



Schlussbericht

der Pilotphase zur

„Modellierung der morphodynamischen Prozesse im Strand- und Vorstrandbereich sandiger Brandungsküsten“

KFKI-Projekt 94: „MorphoSylt“

Projektzeitraum: 01.11.2006 – 30.06.2007

Zuständigkeiten:

LKN Schleswig-Holstein, Geschäftsbereich 2 „Gewässerkunde, Vorarbeiten Küstenschutz“

Koordinator: RBD Dipl.-Ing. Dirk van Riesen (Dirk.vanRiesen@lkn-sh.de)

Bearbeitung: Dipl.-Ing. Dagmar Much (Dagmar.Much@lkn-sh.de)

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03KIS064 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt beim Autor.

Kurzfassung

Die Westküste Sylts weist bedingt durch komplexe Wechselwirkungen zwischen Hydrologie und Morphologie im Bereich des Strandes und Vorstrandes einen langfristigen jährlichen Küstenrückgang von rund einem Meter auf. Seit 1972 wird versucht, die Küstenlinie durch wiederholte Sandaufspülungen zu halten. Dadurch konnte ein weiterer Küstenrückgang an Düne und Kliff sowie die Zerstörung vorhandener Küstenschutzanlagen weitgehend verhindert werden. An den Inselenden sind dagegen Erosionen im Vorstrandbereich festzustellen.

Durch die regelmäßig durchgeführten Strandaufspülungen wurden umfangreiche Vordünen geschaffen, wobei die im Vorstrandbereich auftretenden Erosionen nicht immer ausgeglichen werden konnten. Das hat zur Folge, dass sich dort der Eintrag der Seegangsenergie auf den Strand erhöht. Zum Schutz der bestehenden Strände, Dünen und Kliffs wird daher eine Versorgung der strandnahen Brandungszone durch das Einbringen von Sand seeseitig des Riffes als sogenannte Vorstrandaufspülung durchgeführt.

Um die bei der Planung von Sandersatzmaßnahmen geforderte Prognose der Wirksamkeit zu erreichen, sollten morphodynamische Simulationsmodelle zum Einsatz kommen. Numerische Simulationsmodelle sind innerhalb der Hydrodynamik bereits ein anerkanntes Werkzeug. Bei der morphodynamischen Modellierung besteht die Schwierigkeit, die einzelnen Prozesse so naturnah zu berücksichtigen, wie sie tatsächlich ablaufen. Die Morphodynamik unterliegt aufgrund von mittel- bis langfristigen als auch wegen kurzfristigen Veränderungen während eines Sturmflutereignisses einer erheblichen Komplexität.

Der vorliegende Schlussbericht der Pilotphase zur „Modellierung der morphodynamischen Prozesse im Strand- und Vorstrandbereich sandiger Brandungsküsten“ soll die Eignung morphodynamischer Modelle für die Westküste Sylts aufzeigen. Dafür erfolgt zunächst eine vergleichende Bewertung von weltweit eingesetzten numerischen Modellen. Aus einer Einschätzung der Leistungsfähigkeit der Simulationsmodelle auf der Grundlage von Validierungsdokumenten und Modellstudien resultiert eine Modellvorauswahl für mögliche weitergehende Untersuchungen für die Eignung im Bereich der Sylter Westküste. Der Schlussbericht weist dabei auf die Herausforderungen bei der morphodynamischen Modellierung und der Beurteilung von Modellergebnissen hin. Wenngleich es heute noch nicht gelingt, die physikalischen Prozesse ausreichend naturgetreu zu beschreiben und die Modelle daher Prozessvereinfachungen und/oder -generalisierungen unterliegen, sind Kalibrierungen und Validierungen der Modelle auf der Grundlage entsprechender Naturdaten äußerst wichtig. Erst mit diesen Ergebnissen sind verlässlichere Beurteilungen der Eignung einzelner Simulationsmodelle möglich.

Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG	2
INHALTSVERZEICHNIS	3
BEMERKUNG	5
1 ÜBERBLICK.....	5
1.1 Untersuchungsgebiet	5
1.2 Aufgabenstellung	7
1.3 Voraussetzungen für das Vorhaben.....	7
1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	7
1.5 Aktueller wissenschaftlicher und technischer Stand	8
1.6 Verwendete Fachliteratur und Informationsdienste	9
1.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	9
2 EINGEHENDE DARSTELLUNG	10
2.1 Modellanforderungen.....	10
2.2 Modellübergreifende Herausforderungen.....	10
2.3 Modellvielfalt.....	12
2.4 Modellbeurteilung.....	13
2.4.1 Asmita.....	13
2.4.2 BEACHPLAN	13
2.4.3 CCH2D	13
2.4.4 COSMOS.....	14
2.4.5 CROSMOR.....	16
2.4.6 Delft3D	17
2.4.7 ESTMORF	19
2.4.8 GENESIS	20
2.4.9 LITPACK	20
2.4.10 MARINA	22
2.4.11 MIKE21	22
2.4.12 NEWDUNE	23
2.4.13 PISCES	24
2.4.14 PONTOS.....	25
2.4.15 SBEACH	26
2.4.16 SediMorph	26
2.4.17 TIMOR	27
2.4.18 TRIM	27
2.4.19 UNIBEST	28

2.4.20	UnTRIM	29
2.4.21	3DD Suite	30
2.5	Verfügbare Datengrundlage und zu optimierendes Messkonzept.....	32
2.6	Ergebnis.....	34
2.7	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	36
2.8	Verwertbarkeit der Ergebnisse	37
2.9	Kenntnisse zu Fortschritt und Vorhaben an anderer Stelle	38
3	ZUSAMMENFASSUNG.....	39
4	GLOSSAR	40
5	SCHRIFTTUM	43
6	ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS	50

Bemerkung

Die im Bericht erwähnten *Fachbegriffe* aus dem Bereich der morphodynamisch-numerischen Modellierung sind im Glossar in Kapitel 4 kurz erläutert. Auf eine detaillierte Beschreibung der komplexen Zusammenhänge wird an dieser Stelle verzichtet und auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen, da der Fokus des Projektes auf der praktischen Modellanwendung liegt.

1 Überblick

Nachfolgend wird ein allgemeiner Überblick sowohl über die fachlichen und wissenschaftlichen Aspekte als auch über allgemein organisatorische Dinge der Pilotphase gegeben.

1.1 Untersuchungsgebiet

Die Westküste der Nordseeinsel Sylt zeichnet sich durch die Profilgestalt eines Riff-Rinne-Systems aus. Das ungefähr 300 Meter parallel der Insel vorgelagerte Sandriff ist charakteristisch für den Vorstrandbereich der Insel (Abbildung 1-1). Zwischen diesem Riff und dem Strandbereich finden ständig Sediment austauschprozesse statt. Dieses Riff ist es auch, welches als natürlicher Wellenbrecher fungiert und die Wellenenergie bereits vor dem Strandbereich abmindert. Die Energiedissipation nimmt jedoch mit steigendem Wasserstand bei Sturmfluten ab, sodass die Wellenenergie mitunter ungebremsst auf die Küste trifft. Die Westküste ist hauptsächlich durch Strandbereiche mit Dünen gekennzeichnet. Zusätzlich befinden sich in Höhe Wenningstedt-Kampen auch eine Steilkante (Kliff) und bei Westerland Küstenlängswerke (ALR HUSUM, 1985; 1997).

Die Insel Sylt stellt aufgrund der hydrographischen und hydrologischen Bedingungen insgesamt ein offenes System mit einer negativen Sandbilanz dar. Bei Sturmflut erodieren Kliff und Dünen. Durch wellen- bzw. tideinduzierte Längsströmungen wird das Material anschließend küstenparallel nach Norden und Süden verfrachtet bis es schließlich an den Inselenden in den großen Tiderinnen für das Inselfsystem verloren geht. Dieser Sandverlust beträgt im Jahresmittel ungefähr 1 Mio. m³. Da für die Standsicherheit von Deckwerken und Ufermauern bzw. für den Erhalt von Dünen und Kliff gewisse Strandbreiten nicht unterschritten werden dürfen, werden seit 1972 an der Westküste regelmäßig Sandersatzmaßnahmen vorgenommen (ALR HUSUM, 1997).

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Südteil der Insel. Es erstreckt sich, wie in Abbildung 1-2 dargestellt, auf rund 12 km Länge und 1 km Breite von Rantum (56+584) nach Hörnum (68+087). Dort werden seit 1983 fortwährend Küstenschutzmaßnahmen durch Strandaufspülungen vorgenommen, zuletzt im Jahr 2007 in den Bereichen 64+287 bis 65+537 und 66+437 bis 67+587. Im Jahr 2006 fanden erstmals im Süden der Insel Vorstrandaufspülungen statt. Dabei wurde in den Bereichen von Rantum (57+585 - 58+084), Puan Klent (59+085 - 60+086) und Sansibar (61+436 - 62+336) Sand im Vorstrand verklappt, da dieser in den letzten Jahrzehnten fortschreitend erodierte.

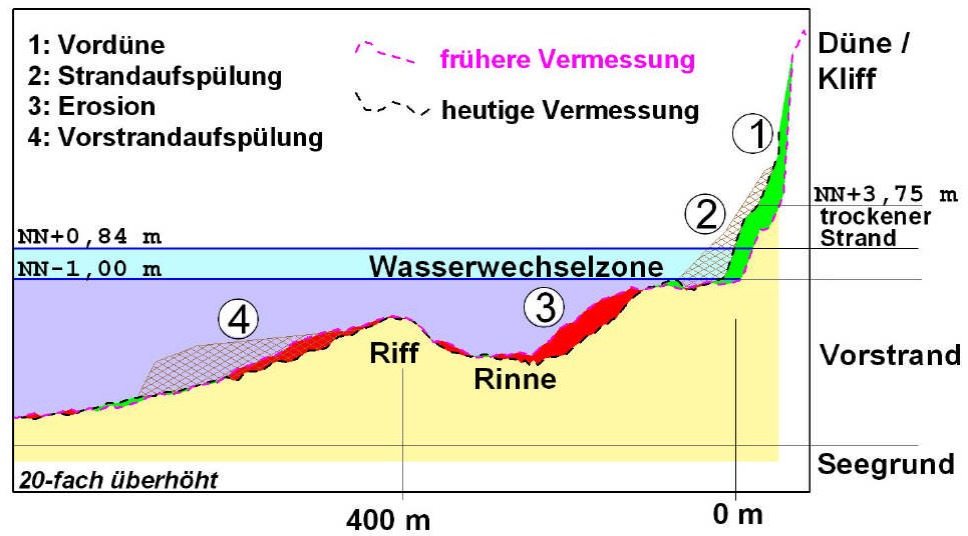


Abbildung 1-1: Prinzipskizze zur Strand- und Vorstrandaufspülung (ALR Husum, 2006)

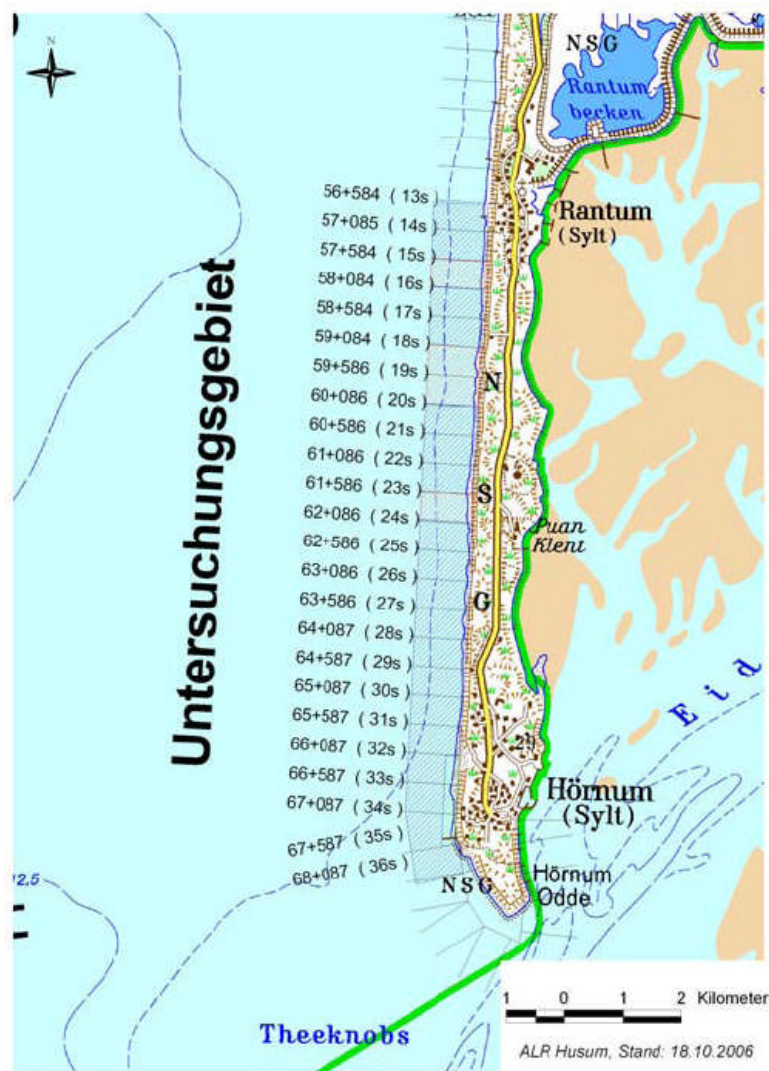


Abbildung 1-2: Ausschnitt Rantum bis Hörnum mit Stationierung und Profilbezeichnung (ALR Husum, 2006)

1.2 Aufgabenstellung

Bislang kann die Wirksamkeit der Sandersatzmaßnahmen nur im Rückblick, im sogenannten Hindcast, durch die Analyse der Vermessungsdaten überprüft werden. Zukünftig ist auch eine Beurteilung der Maßnahmen auf die morphologische Entwicklung des Küstennahbereiches im Forecast, also bereits während der Planung, angestrebt. Dieses ist aber nur durch den Einsatz geeigneter numerischer Simulationsmodelle möglich.

Daher soll in der Pilotphase zunächst im Rahmen einer vergleichenden Bewertung ermittelt werden, wo bereits numerische und empirische Modelle für die Prognose von morphodynamischen Prozessen an sandigen Brandungsküsten zum Einsatz gekommen sind und welche Ergebnisse damit im Vergleich zur Naturdatenanalyse erzielt wurden.

Aufbauend auf diesem Wissen sollen die Leistungsmerkmale der am Markt verfügbaren Simulationsmodelle für den Einsatz im Untersuchungsgebiet „Westküste Sylt“ nachvollziehbar eingeschätzt werden.

Weiterhin sind das bestehende Messkonzept und die vorliegende Datengrundlage zu überprüfen. Gegebenenfalls ist das Messkonzept in Art und Umfang so zu optimieren, dass die erforderlichen Daten für eine modelltechnische Untersuchung der morphodynamischen Prozesse einschließlich des morphodynamischen Verhaltens von Aufspülmaßnahmen im genannten Problembereich zur Verfügung stehen und eine tragfähige Grundlage für eine morphodynamische Modellierung bilden.

Die Ergebnisse der Pilotphase zeigen, inwieweit bereits am Markt verfügbare *morphodynamische Simulationsmodelle* die von Tide und Seegang abhängigen morphologischen Prozesse in den benannten Problembereichen hinreichend naturähnlich abbilden können bzw. welcher Handlungsbedarf besteht, um einen erfolgreichen Einsatz als Planungswerkzeug zu gewährleisten.

In der Pilotphase soll ebenso aufgezeigt werden, mit welcher Zielrichtung sowie mit welchen Methoden und Modellen morphodynamische Untersuchungen an sandigen Brandungsküsten weitergeführt werden können.

1.3 Voraussetzungen für das Vorhaben

Das Vorhaben „Modellierung der morphodynamischen Prozesse im Strand- und Vorstrandbereich sandiger Brandungsküsten“ mit dem Förderkennzeichen 03KIS064 ist ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördertes Projekt. Zur Bearbeitung des Vorhabens stand ein Zeitraum von acht Monaten (11/2006 - 06/2007) zur Verfügung. Die Bearbeitung des Projektes lag ausschließlich beim Amt für ländliche Räume (ALR) in Husum. Für die Pilotphase wurde beim Projektnehmer mit Dagmar Much eine wissenschaftliche Mitarbeiterin für die Dauer von fünf Monaten befristet angestellt. Die Pilotphase wurde zusätzlich durch Herrn van Riesen und Herrn Winskowsky begleitet.

1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Pilotphase war ursprünglich für die Dauer von acht Monaten ausgelegt. Durch eine erst zu einem späteren Zeitpunkt mögliche Einstellung der wissenschaftlichen Mitarbeiterin beim

ALR Husum verkürzte sich die aktive Arbeitszeit in der Pilotphase auf fünf Monate. Die in der Vorhabenbeschreibung aufgezeigten Arbeitspakete (AP) sind beibehalten worden:

AP 1: Vergleichende Bewertung

Die vergleichende Bewertung ergibt eine Dokumentation der weltweit eingesetzten numerischen und empirischen Modelle für die Prognose von morphodynamischen Entwicklungen im Bereich der Strände und Vorstrände sandiger Brandungsküsten. Dabei wird festgestellt, ob entsprechende nachvollziehbare *Kalibrierungs-* und *Validierungsdokumente* für den Nachweis der Modellqualität zur Verfügung stehen. Eine Bewertung der Güte der Modelle erfolgt durch den Vergleich der Prognoseergebnisse mit den Ergebnissen der Naturdatenanalyse, getrennt nach kurz-, mittel- und langfristigen Prognosen.

AP 2: Einschätzung der Leistungsfähigkeit verfügbarer Simulationsmodelle

Ausgehend von den Ergebnissen zu AP 1 erfolgt eine Einschätzung der Leistungsfähigkeit der auf dem Markt verfügbaren Modelle hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten und –grenzen für den Bereich sandiger Brandungsküsten am Beispiel der Westküste von Sylt. Dies beinhaltet die Abschätzung der Prognosefähigkeit der im Modell abgebildeten Prozesse sowie des Vertrauensbereichs der Modellergebnisse. Defizite in der Modelltechnik und des Prozessverständnisses werden aufgezeigt.

AP 3: Aufstellung eines zukünftigen Messkonzeptes

Im Rahmen der Pilotphase ist das derzeitige Messkonzept im Hinblick auf eine Nutzung der Daten für morphodynamische Modellierungen zu überprüfen.

1.5 Aktueller wissenschaftlicher und technischer Stand

Seit mehreren Jahrzehnten werden mathematische Modelle zur Simulation der Küsten- und Binnengewässerprozesse eingesetzt. Zur Entwicklung der Simulationsverfahren wurden national und international erhebliche Aufwendungen erbracht. Nachdem anfangs nur einfache konzeptionelle oder empirische Modelle eingesetzt wurden und später hydrodynamisch-numerische Tidemodelle für Wasserstand und Strömung hinzukamen, werden heutzutage gekoppelte morphodynamische Modelle mit Seegang und Sedimenttransport eingesetzt.

Die Hafenbautechnische Gesellschaft (HTG) kommt bei ihrer Auflistung der prioritären Forschungs- und Entwicklungs-Schwerpunkte im Jahr 2006 zu dem Ergebnis, dass es für die Modellierung der Morphodynamik im Küsten- und Ästuarraum bisher kein von der Fachwelt anerkanntes zuverlässiges Modell für den operationellen Einsatz gibt, da es bisher an einer allgemein akzeptierten Methodik für die Erfassung der skalenübergreifenden Prozesse unter Berücksichtigung von Wind, Seegang, Strömung und Sedimenteigenschaften fehlt (DÜCKER ET AL., 2006). Die im Rahmen von Forschungsprojekten („Ebbdelta” und „Promorph”) geförderten Arbeiten zu diesem Thema befassten sich bislang nur mit der Untersuchung der mittelfristigen Änderung der Küstenmorphologie und der Sedimentdynamik in den Wattgebieten Schleswig-Holsteins. Wichtige Erkenntnisse zur grundsätzlichen Eignung von morphodynamischen Modellen als Prognosewerkzeug in großräumigen Wattgebieten konnten dabei gesammelt werden (MAYERLE ET AL., 2005).

Im Rahmen des Workshops des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) zum Thema “Morphodynamik” am 21. und 22. September 2005 in Büsum wurde allerdings deutlich, dass Forschungsbedarf u.a. bei den Ansätzen zur Beschreibung der Welleneinwirkung auf den Sedimenttransport und zur Berücksichtigung der Variabilität der Sedimente gesehen wird. Mit den zurzeit zur Verfügung stehenden morphodynamischen Modellen können in der Regel lediglich Entwicklungstendenzen aufgezeigt werden und die aus numerischen Langzeitsimulationen gewonnenen Aussagen sind eher statistischer Natur (KFKI-WORKSHOP, 2005).

Im Rahmen der Sitzung der KFKI-Beratergruppe am 16. Mai 2006 wurde erkennbar, dass für die Modellierung von Morphodynamik eine weitergehende Vertiefung des Prozessverständnisses notwendig ist. Es wurde als sinnvoll erachtet, primär auf etablierte morphodynamische Modelle für zukünftige Untersuchungen zurückzugreifen. Als zielführend wurde es angesehen, zukünftige Untersuchungen zunächst an Referenzgebieten zu orientieren, die beispielhaft für maßgebliche Prozesse sind.

