

Modellierung morphodynamischer Prozesse an sandigen Brandungsküsten

Von DIRK VAN RIESEN und DAGMAR MUCH

Zusammenfassung

Mathematische Modelle werden im Bereich des Küstenschutzes und der Küstenforschung vermehrt eingesetzt. Hydrodynamisch-numerische mit Seegang und Strömung gekoppelte Tide-Modelle gelten dabei als äußerst etabliert. Seit einigen Jahren werden ebenso gekoppelte morphodynamische Modelle mit Seegang und Sedimenttransport eingesetzt.

Die vom BMBF geförderte Pilotphase zum KFKI-Projekt „MorphoSylt“ (03KIS064) hatte zur Aufgabe, die Möglichkeiten der morphodynamischen Modellierung für die Westküste Sylts über eine vergleichende Bewertung von weltweit eingesetzten numerischen Modellen und eine Einschätzung der Modellleistung und -eignung zu prüfen.

Aus den Erfahrungen dieser Literaturrecherche resultiert eine Modellvorauswahl für den Bereich der Westküste Sylts. Die Pilotphase stellt dabei auch die Herausforderungen und Grenzen bei der morphodynamischen Modellierung und der Beurteilung von Modellergebnissen heraus.

Schlagerwörter

Numerische Modellierung, Morphodynamik, sandige Küste, Brandungsküste, Sandersatzmaßnahmen, Sandaufspülung, Sylt

Summary

Mathematical models are increasingly used for coastal protection and coastal research. Thereby, hydrodynamic-numerical tidal models coupling swell and current are considered as extremely established. For some years morphodynamic models coupling swell and sediment transport are used as well.

Main issue of the pilot phase of the KFKI project “MorphoSylt” (03KIS064), sponsored by the German Ministry of Education and Research (BMBF), was to examine the possibilities of the morphodynamical modelling for the west coast of the North Frisian Island called Sylt. This takes place by a comparative evaluation from world-wide used numerical models and by an estimate of the model achievement and model suitability.

From these experiences a preselection of models for possible resuming investigations of the model achievement for the west coast of Sylt resulted. Thereby, the pilot phase refers to the challenges by modelling morphodynamics and the evaluation of model results generally.

Keywords

Numerical Modelling, morphodynamics, sandy coastline, high-energy coastline, nourishments, Sylt

I n h a l t

1. Einleitung	182
2. Situation	182
2.1 Untersuchungsgebiet.	183
2.2 Aktueller wissenschaftlicher Stand	184
3. Herausforderungen in der morphodynamischen Modellierung.	184
4. Modellanforderungen.	185
5. Modellbeurteilungen	186
6. Datengrundlage und Messkonzept	189
7. Fazit und Ausblick	189
8. Danksagung	190
9. Schriftenverzeichnis.	191

1. E i n l e i t u n g

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 Inselsystem verlorengeht. Dieser Sandverlust beträgt im Jahresmittel ungefähr 1 Mio. m³, was langfristig einen jährlichen Küstenrückgang von rund einem Meter bedeutet. 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 (ALW HUSUM, 1997). 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 auf dem trockenen Strand durchgeführten Sandaufspülungen 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 auch 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 ermöglichen, sollen morphodynamische Simulationsmodelle zum Einsatz kommen.

2. S i t u a t i o n

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 im Bereich der Westküste Sylts eine solche Beurteilung nur im Rückblick (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 finden rund alle drei Monate bzw. ereignisbezogen nach Sturmfluten statt, um die erfolgten Materialumlagerungen zu erfassen und zu dokumentieren.

Die Verwendung von morphodynamischen Modellsystemen ermöglicht zudem die Beurteilung von morphodynamischen Veränderungen auch in der Vorschau (Forecast). Dadurch kann 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 ein gut kalibriertes und validiertes Modellsystem sowie synoptische Daten für Hydrologie, Sedimentologie, Meteorologie sowie Daten der terrestrischen und hydrographischen Vermessung.

