptionellen Dünenerosionsmodellen; Aufschluss soll ein großangelegter Wellenbecken-Versuch geben, der Küstenlängsströmungen zulässt. Im Projekt RealDune wurden anhand zweier Versuchsdünen an der niederländischen Küste Geschwindigkeiten, Drücke und Sedimentkonzentrationen in der Brandungszone gemessen; die Ergebnisse belegen die dominante Wirkung der durch Schwallbrecher (engl. *bore*) induzierten Turbulenz, deren korrekte numerische Implementierung in Erosionsmodellen wie XBeach noch aussteht (van Wiechen, VRIES und RENIERS 2024). Hierzu passt die dokumentierte küstenparallele Variabilität (Abbildung 61) der simulierten Dünenerosion, deren küstenparallele Struktur dominant mit der Wasserspiegel-Varianz am Strand korreliert – ein Ansatzpunkt, die infragravitative Prägung des Wellenauflaufs unter schrägem Wellenangriff gezielt zu untersuchen und profilbezogene Auswertungen künftig um gleitende Mediane über etwa 200 m zu ergänzen. Als Versuchsanordnung bieten sich Kontrollläufe mit küstennormalem Antrieb sowie längsuniformen Standardprofilen unter zyklischen (periodischen) lateralen Randbedingungen an: Diese trennen selbstorganisierte hydrodynamische Muster in Küstenlängsrichtung von bathymetrisch erzwungenen Strukturen, vermeiden den hier notwendigen Ausschluss der lateralen Randzonen von der Auswertung (rund 10 % der Modelllänge) und erlauben – bei Domänenlängen von einem Mehrfachen der beobachteten Autokorrelationslänge (20 bis 70 m) – deutlich kürzere und damit kostengünstigere 2DH-Domänen; zu beachten bleibt, dass die Periodenlänge die natürliche Längenskala der Muster nicht künstlich beschneiden darf. Grundlegend bleibt hierfür das Prozessverständnis der Dünenerosion nach Thiel de Vries (2009). Über das in ResCAD betrachtete Kollisionsregime hinaus dokumentieren Winters, Jr. und Gallien (2023) Beobachtung und numerische Modellierung eines Overwash- und Durchbruchereignisses – ein Extremregime, das für die hier untersuchten, ausreichend hohen Küstenschutzdünen zwar planmäßig nicht auftreten soll, dessen Modellierung jedoch für die Bewertung von Systemversagen (etwa an Schwachstellen wie Strandzugängen, vgl. Unterabschnitt 3.4) relevant werden könnte. Methodisch erscheint die Kombination numerischer und statistischer Modelle zu einem probabilistischen Prognosekorridor der Dünenerosion vielversprechend, der auch Längsströmungen, Dünenwachstum durch Overwash und Wind sowie

das unregelmäßige Auftreten von Sturmhochwassern berücksichtigt (Santos u. a. 2019; Plant und Stockdon 2012). Ergänzend sollte das Szenario einer großflächigen winterlichen Vereisung untersucht werden, wie sie bei einer Abschwächung der atlantischen Umwälzzirkulation denkbar wäre: Insbesondere größere Eisbewegungen würden an sandigen Dünen und Deichen erhebliche Sedimentabträge verursachen.

Wissens- und Simulationsdatenbank. Die im Aufbau befindliche, über einen lokalen LLM-Coding-Assistenten steuerbare Wissens- und Simulationsdatenbank der TU Dresden bündelt Dokumentation, Datenstrukturierung, Modellierung und Analyse für den Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommerns in einer reproduzierbaren Arbeitsumgebung. Das damit freigesetzte Potential reicht von der drastisch beschleunigten Beantwortung planerischer Fragestellungen (Auswertungen, Szenarienrechnungen und Kartenprodukte auf Zuruf) über die automatisierte Qualitätssicherung von Datengrundlagen bis zur niederschwelligen Nachnutzung der ResCAD-Modellketten durch Behörden und Forschungspartner. Perspektivisch kann diese Infrastruktur als Referenzarchitektur für eine landesweite, evidenzbasierte Küstenschutzplanung dienen.

Offene Modellkette und Datenzusammenführung. Eine Zusammenführung der Datengrundlage des SHG (einschließlich des MATLAB-Hauptskripts), der Datengrundlage sowie der Kalibrierungs- und Validierungsparameter des MIKE21-Modells aus ResCAD B mit der Wissensdatenbank der TU Dresden würde eine umfassende Überprüfung und Validierung der gesamten Modellkette wesentlich erleichtern. Zugleich bildete sie die Voraussetzung für die Umstellung auf ein quelloffenes Ostseemodell: Als Grundlage bieten sich Delft3D FM für die Hydrodynamik sowie WAM Cycle 7 für den Seegang an (Ricker, Marcel and Hartmann, Robert 2025) – beide Open Source, für großskalige Simulationen geeignet und über standardisierte Kopplungssysteme (OASIS3-MCT) verknüpfbar. Damit ließen sich Sturmhochwasser der Ostsee vollständig in einer offenen, reproduzierbaren Kette nachsimulieren.

GPU-beschleunigte Simulation. Die TU Dresden entwickelt darüber hinaus optimierte Simulationsläufe für Wellenmodelle, die die Rechenkapazität moderner Grafikprozessoren nutzen: Für den Original-XBeach-Code wurde per OpenACC-Offload des Wellenmoduls in eigenen Voruntersuchungen bereits eine 1,7-fache Gesamtbeschleunigung eines 2DH-Referenzfalls erreicht und validiert; parallel wird das GPU-native Flachwassermodell BG-Flood (Bosserelle, Lane und Harang 2021) als Baustein einer schnellen Simulationskette aufgebaut. Derart beschleunigte, hochauflösende hydrodynamische Simulationen eignen sich – insbesondere in Kombination mit kurvilinearen, randangepassten Rechengittern (vgl. Unterabschnitt 8.1) – hervorragend für Fragestellungen, die bislang an der Rechenzeit scheiterten: etwa die detaillierte Analyse von Strömung und Sedimenttransport in Buhnenfeldern oder ensemblebasierte Unsicherheitsabschätzungen.

Hochleistungsrechnen an der TU Dresden. Einen erheblichen Standortvorteil für die Fortführung der Arbeiten bietet die Hochleistungsrechen-Infrastruktur der TU Dresden: Über das Zentrum für Informationsdienste und Hochleistungsrechnen (ZIH, heute Teil des CIDS) im Lehmann-Zentrum steht mit dem Nationalen Hochleistungsrechnen-Zentrum NHR@TUD eines der großen deutschen Universitäts-HPC-Zentren zur Verfügung, an dem Rechenzeit für Wissenschaftlerinnen

und Wissenschaftler vergleichsweise niederschwellig beantragt werden kann[2]. Die verfügbaren CPU-Cluster (u. a. *Barnard*, *Romeo*) erlauben es, Simulationsensembles wie die hier gerechneten geometrisch-klimatischen Faktoriale oder den 83-Ereignis-Hindcast als parallele Job-Arrays mit realen Laufzeiten von Minuten statt Stunden auszuführen – die parallele Ausführung unabhängiger Ensemble-Läufe umgeht dabei die zuvor diskutierte begrenzte MPI-Skalierung einzelner Läufe; die GPU-Cluster (*Alpha Centauri* mit NVIDIA A100, *Capella* mit H100) bieten der GPU-Entwicklungslinie (OpenACC-XBeach, BG-Flood) sowie dem Training neuronaler Metamodelle deutlich größere Reserven als die bisher genutzte Workstation-Hardware, und für das angestrebte quelloffene Ostseemodell ist eine erneute Hindcast-Modellierung über mehrere Jahrzehnte überhaupt erst auf einem CPU-Cluster praktikabel. Die Wissens- und Simulationsdatenbank bliebe in diesem Konzept die lokale Steuer- und Auswertungsebene, während rechenintensive Ensembles ausgelagert und die Ergebnisse automatisiert zurückgeführt werden – eine Konstellation, die die TU Dresden für entsprechende Folgeprojekte in eine ausgezeichnete Ausgangsposition bringt.

Skalierung und Frühwarnung. Die in Abschnitt 7.1 entwickelte automatisierte 1D-Kalibrierungsroutine bildet die Grundlage, um die ResCAD-Modellergebnisse vom Untersuchungsgebiet auf die gesamte Außenküste Mecklenburg-Vorpommerns zu skalieren: Mit den flächendeckend verfügbaren Randbedingungen des SHG (Raster 500–800 m) und den jährlichen ALS-Befliegungen lassen sich lokal nachkalibrierte 1D-Modelle für sämtliche dünengeschützten Abschnitte aufbauen. Für die regionale Skalierung bieten sich zudem neuronale Metamodelle an, die auf XBeach-Ensembles repräsentativer Küstenprofile trainiert werden (Athanasiou u. a. 2022). Darauf aufbauend erscheint ein automatisiertes Frühwarnsystem für die Dünenerosion realisierbar: Der SHG bzw. operationelle Wasserstands- und Seegangsvorhersagen liefern die Randbedingungen, eine vorbereitete lokale 1D-XBeach-Simulationsstruktur kann durch eingewiesenes Personal innerhalb weniger Stunden belastbare Prognosen des Dünenerosionsvolumens eines angekündigten Sturmereignisses erzeugen; alternativ lassen sich Bayes-Netz-basierte Frühwarnsysteme direkt auf den Szenarien-Ensembles trainieren (Garzon, O. Ferreira u. a. 2024).

Anwendungswerkzeug für das Metamodell zur Analyse und Klimaanpassung von Küstenschutzdünen. Die drei Module des MDE eignen sich unmittelbar für die Überführung in ein frei zugängliches Anwendungswerkzeug für Behörden und Planungsverantwortliche: Modul 1 prognostiziert das Dünenerosionsvolumen aus den hydraulischen Kennwerten synthetischer SHG-Szenarien, Modul 2 aus den Kennwerten historischer bzw. beobachteter Ereignisse, und Modul 3 liefert für das Bemessungsereignis RHW geschlossene, invertierbar gekoppelte Bemessungsformeln in Abhängigkeit von Dünengeometrie und Meeresspiegelanstieg – einschließlich der Ableitung von Pessimalprofilen. Nach Projektabschluss wurde diese Bündelung prototypisch auf Basis frei verfügbarer Software vorbereitet (die Benennung der Softwareanwendung bleibt einer späteren Abstimmung vorbehalten); die Entwicklung und Bereitstellung der eigentlichen Softwareanwendung mit grafischer Benutzeroberfläche ist nicht mehr Bestandteil des Projektes, die hier abgeleiteten Module können als methodische Grundlage und Ergänzung für den wissenschaftlichen Transfer dienen. Der naheliegende nächste Entwicklungsschritt ist die sukzessive Erweiterung der Koeffizientenbasis auf weitere Küstenabschnitte: Neue Standorte lassen sich nach lokaler Nachkalibrierung der XBeach-Modelle – weitgehend automatisiert über die entwickelte 1D-Kalibrierungsroutine – ohne strukturelle Anpassungen ergänzen. Belastbar kalibrierte Datengrundlagen liegen derzeit ausschließlich für die KKM F180.715 und F181.495 vor; Ursache ist die räumlich und zeitlich limitierte

[2] Dokumentation und Antragswege: `https://doc.zih.tu-dresden.de` (Stand Juli 2026; aktuelle Systeme und Konditionen sind bei Antragstellung zu prüfen).

topobathymetrische Datenlage (EOMAP/ALS). Die Voraussetzungen hierfür hat das StALU MM mit dem frühzeitigen Einstieg in die satellitengestützte Bathymetrievermessung und der Wahl eines Untersuchungsgebiets mit hoher Dynamik, zahlreichen Maßnahmen und dichter Vermessungshistorie geschaffen – auf dieser Grundlage steht nun ein fundiert kalibrierter Modellansatz für einen 750-m-Abschnitt zur Verfügung. Eine mit zusätzlichen Kosten verbundene Auswertung weiterer bereits vorhandener Satellitendaten konnte im Projektzeitraum nicht realisiert werden; nachvollziehbar musste seitens der Auftraggeber und verantwortlichen Behörden der finanzielle Aufwand für bis dato neue und damit risikobehaftete Bemessungsmethoden zunächst begrenzt werden. Perspektivisch ließe sich die topobathymetrische Datengrundlage durch eine quelloffene Auswertekette für satellitengestützte Bathymetrie ergänzen: Die den EOMAP-Produkten zugrunde liegenden Sentinel-2-Aufnahmen sind über das Copernicus-Programm frei verfügbar, und die publizierten Auswerteverfahren – physikalisch basierte Strahlungstransfer-Inversion bzw. empirische Bandverhältnis-Methoden (Lyzenga 1978; Stumpf, Holderied und Sinclair 2003) – lassen sich mit den im Vorhaben gewonnenen Kalibrier- und Validierungsdaten (GNS, ALS) betreiben; ergänzend liefern die frei zugänglichen Photonendaten der ICESat-2-Mission Bathymetrie-Transekte zur Kalibrierung (Parrish u. a. 2019). Da die optische Eindringtiefe in der gelbstoffreichen Ostsee begrenzt ist, kommt die wellenkinematische Tiefeninversion über die Dispersionsrelation als unabhängige zweite Methode in Betracht; die Stärke der kommerziellen Produkte – operationelle Prozessierung und Qualitätskontrolle – bleibt davon unberührt. Die gesellschaftliche Investition in eine saubere, ereignisbezogene Datengrundlage und die Skalierung der sich in ResCAD regional bewährten, leistungsstarken neuen Werkzeuge wird jedoch dringend empfohlen – insbesondere mit Blick auf die Relationen der zu erwartenden, sich mit dem beschleunigten Meeresspiegelanstieg exponentiell steigernden Kosten für den Küstenschutz in Mecklenburg-Vorpommern.