1.6 Verwendete Fachliteratur und Informationsdienste

Als Informationsbasis dienten Forschungsberichte, wissenschaftliche Veröffentlichungen, Anwendungsstudien und ein persönlicher Erfahrungsaustausch mit Forschungseinrichtungen, Modellentwicklern, Softwareherstellern, Planungsunternehmen und Behörden. Detaillierte Ausführungen zu den einzelnen Quellen sind dem Schrifttum in Kapitel 0 zu entnehmen. Die Quellen wurden über die bekannten öffentlichen Fachbibliotheken, aus den Datenbanken der entsprechenden Forschungsinstitutionen, dem Internet oder über die Autoren selbst bezogen.

1.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Für die Bearbeitung der Arbeitspakete und um Informationen zu den einzelnen Modellen und ihrer Anwendung zu erhalten, erfolgten Kontaktaufnahmen zu zahlreichen Institutionen und Unternehmen, die auf dem Gebiet der morphodynamischen Modellierung tätig sind. Das Interesse galt dabei den Erfahrungswerten bei der morphodynamischen Modellierung, Anwendungsstudien und eventuell verfügbaren Validierungsdokumenten. Auf eine detaillierte Nennung der kontaktierten Personen wird an dieser Stelle verzichtet. Eine Auflistung der Kontaktpersonen ist beim Projektnehmer hinterlegt.

2 Eingehende Darstellung

Im Folgenden werden die Herausforderungen bei einer morphodynamischen Modellierung, die diversen Forschungsanstrengungen, die Modellbeurteilungen und die Ergebnisse der Pilotphase aufgezeigt.

2.1 Modellanforderungen

Die Beurteilung der Modelleignung für eine morphodynamisch-numerische Modellierung im Bereich der Westküste Sylt kann nur mit Kenntnis der Anforderungen erfolgen, welche das zukünftige Modell zu erfüllen hat. Mit den Ergebnissen der Modellrechnung soll in diesem Fall die Wirksamkeit von Sandersatzmaßnahmen im Strand- und Vorstrandbereich im Hinblick auf eine Optimierung des Küstenschutzes untersucht werden. Zusätzlich sollen mithilfe der numerischen Modelle vergleichende Analysen der morphologischen Aktivität ohne und mit Küstenschutzmaßnahmen sowie aufgrund unterschiedlicher Ausführungsvarianten der geplanten Küstenschutzmaßnahme (Tetrapodenwerke, Strandmauern, Deckwerke, Sandersatzmaßnahmen) vorgenommen werden (siehe auch Kapitel 2.7). Mit den Modelluntersuchungen sollen dabei kurz- (Tage; Sturmflutereignis), mittel- (Wochen bis Jahre; saisonale Betrachtung) und langfristige (Dekaden) morphodynamische Veränderungen untersuchbar sein. Daher muss vor allem bekannt sein, welche physikalischen Prozesse für die morphologische Aktivität vornehmlich relevant sind und in dem Modell berücksichtigt sein müssen. Für die Charakterisierung des Systems “Westküste Sylt” gilt folgendes:

- Tide (Mesotidenküste; Tidenhub zwischen NN+1,8m und NN+3,6m)
- Seegang (Brandungsküste, Wellentransformation, ind. Brandungsströmung)
- Riff-Rinne-System (Wechselwirkung Riff-Rinne-Strand)
- Interaktion Wellen-Strömung
- Wellen- und strömungsinduzierter Küstenlängs- und Küstenquertransport
- Windinduzierter Sedimenttransport

Letztendlich hängt die Modellwahl auch von der verfügbaren Computerleistung ab. Die Möglichkeit numerische Untersuchungen ohne jegliche Einschränkungen durch die Rechnerkapazität durchzuführen, wird in der nachfolgenden Beurteilung der Modelleignung vorausgesetzt.

2.2 Modellübergreifende Herausforderungen

Eine morphologische Veränderung ist das Ergebnis verschiedener natürlicher (Abbildung 2-1) und anthropogener Faktoren. Diese zahlreichen Faktoren treten in unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen auf und sind zusätzlich häufig noch von unterschiedlicher Art (kontinuierlich oder zufällig, reversibel oder irreversibel) (EUROSION, 2004). Die gegenseitigen Wechselwirkungen sind dabei vorwiegend nichtlinear, sodass die Vorhersage der morphologischen Veränderungen umso komplexer und schwieriger wird, je größer die Zeit- und Raumskalen sind (LECHER ET AL., 2001).

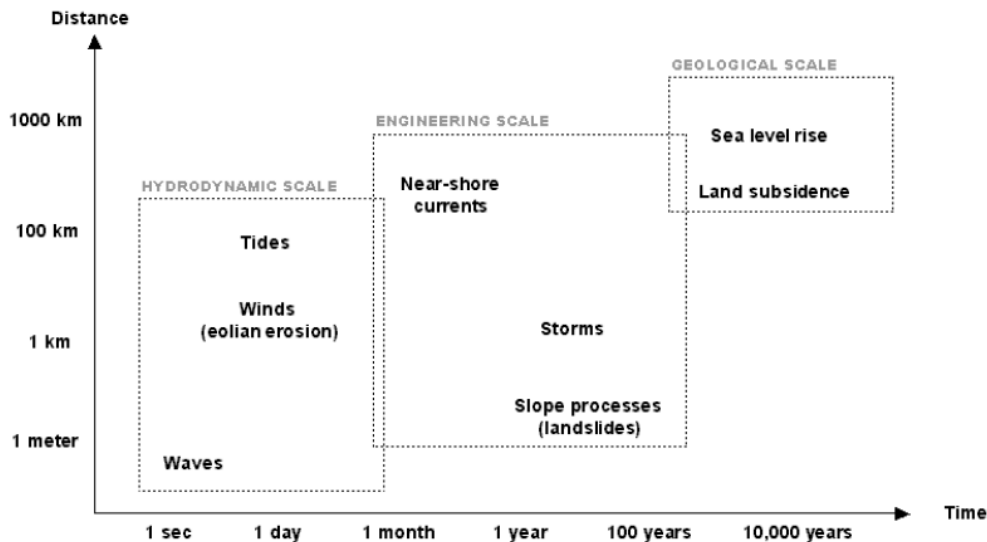


Abbildung 2-1: Zeit- und Raumskalen der Morphologie beeinflussenden natürlichen Faktoren (erosion, 2004)

Die Schwierigkeiten innerhalb der morphodynamischen Modellierung sind vielfältig. Mit mehreren Parametern kann die Realität zwar genauer nachgebildet werden, es bleiben aber die Unsicherheiten hinsichtlich Größenordnung und Relevanz der Einzelparameter bei den physikalischen Prozessen, die sowohl selbst als auch in ihren Wechselbeziehungen untereinander verstanden sein müssen. Hinzu kommt, dass die Identifizierung der ausschlaggebenden Prozesse in den unterschiedlichen Zeitskalen schwierig ist. Die entscheidenden Prozesse für die Veränderungen in der Morphologie sind bei einem kurzen Zeitraum, wie etwa bei einem Sturmflutereignis, nicht dieselben wie bei einem langen Zeitraum (NEWE, 2004). Generell besteht ein schmaler Grad zwischen einer zu oberflächlichen (einfache CERC-Formel) und einer zu detaillierten Beschreibung der wirksamen Prozesse, wie in Blackboxsystemen wie LITPACK oder MIKE21 (COOPER ET AL., 2004). VAN RIJN ET AL. (2005) weisen auf die Fehlermultiplikation im Laufe der Simulationsdauer einer morphodynamischen Modelluntersuchung hin, die sich durch Fehler in den Eingangsdaten, Fehler in den Modellformulierungen und durch Extrapolationsfehler infolge einer Modellanwendung außerhalb der räumlichen und zeitlichen Gültigkeit ergibt.

Modellvergleichsstudien unter dem Gesichtspunkt der praktischen Anwendbarkeit sind sehr rar und nicht selten schon einige Jahre alt sind. Eine zwischenzeitliche Verbesserung der Modelle kann daher nicht ausgeschlossen werden.

BRØKER ET AL. (1992) vergleichen Modelle anhand von Laborergebnissen für eine kurzfristige Küstenprofilmodellierung unter direktem Wellenangriff. Nahezu alle verwendeten Modelle existieren heute nicht mehr oder waren Vorstufen bzw. Teilmodelle einiger aktueller Modellsysteme. Die Ergebnisse weisen auf die Problematik hin, dass die Prozessbeschreibungen besonders für das Geschwindigkeitsfeld in der Brandungszone schlecht verstanden und beschrieben werden und dass die Modelle allesamt die Dünenerosion und die Prozesse im Wasserwechselbereich nicht berücksichtigen (ROELVINK ET AL., 1993).

SCHOONEES ET AL. (1995) bewerten zehn „gut bekannte, weit verbreitete und erfolgreich angewendete Küstenquertransportmodelle“. Es wird darauf hin gewiesen, dass es ohne ein einheitliches Vergleichsmaß keinen endgültigen Vergleich geben kann. Die Zuordnung bzw.

Beurteilung der Modelle erfolgt daher innerhalb zweier Kategorien: erstens auf der theoretischen Grundlage, dass heißt der verwendeten theoretischen Ansätze und zweitens auf dem Umfang der *Verifizierung*. Die Klassifizierung erfolgt ausschließlich nach den Attributen „am besten“, „akzeptabel“ und „weniger tauglich“. Ein solcher Modellvergleich unterliegt selbstverständlich einer gewissen Subjektivität und lässt eine eindeutige Unabhängigkeit vermissen. SCHOONEES ET AL. (1995) vergleichen unter anderem auch die folgenden Modellansätze, die auch Bestandteile kommerzieller Modelle und Modellsystem sind: Bailard (COSMOS, UNIBEST), Steetzel (PONTOS), Larson & Kraus (SBEACH) und der Ansatz des DHI-Modells (LITPACK). Diese Ansätze weisen im Vergleich zu den restlichen verglichenen Quertransportansätzen die besseren Ergebnisse auf und können nach SCHOONEES ET AL. (1995) für eine praktische Anwendung empfohlen werden. Auf die modellbedingten Einschränkungen wird in den Unterkapiteln der jeweiligen Modellbeurteilung in Kapitel 2.4 eingegangen.

Ein weiterer Modellvergleich erfolgt durch NICHOLSON ET AL. (1997). Die morphodynamischen Modelle werden dabei im Hinblick auf die Formulierung des Schwebstofftransportes unterschieden. Am Beispiel eines Offshore-Wellenbrechers werden unter anderem die Simulationsergebnisse der kommerziellen Modelle MIKE21, Delft3D und PISCES mit Labor- und Felddaten verglichen. Die Studie zeigt, dass die Modellergebnisse naturgemäß von dem verwendeten Sedimenttransportansatz stark abhängig sind und dass die Interaktionen zwischen Hydrodynamik und Morphodynamik einen starken Einfluss haben. Aussagen über die Qualität und das Leistungsvermögen der einzelnen Modelle finden sich bei NICHOLSON ET AL. (1997) nicht.

Die Erkenntnisse, dass die Modellergebnisse stark vom verwendeten Sedimenttransportansatz abhängig sind und die Berücksichtigung der Interaktionen von Hydrodynamik und Morphodynamik im Modell notwendig ist, haben heute auch noch Bestand (KUIJPER ET AL., 2004; ZÓZIMOL ET AL., 2006).

2.3 Modellvielfalt

Zu Beginn der Recherche zum wissenschaftlichen Stand der morphodynamischen Modellierung und der Anwendung der Modelle in der Praxis entsteht schnell der Eindruck, dass vermeintlich eine Vielzahl von morphodynamischen Modellen und Modellsystemen existiert. Nach und nach wird jedoch deutlich, dass viele Modelle oftmals nur projektgebunden sind und nicht weiterentwickelt, verbessert oder anwendungstauglich gemacht werden.

Einige Modelle, die häufiger in der Literatur erwähnt werden, finden mit Einsatzgebieten in den Vereinigten Staaten und Europa (u.a. Belgien, Dänemark, Deutschland, Großbritannien, Italien, Niederlande, Spanien) weltweit Verwendung. Dabei handelt es sich sowohl um Modelle, die bereits durch unabhängige Anwender verwendet werden und für die auch ausführliche Modellbeschreibungen vorhanden sind, als auch um Modelle, die entweder hauptsächlich durch den Modellentwickler selbst verwendet werden oder sich noch in Testphasen befinden. Der vermehrte Einsatz dieser Modelle lässt jedoch den Schluss zu, dass es jeweils geeignete Untersuchungen zur *Kalibrierung* und *Validierung* der Modelle geben müsste.

Eine Übersicht der Modelle zeigt Tabelle 2-4. Eine ausführlichere Beschreibung und Beurteilung der Modelle finden sich nachfolgend in Kapitel 2.4.

2.4 Modellbeurteilung

Nachfolgend werden die in diesem Bericht untersuchten Modelle kurz vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eignung für die Modelluntersuchungen an der Westküste Sylts bewertet. Die Informationen zu den einzelnen Modellen liegen in unterschiedlichen Detaillierungsgraden vor und sind aus verschiedenen wissenschaftlichen Artikeln, aus persönlichen Mitteilungen oder von Internetseiten zusammengetragen.

2.4.1 Asmita

Mit dem semi-empirischen Modell [ASMITA](#) (Aggregated Scale Morphological Interaction between a Tidal basin and the Adjacent coast) sind Untersuchungen zu langfristigen morphologischen Entwicklungen von Küstensystemen unter Tideeinfluss möglich. Das Konzept basiert auf einer Schematisierung des Prielsystems in morphologische Untereinheiten, in denen das morphologische Gleichgewicht von hydrologischen und morphometrischen Bedingungen abhängig ist. Tritt in einer oder mehreren Zellen ein morphologisches Ungleichgewicht auf, wird durch die Nachbarzellen versucht, dieses auszugleichen, um wieder ein Gesamtsystem im morphologischen Gleichgewicht zu erhalten. Das *verhaltenbasierte Modell* unterliegt der Annahme, dass der Schwebstofftransport repräsentativ für das Transportverhalten im System ist und somit die morphologischen Veränderungen bestimmt. Der Sedimenttransport wird dabei nach Galappatti & Vreugdenhil erfasst (STEETZ ET AL., 1998). Das ein-dimensionale *multi-layer* Modell ist von Delft Hydraulics (Stive) in den Niederlanden entwickelt worden.

ASMITA ist ausschließlich für die Simulation von morphologischen Entwicklungen und Sedimentaustauschprozessen zwischen Tidebecken und Außendelta und daher nicht für Untersuchungen an der offenen Westküste Sylts geeignet.

2.4.2 BEACHPLAN

BEACHPLAN ist ein kommerzielles zwei-dimensionales *Linienmodell* von HR Wallingford, UK. Es dient der langfristigen Prognose der Küstenlinienentwicklung nach dem Bau von Küstenschutzmaßnahmen. Da auch trotz mehrmaliger Anfrage bei dem Modellentwickler keine Modellbeschreibungen zur Verfügung gestellt wurden, können hier keine Einzelheiten über BEACHPLAN genannt werden. Einzig über Antonio Lizzardo (TECHNITAL, Italien) ist bekannt, dass BEACHPLAN den littoralen Küstenlängstransport aufgrund des lokalen Wellenklimas unter Berücksichtigung der Wellentransformationsprozesse, der Sedimentverteilung sowie der bestehenden Bauwerke berechnet.

Für dieses Modell liegen aus oben genannten Gründen bis dato weder *Validierungs-* oder *Kalibrierungsberichte* noch Studien über Modellanwendungen vor, weshalb eine Beurteilung der Modelleignung für die Westküste Sylts nicht erfolgen kann.

2.4.3 CCH2D

Das zwei-dimensionale *Flächenmodell* [CCH2D](#) vom „National Center for Computational Hydroscience and Engineering“ der Universität Mississippi, USA (Wang, Jia & Hu) ist ein instationäres Abfluss- und Sedimenttransport-Modell mit beweglicher Sohle. Der Sedimenttransport ist sowohl für kohäsives als auch für nicht kohäsives Sediment (Geschiebe-,

Schwebstoff- und die Gesamtfracht) modellierbar. Ursprünglich ist CCH2D ein Flusslauf-Modell und als solches frei verfügbar.

Kommerzielle Erweiterungsmodule für CCH2D wie [CCHE-TIDE](#) und [CCHE2D-COAST](#) ermöglichen eine Untersuchung von Küstengewässern.

Die Erweiterung CCHE-TIDE ist ein Zusatzmodul zur Simulation von Tidenströmungen für Ästuar- und Küstengewässer. Das Modell wurde mit verschiedenen Labor- und Naturdaten getestet und *validiert* (DING, 2007; DING ET AL., 2006; 2007).

Die Erweiterung CCHE2D-COAST ermöglicht die Simulation von Küstenprozessen an Küsten mit unregelmäßiger Küstenlinie unter Welleneinfluss. Das *prozessbasierte* Modell besteht aus Modulen für die Simulation von irregulären Wellen und küstennahen Strömungen. Das Sedimenttransport-Modul wird durch einen Ansatz für die Berücksichtigung von strömungs- und welleninduzierten Transport erweitert. Dabei werden ebenso die drei-dimensionalen Strömungseffekte in der Brandungszone und der Wellenauflauf berücksichtigt (WWW-CCH2D-COAST). Das Wellenmodell ist für verschiedene Wellenspektren und das Strömungsmodell für küstennahe Strömungen *validiert* worden. Die *Validierung* des morphodynamischen Modells fand bisher nur unter Laborbedingungen für eine Wellenbrecherumgebung statt.

Aktueller Forschungsschwerpunkt ist zur Zeit die Entwicklung eines drei-dimensionalen Strömungsmodells (WWW-CCH2D-TIDE).

Die *Validierungsberichte* stehen weder für CCHE2D-COAST noch für CCHE-TIDE öffentlich zur Verfügung. Eine Beurteilung der Modelleignung für die Westküste Sylts ist daher nicht möglich.

2.4.4 COSMOS

Das zwei-dimensionale *Profilmodell* COSMOS von Soulsby (HR Wallingford, UK) für die Modellierung von physikalischen Prozessen in der Brandungszone und im Strandbereich während Sturmflutereignissen beruht auf der Voraussetzung, dass die Tiefenlinien parallel zur Küstenlinie sind. Mit dem Modell werden sowohl der Küstenlängs- als auch der Küstenquertransport berechnet. Als Ansatz für den Sedimenttransport ist ein modifizierter Bailard-Bagnold-Ansatz implementiert. Das *deterministische* Modell berücksichtigt zur Simulation der Morphodynamik die Wellenbedingungen einschließlich ihrer Transformationsprozesse und die Strömungsverhältnisse. Die Küstenquerströmungen werden in ihrer vertikalen Verteilung erfasst (quasi-3D Modell). Das Wellenbrechen wird durch einen konstanten Brechkoeffizienten abhängig von den Offshore-Bedingungen und die Sedimentverteilung über einen einzelnen repräsentativen Korndurchmesser berücksichtigt (NAIRN ET AL., 1993; VAN RIJN ET AL., 2003).

Innerhalb des MAST III-Programms [COAST3D](#) (1997-2001) wurde ein Modellvergleich durchgeführt. Das Untersuchungsgebiet „Egmond“ ist eine Mesotidenküste und durch zwei im Vorstrandbereich liegende Riffe gekennzeichnet (Abbildung 2-2). Durch vorangestellte Messkampagnen standen für den Modell-Natur-Vergleich ausreichend Naturdaten zur Verfügung. Dadurch konnte die Modelleignung verschiedener Modelle (u.a. auch von COSMOS) für die Untersuchung des morphologischen Verhaltens eines Riff-Rinne-Systems beurteilt

werden. Da es sich zudem auch um eine sandige Küste handelt, ist das Untersuchungsgebiet „Egmond“ mit dem vor der Westküste Sylts vergleichbar.

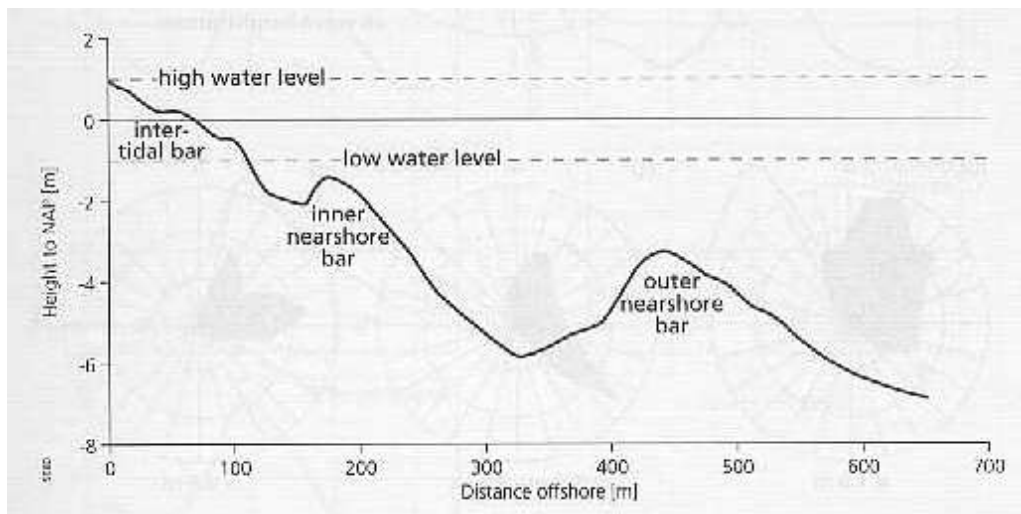


Abbildung 2-2: Querprofilform im Vorstrandbereich im Untersuchungsgebiet „Egmond“ (van Rijn et al., 2005)

Die Ergebnisse der Modelle werden in dem Vergleich ausschließlich über *statistische Vergleichsparameter* beurteilt. Diese Vergleichsparameter ergeben sich aus den Differenz zwischen den Modellergebnissen und den Naturdaten. Die Vergleichsparameter bieten dabei eine höhere Objektivität als eine reine Beurteilung mit Attributen wie „gut“, „angemessen“ oder „zufriedenstellend“.