2.1 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 (Abb. 1). Zwischen diesem Riff und dem Strandbereich finden ständig Sedimentaustauschprozesse statt. Dieses Riff ist es auch, welches als natürlicher Wellenbrecher fungiert und die Wellenenergie bereits vor dem Strandbereich abmindert. Die Energiedissipation am Riff nimmt jedoch mit steigendem Wasserstand bei Sturmfluten ab, sodass die Wellenenergie mitunter ungebremst auf die Küste trifft. Die West-

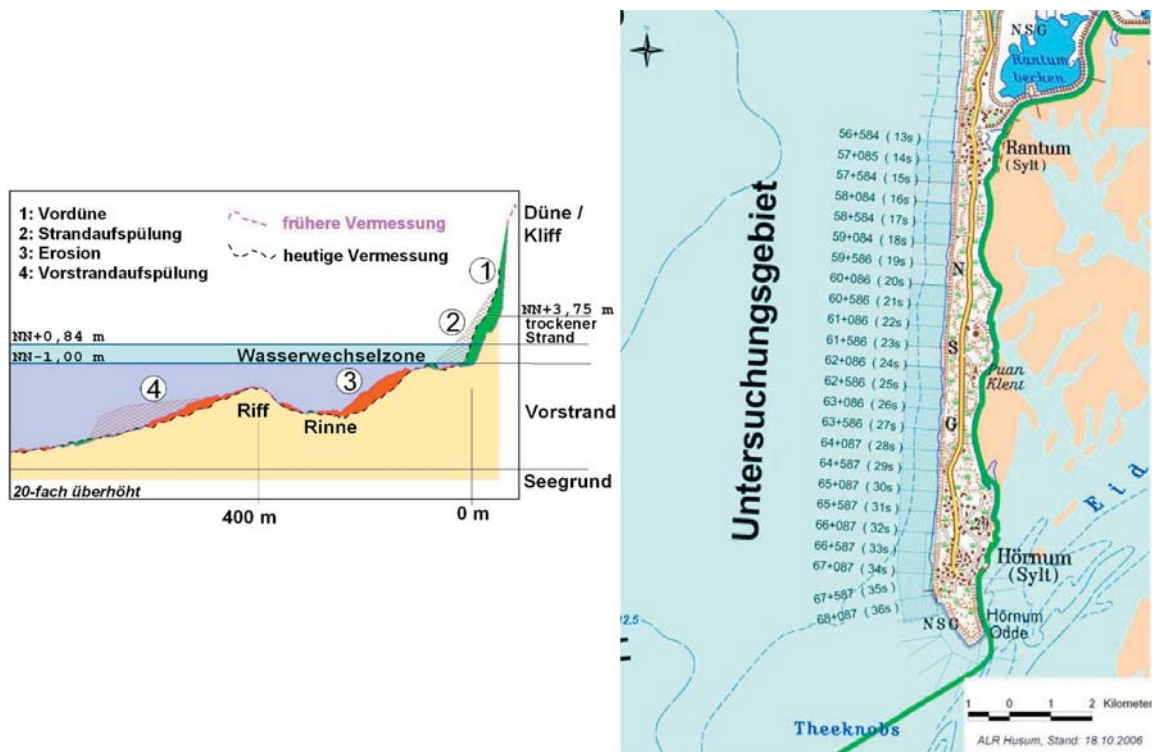


Abb. 1: Untersuchungsgebiet „Westküste Sylt“

küste ist hauptsächlich durch Strandbereiche mit Dünen gekennzeichnet. Vereinzelt finden sich auch feste Bauwerke wie Ufermauern, Deckwerke oder Bühnen entlang der Westküste wieder (ALR HUSUM, 1985; 1997).

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Südteil der Insel. Es erstreckt sich, wie in Abbildung 1 dargestellt, auf rund 12 km Länge und 1 km Breite von Rantum (Station 56+584) nach Hörnum (Station 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.

2.2 Aktueller wissenschaftlicher 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 bislang an einer allgemein akzeptierten Methodik für die Erfassung der skalenübergreifenden Prozesse unter Berücksichtigung von Wind, Seegang, Strömung und Sedimenteigenschaften fehlt (DÜCKER u. OUMERACI, 2006). Die im Rahmen von KFKI-Forschungsprojekten („Ebbdelta“ und „Promorph“) geförderten Arbeiten zu diesem Thema befassten sich bislang 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 u. ZIELKE, 2005). Da die Bedingungen an einer sandigen Brandungsküste merklich unterschiedlich zu denen in Wattgebieten sind und an der Westküste Sylts auch kurz- und langfristige morphologische Entwicklungen untersucht werden sollen, sind die Ergebnisse aus diesen vorhergehenden Projekten nur bedingt verwendbar.