Klimaanpassungsstrategien, Anpassungspfade und Ressourcenplanung. Ein wesentliches Handlungsfeld ist die Entwicklung eines Ressourcenmanagementplans für die nachhaltige, langfristige Gewährleistung des Küstenschutzes über das Jahr 2100 hinaus. Höchste Priorität hat dabei die Abschätzung der überhaupt verfügbaren Sedimentressourcen, denn erst auf dieser Grundlage lassen sich realistische Anpassungsszenarien und Klimaanpassungspfade entwickeln, die wiederum die Voraussetzung für eine langfristige Regionalplanung und das sichere Leben in sturmhochwassergefährdeten Bereichen darstellen. Erst realistische, ressourcenbasierte Klimaanpassungsstrategien erlauben konkrete, operative Vorschläge für klimaresiliente Küstenschutzdünen: Die Simulationen dieses Vorhabens zeigen eine hohe Anpassungsfähigkeit der Dünensysteme, jedoch ausschließlich unter deutlich erhöhtem Ressourceneinsatz und dort, wo ein teilweises Zurückweichen der Dünenlinie überhaupt möglich ist (vgl. Abschnitt 9.1). Als Vorbild für die institutionelle Verankerung kann das niederländische Forschungsprogramm *Coastal Genesis 2* dienen, das Forschung und Küstenschutzpolitik in einem iterativen *Research-for-Policy*-Zyklus verbindet und daraus operative Entscheidungen zur Sedimentbewirtschaftung ableitet (Q. Lodder und Slinger 2022; Q. J. Lodder u. a. 2023). Für die systematische Bewertung von Aufspülungsdesigns bietet die Klassifikationsmethode nach Gijsman, Visscher und Schlurmann (2018) einen möglichen Ansatzpunkt; grundsätzlicher stellen Parkinson und Ogurcak (2020) jedoch die Frage, ob konventionelle Sandaufspülungen allein ausreichen werden, um mit einem sich beschleunigenden Meeresspiegelanstieg langfristig Schritt zu halten. Werkzeuge wie das *Coastal Recovery from Storms Tool* demonstrieren, wie sich Managementoptionen bewirtschafteter Dünenküsten szenarienbasiert vergleichen lassen (RUGGIERO u. a. 2019); für die deutsche Ostseeküste unterstreichen die Analysen von Kiesel, Lorenz u. a. (2023) und die Erfahrungen aus dem Sturmhochwasser Oktober 2023 (Kiesel, Wolff und Lorenz

2024) die Notwendigkeit, von festen Bemessungswerten zu einer adaptiven, evidenzbasierten Entscheidungsfindung überzugehen.

Naturbasierte Maßnahmen zur Stärkung der Widerstandsfähigkeit. Schließlich sollten die Dünenerosionsmodelle um vorhandene oder geplante Küstenschutzstrukturen erweitert werden, um naturbasierte und hybride Maßnahmen quantitativ bewerten zu können: Neben Buhnen und Vegetation (gemeint ist die dünenstabilisierende Bepflanzung, insbesondere mit Strandhafer zur Sedimentfixierung und Förderung des Dünenaufbaus) zählen dazu insbesondere die gezielte Anpassung der Unterwassergeometrie (z. B. optimierte, verkürzte und angehobene morphodynamisch aktive Zonen mit stabilisierten Bermen, vgl. Abschnitt 8.5) sowie abgesenkte, wellendämpfende Strukturen, die vorzugsweise ingenieurbiologisch ausgeführt und an den natürlichen Sedimenttransport angelehnt werden. Das Ziel ist, die vertraute Form, die natürliche Morphodynamik und den dissipativen Charakter von Strand und Düne zu erhalten – bei deutlich reduzierten Aufspülvolumina. Die Forschung zum äolischen Sedimenttransport zeigt das Potential natürlichen Dünenwachstums durch windinduzierten Sedimenteintrag aus dem Strand; die vorliegenden quantitativen Befunde beziehen sich allerdings überwiegend auf Nordseedünen mit anderem Küstencharakter (u. a. Tidenhub und Strandbreiten) und sind auf die Ostseeküste nicht unmittelbar übertragbar (Vries 2013; VRIES u. a. 2014; Vries u. a. 2017). Für die Ostseeküste wurde das Sturmflutschutz-Potential natürlichen Vordünenwachstums bislang lediglich beispielhaft quantifiziert (Mehrtens, Lojek u. a. 2023); ob und in welchem Umfang äolischer Wiederaufbau hier einen belastbaren Beitrag leisten kann, wäre vor einer Einbindung in Erhaltungskonzepte lokal zu belegen.

Literatur

(o. D.).

Abdelaal, S. und H. Oumeraci (2016). *Modelling Strategies with XBeach*. DOI: 10.13140/RG.2.1.4199.0644.

Andrews, D. G. und M. E. Mcintyre (1978). „An exact theory of nonlinear waves on a Lagrangian-mean flow“. In: *Journal of Fluid Mechanics* 89.4, S. 609–646. ISSN: 0022-1120. DOI: 10.1017/S0022112078002773.

Arcadis & Deltares (2022). *Validation of Dune Erosion Model XBeach: Development of 'BOI Sandy Coasts'*. Rijkswaterstaat.

– (2023). *Semi-Probabilistic Model for XBeach: Definition of a semi-probabilistic method for 'BOI Sandy Flood Defences'*. Rijkswaterstaat.

Arns, A. u. a. (2017). „Sea-level rise induced amplification of coastal protection design heights“. In: *Scientific Reports* 7, S. 40171. ISSN: 2045-2322. DOI: 10.1038/srep40171.

Athanasiou, P. u. a. (2022). „Estimating dune erosion at the regional scale using a meta-model based on neural networks“. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 22.12, S. 3897–3915. DOI: 10.5194/nhess-22-3897-2022.

Bae, H. u. a. (2022). „Proposal of Parameter Range that Offered Optimal Performance in the Coastal Morphodynamic Model (XBeach) Through GLUE“. In: *Journal of Ocean Engineering and Technology* 36.4, S. 251–269. ISSN: 1225-0767. DOI: 10.26748/KSOE.2022.013.

Barbero-García, I. u. a. (2023). „Automatic detection of bulldozer-induced changes on a sandy beach from video using YOLO algorithm“. In: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 117, S. 103185. ISSN: 15698432. DOI: 10.1016/j.jag.2023.103185.

Beckmann, S. u. a. (2025). „Hydrodynamische Rekonstruktion des Sturmhochwassers vom 20./21. Oktober 2023: 18 pages“. In: DOI: 10.18171/1.094112.

Bosserelle, C., E. M. Lane und A. Harang (2021). „BG-Flood: A GPU adaptive, open-source, general inundation hazard model“. In: *Proceedings of the Australasian Coasts & Ports 2021 Conference*. Quellcode: https://github.com/CyprienBosserelle/BG_Flood. Christchurch.

Bruun, P. (1954). „Coast erosion and the development of beach profiles: Beach erosion board technical memorandum“. In: *US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS*.

Bruun, P. (1962). „Sea-Level Rise as a Cause of Shore Erosion“. In: *Journal of the Waterways and Harbors Division* 88.1. Originalquelle der Bruun-Regel; ergänzt 22.07.2026 nach Zitatprüfung (1954 = Gleichgewichtsprofil, 1962 = Bruun-Regel, 1983 = Review), S. 117–130. DOI: 10.1061/JWHEAU.0000252.

– (1983). „Review of conditions for uses of the Bruun rule of erosion“. In: *Coastal Engineering* 7.1, S. 77–89. ISSN: 03783839. DOI: \url{10.1016/0378-3839(83)90028-5}.

Bugajny, N., K. Furmańczyk und J. Dudzińska-Nowak (2015). „Application of XBeach to model a storm response on a sandy spit at the southern Baltic“. In: *Oceanological and Hydrobiological Studies* 44.4, S. 1. ISSN: 1730-413X. DOI: 10.1515/ohs-2015-0052.

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) (2026). *Sturmflutberichte und Wasserstandsvorhersagen für die deutsche Ostseeküste*. https://www.bsh.de. U. a. Berichte zu den Ereignissen vom 04.01.2017 („Axel“) und 02.01.2019 („Zeetje“), Zugriff: 09.07.2026.

Dangendorf, S. (12. Mai 2017). „Meeresspiegeländerungen in der Ostsee: Erste Ergebnisse aus dem Projekt AMSeL-Ostsee“. Husum.

de Bakker, A., M. van der Lugt und L. de Vet (2021). *BOI: Scaling of Dimensional Parameters in XBeach*. 11205758-029-GEO-0002. Deltares.

de Winter, R. C. und B. G. Ruessink (2017). „Sensitivity analysis of climate change impacts on dune erosion: case study for the Dutch Holland coast“. In: *Climatic Change* 141, S. 685–701. DOI: 10.1007/s10584-017-1922-3.

Dean, R. G. (1977). „Equilibrium Beach Profiles: US, Atlantic and Gulf Coasts“. Report. Newark: University of Delaware.

Deltares, Hrsg. (2023). *XBeach User Manual: Release XBeach 1.24.6057 Halloween*. Delft.

Den Heijer, C. (2013). „The Role of Bathymetry, Wave Obliquity and Coastal Curvature in Dune Erosion Prediction“. Diss. Technische Universiteit Delft.

Dissanayake, P. und C. Winter (2020). „MODELLING THE EFFECT OF COASTLINE ORIENTATION ON STORM EROSION AT THE SYLT ISLAND, NORTH SEA“. In: *Coastal Engineering Proceedings* 36v, S. 50. ISSN: 0589-087X. DOI: 10.9753/icce.v36v.papers.50.

Draper, N. R. und H. Smith (1998). *Applied Regression Analysis*. 3. Aufl. New York: John Wiley & Sons. DOI: 10.1002/9781118625590.

Elsayed, S. M., H. Oumeraci und N. Goseberg (2024). „Effects of soil properties on erosion and breaching of natural coastal barriers under extreme storm surges“. In: *Shore & Beach*, S. 39–64. ISSN: 0037-4237. DOI: 10.34237/1009245.

EUROSION (2004). *A guide to coastal erosion management practices in Europe: lessons learned*. Hrsg. von Directorate General Environment - European Commission.

Fahrmeir, L. u. a. (2016). *Statistik: Der Weg zur Datenanalyse*. 8. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum. DOI: 10.1007/978-3-662-50372-0.

Galappatti, G. und C. B. Vreugdenhil (1985). „A depth-integrated model for suspended sediment transport“. In: *Journal of Hydraulic Research* 23.4, S. 359–377. ISSN: 0022-1686. DOI: 10.1080/00221688509499345.

Garzon, J. L., O. Ferreira u. a. (2024). „Development of a Bayesian network-based early warning system for storm-driven coastal erosion“. In: *Coastal Engineering* 189, S. 104460. ISSN: 03783839. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2024.104460.

Garzon, J. L., Ó. Ferreira und T. A. Plomaritis (2022). „Modeling of Coastal Erosion in Exposed and Groin-Protected Steep Beaches“. In: *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 148.6. ISSN: 0733-950X. DOI: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000719.

Gijsman, R., J. Visscher und T. Schlurmann (2018). „A Method to Systematically Classify Design Characteristics of Sand Nourishments“. In: *Proceedings NCK-Days 2018*.

