

Überlegungen zur Anlage von Sportboothäfen an sandigen Brandungsküsten*

Von SÖREN KOHLHASE

Z u s a m m e n f a s s u n g

Häfen an einer sandigen Brandungsküste bedeuten immer eine Störung eines sensiblen morphologischen Zustandes, der durch ein komplexes Wechselspiel zwischen äußeren hydrodynamischen Kräften aus Seegang, Wasserständen und Strömungen und dem Sediment in und im Umfeld einer Marina charakterisiert ist. Einflüsse von Bauwerken in See und – wegen ihrer Abmessungen – insbesondere von Wellenschutzbauwerken einer Marina auf die Morphologie können schwerwiegende Folgen haben, die sich oft über viele Kilometer erstrecken.

Da die negativen Einflüsse einer Marina auf die küstennahe Sedimentbewegung prinzipiell nicht gänzlich vermieden werden können, kommt es für den Planer darauf an, nach Ausgleichsmaßnahmen zu suchen, um z.B. die Erosion in an die Marina angrenzenden Küstenbereichen in tolerierbaren Grenzen zu halten.

Es wird ein Ansatz zur Diskussion gestellt, der nur einen geringen Einfluss auf die Sedimentdynamik einer Brandungsküste erwarten lässt, da die Bereiche, in denen die küstennahen Transporte von Material stattfinden, praktisch nicht berührt werden, indem der Hafen binnenseitig angelegt wird und der Übergang von der See an die Liegestelle des Sportboots schwebend erfolgt.

Eine Marina – wie vom Verfasser vorgeschlagen – soll einen konventionellen Sportboothafen keinesfalls ersetzen, zumal der Vorschlag durchaus auch Nachteile hat.

Der Lösungsvorschlag ist vielmehr als eine technische Variante für diejenigen Lokationen zu verstehen, in denen ein Hafen in üblicher Weise wegen zu erwartender Einflüsse auf das Umfeld und/oder Gefährdung vorhandener Anlagen bzw. wertvoller Bebauung nicht genehmigt werden kann.

S u m m a r y

From the basics of the sediment budget of a sandy beach it can be generally concluded that interferences between the structures of a marina and the longshore sediment transport will affect the neighbouring beaches. Since downdrift erosion can usually not be tolerated, measures to control and balance such erosion must be carefully investigated.

Existing techniques to deal with downdrift erosion problems are briefly illustrated in this paper. In order to minimize or even avoid downdrift erosion caused by a newly-built marina a new technique based on common elements of harbour and marina engineering is introduced.

* Dieser Beitrag ist eine erweiterte Fassung eines Vortrags, den der Verfasser anlässlich des „Second Sino-German Joint Symposium on Coastal and Ocean Engineering, Oct 11–20, 2004“ an der Hohai University in Nanjing, China gehalten hat.

I n h a l t

1. Einleitung	220
2. Einflüsse einer Marina auf die Sedimentdynamik und Techniken zur Minderung der Lee-Erosion.	221
2.1 Sedimenthaushalt	221
2.2 Sand-Bypassing.	225
2.3 Verflüssigung des Sediments	227
2.4 Anmerkungen zu offshore angeordneten Häfen.	229
3. Konzeptionelle Überlegungen zur Anlage einer Marina an Außenküsten mit minimiertem Einfluss auf die Küstendynamik	231
3.1 Grundüberlegungen	231
3.2 Komponenten einer möglichen Alternativlösung und technischer Varianten	232
3.3 Beispielhafte Darstellung eines schwebenden Sportbootübergangs	235
3.3.1 Planungsgrundlagen und hydrografische Bedingungen des Seegebiets	235
3.3.2 Brückenlösung.	238
4. Schriftenverzeichnis.	239

1. Einleitung

Aufgrund der ozeanographischen Bedingungen, insbesondere Welleneinwirkungen und Strömungen, benötigt eine Marina an einer Außenküste für ein sicheres Anlaufen und Liegen der in der Freizeitschiffahrt eingesetzten Boote im Allgemeinen aufwändige Schutzwerke in Form von Molen oder Wellenbrechern. Der Tiefgang der Boote erfordert im Regelfall Baggermaßnahmen für die Herstellung und Unterhaltung des Hafens sowie der Zu- und Einfahrt.

