

## 8 SUMMARY

Exposed sandy beaches are physically harsh and highly dynamic environments. Waves, tides and sediment type form a largely physically controlled habitat for the sandy beach organisms. The present study is an ecological comparison of two sandy shores differing in wave energy and morphodynamics. The study sites were located in the eastern North Sea on the German island of Sylt and the neighbouring Danish island of Rømø. The Sylt shore is coarse grained, steep profiled, and receives high wave energy. Beach nourishment is used to counterbalance erosion. It is a highly dynamic, intermediate beach type. In contrast, the Rømø shore is fine grained, flat profiled, accreting and with low wave energy. It represents a relatively stable, dissipative beach type.

The primary objective of this thesis are the effects of wave energy and sandy shore morphology on the biotic community and its food supply. The studied community components include the meio- and macroinfauna, aquatic epibenthos, and shorebirds. A simultaneous and detailed analysis of the first two provides insights on the ecological distinction between meio- and macrofauna in the beach system including their temporal variability and spatial zonation across the shore. In addition, the ecological consequences of beach nourishment on the infauna were studied.

Overall meiofaunal abundances (average of inter- and subtidal) were similar on both shores, but the taxonomic composition differed. On the intermediate shore with high wave energy, meiofauna was composed of roughly equal proportions of several major taxa, while there was a strong numerical dominance of nematodes on the dissipative shore with low wave energy. Meiofaunal zonation on the intermediate shore showed higher abundances in the intertidal than in the subtidal, while meiofauna was more evenly abundant across the entire dissipative shore. Species density and diversity of interstitial plathelminths and polychaetes were higher at Sylt than at Rømø. Both numbers peaked at mean low water and in the shallow subtidal at Sylt, while the maximum occurred at the mid shore at Rømø.

In contrast to meiofauna, overall macrofaunal abundance, species density, and diversity were all lower on the intermediate than on the dissipative shore. Polychaetes were the most abundant taxon on both shores, followed by amphipods and isopods at Sylt, and by bivalves and amphipods at Rømø. Zonation revealed higher macrofaunal abundance and

species density in the subtidal than in the intertidal at Sylt and a even distribution across the Rømø shore.

Temporal variability of meiofaunal abundances was higher on the intermediate shore, while this was the case with macrofauna on the dissipative shore. In both faunal components highly mobile species were more prominent at Sylt than at Rømø.

Corresponding to the impoverished macrofauna on the intermediate shore, abundances of epibenthic predators, such as shrimps, crabs, fishes, and shorebirds were also lower at Sylt than at Rømø. Additionally, the concentrations of Chlorophyll *a* and particulate organic carbon and the C/N ratio in the sediment were all lower on the intermediate than on the dissipative shore. Nutrient concentrations in interstitial and surf waters indicate oxic nutrient regeneration at Sylt, while at Rømø also anoxic mineralisation occurs.

In conclusion, high wave energy on the eroding, dynamic intermediate shore limited the macrofauna, particularly at the steep intertidal slope, while it had weak effects on the meiofauna. The latter is abundant and of high evenness between major taxa. Further, it is mainly composed of agile taxa, which are able to quickly exploit the fresh organic material pathing through the beach under high oxic conditions. Low wave energy across the accreting, dissipative shore favoured macrofauna, and nematodes adapted to low oxygen conditions. Organic materials may intermittently accumulate on this shore and zoomass builds up to support abundant visitors from higher trophic levels.

This comparison of two sandy beaches differing in wave energy offers first ideas on the consequences of increasing wave energy and erosion on exposed sandy shores. Such increases are expected as a corollary of global warming and the concomitant sea level rise. This is likely to provoke an increasing use of beach nourishment to combat erosion, creating highly dynamic intermediate shores away from morphodynamic equilibrium. The Sylt shore with its described ecosystem may be an example for this future beach state. A “small food web” takes over on such shores, particularly in the cold-temperate region of the North Sea, while the “large food web” will be impoverished. Disturbances by nourishment operations had minor impacts on the infauna of this dynamic system. Thus, from an ecological perspective, beach nourishments may be regarded as an acceptable method of coastal defence. However, no larger operations than the ones studied (350,000 m<sup>3</sup>/2 km) and intervals between those disturbances of at least two years at a given site are recommended.