Grenzdörffer, G. und M. Naumann (2016). „Investigations on the Possibilities of Monitoring Coastal Changes Including Shallow Under Water Areas with UAS Photo Bathymetry“. In: *ISPRS Archives*. Bd. XLI-B1, S. 843–850. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B1-843-2016.

Gruhn, A., D. Salecker und P. Fröhle (2017). „Versagensmechanismen und Versagenswahrscheinlichkeiten von Hochwasserschutzdünen“. In: *HoRisK*. Die Küste. Heide, Holstein, S. 117–141.

Gurwell, B. (2008). „Coastal Protection along the Baltic Sea Coast – Mecklenburg-Vorpommern“. In: *Die Küste* 74, S. 179–188. URL: https://hdl.handle.net/20.500.11970/101603.

Guthrie, W. F. (2020). *NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods (NIST Handbook 151)*. DOI: 10.18434/M32189.

Hallermeier, R. J. (1981). „A Profile Zonation for Seasonal Sand Beaches from Wave Climate“. In: *Coastal Engineering* 4, S. 253–277. ISSN: 03783839. URL: %5Curl%7Bhttps://cirp.usace.army.mil/products/files/doc/Hallermeier1981-ProfileZonation.pdf%7D.

Harff, J., K. Furmańczyk und H. von Storch (2017). *Coastline Changes of the Baltic Sea from South to East – Past and Future Projection*. Bd. 19. Coastal Research Library. Cham: Springer International Publishing. ISBN: 978-3-319-49892-8. DOI: 10.1007/978-3-319-49894-2.

Hofstede, J. und J. Aufderbeck (2024). „Die Ostseesturmflut im Oktober 2023: Schäden an Küstenschutzanlagen und Konsequenzen für den Küstenschutz in Schleswig-Holstein: 21 pages“. In: DOI: 10.18171/1.094102.

Holthuijsen, L. H., N. Booij und T. Herbers (1989). „A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents“. In: *Coastal Engineering* 13.1, S. 23–54. ISSN: 03783839. DOI: 10.1016/0378-3839(89)90031-8.

Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN: 9780521860284. DOI: 10.1017/CBO9780511618536.

IPCC (2023). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Sixth Assessment Report (AR6)*. Cambridge University Press. ISBN: 9781009157896. DOI: \url{10.1017/9781009157896}.

Kaehler, C. u. a. (2022). „Dune Erosion at the German Baltic Coast—Investigation and Analysis of a Large-Scale Field Experiment Compared to Life Dunes“. In: *Journal of Marine Science and Engineering* 10.11, S. 1605. DOI: 10.3390/jmse10111605.

KFKI (2022). *Die Küste, 92 - 1872 - An exceptional storm surge in the Baltic*. Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hrsg.), via Bundesanstalt für Wasserbau. DOI: 10.18171/1.092100.

Kiesel, J., M. Lorenz u. a. (2023). „Regional assessment of extreme sea levels and associated coastal flooding along the German Baltic Sea coast“. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 23.9, S. 2961–2985. DOI: 10.5194/nhess-23-2961-2023.

Kiesel, J., C. Wolff und M. Lorenz (2024). „Brief communication: From modelling to reality – flood modelling gaps highlighted by a recent severe storm surge event along the German Baltic Sea coast“. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 24.11, S. 3841–3849. DOI: 10.5194/nhess-24-3841-2024.

Krause, G. C. A. (2013). *Dünenbau auf den Ostsee-Küsten West-Preussens*. [S.l.]: UNIKUM. ISBN: 3845700904.

Kriebel, D. L. (1986). „Verification Study of a Dune Erosion Model“. In: *Shore and beach* 54.3, S. 13–21. URL: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0022756583&partnerID=40&md5=3b21ffa89a03bfeb66c4150afdb2e157.

Kuschnerus, M. u. a. (2022). „DETECTING ANTHROPOGENIC VOLUME CHANGES IN CROSS SECTIONS OF A SANDY BEACH WITH PERMANENT LASER SCANNING“. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLIII-B2-2022, S. 1055–1061. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2022-1055-2022.

Larson, M., L. Erikson und H. Hanson (2004). „An analytical model to predict dune erosion due to wave impact“. In: *Coastal Engineering* 51.8–9, S. 675–696. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2004.07.003.

Lindenberg, Z. (2023). *Calculating Depth of Closure and Application to Bruun's Rule*. Hrsg. von International Coastal Management. DOI: \url{10.13140/RG.2.2.35339.26401}.

Lodder, Q. J. u. a. (2023). „The Coastal Genesis 2 research programme: Outputs, Outcomes and Impact“. In: *Ocean & Coastal Management* 237, S. 106499. ISSN: 09645691. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2023.106499.

Lodder, Q. und J. Slinger (2022). „The 'Research for Policy' cycle in Dutch coastal flood risk management: The Coastal Genesis 2 research programme“. In: *Ocean & Coastal Management* 219, S. 106066. ISSN: 09645691. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2022.106066.

Luijendijk, A. u. a. (2018). „The State of the World's Beaches“. In: *Scientific Reports* 8.1, S. 6641. ISSN: 2045-2322. DOI: 10.1038/s41598-018-24630-6. URL: https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6.

Lyzenga, D. R. (1978). „Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features“. In: *Applied Optics* 17.3, S. 379–383. DOI: 10.1364/AO.17.000379.

Mehrtens, B., O. Lojek u. a. (2023). „Foredune growth and storm surge protection potential at the Eiderstedt Peninsula, Germany“. In: *Frontiers in Marine Science* 9. DOI: 10.3389/fmars.2022.1020351.

Mehrtens, B., L. Vinkelau u. a. (2025). „Benchmarking Overview on Methods for Spatiotemporal Detection of Dune Erosion in Physical Modeling“. In: *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 151. DOI: 10.1061/JWPED5.WWENG-2138.

Mentaschi, L. u. a. (2018). „Global long-term observations of coastal erosion and accretion“. In: *Scientific Reports* 8.1, S. 12876. ISSN: 2045-2322. DOI: 10.1038/s41598-018-30904-w.

Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern (MLUV M-V) (2009). *Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern, Übersichtsheft: Grundlagen, Grundsätze, Standortbestimmung und Ausblick*. Techn. Ber. Schwerin: MLUV M-V.

Newe, J. (2005). „Strandprofilentwicklung unter Sturmflutseegang: Methodik für großmaßstäbliche 2D-Experimente und Berechnungsansätze“. Dissertation. Braunschweig: Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.

– (2013). *Neubemessung der Landesküstenschutzdünen Mecklenburg-Vorpommerns: Abschlussbericht für das StALU Mittleres Mecklenburg*.

– (2018). *Der Einfluss von Korngrößen auf den Dünenabbruch am Beispiel des Küstenabschnittes Ahrenshoop: Abschlussbericht zum Vertrag 34-1-18*. Wolfenbüttel.

– (2019). *Verifizierung des Dünenabbruchmodells NewDune am Beispiel von Sturmfluten der Jahre 2017 und 2019: Abschlussbericht*. Wolfenbüttel.

Newe, J. und H.-H. Dette (2004). *Bemessung der Landesküstenschutzdünen Mecklenburg-Vorpommerns*. Braunschweig.

Nöthel, H. u. a. (2024). „Ablauf der Ostseesturmflut vom Oktober 2023“. In: *Die Küste* 94. DOI: 10.18171/1.094109.

Nuyts, S. u. a. (2026). „Wave direction controls erosion response of embayed beaches under climate change“. In: *Coastal Engineering* 208, S. 105018. ISSN: 03783839. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2026.105018.

Parkinson, R. W. und D. E. Ogurcak (2020). „Will beach nourishment be enough to hold back the sea?“ In: *Shore and Beach*. DOI: 10.34237/1008844.

Parrish, C. E. u. a. (2019). „Validation of ICESat-2 ATLAS Bathymetry and Analysis of ATLAS's Bathymetric Mapping Performance“. In: *Remote Sensing* 11.14, S. 1634. DOI: 10.3390/rs11141634.

Plant, N. G. und H. F. Stockdon (2012). „Probabilistic prediction of barrier–island response to hurricanes“. In: *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 117.F3. ISSN: 21699003. DOI: 10.1029/2011JF002326.

RADOST, Hrsg. (2014). *RADOST-Abschlussbericht und 5. RADOST-Jahresbericht: Regionale Anpassungsstrategien für die deutsche Ostseeküste*. Berlin.

Ranasinghe, R., D. Callaghan und M. J. F. Stive (2012). „Estimating coastal recession due to sea level rise: beyond the Bruun rule“. In: *Climatic Change* 110.3-4, S. 561–574. ISSN: 0165-0009. DOI: 10.1007/s10584-011-0107-8.

Ricker, Marcel and Hartmann, Robert (2025). *WAM Cycle 7 – Third generation spectral wave model, v7.0.10*. Open Source (GPL-3.0), optionale OASIS3-MCT-Kopplung. Helmholtz-Zentrum Hereon. URL: https://github.com/myWAveModel/wam (besucht am 18. 07. 2026).

Ridder, M. de u. a. (2020). *Boundary condition guidelines for XBeach simulations: Methodology for the representation of infragravity waves in varying water depth and wave conditions*. Hrsg. von Deltares, Delft, Netherlands.

RKMV (2012). *Regelwerk: Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern: Hydrodynamische Eingangsparameter: für den Entwurf, die Bemessung die Sicherheitsüberprüfung von Küstenschutzanlagen in M-V*. Rostock.

– (2022a). *Regelwerk: Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern: Hydrodynamische Eingangsparameter: für den Entwurf, die Bemessung und die Sicherheitsüberprüfung von Küstenschutzanlagen in M-V, Themenheft 2-4/2022*. Rostock.

– (2022b). *Regelwerk: Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern: Referenzhochwasserstand und Bemessungshochwasserstand, Themenheft 2-5/2022*. Rostock.

Roelvink, D. und S. Costas (2019). „Coupling nearshore and aeolian processes: XBeach and duna process-based models“. In: *Environmental Modelling & Software* 115, S. 98–112. ISSN: 13648152. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.02.010.

Roelvink, D., A. Reniers u. a. (2009). „Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands“. In: *Coastal Engineering* 56.11-12, S. 1133–1152. ISSN: 03783839. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2009.08.006.

Roelvink, J. A. (1993). „Dissipation in random wave groups incident on a beach“. In: *Coastal Engineering* 19.1-2, S. 127–150. ISSN: 03783839. DOI: 10.1016/0378-3839(93)90021-Y.

Rosati, J. D., R. G. Dean und T. L. Walton (2013). „The modified Bruun Rule extended for landward transport“. In: *Marine Geology* 340, S. 71–81. ISSN: 00253227. DOI: 10.1016/j.margeo.2013.04.018.

Rosenhagen, G. und I. Bork (2009). „Rekonstruktion der Sturmflutwetterlage vom 13. November 1872“. In: *MUSTOK*. Bd. 75. Die Küste. Heide, Holstein, S. 51–70. URL: https://izw.baw.de/die-kueste/0/k075105.pdf.

Roshandel, S. u. a. (2021). „3D Ocean Water Wave Surface Analysis on Airborne LiDAR Bathymetric Point Clouds“. In: *Remote Sensing* 13.19, S. 3918. DOI: 10.3390/rs13193918.

RUGGIERO, P. u. a. (2019). „Simulating dune evolution on managed coastlines: Exploring management options with the Coastal Recovery from Storms Tool (CReST)“. In: *Shore & Beach*, S. 36–43. ISSN: 0037-4237. DOI: 10.34237/1008724.

Sallenger, A. H. [(2000). „Storm Impact Scale for Barrier Islands“. In: *Journal of Coastal Research* 16.3, S. 890–895. URL: http://www.jstor.org/stable/4300099 (besucht am 15. 05. 2026).

Santos, V. M. u. a. (2019). „Combining Numerical and Statistical Models to Predict Storm–Induced Dune Erosion“. In: *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 124.7, S. 1817–1834. ISSN: 21699003. DOI: 10.1029/2019JF005016.

Schweiger, C. u. a. (2020). „Spatial and temporal evaluation of storm-induced erosion modelling based on a two-dimensional field case including an artificial unvegetated research dune“. In: *Coastal Engineering* 161, S. 103752. ISSN: 03783839. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2020.103752.

Seifert, T., F. Tauber und B. Kayser (2001). „A high-resolution spherical grid topography of the Baltic Sea – 2nd edition“. In: *Baltic Sea Science Congress, Stockholm, 25–29 November 2001*. Poster #147. Stockholm.