Um die Welleneinwirkung im Einfahrtsbereich und an den Liegeplätzen zu begrenzen, müssen die Schutzwerke in ihrer Anordnung und Konstruktion optimiert werden.

Bauwerke für den Wellenschutz nehmen in der Gesamtinvestition eines Hafens einen großen Anteil ein. Ein schwieriges Problem in funktioneller Hinsicht stellt der Einfluss der Bauwerke auf die natürliche Sedimentbewegung an einer sandigen Brandungsküste dar. Negative Einflüsse auf die Sedimentdynamik, speziell ein Rückgang der Küstenlinie und/oder vorhandener Dünen durch Lee-Erosion können im Normalfall aus Gründen des Umweltschutzes oder wegen vorhandener Einrichtungen (Straßen, Gebäude etc.) nicht hingenommen werden. Die Lee-Erosion muss also auf ein Minimum begrenzt werden. Andererseits ist ein Einfluss von Bauwerken auf die Sedimentbewegung vom Grundsatz her nicht gänzlich zu vermeiden.

Negative Sedimentbilanzen im Lee-Bereich eines Hafens können lediglich durch Ersatz des durch Seegang und Strömungen verloren gegangenen Strandmaterials ausgeglichen werden. Durch Sand-Bypassing und andere Techniken wird versucht, den Einfluss einer Marina auf die Sedimentdynamik zu minimieren, doch ist die Problematik von grundsätzlicher Art. In Deutschland müssen – wie die Praxis zeigt – die Wünsche von Städten und Gemeinden nach attraktiven neuen Sportbootanlagen an einer Außenküste durch die Genehmigungsbehörden zunehmend negativ beschieden werden.

In diesem Beitrag werden einige Grundsätze dargestellt, die bei einer Planungsaufgabe für eine Marina an einer Brandungsküste im Hinblick auf die Problematik „Einflüsse auf die Sedimentdynamik“ beachtet werden müssen, und es werden sich daraus ergebende Grenzen technischer Möglichkeiten dargestellt. Schließlich und hierauf aufbauend wird ein vom Verfasser entwickelter Ansatz vorgestellt und zur Diskussion gestellt, der das Ziel verfolgt, den in herkömmlichen Lösungen unvermeidbaren Einfluss einer Marina auf das Regime einer sandigen Brandungsküste zu vermeiden.

2. Einflüsse einer Marina auf die Sedimentdynamik und Techniken zur Minderung der Lee-Erosion

2.1 Sedimenthaushalt

Einflüsse einer Marina an einer Brandungsküste wurden einleitend bereits angesprochen. Abb. 1 und 2 zeigen Luftaufnahmen vom Strandabschnitt des Sportboothafens in Kühlungsborn, einer der vielen Marinas an der mecklenburg-vorpommerschen Ostseeküste, die in den letzten Jahren gebaut wurden. Abb. 2 wurde im Juli 2003 aufgenommen. Der Hafen ist also noch nicht sehr alt und die Infrastrukturmaßnahmen wurden noch nicht einmal fertiggestellt.



Abb. 1: Strandsituation 2000, vor Sportboothafenbaumaßnahme Kühlungsborn (Landesvermessungsamt MV)



Abb. 2: Situation 2003, Sportboothafen Kühlungsborn (KLONOWSKI, Ostseezeitung)

Wenn man das Foto betrachtet, so fallen die Ablagerungen von Sedimenten am westlichen Wellenbrecher auf. Am östlichen Wellenbrecher ist die Küste zurückgewichen. Die Akkumulation von Sand im Luv-Bereich und die Erosion in Lee sind typisch für alle Einbauten in das Meer, die die natürliche Sedimentbewegung beeinflussen oder – im Extremfall – unterbrechen. Die Bezeichnungen Luv und Lee beziehen sich auf die Richtung der dominierenden Strömungen. Sie sind im Falle Kühlungsborn von West nach Ost gerichtet.

Strömungen resultieren im Wesentlichen aus der Wirkung küstennaher Wellen. Sie sind die treibende Kraft für den Transport von Sand. Dieser findet vornehmlich im Bereich brechender Wellen statt.

Man kann aus dem Foto noch weitere Details erkennen. So wurde die seeseitige Flanke des Wellenbrechers mit einem Sporn versehen, um den Retentionsraum für zu erwartende Ablagerungen von Sand zu vergrößern mit dem Ziel, Ablagerungen in der Hafeneinfahrt, mit denen nach Erreichen eines neuen morphologischen Gleichgewichtszustands gerechnet werden muss, möglichst zeitlich zu verzögern.

