



# STENCIL

Strategies and Tools for Environment-Friendly  
Shore Nourishments as Climate Change Impact  
Low-Regret Measures



## Erfahrungen mit Sandersatz im Küstenschutz

Eine allgemeine Entscheidungsunterstützung für die Praxis mit aktuellen Erkenntnissen aus der Wissenschaft

STENCIL: Strategien und Werkzeuge für umweltfreundliche Sandaufspülungen als ‚low-regret‘ Maßnahmen unter Auswirkung des Klimawandels (FKZ: 03F0761A-D)

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Dieses Dokument wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens STENCIL erstellt, das unter dem Förderkennzeichen 03F0761A-D vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert wurde.

Autoren: Staudt, F., Ganal, C., Gijsman, R., Hass, H.C., Mielck, F., Schürenkamp, D., Tegethoff, K., Wolbring, J., Schlurmann, T., Schimmels, S.

Umschlagfoto: Vorderseite: Hondsbossche Duinen, Niederlande (Foto: F. Staudt); Rückseite: Sylt, Deutschland (Foto: R. Gieschen)

Zitationsvorschlag: Staudt, F., Ganal, C., Gijsman, R., Hass, H.C., Mielck, F., Schürenkamp, D., Tegethoff, K., Wolbring, J., Schlurmann, T., Schimmels, S. (2019): Erfahrungen mit Sandersatz im Küstenschutz. Eine allgemeine Entscheidungsunterstützung für die Praxis mit aktuellen Erkenntnissen aus der Wissenschaft. Hannover.

Die Autoren danken Jannes Fröhlich (WWF Deutschland) sowie den Mitgliedern der projektbegleitenden Gruppe des Forschungsvorhabens für Anmerkungen und Kommentare zum Inhalt der Broschüre.

Stand: Oktober 2019

# Inhalt

Einleitung .....	3
Methodik.....	5
Sandersatz für den Küstenschutz.....	6
Entnahmeverfahren .....	9
Marine Tiefenentnahme.....	10
Marine Flächenentnahme .....	12
Terrestrische Sande .....	13
Aufspülverfahren .....	15
Strandaufspülung.....	16
Vorstrandaufspülung .....	18
Dünenverstärkung .....	20
Mega-Aufspülung .....	22
Zusammenfassung .....	24
Literaturnachweis .....	26



## Einleitung

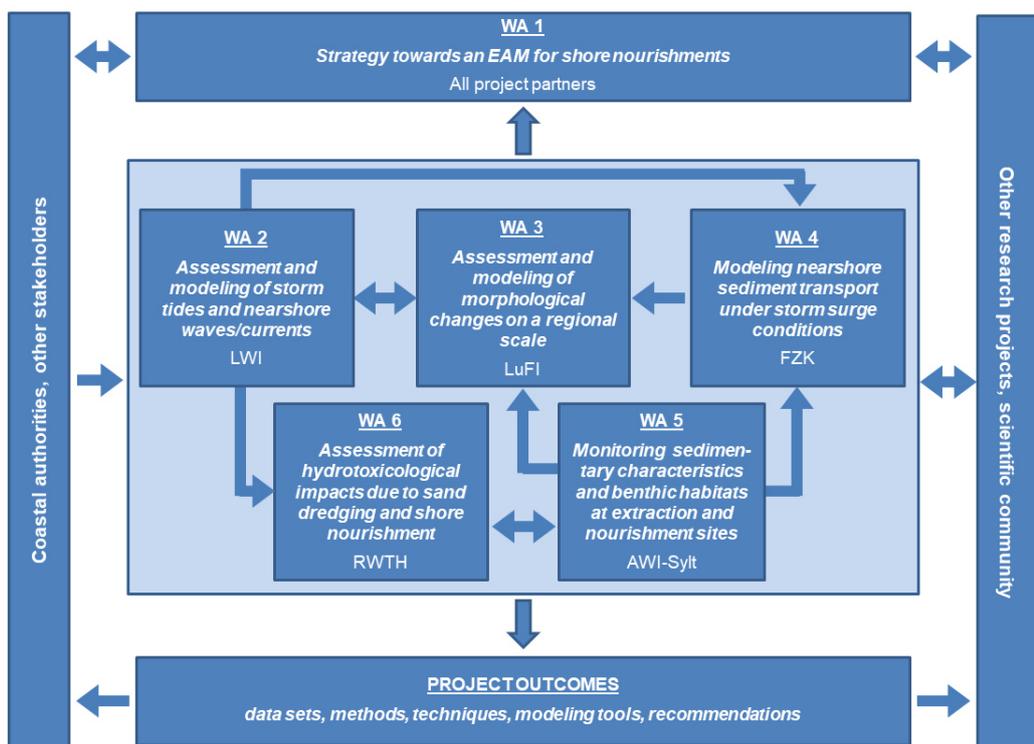
Sandersatzmaßnahmen oder Sandaufspülungen, d.h. das künstliche Aufspülen von Sand an ausgewählten Küstenstreifen, werden seit mehreren Jahrzehnten in vielen Küstengebieten routinemäßig durchgeführt. Gründe für die Durchführung von Aufspülungen sind u.a. das Ausgleichen von sturmbedingter Küstenerosion, der Schutz von Infrastruktur durch die Verstärkung des davorliegenden Strandabschnittes oder eine Verbreiterung des Strandes für touristische Zwecke. Vor allem in Hinblick auf den steigenden Meeresspiegel und den Paradigmenwechsel von harten Küstenschutzmaßnahmen, wie z.B. Deckwerke, Bühnen, Strandmauern etc., hin zu naturnahen, anpassungsfähigen Alternativen rücken Sandaufspülungen, die für gewöhnlich zwischen Vorstrand, Strand und Dünen vorgenommen werden, als weitestgehend umweltfreundliche Variante des Küstenschutzes in den weltweiten Fokus. Im Gegensatz zu harten Strukturen besitzen Sandaufspülungen jedoch eine verminderte Lebensdauer: durch den stetigen Einfluss von Strömungen, Wellen und Wind im dynamischen Küstensystem wird die Aufspülung abgetragen und muss nach kürzeren Zeiträumen erneuert werden.

Die langfristigen Umweltauswirkungen von Sandentnahme und Sandaufspülungen sind weitestgehend unbekannt. Obwohl die Erholung der lokalen Umwelt nach der Sandentnahme bzw. -aufspülung regelmäßig Gegenstand der Forschung ist, spielt diese in der Praxis bei der Planung und Genehmigung häufig nur eine untergeordnete Rolle, da die sichtbaren Vorteile einer Aufspülung gegenüber harten Schutzmaßnahmen überwiegen.

Die Entwicklung neuer Raumplanungsstrategien, wie z.B. dem Integrierten Küstenzonenmanagement (IKZM) oder dem ökosystembasierten Management (*Ecosystem Approach to Management*, EAM), und Umweltrichtlinien, wie z.B. der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL), der Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie (FFH-Richtlinie) und der Vogelschutzrichtlinie der EU, erfordert neue Konzepte, Modelle und Werkzeuge zur Umsetzung von nachhaltigen und umweltfreundlichen Küstenschutzmaßnahmen. Das Forschungsprojekt STENCIL („Strategien und Werkzeuge für umweltfreundliche Sandaufspülungen als ‚low-regret‘ Maßnahmen unter Auswirkung des Klimawandels“) hatte die Zielsetzung, geeignete Konzepte und Methoden zu entwickeln, mit deren Hilfe Sandaufspülungen möglichst umweltfreundlich und nachhaltig im Einklang mit dem Ökosystem geplant, überwacht und durchgeführt werden können. Durch die Zusammenarbeit zwischen dem Forschungszentrum Küste (FZK, Leibniz Universität Hannover/TU Braunschweig), dem Ludwig-Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen (LuFI, Leibniz Universität Hannover), dem Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI, TU Braunschweig), dem Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft sowie dem Institut für Umweltforschung der RWTH Aachen, und dem Alfred-Wegener-Institut (AWI Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung) vereint das Projekt die wissenschaftliche Expertise aus dem Küsteningenieurwesen sowie den Geo- und Umweltwissenschaften. In den Teilprojekten wurden u.a. Modelle für die Hydrodynamik und den Sedimenttransport im Küstenbereich (und damit das Verhalten von Aufspülkörpern) und eine Methode zur Schadstoffanalyse von Sedimenten entwickelt. In einem der Teilprojekte wurde die Wiederverfüllung von Sandentnahmestellen vor der Küste von Sylt in regelmäßigen Abständen untersucht. Das Projekt wurde von Oktober 2016 bis September 2019 vom BMBF gefördert und hat bislang eine Reihe an wissenschaftlichen Publikationen und Konferenzbeiträgen produziert (s. [1]–[3] sowie [www.stencil-project.de](http://www.stencil-project.de)).