Siewert, M. u. a. (2024). „Die Ostseesturmflut vom Oktober 2023 an den sandigen Flachküsten und Binnenküsten von Mecklenburg-Vorpommern: 16 pages“. In: DOI: 10.18171/1.094108.

Soomere, T., M. Viška und M. Eelsalu (2013). „Spatial variations of wave loads and closure depths along the coast of the eastern Baltic Sea; pp. 93–109“. In: *Estonian Journal of Engineering* 19.2, S. 93–109. ISSN: 1736-6038. DOI: 10.3176/eng.2013.2.01.

Stumpf, R. P., K. Holderied und M. Sinclair (2003). „Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types“. In: *Limnology and Oceanography* 48.1, part 2, S. 547–556. DOI: 10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0547.

The MathWorks, Inc. (2024). *Statistics and Machine Learning Toolbox: User's Guide*. Version R2024b. The MathWorks, Inc. Natick, MA.

Thiel de Vries, J. S. M. van (2009). „Dune erosion during storm surges“. Diss. Delft, The Netherlands: Delft University of Technology.

Tiede, J. u. a. (2024). „Evolution of beach profiles at the German Baltic Sea during and after large-scale beach nourishment: bar formation and sand redistribution“. In: *Frontiers in Marine Science* 11. DOI: 10.3389/fmars.2024.1473237.

Trouw, K. J. M. u. a. (2012). „NUMERICAL MODELLING OF HYDRODYNAMICS AND SEDIMENT TRANSPORT IN THE SURF ZONE : A SENSITIVITY STUDY WITH DIFFERENT TYPES OF NUMERICAL MODELS“. In: *Coastal Engineering Proceedings* 1.33, S. 23. ISSN: 0589-087X. DOI: 10.9753/icce.v33.sediment.23. URL: file:///C:/Users/Fleischer/Downloads/7004-Article%20Text-28544-1-10-20121214.pdf.

van Gent, M. u. a. (2008). „Large-scale dune erosion tests to study the influence of wave periods“. In: *Coastal Engineering* 55.12, S. 1041–1051. ISSN: 03783839. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2008.04.003.

van Gent, M. R. A. u. a. (2007). „Dune Erosion Prediction Methods Incorporating Effects of Wave Periods“. In: *Coastal sediments '07*. Hrsg. von N. C. Kraus und J. D. Rosati. Reston Va.: American Society of Civil Engineers, S. 612–625. ISBN: 978-0-7844-0926-8. DOI: 10.1061/40926(239)46.

van Wiechen, P., S. de VRIES und A. RENIERS (2024). „Field observations of wave-averaged suspended sediment concentrations in the inner surf zone with varying storm conditions“. In: *Marine Geology* 473, S. 107302. ISSN: 00253227. DOI: 10.1016/j.margeo.2024.107302.

Vousdoukas, M. I. u. a. (2020). „Sandy coastlines under threat of erosion“. In: *Nature Climate Change* 10, S. 260–263. DOI: 10.1038/s41558-020-0697-0.

VRIES, S. de u. a. (2014). „Aeolian sediment transport on a beach with a varying sediment supply“. In: *Aeolian Research* 15, S. 235–244. ISSN: 18759637. DOI: 10.1016/j.aeolia.2014.08.001.

Vries, S. de (2013). *Physics of blown sand and coastal dunes*. [S.l.]: [s.n.] ISBN: 978-94-6191-878-9.

Vries, S. de u. a. (2017). „Measured spatial variability of beach erosion due to aeolian processes“. In: *Proceedings of Coastal Dynamics 2017*. Hrsg. von T. Aagaard, R. Deigaard und D. Fuhrman. Bd. 071, S. 481–491.

Walstra, D. J. R., J. A. Roelvink und J. Groeneweg (2001). „Calculation of Wave-Driven Currents in a 3D Mean Flow Model“. In: *Coastal engineering 2000*. Hrsg. von B. L. Edge. Reston VA: American Society of Civil Engineers, S. 1050–1063. ISBN: 9780784405499. DOI: 10.1061/40549(276)81.

Wang, J. u. a. (2023). „An Overview of Shoreline Mapping by Using Airborne LiDAR“. In: *Remote Sensing* 15.1, S. 253. DOI: 10.3390/rs15010253.

Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) (2026). *PEGELONLINE – Gewässerkundliches Informationssystem, Pegel Warnemünde*. https://www.pegelonline.wsv.de. Zugriff: 09.07.2026.

Weichbrodt, F. u. a. (2013). „Grundlagen für Entwurf, Bemessung und Sicherheitsüberprüfung von Küstenschutzanlagen in Mecklenburg-Vorpommern“. In: *Die Küste* 80, S. 143–162. URL: %5Curl%7Bhttps://izw.baw.de/die-kueste/0/k080105_a.pdf%7D.

Weisse, R. u. a. (2021). „Sea level dynamics and coastal erosion in the Baltic Sea region“. In: *Earth System Dynamics* 12.3, S. 871–898. DOI: 10.5194/esd-12-871-2021.

MV-Wetter (2023). *Historische Sturmfluten an der Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommerns (Pegel Warnemünde, Ereignisse ≥ 1,25 m über Mittelwasser seit 1872)*. https://www.mv-wetter.de. Artikel vom 25.10.2023, Zugriff: 09.07.2026.

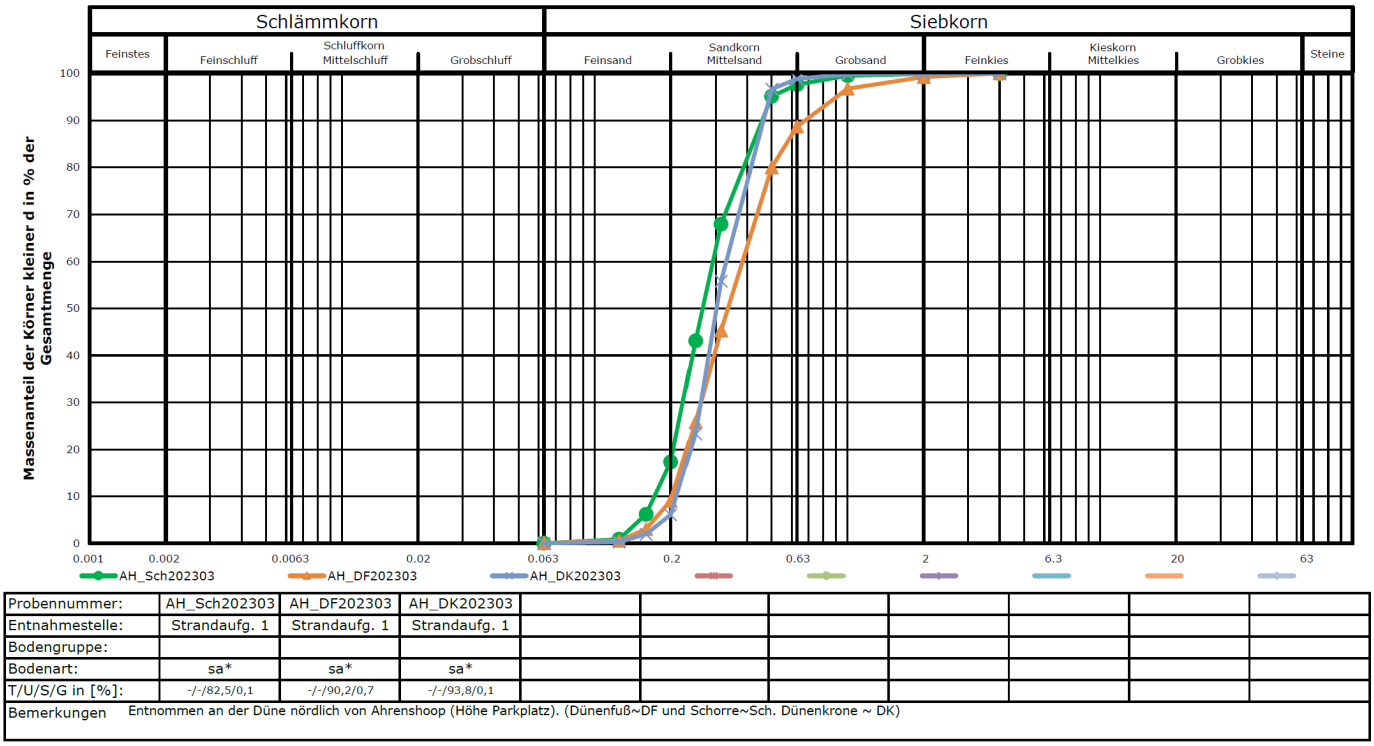
Wilmink, R. u. a. (2023). „XBEACH IMPLEMENTATION IN THE NEW NATIONAL COASTAL FLOOD RISK ASSESSMENT FRAMEWORK FOR THE DUTCH COAST“. In: *Coastal Engineering Proceedings* 37, S. 46. ISSN: 0589-087X. DOI: 10.9753/icce.v37.management.46.

Winters, M. A., M. A. A. Jr. und T. W. Gallien (2023). „OBSERVATION AND NUMERICAL MODELING OF A DUNE OVERWASH AND BREACHING EVENT“. In: *Coastal Engineering Proceedings* 37, S. 35. ISSN: 0589-087X. DOI: 10.9753/icce.v37.sediment.35.

Wolski, T. u. a. (2014). „Extreme sea levels at selected stations on the Baltic Sea coast“. In: *Oceanologia* 56.2, S. 259–290. ISSN: 00783234. DOI: 10.5697/oc.56-2.259.

Anhang

A. Ergänzende Abbildungen



Probennummer:	AH_Sch202303	AH_DF202303	AH_DK202303
Entnahmestelle:	Strandaufg. 1	Strandaufg. 1	Strandaufg. 1
Bodengruppe:			
Bodenart:	sa*	sa*	sa*
T/U/S/G in [%]:	-/-/82,5/0,1	-/-/90,2/0,7	-/-/93,8/0,1
Bemerkungen	Entnommen an der Düne nördlich von Ahrenshoop (Höhe Parkplatz). (Dünenfuß~DF und Schorre~Sch. Dünenkrone ~ DK)		

Abbildung 120: Kornzusammensetzung im Untersuchungsgebiet am Dünenfuß und an der Schorre im März 2023

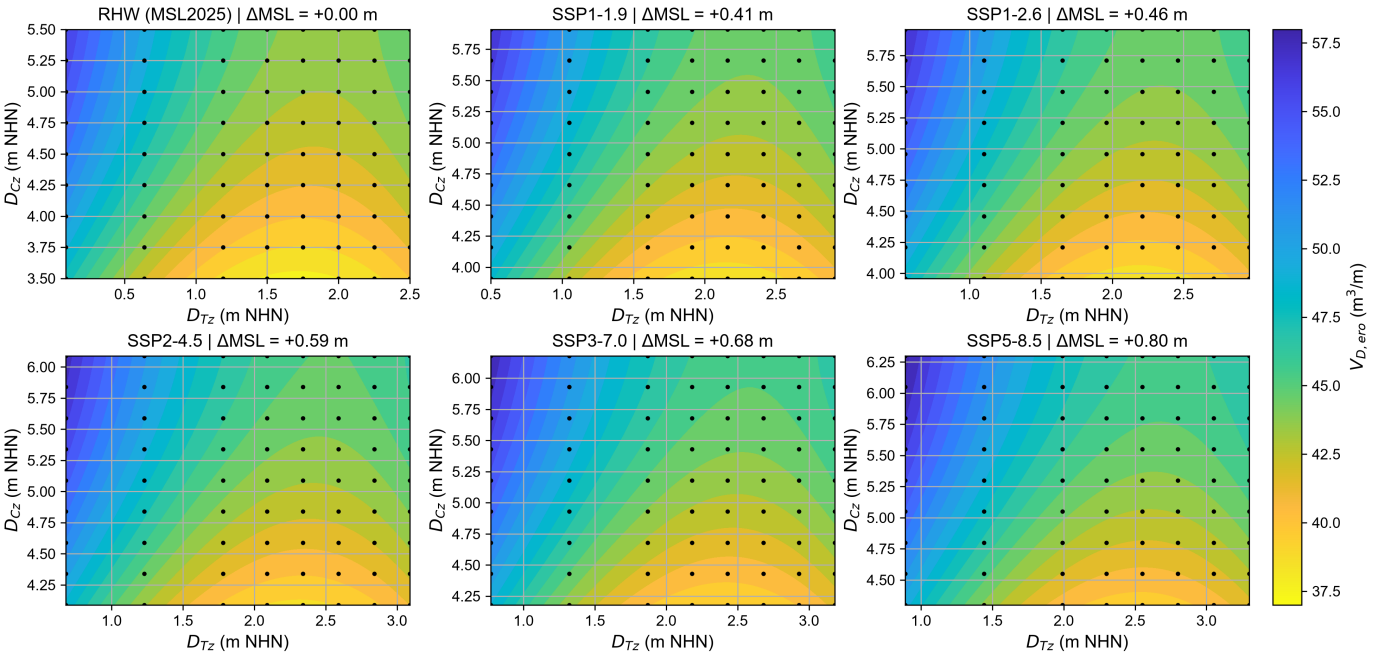


Abbildung 121: Antwortflächen des Dünenerosionsvolumens nach Gleichung (18) je Klimaszenario in Abhängigkeit von Dünenfuß- und Kronenhöhe; schwarze Punkte: XB-Simulationen (Simulation: V12_01, KKM F180.715)