Die Ergebnisse der morphodynamischen Simulationen sind sehr unterschiedlich. Es zeigt sich, dass die Modellrechnungen nicht nur untereinander große Unterschiede in der Qualität der Ergebnisse aufweisen, sondern auch das Modell starken Schwankungen je nach Küstenabschnitt (Strand, äußere oder innere Brandungszone) unterliegt.

Mit dem Modell COSMOS sind gute morphodynamische Untersuchungen für das komplette Riff-System zum unmittelbaren Zeitpunkt nach dem Sturmflutereignis und für den Strandbereich und strandnahen Bereich im Zeitraum vor dem Sturmflutereignis möglich. Für morphologische Untersuchungen über einen längeren Zeitraum ohne Extremereignis ist es für das Gesamtsystem jedoch unbrauchbar. Diese Schwachstelle des Modells resultiert daher, dass die Energiedissipation in der Brandungszone nicht ausreichend nachgebildet werden kann. Eine Untersuchung saisonaler morphologischer Veränderungen über mehrere Monate ist mit COSMOS ausgeschlossen (VAN RIJN ET AL., 2000).

COSMOS ist somit nur für die Simulation von Sturmflutereignissen verwendbar, da es keine repräsentativen Ergebnisse für die Strandentwicklung unter mittleren Bedingungen liefert. Dies bestätigte auch Mike Walkden von der Universität Newcastle in England (pers. Mitteilung).

Aufgrund der Modelleinschränkungen bezüglich des Wellenbrechens und der ungenügenden Modellergebnisse für mittelfristige Untersuchungen ist eine Anwendung des Modells COSMOS für die Untersuchung der morphodynamischen Entwicklung an der Brandungsküste Sylts nicht zu empfehlen.

2.4.5 CROSMOR

Das Küstenprofilmodell [CROSMOR](#) von Grasmeijer (ehemals Universität Utrecht, NL) ist ein kommerzielles *probabilistisches* Küstenquertransport-Modell zur Ermittlung von Profiländerungen unter Berücksichtigung von Wellen, Wind und Tideströmungen. Es ermöglicht die Berechnung der kurz- und mittelfristigen Dünen-, Strand- und Vorstranderosion. Das Modell besteht aus Untermodulen, in denen die Verteilung der Wellen, die Strömungsgeschwindigkeiten, der Sedimenttransport und schließlich die daraus resultierenden Profiländerungen berechnet werden. Die Strömungsverhältnisse werden sowohl küstenlängs als auch küstenquer berücksichtigt. Der Sedimenttransport wird als wellen- und strömungsinduzierter Transport über Ansätze von Ribberink oder van Rijn bestimmt (GRASMEIJER ET AL., 2002). Die Berechnung der Transportraten und der morphologischen Veränderungen entlang von Küstenprofilen kann einschließlich Böschungen, Bermen oder Sandriffen erfolgen. Das Wellenbrechen wird in CROSMOR durch einen variablen Brechkoeffizient berücksichtigt. Dieser ist vom Quotienten der Wellensteilheit und der Sohlneigung abhängig. Die Berücksichtigung von naturnahen Sedimentverhältnissen ist durch die Möglichkeit, den Sedimenttransport auch für abgestuftes Material (variablen Rauheitsparameter) zu berechnen, gegeben (GRASMEIJER ET AL., 2002).

Zu den Anwendungsmöglichkeiten von CROSMOR gehören sowohl die Untersuchung der Küstenprofiländerungen aufgrund von kurz- und mittelfristigen Veränderungen der Seeangsbedingungen als auch Untersuchungen zum Einfluss von Sandentnahmen im offshore-Bereich auf den Vorstrandbereich und das Küstenquerprofil inklusiv evtl. vorgenommener Sandersatzmaßnahmen (VAN RIJN ET AL., 2001).

Die Modelleignung von CROSMOR wurde ebenfalls in dem Modellvergleich im [COAST3D](#)-Projekt untersucht (Abbildung 2-2). CROSMOR ist danach in der Lage, die Wellenhöhenentwicklung auch unter Berücksichtigung der Energiedissipation im Bereich von Riffen und Sandbänken nachzubilden. VAN RIJN ET AL. (2000) führen dies auf den variablen Wellenbrechkoeffizienten zurück.

Die Ergebnisse der morphodynamischen Simulation sind sehr unterschiedlich zu bewerten. Während der Bereich des äußeren Riffs zu allen Zeitpunkten bei saisonaler und Sturmflutuntersuchung gut simuliert wird, können die Verhältnisse und Bedingungen im Bereich des inneren Riffs nur vor und während des Sturmflutereignisses gut nachgebildet werden. Für mittelfristige Untersuchungen und nach dem Sturmflutereignis sind die Ergebnisse für diesen Bereich und für den Strandbereich dagegen eher mäßig. Der Grund für die schlechten Ergebnisse im Küstennahbereich sind die auftretenden 3D-Effekte (Rippströmungen), die im Modell nicht berücksichtigt werden. Beim gegenwärtigen Wissens- und Forschungsstand ist eine detaillierte Simulation des Küstennahbereiches nicht möglich. Das Verhalten von Strand und Dünen kann derzeit nicht mit Profil-Modellen wie CROSMOR für mittelfristige Zeiträume simuliert werden (GRASMEIJER, 2002). GRASMEIJER ET AL. (2002) weisen trotzdem auf den Modellvorteil hin, dass durch den variablen Rauheitsparameter (abgestuftes Material) realistischere Ergebnisse erzielt werden können als bei Modelsimulationen mit einer konstanten Korngröße (mittlerer Korndurchmesser) und es dadurch nicht zu einer zu flach modellierten Bathymetrie kommt.

Für eine Modellanwendung vor der Westküste Sylts erscheint CROSMOR nach den Ergebnissen der morphodynamischen Simulation im „Egmond“-Gebiet, dessen Naturbedingungen

ähnlich derer an der Westküste Sylts sind, für Untersuchungen im Vorstrandbereich geeignet. Eine zuverlässige Simulation für den unmittelbaren Strandbereich einschließlich Düne ist damit aber nicht möglich.

2.4.6 Delft3D

Das drei-dimensionale Modell von Delft Hydraulics aus den Niederlanden besitzt integrierte Module für die mittel- bis langfristige Simulation von Hydrodynamik, Seegang, Sedimenttransport und der Morphodynamik. Die Modellierung von Küsten-, Fluss- und Ästuargebieten ist für kohäsive und nicht-kohäsive Sedimente mit maximal fünf Kornfraktionen möglich. Die Hauptmerkmale des Modells sind nach Aussage der Modellentwickler ein hoher Grad an Integration und *Interoperabilität*, stets auf dem aktuellen wissenschaftlichen Stand implementierte Module, eine leichte und anwenderfreundliche Oberfläche sowie die mögliche Simulation unter stationären und instationären Bedingungen. Die Modellierung mit Delft3D ist für ein Gebiet von 10 bis 100 Kilometer und über einen Zeitraum von einem Sturmflutereignis bis zu 10 Jahren möglich (DELFT HYDRAULICS, 2001; 2003).

Neben den Modulen für Wasserstand und Strömung, Seegang, Sedimenttransport und Morphodynamik stehen weitere Zusatzmodule für die Untersuchung von ökologischen Prozessen bei qualitativen Fragestellungen zur Verfügung (DELFT HYDRAULICS, 2005; 2006).

Im Wellenmodul kann zwischen zwei Wellenmodellen gewählt werden. Mit HISWA (2. Generation) und SWAN (3. Generation) stehen etablierte Wellenmodelle zur Verfügung. Der Geschiebe- und Schwebstofftransport ist über mehrere zur Wahl stehende Ansätze wie von Engelund-Hansen, Meyer-Peter & Müller, Bailard, van Rijn und Bijker u.a. implementiert.

Die morphodynamischen Veränderungen werden über einen sukzessiven Durchlauf der einzelnen Module berechnet. Eine Berechnung langfristiger Veränderung erfolgt mithilfe des *morphologischen Faktors*.

Rechenzeitverkürzungen ermöglicht die Delft3D-(Forschungs-)Variante Delft-RAM. Mit der „Rapid Assessment of Morphology“-Methode von ROELVINK ET AL. (2001) erfolgt die langfristige Modellierung unter einem ‚schnellen morphologischen Update‘. Durch die Annahme, dass kleine Sohlveränderungen keine gravierenden Veränderungen in den Strömungs- und Wellenbedingungen nach sich ziehen und umgekehrt, kann der Sedimenttransport als gemittelte Größe unterschiedlicher Wellen- und Strömungsfelder berechnet werden. Dies ermöglicht die parallele Berechnung der einzelnen Bedingungen und eine Verkürzung der Rechendauer.

Im Auftrag des **RWS National Institute for Coastal and Marine Management** (RWS RIKZ) wurde 2004 für Delft3D eine Studie mit einer *Kalibrierung* und *Verifizierung* für die Hydro- und Morphodynamik durchgeführt (KUIJPER ET AL., 2004; VAN DER KAAIJ ET AL., 2004). Die *Kalibrierung* und *Verifizierung* der Hydrodynamik ließ für das Untersuchungsgebiet einzig die Frage nach der Güte des drei-dimensionalen Strömungsfeldes offen, da hierfür keine Messungen in einer höheren räumlichen Auflösung vorhanden waren. Erst mit diesen Messungen können Aussagen hinsichtlich des drei-dimensionalen Strömungsfeldes und des Wasseraustauschs von Gerinne und Wattflächen getroffen werden.

Der morphodynamische Modell-Natur-Vergleich zeigt, dass das Modell in der Lage ist, qualitativ gute Ergebnisse zu liefern (KUIJPER ET AL., 2004). Auf dieser Grundlage ist eine subjektive Anwendungsrangordnung für das Untersuchungsgebiet der Westerschelde erarbeitet worden (Tabelle 2-1).

		Niedrige Anwendbarkeit
Salzwiesen		1 - 2
Tidebeeinflusste Flächen: Auswirkungen von Verklappungs- und Ausbaggermaßnahmen		2
Import/Export- Management und Strategien		2 - 3
Verhalten groß skaliger Systeme, Verhalten von Gerinnen und Schwellen; räumliche und zeitliche Schwankungen in Transportmustern		3
Ausbaggervolumen		4
Auswirkungen hydrodynamischer Parameter		5
		Hohe Anwendbarkeit

Tabelle 2-1: Anwendungsgebiete einer Delft3D-Modellierung (Kuijper et al., 2004)

Das Untersuchungsgebiet diese Studie ist der südlichste niederländische Meeresarm und ist im Gegensatz zum System der Westküste Sylts ein Ästuar mit mäandrierendem Gerinnesystem. Da das Untersuchungsgebiet weder eine offene sandige Brandungsküste noch mit einem Tidenhub von 1,89 - 5,20 m eine eindeutige Mesotideküste ist, sind die Bedingungen nicht mit denen vor der Westküste Sylts zu vergleichen.

Mit der Studie konnten einige Schwächen des Modells aufgedeckt werden, die durch Modellverbesserungen beseitigt werden müssen (KUIJPER ET AL., 2004). So werden Bathymetrien häufig zu steil modelliert, da Prozesse infolge Hangneigung und der geotechnischen Gegebenheiten (Filterregeln, Standsicherheiten) in dem Modell nicht ausreichend berücksichtigt werden. Weitere Schwachpunkte des Modells ist die große Abhängigkeit der Modellergebnisse vom gewählten Sedimenttransportansatz, bei denen der Ansatz von van Rijn noch die besseren Ergebnisse lieferte, sowie die überschätzten Transportkapazitäten bei hohen Fließgeschwindigkeiten ohne Berücksichtigung einer zeitlichen Rauheitsminderung.

In dem EU FP5-Projekt [SANDPIT](#) (2002-2005) sollten vertrauenswürdigen Vorhersagetechniken für ein besseres Verständnis bezüglich der Morphologie und zur Simulation und Prognose von großräumigem morphologischem Verhalten entwickelt werden. Dabei lag der Schwerpunkt auf der Entwicklung von Sedimenttransportansätzen für die Verwendung in morphodynamischen Modellsystemen. Ein Modell-Natur-Vergleich (auch mit DELFT3D) wurde auf der Grundlage von *statistischen Vergleichsparameter* durchgeführt (VAN RIJN ET AL., 2005; WALSTRA ET AL., 2005). Das Modell lieferten einen guten bis exzellenten BSS-Wert für die morphologische Entwicklung von Sohlvertiefungen im Tiefwasserbereich. Allerdings lässt die vorliegende Dokumentation des Modellvergleiches keine Rückschlüsse auf die Modelleignung für Untersuchungen im Küstennah- und Strandbereich zu. Eine weitere Erkenntnis des Forschungsprojektes war, dass trotz der Verwendung gleicher Randbedingungen, Modellparameter und eines identischen Wellenmoduls große Unterschiede zwischen den Ergebnissen der einzelnen Modelle zur Prognose der morphologischen Entwicklung auftreten. Es ist daher umso wichtiger zu wissen, unter welchen Voraussetzungen und auf welchen Größen (Sedimentmessungen oder morphologischen Veränderungen) das einzelne Modell *kalib-*

riert wurde. WALSTRA ET AL. (2005) kritisieren, dass Modellvalidierungen zu unterschiedlich und nicht transparent genug sind und so keine Vergleiche von Modellfähigkeiten und Ergebnislage möglich sind. Gerade im Hinblick auf den Endnutzer sollten einheitliche *Kalibrierungs-* und *Validierungsmethoden* verwendet werden (WALSTRA ET AL., 2005).

In den Studien von GRUNNERT ET AL. (2004) und TONNON ET AL. (2007) werden das morphologische Verhalten von Sandersatzmaßnahmen mit Delft3D untersucht. Das Untersuchungsgebiet „Terschelling“ ist mit einer offenen sandigen Küste und einer Aufspülungsmaßnahmen im Vorstrandbereich mit dem der Westküste Sylts in etwa vergleichbar. Das Ergebnis der Studien zeigt, dass die gegenwärtigen *prozessbasierten* drei-dimensionalen Modelle durchaus brauchbar für die Simulation des morphologischen Verhaltens von Sandersatzmaßnahmen sind. Allerdings ist nach den Untersuchungen nur eine Prognose zum allgemeinen Profilverhalten für eine großräumige und langzeitliche Untersuchung (mehrere Kilometer und Monate) gegeben. Unter diesen Voraussetzungen kann Delft3D qualitative Ergebnisse für die morphologischen Veränderungen von Aufspülungsmaßnahmen im Vorstrandbereich liefern. Kleinräumige Prognosen sind aber bislang nicht möglich (GRUNNERT ET AL., 2004).

VAN DUIN ET AL. (2004) weisen dagegen auf die weitere Modellschwäche, der unzureichenden Beschreibung der Wellenverformung infolge Grundberührung (Vernachlässigung der Wellenasymmetrie) und des Sedimenttransportes in Küstenquerrichtung hin. Diese Einschränkung führt bei Untersuchungsräumen mit großen Rippströmungen nicht selten zu falschen Werten. Dies mündet häufig bereits in falschen Vorzeichen der morphologischen Veränderungen. Daher ist allein die Aussage, ob Erosion oder Sedimentation auftritt, in diesen Untersuchungsräumen nicht vertrauenswürdig.

Inwieweit die Erkenntnisse aus der Studie vom RWS RIKZ von 2004 und den Forschungsprojekten bereits in die weitere Modellentwicklung eingegangen sind, konnte nicht geklärt werden. Die Klassifizierung der Modellfähigkeit aus der Untersuchung an der Westerschelde (Tabelle 2-1) kann für die Beurteilung der Modelleignung für die Westküste Sylts aufgrund eines bathymetrischen und topographischen gänzlich anderen Systems nur bedingt herangezogen werden.

Nach den oben erwähnten Erfahrungen mit DELFT3D und aufgrund fehlender *Validierungsberichte* ist eine Einordnung der Modelleignung für den Bereich der Westküste Sylts nicht möglich. Die Erkenntnisse gerade im Hinblick auf die Untersuchung von Sandersatzmaßnahmen in Gebieten mit großen Rippströmungen (Riff-Rinne-Systemen) lassen auf eine womöglich nicht ausreichende Modelleignung von DELFT3D für die Westküste Sylts schließen.

2.4.7 ESTMORF

Das dynamisch-empirische Modell [ESTMORF](#) (ESTuary MORphology) ist ein ein-dimensionales Modell zur Untersuchung der morphologischen Entwicklung in Ästuaren. Eine Anwendung außerhalb von Ästuaren und Tidebecken und an offenen Küsten ist nach EUROSIOON (2004) nicht möglich.

Diese Modelleinschränkung lässt eine Untersuchung der morphodynamischen Prozesse mit ESTMORF an der Westküste Sylts somit nicht zu.

2.4.8 GENESIS

Das von Hansen und Kraus (U.S. Army Corps of Engineers) entwickelte ein-dimensionale Modell [GENESIS](#) (GENeralized model for SIMulating Shoreline change) dient der Simulation langfristiger Küstenlinienveränderungen in einer räumlichen und zeitlichen Breite von 1 bis 10 Kilometern und 1 bis 20 Jahre.

Das *one-layer* Modellkonzept beruht auf den Voraussetzungen, dass die Strandprofilform unverändert bleibt, die Küstenlinienentwicklung einem langfristigen morphologischen Trend unterliegt und der Küstenlängstransport ausschließlich aus dem Wellenbrechen resultiert. Das Modell ist nicht in der Lage, Wellenreflexion, Tideeinfluss, Küstenquertransport sowie Prozesse in Küstennähe zu berücksichtigen (HANSON ET AL., 1989; CEM-PART III, 2002). PILKEY ET AL. (1994) weisen außerdem explizit darauf hin, dass keine Berücksichtigungen von Riff-Rinne-Systemen und von Welle-Strömung-Interaktionen im Modell erfolgen.

Die Verwendung von GENESIS für morphodynamische Untersuchungen an der Westküste Sylts ist durch die oben erwähnten Einschränkungen, allen voran die Nicht-Berücksichtigung wechselnder Wasserstände, des Küstenquertransportes, küstennaher Prozesse und von Riff-Rinne-Systemen, ausgeschlossen (ALW HUSUM, 1993).

2.4.9 LITPACK

Das eigenständige *deterministische* Modell [LITPACK](#) ist ein ein-dimensionales kommerzielles Modellsystem für littorale Küstenprozesse und Küstenlinienkinetik (Integrated Modelling-system for LITorale Processes And Coastline Kinetic) vom Danish Hydraulic Institute (DHI). Es dient der Prognose langfristiger Küstenentwicklungen und besteht aus einzelnen Modulen für spezielle Prozessbeschreibungen. Die Grundvoraussetzung des *one-layer* Modellsystems ist nach KERPER ET AL. (2002) eine quasi-gleichförmige Tiefenstruktur sowie gleichmäßige Wellen- und Strömungsbedingungen in Küstenlängsrichtung. Diese Annahme begrenzt die Anwendung von LITPACK auf lange, gleichmäßige Küsten und auf Systeme, bei denen die Entwicklung der Küstenlinien vornehmlich durch den Küstenlängstransport geprägt ist. Durch eine Verknüpfung der einzelnen Module können nach den Modellbeschreibungen des Entwicklers komplexe Probleme ohne gravierenden Informationsverlust simuliert werden (DHI SOFTWARE, 2007,c; DHI, 2007).

Das LITSPT-Modul bildet die Basis für alle Sedimentberechnungen in den LITPACK-Modulen. Die Berechnung des Sedimenttransportes kann für gleichförmiges oder abgestuftes kohäsives Material unter irregulären Wellen und Strömungen einschließlich Wellenbrechen berechnet werden. Dieses „Datenbank-Modul“ bildet die Grundbeschreibung des Sedimenttransportes für unterschiedliche Wellen- und Strömungsereignisse (DHI SOFTWARE, 2007,e).

Das Modul LITDRIFT berechnet unter Verwendung des LITSTP-Moduls und eines hydrodynamischen Modells den Küstenrückgang infolge Küstenlängsströmungen und Seegang (DHI SOFTWARE, 2007,b; DOMELSE (2006)). In LITDRIFT werden Seegangs-, Strömungs- und Tidebedingungen für die Bestimmung der Transportkomponenten berücksichtigt (DHI SOFTWARE, 2007,b).

Die Module für die Untersuchung von morphodynamischen Veränderungen sind LITLINE, LITPROF und LITTREN, wobei LITTREN für die Simulation von Gerinneverfüllung bei Fahrrinnen verwendet und in diesem Zusammenhang nicht näher betrachtet wird.