Unterhaltungsbaggerungen in der Zufahrt und Einfahrt und ggf. auch im Hafen verursachen erhebliche Kosten. Aus der Praxis des Hafenbaus sind dem Autor Fälle bekannt, in denen die Hafenbecken bereits nach wenigen Jahren vollständig versandet waren und sogar ein Neubau des Hafens erforderlich wurde.

Die spezielle Geometrie der Hafeneinfahrt wurde primär unter dem Blickwinkel des Wellenschutzes gewählt.

Zum Verständnis der morphologischen Veränderungen von sandigen Brandungsküsten und der Wechselwirkungen zwischen Bauwerken und dem Strand ist es zweckmäßig, Transporte in Küstenlängsrichtung und quer dazu vereinfachend getrennt voneinander zu betrachten, obwohl Seegang und Strömungen in der Natur nur überlagert auftreten (vgl. hierzu KOHLHASE, 1991a).

Die formale Trennung in Küstenlängstransport und Quertransport (Abb. 3) erlaubt, unabhängig vom Berechnungsansatz, folgende Aussagen, die für die Interpretation von bauwerksbedingten Einflüssen auf die Sedimentdynamik wichtig sind:

- Eine statistische Analyse zur Berücksichtigung der jährlichen und jahreszeitlichen Veränderlichkeit der Wellen (Höhe, Richtung, Periode) zeigt, dass die größten Anteile am Längstransport aus mittleren Ereignissen resultieren, ein Umstand, der häufig nicht beachtet wird. Mittlere Ereignisse tragen zwar als Einzelereignis nicht signifikant zum jährlichen Sedimenttransport bei, haben aber eine große Eintrittshäufigkeit und liefern dadurch resultierend den größten Beitrag.
- Die Größe des Längstransports sagt nichts aus über zu erwartende Küstenveränderungen, wenn nicht die örtliche Veränderlichkeit, d.h. der Gradient der Transporte in Strömungsrichtung in die Bewertung einbezogen wird.
- eine Küste kann morphologisch trotz hoher Längstransporte stabil sein. Umso gefährlicher sind dann Störungen des natürlichen Gleichgewichtszustands durch Bauwerke.
- Küstenveränderungen sind nur durch Einbeziehung des Quertransports verständlich und quantifizierbar, ein Umstand, der bei Kartenvergleichen aus Vermessungen häufig übersehen wird (vgl. auch KOHLHASE, 1991b).
- Bei negativem Gradienten des Längstransports sind Ablagerungen des transportierten Sandes, bei positivem Gradienten ist entsprechend Erosion (Küstenrückgang) zu erwarten, damit die Transportbilanz in einem betrachteten Kontrollraum ausgeglichen ist.
- Die Transportbilanz wird durch den Einfluss des Quertransports hergestellt, eine negative Bilanz durch Ufererosion im entsprechenden Abschnitt oder durch Erosion der Dünen.