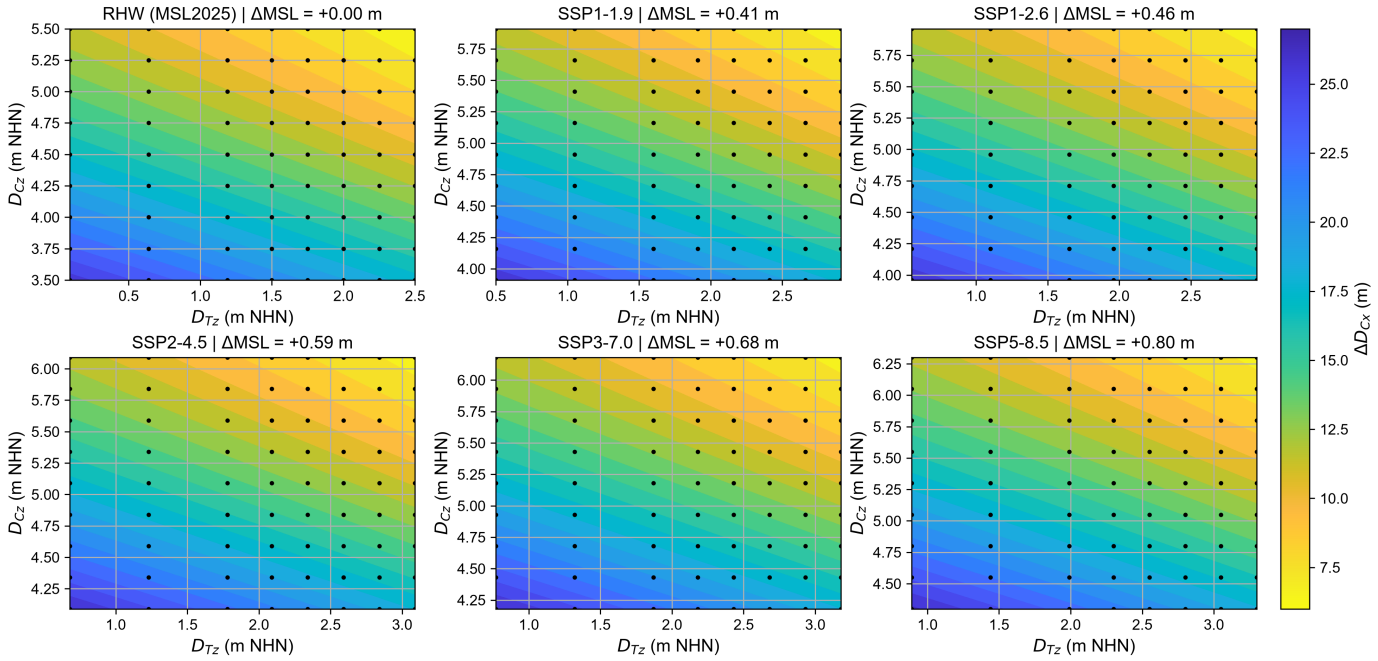


Abbildung 122: Antwortflächen des Kronenrückgangs nach Gleichung (19) je Klimaszenario in Abhängigkeit von Dünenfuß- und Kronenhöhe; schwarze Punkte: XB-Simulationen (Simulation: V12_01, KKM F180.715)

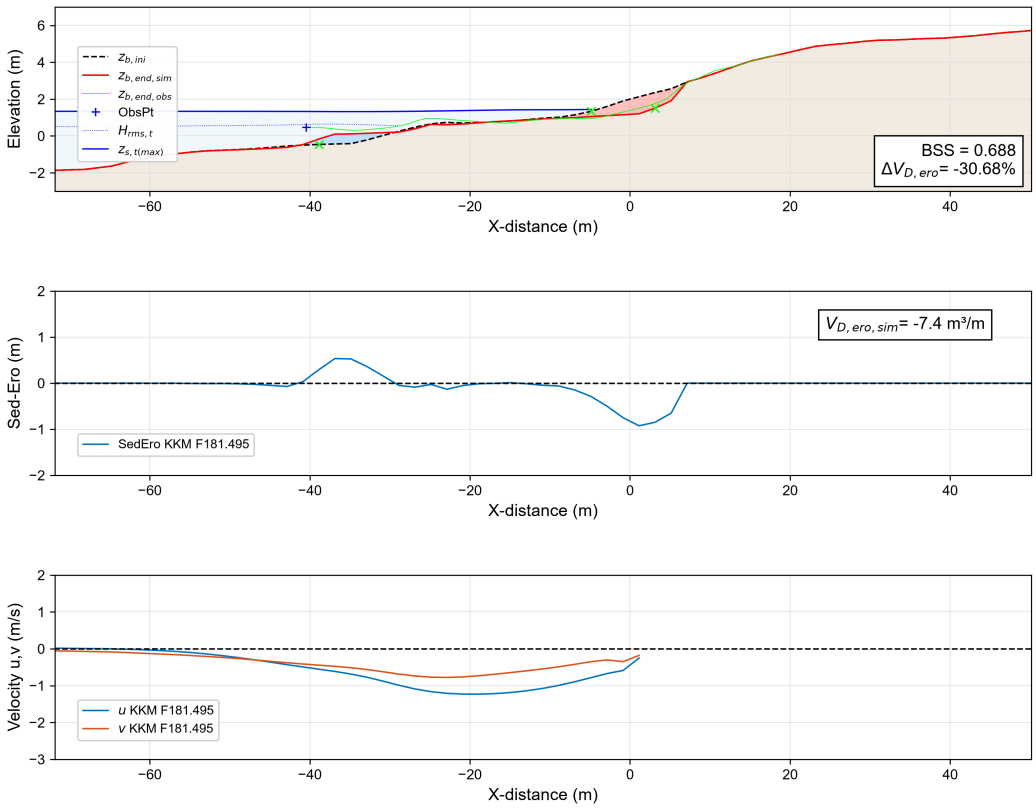


Abbildung 123: Profilbezogene Auswertung der 2DH-Kalibrierungssimulation mit dem besten mittleren BSS am zweiten Referenzprofil (Simulation: V8_05_run13_007, KKM F181.495), Darstellung analog zu Abbildung 57

B. Sensitivität des Bezugsniveaus der TADK-Volumenauswertung

Die volumetrische Auswertung des TADK in Abschnitt 4 verwendet als unteres Bezugsniveau des Dünenvolumens V_D das MHW (1,19 m NHN, Pegel Warnemünde). Das MHW ist ein statistisch definierter Wert, der sich auf andere Küstenabschnitte übertragen lässt und damit die Vergleichbarkeit der Auswertung ermöglicht; ein absoluter NHN-Wert kann das nicht leisten. In Abstimmung mit dem StALU MM wird die Auswertung hier ergänzend für ein pauschales Bezugsniveau von 1,00 m NHN durchgeführt. Dazu wurde die Auswertekette in Python reimplementiert und mit den Ergebnissen des Hauptteils validiert: Für das Bezugsniveau MHW reproduziert sie die Kennwerte aus Abschnitt 4 exakt (u. a. Wilcoxon-Rangsummentest $p = 7{,}1 \cdot 10^{-9}$). Die Lage der 18 ausgewerteten TADK-Profile (KKM F180.235 bis F184.715) zeigt Abbildung 124 – hier mit dem linearen Volumentrend 2012–2022 für das pauschale Bezugsniveau 1,00 m NHN eingefärbt (die Kartenvariante für das Bezugsniveau MHW zeigt Abbildung 32 im Hauptteil; die Trendwerte unterscheiden sich geringfügig).

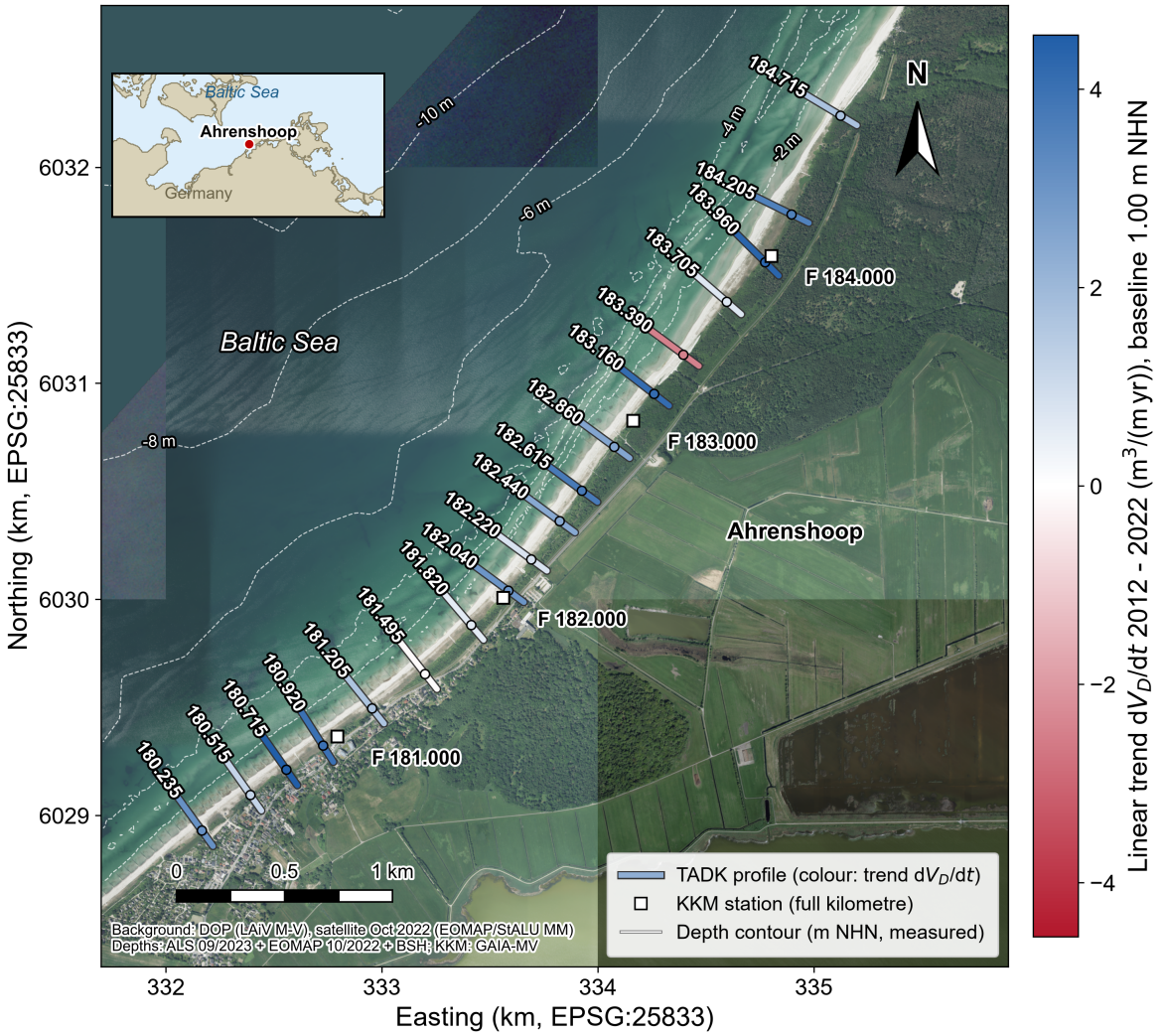


Abbildung 124: Lage der ausgewerteten TADK-Profile (KKM F180.235 bis F184.715) auf Grundlage der amtlichen Küstenkilometrierung; Färbung: linearer Trend des Dünenvolumens V_D 2012–2022 über dem pauschalen Bezugsniveau 1,00 m NHN; Hintergrund: DOP (LAiV M-V) und Satellitenbild Oktober 2022 (EOMAP GmbH / StALU MM); Tiefenlinien: gemessenes Geländemodell aus ALS (09/2023), EOMAP-Satellitenbathymetrie (10/2022) und BSH-Daten