3. Herausforderungen in der morphodynamischen Modellierung

Eine morphologische Veränderung ist das Ergebnis verschiedener natürlicher (Abb. 2) und anthropogener Faktoren. Diese zahlreichen Faktoren treten in unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen auf. Zudem sind diese Faktoren häufig noch unterschiedlicher Art und können kontinuierlich oder zufällig sowie reversibel oder irreversibel vorkommen (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).

Die daraus resultierenden Schwierigkeiten innerhalb der morphodynamischen Modellierung sind vielfältig. Mit mehreren Parametern für Tide, Seegang, Strömung, Morphologie, Meteorologie etc. kann die Realität zwar genauer nachgebildet werden, es bleiben aber die Unsicherheiten hinsichtlich Größenordnung und Relevanz der Einzelparameter in 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 einfachen (z.B. CERC-Formel) und einer zu detaillierten Beschreibung der wirksamen Prozesse, wie in Black-Box-Systemen wie LIT-PACK oder MIKE21 (PILKEY u. COOPER, 2002; COOPER u. PILKEY, 2004). VAN RIJN et al. weisen zusätzlich auf die Fehlermultiplikation im Laufe der Simulationsdauer einer morphodynamischen Modelluntersuchung hin, die sich durch Fehler in den Eingangsdaten und in den Modellformulierungen sowie durch Extrapolationsfehler infolge einer Modellanwendung außerhalb der räumlichen und zeitlichen Gültigkeit ergibt.

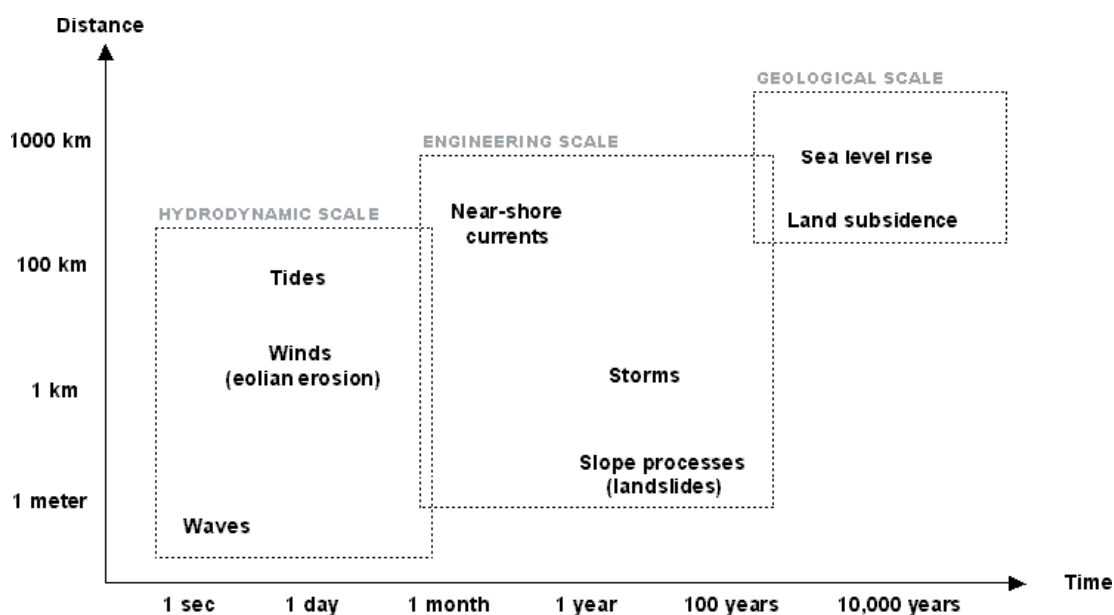


Abb. 2: Zeit- und Raumskalen der Morphologie beeinflussenden natürlichen Faktoren (EUROSION, 2004)

4. Modell anforderungen

Die Modellanforderungen richten sich nach dem Untersuchungsgegenstand und den vorliegenden Randbedingungen in dem Untersuchungsgebiet.

Mit den Ergebnissen der Modellrechnung im Bereich der Westküste Sylt soll die Wirksamkeit von Sandersatzmaßnahmen im Strand- und Vorstrandbereich im Hinblick auf eine Optimierung des Küstenschutzes untersucht werden. Zusätzlich sollen mithilfe der nume-

rischen Modelle vergleichende Analysen der morphologischen Aktivität ohne und mit Küstenschutzmaßnahmen sowie aufgrund unterschiedlicher Ausführungsvarianten der geplanten Küstenschutzmaßnahme (Tetrapodenwerke, Strandmauern, Deckwerke, Sandersatzmaßnahmen) vorgenommen werden.

