

Gemeinsamer Schlussbericht

des Verbundvorhabens

Resistance and Climate Adaptation in Dune Systems (ResCAD)

Widerstand und Klimaanpassung von Dünensystemen

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Teilvorhaben A	03F0927A — Hydromorphologische Szenari- entwicklung des Dünenerosionsverhaltens unter Einsatz numerischer Modelle Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik (IWD) Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm (Koordination); Dipl.- Ing. Dirk Fleischer
Teilvorhaben B	03F0927B — Analyse der hydrodynamischen Randbedingungen und deren Auswirkungen auf die südwestliche Ostsee Hochschule RheinMain Prof. Dr.-Ing. Arne Arns; Simon Beckmann, M. Sc.
Assoziiert	Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg (StALU MM)
Begleitung	Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwe- sen (KFKI), Förderbereich MARE:N
Laufzeit	11/2022 – 12/2025 (inkl. zweimonatiger kostenneutraler Verlängerung)

„Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt unter den Förderkennzeichen 03F0927A und 03F0927B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.“

Dresden / Wiesbaden, im August 2026

1 Das Verbundvorhaben im Überblick

Aufgespülte Küstenschutzdünen zählen zu den wirksamsten naturbasierten Küstenschutzbauwerken der deutschen Ostseeküste. Ihre Bemessung beruht bislang auf empirischen, profilbasierten Verfahren, die veränderte hydrodynamische Randbedingungen – insbesondere den beschleunigten Meeresspiegelanstieg – nur eingeschränkt abbilden. Ziel des Verbundvorhabens ResCAD war die Erarbeitung robuster, ressourcenschonender und anwenderfreundlicher Praxishilfen, die die Dünenerosion infolge hydrodynamischer Extremereignisse auch unter veränderten klimatischen Randbedingungen genauer beschreiben und für Klimahorizonte bis 2100 bewertbar machen. Hierfür verband der Verbund zwei ineinandergreifende Ansätze: Das Teilvorhaben B (Hochschule RheinMain) generierte durch die hydrodynamische Rekonstruktion historischer Sturmhochwasser (Hindcast) eine umfassende Datenbasis und entwickelte über die statistische, multivariate Analyse den stochastischen Sturmhochwassergenerator (SHG) für synthetische Szenarien sowie darauf aufbauend das statistische Dünenerosionsmodell SanDrA („Sandy Dune Erosion Assessment“). Das Teilvorhaben A (TU Dresden) entwickelte die prozessbasierte hydro-morphodynamische Modellierung der Dünenerosion (XBeach, 1D/2DH) am Pilotstandort Ahrenshoop (Fischland-Darß-Zingst), schuf die zugehörige topo-bathymetrische Datengrundlage durch eigene Messkampagnen und verdichtete die Simulationsensembles zum Metamodell zur Dünenentwicklung (MDE) auf Grundlage von Klimaszenarien. Beiträge und Werkzeuge der Teilvorhaben sind im Folgenden mit (A) bzw. (B) gekennzeichnet; Einzelheiten zu den jeweiligen Komponenten enthalten die Abschlussberichte der Teilvorhaben A und B.

2 Projektübergreifende Zusammenarbeit

Die Zusammenarbeit im Verbund war durchgängig eng und arbeitsteilig organisiert:

- **Regelmäßige Abstimmung:** Projekttreffen des Verbunds (überwiegend online) sowie Sitzungen der projektbegleitenden Gruppe unter Leitung des StALU MM; fachliche Begleitung durch das KFKI mit jährlichen Statusvorträgen auf den KFKI-Seminaren 2024–2025.
- **Datenschnittstellen:** ResCAD-B stellte die hydraulischen Randbedingungen bereit (MIKE21-Hindcast historischer Sturmhochwasser sowie SHG-Szenariodateien); ResCAD-A überführte diese über automatisierte Importroutinen in XBeach-Simulationen und übergab im Gegenzug die prozessbasierten Simulationsergebnisse an ResCAD-B: Die 215 SHG-getriebenen Simulationen der Hindcast-Schnittstelle bildeten die Trainingsgrundlage des statistischen Dünenerosionsmodells; ergänzend übergebene geometrisch variable Szenarien-Ensembles konnten innerhalb der Projektlaufzeit nicht mehr einbezogen werden und stehen für die Weiterentwicklung des Modells bereit.
- **Flexible Aufgabenteilung bei den Naturmessungen:** Der Projektantrag ordnete einen wesentlichen Teil der messtechnischen Dokumentation der Untersuchungsgebiete – insbesondere die UAV-gestützte Aufnahme in engen zeitlichen Abständen und deren Überführung in georeferenzierte Geländemodelle – dem Teilvorhaben B zu. Im Projektverlauf übernahm das Teilvorhaben A diese Aufgaben vollständig und realisierte sämtliche Messkampagnen (UAV-Photogrammetrie und -Laserscanning, GNSS, terrestrisches Laserscanning, ereignisnahe Sondereinsätze); die erhobenen Daten standen dem Verbund uneingeschränkt zur Verfügung.

- **Gemeinsames Referenzereignis:** Das Sturmhochwasser vom 19.–21.10.2023 wurde von ResCAD-A messtechnisch unmittelbar dokumentiert und von ResCAD-B hydrodynamisch rekonstruiert – es diente beiden Teilvorhaben als gemeinsames Kalibrier- und Validierungsereignis und wurde gemeinsam publiziert (Beckmann et al. 2024, Die Küste 94).
- **Kostenneutrale Verlängerung:** Die Laufzeit des Verbunds wurde kostenneutral um 2 Monate bis zum 31.12.2025 verlängert, u. a. bedingt durch den institutionellen Wechsel des Teilvorhabens B von der Universität Rostock an die Hochschule RheinMain. Die Arbeit wurde mit unverändertem Team weitergeführt.

3 Gemeinsame Ergebnisse und Synergien

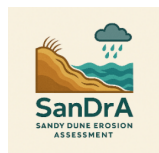
Das zentrale gemeinsame Ergebnis ist eine durchgängige, statistisch fundierte **Modellkette für Bemessung und Erhaltungsmanagement von Küstenschutzdünen**, bestehend aus den im Verbund entwickelten Praxiswerkzeugen: Die Prozesskette basiert auf synthetischen Sturmhochwasserszenarien des SHG (B) und prozessbasierten XBeach-Simulationen der Dünenerosion (A); hinzu kommen das statistische Dünenerosionsmodell SanDrA (B) für die szenariobezogene Bewertung und das datenbasierte Metamodell zur Dünenentwicklung MDE (A) mit invertierbaren Bemessungsformeln bis hin zu klimaangepassten Sollprofilen. Tabelle 1 stellt die drei Werkzeuge im Überblick vor.

Tabelle 1: Die Praxiswerkzeuge des Verbunds im Überblick



SHG – Stochastischer Sturmhochwassergenerator (B)

Basierend auf der multivariaten Statistik der Einwirkungen werden synthetische, statistisch und physikalisch plausible Sturmhochwasser-Ganglinien (Wasserstand, Dauer, Wellenhöhe, Peakperiode) generiert. Standalone-Programm mit grafischer und tabellarischer Ergebnisausgabe.



SanDrA – Sandy Dune Erosion Assessment (B)

Das statistische Regressionsmodell dient zur schnellen Abschätzung sturmflutbedingter Dünenerosionsvolumina und Profilveränderungen unter Berücksichtigung multipler Eingangsparameter. Standalone-Programm mit grafischer und tabellarischer Ergebnisausgabe.



MDE – Metamodell zur Dünenentwicklung (A)

Das datenbasierte Metamodell verdichtet die prozessbasierten XBeach-Simulationensensibles zu geschlossenen, invertierbaren Bemessungsformeln für Erosionsvolumen und Dünenrückgang – bis hin zu klimaangepassten Sollprofilen für Meeresspiegelhorizonte bis 2100. Standalone-Programm mit grafischer und tabellarischer Ergebnisausgabe.