Gemeinsam haben die STENCIL-Projektpartner die gängigen Prinzipien und Techniken zu Sandaufspülungen in Deutschland, Dänemark, den Niederlanden, Spanien, Großbritannien, den USA und Australien sowie aktuelle Forschungsergebnisse zu Sandersatzmaßnahmen zusammengetragen und analysiert. Besonderes Augenmerk lag dabei auf der Berücksichtigung und Überwachung der Meeresumwelt bei der Sandentnahme und -aufspülung, d.h. die Konformität des Verfahrens mit dem EAM für Küstenzonen. Basierend auf den Ergebnissen der Recherche und den Forschungsergebnissen aus den einzelnen STENCIL-Arbeitspaketen wurden unterschiedliche Verfahren zur Sandentnahme und Sandaufspülung analysiert und zu beachtende Aspekte der Umweltverträglichkeit und Eignung zum Küstenschutz verglichen. Das vorliegende Dokument trägt die Ergebnisse dieser Recherche und deren vergleichende Einordnung aus wissenschaftlicher Perspektive zusammen.

Überblick über die Teilprojekte (WA 1–6) im Forschungsprojekt STENCIL



# Methodik

Für die vergleichende Analyse der verschiedenen Entnahme- und Aufspülverfahren bietet sich die sogenannte SWOT-Analyse an: SWOT steht für strengths, weaknesses, opportunities and threats – Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken. Obwohl dieses Planungstool zur Optimierung von Unternehmen entwickelt wurde, lässt es sich ebenso auf Prozesse oder Verfahren, wie z.B. Sandentnahme und -aufspülung anwenden. Mit dem Tool werden bekannte Stärken eines Unternehmens oder Verfahrens analysiert, um daraus Chancen für die Zukunft zu entwickeln. Parallel dazu werden die Schwächen analysiert, um abzuleiten, inwiefern diese zukünftige Risiken darstellen könnten.

Angelehnt an eine Studie des WWF, die verschiedene ökosystembasierte Maßnahmen zur Anpassung von weichen Küsten an den Klimawandel betrachtet [4], wird in der vorliegenden Broschüre jedes Entnahme- und Aufspülverfahren aus den verschiedenen Blickwinkeln analysiert.

	Nützlich	Schädlich
Heutige (bekannte) Eigenschaften des Verfahrens	Stärken	Schwächen
Zukünftige Entwicklung des Verfahrens, die unter Einbezug weiterer externer Faktoren abgeschätzt wird	Chancen	Risiken

Muster für eine SWOT-Analyse für einzelne Verfahren

Die Broschüre soll dem Leser einen objektiven Überblick über den aktuellen Wissensstand zum Thema Sandaufspülung für den Küstenschutz geben. Auf eine abschließende Bewertung oder Empfehlung der verschiedenen Verfahren wird bewusst verzichtet; der Leser kann die Verfahren jedoch anhand ihrer Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken für den eigenen Anwendungsfall selbst bewerten.

Im nachfolgenden Ergebnisteil werden zunächst die Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken von Sandersatzmaßnahmen (gegenüber anderen, harten Küstenschutzmaßnahmen) analysiert. Darauf folgend werden drei verschiedene Verfahren zur Materialentnahme (i. marine Tiefenentnahme, ii. marine Flächenentnahme, iii. terrestrische Sande) und vier verschiedene Aufspülvarianten (i. Strandaufspülung, ii. Vorstrandaufspülung, iii. Dünenverstärkung, iv. Mega-Aufspülung) behandelt. Zu jeder beschriebenen Variante gibt es eine Einleitung und eine kurze Zusammenfassung der Ergebnisse. Besonderes Augenmerk bei der Analyse der Maßnahmen liegt auf der physikalischen (d.h. hydro- und morphodynamischen) und ökologischen Nachhaltigkeit sowie auf den Auswirkungen auf die Gesellschaft (z.B. auf Wirtschaft, Tourismus etc.).

## Sandersatz für den Küstenschutz

6

Sandersatzmaßnahmen werden in vielen Regionen weltweit genutzt, um die Erosion sandiger Küsten auszugleichen oder dieser vorzubeugen. Es gilt als hinlänglich bekannt, dass Sandaufspülungen (Vorstrand und Strand) einen wesentlichen Beitrag zur Erosionssicherung bzw. Wiederherstellung von Küstenlinien sowie zur Sicherung des Hinterlands vor Überflutungen (Dünenaufbau) leisten. Im Gegensatz zu harten Küstenschutzmaßnahmen können sich Sandaufspülungen an die angreifenden Kräfte (Wellen, Strömungen) und den variierenden Meeresspiegel anpassen bzw. entsprechend verformen. Durch die naturnahe Gestaltung und die Verwendung natürlicher Materialien fügt sich Sandersatz besser in das Landschaftsbild der Küste ein und erzeugt keine negativen Randeffekte (z.B. Lee-Erosion oder Kolk, wie teilweise an Strandmauern oder Buhnen zu finden). Da der Sand im dynamischen Küstensystem wieder abgetragen wird, müssen Sandersatzmaßnahmen regelmäßig erneuert werden, um die Küstenschutzfunktion für die dahinterliegende Infrastruktur zu erhalten. Entsprechend ist der Küstenschutz mittels Sandaufspülungen in Analogie zu harten Küstenschutzmaßnahmen eine Daueraufgabe. Die Wiederholungsaufspülungen werden im Küstenmanagement berücksichtigt und sind mancherorts jährlich notwendig, was einen hohen Aufwand und laufende Kosten für die Instandhaltung verursacht. Sandersatz ist dadurch vor allem geeignet, um vorübergehenden Sandmangel auszugleichen [5]. Sandaufspülungen können sowohl als alleinige Küstenschutzmaßnahme genutzt werden als auch zum Schutz von anderen Strukturen (z.B. Buhnen oder Deckwerken) zum Einsatz kommen. In dieser Schutzfunktion schwächt der aufgespülte Sand den angreifenden Seegang ab und verlängert somit die Lebensdauer der dahinterliegenden Struktur.

Sandersatzmaßnahme auf Sylt (Foto: R. Gieschen)



Weltweit gibt es Unterschiede in den Sandaufspülstrategien: So sind in einigen Ländern teils jährliche Wiederholungsaufspülungen vorgesehen (Deutschland, Belgien, Dänemark, USA), um die sandigen Küsten nachhaltig zu stärken und der drohenden Erosion vorzubeugen; in anderen Regionen (z.B. Spanien, Australien) werden Aufspülungen oftmals als Reparaturmaßnahmen durchgeführt, wenn Strandabschnitte z.B. durch Sturmereignisse bereits stark erodiert sind. In Spanien ist der Tourismus einer der wichtigsten Wirtschaftszweige, weshalb Strandaufspülungen dort vor

allem durchgeführt werden, um die Attraktivität eines Strandabschnittes für Besucher zu erhalten bzw. zu steigern.

Die Kenntnisse der ökologischen Auswirkungen von Sandentnahme und -aufspülung beschränken sich bisher häufig auf die Beeinflussung des Lebensraums oder der Lebensumstände einzelner Arten (sog. *Schlüsselarten*). Gerade die im und auf dem Sediment lebenden Tierarten (*Benthos*) werden durch eine Aufspülmaßnahme gestört, aber auch die Fauna auf höheren trophischen Ebenen (Fische, Seevögel und andere Meeres- und Küstenbewohner) können beeinträchtigt werden. Während sich einige Arten zeitnah wieder erholen, verschwinden andere aus der betroffenen Region, was dazu führen kann, dass neue Arten ihren Lebensraum übernehmen. Die Regenerationsraten der Lebewesen an den Entnahmestellen sind – neben den sedimentologischen und hydrografischen Bedingungen vor Ort – stark abhängig von der Entnahmemethode, die im nächsten Kapitel weiter beschrieben wird. Vor allem die langfristigen ökologischen Auswirkungen sind schwer abschätzbar bzw. zu verallgemeinern, da 1) vielerorts nur wenige Daten zur Sedimentdynamik und den natürlichen Lebensgemeinschaften vorliegen (und Veränderungen deshalb schwer zu evaluieren sind) und 2) die biologischen Zusammenhänge (z.B. innerhalb der Nahrungskette) noch unbekannt sind, sodass das volle Ausmaß der Auswirkungen nicht erkannt wird [6].