LITLINE ist ein Erweiterungsmodul für die Untersuchung der Küstenlinienentwicklung. Basierend auf den Ergebnissen von LITDRIFT werden Veränderungen im Transportvermögen berechnet (DHI SOFTWARE, 2007,a). Bei der Berechnung wird vorausgesetzt, dass die Querprofilform bei Erosion und Sedimentation unverändert bleibt und die Morphologie der Küste einzig durch die Position der Küstenlinie beschrieben wird.

LITPROF dagegen simuliert die Profilentwicklung aufgrund des Küstenquertransportes auf den Sedimenttransportraten aus dem LITSTP-Modul unter der Voraussetzung, dass die hydrodynamischen und sedimentologischen Randbedingungen entlang des Küstenverlaufs identisch und die Tiefenlinien parallel zur Küstenlinie sind. Somit ist das Untersuchungsgebiet einzig durch ein Strandquerprofil beschreibbar (DHI SOFTWARE, 2007,d).

Im Analyseprojekt [Comparative Analysis of Coastline Models](#) vom Institute of Hydroengineering of the Polish Academy of Sciences in Gdansk, PL wurde neben UNIBEST, GENESIS auch die Modelleignung von LITPACK (LITLINE) mittels eines Modell-Natur-Vergleichs untersucht (SZMYTKIEWICZ ET AL., 2000). Das Untersuchungsgebiet ist das Hafengebiet von Władysławowo und befindet sich auf der Halbinsel Hel (Putziger Nehrung). Es ist durch einen gleichmäßigen Längstransport und ausgeprägte Küstenveränderungen (Sedimentation und Leeerosion) gekennzeichnet. Aussagen zur Querprofilgestalt im Untersuchungsgebiet und damit ein Vergleich mit dem Untersuchungsgebiet „Westküste Sylt“ liegen nicht vor. Die Ergebnisse zeigen, dass die morphologische Entwicklung im Leebereich mit LITPACK (LITLINE) nicht naturnah zu simulieren ist (Tabelle 2-2). Die Tabelle 2-2 verdeutlicht aber auch, dass die Diskrepanz zwischen den Modellergebnissen der Simulationen mit (Validierung 1976-1988) und ohne der Berücksichtigung von Küstenschutzmaßnahmen (Validierung 1988-1997) beachtlich ist und bauliche Maßnahmen wie Buhnen und Ufermauern mit LITPACK (LITLINE) nicht angemessen berücksichtigen werden können. Im Vergleich zu den anderen untersuchten Modelle konnten mit LITPACK (LITLINE) insgesamt jedoch die relativ besten Ergebnisse erzielt werden.

Table 2
Correlation coefficients between model and actual shoreline changes

	GENESIS	LITPACK	SAND94	UNIBEST
Calibration	0.90	0.97	0.96	0.99
Validation 1976–1988	0.72	0.70	0.63	0.57
Validation 1988–1997	0.17	0.47	0.20	0.33
Verification, lee side	0.32	0.43	0.45	0.38
Verification, both sides	0.53	0.51	0.54	0.32

Tabelle 2-2: Korrelationskoeffizienten des Modellvergleiches (Szmytkiewicz et al., 2000)

Im BMBF-Projekt **Klimaänderung und Küste – Fallstudie Sylt** (1997-2000) und dem darin integrierten Teilprojekt „Klimabedingte Veränderung der Gestalt der Insel Sylt“ wird in Anlehnung an großskalige Klimamodelle eine feinskalige Untersuchung der Küstenlinie Sylts unter Annahme definierter Szenarien, jedoch ohne die Berücksichtigung der Sandersatzmaßnahmen, durchgeführt. Für diese Untersuchung wird das Modell LITPACK (LITLINE) von THIEDE ET AL. (2000) mit dem Vermerk, dass LITPACK (LITLINE) „schon in der Vergangen-

heit erfolgreich an der Westküste von Sylt angewandt werden“ konnte, verwendet; obgleich es davon keine Unterlagen gibt. Durch eine persönliche Mitteilung des Zweitautors ist jedoch bekannt, dass die Arbeit ausschließlich eine *Kalibrierung* des Modells und keine *Validierung* beinhaltete. Die *Kalibrierung* erfolgte für jedes einzelne Profil getrennt und nicht für das Untersuchungsgebiet insgesamt, wodurch die *Kalibrierungsparameter* von Profil zu Profil unterschiedlich sind. Aufgrund dieser Tatsache kann die Modelleignung des Modells auf diesen Simulationen nicht beurteilt werden.

In dem Vergleich von Dünenabbruchmodellen nach DOMESLE (2006) wird die Modelleignung von LITPACK (LITPROF) als mäßig beurteilt. In dem Modellvergleich von LITPACK, NEWDUNE, SBEACH und UNIBEST weist LITPACK eklatante Schwächen in der Modellierung auf und liefert vornehmlich unrealistische Werte, die an einer zuverlässigen Berechnung des Sedimenttransport und des Küstenprofils zweifeln lassen.

Eine Beurteilung der Modelleignung von LITPACK für die Westküste Sylts kann aufgrund fehlender *Validierungsberichte* nicht erfolgen. Die Erfahrungswerte aus den oben genannten Studien und Modellvergleichen lassen jedoch den Schluss zu, dass die Modelleignung für eine morphodynamische Untersuchung an der Westküste Sylt nicht ausreichend ist.

2.4.10 MARINA

Das kommerzielle zwei-dimensionale Modell [MARINA](#) (Milbradt; Universität Hannover, smile consult GmbH) simuliert die Hydro- und die Morphodynamik in Flüssen, Seen, Ästuaren und Küstenbereichen. Die Sedimenttransport kann für Schwebstoffe (Ansatz: Rossinsky & Debolsky) und Geschiebe (van Rijn) erfasst werden (SMILECONSULT, 2006; WWW-MARINA).

Aus dem Forschungsprojekt [MorWin](#) (1997-2000), in dem die numerische Modellierung morphodynamischer Prozesse an tidefreien Küsten mit seegangsinduziertem Küstenlängstransport der Untersuchungsschwerpunkt war, geht das Modell MARTIN hervor. MARTIN bildet als Wellen-Strömung-Sedimenttransport-Modell das Grundgerüst für das morphodynamische Modell MARINA. Nach persönlicher Mitteilung des Entwicklers konnte MARTIN bereits gute Ergebnisse an sandigen Brandungsküsten mit Riff-Rinne-Systemen erzielen und daher lässt auch das Modell MARINA auf gute Ergebnisse für die Fragestellung an der Westküste Sylts hoffen.

Da weder für MARTIN noch für MARINA derzeit *Validierungsdokumente* oder Modellstudien vorliegen, kann die Modelleignung für das Untersuchungsgebiet der Westküste Sylts allerdings nicht bewertet werden.

2.4.11 MIKE21

[MIKE21](#) ist wie LITPACK ein kommerzielles Produkt vom Danish Hydraulic Institute (DHI). Im Gegensatz zu LITPACK sind mit MIKE21 Untersuchungen von Tide, Strömung, Seegang, Sedimenttransport und ökologischen Prozessen in Flüssen, Ästuaren, Buchten, Seen und Küstengewässern zwei-dimensional möglich. Ebenso wie LITPACK besteht auch MIKE21 aus einzelnen Untermodulen. Das hydraulische Modul HD stellt mit der Simulation von Wasserstand und Strömungen die Basis für alle weiteren Untersuchungen dar. Die Module MT und ST beschreiben den Sedimenttransport von Schluff und Tone (MT) bzw. nicht kohäsiver Stoff-

fe (ST) unter dem Einfluss von Strömung und Welle. Der Sedimenttransport kann unter verschiedenen Transportansätzen wie u.a. Engelund-Hansen, Engelund-Fredsøe, Ackers-White oder Bijker vornehmlich als Gesamttransport erfasst werden. Da MIKE21 ein zweidimensionales Modell ohne bewegliche Sohle ist, findet keine Rückkopplung zwischen der Bathymetrie und der Hydrodynamik statt. Das ST-Modul gibt daher nur Anhaltspunkte zu möglichen Erosions- und Ablagerungsgebieten, aber keinen bathymetrischen oder topographischen Endzustand für den Simulationszeitraum an (DHI SOFTWARE, 2007,f).

Für die morphodynamische Modellierung steht mit MIKE21 CAMS (Coastal Area Morphological Shell) ein gekoppeltes dynamisches Modell für Tide, Wellen, Strömung und Sedimenttransport mit beweglicher Sohle zur Verfügung (DHI Software, 2007,g). Dieses Modell ermöglicht die Berechnung der morphologischen Veränderungen und eines bathymetrischen/topographischen Endzustandes, wobei die Interaktion zwischen Bathymetrie und Hydrologie vollständig berücksichtigt wird.

MIKE21 und MIKE21 CAMS können im Küsteningenieurwesen zur Optimierung von Hafenentwürfen, bei der Planung von Küstenschutzmaßnahmen und zur Untersuchung der Stabilität von Prielsystemen verwendet werden (DHI SOFTWARE, 2006).

Von der dänischen Küstenschutzbehörde **Kystdirektoratet** liegen Ergebnisberichte zur morphodynamischen Modellierung für die mittelfristige Entwicklung einer rd. 3,5 km langen Vorstrandaufspülung vor der dänischen Küste bei Torsminde (JOHNSON ET AL., 1991; 2001). Aus diesen geht hervor, dass die Modellleistung von MIKE21 bzw. MIKE21 CAMS dadurch sehr eingeschränkt ist, dass zum einen die Ergebnisse stark vom gewählten Korndurchmesser abhängig sind und zum anderen, dass die Verlagerung der Längsströmungen infolge Wellenbrechen (surface roller effekt) nicht berücksichtigt wird und so die Transportkapazitäten falsch bestimmt werden.

Ob MIKE21 oder auch MIKE21 CAMS für eine morphodynamischen Untersuchung der komplexen Brandungsküste von Sylt geeignet ist, ist daher zu bezweifeln.

2.4.12 NEWDUNE

Das Dünenabbruchmodell NEWDUNE ist eine Weiterentwicklung des Kriebel-Modells (E-DUNE) durch die Technische Universität Braunschweig (DETTE ET AL., 1994,a). Das eindimensionale Modell erlaubt die Bestimmung bzw. Abschätzung von Ausräumungsmengen innerhalb des Küstenquerprofils während eines Sturmflutereignisses. Dem Modell liegt dabei die Annahme zugrunde, dass jedes Küstenprofil bestrebt ist, sein Gleichgewichtsprofil zu erlangen und dass während Sturmflutereignissen die küstenparallelen Strömungen und somit auch der Sedimentlängstransport eher gering und folglich zu vernachlässigen sind. Der Küstenquertransport entspricht daher dem Gesamttransport.

NEWDUNE unterliegt darüber hinaus noch einigen weiteren Einschränkungen. Das Modell ist nicht in der Lage, Riff-Rinne-Strukturen sowie Prozesse in der Wasserwechselzone und im Unterwasserbereich (Brandungszone) zu berücksichtigen (DETTE ET AL., 1994,a;b). NEWDUNE kann lediglich für vorgegebene einzelne Sturmflutwasserstände den Dünenabbruch berechnen. DOMESLE (2006) gibt aufgrund dieser Schwächen auch keine Empfehlung für die Verwendung dieses Dünenabbruchmodells für die Untersuchung der morphologischen Veränderungen an einer Küstenlinie.

An der **Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommerns** werden nach NEWE ET AL. (2004) die Dünenabbrüche mit NEWDUNE berechnet. Innerhalb des Modellvergleiches dreier existierender Dünenabbruchmodelle (NEWDUNE, SBEACH und UNIBEST-DE) wird dabei NEWDUNE als die für Mecklenburg-Vorpommern sinnvollste Modellvariante für die Bemessung und Bewertung von Landesküstenschutzdünen (Bemessung von Solldünen) vorgeschlagen. Die genannten Einschränkungen der Modelleistung bei Riff-Rinne-Systemen und für die Untersuchung der morphologischen Aktivität unterhalb des angegebenen Sturmflutwasserstandes sind für die dort vorhandene Fragestellung zweitrangig (Tabelle 2-3).

+ Verifizierung des Modells anhand einer Vielzahl von Labor- und Naturdaten	+ bislang keine Instabilitäten infolge geringer Gitternetzabstände aufgetreten
- stark vereinfachter Ansatz für das Wellenbrechen und die Wellenhöhen in der Brandungszone ($H/h = 0,78$)	+ Simulation von sehr steilen Dünen- bzw. Kliffprofilen problemlos möglich, da das vertikale Gitternetz sich automatisch der Neigung anpasst
- Simulation von Riff-Rinnen-Profilen nicht möglich	+ Überspülung der Düne wird simuliert (vgl. auch SCHOONEES & THERON)
- kein Sedimenttransport seeseitig des Brechpunktes. Das widerspricht dem Konzept der <i>Closure Depth</i> (z.B. HALLER-MEIER, 1978)	- Berechnung einiger Profile nicht möglich, da während der Berechnung negative Neigungen auftreten oder die Kontinuitätsbedingung nach Gl. (7) nicht erfüllt ist.
+ Scharfkantige Ausbildung des Dünenfußes entspricht eher der Realität (z.B. Abb. 12)	+ Quelltext ist vorhanden, d.h. neuere Forschungsergebnisse können ggf. einbezogen werden
+ Höhe des Dünenfußes realistischer als bei SBEACH (z.B. Abb. 12)	
+ Abtrag der Strandoberfläche entspricht in etwa der Natur (z.B. Abb. 12)	

Tabelle 2-3: Vor- und Nachteile des Modells NEWDUNE (Newe et al., 2004)

Nach dem Forschungsvorhaben **Untersuchungen zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt** wurde das Modell NEWDUNE mit den in dem Forschungsvorhaben bestimmten Steuerungs- und Eingangsparametern für die Untersuchung morphologischer Veränderungen über mehrere Jahre (1994-1997) am ALW eingesetzt. Die Ergebnisse zeigten, dass NEWDUNE für den Bereich der Westküste Sylts nur sehr eingeschränkt tauglich ist.

Weitere morphodynamische Untersuchungen an der Westküste Sylts sind aufgrund dieser Studie und den oben genannten Einschränkungen mit dem Modell NEWDUNE nicht zu verfolgen.

2.4.13 PISCES

PISCES ist ein kommerzielles zwei-dimensionales *Flächenmodell* von HR Wallingford, UK (Price, Chesher, Southgate) für die Untersuchung der mittelfristigen morphologischen Entwicklung. Es unterliegt keinen Beschränkungen in Küstenlängs- oder Küstenquerrichtung und ist unabhängig von der Küstengeometrie. Die zeitlichen morphologischen Veränderungen werden über die Strömung, und den resultierenden Sedimenttransport infolge Seegang und Tide und deren Wechselwirkungen (bewegliche Sohle) berechnet. Der Sedimenttransport

wird für Schwebstoffe und Geschiebe über einen modifizierten van Rijn-Transportansatz erfasst.

Im EU FP5-Projekt [SANDPIT](#) (2002-2005) erfolgte ein Modell-Natur-Vergleich für PISCES auf *statistischen Vergleichsparemtern* (VAN RIJN ET AL., 2005; WALSTRA ET AL., 2005). Das Modell lieferte einen guten bis exzellenten *BSS-Wert* für die morphologische Entwicklung von Sohlvertiefungen im Tiefwasserbereich. Ansonsten lässt die unzureichende Dokumentation des Modellvergleiches keine Rückschlüsse auf die Modelleignung für Untersuchungen im Küstennah- und Strandbereich zu.

Aufgrund dieser mangelnden Informationsbasis kann die Modelleignung von PISCES für die Westküste Sylts nicht beurteilt werden. Die Einschränkung, den Schwebstoff- und Geschiebetransport nur über einen Sedimentansatz berechnen zu können, ist aufgrund der großen Abhängigkeit von Modellergebnissen vom gewählten Sedimenttransport aber ein großer Nachteil. Mögliche Ergebnisbreiten können durch die Verwendung eines einzelnen Sedimenttransportansatzes nicht beurteilt werden.

2.4.14 PONTOS

Das *multi-layer* Modell [PONTOS](#) von Steetzel (Alkyon, NL) ist ein zwei-dimensionales *verhaltenbasiertes Küstenlinienmodell* für die Abschätzung einer langfristigen und großräumigen Entwicklung. Durch das *multi-layer* Konzept können im Gegensatz zu *one-layer* Modellen auch Effekte der Sedimentbewegungen im Profilverlauf berücksichtigt werden. In dem Modell werden der welleninduzierte Küstenquertransport sowie der wellen- und tideinduzierte Längstransport berücksichtigt (STEETZEL ET AL., 1998; 2004,a).

Im **RWS National Institute for Coastal and Marine Management** (RWS RIKZ) in den Niederlanden ist zukünftig eine langfristige Modellierung auf numerischen Modellen beabsichtigt. Die langfristigen Untersuchungen erfolgen auf *verhaltenbasierten* Modellen wie PONTOS und ASMITA (siehe 2.4.1), da für langfristige Untersuchung ein Hochskalieren von kurz- bis mittelfristigen *prozessbasierten* Ergebnissen aufgrund der Fehlermultiplikation nicht sinnvoll ist (STEETZEL ET AL., 2004). Die *Kalibrierungsergebnisse* der ersten Version des Modells ergaben gute Ergebnisse und zeigten, dass PONTOS ein vielversprechendes Werkzeug zur Simulation und Quantifizierung von morphologischen Einflüssen ist (PONTOS, 1999; STEETZEL ET AL., 1998; 2004,a). Der Vorteil von PONTOS ist, dass das Modell als *multi-layer* Modell die morphologischen Veränderungen in den unterschiedlichen Strandbereichen (Düne, Strand, Brandungszone und höherer Küstenbereich) verhältnismäßig gut nachbilden kann. Allerdings zeigt die *Verifizierung* auch, dass das Modell nur für einfache Bathymetrien mit nahezu parallelen Tiefenlinien zur Küstenlinie gültig ist (STEETZEL ET AL., 2004,a).

Aufgrund der geringen Informationsbasis und dass weder die *Kalibrierungsergebnisse* noch *Validierungsdokumente* eingesehen werden konnten, kann die Modelleignung von PONTOS für die Westküste Sylts schlecht beurteilt werden. STEETZEL ET AL. (2004,b) und RWS RIKZ halten eine Untersuchung großräumiger und langfristiger Küstenentwicklungen mit PONTOS für gut möglich und für sandige Brandungsküsten wie Sylt geeignet.

2.4.15 SBEACH

SBEACH (Storm-induced BEACH CHange model) ist ein ein-dimensionales *deterministisches* Modell von Kraus & Larson, welches auf den Ergebnissen aus empirischen Überlegungen, experimentellen Versuchen und Messungen im Wellenkanal abgeleitet und mit einem Naturdatensatz verifiziert wurde (LARSON ET AL., 1989). Mit SBEACH können Profiländerungen infolge wechselnder Wasserstände und einzelner Sturmflutereignisse (Wellenbrechen) beurteilt werden. Dem Modell liegt dabei die Hauptthese zugrunde, dass brechende Wellen den größten Einfluss auf die Profiländerungen haben und sich der maximale Quertransport somit in der Brandungszone abspielt. Der Längstransport wird vernachlässigt, da er keinen Einfluss auf die kurzfristigen Profilveränderungen hat. Das Modell kann daher nur kurzzeitige sturm-induzierte Erosionen berechnen. Für das Modell liegt eine *Verifizierung* und *Validierung* für einige Testfelder an der amerikanischen West- und Ostküste vor.

Die veröffentlichten **Validierungs- und Verifizierungsstudien** von LARSON ET AL. (1989; 1999) und WISE ET AL. (1996) und auch zahlreiche Anwendungsstudien lassen Einschränkungen und Anwendungsgrenzen von SBEACH erkennen. So sind keine Ansätze für den Längstransport und den Sedimentaustausch implementiert, die eine Simulationen von Sandbankwanderungen und morphologischen Veränderungen im Vorstrandbereich ermöglichen (MORELLATO ET AL., 2004). Prozesse in der Wasserwechselzone, der strömungsinduzierte Sedimenttransport und die Stranderholung können aufgrund von unzureichenden oder ganz fehlenden Ansätzen ebenso nicht berücksichtigt werden.

SBEACH ist für eine Untersuchung an der Westküste Sylts aufgrund der hier genannten Modelleinschränkungen nicht geeignet.

2.4.16 SediMorph

[SediMorph](#) ist ein morphodynamisches Modell, welches die Prozesse in einem Gewässerboden drei-dimensional simuliert. Dafür werden die Massenbewegungen infolge Geschiebe- und Schwebstofftransport der einzelnen Kornfraktionen sowie des Porenwassers bilanziert. Das Modell wurde von Malcherek bei der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in Hamburg entwickelt. SediMorph berechnet unter Berücksichtigung veränderlicher Wassertiefen die Morphodynamik infolge Geschiebe- und Schwebstofftransport. Das Modell liefert synoptische Ergebnisse zum Sedimenthaushalt (z.B. mittlerer Korndurchmesser, Kornrauheit) und zu morphologischen Charakteristiken (z.B. Riffelhöhe und -länge, Transportkapazitäten, Erosions- und Sedimentationsraten).

Da SediMorph ausschließlich ein *morphodynamisches Modell* ist, erfordert die morphodynamische Modellierung eine Kopplung mit einem hydrodynamischen Modell. Die BAW verwendet zu diesem Zweck unter anderem UnTrim.