Mit den Modelluntersuchungen sollen dabei kurz- (Tage; Sturmflutereignis), mittel- (Wochen bis Jahre) 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 (HEYER et al., 2007).

Für die Charakterisierung des Systems „Westküste Sylt“ gilt Folgendes:

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

5. Modellbeurteilungen

Die Pilotphase verdeutlicht, dass es unzählige Modelle und Modellansätze für die Untersuchung morphodynamischer Entwicklungen gibt. Eine Vielzahl der Modelle ist dabei jedoch nur projektgebunden und wird nicht zur Praxisreife weiterentwickelt.

Die Erfahrungen aus der Pilotphase zeigen auch, dass es zurzeit nur wenige öffentliche Modellstudien gibt, die einen Modell-Natur-Vergleich beinhalten und eine Beurteilung der Modellfähigkeiten auch über das jeweils dargelegte Untersuchungsgebiet zulassen (COOPER et al., 2004; RUESSINK et al., 2006; SOUTHERLAND et al., 2004).

Eine genaue Beurteilung ist aus den genannten Gründen daher nur bedingt möglich.

Aus der Abschätzung der Modelleignung für eine mögliche Verwendung im Bereich der Westküste Sylts über Modellbeschreibungen, wissenschaftliche Artikel, Forschungsberichte und, sofern vorhanden, über Kalibrierungs- und Validierungsberichte resultiert die Tabelle 1. Als Beurteilungskriterien zählen neben der Qualität der Modellergebnisse zu Naturdaten, die für den Bereich der Westküste Sylts relevanten implementierten physikalischen Prozesse (siehe Kap. 4), die Möglichkeiten der Simulation von Baumaßnahmen insbesondere mit externen Sandquellen (Sandaufspülung) sowie bereits ausgewiesene Natureinsätze der Modelle.

Die Beurteilung einiger Modelle wie bspw. Asmita, Estmorf, GENESIS, NEWDUNE oder SBEACH ist aufgrund verfügbarer ausführlicher Modellbeschreibungen oder Validierungsberichten und der darin erwähnten Modelleinschränkungen eindeutig (STEETZEL et al., 1998; EUROSION, 2004; HANSON u. KRAUS, 1989; CEM-PART III, 2002; DETTE et al., 1994; LARSON u. KRAUS, 1990; WISE et al., 1996).

Für die Vielzahl der Modelle erfolgt die Bewertung durch gewonnene Erkenntnisse aus Modellstudien und wissenschaftlichen Berichten. So auch für LITPACK und COSMOS. Für die Untersuchung der morphodynamischen Entwicklung an der Brandungsküste Sylts sind diese Modelle nicht zu empfehlen, da sie Schwächen bei der Simulation unter Berücksichtigung von Küstenschutzmaßnahmen, des Wellenbrechens und für mittelfristige Untersuchungen haben (SZMYTKIEWICZ et al., 2000; VAN RIJN et al., 2000).

Modelle wie TIMOR, UNIBEST, PONTOS und CROSMOR heben sich dagegen nach

solchen Studien positiv ab. PONTOS und TIMOR werden dabei auch bereits erfolgreich für praktische Fragestellungen an sandigen Küsten und bei Sandersatzmaßnahmen angewandt (STEETZEL et al., 1998 u. 2004; ZANKE et al., 2001 u. 2002; ZANKE, 2005). UNIBEST und CROSMOR finden dagegen in unterschiedlichen Modellstudien einzelner Forschungsprojekte, aus denen Erkenntnisse zu Modelleinschränkungen gewonnen werden konnten, Erwähnung. Aus diesen Ergebnissen empfiehlt sich ein Einsatz von CROSMOR besonders im Vorstrandbereich, wohingegen eine Simulation für den unmittelbaren Strandbereich einschließlich Düne nicht zu vertrauenswürdigen Ergebnissen führt (VAN RIJN et al., 2000). UNIBEST dagegen ermöglicht auch eine Untersuchung der Küstenprofilentwicklung unter dem Einfluss von Dünenabbrüchen (VAN RIJN et al., 2000; WALSTRA, 2002).