<b>Stärken</b>	<b>Schwächen</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Funktionelle und flexible Maßnahme ohne negative Randeffekte wie z.B. Kolk</li> <li>▪ Morphologische Nachhaltigkeit durch Aufstockung des Sedimenthaushalts im aktiven Küstenprofil</li> <li>▪ Erhalt des naturnahen Charakters des Strandes</li> <li>▪ Kein Fremdkörper, lediglich Umlagerung von natürlichem Material innerhalb des Systems</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kurze Verweildauer im Gegensatz zu harten Strukturen ⇒ regelmäßige Wiederholungsaufspülungen erforderlich</li> <li>▪ Wiederholter Eingriff in das Ökosystem</li> <li>▪ Hohe laufende Kosten</li> <li>▪ Schwer zu bemessen im Gegensatz zu harten Strukturen</li> </ul>
<b>Chancen</b>	<b>Risiken</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Anpassung an den steigenden Meeresspiegel</li> <li>▪ Kurzfristige Reduktion der Wellenenergie am Strand</li> <li>▪ Langfristige (positive) Beeinflussung des Sedimentbudgets am gesamten Küstenabschnitt</li> <li>▪ Attraktivitätssteigerung für Strandbesucher</li> <li>▪ Erhalt des Habitats für natürlich an Sandstränden vorkommenden Benthos</li> <li>▪ Bildung neuer Habitate im Entnahmegebiet möglich, z.B. durch das Freispülen von Steinen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Langfristige ökologische Beeinträchtigung der Entnahmestelle und der Aufspülstelle</li> <li>▪ Langfristige (negative) Beeinflussung des Sedimentbudgets am gesamten Küstenabschnitt</li> <li>▪ Begrenzte Ressourcenverfügbarkeit und damit steigende Kosten</li> <li>▪ Gefahr, dass Aufspülungen als langfristige, vermeintlich nachhaltige Lösung in dicht besiedelten Küstenregionen akzeptiert werden, ohne Alternativen zu entwickeln</li> </ul>

**Fazit**

Sandersatzmaßnahmen besitzen eine Reihe von Stärken gegenüber starren Küstenschutzmaßnahmen und eignen sich gut, um vorübergehenden Sandmangel auszugleichen. Bei einer langfristigen Aufspülstrategie könnten die laufenden Kosten die ökonomische Nachhaltigkeit stark einschränken. Chancen und Risiken für die Küstenökologie sind bei aktuellem Kenntnisstand nur schwer abschätzbar.



# Entnahmeverfahren

Zur Erhaltung der Küste durch Sandaufspülungen werden erhebliche Sandmengen benötigt, die entweder im bestehenden System regelmäßig umgelagert oder dem System durch Zugabe im Rahmen eines Sedimentmanagements hinzugefügt werden. Sandressourcen können sowohl an Land (*onshore*) als auch im Meer (*offshore*) abgebaut werden, wobei das Material für Sandaufspülungen derzeit überwiegend aus marinen Lagerstätten stammt. Beim marinen Abbau wird der Sand mit unterschiedlichen Techniken vom Meeresboden gesaugt und an einen anderen Ort verbracht. Die Abbaumengen mariner Sand- und Kiesvorkommen sind in den letzten Jahren deutlich gestiegen [7], [8]; alleine auf dem nordeuropäischen Kontinentalschelf werden jährlich mehr als 40 Mm<sup>3</sup> Sand- und Kiesressourcen abgebaut [9], [10]. Zudem wird im Zusammenhang mit der Entwicklung der Küstenzone und der globalen Bauindustrie eine weiter steigende Nachfrage nach Sandressourcen prognostiziert. Hierdurch werden ebenfalls die grundlegende Verfügbarkeit und die konkurrierenden Ansprüche auf Sandvorkommen und deren -nutzungen adressiert [11], [12].

Die Entnahme von Sand am Meeresboden führt zu morphologischen, hydrodynamischen, chemischen und biologischen Veränderungen. Bislang gibt es europaweit keine einheitlichen Regelungen zur Durchführung und Überwachung von Sandentnahmen. Die steigende Nachfrage, der Schutz des Küstenökosystems und unterschiedliche Nutzungsinteressen erfordern das Management von Sandentnahmen, inklusive der Berücksichtigung der Nachhaltigkeit der Entnahmen und ökologischen Aspekten [10]. Die marine Sandentnahme hat direkte Auswirkungen auf die benthischen Habitate, da Organismen eingesaugt und die Bathymetrie und Sedimentzusammensetzung verändert werden können. Indirekte Effekte entstehen durch Trübungsfahnen, Schadstoffauslösung, Bedeckung und Unterwassergeräusche. Vom Lebensraumverlust oder dessen signifikanter Veränderung sind die gesamte Bodenfauna sowie Fische und Vögel im Entnahmeumfeld betroffen. Eine hydraulische Mitnahme von marinen Organismen kann über das Saugfeld erfolgen, das während der Entnahmearbeiten erzeugt wird [13], [14], wodurch Biomasse und Siedlungsdichte im Abbaubereich reduziert werden [15]. Trübungsfahnen und Unterwassergeräusche können Verhaltensreaktionen von marinen Organismen hervorrufen [14], [16], [17]. Werden festsitzende (*sessile*) benthische Lebewesen, wie z.B. bestimmte Muschelarten oder Schwämme, von Sediment überdeckt, kann dies ihre Atmung und ihre Filtermechanismen beeinträchtigen [14]. Durch die Baggeraktivitäten kann es des Weiteren zu einer Schadstoffauslösung von im Sediment gebundenen organischen und anorganischen Verunreinigungen und einer Verringerung des Sauerstoffgehalts in der Wassersäule kommen.

Das morphologische und ökologische Regenerationspotenzial der Entnahmestelle hängt stark von den lokalen Bedingungen ab [18]–[20]. Morphologische Regenerationsraten (d.h. Wiederverfüllungsraten) variieren in Abhängigkeit der Entnahmetechnik, des vorhandenen Materials, der hydrodynamischen Bedingungen und der daraus resultierenden natürlichen morphologischen Aktivität. Die Art des neu an der Entnahmestelle akkumulierten Sediments, die Sensibilität der Organismen gegenüber der anthropogenen Störung sowie die Transportprozesse bestimmen die Erholung der benthischen Gemeinschaften. Eine schnelle Regeneration kann beispielsweise in Gebieten mit mobilem Sediment und regelmäßig gestörten Bereichen, die durch opportunistische Arten gekennzeichnet sind, stattfinden. Stabile Lebensräume mit grobem Kies hingegen weisen meist ein schlechteres Regenerationspotenzial auf [15], [20]. Allgemein läuft die Regeneration zunächst schneller ab und verlangsamt sich dann stetig [21]. Für marine Sandentnahmen wird zwischen Tiefenentnahmen und Flächenentnahmen unterschieden. Die Vor- und Nachteile der einzelnen Entnahmeverfahren werden im Nachfolgenden analysiert.

## Marine Tiefenentnahme

10

Marine Tiefenentnahmen werden mit stationären Stechkopfbaggern (Anchor/Cutter Suction Dredger) oder Saugbaggern durchgeführt. Stechkopfbagger werden insbesondere bei hartem Untergrund verwendet [22], [23]. Durch marine Tiefenentnahmen können am Meeresgrund Entnahmetrichter mit einer Tiefe von bis zu 20 Metern entstehen [1]. Bei dieser Vorgehensweise bleibt der direkte Eingriff am Meeresgrund auf eine im Vergleich zur marinen Flächenentnahme (s.u.) kleinere Fläche beschränkt, die langfristigen ökologischen Effekte werden jedoch größer eingeschätzt als bei der Flächenentnahme [9].

Innerhalb der Entnahmetrichter treten im Vergleich zur Umgebung reduzierte Fließgeschwindigkeiten auf [10], [19], [24]. Generell kann durch die Veränderung der Fließgeschwindigkeit die Ökologie durch Schichtung des Wassers, Transport und Sedimentation von Feinmaterial und die Morphologie des Meeresbodens beeinflusst werden. In den tieferen Bereichen der Entnahmetrichter besteht ein erhöhtes Risiko für Sauerstoffmangel, das durch die Akkumulation von organischem Feinmaterial noch verstärkt werden kann [24].

Die Wiederverfüllung der Entnahmetrichter wird von den lokalen Bedingungen kontrolliert. Oftmals sind die Trichter auch nach Jahrzehnten noch sichtbar. Die Hauptverfüllungsprozesse in Gebieten mit geringer Sedimenttransportkapazität sind Hangrutschungen [25]; zudem findet auf Grund der reduzierten Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb der Trichter eine Ablagerung von Feinmaterial statt [1]. Durch eine Veränderung des Untergrunds, insbesondere der Sedimentzusammensetzung, kann es zu einer langfristigen Veränderung der Zusammensetzung und Biomasse der benthischen Gemeinschaften kommen.