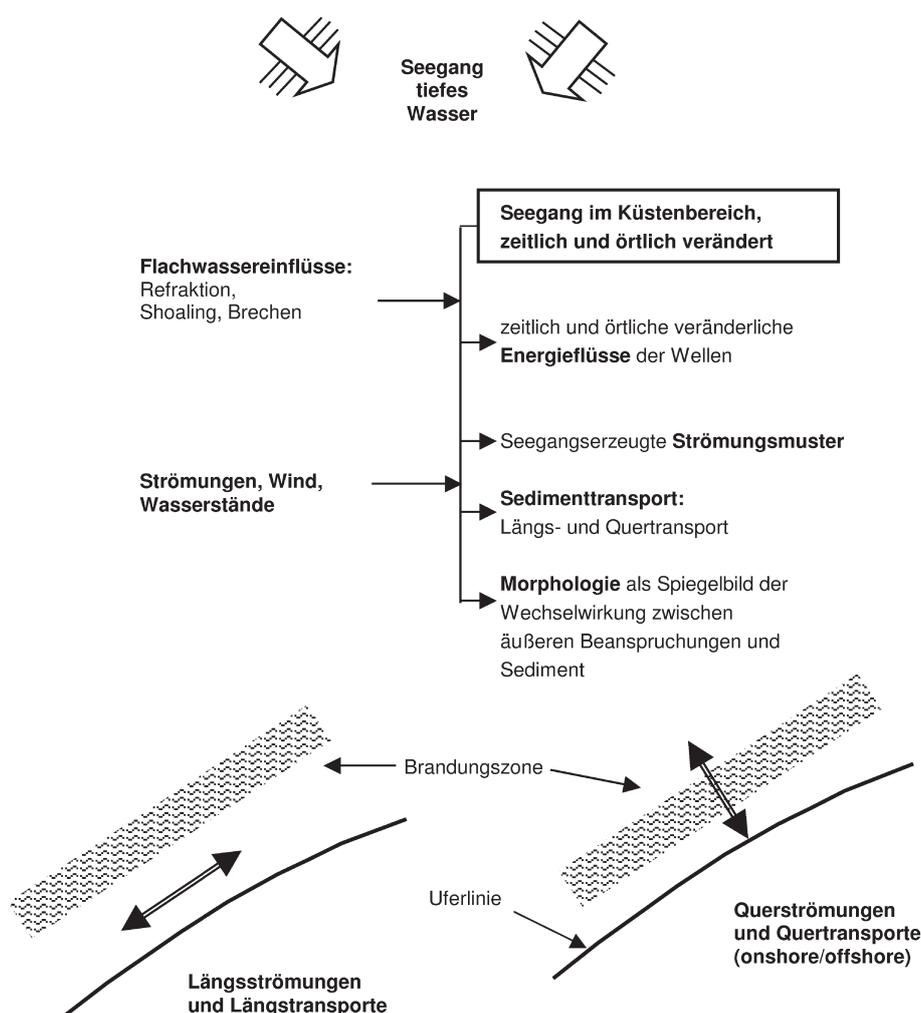


Abb. 3: Zur Methodik von Sedimenttransportuntersuchungen – Längs- und Quertransport und hydrodynamische Einflüsse –, schematisch (nach KOHLHASE, 1991a)

- Quertransport allein führt lediglich zu Profilveränderungen, indem die Küste versucht, sich ständig veränderlichen äußeren Beanspruchungen (Seegang, Wasserstände) anzupassen. Generell verbleibt der Sand im Profil und kann nur durch die Wirkung von Längsströmungen dem System verlorengelangen.
- Besonders augenfällig sind Küstenveränderungen bei extremen Belastungen, z.B. Sturmfluten mit oft spektakulären Küstenabbrüchen. Küstenveränderungen können – in Verbindung mit Längsströmungen – irreversibel sein, sind aber häufig reversibel, weil erfahrungsgemäß der Einfluss von Längsströmungen unter extremen Bedingungen recht gering ist. Letztes betrifft besonders so genannte „geschlossene Systeme“, da ein Austritt von Sedimenten aus dem betrachteten Küstenabschnitt per Definition ausgeschlossen ist.

Generell ist eine sandige Brandungsküste bestrebt, sich den äußeren Beanspruchungen durch Erosion, Sedimentation oder Veränderungen des Profils anzupassen und einen „dynamischen Gleichgewichtszustand“ herzustellen; dynamisch deswegen, weil die äußeren Einflüsse auf die Küstendynamik, wie der Name sagt, dynamischer Natur sind und Gleichgewichtszustände im eigentlichen Sinne nicht existieren.

Wird durch Bauwerke, gleich welcher Art, in diesen dynamischen Prozess eingegriffen, so wird die Küste zwangsläufig reagieren, indem – bezogen auf die Schutzbauwerke eines Hafens – im Luv-Bereich Sedimentation und in Lee entsprechend Erosion entsteht.

Die Wirkung von Bauwerken auf die Küstendynamik ist in Abb. 4 schematisch für konventionelle Bauwerke des Küstenwasserbaus dargestellt.

Im Küstenschutz wird häufig in passiven Küstenschutz und in aktiven Küstenschutz unterschieden, passiver Schutz, weil durch starre Bauwerke nur lokal Einfluss auf die Feststoffbewegung genommen wird, anders als bei aktiven (weichen) Maßnahmen, die durch Ersatz des verlorengegangenen Materials unmittelbar in den Sedimenthaushalt eingreifen (hierzu KOHLHASE, 2004).