Zur genaueren Begründung der Beurteilung einzelner Modelle siehe LKN HUSUM (2008).

Modellübergreifend bleibt die Erkenntnis, dass die Qualität von morphodynamischen Modellen momentan noch von einem nicht ausreichenden Prozessverständnis, besonders im Bereich der welleninduzierten Küstenlängs- und Küstenquerströmungen und des welleninduzierten Sandtransportes, eingeschränkt ist. 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, das kurzfristige und langfristige morphologische Entwicklungen für klein- und großräumige Untersuchungsgebiete an sandigen Brandungsküsten naturähnlich simulieren oder gar prognostizieren kann. Es ist fraglich, ob ein solches „Universalmodell“ überhaupt umsetzbar ist, wenn unterschiedliche Prozesse für die jeweilige Veränderungen verantwortlich und nicht zwangsläufig für die Beschreibung der physikalischen Prozesse in den unterschiedlichen Skalen gleich entscheidend sind.

Ein weiterer verbesserungsbedürftiger Punkt der morphodynamischen Modellierung ist, dass die Ergebnisse stark von der Wahl des verwendeten Sedimenttransportansatzes abhängig sind und verschieden gewählte Ansätze mitunter zu großen Ergebnisbreiten führen können. Morphologische Veränderungen im Strandbereich aufgrund äolischen Sedimenttransportes können zurzeit in den Modellen ohnehin noch nicht berücksichtigt werden.

Tab. 1: Übersicht der beurteilten Modelle für den operationellen Einsatz an der Westküste Sylts (LKN HUSUM, 2008)

Modell	Einsatzgebiet	Modellklasse	Module			Verfügbarkeit	Kontakt/Hersteller	Dimension	mögl. Simulationszeitraum	Beurteilung	Prof/Kontra
			HD	W	ST						
Asmita	NL	L	(X)	-	X	-	k.A.	1D	langfristig	○	Ausschließlich für Untersuchungen in Tidebecken und Außendelta, nicht für offene Küstensysteme
Beachplan	I. UK	L	-	X	X		kommerziell	2D	langfristig	●	¹⁾
CCH2D	RC, USA	F	X	-	X	X	kommerziell	2D, Q3D	kurz- bis mittelfristig	●	Modelleinschränkung bei Wellenbrechen (Energiedissipation in Brandungszonen) und mittelfristiger Untersuchungszeiträume
COSMOS	UK	P	X	X	X	X	kommerziell	2D, Q3D	kurz- bis mittelfristig	○	Guter Modell-Natur-Vergleich eines Syll-ähnlichen Untersuchungsgebietes, bes. für den Vorstrandbereich. Berücksichtigung von Transportprozessen entlang von Riften, Wellenbrechen und Energiedissipation im Bereich von Riften und Sandbänken
CROSMOR	UK, (NL)	P	X	X	X	X	kommerziell	2D	kurz- bis mittelfristig	●	²⁾ Unzureichende Prozessbeschreibung von Wellenverformung infolge Grundberührung und des Sedimenttransportes in Küstenquerrichtung
Delft3D	NL, (B), D, UK	F	X	X	X	X	kommerziell	3D	mittel- und langfristig	● / ○	Ausschließlich für Untersuchungen morphologischer Entwicklung in Ästuaren und Tidebecken
Esimorf	NL	(F)	X	-	X	X	k.A.	1D	langfristig	○	¹⁾
GENESIS	LT, UK, USA, (NZ)	L	X	X	X	X	kommerziell	1D	mittel- bis langfristig	○	Keine Berücksichtigung von wechselnden Wasserständen, des Küstenquerrichtungs- und küstennaher Prozesse sowie Rifl-Rinne-Systemen
LITPACK	B, D, DK, E, I, UK, USA	L & P	X	X	X	X	kommerziell	1D	langfristig	● / ○	Modellvergleichsstudie mit versch. Dünenabbruchmodellen sowie Hauselgene Erfahrungen am LKN
MARINA	CDN, D	F	X	X	X	X	kommerziell	2D	k.A.	●	¹⁾
MIKE21	DK, D, UK, USA	F	X	X	X	X	kommerziell	2D	mittelfristig	○	Modellstudie, ungenügende Berücksichtigung von Längsströmungen infolge Wellenbrechen (Transportkapazitäten), auffallend große Ergebnisschwankungen durch Kornbruchmesswahl
NEWDUNE	D	P	-	-	X	X	vorhanden	1D	kurzfristig	○	Keine Berücksichtigung von Rifl-Rinne-Systemen, kein Sedimenttransport seeseitig des Brechpunktes, keine Prozesse in der Wasserwechselzone und in der Brandungszone
PISCES	NL	F	X	X	X	X	kommerziell	2D	mittelfristig	●	¹⁾
PONTOS	B, NL	L	X	X	X	X	kommerziell	2D	mittel- bis langfristig	● / ●	¹⁾ großräumige und langfristige Untersuchungen zur Küstenentwicklung für sandige Küsten seien aber lt. Modellbeschreibung möglich
SBEACH	USA	P	X	X	X	X	kommerziell	1D	kurzfristig	○	Keine Ansätze für Längstransport und Sedimentaustausch, für Prozesse in der Wasserwechselzone und für den strömungsinduzierten Sedimenttransport
SedMorph	D	k.A.	-	-	X	X	k.A.	2D, 3D		○	Validierungsbericht für Ästure: keine Untersuchung von Sohlenentwicklung (Rifflin, Dünen) möglich, keine Berücksichtigung von Schwebstofftransport in der Wassersäule sowie kaum von Seegangsprozessen
TIMOR	D (Entwickler)	F	X	-	X	X	k.A.	2D, Q3D	mittel- bis langfristig	● / ●	²⁾ Ergebnisstudien unter Wind- & Seegangsergebnisse zeigen gute Nachbildung von Rinneverlagerungen
Trim	D	k.A.	X	X	X	-	k.A.	2D, 3D	k.A.	○	Validierungsbericht: Anwendungsempfehlung für tide dominante Ästuarbereiche, keine bewegliche Sohle
UNIBEST	NL, UK	L & P	X	X	X	X	kommerziell	2D	kurz- bis langfristig	● / ●	²⁾ Anwendungsstudien: Untersuchung von Küstenprofilentwicklung infolge tide- und seegangsinduzierter Strömungen möglich, Anwendungsempfehlung für Sturmflutereignisse und saisonaler Untersuchungen bei Sandersatzmaßnahmen
UnTrim	D	k.A.	X	-	X	-	k.A.	2D, 3D	k.A.	●	¹⁾
3DD Suite	NZ	(P)	X	X	X	X	kommerziell	3D	k.A.	●	¹⁾