Saugbagger vor Sylt (Foto:  
M. Kumblehn)



Durch die Ablagerung von Feinmaterial kann außerdem der Sauerstoffaustausch der obersten Schicht beeinträchtigt werden, sodass sich anoxische Verhältnisse entwickeln, welche die Wiederansiedlung von benthischen Organismen behindern. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, dass das Feinmaterial Verunreinigungen wie Nährstoffe, Schwermetalle oder pathogene Bakterien enthält, welche eine Gefahr für die Umwelt darstellen.

Die natürliche Wiederverfüllung der Mulden und Trichter mit Sediment aus der Umgebung kann zu einem Sedimentverlust in der Küstenregion führen und dadurch Erosionsprozesse begünstigen, was bei der Auslegung der Entnahmestelle berücksichtigt werden sollte [26]. Des Weiteren kann Offshore-Infrastruktur, wie z.B. Seekabel und Pipelines durch die resultierenden Sedimentumlagerungen beschädigt werden.

<p style="text-align: center;"><b>Stärken</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Große Entnahmemengen bei lokaler Begrenzung der Fläche des „direkten“ Eingriffs</li> <li>▪ Entnahmeverfahren auch bei großen Wassertiefen möglich</li> <li>▪ Gute Qualität im Vergleich zu terrestrischen Sanden</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Schwächen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Der ökologische Eingriff wird als signifikant angesehen</li> <li>▪ Entstehung tiefer Trichter</li> <li>▪ Stationäre Baggerschiffe sind anfällig für Wellengang und Strömung</li> <li>▪ Geringes Regenerationspotenzial und lange Regenerationszeiträume</li> <li>▪ Veränderte Strömungsverhältnisse</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>Chancen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Erschließung zusätzlicher Sandressourcen</li> <li>▪ Kurze Transportwege im Vergleich zu terrestrischen Sanden</li> <li>▪ Änderung der Sedimenteigenschaften und der Artenzusammensetzung des Benthos</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Risiken</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Negative Auswirkungen auf Sedimenthaushalt der Küstenzone</li> <li>▪ Konflikte mit anderen Nutzungen</li> <li>▪ Ablagerung von Feinmaterial und daran gebundenen Schadstoffen in Trichtern</li> <li>▪ Änderung der Sedimenteigenschaften und der Artenzusammensetzung des Benthos</li> <li>▪ Reduzierter Sauerstoffgehalt in den Trichtern</li> <li>▪ Reduzierung der Biodiversität und der Biomasse</li> </ul>

### Fazit

Marine Tiefenentnahmen erlauben maximale Materialgewinnung bei einer Minimierung der direkt beeinflussten Fläche. Sie können jedoch gravierende morphologische und ökologische Auswirkungen haben. Eine umfassende morphologische und ökologische Regeneration der Entnahmestellen ist oft nicht möglich oder dauert sehr lange (> 50 Jahre).

## Marine Flächenentnahme

12

Marine Flächenentnahmen können mit Schleppkopfbaggern oder Schleppsaugbaggern (Trailer Hopper Suction Dredger) durchgeführt werden. Im Vergleich zur *stationären* Tiefenentnahme wird bei diesem *dynamischen* Verfahren nur die oberste Schicht des Meeresbodens vom fahrenden Schiff aus entnommen. Die Schiffe hinterlassen dabei 2-3 Meter breite und 0,2-0,5 Meter tiefe Furchen mit mehreren 100 Metern Länge [25]. Die Gewinnung von Sand mit dem Schleppkopfbagger ist in Europa deutlich weiter verbreitet als die marine Tiefenentnahme [27].

Ein erheblicher Nachteil der Methode ist die großflächige Zerstörung der Bodenfauna, die aus der flächenintensiven Sandgewinnung resultiert. Die Furchen, die bei der Entnahme mit einem Schleppsaugbagger entstehen, sind jedoch weniger beständig als die Entnahmetrichter nach einer stationären Entnahme, weshalb die Regeneration nach einer dynamischen Entnahme prinzipiell schneller verläuft als bei Verwendung eines stationären Saugbaggers [25]. Entsprechend gilt der ökologische Eingriff als geringer. In Gebieten mit schwacher Sedimentdynamik sind die Spuren der Entnahmeaktivität aber auch hier noch Jahre später erkennbar [28]. Oftmals tritt nach der Flächenentnahme ebenso wie bei den marinen Tiefenentnahmen eine Verfüllung mit feinerem Sediment auf [18]. Damit einhergehend kann es auch hier zu einer Veränderung des Benthos kommen.

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Keine tiefen Entnahmetrichter</li><li>▪ Der ökologische Eingriff wird im Vergleich zur Tiefenentnahme als geringer angesehen</li><li>▪ Baggerschiffe können auch bei stürmischen Bedingungen betrieben werden</li><li>▪ Gute Qualität im Vergleich zu terrestrischen Sanden</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Hohe Flächeninanspruchnahme und dadurch begrenzte Entnahmemengen</li><li>▪ Große Ausdehnung der Fläche des „direkten“ Eingriffs</li><li>▪ Großflächige Störung des Meeresbodens durch Furchen</li><li>▪ Regeneration von lokalen Bedingungen abhängig</li></ul>
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Schnelle, annähernd vollständige Regeneration der benthischen Gemeinschaften möglich</li><li>▪ Kurze Transportwege im Vergleich zu terrestrischen Sanden</li><li>▪ Änderung der Sedimenteigenschaften und der Artenzusammensetzung des Benthos</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Negative Auswirkungen auf Sedimenthaushalt der Küstenzone</li><li>▪ Konflikte mit anderen Nutzungen</li><li>▪ Ablagerung von Feinmaterial und daran gebundenen Schadstoffen in Furchen</li><li>▪ Änderung der Sedimenteigenschaften und der Artenzusammensetzung des Benthos</li><li>▪ Mobilisierung von Schadstoffen</li><li>▪ Reduzierung der Biodiversität und der Biomasse</li></ul>

### Fazit

Marine Flächenentnahmen führen zu einer großflächigen Beeinflussung des Meeresbodens inklusive der benthischen Gemeinschaften. Das Regenerationspotenzial hängt stark von den lokalen Gegebenheiten ab, ist aber generell höher einzustufen als bei Tiefenentnahmen.

## Terrestrische Sande

Neben der marinen Sandgewinnung können auch terrestrische Sande für Sandersatzmaßnahmen genutzt werden, was in Deutschland jedoch nur in geringem Umfang geschieht. Die Gesamtkosten für eine Aufspülung mit terrestrischen Sanden sind durch die Konkurrenz mit der Bauindustrie und höhere Transportkosten deutlich höher als bei Nutzung mariner Sande.

Terrestrische Sande werden im Tagebau gewonnen, welcher immer mit signifikanten Umweltein-  
griffen verbunden ist. Der im Tagebau abgebaute Sand befindet sich meist in weiter Entfernung zu  
seinem Einsatzort an der Küste und muss zunächst dorthin transportiert werden, was ein zusätzli-  
ches Verkehrsaufkommen und eine höhere Umweltbelastung bedeutet.

Für die Effektivität und die Umweltverträglichkeit von Sandaufspülungen ist die Ähnlichkeit des  
verwendeten Materials mit dem natürlich an der Küste vorkommenden ein maßgeblicher Faktor  
(*Kompatibilität*). Küsteneigene Sande, die am Meeresboden in Küstennähe gewonnen werden,  
sind dem natürlichen Küstensediment in Zusammensetzung und Mineraliengehalt meist sehr ähn-  
lich. Terrestrisch gewonnenes Material weist teilweise höhere Ton- und Schluffanteile, andere  
Kornformen oder eine andere mineralische Zusammensetzung auf [9] und muss entsprechend  
geprüft werden. Zusätzlich muss sichergestellt werden, dass das fremde Material frei von Konta-  
minierung ist.



Ein Baggersee zur terrestrische Sand- und Kiesentnahme (Foto: F. Staudt)

<b>Stärken</b> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Keine primäre Beeinflussung von marinen Ökosystemen und Organismen</li><li>▪ Sandabbau ist selten flächig, daher geringere Beeinflussung des Quellgebietes</li></ul>	<b>Schwächen</b> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Eingriff ins terrestrische Ökosystem</li><li>▪ Eintrag von „Fremdmaterial“ in die Küstenumwelt</li><li>▪ Meist weitere Transportwege, dadurch höhere Umweltbelastung</li><li>▪ Überprüfung der Sedimenteigenschaften und eventuelle Behandlung notwendig</li></ul>
<b>Chancen</b> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Schonung mariner Ressourcen</li></ul>	<b>Risiken</b> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Begrenzte Ressourcenverfügbarkeit und damit steigende Kosten</li></ul>

**Fazit**

Die Gewinnung terrestrischer Sande hat nur geringe Auswirkungen auf das marine Ökosystem. Diese Methode verursacht jedoch hohe Kosten und erfordert unter Umständen weite Transportwege. Terrestrische Sande stellen einen Eintrag von Fremdmaterial in das Küstensystem dar und besitzen oftmals eine schlechtere Kompatibilität als marine Sande.