Die Wirkung von Bauwerken ist – wie leicht einleuchtet – bei Hafentmolten oder Wellenbrechern am größten, weil Wellenbrecher aus navigatorischen Gründen bzw. zur Gewährleistung der Schiffsicherheit in größere Wassertiefen reichen müssen und somit der Längstransport weitestgehend unterbrochen ist (hierzu FRÖHLE et al., 2002).

Der Einfluss der Lee-Erosion kann sich über viele Kilometer erstrecken, wie die Erfahrung zeigt.

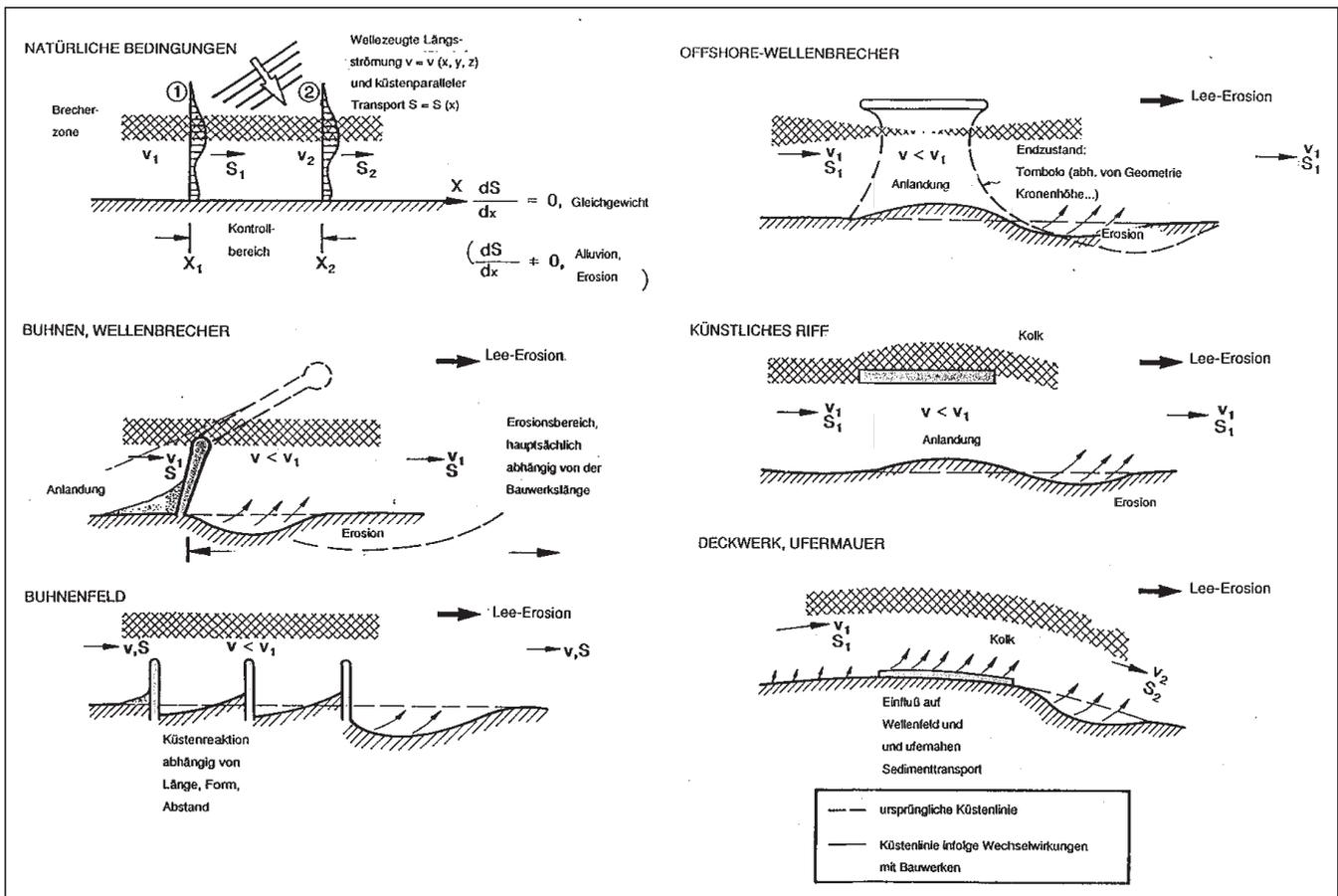


Abb. 4: Einfluss von Bauwerken auf die Küstendynamik, schematisch (nach KOHLHASE, 1991)