Erklärungen

Modellklasse: Profilmmodell, KüstenLinienmodell, Flächenmodell

Module: HydroDynamik, Wellen (Seegang), SedimentTransport, MorphoDynamik

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)

Prof/Kontra: ¹⁾ Keine (öffentlichen) Validierungs- und Kalibrierungsdokumente oder Anwendungsstudien einsehbar; ²⁾ Keine (öffentlichen) Validierungs- und Kalibrierungsdokumente einsehbar

6. Datengrundlage und 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 und Validierung unabdingbar. Hydrologische, sedimentologische, meteorologische und geodätische Datensätze 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.

Für den Bereich Sylt, insbesondere der morphodynamisch aktiven Westküste, sind nicht zuletzt durch die Brisanz des Küstenrückgangs und den kontinuierlichen Küstenschutzmaßnahmen immer wieder Messungen der Belastungsgrößen und der Morphologie durchgeführt worden. Dadurch liegt für Sylt ein großes Datenvolumen vor.

Dieses Datenvolumen beinhaltet eine Vielzahl von verwertbaren Tide-Zeitreihen und Vermessungsdaten. Für Seegang, Strömung und Sedimentologie sind die Datenbestände jedoch bisweilen stark fragmentarisch, 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 aus dem bestehenden Messkonzept insgesamt daher nicht optimal.

Im Rahmen der Pilotphase wurde eine neue Richtungswellenmessboje beschafft und etwa auf Höhe des Profils 19s (Abb. 1) vor der Küste verankert. Diese 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.

Eine viel größere Einschränkung für die Kalibrierung und Validierung auf der Grundlage des Sedimenttransportes ist das bislang nicht gelöste Problem, Geschiebefrachten zu messen. Die Wahl des Geschiebeparameters kann daher ausschließlich auf Annahmen erfolgen.