## Aufspülverfahren

Die allgemeine Bezeichnung „Sandersatz“ umfasst sowohl das Platzieren von Sediment am Strand (Strandaufspülung) und in den hinteren Strandregionen (*supralitorale* Aufspülung oder Dünenverstärkung) als auch seeseitig der Küstenlinie (*sublitorale* Aufspülung oder Vorstrandaufspülung) [29]. Der Spülsand wird entweder per Regenbogen-Verfahren (d.h. in einem hohen Bogen vom Bug des Baggerschiffs) auf den Strand bzw. Vorstrand gespült, über eine Rohrleitung auf den Strand transportiert oder direkt im Vorstrand aus dem Laderaum des Baggerschiffs unterhalb der Wasserlinie verklappt.

Trotz der vermeintlich weichen Charakteristik von Sandaufspülungen stellen sie einen Eingriff in das Ökosystem dar. Als zusätzliches Habitat, das durch großflächige Aufspülungen, wie etwa den „Sandmotor“, an der niederländischen Küste entsteht, oder als Reparaturmaßnahme von Strand- und Dünenlebensräumen, die durch Erosion verloren gegangen sind, erfüllen sie potenziell einen weiteren Nutzen neben dem Küstenschutz und der touristischen Wertschöpfung des Strandes [4]. Negative Folgen beinhalten wiederum die Beeinträchtigung der Habitats an der Aufspülstelle, die besonders während und unmittelbar nach der Bauzeit auftreten. Hierbei hat die Lage der Sandaufspülung im Strandprofil einen wesentlichen Einfluss auf die Regeneration der dort ansässigen Lebensgemeinschaften [30]. Insbesondere die Organismen im oberen Strandbereich am Übergang zu den Dünen erholen sich nach einer Aufspülung in diesem Bereich nur mühsam oder gar nicht. Gleichzeitig wurde an einigen Aufspülorten bereits wenige Monate nach der Aufspülung eine vollständige Erholung im unteren Strandbereich, der Wellenauflaufzone, nachgewiesen, was auf die hohe Anpassbarkeit der Arten an die dortige Sedimentdynamik zurückzuführen ist (z.B. [6], [31]). Wird eine ausreichende Pause zwischen mehreren, aufeinander folgenden Strandaufspülungen eingeplant, so können sich dezimierte Populationen erholen und langsam fortpflanzende Lebewesen reproduzieren und wiederansiedeln. Um die Möglichkeit zur Erholung weitergehend zu verbessern, wird in der Literatur empfohlen, bereichsweise keine Aufspülung vorzunehmen, so dass aus diesen (unbeeinträchtigten) Bereichen eine Rekolonisierung der aufgespülten Bereiche erfolgen kann. Gleiches gilt für die Schichtdicke des aufgespülten Materials: Je geringer diese ausfällt, desto niedriger ist die Sterberate der dort lebenden Organismen in Folge von Überdeckung bzw. Ersticken [30].

Ähnlich wie bei der Materialentnahme sind die Vor- und Nachteile sowie Chancen und Risiken der Aufspülstrategien direkt gekoppelt an die Bauausführung, Projektort, -zeit und -größe sowie die Eigenschaften des aufgespülten Sediments. Eine detaillierte Planung sowie die genaue Analyse und Abwägung aller Konsequenzen sind Voraussetzung für die nachhaltige und ökologische Durchführung einer Sandaufspülungsmaßnahme [32]. In diesem Kontext betont u.a. Nordstrom [33], dass insbesondere die kumulativen, langfristigen, ökologischen Beeinträchtigungen durch Aufspülmaßnahmen weitergehender Untersuchungen bedürfen. Die hydrodynamischen Prozesse an Vorstrand- und Strandaufspülungen wurden in STENCIL durch physikalische Modellversuche im Wellenkanal am LWI der TU Braunschweig vergleichend untersucht und in Hinblick auf die hydrodynamische Wirksamkeit der verschiedenen Aufspülstrategien bewertet. Auf den nachfolgenden Seiten werden die Vor- und Nachteile von Strandaufspülungen, Vorstrandaufspülungen, Dünenverstärkungen und sogenannten Mega-Aufspülungen analysiert.

## Strandaufspülung

16

Bei der Strandaufspülung wird der Sand unmittelbar innerhalb der Wellenauflaufzone bis zum Dünenfuß platziert. Beim Einbau an Land wird das Sediment nach der Entladung an der Aufspülstelle verteilt; dies geschieht entweder durch natürliche litorale Prozesse oder mithilfe konventioneller Erdbaumaschinen, die das Material verschieben und profilieren [34]. Das Strandprofil wird in der Regel an das vorhandene Profil angepasst, um große Abweichungen in der Strandneigung zu vermeiden.

Strandaufspülungen werden von der Öffentlichkeit unmittelbar wahrgenommen und steigern die Attraktivität des Strandes sowie den touristischen Nutzen. Weitere Vorteile sind die Stärkung der Schutzfunktion des Strand-Dünen-Systems durch direkte Vergrößerung der Sandreserve sowie die Möglichkeit eines sehr kosteneffizienten Monitorings der Aufspüleffizienz. Jedoch werden auch die am Strand lebenden Organismen durch das aufgespülte Material verschüttet oder durch Baugeräte und Rohrleitungen gestört. Da gerade die Wellenauflaufzone ein dynamisches System ist und die dort vorkommenden Lebewesen an Sedimentumlagerungen gewöhnt sind, erholen sich einige Schlüsselarten schneller von den Baumaßnahmen [30], [35]–[37] im Vergleich zum Regenerationspotenzial im oberen (trockenen) Strandbereich, welches häufig weitaus geringer ist [38], [39].

Strandaufspülung per Rohrleitung auf Sylt (Foto: C. Krautwald)



Nachteile von Strandaufspülungen sind der zumeist höhere Aufwand (z.B. Installation von Rohrleitungen, nachträgliche Profilierung des Strandes) und die damit verbundenen Kosten sowie die Notwendigkeit, den Strand während der Baumaßnahme zu sperren. Des Weiteren können durch einzelne schwere Sturmfluten schon große Teile des aufgespülten Sandes erodiert und in den Küstennahbereich umgelagert werden. Dieser Verschleiß, der oftmals in einer deutlich kürzeren Lebensdauer der Maßnahme (Jahre bis Jahrzehnt) resultiert, wird bei Planung, Genehmigung und Budgetierung des Küstenschutzes mittels Sandaufspülungen bewusst akzeptiert. Wenn ein solches

Sturmflutereignis unmittelbar nach der Strandaufspülung stattfindet, kann dies zu sehr großen Verlusten sowie einer negativen öffentlichen Wahrnehmung und einer verminderten Akzeptanz der Küstenschutzmaßnahme führen. Zudem kann sich insbesondere durch falsche Sedimentzusammensetzung (z.B. eine zu breite Korngrößenverteilung) im oberen Strandbereich ein Kliff, d.h. eine steile Abbruchkante bilden.

<p style="text-align: center;"><b>Stärken</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aufstockung des Sedimenthaushalts im aktiven Küstenprofil</li> <li>▪ Beeinflussung des Benthos innerhalb der Wellenauflaufzone vergleichsweise gering, da es an starke Umlagerungen angepasst ist</li> <li>▪ Öffentliche Wahrnehmung der Aufspülmaßnahme</li> <li>▪ Steigerung des Freizeitwerts</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Schwächen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Keine Reduktion der einwirkenden Wellenenergie am Strand</li> <li>▪ Temporäre Baustelle an Land erforderlich</li> <li>▪ Vergleichsweise hoher Aufwand und Kosten</li> <li>▪ Schädigung von Artengemeinschaften durch Baumaßnahme</li> <li>▪ Geringeres ökologisches Regenerationspotenzial im oberen Strandprofil</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>Chancen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Beibehaltung des natürlichen Erscheinungsbildes von Stränden</li> <li>▪ Zusätzliche Sedimentversorgung benachbarter Küstenabschnitte über den Längstransport</li> <li>▪ Sensibilisierung einer breiten Öffentlichkeit für Küstenprozesse und -schutz</li> <li>▪ Ökosystemförderung durch Habitaterhalt</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Risiken</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kliffbildung durch falsche Sedimentzusammensetzung</li> <li>▪ Sandverlust in Folge von Sturmfluten kann zur negativen Wahrnehmung des Projektes in der Öffentlichkeit führen</li> <li>▪ Veränderung des Habitats durch geänderte Sedimenteigenschaften</li> </ul>

## Fazit

Strandaufspülungen können als Lösungen mit relativ kurzer Lebensdauer im Vergleich zu harten Küstenschutzmaßnahmen genutzt werden, um den Strand zu verbreitern oder Erosion auszugleichen. Verglichen mit der Vorstrandaufspülung ist die hydrodynamische Wirksamkeit nur bedingt gegeben und der bauliche Aufwand und die Baukosten sind zumeist relativ groß. In den dynamischen Bereichen des Strandprofils (Wellenauflaufzone) ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich einige Schlüsselarten schnell regenerieren, relativ hoch. In weniger dynamischen, trockenen Bereichen wird das Ökosystem jedoch langfristig beeinflusst bzw. irreversibel verändert.