Für das Modell SediMorph liegt ein **Validierungsbericht** für ein Ästuargebiet vor. Aus diesem geht hervor, dass eine Untersuchung der morphologischen Entwicklung von Sohlformen (Riffeln und Dünen) mit diesem Modell nicht möglich ist. Außerdem wird darauf hingewiesen, dass der Schwebstofftransport in der Wassersäule und die resultierende Sedimentkonzentration nicht berücksichtigt werden (Malcherek et al., 2005).

Die Modellleistung an sandigen Brandungsküsten kann mit den verfügbaren Informationen nicht abgeschätzt werden. Aufgrund der mangelnden Berücksichtigung von Seegangsprozessen und der begrenzten Berücksichtigung des Schwebstofftransportes kann eine Verwendung des Modells SediMorph für morphodynamische Untersuchungen der Westküste Sylts einschließlich der Sandersatzmaßnahmen und ihrer Entwicklung eher ausgeschlossen werden.

2.4.17 TIMOR

Das morphodynamische Modell TIMOR (TIdal MORphology) ist ein zwei-dimensionales Modell von Zanke, TU Darmstadt (ZANKE ET AL., 2002,b). Die Veränderungen der Sohle werden über Module für die Hydrodynamik, den Sedimenttransport und die Morphodynamik simuliert. Die für eine morphodynamische Untersuchung notwendige Kopplung mit einem Seegangsmodell ist möglich. Der Sedimenttransport wird über den Geschiebe- und Schwebstofftransport für ausschließlich nicht bindige Böden unter verschiedenen Ansätzen für einen Mehrkorn-Fraktion-Ansatz erfasst.

Im KFKI-Projekt **Morphologische Langfristprognose für das System Tidebecken-Außensände am Beispiel Sylts und der Dithmarscher Bucht** (1997-2000) erfolgte unter der Kopplung des Seegangsmodells SWAN auch die Untersuchung der langfristigen morphodynamischen Aktivitäten im Hörnumbecken. Das Modell konnte unter Berücksichtigung repräsentativer Wind- bzw. Seegangseignisse die morphologisch aktiven Bereiche und Rinneverlagerungen dem Projektnehmer nach gut nachbilden und den vorhandenen morphodynamischen Trend gut wiedergeben (ZANKE ET AL., 2001).

Ähnlich gut schneidet das Modellsystem TIMOR-SWAN im Vergleich zu den kommerziellen Systemen MIKE und COSMOS im Forschungsprojekt [MorWin](#) (1997-2000) ab (BARTHEL ET AL., 1997). Die mittelfristige morphodynamische Untersuchung erfolgte dabei an einer tidefreien, seegangsgeprägten Küste unter Berücksichtigung des seegangsinduzierten Sedimenttransportes. Die Modellvergleiche zeigten, dass TIMOR zum damaligen Zeitpunkt auf dem neusten Stand der Software-Technik und auf einem international vergleichbaren Entwicklungsstand war (LEHFELDT, 2000). Eine genauere Beurteilung der einzelnen Modellergebnisse und auch deren Vergleich ist schwierig, da auch hier die Informationsbasis sehr dünn ist.

Das TIMOR-SWAN-Modell kann seit einigen Jahren erfolgreich an praktischen Fragestellungen, wie die Simulation eines möglichen Dünendurchbruches einschließlich der Untersuchung einer Sandaufspülungsvariante bei Hiddensee und für die Beurteilung von Ausbauvarianten und ihrer langfristigen Wirkungsweise, angewendet werden (ZANKE ET AL., 2001,b; 2002,b; ZANKE, 2005).

Leider liegen für das Modell keine Berichte zur *Kalibrierung* und *Validierung* vor, sodass eine Beurteilung der Modelleignung für die Westküste Sylts nicht erfolgen kann. Die Erfahrungswerte und Stellungnahmen aus den oben erwähnten wissenschaftlichen Berichten – auch wenn sie vornehmlich vom Entwickler selbst stammen – lassen jedoch auf eine mögliche Eignung des Modells auch für das Untersuchungsgebiet der Westküste Sylt schließen.

2.4.18 TRIM

Das Modell [TRIM](#) ist von Casulli, Universität Trient, entwickelt worden und wird von der BAW in Hamburg weitergeführt und gepflegt. Es liegt sowohl in zwei- als auch in drei-

dimensionaler Version vor. Es ist ein hydrodynamisch-numerisches Modell zur Beschreibung von zeitabhängigen tiefengemittelten Transportgrößen (Geschiebe, Schwebstoffe) und besteht aus Modulen für die Hydrodynamik (Wasserstand und Strömung) und den Sedimenttransport. Der Sedimenttransport wird über einen Mehrkorn-Fraktion-Ansatz als Gesamttransport aus den ermittelten Komponenten des Geschiebe- (Ansätze nach van Rijn und Bagnold) und des Schwebstofftransportes (Advektion-Diffusion-Gleichung) berücksichtigt.

Für das Modell TRIM2D liegt ein **Validierungsbericht** vor, der auf der Internetpräsenz der BAW eingesehen werden kann (BAW, 1998). Aus diesem gehen die empfohlenen Anwendungsbereich für das Modell hervor. Danach bietet sich TRIM2D für Untersuchungen von tidedominanten Ästuarräumen und Wattgebieten sowie von Binnengewässern an (LANG ET AL., 1998).

Eine Anwendung des Modells zur Untersuchung der morphodynamischen Entwicklung in einem offenen System einer sandigen Brandungsküste erscheint daher aufgrund fehlender Ansätze für seegangsbedingte Prozesse als ungeeignet. Zudem ist TRIM ein Modell ohne bewegliche Sohle und eine Simulation von morphologischen Veränderungen somit nicht möglich.

Mit TRIM3D kann derzeit lediglich der Transport der Wassermasse, der Transport des Strömungsimpulses und der Transport gelöster Salze simuliert werden. Eine Bestimmung der Sedimenttransportkomponenten ist nicht möglich. Für TRIM3D liegt kein *Validierungsbericht* vor.

2.4.19 UNIBEST

Das [UNIBEST](#) Coastal Software Package (UNIform BEach Sediment Transport) für die Untersuchung sandiger Küstenlinien und Küstenprofilen ist ein zwei-dimensionales Modell von Delft Hydraulics aus den Niederlanden. Mit diesem Modell wird der Sedimenttransport unter der Annahme eines gleichmäßigen Küstenlängstransportes infolge baulicher Maßnahmen oder aufgrund von Sturmflutereignissen unter Berücksichtigung von tide- und/oder welleninduzierten Strömungen bestimmt. Das *deterministische* Modellpaket besteht aus den Modellen UNIBEST-CL+ (coastline behaviour), UNIBEST-TC (time-dependent cross-shore) und UNIBEST-DE (dune erosion). Das Modellsystem beinhaltet aufgrund der zahlreich berücksichtigten physikalischen Prozesse insgesamt eine Vielzahl von Parametern. Dadurch wird ein hoher Eingangsdatensatz für das Model-Set-up benötigt (BOSBOOM ET AL., 2000).

Mit UNIBEST-CL+ kann der Längstransport und die Veränderungen entlang einer Küstenlinie modelliert werden. Das Modell ist ein Sedimentbilanzierungsmodell und berücksichtigt dabei auch den littoralen Transport. Mit dem Modell sind klein- und großräumige morphologische Untersuchungen für kurze und lange Zeiträume (Dekaden) möglich. Berücksichtigt werden in dem Modell die Prozesse der Wellenausbreitung und der welleninduzierten Längsströmung. Der Sedimenttransport kann als Gesamttransport mit den Ansätzen von u.a. van Rijn, Bijker, Bailard oder van der Meer erfasst werden (KRAMER, 2005).

Das Modell UNIBEST-TC bietet die Möglichkeit, Profiländerungen aufgrund des Quertransportes infolge tide- und seegangsinduzierter Strömungen zu simulieren. Die Modellierung morphodynamischer Prozesse ist mit UNIBEST-TC für Zeiträume bis zu einem Jahr (kurz-/mittelfristig) möglich. Als Anwendungsgebiet für UNIBEST-TC empfiehlt WALSTRA (2000)

Untersuchungen zur Küstenprofilentwicklung aufgrund saisonaler Veränderungen des See-
gangs und Stabilitätsuntersuchung von Sandersatzmaßnahmen.

Ähnlich dem UNIBEST-TC können auch mit dem Modell UNIBEST-DE Profiländerungen
an Strand und Düne innerhalb der Küstenlinie infolge des Quertransportes simuliert werden
(HOFSTEDE, 2004). Im Gegensatz zu UNIBEST-TC ist UNIBEST-DE ausschließlich für
Sturmflutereignisse anzuwenden. Dieses Modell ist dem Entwickler (Bosboom, Reniers) nach
bestens geeignet, Entwürfe von Sandersatzmaßnahmen an Strand und Vordüne zu untersu-
chen (VAN RIJN ET AL., 2003).

Beim Projekt [Comparative Analysis of Coastline Models](#) vom polnischen Institut IBW
PAN sind die Ergebnisse für UNIBEST(-CL+) für die Entwicklung der Küstenlinie mangel-
haft (SZMYTKIEWICZ ET AL., 2000). UNIBEST(-CL+) weist im Vergleich zu anderen Modellen
(vgl. Tabelle 2-2) die schlechtesten Ergebnisse sowohl für den Zustand ohne als auch mit bau-
lichen Eingriffen auf.

Ganz anders sehen dagegen die Ergebnisse im Modellvergleich des [COAST3D](#)-Projektes aus.
Während die Ergebnisse einen Einsatz von UNIBEST-TC für die Untersuchung der morpho-
dynamischen Entwicklung des Küstenprofils einschließlich des Strandbereichs für Sturmflut-
ereignissen gänzlich ausschließen (dafür gibt es UNIBEST-DE), sind die Ergebnisse für mit-
telfristige Untersuchungen für den Vorstrandbereich vielversprechend (VAN RIJN ET AL.,
2000). WALSTRA ET AL. (2002) unterstreichen die Ergebnisse des COAST3D-Projektes, in-
dem darauf hingewiesen wird, dass das Modell nicht das morphodynamische Verhalten in
Bereichen mit Wassertiefen kleiner als 0,50m wie im Bereich von Brandungszonen und im
Bereich des Wellenaufbaus angewendet werden kann. UNIBEST-TC ist danach nur bedingt
in der Lage, das morphologische Verhalten im unmittelbaren Strandbereich zu simulieren.
Zusätzlich ist die Energiedissipation im Bereich von Riffen durch den konstanten Brechkoef-
fizienten nur unzureichend berücksichtigt, wodurch die Morphologie aufgrund des konstanten
Rauheitsfaktor nicht selten zu flach und zu seicht wiedergegeben wird (GRASMEIJER ET AL.,
2002). Nach VAN DUIN ET AL. (2004) ist UNIBEST-TC für die Modellierung von Sander-
satzmaßnahmen jedoch grundsätzlich geeignet.

Während NEWE ET AL. (2004) für die Empfehlung von Dünenabbrüchen an der **Ostseeküste
Mecklenburg-Vorpommerns** UNIBEST-DE aufgrund seiner „schwierigen und zeitaufwen-
digen Handhabung“ gar nicht zu einer weiteren Modellbeurteilung heranzieht, empfiehlt DO-
MESLE (2006) für eine Simulation der Strandprofil-Entwicklung infolge des Küstenquertrans-
portes dieses Modell aufgrund der besseren Ergebnisse im Modellvergleich.

Die Beurteilung der Modelleignung von UNIBEST für die Westküste von Sylt ist aufgrund
der unterschiedlichen Güte der einzelnen Modelle und des Fehlens von öffentlichen zugängli-
chen *Validierungsberichten* schwierig. Nach den vorliegenden Ergebnissen ist eine morpho-
dynamische Untersuchung der Küstenlinie mit UNIBEST (-CL+) nicht zu empfehlen. Eine
morphodynamische Untersuchung der Küstenprofilentwicklung an der Westküste Sylts
scheint dagegen mit UNIBEST (-DE,-TC) möglich.

2.4.20 UnTRIM

Das Modell [UnTRIM](#) ist ein von Casulli entwickeltes Modell zur Simulation von Transport-
prozessen unter Verwendung der drei-dimensionalen Flachwassergleichung sowie der drei-

dimensionalen Transportgleichung für Salz, Wärme und suspendierte Stoffe. Das Modell besteht aus Modulen für Wasserstand, Strömung und Sedimenttransport. Eine Berücksichtigung der Seegangsbedingungen und eine Untersuchung der morphodynamischen Prozesse kann nur über die Kopplung mit entsprechenden Modellen erfolgen. UnTRIM dient der Bestimmung von Wasserspiegelauslenkungen an der freien Oberfläche, Strömungsgeschwindigkeiten, Tracerkonzentrationen (z.B. Salzgehalt, Temperatur, Schwebstoffgehalt) und hydrodynamischen Druckverhältnissen (www-BAW).

Für das Modell UnTRIM liegt ein **Validierungsbericht** vor, der auf der Internetpräsenz der BAW eingesehen werden kann (CASULLI ET AL., 2004). Der Bericht zeigt Validierungsbeispiele für Flüsse und Ästuar unter Tidedynamik auf. Ein Validierungsbeispiel für sandige Brandungsküsten liegt nicht vor. Aufgrund dessen können keine Aussagen bzgl. der Modelleignung von UnTRIM für die morphodynamische Untersuchung an der Westküste Sylt gemacht werden.

2.4.21 3DD Suite

Das Modellsystem [3DDSuite](#) von ASR Limited (Amalgamates Solutions & Research) aus Neuseeland wurde von Black entwickelt. Es besteht aus Einzelmodellen zur Untersuchung von Strömung, Wellenklima und Sedimentationsvorgängen. Außerdem ist mit dem Modell 2DBeach ein zwei-dimensionales Strandevolutionsmodell vorhanden, das den Sedimenttransport infolge Seegang und Strömung auf der Grundlage verschiedener Sedimenttransport-Ansätze (Bagnold, Bailard und Nairn & Southgate) berechnet (BLACK, 2003). 2DBeach ermöglicht somit die Prognose von morphologischen Veränderungen (inkl. Stranderholung) im Strand- und Vorstrandbereich (ASRLIMITED).

Eine Einschätzung der Modellleistung von 2DBeach ist aufgrund mangelnder Dokumentationen derzeit nicht möglich.

Modell	Einsatzgebiet	Modellklasse	Module				Verfügbarkeit	Kontakt / Hersteller	Dimension	mögl. Simulationszeitraum	Beurteilung nach Kap. 2.4
			HD	W	ST	MD					
Asmita	NL	L	(X)	-	X	-	k.A.	Stive, Delft Hydraulics, NL	1D	langfristig	○
Beachplan	I, UK	L	-	X	X		kommerziell	HR Wallingford, UK	2D	langfristig	●
CCH2D	RC, USA	F	X	-	X	X	kommerziell	Wang, Jia, Hu, NCCH, Univ. Mississippi, USA	2D, Q3D	kurz- bis mittelfristig	●
COSMOS	UK	P	X	X	X	X	kommerziell	Soulby, HR Wallingford, UK	2D, Q3D	kurzfristig	○
CROSMOR	UK, (NL)	P	X	X	X	X	kommerziell	Grasmeijer, ehem. Universität Utrecht, NL	2D	kurz- bis mittelfristig	●
Delft3D	NL, (B), D, UK	F	X	X	X	X	kommerziell	Roelvink, WL Delft Hydraulics, NL	3D	mittel- und langfristig	● / ○
Estmorf	NL	(F)	X	-	X	X	k.A.	k.A.	1D	langfristig	○
GENESIS	LT, UK, USA, (NZ)	L	X	X	X	X	kommerziell	Hansen, Uni Lund, S; H. Kraus, USACE, USA	1D	mittel- bis langfristig	○
LITPACK	B, D, DK, E, I, UK, USA	L & P	X	X	X	X	kommerziell	Danish Hydraulic Institute (DHI), DK	1D	langfristig	● / ○
MARINA	CDN, D	F	X	X	X	X	kommerziell	Milbradt, TU Hannover (smile consult GmbH), D	2D	k.A.	●
MIKE21	DK, D, UK, USA	F	X	X	X	X	kommerziell	DHI, DK	2D	mittelfristig	○
NEWDUNE	D	P	-	-	-	X	vorhanden	Newe, LWI, TU Braunschweig, D	1D	kurzfristig	○
PISCES	NL	F	X	X	X	X	kommerziell	Chesher, Southgate; HR Wallingford, UK	2D	mittelfristig	●
PONTOS	B, NL	L	X	X	X	X	kommerziell	Steetzel, Alkyon, NL	2D	mittel- bis langfristig	● / ●
SBEACH	USA	P	X	X	X	X	kommerziell	Kraus, USACE, USA; Larson, Uni Lund, S	1D	kurzfristig	○
SediMorph	D	k.A.	-	-	-	X	k.A.	Malcherek, Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg, D	2D, 3D	k.A.	○
TIMOR	D (Entwickler)	F	X	-	X	X	k.A.	Zanke, Mewis, TU Darmstadt	2D, Q3D	mittel- bis langfristig	● / ●
Trim	D	k.A.	X	X	X	-	k.A.	Casulli, Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg, D	2D, 3D	k.A.	○
UNIBEST	NL, UK	L & P	X	X	X	X	kommerziell	Walstra, WL Delft Hydraulics, NL; Sogreah, F	2D	kurz- bis langfristig	● / ●
UnTrim	D	k.A.	X	-	X	-	k.A.	Casulli, Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg, D	2D, 3D	k.A.	●
3DD Suite	NZ	(P)	X	X	X	X	kommerziell	Black, ASR Limited, NZ	3D	k.A.	●

ErklärungenModellklasse: **P**rofilmodell, **K**üsten**L**inienmodell, **F**lächenmodellModule: **H**ydro**D**ynamik, **W**ellen (Seegang), **S**ediment**T**ransport, **M**orpho**D**ynamik

Zeitskalen: Einordnung der Simulationsbreiten in short-, medium- und long-term ist stark subjektiv. Bei einigen Autoren sind Wochen und Monate noch mittelfristig, bei anderen schon langfristig

hier: kurzfristig: Stunden - Tage (Sturmflutereignis)

mittelfristig: Wochen/ Monate - max. 1-2 Jahre (Saisonal)

langfristig: Jahre - Dekaden

Verwendbarkeit: ● = (eher) JA; ○ = (eher) NEIN; ◐ = vakant; ◑ / ◒ = vakant (Tendenz)

Tabelle 2-4: Übersicht der beurteilten Modelle

2.5 Verfügbare Datengrundlage und zu optimierendes Messkonzept

Die Datengrundlage im Untersuchungsgebiet ist neben der Qualität des eingesetzten Modells entscheidend für eine erfolgreiche morphodynamisch-numerische Modellierung. Eine ausreichende Datenmenge und -qualität ist für eine sorgfältige *Kalibrierung* unabdingbar. Zudem müssen für die *Validierung* des Modells Datensätze zur Überprüfung der Modellergebnisse durch Naturdaten vorliegen. Datensätze für Wasserstand, Seegang, Wind, Strömung, Sedimenthaushalt und Bathymetrie sollten für die *Kalibrierungs-* und *Validierungszeiträume* möglichst zeitgleich erfasst vorliegen, da Strömung, Sediment und Morphologie in Wechselwirkung zueinander stehen und sich auch mit jedem anthropogenen Eingriff verändern.

Die Datengrundlage und -verfügbarkeit für die Anwendung *morphodynamischer Modelle* resultieren aus durchgeführten Messkampagnen und den daraus verwertbaren Messreihen. Für den Bereich Sylt insbesondere der morphodynamisch aktiven Westküste sind nicht zuletzt durch die Brisanz des Küstenrückgangs und den kontinuierlichen Küstenschutzmaßnahmen immer wieder Messungen durchgeführt worden. Dadurch liegt für Sylt ein großes Datenvolumen vor.

Für den Wasserstand stehen drei Dauermessstationen für Sylt zur Verfügung. Die vom Wasser- und Schifffahrtsamt Tönning betreuten Messpegel in List (seit 1889, digitale Zeitreihen ab 1934) und Hörnum (1928, digital ab 1937) befinden sich an der Ostseite der Insel. An der Westküste befindet sich der seit 1984 vom ehemaligen ALR Husum/jetzigen LKN betriebene Messpfahl Westerland. Die drei Messstationen ermöglichen eine großräumige Erfassung der Wasserstände, für ein einzelnes kleineres Untersuchungsgebiet wie „Rantum-Hörnum“ können diese Datenbestände jedoch nur bedingt herangezogen werden. Die Größenordnung und die Eintrittszeitpunkte der Wasserstände sind stark windabhängig und verändern sich im Verlauf der Küstenlinie. Die Wasserstände für das gewünschte Untersuchungsgebiet können durch eine Interpolation der vorhandenen Wasserstandsdaten nicht einwandfrei ermittelt werden, dies zeigt ein Vergleich von einzelnen Versuchsmessungen mit Sommermesspegeln im Bereich Rantum (West) und Hörnum (West).

Seegangsdaten vom Messpfahl Westerland liegen seit 1987 vor. Anfangs erfolgte die Seegangsmessung mit einem Wellenmessdraht und seit 1993 über eine Wellenmessboje. Projektbezogene Seegangmessungen mit Bojen gab es im Bereich Kampen (1987-1993), Rantum (1992/1993) und Hörnum (1991-1993). Im Forschungsvorhaben „Untersuchungen zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt“ fanden auch Einzelmessungen bei Rantum und Kampen statt (1992). Die zeitlich begrenzten Datensätze aus Projekten lassen jedoch nicht selten eine klare Plausibilität vermissen. Im Rahmen dieser Pilotphase wurde eine neue Richtungswellenmessboje beschafft und auf Höhe Rantum für Seegangsmessungen seit April 2007 ausgelegt, um den örtlichen Seegang zu erfassen.