2.2 Sand-Bypassing

Im Sinne der Terminologie „aktiver und passiver Küstenschutz“ bei Sicherungstechniken zum Schutz sandiger Brandungsküsten sind Sand-Bypassing-Anlagen an Hafeneinfahrten den aktiven Schutzmaßnahmen zuzurechnen. Der im Luv-Bereich einer Hafeneinfahrt oder eines Wellenbrechers abgelagerte Sand wird hier aufgenommen und in den leeseitigen Erosionsbereich gefördert, so dass das Defizit in der Bilanz des Küstenlängstransports ausgeglichen wird.

Im Schrifttum findet man zu dieser Technik viele Hinweise, aber wenig konkrete Angaben und Zahlen.

Generell gibt es für den Bypass von Sedimenten über die Störstelle Hafen hinweg folgende Möglichkeiten:

- a) Landseitiger Transport:
Einsatz konventioneller Erdbaugeräte für die Aufnahme des Sandes aus dem Anlandungsbereich und den Transport in den Erosionsbereich.
- b) Seeseitiger Transport:
Transport auf See über die Hafeneinfahrt hinweg mit Schuten oder Barges. Beladungs- und Entladungsvorgänge mit Erdbaugeräten. Hydraulische Förderung über See ist generell ebenfalls möglich.
- c) Hydraulischer Feststofftransport in einer Rohrleitung. Aufnahme des Sandes aus dem Akkumulationsbereich durch mobile oder stationäre Pumpenanlagen und Förderung des Sandes in den Erosionsbereich als Sand-Wasser-Gemisch in einer stationären oder mobilen Rohrleitung.

Für den Yachthafen Kühlungsborn (vgl. Abb. 2) wurde wegen der zu erwartenden Störungen des morphologischen Gleichgewichts durch die Bauwerke des Hafens konzeptionell eine stationäre Rohrleitung in der landseitigen Böschung der Hafenbecken vorgesehen. Der Transport über See erwies sich allerdings als kostengünstiger, als nach einer recht kurzen Zeit von nur etwa 2 Jahren nach der Fertigstellung der Wellenbrecher erstmals ein Ausgleich des Materialdefizits im Lee-Bereich des Hafens erforderlich wurde. Nach Aussagen des Planers wurden ca. 20.000 m³ Sand per Schiff verfrachtet. Die Verlandungen in Luv und entsprechend die Erosion in Lee seien um ein Vielfaches größer gewesen, als nach Voruntersuchungen durch ein Hochschulinstitut angenommen werden konnte.

Anzumerken ist, dass das Foto (Abb. 2) nach dieser ersten Ausgleichsmaßnahme aufgenommen wurde. Gleichwohl ist die Lee-Erosion deutlich erkennbar. Die Methode c), also Bypassing im eigentlichen Sinne, kam also noch nicht zum Einsatz. Zum Beispiel Kühlungsborn ist anzumerken, dass besondere Vorkehrungen für die Aufnahme des abgelagerten Sandes, etwa durch eine mobile Pumpenstation, bislang nicht getroffen wurden.

Eine im Rahmen einer Seminararbeit am Institut für Wasserbau der Universität Rostock durchgeführte Internetrecherche (KÜHL, 2004) zeigt eine deutliche Häufung derzeit in Betrieb befindlicher Anlagen im US-amerikanischen Raum und an der Südküste Australiens.

Das im Jahr 2001 fertiggestellte Sand-Bypassing-System an der Mündung des Tweed River ist ein Beispiel für die erfolgreiche Anwendung dieser Technik (Abb. 5).



5a) Tweed River Australien, Situationsplan



5b) Anordnung der Strahlpumpe an einer Brückenkonstruktion oder über einem Sandfang (Internet)

Abb. 5: Beispiel für eine Sand-Bypassing-Einrichtung (aus KÜHL, 2004)

Der Tweed River bildet in seinem Mündungsbereich die Grenze zwischen den australischen Provinzen Queensland und New South Wales. Er mündet südlich der berühmten Strände der Goldküste in den Südpazifik (Abb. 5a).