## Vorstrandaufspülung

Bei einer sublitoralen Aufspülung wird Sediment im Vorstrandbereich unterhalb der Wasserlinie platziert [29]. Da dies in der Regel direkt vom Baggerschiff durchgeführt wird, entfallen landseitige Erdbaumaßnahmen, wodurch die Baumaßnahme günstiger ist als bei Strandaufspülungen [40]. Der Aufwand ist damit geringer als bei Strandaufspülungen; zudem muss der Strand während der Aufspülmaßnahme nicht gesperrt werden. Durch Stärkung der seewärtigen Sandbänke (*Riffe*) wird das Küstenfundament stabilisiert und der allgemeine Sedimenthaushalt langfristig aufgestockt [41]. Hydrodynamisch wirken Sandvorspülungen zusätzlich als Küstenschutzmaßnahme, indem sie die Wellenergie frühzeitig reduzieren und somit die Belastung auf den Strand durch die auftretenden Wellen senken. Das vorzeitige Brechen der Wellen und der damit verbundene Energieverlust bewirken eine Reduktion des Küstenabtrags analog zur Wirkung eines vorgelagerten Wellenbrechers [41]–[43]. Die Strandbreite und damit die Attraktivität des Strandes werden durch eine Vorstrandaufspülung somit erst langfristig beeinflusst bzw. erhalten.

Das dynamische Verhalten der Vorstrandaufspülung erschwert jedoch eine präzise Vorhersage und Überwachung der Morphologie [2]. Da ihre hydrodynamische Wirksamkeit bei sehr hohen Wasserständen abnimmt, kann die Effizienz von Vorstrandaufspülungen bei Extremereignissen eingeschränkt sein. Hierdurch besteht allerdings auch die Chance, dass eine Vorstrandaufspülung durch ein solches Extremereignis weniger Schaden nimmt als eine Strandaufspülung. Während Vorstrandaufspülungen als effektive Maßnahme für die tidebeeinflussten Strände der Nordsee angesehen werden, wird eine geringere Effektivität für weniger energetische Seegangsbedingungen erwartet [44], [45].

Mit steigender Wassertiefe wird das Sediment feiner und Artenvielfalt und -reichtum nehmen zu. Die benthischen Organismen in diesem Bereich sind weniger gut an hohe Sedimentdynamik oder Überdeckung angepasst als die Organismen im Strandbereich, weshalb sie sich wesentlich langsamer davon erholen [38], [39]. Existieren im Küstenprofil mehrere Sandbänke, so gilt das Habitat zwischen den Sandbänken als besonders sensibel, da es von hoher Artenvielfalt und hohem Artenreichtum geprägt ist [38]. Da die Erfassung ökologischer Daten in diesem Abschnitt des Küstenprofils allerdings besonders kompliziert ist, gibt es bisher nur eine begrenzte Anzahl an Studien über die langfristigen Umweltauswirkungen.

<p style="text-align: center;"><b>Stärken</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reduktion der einwirkenden Wellenenergie am Strand</li> <li>▪ Geringer Aufwand (Baustelleneinrichtung, Schiffszeiten)</li> <li>▪ Keine Baugeräte am Strand</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Schwächen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Keine Dämpfung der Wellenenergie bei extremen Sturmflutwasserständen</li> <li>▪ Kein zusätzliches Sanddepot am Strand</li> <li>▪ Beeinflusst Strandbreite nicht direkt, sondern eher langfristig</li> <li>▪ Benthos in größeren Wassertiefen nicht an starke Sedimentdynamik angepasst</li> <li>▪ Schutzpotenzial der Maßnahme nicht sichtbar für die Öffentlichkeit</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>Chancen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Möglichkeit zur Beeinflussung der Hydro- und Morphodynamik im Küstennahbereich</li> <li>▪ Im Gegensatz zur Strandaufspülung erhöhte Stabilität bei Extremereignissen</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Risiken</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Geänderte Morphodynamik im Riff-Rinne-System kann hydrodynamische Nebeneffekte verursachen (z.B. Rückströme)</li> <li>▪ Langfristige Störung des Lebensraums an der Aufspülstelle</li> </ul>

### Fazit

Vorstrandaufspülungen können in Relation zu Strandaufspülungen als kostengünstigere, längerfristig wirksame Maßnahme angewendet werden, um den Strand zu verbreitern oder Erosion vorzubeugen. Sie sind besonders wirksam bei Stürmen geringerer Intensität. Bei extremen Sturmflutwasserständen verlieren sie ihre hydrodynamische Wirksamkeit und es kann zur Schädigung der oberen Strandbereiche und des Dünenfußes kommen, was wiederum Risiken in der Sicherung des Hinterlands bergen kann.

## Dünenverstärkung

20

Bei einer Dünenverstärkung oder supralitoralen Aufspülung wird der hintere Bereich des Strandes stabilisiert, indem Sand in oder am Fuß der Dünen platziert wird [29]. So soll dieser Bereich gestärkt und vor Erosion und Bruch während Sturmfluten geschützt werden. Dabei fungiert der aufgespülte Sand als Puffer, welcher unter Sturmflutbedingungen bei ausreichender Einhaltung der Schutzwirkung für die dahinterliegende Infrastruktur abgetragen werden kann. Dünenverstärkungen haben somit keinen Einfluss auf die Wellenenergie, die auf den Strand trifft; ihre morphologische Entwicklung hängt in erster Linie vom Wind ab. Die Auslegung von Dünenverstärkungen sowie das Monitoring im Rahmen des Küstenschutzes sind weniger komplex als bei Strand- oder Vorstrandaufspülungen. Durch die Anpflanzung von Vegetation, z.B. Strandhafer, wird die Düne zusätzlich stabilisiert, was zwar die Küstenschutzfunktion sicherstellt, auf lange Sicht allerdings zu einer Überalterung der Düne und einem Verlust der Biodiversität führen kann [46].

Der Einfluss der Dünenverstärkung auf die Strandbreite (und damit auch die Attraktivität des Strandes) ist geringer als bei anderen Maßnahmen, da die Breite erst beeinflusst wird, wenn z.B. eine schwere Sturmflut Sand von der Düne zum Strand hin abträgt. Ihr Einfluss auf die Schutzwirkung des Strandes ist jedoch schwer vorherzusagen. Zudem sind der Bauaufwand und die damit verbundenen Kosten verglichen mit anderen Aufspülverfahren am größten.

Im Rahmen einiger Küstenmanagementkonzepte wird eine Dünenverstärkung bzw. -erhaltung mit Strand- oder Vorstrandaufspülungen kombiniert, wie z.B. an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns [47] oder bei großskaligen Managementkonzepten wie den Hondsbossche Duinen in den Niederlanden (s. auch Mega-Aufspülung). Im Gegensatz zur Dünenstabilisierung werden ebenfalls Konzepte dafür entwickelt, die natürliche Dynamik des Dünensystems wiederherzustellen bzw. aktiv zu unterstützen, um sowohl die Biodiversität als auch ein Aufwachsen der Küsten mit dem Anstieg des Meeresspiegels zu fördern [48], [49].