Die Abbildungen 125 bis 132 stellen die betroffenen Auswertungen für beide Bezugsniveaus in identischer Python-Darstellung gegenüber; Tabelle 17 fasst die Kennwerte je Küstenabschnitt zusammen. Die wesentlichen Befunde:

- **Absolutvolumina:** Durch das um 0,19 m tiefere Bezugsniveau nimmt V_D erwartungsgemäß zu – im Mittel um +6,7 m^3/m (Spannweite +1,4 bis +13,5 m^3/m, vgl. Abbildung 127). Der Zuwachs entspricht der Querschnittsfläche des Streifens zwischen 1,00 und 1,19 m NHN und variiert mit der dortigen Profilbreite; das räumliche Muster der Volumenverteilung bleibt unverändert.
- **Trends:** Die linearen Volumentrends 2012–2022 sind nahezu identisch (Mittel 2,18 gegenüber 2,20 $m^3/(m\,a)$; je Abschnitt Abweichungen $\leq$ 0,35 $m^3/(m\,a)$, vgl. Abbildungen 128 und 129). Die Rangfolge der Abschnitte – einschließlich des einzigen negativen Trends bei KKM 183.390 – bleibt bestehen.
- **Sturmhochwasser-Signal:** Auch mit pauschalem Bezugsniveau bleibt der Unterschied zwischen Messintervallen mit und ohne SHW hochsignifikant: mittlere Volumenänderung −10,0 m^3/m (mit SHW) gegenüber +5,4 m^3/m (ohne), $p = 3{,}0 \cdot 10^{-9}$ (MHW: −8,8 bzw. +5,0 m^3/m, $p = 7{,}1 \cdot 10^{-9}$; vgl. Abbildung 132).

Die Wahl des Bezugsniveaus beeinflusst somit ausschließlich die Absolutwerte des Dünenvolumens, nicht aber die räumlichen Muster, die Trends oder die statistische Signifikanz des Einflusses der Sturmhochwasser. Für den Hauptteil wird daher das übertragbare Bezugsniveau MHW beibehalten.

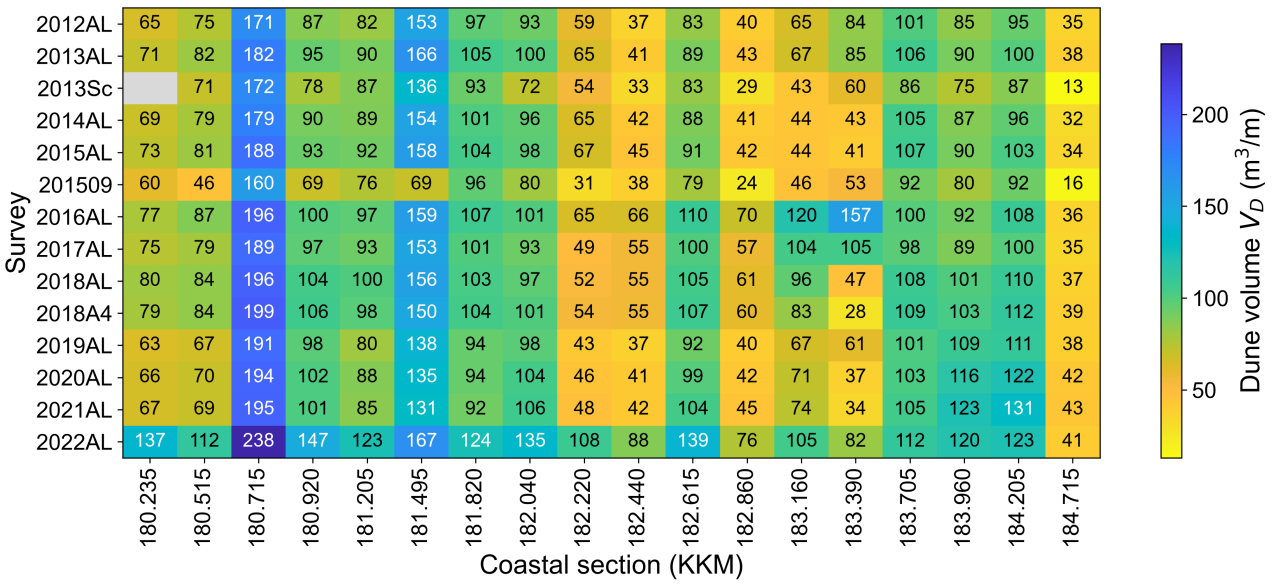


Abbildung 125: Dünenvolumen V_D über MHW (1,19 m NHN) je Küstenabschnitt und Vermessung (Python-Auswertung, identisch zur Auswertung im Hauptteil)

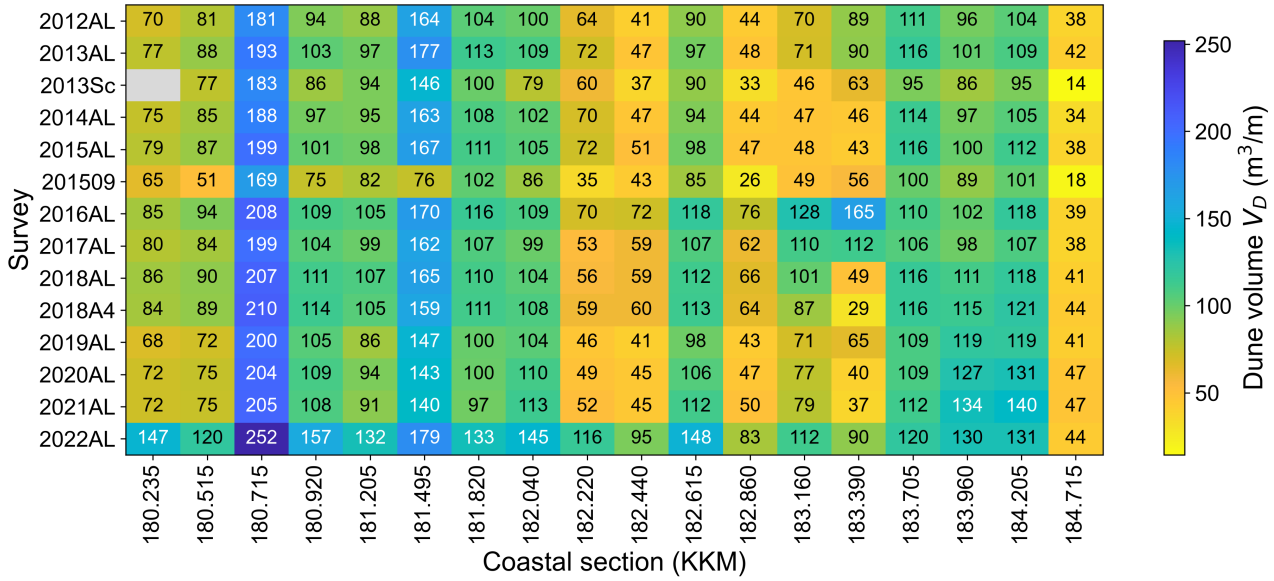


Abbildung 126: Dünenvolumen V_D über dem pauschalen Bezugsniveau 1,00 m NHN je Küstenabschnitt und Vermessung

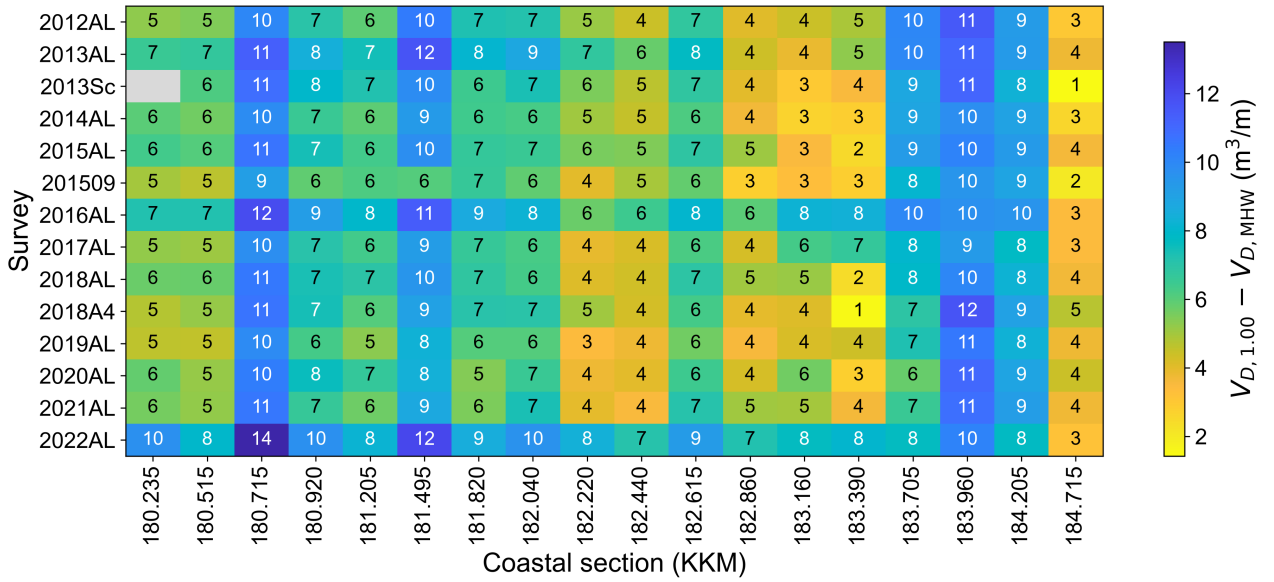


Abbildung 127: Differenz der Dünenvolumina zwischen den Bezugsniveaus 1,00 m NHN und MHW: Der Zuwachs entspricht der Querschnittsfläche des Streifens zwischen beiden Niveaus

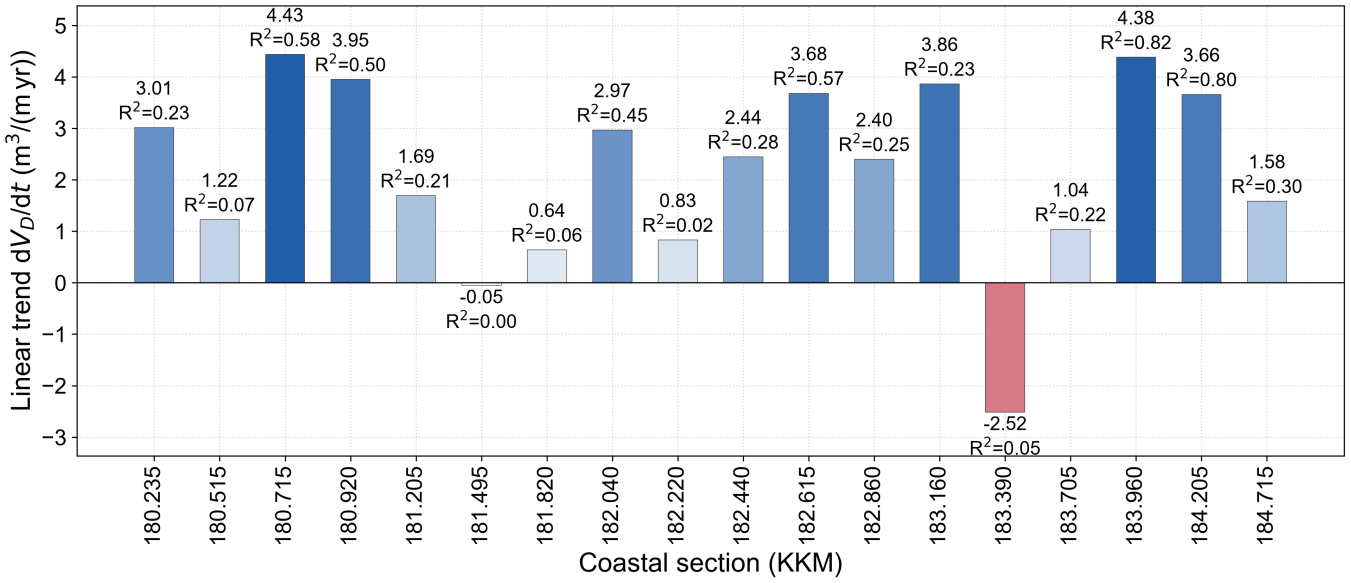


Abbildung 128: Linearer Trend des Dünenvolumens V_D 2012–2022 je Küstenabschnitt, Bezugsniveau MHW