Das Tweed-River-Projekt ist ein Gemeinschaftsprojekt der Regierung von New South Wales und der Gemeinden von Gold Coast City und Tweed Shire (KÜHL, 2004).

Durch die Sand-Bypassing-Anlage werden im Wesentlichen zwei Ziele verfolgt:

- die Herstellung einer gefahrlosen Schiffspassage im Mündungsbereich des Tweed River
- die Wiederherstellung der touristisch wertvollen Strände an der Goldküste und der Ausgleich von jährlichen Strandrückgängen.

Mit der Verlängerung der die Einfahrt zum Tweed River begrenzenden Wellenbrecher in den 60er Jahren hatte sich im Laufe der Zeit eine flache Sandbank vor der Einfahrt gebildet, die nur unter Gefahren von ein- und auslaufenden Schiffen passiert werden konnte. Der natürliche Sedimenttransport in Richtung auf die Strände der Goldküste war unterbrochen. Eine Rehabilitation allein mit passiven Küstenschutzmethoden war nicht erfolgreich.

Das System wurde als stationäre Anlage konzipiert. Der Sand wird auf einer Strecke von 450 m etwa 250 m südlich des südlichen Wellenbrechers in einem Sandfang aufgefangen. Über dem Sandfang, der dauerhaft auf Tiefe gehalten wird, sind durch eine Brückenkonstruktion insgesamt 11 Wasserstrahlpumpen angeordnet (Abb. 5b), von denen jeweils 5 gleichzeitig eingesetzt werden. Die Pumpen fördern den eingetriebenen Sand als Sand-Wasser-Gemisch zunächst in eine Sandgrube am Ufer. Von hier wird der Sand durch ein stationäres Rohrleitungssystem unter dem Tweed River hindurch geführt und zu den verschiedenen Ausläufen an den Stränden von Queensland bzw. New South Wales gepumpt. Technische Daten der Anlage, jedoch keine Kostenangaben, sind im Internet zu finden.

2.3 Verflüssigung des Sediments

Eine weitere Technik, die sowohl zum Ausgleich von Defiziten im Lee-Bereich eines Hafens als auch zum Freihalten der Hafeneinfahrt genutzt werden kann, ist die Bodenverflüssigung.

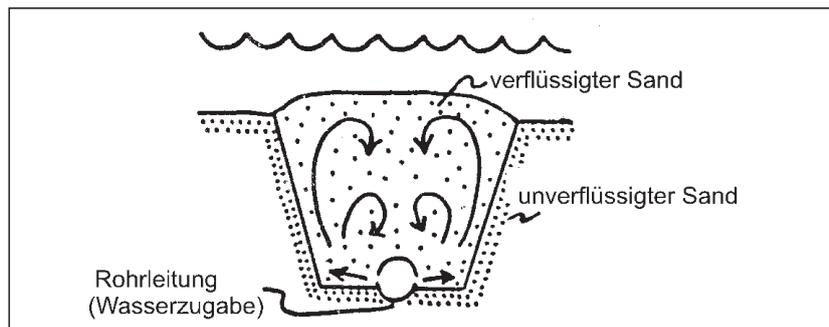
Anwendungen des Prinzips wurden von PARKS im Jahre 1991 auf der COPEDEC in Mombasa/Kenia vorgestellt. Der Autor setzt sich auch kritisch mit der Anlage von Marinas an sandigen Brandungsküsten und speziell mit der Verlandung von Hafeneinfahrten auseinander.

Der physikalische Vorgang der Bodenverflüssigung und dessen Nutzung für den Transport von Feststoffen ist recht alt. Bereits im Jahre 1893 wurde (PARKS, 1991) ein Patent an einen australischen Erfinder erteilt.