Bauarbeiten in den „Hondsbossche Duinen“, Niederlande (Foto: F. Staudt)



<p style="text-align: center;"><b>Stärken</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Direkter Schutz der Dünen als Hochwasserschutzmaßnahme (Sturmflutpuffer) oder Notfallmaßnahme gegen Dünendurchbrüche</li> <li>▪ Einfache Bemessung und Überwachung</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Schwächen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Keine hydrodynamische Wirksamkeit</li> <li>▪ Hoher Aufwand, v.a. durch zusätzliche Bepflanzung</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>Chancen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einbindung der Öffentlichkeit über gute Kommunikation und Sensibilisierung für Küstenprozesse</li> <li>▪ Veränderung des Ökosystems durch Anpflanzung von Dünenvegetation</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Risiken</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sediment steht dem Küstenlängstransport nicht zur Verfügung</li> <li>▪ Veränderung des Ökosystems durch Anpflanzung von Dünenvegetation</li> </ul>

### Fazit

Dünenverstärkungen dienen als schützendes Element gegen die Einwirkungen von Sturmfluten, jedoch hat das eingebrachte Sandvolumen keinen direkten Einfluss auf die Wellenenergie im Strandbereich. Die (verstärkten) Dünen schützen jedoch das dahinterliegende Land vor Überflutungen. Die Bemessung und Überwachung von stabilen Dünen als Küstenschutzmaßnahme ist vergleichsweise einfach.

## Mega-Aufspülung

22

Gängige Praxis im Küstenmanagement ist derzeit die punktuelle Aufspülung von Sand entlang einzelner Küstenabschnitte. Hierbei wurden in den vergangenen Jahrzehnten beispielsweise entlang der Sylter Westküste auf Abschnitten von 0,5–1,5 km Länge Aufspülmengen von 100–200 m<sup>3</sup> pro Meter Küstenlinie eingebracht [50].

In den vergangenen Jahren haben die Niederlande mit Mega-Aufspülungen (z.B. dem Sandmotor und den Hondsbossche Duinen) mit hohen Aufspülmengen (20–30 Mio. m<sup>3</sup>) und -konzentrationen experimentiert. Deren Auswirkungen auf die Küstenhydrodynamik und -morphodynamik, die Umwelt und den Tourismus sind Gegenstand laufender Forschungsprojekte und werden engmaschig untersucht [51]–[53]. Durch die Platzierung einer großen Sandmenge sollen sowohl der betroffene als auch die angrenzenden Strandabschnitte durch den Küstenlängstransport über einen Zeitraum von mehreren Dekaden mit Sediment versorgt werden. Da sich die Mega-Aufspülung – ähnlich einer Landgewinnung – bis in größere Wassertiefen erstreckt, werden zum Bau sehr große Sandmengen benötigt. Durch die großen Unsicherheiten bezüglich der Auslegung und des morphodynamischen Verhaltens der Aufspülung besteht auch die Gefahr, dass sich Teile des aufgespülten Sandes ohne effizienten Beitrag zum Küstenschutz in größeren Wassertiefen verteilen.

Durch eine einzelne Mega-Aufspülung werden Flora und Fauna auf einer großen Fläche nachhaltig und lückenlos gestört, allerdings werden hierdurch wiederholte, kurzperiodische Eingriffe durch regelmäßige Maßnahmen vermieden. Ebenso fallen die Kosten zur Einrichtung der Baustelle nur einmal an. Zusätzlich werden Flächen für die touristische Nutzung und die Entwicklung neuer Habitate geschaffen. Da es sich bisher lediglich um Pilotstudien handelt, sind Chancen und Risiken nur schwer abschätzbar.

Die Hondsbossche Duinen in den Niederlanden, eine Kombination aus Mega-Aufspülung und Dünenverstärkung (Foto: F. Staudt)



<p style="text-align: center;"><b>Stärken</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kostengünstige Maßnahme im Vergleich zu punktuellen Aufspülungen</li> <li>▪ Einmaliger Eingriff ins Ökosystem</li> <li>▪ Langfristige Wirksamkeit für den Sedimenthaushalt auch in angrenzenden Küstenabschnitten</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Schwächen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Veränderung der lokalen Hydro- und Morphodynamik</li> <li>▪ Großer, lückenloser Eingriff in das Ökosystem an der Aufspülstelle</li> <li>▪ Großer Eingriff in lokale Sandressourcen an der Entnahmestelle</li> <li>▪ Hohe Investition an einzeltem Strandabschnitt</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>Chancen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bereitstellung von Flächen für unterschiedliche Naherholungszwecke, Attraktivitätssteigerung für Strandbesucher</li> <li>▪ Größere Gestaltungsfreiräume für verschiedene Interessenvertreter</li> <li>▪ Proaktive Weise, um Auswirkungen der Klimaänderungen entgegenzuwirken</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Risiken</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bisher nur ein Pilotprojekt: Langzeitstudien fehlen und Auswirkungen noch nicht absehbar</li> <li>▪ Große Unsicherheiten in der Vorhersage der Morphologie und der Lebensdauer, Sandressourcen werden eventuell wenig effizient genutzt</li> <li>▪ Sturmflutwirksamkeit ist möglicherweise geringer als angenommen</li> </ul>

**Fazit**

Mega-Aufspülungen bieten die Möglichkeit, die Anzahl und die Kosten von Aufspülprojekten zu reduzieren. Gleichzeitig profitieren angrenzende Strandabschnitte durch den Küstenlängstransport. Die langfristigen Folgen eines solchen Aufspülprojektes sind jedoch noch nicht absehbar und Gegenstand aktueller Forschung.

## Zusammenfassung

24

Die SWOT-Analyse zeigt, dass jedes Verfahren für die Materialentnahme und die Aufspülung eine Reihe von Vor- und Nachteilen mit sich bringt, die der Anwender gegeneinander abwägen muss. Mit weiteren Forschungsergebnissen, v.a. hinsichtlich der langfristigen ökologischen und morphologischen Auswirkungen der Verfahren, könnten einige der potenziellen *Chancen* und *Risiken* zu bekannten und absehbaren *Stärken* bzw. *Schwächen* werden. Bis dahin muss der Anwender unter Berücksichtigung aller Faktoren ein Verfahren auswählen, das für den geplanten Anwendungsfall geeignet ist und bei dem die Risiken für die Region vertretbar sind. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass viele bisher unbekannte biologische Prozesse möglicherweise weitere Auswirkungen auf das Küstenökosystem haben könnten. Daher sind Eingriffe in die Küstenumwelt immer mit gewissen Risiken für das Ökosystem und den Menschen verbunden und sollten nur dann erfolgen, wenn sie unter Abwägung der wesentlich beeinflussten marinen und terrestrischen Kompartimente und nach Diskussion und Priorisierung der primären Schutzziele (Lebens-, Natur- und Wirtschaftsraum) unbedingt erforderlich sind.

Strandaufspülung per Rohrleitung auf Sylt (Foto: R. Gieschen)





## Literaturnachweis

- [1] F. Mielck, H. C. Hass, R. Michaelis, L. Sander, S. Papenmeier, and K. H. Wiltshire, "Morphological changes due to marine aggregate extraction for beach nourishment in the German Bight (SE North Sea)," *Geo-Marine Lett.*, Dec. 2018.
- [2] R. Gijssman, J. Visscher, and T. Schlurmann, "The lifetime of shoreface nourishments in fields with nearshore sandbar migration," *Coast. Eng.*, p. 103521, Jul. 2019.
- [3] R. Gijssman, J. Visscher, and T. Schlurmann, "A method to systematically classify design characteristics of sand nourishments," *Coast. Eng. Proc.*, vol. 1, no. 36, p. 95, Dec. 2018.
- [4] J. Fröhlich and H.-U. Rösner, *Klimaanpassung an weichen Küsten - Fallbeispiele aus Europa und den USA für das schleswig-holsteinische Wattenmeer*. Husum: WWF Deutschland, 2015.
- [5] Ausschuss für Küstenschutzwerke der DGEG und der HTG, "Empfehlungen D. Sandaufspülungen als Küstenschutz," *Die Küste*, vol. 55 EAK, pp. 283–351, 1993.
- [6] J. Speybroeck, "Ecology of Macrobenthos as a Baseline for an Ecological Adjustment of Beach Nourishment," Gent University, 2007.
- [7] M. F. De Jong, "The ecological effects of deep sand extraction on the Dutch continental shelf," Wageningen University, 2016.
- [8] M. Diesing, "Die Regeneration von Materialentnahmestellen in der südwestlichen Ostsee unter besonderer Berücksichtigung der rezenten Sedimentdynamik," Christian-Albrechts-Universität Kiel, 2003.
- [9] A. F. Velegrakis, A. Ballay, S. Poulos, R. Radzevicius, V. Bellec, and F. Manso, "European marine aggregates resources: Origins, usage, prospecting and dredging techniques," *J. Coast. Res.*, no. 51, pp. 1–14, 2010.
- [10] W. M. I. Bonne, "European Marine Sand and Gravel Resources: Evaluation and Environmental Impacts of Extraction - an Introduction," *J. Coast. Res.*, vol. 51 (SI), pp. i–vi, 2010.
- [11] UNEP, *Sand and Sustainability: Finding New Solutions for Environmental Governance of Global Sand Resources*. Geneva, Switzerland: GRID-Geneva, United Nations Environment Programme (UNEP), 2019.
- [12] P. Peduzzi, "Sand, rarer than one thinks," *Environ. Dev.*, vol. 11, pp. 208–218, Jul. 2014.
- [13] K. J. Reine and D. G. Clarke, "Entrainment by hydraulic dredges - a review of potential impacts. US Army Engineers Research and Development Center Technical Notes DOER-E1," 1998.
- [14] V. L. G. Todd *et al.*, "A review of impacts of marine dredging activities on marine mammals," *ICES J. Mar. Sci.*, vol. 72, no. 2, pp. 328–340, Jan. 2015.
- [15] H. M. Tillin, A. J. Houghton, J. E. Sanders, and S. C. Hull, "Direct and Indirect Impacts of Marine Aggregate Dredging," *Mar. ALSF Sci. Monogr. Ser.*, vol. 1, 2011.
- [16] S. P. Collin and N. S. Hart, "Vision and photoentrainment in fishes: The effects of natural and anthropogenic perturbation," *Integr. Zool.*, vol. 10, no. 1, pp. 15–28, Jan. 2015.
- [17] A. S. Wenger *et al.*, "A critical analysis of the direct effects of dredging on fish," *Fish Fish.*,

vol. 18, no. 5, pp. 967–985, Sep. 2017.