Strömungsdaten liegen aus Einzelmessungen für die Tide- und die Brandungsströmung vor. Datenreihen für die Tideströmungen sind für einige Jahre vom Messpfahl Westerland (1988-2002) vorhanden. Die Brandungsströmungen wurden ebenfalls im Forschungsvorhaben „Untersuchungen zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt“ gewonnen (DETTE ET AL., 1994,c). Dabei wurden in den Testgebieten Rantum und Kampen an drei Messpunkten jeweils im Frühjahr und Herbst Strömungsaufzeichnungen vorgenommen (1992). Diese Daten weisen etliche Ausfallzeiten auf.

Aus der Diplomarbeit von AHRENDT (1985) geht eine Sedimentkartierung für den Strand- und Vorstrandbereich sowie für den Seegrund der Westküste vor Hörnum hervor, die die Zustände vor, während und nach der Strandvorspülung 1983 dokumentiert. Dadurch konnten die damaligen Sedimentationsverhältnisse über ein Jahr lang dokumentiert werden. Mitte der 1990er Jahre erfolgte durch das Geologisch-Paläontologische Institut an der Universität Kiel Untersuchungen zur küstennormalen Sedimentverteilung im Bereich der Westküste Sylt. Die Ergebnisse aus diesen Untersuchungen liegen ebenfalls als Kartierungen vor (KÖSTER ET AL., 1993). Ergebnisse und Angaben aus Kartierungen können als Richtwerte für Annahmen von Sedimentgrößen dienlich sein. Digitale sedimentologische Datensätze liegen für Sylt nur für die Testgebiete vor Kampen, Westerland und Rantum als Punktmessungen aus den Jahren 1986 bis 1990 vor (DETTE ET AL., 1994; RAUDKIVI, 1994).

Meteorologische Datenreihen sind für Hörnum von 1983 bis 1996 vorhanden. Am Messpfahl vor Westerland werden darüber hinaus seit 1987 Winddaten erfasst. Zusätzlich stehen die vom Deutschen Wetterdienst (DWD) gewonnenen Winddaten von der Messstation List zur Verfügung.

Die ersten Vermessungsdaten liegen vereinzelt für die im Abstand von 500 m definierten Hauptprofile seit 1900 vor und sind aus analogen Datenbeständen georeferenziert worden. Diese älteren Datensätze stellen in der Regel nur den Dünen- und Strandbereich dar und sind z.T. sehr lückenhaft. In den Anfangsjahren um 1900 weisen sie erhebliche Fehlstellen auf und sind nicht selten nur mit einer einzigen Höhenkote versehen. Kontinuierliche Vermessungen für das Untersuchungsgebiet erfolgten seit Beginn der Sandersatzmaßnahmen Anfang der 1980er in einem Abstand von 50 m. Seit 1984 erfolgen auch hydrographische Vermessungen zur Erfassung des Vorstrandbereiches (bis NN-10,0m). Zusätzlich finden zu jeder Küstenschutzmaßnahme baubegleitende hydrographische und terrestrische Vermessungen statt. Ereignisbezogen erfolgt außerdem ein Aufmaß der Inselenden. Da sich die Vermessungstätigkeit hauptsächlich nach den Küstenschutzaktivitäten und der Wetterlage richtet, sind unterschiedliche Vermessungsrhythmen für die einzelnen Profile nicht vermeidbar. Zur Beurteilung der morphologischen Situation der gesamten Westküste wird daher jährlich zusätzlich eine Laserscan-Befliegung durchgeführt.

Die Auflistung der verfügbaren Datensätze zeigt, dass das bestehende Messkonzept nicht ausreicht, die erforderlichen Datensätze für eine morphodynamische Modelluntersuchung für die Westküste Sylts bereitstellen zu können. Die Datensätze liegen fragmentiert vor, sodass eine Anwendung von weitgehend räumlich und zeitlich geschlossenen Datensätzen für die *Kalibrierung* und *Validierung* auf unterschiedlichen Zeiträumen nicht möglich sind. Für eine morphodynamisch-numerische Modellierung sind die Datenbestände insgesamt nicht optimal. Nichtsdestotrotz liegt besonders durch das ehemalige Forschungsvorhaben zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt ein großes Datenvolumen vor, welches die oben beschriebenen Einschränkungen aufweist (Ausfallzeiten, zeitliche und räumliche Fragmentierung).

Wünschenswert wäre es, für eine zukünftige Verwendung von *morphodynamischen Modellen* die Datenbestände durch neuerliche Messeinsätze auf einem definierten Referenzgebiet mit einfachen hydrologischen Randbedingungen an der Westküste Sylts zu optimieren. Innerhalb dieses Referenzgebietes könnte durch kontinuierliche hydrologische Messungen sowie regelmäßige (viertel-/halbjährig) und ereignisbezogene hydrographische wie terrestrische Vermessungen und sedimentologische Messungen eine genauere Datenlage erarbeitet werden, um so

eine *Kalibrierung* und *Validierung* bei zukünftigen möglichen (Probe-)Simulationen zu ermöglichen. Für dieses Referenzgebiet bietet sich ein Küstenabschnitt bei Rantum (Höhe 13s, Haupttreppe Rantum) an, da in diesem Bereich seit 2006 eine intensive messtechnische Beleuchtung auch im Vorstrandbereich erfolgt. Zudem befindet sich das Referenzgebiet nicht im Bereich der Inselenden, wodurch eine detaillierte drei-dimensionale Beschreibung der physikalischen Prozesse vorerst nicht notwendig erscheint und die Randbedingungen für dieses Gebiet besser zu bestimmen sind. Für diesen Bereich liegen außerdem bereits vereinzelt ältere Datensätze vor. Mithilfe der aktuellen Datensätzen könnte auch eine Überprüfung der möglichen Repräsentativität dieser älteren Datenreihe für heutige Verhältnisse erfolgen.

Die Ergebnisse zukünftiger Modelluntersuchungen für ein solches Referenzgebiet müssen letztendlich eine Übertragbarkeit des Modells auf verschiedene Untersuchungsgebiete (2. Referenzgebiet) gewährleisten. Erst dann unterliegt das morphodynamische Modell den Anforderungen und Voraussetzungen für einen praktischen Einsatz.

2.6 Ergebnis

Die Ausführungen in den Kapiteln 2.2 bis 2.5 zeigen den Stand und die derzeitigen Schwierigkeiten bei der morphodynamischen Modellierung auf.

Es bleibt die Erkenntnis, dass momentan die Qualität von *morphodynamischen Modellen* von dem mangelnden Prozessverständnis, wie für die welleninduzierten Küstenlängs- und Küstenquerströmungen und den welleninduzierten Sandtransport, eingeschränkt ist. Quantitativ vertrauenswürdige Aussagen mit Modellergebnissen sind nur für den Wasserstand und vereinzelt für Seegang (Wellenhöhe) und Strömung realisierbar. Mit *morphodynamischen Modellen* sind nur qualitative Aussagen über die morphologische Entwicklung möglich. Die quantitative Vorhersagefähigkeit bzgl. der morphologischen Veränderung ist als niedrig einzustufen (GRASMEIJER, 2002; VAN RIJN ET AL., 2003). Prinzipiell sind *prozessbasierte* Modellsysteme für die Simulation von Sandaufspülungen und ihrem zukünftigen Verhalten geeignet. Die Modellierung muss allerdings unter dem Vorbehalt erfolgen, dass die physikalischen Prozesse im Küstennahbereich noch nicht hinreichend verstanden und möglicherweise nicht ausreichend im Modell implementiert sind (GRASMEIJER, 2002).

Es gibt zurzeit kein Modellsystem, dass kurzfristige und langfristige morphologische Entwicklungen für klein- und großräumige Untersuchungsgebiete an sandigen Küsten simulieren kann. Es ist fraglich, ob es ein Modell, welches nicht nur eine kurzfristige Entwicklung sondern auch langfristige Veränderungen in der Morphologie simulieren oder gar prognostizieren soll, geben kann, wenn unterschiedliche Prozesse für die jeweilige Veränderungen verantwortlich und nicht zwangsläufig für die Beschreibung der physikalischen Prozesse aller Zeitskalen gleich entscheidend sind.

Je nach Untersuchungsgebiet und Fragestellung hängt die Wahl des zu verwendenden Modells auch von der räumlichen Auflösung ab. Zwei-dimensionale Simulationen können unter Umständen die Ursache- und Wirkungsaktionen besonders an Inselenden oder in Bauwerksnähe nicht ausreichend nachbilden. Bei einer drei-dimensionalen Simulation sind größere Unsicherheiten und Beschreibungsdefizite der physikalischen Prozesse zu erwarten. Für die alleinige Untersuchung der bathymetrischen Entwicklung sind die „alten“ 2D-Modellierungen bislang ausreichend, da das Prozessverständnis für die Beschreibung drei-dimensionaler Pro-

zesse oftmals noch nicht im notwendigen Maße vorhanden ist (GRUNNERT ET AL., 2004; SOUTHERLAND ET AL., 2004,a).

Ein weiterer Schwachpunkt der morphodynamischen Modellierung ist, dass die Ergebnisse stark von der Wahl des verwendeten Sedimenttransportansatzes abhängig sind und verschiedenen gewählte Ansätze unter Umständen zu großen Ergebnisbreiten führen. Morphologische Veränderungen aufgrund äolischen Sedimenttransportes können zurzeit in den Modellen ohnehin nicht berücksichtigt werden.

Die größte Hürde für die Bewertung der Güte von Modellergebnissen sowie für eine vergleichende Bewertung der Modelle untereinander ist jedoch der Mangel an verwertbaren Datensätzen. Um diesem Mangel an nutzbaren Daten entgegen zu wirken, wurde bereits im Rahmen dieser Pilotphase eine neue Richtungswellenmessboje beschafft und auf Höhe Rantum ausgelegt. Die seit April 2007 zum Messpfahl Westerland ergänzenden Seegangsmessungen für den südlichen Teil der Westküste sind ein anfänglicher Versuch, das Messkonzept zu optimieren. Durch die neu gewonnenen Datensätze ist eine kleinräumige Beschreibung des Seegangs an der Westküste Sylts möglich.

Für eine weitere Optimierung des Messkonzeptes im Hinblick auf morphodynamische Modelluntersuchungen wären kontinuierliche hydrologische Messungen sowie regelmäßige (viertel-/halbjährig) und ereignisbezogene hydrographische wie terrestrische Vermessungen sowie sedimentologische Messungen in einem definierten Referenzgebiet wünschenswert. Eine hinsichtlich Raum und Zeit geschlossene Datengrundlage könnte für zukünftige *Kalibrierungen* und *Validierungen* herangezogen werden. Für dieses Referenzgebiet bietet sich ein Küstenabschnitt bei Rantum (Höhe 13s, Haupttreppe Rantum) an, da in diesem Bereich sowohl Strand- als auch Vorstrandaufspülungen wie auch eine intensive messtechnische Begleitung erfolgen. Zudem liegen bereits vereinzelt ältere Datensätze aus diesem Bereich vor.

Die Ergebnisse aus der Pilotphase „MorphoSylt“ lassen erkennen, dass es zurzeit keine öffentlichen Ergebnisstudien gibt, die eine belastbare Bewertung der Modelleistung zulassen. Die verfügbaren Arbeiten lassen zwar gelegentlich das Potential des morphodynamischen Modells erahnen, aber es fehlt eine Allgemeingültig- und Übertragbarkeit, die konkrete Aussagen zur Modelleignung für sandige Brandungsküsten und Riff-Rinne-Systeme wie Sylt zulassen (COOPER ET AL., 2004; RUESSINK ET AL., 2006, SOUTHERLAND ET AL., 2004,b).

Die Untersuchungen im Rahmen der Pilotphase haben gezeigt, dass durch eine reine Literaturrecherche es nicht möglich ist, eine stichhaltige und fundierte Modellwahl für die Modellierung der morphologischen Veränderungen an der Westküste Sylt zu treffen.

Eine überzeugende und begründete Bewertung der Modelleignung kann daher nur mit Probesimulationen erreicht werden, bei denen die Stärken und Schwächen des jeweiligen Modells erkannt werden können. Die küstenmorphologischen Veränderungen (Erosion, Sedimentation) und die hierfür verantwortlichen hydrodynamischen (Tideströmungen, Seegang und seegangsinduzierte Strömungen, Wirbel und Turbulenz) und morphodynamischen Prozesse (Bewegungsbeginn, Sedimenttransport, Küstenquertransport, Küstenlängstransport) spielen sich in verschiedenen Zeit- und Raumskalen ab. Die Wechselwirkungen sind vorwiegend nichtlinear, sodass die Vorhersage der morphologischen Veränderungen umso komplexer und schwieriger wird, je größer die Zeit- und Raumskalen sind (LECHER ET AL., 2001). Daher müssen sich die Modelle erst bei Probesimulationen auf kleinen Raum- und Zeitskalen bewähren,

ehe ein Einsatz in größeren Skalen erfolgen kann. Dabei ist zu allererst zu klären, welche Prozesse in welchen Skalen maßgeblich für die morphodynamische Entwicklung sind und ob diese in den Modellen naturgetreu berücksichtigt werden (HEYER ET AL., 2007).

Auf den Ergebnissen des Kapitels 2.4 erscheinen Untersuchungen der morphodynamischen Prozesse an der Westküste Sylt mit Modellen der folgenden Vorauswahl am ehesten geeignet:

kurzfristig (Tage, Sturmflutereignis)	CROSMOR, UNIBEST
mittelfristig (Wochen – 2 Jahre)	CROSMOR, PONTOS, TIMOR, UNIBEST
langfristig (Jahre- Dekaden)	PONTOS, TIMOR

Tabelle 2-5: Modellvorauswahl aufgrund der Beurteilung der Modelleignung

Durch die sich überschneidenden Anwendungszeiträume könnte neben dem Modell-Natur-Vergleich zusätzlich auch eine „Ensemblerechnung“ erfolgen. Dies ermöglicht eine Einordnung der Ergebnisse und den Vergleich der Modelle untereinander.

Für eine überzeugende und begründete Bewertung der Modelle werden Probesimulationen der vorausgewählten Modellsysteme (Tabelle 2-5) vorgeschlagen. Aus den Ergebnissen dieser Modellstudien könnte dann eine genauere Modellwahl resultieren. Da nicht alle Modelle die kompletten Zeitskalen simulieren können, muss dieser Aspekt in der Modellwahl berücksichtigt und ggf. ein Anwendungsschwerpunkt gesetzt werden.

2.7 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Beurteilung der morphodynamischen Veränderungen im Strand- und Vorstrandbereich in Abhängigkeit der hydrologischen Randbedingungen ist eine wesentliche Voraussetzung für eine effiziente Planung von Strand- und Vorstrandaufspülungen.

Bisher ist dem Projektnehmer eine solche Beurteilung nur im Rückblick, im Hindcast, durch eine Analyse der gewonnenen Vermessungsdaten möglich. Zur Kontrolle der Maßnahmen und zur Dokumentation der Sandumlagerungen während der Bauphase erfolgen baubegleitende hydrographische Vermessungen in den Aufspülbereichen. Nach Abschluss der Aufspülarbeiten wird eine Komplettvermessung analog zur Vorvermessung durchgeführt. Wiederholungsvermessungen sind rund alle drei Monate bzw. ereignisbezogen nach einer Sturmflut geplant, um die erfolgten Materialumlagerungen zu erfassen und zu dokumentieren.

Die Verwendung von morphodynamischen Modellsystemen würde neben dieser gewohnten Art und Weise die Beurteilung von morphodynamischen Veränderungen auch im Forecast ermöglichen. Dadurch könnte zum einen das Verständnis der Prozesse im Vorstrand- und Strandbereich verbessert, zum anderen aber auch eine Optimierung des Küstenschutzes und somit eine etwaige Kostenoptimierung erzielt werden.

Voraussetzung dafür ist die Verwendung eines gut *kalibrierten* und *validierten* Modellsystems. Dafür sind synoptische Daten für Hydrologie, Sedimentologie, Meteorologie und Bathymetrie notwendig.

2.8 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Pilotphase zeigen, dass es gegenwärtig kein *morphodynamisches Modellsystem* gibt, das kurzfristige wie auch langfristige morphologische Entwicklungen an sandigen Küsten naturähnlich simulieren kann. Die Vorstellung von einem Universalmodell, welches sowohl für kurzfristige und langfristige als auch für klein- wie großräumige Untersuchungen verwendet werden kann, kann nur eine Vision sein und ist aufgrund der verschiedenen Wertigkeit der physikalischen Prozessen in den jeweiligen Skalen (noch) nicht umsetzbar.

Eine vergleichende Bewertung der Leistung von Modellen ist grundsätzlich nur über einen Modell-Natur-Vergleich unter identischen Naturbedingungen möglich. Das Streben nach einer solchen Bewertung setzt voraus, dass die Vergleiche von Modellergebnissen und Feldmessungen an repräsentativen Referenzgebieten erfolgen. Eine *Validierung* des Modellsystems muss dann aber auch über den Vergleich von Wasserstand und Wellenhöhe hinausgehen und ebenso Ergebnisse aus dem Sedimenttransport-Modul und vor allem aus dem Morphodynamik-Modul erfassen (GRUNNERT ET AL., 2004). Außerdem muss es, wie auch COOPER ET AL. (2004), HEYER ET AL. (2007) und SOUTHERLAND ET AL. (2004,b) bemerken, gleiche Vergleichsparametern und Instrumentarien für eine belastbare Abschätzung und Beurteilung geben.

Wichtigster Punkt dafür ist eine in hinreichender Güte und Umfang vorliegende Datenmenge. Seegangs- und Wasserstandsdaten stellen dabei weniger ein Problem dar. Der Mangel an Datensätzen tritt aber bereits bei den Strömungsmessungen auf, die für den Bereich Sylt sehr rar sind. Das Defizit setzt sich in den sedimentologischen Daten fort. Die zur Verfügung stehenden Datenreihen zur Schwebstoffkonzentration reichen für eine *Kalibrierung* und eine *Validierung* in unterschiedlichen Zeiträumen und für eine Untersuchung der aktuellen Entwicklung nicht aus. Ein viel größeres Manko für die *Kalibrierung* und *Validierung* auf der Grundlage des Sedimenttransportes ist das bislang nicht gelöste Problem, Geschiebefrachten zu messen. Die Wahl des Geschiebeparameter kann ausschließlich auf Annahmen erfolgen.

Die Vermessungsdaten sind dagegen eine in Teilgebieten gute Grundlage mit vielen Referenzdatensätzen für die *Validierung*; gleichwohl fehlen die hydrologischen und sedimentologischen Daten zu diesen Zeitpunkten. Es muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass je länger die Datensätze zurückreichen, desto größer werden auch die Lücken in den Datensätzen werden, wodurch eine Beurteilung langfristiger Simulationen im gesamten Vorstrandbereich erschwert bleiben wird.

Eine überzeugende und begründete Bewertung der Modelleignung kann nur mit Probesimulationen erreicht werden, bei denen die Stärken und Schwächen des jeweiligen Modells erkannt werden können. Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen der vorausgewählten Modellsysteme (Tabelle 2-5) könnte dann eine genauere Modellwahl resultieren.

Weiterhin ist eine Optimierung des Messkonzeptes für die morphodynamische Modellierung in einem definierten Referenzgebiet anzustreben.

2.9 Kenntnisse zu Fortschritt und Vorhaben an anderer Stelle

Ein deutsch-russisches Kooperationsprojekt (KFKI-Projekt **ModPro**; 2007-2009) befasst sich aktuell mit der Entwicklung prozessorientierter Ansätze zur Beschreibung der Sedimentsuspension und des Sedimenttransports für das Gebiet sandiger Küsten. Das entwickelte Modell soll schließlich die Basis eines numerischen Modells für die Prognose von Sedimenttransport und morphologischer Veränderungen sein (GRÜNE, 2007). Das Projekt ist noch in der Anfangsphase, könnte jedoch für die weitere Untersuchung für die Modellierung des Westküste Sylts interessant werden.

Ein ähnlich junges KFKI-Projekt ist **DÜNEROS** (2006-2007). Mit diesem Projekt sollen Grundlagen für die Ermittlung von Sturmfluterosionen im Dünenbereich geschaffen werden. Das entwickelte Verfahren soll schließlich die Bemessung von Randdünen ermöglichen. Da es in erster Linie darum geht, den Mangel an geeigneten Naturdaten für Modell-Natur-Vergleiche mit entsprechenden Messkampagnen zu minimieren, werden keine Modellierungen oder *Validierungen* vorgenommen (NIEMEYER, 2006).

Am **GKSS-Forschungszentrum** wird zurzeit an einem integrierten Modellsystem [MOPS](#) für die Nordfriesische Küste gearbeitet. In diesem Modellsystem sollen letztendlich ein Strömungsmodell, ein Wellenmodell, ein Atmosphärenmodell und ein Morphodynamikmodell gekoppelt werden. Der neue morphodynamische Teil ist aktuell noch in der Entwicklung. Die *Validierungsphase* soll im Sommer 2008 beginnen.