## 9 KURZFASSUNG

Exponierte Sandstrände sind physikalisch harsche und äußerst dynamische Lebensräume, deren Morphologie maßgeblich durch die Energie der auflaufenden Welle, den Tidehub und den Sedimenttyp bestimmt werden. Für ihre Bewohner stellen sie ein stark physikalisch kontrolliertes Habitat dar, in dem die Wellenenergie als bestimmender Faktor gilt.

Die vorliegende Arbeit ist ein ökologischer Vergleich von zwei exponierten Sandstränden, die durch unterschiedliche Wellenenergie und Morphodynamik charakterisiert sind. Die untersuchten Strände befinden sich in der östlichen Nordsee auf Sylt und der Nachbarinsel Rømø. Der Sylter Strand ist durch groben Sand, ein steiles Profil und hohe Wellenenergie gekennzeichnet (Abb. 1). Um der Erosion entgegen zu wirken, werden auf Sylt seit 1988 in unregelmäßigen Abständen Sandvorspülungen durchgeführt. Nach der morphodynamischen Strandklassifizierung von Short & Wright (1983) ist der Sylter Strand ein dynamischer, intermediärer Strandtyp. Der Strand auf Rømø hingegen ist durch feineren Sand, ein flaches Profil, geringe Wellenenergie und dauerhafte Sanddeposition charakterisiert (Abb. 1). Es ist ein relativ stabiler, dissipativer Strand.



Abb. 1 Links: Erosiver, hoch dynamischer, intermediärer Sandstrand auf der Nordseeinsel Sylt (Foto: K. Reise). Rechts: Depositärer, relativ stabiler, dissipativer Strand der Insel Rømø.

Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit waren die Effekte der Wellenenergie und Strandmorphologie auf die im Sand lebenden Organismen (Meio- und Makrobenthos). Parallele Studien dieser beiden Faunenkomponenten sind an Stränden selten, insbesondere Untersuchungen in denen die Meiofauna („Sandlückenfauna“) bis zur Art

bestimmt wurde. Gerade eine gleichzeitige und detaillierte Analyse dieser beiden Tiergruppen kann jedoch weitere Hinweise auf eine ökologische Trennung von Meio- und Makrofauna in den Stränden liefern. Neben dem Unterschied in ihrer Größe werden die Gemeinschaften der Meio- und Makrofauna im Strand vermutlich auch durch unterschiedliche Faktoren maßgeblich bestimmt. Daher wurde auch ihre zeitliche Variabilität und räumliche Zonierung von Eu- zu Sublitoral untersucht. Um den Einfluß der Wellenenergie und Strandmorphologie im Hinblick auf das gesamte Ökosystem zu klären, wurden zusätzlich die Nahrungsverfügbarkeit für die Fauna in den Stränden, das aquatische Epibenthos und die Vögel betrachtet. Weiterhin schließt diese Arbeit eine Untersuchung der ökologischen Effekte von Sandvorspülungen auf das Meio- und Makrobenthos ein.

Die Individuendichte der Meiofauna (im Mittelwert aus Eu- und Sublitoral) war in beiden Stränden ähnlich, aber die taxonomische Zusammensetzung war unterschiedlich. Am Strand mit hoher Wellenenergie setzte sich die Gesamtindividudichte der Meiofauna aus zahlreichen Taxa mit nahezu gleichen Anteilen zusammen, während am Strand mit geringer Wellenenergie Nematoden deutlich dominierten. Die räumliche Zonierung zeigte am Sylter Strand eine signifikant höhere Meiofauna-Individuendichte im Eu- als im Sublitoral. Auf Rømø hingegen wurde eine gleichförmige Verteilung von Eu- zu Sublitoral festgestellt. Die Artendichte und Diversität der im Sandlückensystem lebenden Plathelminthen und Polychaeten war am Strand mit hoher Wellenenergie signifikant höher als am Strand mit geringer Wellenenergie. Auf Sylt waren Artendichte und Diversität dieser Platt- und Borstenwürmer an der mittleren Niedrigwasserlinie und im flachen Sublitoral am höchsten, während auf Rømø am höher gelegenen mittleren Strandhang die höchsten Werte gefunden wurden.