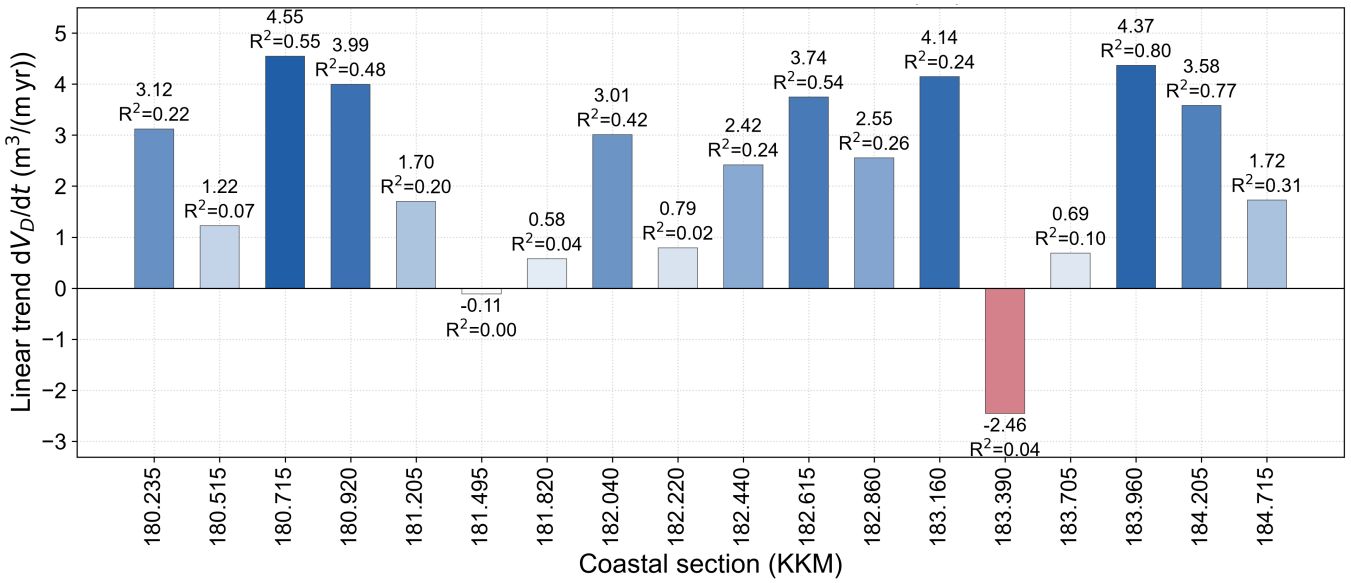


Abbildung 129: Linearer Trend des Dünenvolumens V_D 2012–2022 je Küstenabschnitt, pauschales Bezugsniveau 1,00 m NHN

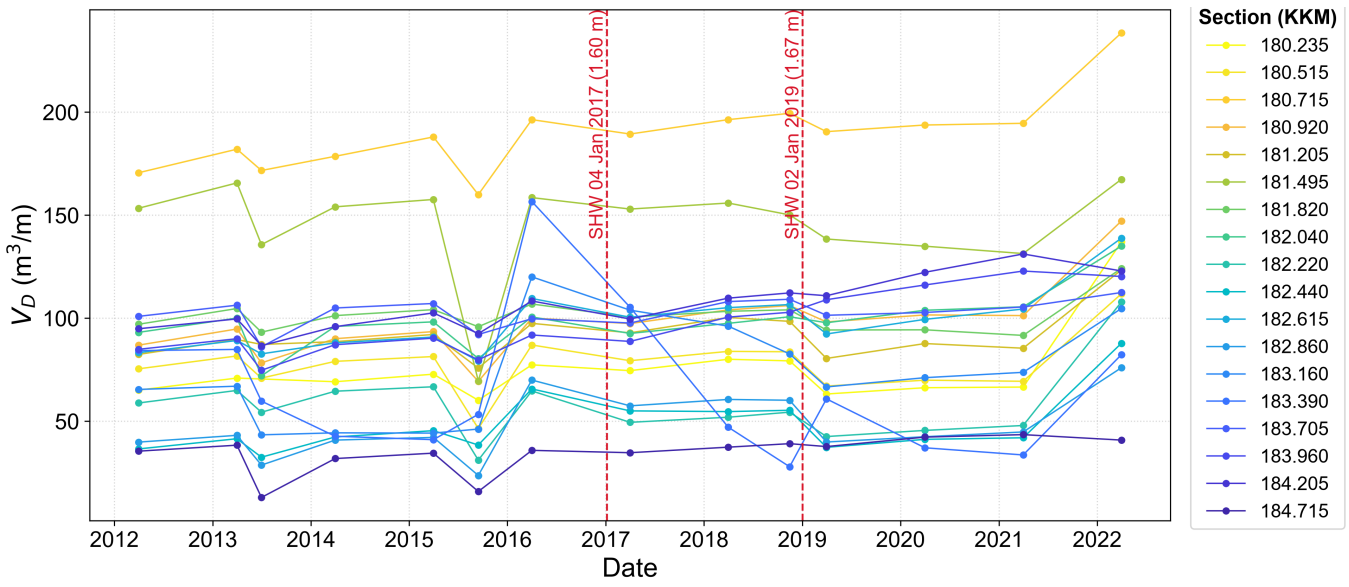


Abbildung 130: Zeitreihen des Dünenvolumens V_D je Küstenabschnitt mit SHW-Ereignissen, Bezugsniveau MHW

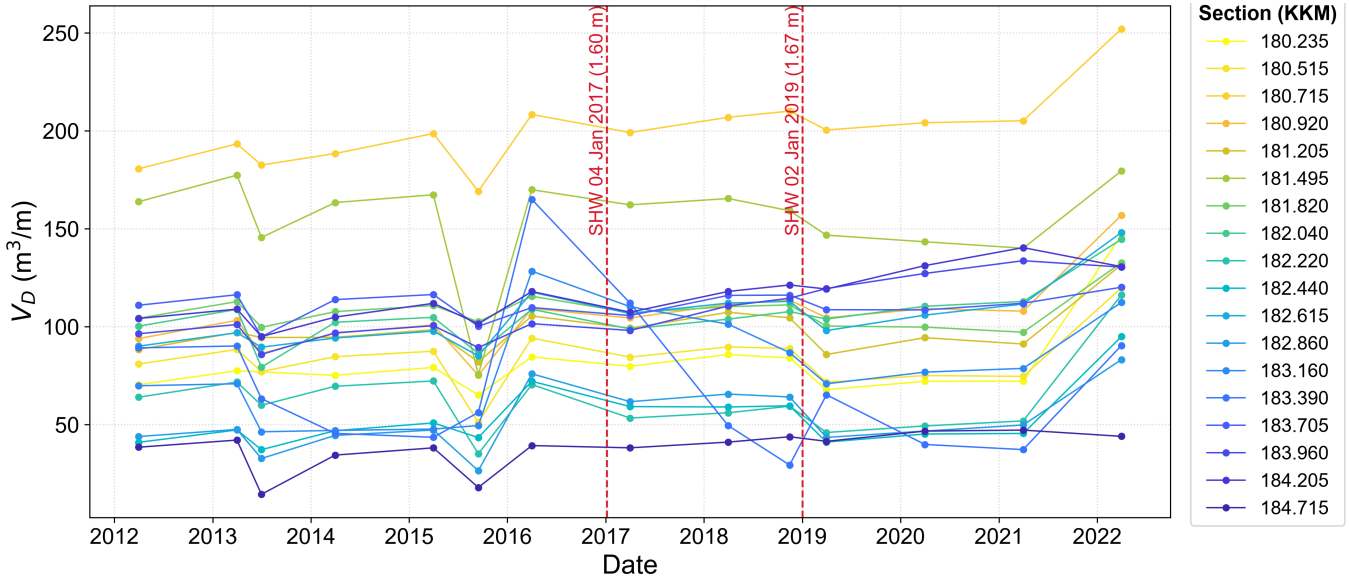


Abbildung 131: Zeitreihen des Dünenvolumens V_D je Küstenabschnitt mit SHW-Ereignissen, pauschales Bezugsniveau 1,00 m NHN

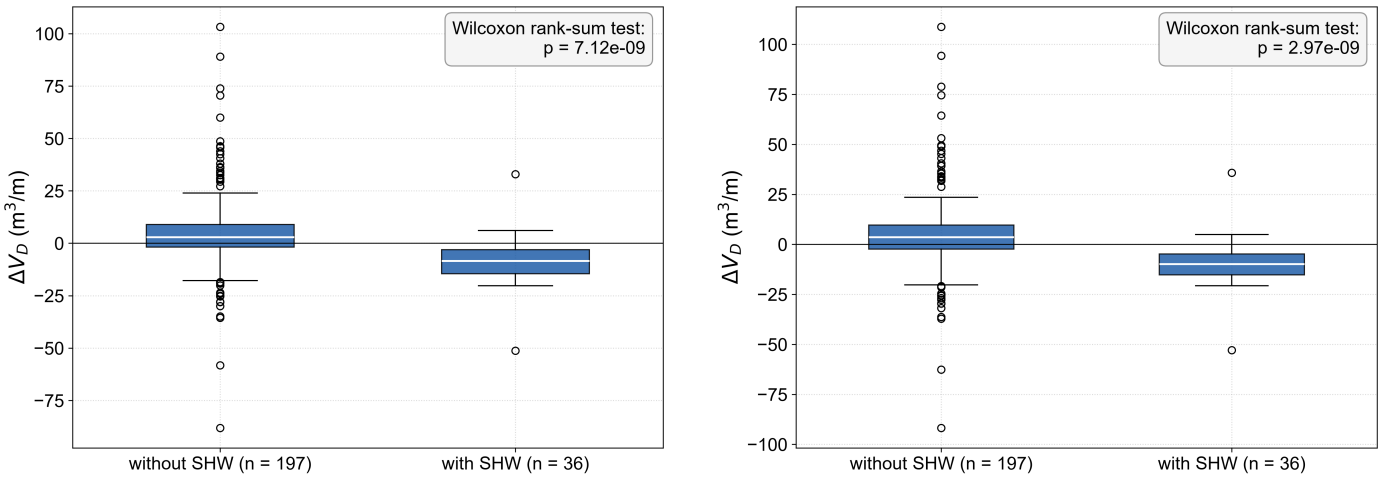


Abbildung 132: Volumenänderung V_D in Messintervallen mit und ohne SHW für die Bezugsniveaus MHW (links, Wilcoxon-Rangsummentest $p = 7{,}1 \cdot 10^{-9}$) und pauschal 1,00 m NHN (rechts, $p = 3{,}0 \cdot 10^{-9}$)

Tabelle 17: Vergleich der TADK-Volumenauswertung für die Bezugsniveaus MHW (1,19 m NHN) und pauschal 1,00 m NHN: mittleres Dünenvolumen $\overline{V_D}$ und linearer Trend je Küstenabschnitt (2012–2022).