An der **TU Darmstadt** wird eigenverantwortlich ein zwei-dimensionales Modell für sandige Küsten, dass einige spezielle Effekte der Wellenwirkung und der Brecherzone mit berücksichtigt, entwickelt. Mit dem Modell sollen die wichtigsten Prozesse in Küstennähe (Wellenasymmetrie, Rippströmung, Hangabwärtstrieb, Sedimentdiffusion) berücksichtigt werden. Der Sedimenttransport ist für Geschiebe- und Schwebstofffracht implementiert. Erste Ergebnisse wurden auf der ICCE 2006 in San Diego von MEWIS (2006) vorgestellt.

Am **National Laboratory of Civil Engineering** in Lissabon, Portugal wird gegenwärtig MORSYS2D (Morphodynamical System) entwickelt. Das zwei-dimensionale morphodynamische *Küstenflächenmodell* soll für die langfristige Analyse von Prielsystemen hinzugezogen werden. Die Entwicklung dauert an, aber erste Fallstudien sind dem Entwickler nach vielversprechend. Da das Modell ausschließlich tidebedingte morphologischen Veränderungen berücksichtigt, ist fraglich, ob das endgültige Modellsystem für den Bereich der Westküste Sylt verwendet werden kann. Näheres zu MORSYS2D und seinem Entwicklungsstand in FORTUNATO ET AL. (2004), RAMOS ET AL. (2005) und ZÓZIMOL ET AL. (2006).

In Belgien im **Flanders Hydraulics Research** wird eine ähnliche Fragestellung wie in der Pilotphase bearbeitet. Auch dort weisen einige Strecken starken Küstenrückgang auf und die Folgen der Küstenerosion werden vornehmlich durch Strandaufspülungen behoben. Aktuell wird eine Studie für die Verwendung und die Modellfähigkeiten von LITPACK angefertigt, deren Abschlussbericht der LKN (vermutlich in niederländisch) ausgehändigt bekommen soll. Im Anschluss wird eine ähnliche Untersuchung mit sehr umfangreichen Messungen für das Modell Delft3D im europäischen Rahmen angestrebt.

3 Zusammenfassung

Die Westküste Sylts ist aufgrund hydrographischer und hydrologischer Besonderheiten als offenes System durch große Sedimentverluste geprägt, welche sich in Form von Küstenrückgängen bemerkbar machen. Zur Sicherung der Küstenlinie werden daher an der Westküste Sylts seit einigen Jahrzehnten Sandersatzmaßnahmen als Strand- oder Vorstrandaufspülung durchgeführt. Zur Untersuchung der Wirksamkeit dieser Maßnahmen wird die Verwendung von morphodynamisch-numerischen Modellen erforderlich. Dafür wird im Zuge der Pilotphase eine vergleichende Bewertung von numerischen Modellen und eine Einschätzung ihrer Leistungsfähigkeit für Untersuchungen an der Westküste Sylts vorgenommen.

Die Pilotphase erbringt die Erkenntnis, dass die Qualität von morphodynamischen Modellen durch das mangelnde physikalische Prozessverständnis im Einzelnen und in der Gesamtheit einschließlich der Wechselwirkungen eingeschränkt ist. Die Vorstellung von einem Universalmodell, welches sowohl für kurzfristige und langfristige als auch für klein- und großräumige Untersuchungen verwendet werden kann, kann nur eine Vision sein und ist aufgrund der verschiedenen Wertigkeit der physikalischen Prozessen in den jeweiligen Skalen kaum umsetzbar.

Die quantitative Vorhersagefähigkeit morphodynamischer Modelle ist niedrig. Die Ergebnisse von morphodynamischen Modellen können nur für qualitative Aussagen herangezogen werden, um die Auswirkungen von geplanten Baumaßnahmen abzuschätzen. Prinzipiell sind prozessbasierte Modellsysteme unter dem Vorbehalt, dass die physikalischen Prozesse im Küstennahbereich noch nicht hinreichend verstanden und u.U. nicht ausreichend im Modell implementiert sind, für die Simulation und Untersuchung von Sandaufspülungen geeignet.

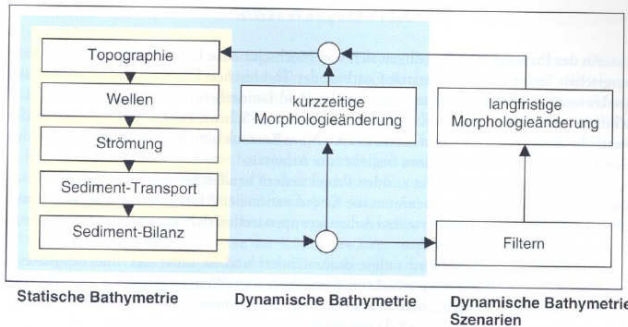
Die Pilotphase zeigt weiterhin, dass die Verwendbarkeit von morphodynamischen Modellen an eine ausreichende Datenmenge (Hydrodynamik, Sedimenttransport, Morphodynamik) geknüpft ist. Für eine numerische Modellierung der Morphodynamik und deren vergleichende Beurteilung mit anderen Modellsystemen ist ein möglichst synoptischer Datensatz für den Modell-Natur-Vergleich notwendig. Eine Optimierung des Messkonzeptes für die morphodynamische Modellierung in einem definierten Referenzgebiet ist daher anzustreben.

Mit den Erfahrungen aus der Pilotphase ist es durch eine reine Literaturrecherche nicht möglich, eine stichhaltige und fundierte Modellwahl für die Modellierung der morphologischen Veränderungen an der Westküste Sylts zu treffen. Eine vergleichende Bewertung der Leistung von Modellen ist nur über einen Modell-Natur-Vergleich unter identischen Naturbedingungen möglich. Das Streben nach einer solchen Bewertung setzt voraus, dass Vergleiche von Modellergebnissen und Feldmessungen an repräsentativen Referenzgebieten erfolgen.

Daher wird eine Modellvorauswahl getroffen, deren Modelle in weiteren Untersuchungen näher zu untersuchen sind. Aus diesen Untersuchungen können Stärken und Schwächen der einzelnen Modelle erkannt und so konkrete Aussagen zur Modelleistung gemacht werden. Außerdem können Erfahrungswerte in der Modellanwendung gewonnen werden, die auch zu einer Optimierung des Messkonzeptes beitragen können. Aus den Ergebnissen dieser Modellstudien könnte schließlich eine Modellwahl explizit für die Untersuchung der morphodynamischen Prozesse im Strand- und Vorstrandbereich für den Bereich der Westküsten Sylts resultieren.

4 Glossar

BSS-Wert	Brier Skill Score Statistischer Vergleichswert für die morphodynamische Modellleistung $BSS = 1 - \frac{\left[\left(z_b - z_m\right) - \Delta z_m\right]^2}{\left(z_0 - z_m\right)^2}$ mit z. B. $\Delta z_m = 0,10\text{m}$ als zul. Fehler (Messfehler) und den Indizes m = gemessen, b = berechnet, 0 = Ausgangshöhe <table><tr><th>Qualification</th><th>Morphology; BSS</th><th>(VAN RIJN ET AL., 2003)</th></tr><tr><td>Excellent</td><td>1.0–0.8</td><td></td></tr><tr><td>Good</td><td>0.8–0.6</td><td></td></tr><tr><td>Reasonable/fair</td><td>0.6–0.3</td><td></td></tr><tr><td>Poor</td><td>0.3–0</td><td></td></tr><tr><td>Bad</td><td>< 0</td><td></td></tr></table>	Qualification	Morphology; BSS	(VAN RIJN ET AL., 2003)	Excellent	1.0–0.8		Good	0.8–0.6		Reasonable/fair	0.6–0.3		Poor	0.3–0		Bad	< 0	
Qualification	Morphology; BSS	(VAN RIJN ET AL., 2003)																	
Excellent	1.0–0.8																		
Good	0.8–0.6																		
Reasonable/fair	0.6–0.3																		
Poor	0.3–0																		
Bad	< 0																		
Deterministisch / deterministisches Modell	Auf der Vorbestimmtheit der Geschehnisse beruhend, Ereignis-Vorhersagbarkeits-Modell (VAN RIJN ET AL., 2001)																		
Ensemblerechnung	Einsatz verschiedener morphodynamischer Modelle/ Modellparameter zur Bündelung von Stärken und Ausblendung von Schwächen. Dieses führt zum Einsatz eines Morphologic Ensemble Prediction System = MEPS. Gleichzeitig Erhöhung der Aussagegenauigkeit bei der Prognose. Neben der notwendigen Variation der numerischen und sedimentologischen Parameter eines bestimmten MD-Modells erbringt auch der Einsatz verschiedener MD-Modelle (Morphologic Multi Model Approach) eine Absicherung der Modellergebnisse (PLÜß, 2006).																		
Flächenmodell	Prozessbasierende Modellsysteme in 2D bzw. Q3D und 3D mit vielen Untermodulen zur Beschreibung des Wellenfeldes, tide-, wind- und wellenerzeugten Strömungsfeldern, Sedimenttransportflüssen und Sohlentwicklung in einem Rückkopplungssystem (VAN RIJN ET AL., 2000). Nur selten Berücksichtigung von Brandungszonenprozessen, wie z.B Rippströmung, Wellereflexion und Diffraktion für die Untersuchung der Strandentwicklung bei Küstenstrukturen (WWW-COASTALWIKI)																		
Interoperabilität	Fähigkeit zur Zusammenarbeit von verschiedenen Systemen, Techniken oder Organisationen durch die Einhaltung gemeinsamer Standards. Zwei Systeme, die miteinander vereinbar sind, nennt man kompatibel (WIKIPEDIA).																		
Kalibrierung	Anpassung des Modells an die Gegebenheiten des betrachteten Systems für bestimmte Zeitspannen oder eines bestimmten Zeitpunktes. Im allgemeinen Sprachgebrauch oft als Eichung des Modells durch Messparameter bezeichnet (ZIELKE, 1999).																		
Linienmodell	Modellsystem zur Untersuchung langfristiger horizontaler Verlagerungen einer strandparallelen Höhenlinie unter dem Einfluss von Wellen und Strömung als Resultat des Sedimenttransports längs der Küste unter der Annahme einer Verlagerung in See- oder Landrichtung ohne gleichzeitiger Formänderung des küstennormalen Profils (WINTER, 2001).																		
Morphologischer Faktor	Bei der Verwendung eines morphologischen Faktors werden die berechneten morphologischen Veränderungen einer Einzeltide mit dem definiertem Zeitfaktor multipliziert und so der Referenzmorphologie angenähert (WINTER, 2001).																		

Morphodynamisches Modell	Vereinfachte Naturbeschreibung, bei der parallel zur Berechnung der Hydrodynamik auch der Feststofftransport berechnet wird und die Ergebnisse als Sedimenttransport bzw. Erosion bei der Topographie bzw. Bathymetrie berücksichtigt werden, bei der die hydrodynamischen Prozesse über eine kontinuierlich aktualisierte Topographie/Bathymetrie ablaufen (BARTHEL ET AL., 1997).  Abbildung 4-1: Prinzip der morphodyn. Simulation (Lehfeldt et al., 1998)
multi-layer-Modell / multi-line-Modell (auch: n-layer-Modell / n-line-Modell)	Generalisierung des einfachen one-line-Modells, die es ermöglicht die Küstenbathymetrie mehr als nur als eine Strukturlinie zu beschreiben. Das Querprofil wird mit wechselseitig interaktiven Schichten schematisiert (STEETZEL ET AL., 2004). Das Querprofil entwickelt sich aufgrund der Interaktion zwischen diesen Schichten. Das Küstenlängsprofil jeder Kontur (Umrisslinie) entwickelt sich wie bei one-line-Modellen nur unter der möglichen Sedimentverteilung der einzelnen Zellen. Die Küstenentwicklung ist somit eine Funktion von Küstenquer- und Küstenlängstransport. Zurzeit noch wenig im Gebrauch, da das Modellkonzept die Gefahr birgt, das Verhalten quer zur Küstenlinie nicht realistisch genug zu beschreiben. Kalibrierung dieser Modelle erfordert einen höheren Aufwand als bei one-line-Modellen (WWW-COASTALWIKI; STEETZEL ET AL., 1998).
one-layer-Modell / one-line-Modell	Die Sandstrandmorphologie wird durch eine einzelne Strukturlinie beschrieben. Veränderungen in der Position dieser Form (also Küstenlinienveränderungen), zusammen mit anderen Parametern wie Wellenbedingungen, Strömungen und Sedimenttransportraten sind ausschließlich eine Funktion der Längsrichtung. Vorhersagen von Veränderungen in der Strand- und küstennahen Meeresbodenebene werden dargestellt. Das Strandprofil wird dabei als konstant angenommen. One-line-Modelle entstanden aus analytischen Lösungen der Diffusionsgleichung werden heute aber aufgrund ihrer Flexibilität und für die realistische Modellierung nicht-idealisierte Küstenlinien in numerischen Modellen verwendet. Feste Bauwerke (Buhnen, Ufermauern) werden durch eine Parametrisierung ihrer Effekte auf die Küstenlinie im Modell berücksichtigt (WWW-COASTALWIKI)
Probabilistisch / probabilistisches Modell	die Wahrscheinlichkeit berücksichtigend; Wahrscheinlichkeitsmodell (VAN RIJN ET AL., 2001).
Profilmodell	Küstenprofil-Modelle spiegeln die physikalischen Prozesse quer zur Küstenlinie unter der Annahme der Längsküstengleichförmigkeit wieder und dienen der Untersuchung kurzfristiger vertikaler Formveränderungen des küstennormalen Strandprofils. Berücksichtigung von allen relevanten Transportkomponenten (Wellenasymmetrie, durchschnittliche Küstenquerströmungen) in Küstenquerrichtung. Darüber hinaus sind Längsküstenströmungen durch Tide und Wellen in den meisten Modelle integriert (VAN RIJN ET AL., 2003; WINTER,

	2001). Küstenprofilmodelle vereinfachen das Küstensystem zu einem 2D System (mit Höhenlage und Küstenabstand in Querrichtung). Diese Modelle beinhalten im Allgemeinen Shoaling, Energieverlust infolge Wellenbrechen und Sohlrauheit, Rippströmung in Querrichtung, Tideströmungen und Sedimenttransport. Alle diese Modelle sagen Strandprofiländerungen infolge Sedimentquertransport voraus (WWW-COASTALWIKI)																		
Prozessbasiertes Modell	Modernste Variante für die Beschreibung morphodynamischer Prozesse zur Küstenentwicklung von Perioden bis 20 Jahre oder mehr. Bestehend aus Untermodulen für die Hydrodynamik, den Sedimenttransport und die Bettniveauveränderungen sowie einem Schleifensystem für die Berücksichtigung der dynamischen Interaktion der einzelnen Module (Update) (GRASMEIJER, 2002). Diese Modelle basieren auf Darstellungen der physikalischen Prozesse und umfassen gewöhnlich die Energie durch Wellen und/oder Strömungen mit entsprechender Antwort des Sedimenttransportes und ein Morphologieaktualisierungsmodul. Weiterhin bestehen jedoch große Lücken im Verständnis besonders des langfristigen morphologischen Verhaltens, wodurch die Ergebnisse mit einer Reihe von Unsicherheiten behaftet sind (WWW-COASTALWIKI)																		
RMAE	Relative Mean Absolute Error Statistischer Vergleichsparameter für die Beurteilung der Modellleistung für Wellenhöhe ($\Delta i=0,10\text{m}$) und Fließgeschwindigkeiten ($\Delta i= 0,05$) (VAN RIJN ET AL., 2000). $\text{RMAE} = \frac{\left[\left i_b - i_m \right - \Delta i_m \right]}{i_m}$ mit Δi als zul. Fehlerbreite (Messfehler) und Indizes m = gemessen und b = berechnet <table><tr><th>Qualification</th><th>Wave height; RMAE</th><th>Velocity; RMAE</th></tr><tr><td>Excellent</td><td><0.05</td><td><0.1</td></tr><tr><td>Good</td><td>0.05–0.1</td><td>0.1–0.3</td></tr><tr><td>Reasonable/fair</td><td>0.1–0.2</td><td>0.3–0.5</td></tr><tr><td>Poor</td><td>0.2–0.3</td><td>0.5–0.7</td></tr><tr><td>Bad</td><td>>0.3</td><td>>0.7</td></tr></table> (VAN RIJN ET AL., 2003)	Qualification	Wave height; RMAE	Velocity; RMAE	Excellent	<0.05	<0.1	Good	0.05–0.1	0.1–0.3	Reasonable/fair	0.1–0.2	0.3–0.5	Poor	0.2–0.3	0.5–0.7	Bad	>0.3	>0.7
Qualification	Wave height; RMAE	Velocity; RMAE																	
Excellent	<0.05	<0.1																	
Good	0.05–0.1	0.1–0.3																	
Reasonable/fair	0.1–0.2	0.3–0.5																	
Poor	0.2–0.3	0.5–0.7																	
Bad	>0.3	>0.7																	
Statistische Vergleichsparameter	BSS = Brier Skill Score RMAE = Relative Mean Absolute Error																		
Validierung	Überprüfung der Gültigkeit des wissenschaftlichen Ergebnisses unter dem Vergleich von Modellergebnissen und Naturmessdaten, die bei der Kalibrierung und Verifizierung in keiner Weise verwendet wurden (ZIELKE , 1999).																		
Verhaltenbasiertes Modell	Phänomenologisches Modell, in dem einige der physikalischen Prozesse, die in die Entwicklung der Küstenlinie mit einbezogen werden, durch empirische Beziehungen vereinfacht werden (STEETZEL ET AL., 2001). Verhaltenorientierte Modell erreichen (vermeintlich) bessere Ergebnisse für die langfristige Modellierung als prozessbasierende Modellsysteme. Es existiert keine klare Grenze zwischen verhaltenbasierten Modellen und prozessbasierenden Modellen.																		
Verifizierung	Überprüfung des Computercodes und der implementierten Prozesse auf Naturähnlichkeit (ZIELKE, 1999).																		

5 Schrifttum

ALR Husum (2006): *Pilotphase zur Modellierung der morphodynamischen Prozesse im Strand- und Vorstrandbereich sandiger Brandungsküsten*, Vorhabenbeschreibung

ALR Husum (2006): *Themenvorschläge zur Fortschreibung „Fachplan Küstenschutz Sylt“*, Amt für ländliche Räume Husum unveröffentlicht

ALW Husum (1985): *FACHPLAN KÜSTENSCHUTZ SYLT*, Amt für Land- und Wasserwirtschaft Husum unveröffentlicht

ALW Husum (1993): *Modelluntersuchungen mit GENESIS*, Stellungnahme von Dr. Schade vom 28.01.1993, Amt für Land- und Wasserwirtschaft Husum, Vermerk, unveröffentlicht

ALW Husum (1997): *FACHPLAN KÜSTENSCHUTZ SYLT – Fortschreibung*, Amt für Land- und Wasserwirtschaft Husum, unveröffentlicht

Ahrendt K. (1985): *Die Sedimente vor der Westküste Hörnum, Kartierung von Strand, Vorstrand und Seegrund und Untersuchungen der Auswirkungen eines Spülkörpers am Strand auf die Sedimentationsverhältnisse*, Diplomarbeit, unveröffentlicht

ASRLimited: *The 3DD modelling: Information Package*, Download (http://www.asrltd.co.nz/downloads_model.htm)

Barthel V., Lehfeldt R. (1997): *Numerische Simulation zur Morphogenese von Windwatten*, Abschlußbericht zur Projektdefinition, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord

BAW (1998): *HN-Verfahren TRIM-2D – Validierungsdokument*, Version 2.0, Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg

Black K.(2003): *Numerical prediction of salient formation in the lee of offshore reefs*, Proceedings of the 3rd International Surfing Reef Symposium, New Zealand, Seite 196-218

Bosboom J., Aarninkhof S.G.J., Reniers A.J.H.M., Roelvink J.A., Walstra D.J.R. Unibest-TC 2.0 (2000): *Overview of model formulations*, WL|Delft Hydraulics H2305.42

Brøker Hedegaard I., Roelvink J.A., Southgate H., Pechon P., Nicholson J., Hamm L. (1992): *Intercomparison of coastal profile models*, Coastal Engineering 162, Seite 2108-2121

Casulli V., Lang G. (2004): *Technical Report - Mathematical Model UnTRIM*, Validation Document, Version 1.0, Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg

CEM-Part II (2002): *CEM-Reports - Chapter 2: Longshore Sediment Transport*, USACE, EM 1110-2-1100

Chesher T.C., Soulsby R.L., Foley W.J., Sterlini P.E., Jervis G. (2005): *Morphological modelling using the 2DH model Pisces*, Bericht AO aus SANDPIT-Projekt: / WP4

Cooper J.A.G., Pilkey O.H. (2004): *Perspectives – Longshore Drift: Trapped in an exepeted universe*, Journal of Sedimentary Research, Vol. 74, No. 5, Seite 599–606

Delft Hydraulics (2001): *Delft3D – Functional Specifications*, Version 2.1, WL|Delft Hydraulics

Delft Hydraulics (2003): *Delft3D-MOR, Simulation of the long-term interaction of waves, currents, sediment transport and morphological development*, User Manual Version 3.10, WL|Delft Hydraulics

Delft Hydraulics (2005): *Delft3D-FLOW, Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments*, User Manual, Version 3.12, WL|Delft Hydraulics