Für eine zukünftige Verwendung von morphodynamischen Modellen ist es daher wünschenswert, die Datenbestände durch Messeinsätze in einem definierten Referenzgebiet an der Westküste Sylts zu optimieren. Innerhalb dieses Referenzgebietes könnte durch kontinuierliche hydrologische Messungen sowie regelmäßige 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.

7. Fazit und Ausblick

Die Pilotphase des KFKI-Projektes „MorphoSylt“ brachte die Erkenntnis, dass die Qualität von morphodynamischen Modellen durch das mangelnde physikalische Prozessverständnis einschließlich ihrer Wechselwirkungen insbesondere an sandigen Brandungsküsten noch recht eingeschränkt ist.

Die quantitative Vorhersagefähigkeit morphodynamischer Modelle ist zwar recht niedrig, qualitative Aussagen zur Abschätzung von Auswirkungen geplanter Baumaßnahmen sind aber möglich. 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 daher geeignet (GRASMEIJER, 2002).

Die Vorstellung von einem Universalmodell, welches sowohl für kurz- 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 Prozesse in den jeweiligen Skalen kaum umsetzbar.

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 ausschließlich durch eine 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 wurde eine Modellvorauswahl (Tab. 1) 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 Modellleistung gemacht werden. Außerdem können so Erfahrungswerte in der Modellanwendung gewonnen werden, die auch zu einer Optimierung des Messkonzeptes beitragen können.

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

Aus den Ergebnissen dieser Modellstudien könnte schließlich eine Modellwahl explizit für die Untersuchung der morphodynamischen Prozesse im Strand- und Vorstrandbereich für den Bereich der Westküste Sylts resultieren.

Insgesamt besteht auch weiterhin ein großer Forschungsbedarf im Hinblick auf das Prozessverständnis der küstennahen Prozesse (Welleneinwirkung auf Sedimenttransport, welleninduzierte Küstenlängs- und Querströmungen, Geschwindigkeitsfelder in der Brandungszone), auf die Beschreibung des äolischen Transportes und auf die Prozessrelevanz in den unterschiedlichen Zeitskalen.

8. D a n k s a g u n g

Die Pilotphase zur Modellierung der morphodynamischen Prozesse im Strand- und Vorstrandbereich sandiger Brandungsküsten (MorphoSylt) wurde als Projekt des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und dem Förderkennzeichen 03KIS064 über einen Zeitraum von acht Monaten gefördert.