	$\overline{V_D}$ (m³/m)		dV_D/dt (m³/(m a))		$\Delta\overline{V_D}$
KKM	MHW	1,00 m	MHW	1,00 m	(m³/m)
180.235	75,6	81,5	3,01	3,12	+6,0
180.515	77,6	83,4	1,22	1,22	+5,8
180.715	189,3	199,9	4,43	4,55	+10,6
180.920	97,8	105,2	3,95	3,99	+7,5
181.205	91,6	98,2	1,69	1,70	+6,6
181.495	144,7	154,2	-0,05	-0,11	+9,6
181.820	101,1	108,0	0,64	0,58	+6,9
182.040	98,1	105,2	2,97	3,01	+7,1
182.220	57,5	62,5	0,83	0,79	+5,0
182.440	48,2	53,1	2,44	2,42	+4,8
182.615	97,9	104,7	3,68	3,74	+6,9
182.860	47,8	52,3	2,40	2,55	+4,5
183.160	73,5	78,3	3,86	4,14	+4,8
183.390	65,5	69,7	-2,52	-2,46	+4,3
183.705	102,4	110,7	1,04	0,69	+8,2
183.960	97,1	107,5	4,38	4,37	+10,5
184.205	106,4	115,2	3,66	3,58	+8,8
184.715	34,3	37,6	1,58	1,72	+3,3

C. Simulationsdateien

Jede XB-Simulation wird vollständig durch wenige Eingangsdateien beschrieben: die Parameterdatei `params.txt`, das Berechnungsgitter (`x.grd`, bei 2DH zusätzlich `y.grd`), die Topobathymetrie (`bed.dep`) sowie die hydraulischen Randbedingungen als Wasserstandsganglinie (`tide.txt`: Zeit in s, Wasserstand in m NHN) und Seegangstabelle im `jonstable`-Format (`waves.txt`: je Zeile H_{m0}, T_p, Anlaufrichtung, Spektrumsform, Richtungsaufweitung, Dauer und Zeitschritt). Sämtliche Eingangsdateien aller Simulationsserien sind im digitalen Anhang abgelegt (vgl. Unterabschnitt F). Exemplarisch dokumentiert das folgende Listing die Parameterdatei der Referenzsimulation des MDE-Moduls 3 (Serie V12_01, Szenario S0000: RHW bei ΔMSL = 0, 1D, KKM F180.715) in gekürzter Form:

```
%%% XBeach parameter settings input file (V12_01, S0000, gekuerzt) %%%
%%% Bed composition %%%      %%% Grid %%%
por          = 0.400000      depfile      = bed.dep
D50          = 0.000260      nx           = 584
D90          = 0.000450      ny           = 0
                             alfa         = 307.062223
%%% General %%%              vardx        = 1
bedfriccoef  = 0.011000      xfile        = x.grd
wavemodel    = surfbeat      thetamin     = 270
wbctype      = jonstable     thetamax     = 90
back         = abs_1d        dtheta       = 10
                             thetanaut    = 1
%%% Model time / tide %%%
tstop        = 381600        %%% Morphology %%%
zs0          = 0.650000      morfac       = 10
zs0file      = tide.txt      morfacopt    = 1
tideloc      = 1             morstart     = 900
                             wetslp       = 0.230000
%%% Waves %%%                dryslp       = 2
bcfile       = waves.txt     hswitch      = 0.100000
lateralwave  = neumann
gamma        = 0.470000      %%% Sediment transport %%%
alpha        = 1.360000      facSk        = 0.110000
gammax       = 1.300000      facAs        = 0.120000
beta         = 0.080000
                             %%% Output %%%
                             outputformat = netcdf
                             tintg/tintm  = 600/3600
```

D. Skripte

Die automatisierte Prozesskette (vgl. Abbildung 53) wurde im Projektverlauf in MATLAB- und PowerShell-Skripten umgesetzt, die vollständig im digitalen Anhang dokumentiert sind; für die Nachnutzung maßgeblich ist die daraus hervorgegangene quelloffene Python-Kette (s. u.). Die zentralen Bausteine der Simulationskette sind:

- `XB_Model_SetUp_2D_MIKE21_V9_11_F181495.m` – automatisierter Modellaufbau der 2DH-Simulationen (Berechnungsgitter, Topobathymetrie, Randbedingungsimport aus MIKE21 bzw. SHG, `params.txt`-Generierung); analoge Varianten für die 1D-Serien (V10 bis V12)
- PowerShell-Steuerskripte – sequenzielle Abarbeitung der Simulationsordner, MPI-Start, Überwachung und Wiederaufnahme nach Systemabstürzen
- `XB_analyse_results_plot_ALL_profils_V9_11.m` (und Serien-Varianten) – automatisiertes Post-Processing der netCDF-Ausgaben: BSS, Dünenparameter, Profil- und 2D-Plots, Ensemble-Statistik
- `XB_analyse_results_plot_ALL_profils_V9_09_V9_10b_Statistik.m` – Regressionsanalyse der Module 1 und 2 des MDE (*stepwise regression*)
- `XB_analyse_results_MDE_Modul3_V12_01_Statistik.m` – Regressionsanalyse des Moduls 3 einschließlich der invertierbaren Kopplung, Bemessungsdiagramme und Antwortflächen

Mit Blick auf eine Open-Access-Nachnutzbarkeit wurden die Regressionsanalyse des MDE sowie sämtliche Berichtsabbildungen zusätzlich als eigenständige, von MATLAB unabhängige Python-Kette reimplementiert und gegen die MATLAB-Ergebnisse validiert (Koeffizientenabweichungen $\leq 5 \times 10^{-7}$, vgl. Unterabschnitt F); der Import der hydraulischen Randbedingungen wurde ebenfalls nach Python überführt und byte-identisch gegen die ursprünglichen Eingangsdateien validiert. Die Python-Kette ist in vier Verzeichnisse gegliedert:

- `MDE_Python` – gemeinsame Regressionsroutine `mde_stepwise.py` sowie `mde_modul1_v9_09_v9_10b.py`, `mde_modul2_v9_11.py` und `mde_modul3_v12_01.py` für die stepwise Regression, Korrelationsanalysen, Bemessungsdiagramme und die Kopplungsvalidierung der drei MDE-Module
- `TADK_Python` – Auswertung der Dünenvolumina aus dem amtlichen TADK-Datensatz (Unterabschnitt B) für beide Bezugsniveaus einschließlich Signifikanztests
- `Sim_Abbildungen_Python` – gemeinsame Darstellungsroutine `xb_report_figs.py` (Profil-, Boxplot- und Kurvenschar-Darstellungen) mit einem Steuerskript je Abbildungsfamilie sowie `fig_extract.py` zum Nachbau ausgewählter MATLAB-`.fig`-Vorlagen
- `XB_BC_Import_Python` – `xb_bc_import.py`: Import der hydraulischen Randbedingungen aus SHG-Szenariodateien und MIKE21-Hindcast in die XBeach-Eingangsdateien `tide.txt` und `waves.txt`; byte-identisch validiert gegen die Original-Eingangsdateien der Serien V8_05, V10_08c und V12_01 (`validate_port.py`)

E. Protokolle

Die Protokolle der Projekttreffen des Verbundes sowie der Sitzungen der projektbegleitenden Gruppe sind im digitalen Anhang abgelegt (vgl. Unterabschnitt F). Ergänzend liegen dort für jeden Feldeinsatz der in Abschnitt 3 beschriebenen Messkampagnen 2023/2024 detaillierte Messprotokolle vor (Zielstellung, Vorbereitung, Durchführung, Datenablage, Verarbeitung, Genauigkeitsnachweis und Fazit je Einsatz) – aufgrund ihres Umfangs sowie der zugehörigen Roh- und Bilddaten sind sie nicht im gedruckten Bericht, sondern ausschließlich im digitalen Anhang enthalten:

- `01_Messeinsatz_20230320-22.md` – GNSS-Referenzvermessung, UAV-LiDAR
- `02_Messeinsatz_20230710.md` – terrestrisches Laserscanning
- `03_Messeinsatz_20240403-04.md` – UAV-Befliegungen, GNSS-Nachmessung
- `04_Sturmhochwasser_20231020.md` – Schadensdokumentation Sturmhochwasser Oktober 2023

F. Digitaler Anhang

Aufgrund des Umfangs der Simulations- und Messdaten wird der überwiegende Teil der Projektergebnisse als digitaler Anhang über den Cloud-Speicher der TU Dresden bereitgestellt (`https://datashare.tu-dresden.de`, Zugang auf Anfrage beim Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik). Der digitale Anhang gliedert sich wie folgt:

- **01 Naturdaten** – Messdaten der Feldkampagnen 2023/2024 (GNS-Profile, UAV-/TLS-Punktwolken, Photogrammetrie, Rammsondierungen, Sedimentproben) sowie je Einsatz ein detailliertes Messprotokoll (Zielstellung, Vorbereitung, Durchführung, Datenablage, Verarbeitung, Genauigkeitsnachweis, Fazit)
- **02 Eingangsdaten** – hydraulische Randbedingungen (MIKE21-Hindcast mit 83 Ereignissen, SHG-Szenarien, RHW-/Klimaszenarien) und Topobathymetrien
- **03 Simulationen** – vollständige XB-Eingangsdateien aller Serien (V8 bis V12) gemäß Unterabschnitt C
- **04 Ergebnisdaten** – extrahierte Dünenparameter, BSS-Tabellen, Regressionsmodelle und Koeffizientensätze der MDE-Module 1 bis 3
- **05 Skripte** – die quelloffene Python-Reimplementierung von MDE-Regression und Berichtsabbildungen (maßgebliche Nachnutzungsfassung) sowie die MATLAB- und PowerShell-Skripte der ursprünglichen Simulationskette gemäß Unterabschnitt D
- **06 Protokolle und Berichte** – Sitzungsprotokolle, Zwischenberichte und Publikationen (vgl. Anhang A)

A. Veröffentlichungen und studentische Arbeiten aus dem Vorhaben

Die folgende Übersicht entspricht der mit dem Sachbericht zum Verwendungsnachweis eingereichten Publikationsliste des Teilvorhabens ResCAD A (FKZ 03F0927A, Stand Juli 2026).

Begutachtete Veröffentlichungen und Buchbeiträge

- Fleischer, D.; Arns, A.; Stamm, J. (2024): *Climate Adaptation Along the German Coast of the Baltic Sea.* In: Riverine, Estuarine and Marine Hydraulics (IAHR-APD 2022), Chennai, Indien.
- Beckmann, S.; Arns, A.; Fleischer, D.; Stamm, J. (2024): *Hydrodynamische Rekonstruktion des Sturmhochwassers vom 20./21. Oktober 2023.* Die Küste 94. DOI: 10.18171/1.094112 (online seit 07/2025).
- Fleischer, D.; Stamm, J.; Arns, A.; Beckmann, S. (2025): *Reassessment of the Coastal Protection Dunes as Nature Based Solutions in the Baltic Sea for Climate Adaption.* Coastal Engineering Proceedings 38 (ICCE 2024, Rom), sediment.94. DOI: 10.9753/icce.v38.sediment.94.
- Fleischer, D.; Stamm, J. (2025): *Dune Dynamics under Extreme Storm Surges – Model-based Evidence on Soft Coastal Protection and their Implications for Regional Climate Adaptation.* Buchkapitel 13, International Conference on Ocean Engineering (ICOE), IIT Madras (im Druck).

Vorträge und Tagungsbeiträge

- Fleischer, D. (2024): Projektvortrag ResCAD. KFKI-Seminar zur Küstenforschung, 19.11.2024.
- Fleischer, D.; Beckmann, S.; Stamm, J.; Arns, A. (2025): *ResCAD: Resistance and Climate Adaption in Dune Systems – Zusammenfassung Projektergebnisse.* 29. KFKI-Seminar zur Küstenforschung, Hamburg, 18.11.2025.
- Fleischer, D.; Stamm, J. (2025): *Nature-based coastal dune management at Baltic Sea – Insights from research project ResCAD.* IOCE 2025, RWTH Aachen, 05.12.2025.
- Fleischer, D.; Beckmann, S.; Arns, A.; Stamm, J. (2026): *ResCAD – Neue Planungswerkzeuge zur Bemessung und Klimaanpassung von Küstenschutzdünen.* KFKI-Seminar zur Küstenforschung, Lübeck (Abstract eingereicht, Status offen).

Studentische Qualifikationsarbeiten (TU Dresden, IWD)

- Giesinger, J.; Stief, P. (2023): *Analyse von hydro-morphodynamischen Prozessen durch Wind-Wellen-Belastung auf Basis unstrukturierter Berechnungsnetze mittels der Software Delft3D Flexible Mesh.* Projektarbeit.
- Reiter, A.-M. (2024): *Analyse hydromorphodynamischer Transportprozesse an Küstenschutzdünen entlang der südwestlichen Ostsee am Beispiel der Sturmflut vom 20.10.2023.* Diplomarbeit.
- Stelzig, D. (2024): *Optimierung eines Berechnungsnetzes für hydromorphodynamische Simulationen mit XBeach: Eine Untersuchung hinsichtlich des Einflusses der Netztopologie am Ostseeküstenabschnitt Ahrenshoop.* Projektarbeit.
- Khatri, M. (2025): *Parameter Study of a Numerical Dune Erosion Model under Extreme Hydraulic Conditions on the Baltic Coast.* Masterarbeit (M.Sc. Hydro Science and Engineering).
- Phuyal, S.; Khanal, P. (2025): *Storm Surge Resistance and Climate Adaptation of Coastal Dune Systems in the Baltic Sea – Analyses of Coastal Dynamics by Supervised Learning Approaches.* Studienprojekt.

Der vorliegende Fachbericht (Fleischer, D.; Stamm, J., 2026) wird als Anlage zum Sachbericht über die TIB Hannover veröffentlicht und schließt die Reihe der Projektveröffentlichungen ab.