Delft Hydraulics (2006): *Delft3D-WAVE, Simulation of short-crested waves with SWAN*, User Manual, Version 3.01, WL|Delft Hydraulics

Delft Hydraulics (2007): *Delft3D - another dimension*, Institutswebsite, Download

Delft Hydraulics (2007): *Delft3D-MOR: the MOR module of Delft3D*, Institutswebsite, Download

Delft Hydraulics (2007): *Delft3D-SED: the SED module of Delft3D*, Institutswebsite, Download

Detle H.H., Neue J., Peters P. (1994,a): *Untersuchungen zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt / Phase II - Bericht Nr. 778: Numerische Modellierung des Küstenabbruches an der Westküste der Insel Sylt*, BMFT-Forschungsvorhaben

Detle H.H., Rahlf H. (1994,b): *Untersuchungen zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt / Phase II - Bericht Nr. 779: Küstentransportmodell STP-Long für Anwendungen an der Westküste der Insel Sylt*, BMFT-Forschungsvorhaben

Detle H.H., Spingat F. (1994,c): *Untersuchungen zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt - Phase II, Bericht Nr. 776: Hydrologische Messungen im Testfeld Rantum*, BMFT-Forschungsvorhaben

DHI Software (2007,a): *LITLINE: Coastline Evolution*, User Guide, DHI Water & Environment, 2007

DHI Software (2007,b): *LITDRIFT: Longshore Current and Littoral Drift*, User Guide, DHI Water & Environment, 2007

DHI Software (2007,c): *LITPACK: An Integrated Modelling System for Littoral Processes And Coastline Kinetics*, Short Introduction and Tutorial, DHI Water & Environment, 2007

DHI Software (2007,d): *LITPROF: Profile Development*, User Guide, DHI Water & Environment, 2007

DHI Software (2007,e): *LITSTP: Noncohesive Sediment Transport in Currents and Waves*, User Guide, DHI Water & Environment, 2007

DHI Software (2007,f): *MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM: Transport Module – Short description*, DHI Water & Environment, 2006

DHI Software (2007,g): *MIKE 21 CAMS - MIKE 21 Coastal Area Morphological Shell*, User Guide, DHI Water & Environment

DHI: *LITPACK: An Integrated Modelling System for Littoral Process and Coastline Kinetics – A short description*, DHI Water & Environment

Ding Y. (2007): *Model Description of CCH2D-Coast*, unveröffentlicht (pers. Mitteilung), 2007

Ding Y., Jia Y., Wang S.S.Y. (2007,a): *Numerical Modeling of Morphological Processes around Coastal Structures*, unveröffentlicht (pers. Mitteilung)

Ding, Y., Wang, S. S. Y., Jia, Y. (2006): *Development and Validation of a Quasi Three-Dimensional Coastal Area Morphological Model*, Journal of Waterway, Port, Coastal, & Ocean Engineering, 132 (6), Seite 462-476

Ding, Y., Yeh, K.-C., Chen, H.-K., and Wang, S.S.Y. (2007,b): *Simulations of Morphodynamic Changes due to Waves and Tides in an Estuary using CCHE2D-Coast Model*, Proceedings of ASCE-EWRI Congress 2007, May 15-19, Tampa, Florida

Domesle M.(2006): *Numerische Simulation von Dünenabbrüchen – Vergleich verfügbarer Modelle*, Diplomarbeit, Universität Rostock, Institut für Umweltingenieurwesen, unveröffentlicht

Dücker H.P., Oumeraci H. (2006): *Herausforderung für die Forschung im Küsteningenieurwesen, maritimen und binnenländischen Hafen- und Verkehrswasserbau aus dem Blickwinkel der HTG*, HANSA International Maritime Journal, 143. Jahrgang, Nr.1

Eurosion (2004): *A guide to coastal erosion management practices in Europe: lessons learned*, Service contract B4-3301/2001/329175/MAR/B3

Fortunato A. B., Oliveira A. (2004): *A modelling system for tidally driven long-term morphodynamics*, Journal of Hydraulic Research Vol.42, No.4, Seite 426-434

González M., Medina R., Ondina J., Osorio A., Méndez F. J., García E. (2007): *An integrated coastal modeling system for analyzing beach processes and beach restoration projects*, Computers and Geosciences, Elsevier Ed

Grasmeijer B.T., van Rijn L.C. Walstra D.-J. (2002): *Modeling cross-shore bar behaviour on storm and seasonal time scales*, Coastal Engineering, Seite 2712-2724

Grasmeijer B.T., van Rijn L.C., Elgar S., Gallagher E (2002): *Verification of a cross-shore Profile Model using field data*

Grasmeijer B.T (2002): *Process-based cross-shore modelling of barred beaches*, Universität Utrecht, Dissertation

Grüne, J. (2007): *Deutsch-Russisches Kooperationsprojekt - Modellierung hydro- und lithodynamischer Prozesse in der Küstenzone*, Vorhabenbeschreibung für KFKI-Projekt ModPro, ForschungszentrumKüste Hannover

Grunnet N.M, Ruessink B.G., Walstra D.J.R. (2005): *The influence of tides, wind and waves on the redistribution of nourished sediment at Terschelling*, The Netherlands, Coastal Engineering 52, Seite 17– 631

Grunnet N.M., Walstra D.J.R., Ruessink B.G. (2004): *Process-based modelling of a shoreface nourishment*, Coastal Engineering 51, Seite 581–607

Hanson H., Kraus N.C. (1989,a): *GENESIS: Generalized Model for Simulation shoreline change*, Report 1: Technical Reference, USACE

Hanson H., Kraus N.C. (1989,b): *GENESIS: Generalized Model for Simulation shoreline change*, Report 2: Workbook and system user's manual, USACE

Heyer H., Oumeraci H., Malcherek A., Zanke U.C.E., Strotmann T., von Storch H., Milbradt P. (2007): *Langfristige Vorhersageverfahren und Vorhersagemodelle einschließlich Einfluss auf Baumaßnahmen*, HANSA, 144. Jahrg. Nr. 1, Seite 66-71

Hofstede J. (2004): *COMRISK Common strategies to reduce the risk of storm floods in coastal lowlands: an introduction*, Abschlussbericht

Johnson H.K., Appendini C.M. (1999): *Nourtec II – Numerical Modelling of a Coastal Processes in the Vicinity of a Shore-face Nourishment Site, North of Torsminde, Denmark*, Kystdirektoratet, unveröffentlicht

- Johnson H.K., Appendini C.M. (2001): *Nourtec II – Morphological modelling of Coastal processes in the Vicinity of a Shoreface Nourishment Site, North of Torsminde, Denmark*, Final Report, Kystdirektoratet, unveröffentlicht
- Kerper D.R., Brøker I., Damgaard Christensen E., Zyserman J.A. (2002): *Application of coastal modeling systems in support of integrated coastal zone management*, Solutions to Coastal Disasters '02, San Diego
- KFKI-Workshop (2005): *Dokumentation unter <http://kfki.baw.de>* (login: morphodynamik, passwd: morph7155)
- Köster R., Ahrendt K. (1993): *4. Zwischenbericht des Forschungsvorhabens des Küstenschutzes auf Sylt – Phase II*, Geologisch-Paläontologisches Institut, Universität Kiel
- Kramer J. (2005): *UNIBEST CL+ 6.0 - User & Theoretical Manual*, Report, WL|Delft Hydraulics
- Kuijper C., Steijn R., Roelvink D., van der Kaaij T., Olijslagers P. (2004): *Morphological modelling of the Western Scheldt, Validation of DELFT3D*, WL|Delft Hydraulics, Alkyon Z3648 / A 1198, unveröffentlicht
- Lang G., Bergemann F., Boehlich M.J., Rudolph E., Ruland P., Seiß G., Winkel N. (1998): *HN-Verfahren TRIM-2D*, Validierungsdokument, Version 2.0, Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg
- Larson M., Kraus N.C. (1989): *SBEACH: Numerical model for storm-induced beach change, Report 1 – Empirical foundation and model development*, USACE
- Larson M., Kraus N.C. (1990): *SBEACH: Numerical model for storm-induced beach change, Report 2 – Numerical formulation and model tests*, USACE
- Latteaux, B. (1995): *Techniques for long-term morphological simulation under tidal action*, Marine Geology 126, Seite 129-141
- Lecher K., Lühr H.-P., Zanke U.C.E (2001): *Taschenbuch der Wasserwirtschaft*, 8. Auflage, Vieweg
- Lehfeldt R., Barthel V.(2001): *MorWin - Morphodynamische Modellierung von Windwatten – Netzgestützte Projektbearbeitung im Küsteningenieurwesen*, Abschlussbericht 1997 – 2000
- Lehfeldt R., Milbradt P., Zyserman J.A., Barthel V. (2002): *Evaluation of simulation models used for morphodynamic studies*, ICCE 2002
- Lehfeldt, R. (2000): *Vergleichende Betrachtung von Forschungs- und kommerziellen Modellen*, Wasser- & Schifffahrtsdirektion Nord, Kiel, Präsentationsfolien
- Malcherek A., Piechotta F., Knoch D. (2005): *Technical Report – Mathematical Module SediMorph*, Validation Document, Version 1.1, Bundesanstalt für Wasserbau
- Mayerle R., Zielke W. (2005): *Vorhersage mittelskaliger Morphodynamik PROMORPH*, Die Küste, Heft 69
- Mewis, P (2006): *Nearshore Morphodynamic-numerical Computation of the influence of harbour jetties*, ICCE Sand Diego
- Morellato D., Sabatier F., Pons F., Gaufres P. (2004): *Comparaison de deux modèles cross-shore d'érosion des plages - Site de Rousty, Delta du Rhône, France*, VIIIèmes Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Compiègne, 7.-9. September 2004, Seite 203-210

- Nairn R.B., Southgate H.N. (1993): *Deterministic profile modelling of nearshore processes. Part 2. Sediment transport and beach profile development*, Coastal Engineering 19, Seite 57-96
- Newe (2004): *Strandprofilentwicklung unter Sturmflutseegang - Methodik für großmaßstäbliche 2D-Experimente und Berechnungsansätze*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation
- Newe J., Dette H.H. (2004): *Bemessung der Landesküstenschutzdünen Mecklenburg-Vorpommerns*, LWI-Bericht Nr. 879a
- Nicholson J., Brøker I., Roelvink J.A., Price D., Tanguy J.M., Moreno L. (1997): *Intercomparison of coastal area morphodynamic model*, Coastal Engineering 31, Seite 97-123
- Niemeyer H.-D. (2006): *Prozesorientierte Naturmessungen der Dünenerosion bei Sturmfluten*, Vorhabenbeschreibung für KFKI-Projekt Düneros, NLWKN Forschungsstelle Küste, unveröffentlicht
- Pilkey O.H., Young R.S., Bush D.M., Thielier E.R. (1994): *Predicting the behaviour of beaches: alternatives to models*, Lissabon, Littoral 94, 26.-29. September 1994, Seite 53-60
- Plüß A.D. (2006): *HN-MD-Modellverfahren – Unterschiede, Vergleichsrechnungen*, Bundesanstalt für Wasserbau, Präsentationsfolien, unveröffentlicht
- PONTOS (1999): *Update & validation of the PONTOS model: Description, formulation and application of v1.0 vol 1*; Final Report 1999, RWS/RIKZ A2444/Z2559, nicht zu bekommen, Anfrage bei Ester Groenendaal/RIKZ)
- Ramos M., Silva P., Sancho F. (2005): *Morphological modelling using a 2DH model*, Bericht AT aus SANDPIT-Projekt/WP4
- Raudkivi, A.J. (1994): *Untersuchungen zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt - Phase II*, BMFT-Forschungsvorhaben, Gesamt-Schlussbericht
- Roelvink J.A., Brøker I. (1993): *Cross shore profile models*, Coastal Engineering 21, Seite 163-191
- Ruessink B.G., Kuriyama Y., Reniers A.J.H.M., Roelvink J.A., Walstra D.J.R. (2006): *Modeling cross-shore sandbar behaviour on the time scale of weeks*, Journal of Geophysical Research
- Schoonees J.S., Theron A.K. (1995): *Evaluation of 10 cross-shore sediment transport / morphological models*, Coastal Engineering 25, Seite 1-41
- Smile consult (2006): *Simulationsmodell Marina Version 1.0*, Handbuch, smile consult GmbH, Hannover
- Steetzel H.J., de Vreong H., van Rijn L.C., Stam J.-M. (1998): *Morphological modelling using a modified multi-layer approach*, Coastal Engineering Proceedings, 26.CEC, Vol.2, Seite 2368-2381
- Steetzel H.J., Wang Z.B.: *A longterm morphological model for the whole Dutch Coast - Part I: model formulation*, WL|Delft Hydraulics & Alkyon, Z3334 / A1000, unveröffentlicht,
- Steetzel H.J., Wang Z.B. (2004): *A longterm morphological model for the whole Dutch Coast - Part II: Application of the model*, WL|Delft Hydraulics & Alkyon, Z3334 / A1000 unveröffentlicht
- Sutherland J., Walstra D.J.R., Chesher T.J., van Rijn L.C., Southgate H.N. (2004): *Evaluation of coastal area modelling systems at an estuary mouth*, Coastal Engineering 51, Seite 119–142

Sutherland J., Peet A.H., Soulsby R.L. (2004): *Evaluating the performance of morphological models*, Coastal Engineering 51, Seite 917–939

Szmytkiewicz M., Biegowski J., Kaczmarek L.M., Okrój T., Ostrowski R., Pruszek Z., Rózyński G., Skaja M. (2000): *Coastline changes nearby harbour structures: comparative analysis of one-line models versus field data*, Coastal Engineering 40, Seite 119–139

Thiede J., Ahrendt K. (2000): *Klimaänderung und Küste – Fallstudie Sylt, Teilprojekt: Klimabedingte Veränderung der Gestalt der Insel Sylt* (Fördernr.:01LK9526), Abschlussbericht, Universität Kiel, Forschungszentrum für marine Geowissenschaften

Tonnon P.K., van Rijn L.C., Walstra D.J.R. (2006): *The morphodynamic modelling of tidal sand waves on the shoreface*, Coastal Engineering; Coastal Engineering 54, Issue 4, Seite 279-296

Van der Kaaij T., Roelvink D., Kuijper K. (2004): *Morphological modelling of the Western Scheldt*, Intermediate report Phase 1: Calibration of the morphological model, WL|Delft Hydraulics & Alkyon, Z3648 / A1198, unveröffentlicht

van Duin M.J.P., Wiersma N.R., Walstra D.J.R., van Rijn L.C., Stive M.J.F. (2004): *Nourishing the shoreface: observations and hindcasting of the Egmond case, The Netherlands*, Coastal Engineering 51, Seite 813– 837

Van Rijn L.C. et al. (2005): *SANDPIT: Sand transport and morphology of offshore sand mining pits – Part II: Detailed scientific and practical results*, Aqua publications

Van Rijn L.C., Ruessink B.G., Mulder J.P.M. et al. (2000): *COAST3D-EGMOND, The behaviour of a straight sandy coast on the time scale of storms and seasons*; Process knowledge and guidelines for coastal management, Abschlussbericht, Aqua Publications

Van Rijn L.C., Walstra D.J.R., Grasmeijer B.T., Kleinhout K. (2001): *Hydrodynamics and morphodynamics in the surf zone of a dissipative beach*

Van Rijn L.C., Walstra D.J.R., Grasmeijer B., Sutherland J., Pan S., Sierra J.P. (2003): *The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storm and seasons using process-based Profile models*, Coastal Engineering 47, Seite 295–327

Walstra D.J.R. (2000): *Unibest-TC - Userguide*, WL|Delft Hydraulics Z2897

Walstra D.J.R., Cheshire T., Davies A.G., Ribberink J., Sergeant P., Silva P., Vittori G., Walther R., van Rijn L.C. (2005): *Intercomparison of the morphological models*, Bericht AY aus SANDPIT-Projekt / WP4

Winter, C. (2001): *Zur morphodynamischen Modellierung am Beispiel der Tideeider*, Christian-Albrechts-Universität Kiel, Dissertation

Wise R.A., Smith S.J., Larson M. (1996): *SBEACH: Numerical model for storm-induced beach change, Report 4 Cross-shore transport under random waves and model validation with SUPERTANK and field data*, USACE

Zanke U.C.E. (2005): *Langfristige Küstenveränderungen im Fachplangebiet Fischland unter dem Gesichtspunkt zusätzlicher Einbauten in See*, Gutachtliche Stellungnahme unveröffentlicht

Zanke U.C.E., Hirschhäuser T. (2001,a): *Morphologische Langfristprognose für das System Tidebecken-Außensände am Beispiel Sylts und der Dithmarscher Bucht*, Abschlussbericht (Fördernr.: MTK0605), TU Darmstadt, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Zanke U.C.E., Hirschhäuser T. (2002,a): *Langfristige Sedimentdynamik des Systems Tidebecken-Ebbdelta unter besonderer Berücksichtigung von verändertem Seegang und Wasserständen* (Fördernr.: KIS028), TU Darmstadt, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Zanke U.C.E., Mewis P. (2002,a): *Morphodynamisches Simulationssystem TIMOR*, Wasser & Boden 54/4, Seite 14-22

Zanke, U., Witting, M (2001,b): *Entwicklungsprognose Südhiddensee - Simulationen zur Problematik eines möglichen Durchbruchs*, Präsentationsfolien

Zielke W. (1999): *DVWK-Schriften 127: Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewässern*, Kommissionsvertrieb Wirtschaft- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn

Zósimol A.C., Oliveira A., Fortunato A.B., Forte C.J.E.M. (2006): *Application of a morphodynamic modelling system to an idealized inlet*, Conference Proceeding Paper, Coastal Dynamics 2005 – 5th International Conference, 4.–8. April 2005, Barcelona, Spanien

Internetquellen:

Modelle:

www-3DDSuite: <http://www.asrltd.co.nz/modeling.htm> (15.01.08)

www-ASMITA : <http://www.netcoast.nl/projects/netcoast/tools/rikz/ASMITA.htm> (15.01.08)

www-BAW: <http://www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/Methoden/hnm/hnm-de.html> (15.01.08; SediMorph, TRIM, UnTRIM)

www-CCHE2D: <http://www.ncche.olemiss.edu/index.php?page=cche2d> (15.01.08)

www-CCHE2D-Coast: http://www.ncche.olemiss.edu/content/software/cche2d_coast.php (15.01.08)

www-CCHE-Tide: http://www.ncche.olemiss.edu/content/software/cche2d_tide.php (15.01.08)

www-Coastalwiki: http://www.encora.eu/coastalwiki/Main_Page (15.01.08)

www-CROSMOR: <http://www.leovanrijn-sediment.com/page16.html> (15.01.08)

www-ESTMORF: <http://www.wldelft.nl/soft/estmorf/index.html> (15.01.08)

www-GENESIS: <http://www.ems-i.com/SMS/models/genesis.html> (15.01.08)

www-LITPACK: <http://www.dhigroup.com/Software/Marine/LITPACK.aspx> (15.01.08)

www-MARINA: <http://www.smileconsult.de/index.php?27> (MARINA, 15.01.08)

www-MIKE 21: <http://www.dhigroup.com/Software/Marine/MIKE21.aspx> (15.01.08)

www-MOPS: <http://ksrm01.gkss.de/coastdat/index.php?menuid=9&reporeid=43> (15.01.08)

www-PONTOS: <http://www.netcoast.nl/projects/netcoast/tools/rikz/PONTOS.htm> (15.01.08)

www-UNIBEST: <http://www.wldelft.nl/soft/chess/index.html> (15.01.08)

Projektwebseiten:

COAST3D: http://www.hrwallingford.co.uk/projects/COAST3D/index_new.html (15.01.08)

MAST-Projekte: <http://cordis.europa.eu/mast/home.html> (15.01.08)

MORWIN: <http://morwin.bauinf.uni-hannover.de/index.html> (15.01.08)

SANDPIT: <http://sandpit.wldelft.nl/mainpage/mainpage.htm> (15.01.08)

Validation: <http://www.ibwpan.gda.pl/bi/projects.php> (15.01.08)

6 **Abbildungs- und Tabellenverzeichnis**

Abbildung 1-1: Prinzipskizze zur Strand- und Vorstrandaufspülung (ALR Husum, 2006)	6
Abbildung 1-2: Ausschnitt Rantum bis Hörnum mit Stationierung und Profilbezeichnung (ALR Husum, 2006)	6
Abbildung 2-1: Zeit- und Raumskalen der Morphologie beeinflussenden natürlichen Faktoren (eurosion, 2004) .	11
Abbildung 2-2: Querprofilform im Vorstrandbereich im Untersuchungsgebiet „Egmond“ (van Rijn et al., 2005) ...	15
Abbildung 4-1: Prinzip der morphodyn. Simulation (Lehfeldt et al., 1998)	41
Tabelle 2-1: Anwendungsgebiete einer Delft3D-Modellierung (Kuijper et al., 2004).....	18
Tabelle 2-2: Korrelationskoeffizienten des Modellvergleiches (Szmytkiewicz et al., 2000).....	21
Tabelle 2-3: Vor- und Nachteile des Modells NEWDUNE (Newe et al., 2004)	24
Tabelle 2-4: Übersicht der beurteilten Modelle	31
Tabelle 2-5: Modellvorauswahl aufgrund der Beurteilung der Modelleignung	36