- [18] M. Desprez, “Physical and biological impact of marine aggregate extraction along the French coast of the Eastern English Channel: short- and long-term post-dredging restoration,” *ICES J. Mar. Sci.*, vol. 57, no. 5, pp. 1428–1438, Oct. 2000.
- [19] D. S. Gonçalves *et al.*, “Morphodynamic evolution of a sand extraction excavation offshore Vale do Lobo, Algarve, Portugal,” *Coast. Eng.*, vol. 88, pp. 75–87, Jun. 2014.
- [20] K. M. Cooper *et al.*, “Implications of dredging induced changes in sediment particle size composition for the structure and function of marine benthic macrofaunal communities,” *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 62, no. 10, pp. 2087–2094, Oct. 2011.
- [21] A. Kubicki, “Significance of sidescan sonar data in morphodynamics investigations on shelf seas - Case studies on subaqueous dunes migration, refilling of extraction pits and sorted bedforms stability,” Christian-Albrechts-Universität Kiel, 2007.
- [22] M. Zeiler, K. Figge, K. Griewatsch, M. Diesing, and K. Schwarzer, “Regenerierung von Materialentnahmestellen in Nord- und Ostsee,” *Die Küste*, vol. 68, pp. 67–98, 2004.
- [23] G. Sutton and S. Boyd, Eds., *Effects of Extraction of Marine Sediments on the Marine Environment 1998 – 2004. ICES Cooperative Research Report No. 297*. International Council for the Exploration of the Sea (ICES), 2009.
- [24] M. Boers, “Effects of a deep sand extraction pit. Final report of the PUTMOR measurements at the Lowered Dump Site,” 2005.
- [25] S. Uścińowicz *et al.*, “Impact of sand extraction from the bottom of the southern Baltic Sea on the relief and sediments of the seabed,” *Oceanologia*, vol. 56, no. 4, pp. 857–880, 2014.
- [26] BMAPA and The Crown Estate, “Marine aggregate dredging and the coastline: a guidance note,” London, Edinburgh, 2013.
- [27] ICES, “Effects of Extraction of Marine Sediments on the Marine Ecosystem,” Copenhagen, Denmark, 2001.
- [28] K. Cooper, S. Boyd, J. Eggleton, D. Limpenny, H. Rees, and K. Vanstaen, “Recovery of the seabed following marine aggregate dredging on the Hastings Shingle Bank off the southeast coast of England,” *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, vol. 75, no. 4, pp. 547–558, Dec. 2007.
- [29] K. Mangor, N. Drønen, K. H. Kærgaard, and S. E. Kristensen, “Shoreline Management Guidelines,” Hørsholm, 2017.
- [30] T. A. Schlacher, R. Noriega, A. Jones, and T. Dye, “The effects of beach nourishment on benthic invertebrates in eastern Australia: Impacts and variable recovery,” *Sci. Total Environ.*, vol. 435, pp. 411–417, 2012.
- [31] D. Wilber, D. Clarke, G. Ray, and R. Van Dolah, “Lessons Learned From Biological Monitoring of Beach Nourishment Projects,” *West. Dredg. Assoc.*, vol. 29412, pp. 262–274, 2009.
- [32] R. G. Dean, *Beach nourishment: Theory and practice*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2002.
- [33] K. F. Nordstrom, “Beach Nourishment and Coastal Habitats: Research Needs to Improve Compatibility,” *Restor. Ecol.*, vol. 13, no. 1, pp. 215–222, Mar. 2005.
- [34] E. Bird and N. Lewis, *Beach Renourishment*. Cham: Springer International Publishing, 2015.
- [35] I. Menn, C. Junghans, and K. Reise, “Buried alive: Effects of beach nourishment on the

infauna of an erosive shore in the North Sea," *Senckenbergiana maritima*, vol. 32, pp. 125–145, 2003.

- [36] T. Wooldridge, H. J. Henter, and J. R. Kohn, "Effects of beach replenishment on intertidal invertebrates: A 15-month, eight beach study," *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, vol. 175, pp. 24–33, 2016.
- [37] L. Leewis, P. M. van Bodegom, J. Rozema, and G. M. Janssen, "Does beach nourishment have long-term effects on intertidal macroinvertebrate species abundance?," *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, vol. 113, pp. 172–181, 2012.
- [38] G. Janssen and S. Mulder, "Zonation of macrofauna across sandy beaches and surf zones along the Dutch coast," *Oceanologia*, vol. 47, no. 2, pp. 265–282, 2005.
- [39] C. F. Rakocinski, R. W. Heard, S. E. LeCroy, J. A. McLelland, and T. Simons, "Responses by Macrobenthic Assemblages to Extensive Beach Restoration at Perdido Key, Florida, USA," *J. Coast. Res.*, vol. 12, no. 1, pp. 326–353, 1996.
- [40] C. Laustrup, H. T. Madsen, P. Sørensen, and I. Brøker, "Comparison of Beach and Shoreface Nourishment Torsminde Tange, Denmark," in *Coastal Engineering 1996, 1997*, pp. 2927–2940.
- [41] P. Sørensen *et al.*, "COADAPT - Danish Coast and Climate Adaption - Beach and shoreface nourishment at Thorsminde Tange, Denmark," Lemvig, 2014.
- [42] P. Hoekstra, K. T. Houwman, A. Kroon, B. G. Ruessink, J. A. Roelvink, and R. Spanhoff, "Morphological Development of the Terschelling Shoreface Nourishment in Response to Hydrodynamic and Sediment Transport Processes," in *Coastal Engineering 1996, 1997*, pp. 2897–2910.
- [43] M. J. P. van Duin, N. R. Wiersma, D. J. R. Walstra, L. C. van Rijn, and M. J. F. Stive, "Nourishing the shoreface: observations and hindcasting of the Egmond case, The Netherlands," *Coast. Eng.*, vol. 51, no. 8–9, pp. 813–837, Oct. 2004.
- [44] L. C. van Rijn, "Coastal erosion control based on the concept of sediment cells," Delft, 2010.
- [45] K. Furmanczyk, "Eurosion case study: Hel Peninsula (Poland)," 2004.
- [46] A. de Groot *et al.*, "Wadden Sea Quality Status Report: Beaches and Dunes," in *Wadden Sea Quality Status Report 2017*, S. Klopper and Common Wadden Sea Secretariat, Eds. Wilhelmshaven, 2017.
- [47] StALU MM, "Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern," Rostock, 2009.
- [48] M. Löffler, A. J. F. van der Spek, and C. van Gelder-Maas, "Options for dynamic coastal management. A guide for managers," Delft, 2013.
- [49] F. Osswald, T. Dolch, and K. Reise, "Remobilizing stabilized island dunes for keeping up with sea level rise?," *J. Coast. Conserv.*, vol. 23, no. 3, pp. 675–687, Jun. 2019.
- [50] LKN.SH, "Fachplan Küstenschutz Sylt," Husum, 2015.
- [51] M. J. F. Stive *et al.*, "A New Alternative to Saving Our Beaches from Sea-Level Rise: The Sand Engine," *J. Coast. Res.*, vol. 290, no. 5, pp. 1001–1008, Sep. 2013.
- [52] B. Huisman, "On the redistribution and sorting of sand at nourishments," Delft University of Technology, 2019.
- [53] M. Radermacher, "Impact of sand nourishments on hydrodynamics and swimmer safety," Delft University of Technology, 2018.





GEFÖRDERT VOM