Erst das Zusammenwirken beider Teilvorhaben ermöglichte die wesentlichen Ergebnisse:

- Die **Rekonstruktion und Projektion historischer Sturmhochwasser (1910–2023)** im Hindcast und unter einer Klimaprognose (MSL +1 m) schaffen eine einzigartige Datenbasis entlang der gesamten Ostseeküste und ermöglichen die lokale multivariate Analyse der Belastungsgrößen (B). Die Ergebnisse der Klimaprojektion verdeutlichen, dass sich als Reaktion auf einen erhöhten Meeresspiegel nicht nur die Scheitelwasserstände der Sturmhochwasser erhöhen, sondern sich auch die statistischen Zusammenhänge zwischen den Belastungsgrößen verändern. Zukünftige Bemessungen und Anpassungsstrategien sollten daher nicht allein auf einem Vorsorgemaß basieren, sondern die lokalen Veränderungen des gesamten hydrodynamischen Systems berücksichtigen.
- Die **morphodynamische Analyse der 83 seegangsgestützt simulierten Ereignisse (1941–2023)** verknüpfte die hydrodynamische Rekonstruktion (B) mit der morphodynamischen Simulation (A) und ermöglichte erstmals eine ereignisstatistische Einordnung der Dünenerosion am Pilotstandort.
- Die **SHG-Szenarien-Ensembles** (insgesamt 215 Szenarien) lieferten statistisch konsistente Belastungen für die Kalibrier-, Sensitivitäts- und Klimaanalysen von A – und die SHG-getriebenen Simulationen der Hindcast-Schnittstelle bildeten umgekehrt die Trainingsgrundlage des statistischen Dünenerosionsmodells von B. Für den SHG besteht prinzipbedingt keine direkte Validierungsmöglichkeit synthetischer Ereignisse; die Plausibilisierung erfolgt über die statistischen Kennwerte der zugrunde liegenden Beobachtungen.
- Die **Klimaszenarien-Analysen** quantifizieren den Anpassungsbedarf: Unter Annahme eines Meeresspiegelanstiegs von +0,80 m bis 2100 deuten die Modellergebnisse der betrachteten Szenarien darauf hin, dass die Küstenschutzdünen mit zusätzlich rund 100 m³ Sediment je laufenden Meter ihre heutige Widerstandsfähigkeit nahezu behalten. Verteilt über den Anpassungszeitraum von 74 Jahren und rund 100 km Dünenküste entspricht dieses Zusatzvolumen im Mittel etwa 135 000 m³/a – einer Erhöhung des derzeitigen jährlichen Aufspülbudgets von landesweit rund 500 000 m³/a (Stand 2021) um etwa ein Drittel. Das Bemessungsverfahren selbst wäre dafür nur geringfügig zu modifizieren.
- Das **gemeinsame Referenzereignis Oktober 2023** belegte die Leistungsfähigkeit der Kette: hydrodynamische Rekonstruktion (B, Willmott-Index $d = 0,97$), ereignisnahe Vermessung (A) und kalibrierte 2DH-Morphodynamik (A, Brier-Skill-Score bis 0,92).

Über die fachlichen Ergebnisse hinaus entstanden bleibende Synergien: eine standortbezogene Datenbasis beider Teilvorhaben (hydraulische Randbedingungen, Topobathymetrie, Simulationsserien), die quelloffene Python-Fassung der Auswerte- und Importkette (A) sowie Wissens-, Werkzeug- und Simulationsdatenbanken, die die Verbundergebnisse strukturiert und reproduzierbar verfügbar halten werden.

4 Verwertung

Die Verwertung erfolgt in enger Abstimmung mit der Küstenschutzverwaltung Mecklenburg-Vorpommerns: Die Werkzeuge der Modellkette adressieren unmittelbar die Ressourcenplanung von Sandaufspülungen, die klimaangepasste Bemessung von Küstenschutzdünen und perspektivisch eine prozessbasierte Erosions-Frühwarnung. Zur Operationalisierung der Modellkette wurden die entwickelten Komponenten in eigenständige Anwendungen überführt: Der stochastische Sturmhochwassergenerator (SHG) und das statistische Dünenerosionsmodell SanDrA werden den betreffenden Landesbehörden als Standalone-Applikationen zur Verfügung gestellt (B).