Die Verteilung der Makrofauna unterschied sich deutlich von der der Meiofauna. Individuen-, Artendichte und Diversität waren am Sylter Strand signifikant geringer als am Rømø Strand. Polychaeten stellten die individuenreichste Gruppe an beiden Stränden, gefolgt von Amphipoden und Isopoden auf Sylt und von Bivalvieren und Amphipoden auf Rømø. Die Zonierung zeigte auf Sylt eine deutlich höhere Individuen- und Artendichte der Makrofauna im Sub- als im Eulitoral. Auf Rømø hingegen waren ähnliche Individuen- und Artendichten von Eu- zu Sublitoral zu beobachten.

Die zeitliche Variabilität der Meiofauna-Individuendichte war am dynamischen Strand mit hoher Wellenenergie ausgeprägter, während dies für die Makrofauna am stabileren Strand mit geringer Wellenenergie der Fall war. In beiden Tiergruppen waren hoch bewegliche Arten besonders auf Sylt vertreten.

Einhergehend mit der verarmten Makrofauna-Gemeinschaft am Sylter Strand wurden geringere Individuendichten epibenthischer Räuber, wie Fische, Krabben, Garnelen und Vögel, auf Sylt als auf Rømø festgestellt. Zusätzlich waren die Konzentrationen an Chlorophyll *a* und partikulärem organischem Kohlenstoff (POC), sowie das C/N-Verhältnis im Sediment auf Sylt geringer als auf Rømø. Dies weist auf eine periodische Anhäufung von organischem Material am stabileren Strand mit geringer Wellenenergie hin, während am dynamischen Strand mit hoher Wellenenergie kein „Nahrungspool“ vorhanden ist. Vergleiche der Konzentrationen anorganischer Nährstoffe im Poren- und Brandungswasser deuteten auf eine oxische Nährstoff Regeneration am Sylter Strand hin, während am Rømø Strand auch eine anoxische Mineralisation vorhanden war.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, daß die hohe Wellenenergie am erodierenden, dynamischen Sylter Strand die Makrofauna besonders im steilen Eulitoral limitiert, während sie einen geringen Einfluß auf die Meiofauna besitzt (Abb. 2). Letztere ist an diesem Strand individuenreich und setzt sich aus zahlreichen Taxa mit gleichmäßigen Anteilen zusammen. Weiterhin sind hauptsächlich hoch bewegliche Taxa vertreten, die fähig sind frisches organisches Material welches den Strand „durchströmt“ unter den vorhandenen sauerstoffreichen Bedingungen schnell zu nutzen. Die niedrigere Wellenenergie entlang des gesamten stabileren dissipativen Rømø Strandes fördert die Entwicklung einer individuen- und artenreichen Makrofauna, sowie eine Dominanz von Nematoden innerhalb der Meiofauna (Abb. 2). Letztere sind häufig an geringe Sauerstoffkonzentrationen angepasst. Unter solchen Strandbedingungen kann sich organisches Material zeitweise anhäufen und sich mehr Zoomasse aufbauen, die wiederum Besucher höherer trophischer Ebenen, wie Krabben, Fische und Vögel, fördert.