9. S c h r i f t e n v e r z e i c h n i s

- ALW HUSUM: Fachplan Küstenschutz Sylt, Amt für Land- und Wasserwirtschaft Husum, unveröffentlicht, 1985.
- ALW HUSUM: Fachplan Küstenschutz Sylt – Fortschreibung, Amt für Land- und Wasserwirtschaft Husum, unveröffentlicht, 1997.
- CEM-PART II: CEM-Reports – Chapter 2: Longshore Sediment Transport, USACE, 2002.
- COOPER J. A. G. and PILKEY, O. H.: Perspectives – Longshore Drift: Trapped in an expected universe, *Journal of Sedimentary Research*, Vol. 74, No. 5, 599–606, 2004.
- DETTE, H. H.; NEWE J. und PETERS, P.: Untersuchungen zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt/Phase II – Bericht Nr. 778: Numerische Modellierung des Küstenabbruches an der Westküste der Insel Sylt, BMFT-Forschungsvorhaben, 1994.
- DÜCKER, H. P. und OUMERACI, H.: 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, 2006.
- EUROSION: A guide to coastal erosion management practices in Europe: lessons learned, Service contract B4-3301/2001/329175/MAR/B3, 2004.
- GRASMEIJER, B. T.: Process-based cross-shore modelling of barred beaches, Universität Utrecht, Dissertation, 2002.
- HANSON, H. and KRAUS, N. C.: GENESIS: Generalized Model for Simulation shoreline change, Report 1: Technical Reference, USACE, 1989.
- HANSON, H. and KRAUS, N. C.: GENESIS: Generalized Model for Simulation shoreline change, Report 2: Workbook and system user's manual, USACE, 1989a.
- HEYER H.; OUMERACI, H.; MALCHEREK, A.; ZANKE, U. C. E.; STROTMANN, T.; VON STORCH, H. und MILBRADT P.: Langfristige Vorhersageverfahren und Vorhersagemodelle einschließlich Einfluss auf Baumaßnahmen, *HANSA*, 144. Jahrg. Nr. 1, 66–71, 2007.
- LARSON, M. and KRAUS, N. C.: SBEACH: Numerical model for storm-induced beach change, Report 2 – Numerical formulation and model tests, USAC, 1990.
- LECHER, K.; LÜHR, H.-P. und ZANKE, U. C. E.: Taschenbuch der Wasserwirtschaft, 8. Auflage, Vieweg, 2001.
- LKN HUSUM: Modellierung der morphodynamischen Prozesse im Strand- und Vorstrandbereich sandiger Brandungsküsten, Schlussbericht, BMBF-Forschungsvorhaben (03KIS064), 2008.
- MAYERLE, R. und ZIELKE, W.: Vorhersage mittelskaliger Morphodynamik PROMORPH, *Die Küste*, 69, 2005.
- NEWE, J.: Strandprofilentwicklung unter Sturmflutseeegang – Methodik für großmaßstäbliche 2D-Experimente und Berechnungsansätze, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2004.
- PILKEY, O. H. and COOPER, J. A. G.: Longshore Transport Volumes: A critical view, *Journal of Coastal Research*, Special Issue 36, 572–580, 2002.
- RUSSINK, B. G.; KURIYAMA, Y.; RENIERS, A. J. H. M.; ROELVINK, J. A. and WALSTRA, D. J. R.: Modeling cross-shore sandbar behaviour on the time scale of weeks, *Journal of Geophysical Research*, 2006.
- STEEETZEL, H. J.; DE VREONG, H.; VAN RIJN, L. C. and STAM, J.-M.: Morphological modelling using a modified multi-layer approach, *Coastal Engineering Proceedings*, 26. CEC, Vol. 2, 2368–2381, 1998.
- STEEETZEL, H. J. and WANG, Z. B.: A longterm morphological model for the whole Dutch Coast – Part I: model formulation, WL|Delft Hydraulics & Alkyon, Z3334/A1000, unveröffentlicht, 2004.
- STEEETZEL, H. J. and WANG, Z. B.: A longterm morphological model for the whole Dutch Coast – Part II: Application of the model, WL|Delft Hydraulics & Alkyon, Z3334/A1000, unveröffentlicht, 2004.
- SUTHERLAND, J.; PEET, A. H. and SOULSBY, R. L.: Evaluating the performance of morphological models, *Coastal Engineering* 51, 917–939, 2004.
- SZMYTKIEWICZ, M.; BIEGOWSKI, J.; KACZMAREK, L. M.; OKRÓJ, T.; OSTROWSKI, R.; PRUSZAK, Z.; RÓZYSKY, G. and SKAJA, M.: Coastline changes nearby harbour structures: comparative analysis of one-line models versus field data, *Coastal Engineering* 40, 119–139, 2000.

- VAN RIJN, L. C.; RUESSINK, B. G. and MULDER, J. P. M. et al.: COAST3D-EGMOND, The behaviour of a straight sandy coast on the time scale of storms and seasons; Process knowledge and guide lines for coastal management, Abschlussbericht, Aqua Publications, 2000.
- VAN RIJN, L. C.; WALSTRA, D. J. R.; GRASMEIJER, B.; SUTHERLAND, J.; PAN, S. and SIERRA, J. P.: 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, 295–327, 2003.
- VAN RIJN, L. C. et al.: Sandpit: Sand transport and morphology of offshore sand mining pits – Part II: Detailed scientific and practical results, Aqua publications, 2005.
- WALSTRA, D. J. R.: Unibest-TC – Userguide, WL|Delft Hydraulics, Z2897, 2002.
- WISE, R. A.; SMITH, S. J. and LARSON, M.: SBEACH: Numerical model for storm-induced beach change, Report 4 Crossshore transport under random waves and model validation with SUPERTANK and field data, USACE, 1996.
- ZANKE, U. und WITTING, M.: Entwicklungsprognose Südhiddensee – Simulationen zur Problematik eines möglichen Durchbruchs, Präsentationsfolien, 2001.
- ZANKE, U. C. E. and MEWIS, P.: Morphodynamisches Simulationssystem TIMOR, Wasser & Boden 54/4, pp 14–22, 2002.
- ZANKE, U. C. E.: Langfristige Küstenveränderungen im Fachplangebiet Fischland unter dem Gesichtspunkt zusätzlicher Einbauten in See, Gutachtliche Stellungnahme, unveröffentlicht, 2005.