Die wissenschaftliche Verwertung ist über Publikationen, Qualifikationsarbeiten beider Standorte und laufende Promotionsvorhaben gesichert. Innerhalb des Projektzeitraums wurden von den Teilvorhaben insbesondere folgende Beiträge veröffentlicht:

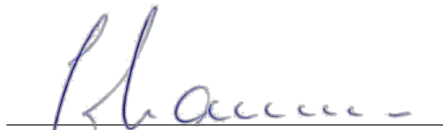
- gemeinsam: Beckmann, Arns, Fleischer u. Stamm (2024): Hydrodynamische Rekonstruktion des Sturmhochwassers vom 20./21. Oktober 2023. Die Küste 94 (doi:10.18171/1.094112);
- gemeinsam: Fleischer, Stamm, Arns u. Beckmann (2025): Reassessment of the Coastal Protection Dunes as Nature Based Solutions in the Baltic Sea for Climate Adaption. Coastal Engineering Proceedings 38 (doi:10.9753/icce.v38.sediment.94);
- (A) Fleischer, Arns u. Stamm (2024): Climate Adaptation Along the German Coast of the Baltic Sea. Proc. IAHR-APD, Chennai;
- (A) Fleischer u. Stamm (im Druck): Dune Dynamics under Extreme Storm Surges – Model-based Evidence on Soft Coastal Protection and their Implications for Regional Climate Adaptation. Buchkapitel, International Conference on Ocean Engineering (ICOE), IIT Madras;
- (B) Beckmann, Arns, MacPherson u. Jensen (2023): Possibility of statistical correction of hydrodynamic-numerical model results using the example of the storm surge of 1872. Die Küste 92 (doi:10.18171/1.092105);
- (B) Beckmann, Jensen, Arns u. Niehüser (2024): Integration von erweiterten Informationen in die statistische Analyse am Beispiel von Flensburg. Die Küste 94 (doi:10.18171/1.094111);
- (B) Beckmann (2025): Results of the hydrodynamic reconstruction of the storm surge of October 20/21, 2023 in the Baltic Sea [Datensatz]. PANGAEA (doi:10.1594/PANGAEA.974303, frei verfügbar unter CC-BY) – macht das gemeinsame Referenzereignis des Verbunds offen nachnutzbar.

Als gemeinsame Ergebnisveröffentlichung des Verbunds ist – dem für KFKI-Verbundvorhaben üblichen Format folgend – eine Beitragsserie in der Schriftenreihe „Die Küste“ in Vorbereitung: Kurzfassungen des Fachberichts mit je einem Beitrag pro Teilvorhaben sowie einem verbund-übergreifenden Übersichtsbeitrag. Einzelheiten enthalten die Sachberichte der Teilvorhaben; die vollständigen Publikations- und Qualifikationsdaten werden gesammelt als RIS-Datei übermittelt.

5 Fazit des Verbunds

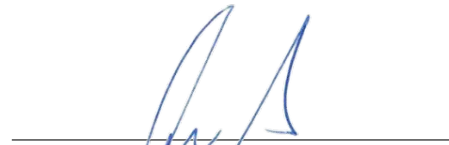
Das Verbundvorhaben hat seine Ziele erreicht: Mit der Kombination aus statistischer Einwirkungsbeschreibung (ResCAD-B) und prozessbasierter Morphodynamik (ResCAD-A) stehen der Küstenschutzpraxis erstmals durchgängige, aufeinander abgestimmte Werkzeuge zur Verfügung, um Dünenerosion ereignisbezogen zu bewerten, klimaangepasst zu bemessen und den langfristigen Ressourcenbedarf zu quantifizieren. Die Arbeitsteilung des Verbunds – Extremwertstatistik und Hydrodynamik bei ResCAD-B, Messung, Morphodynamik und Metamodellierung bei ResCAD-A – hat sich als tragfähig erwiesen; die etablierten Schnittstellen und die Datenbasis beider Teilvorhaben bilden eine belastbare Grundlage für Anschlussvorhaben entlang der deutschen Ostseeküste.

Dresden



Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm
(Teilvorhaben A, Koordination)

Wiesbaden



Prof. Dr.-Ing. Arne Arns
(Teilvorhaben B)