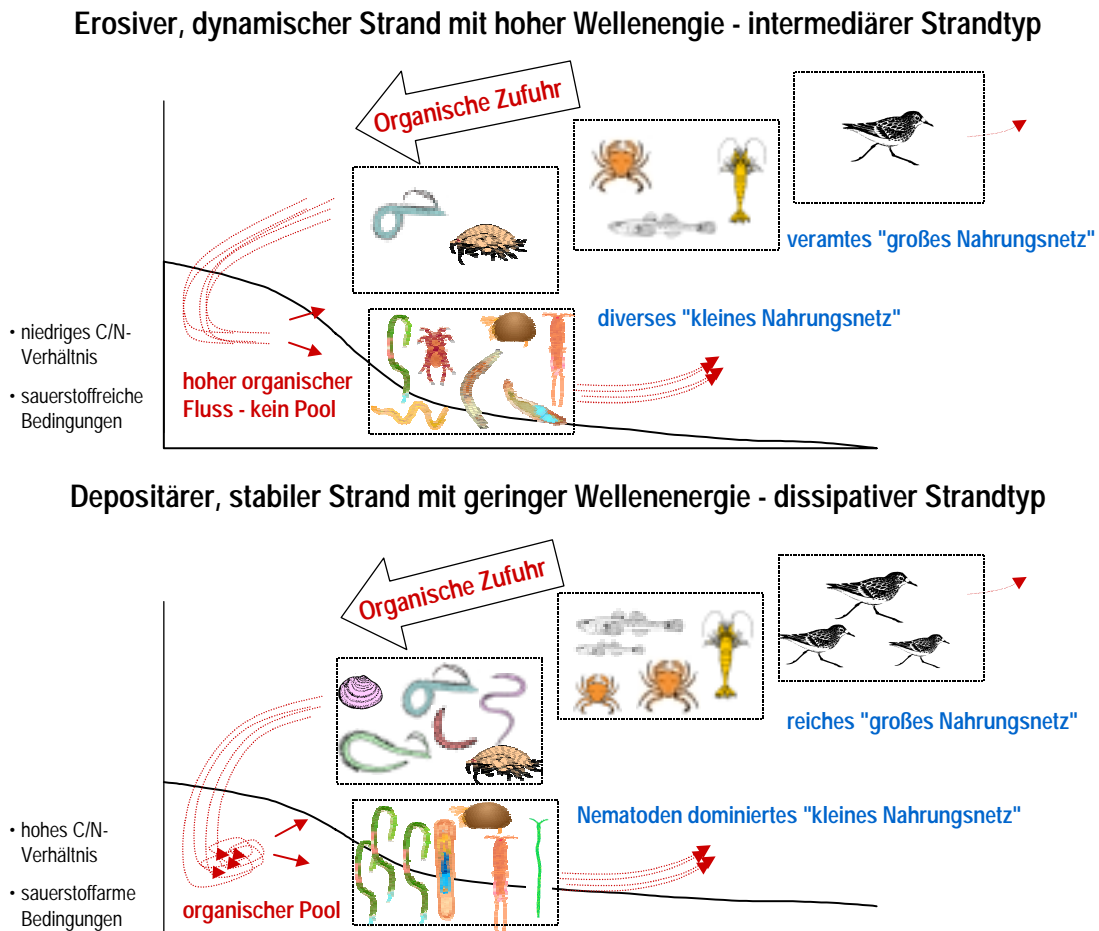


Abb. 2 Nahrungsnetz zweier Sandstrände mit unterschiedlicher Wellenenergie in der kalttemperierten Region der östlichen Nordsee. Der dynamische, intermediäre Strand mit hoher Wellenenergie ist durch hohe Flüsse organischen Materials durch den Strand charakterisiert, speichert jedoch keine Nahrungsressourcen. An diesen Stränden dominiert das „kleine Nahrungsnetz“ mit hoch beweglichen Tieren. Am stabileren, dissipativen Strand mit geringer Wellenenergie akkumuliert zweitweise organisches Material und das „große Nahrungsnetz“ ist bedeutend. Pfeile deuten den Fluss organischer und mineralisierter Substanzen an.

Der vorliegende Vergleich der Ökosysteme zweier Strände mit unterschiedlicher Wellenenergie liefert erste Ideen möglicher Konsequenzen einer steigenden Wellenenergie und Erosion an exponierten Sandstränden. Solche Zunahmen werden im Zusammenhang mit einer globalen Klimaerwärmung und einem damit verbundenen Meeresspiegelanstieg erwartet. Gleichzeitig wird, um die Strände zu stabilisieren, von einer Zunahme an Sandvorspülungen ausgegangen. Daraus resultieren vermutlich hochdynamische Strände eines intermediären Strandtypes, die sich in einem morphodynamischen Ungleichgewicht befinden. Der Sylter Strand mit seinem beschriebenen Ökosystem ist für diesen Strandtyp ein Beispiel. In der kalttemperierten

Region der Nordsee dominiert in solchen Systemen das „kleine Nahrungsnetz“ (Meiofauna), während das „große Nahrungsnetz“ (Makrobenthos-Epibenthos-Vögel) verarmt. Sandvorspülungen haben geringe negative Einflüsse auf das Benthos in diesem dynamischen System. Aus ökologischer Sicht können sie als eine akzeptable Methode des Küstenschutzes angesehen werden. Der Umfang der Maßnahme spielt jedoch eine entscheidende Rolle. Um eine Verträglichkeit für das Ökosystem zu gewährleisten werden keine größeren Maßnahmen als die in dieser Arbeit untersuchten ( $350,000 \text{ m}^3$  auf 2 km) und Ruhepausen zwischen solchen Störungen von mindestens zwei Jahren an einem Strand empfohlen.