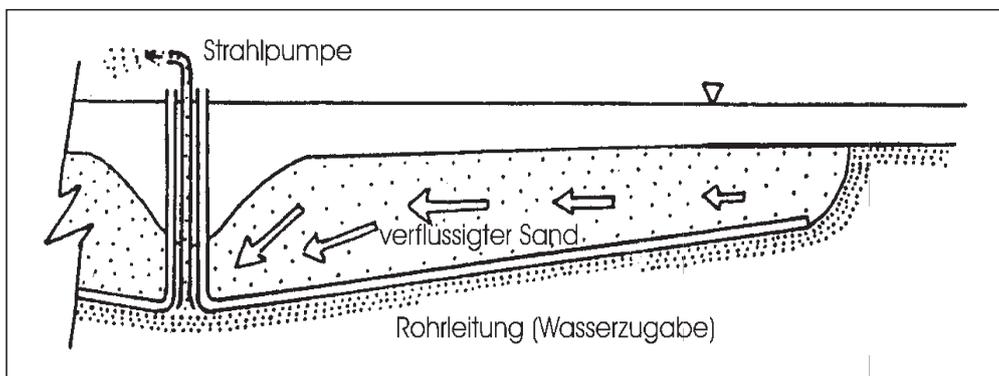
Bodenverflüssigung kann im Kontext dieses Beitrags durch die Zugabe von Wasser in ein perforiertes in den Boden eingegrabenes Rohr (Abb. 6) genutzt werden.

Der Wasseraustritt (Klarwasser) aus dem Rohr erzeugt ein in Abb. 6a schematisch dargestelltes Strömungsmuster, das den Sand verflüssigt und in Schwebelag hält. Nach Angaben von PARKS kann das Prinzip in der Weise genutzt werden, dass das Rohr mit geringem Gefälle in einem Graben verlegt wird (Abb. 6b). Das Gefälle sorgt dafür, dass das Gemisch, wenn sich die Bodenteilchen im Schwebelag befinden, dem Saugrohr einer Pumpe zufließen und durch diese dann vergleichsweise einfach gefördert werden kann.

Es sei möglich, nach dem Prinzip Grabenlängen von etwa 200 m mit einer einzigen Pumpe zu betreiben, wenn der Transport durch Seegang und Strömungen besonders groß



6a) Bodenverflüssigung in der Umgebung eines in einem Graben verlegten perforierten Rohres bei Wasserzutritt



6b) Nutzung des Prinzips der Bodenverflüssigung zur Freihaltung einer Hafeneinfahrt, schematisch

Abb. 6: Prinzip der Bodenverflüssigkeit (PARKS, 1991)

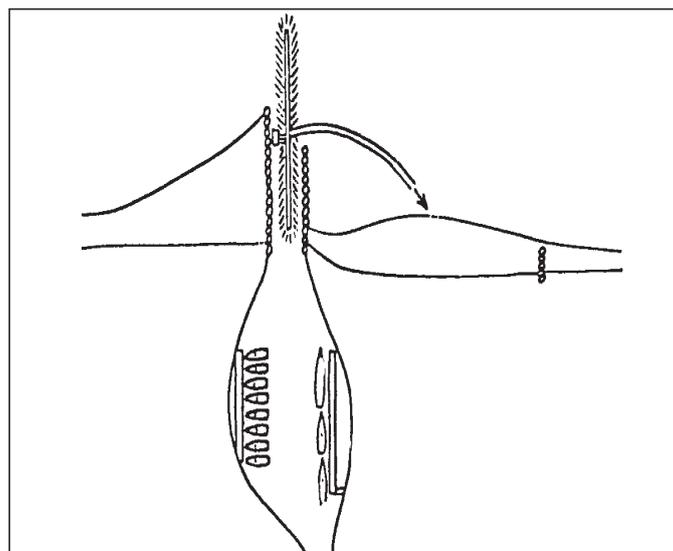


Abb. 7: Anwendungsbeispiel der 1991 projektierten Anlage Flag Harbor Yacht Haven Channel (PARKS, 1991)

sei. Im Vergleich zu herkömmlichen Unterhaltungsbaggerungen einer Hafeneinfahrt sei das Verfahren erheblich preisgünstiger.

Abb. 7 zeigt ein Anwendungsbeispiel für einen Yachthafen. Ob das Projekt realisiert wurde, ist dem Verfasser nicht bekannt.

Das Verfahren der Bodenverflüssigung selbst ist recht einfach. Es wird im Tidewasserbau als Wasser-Injektionsverfahren als besondere Technik zur Fahrrinnenvertiefung und -unterhaltung schon seit langer Zeit praktiziert, in Deutschland vor allem auch deswegen, weil die Verwendung der Schlickegge aus ökologischen Gründen heute nicht mehr zulässig ist.

Eine Sand-Bypassing-Anlage, die das Prinzip der Bodenverflüssigung nutzt, sollte nach Sicht des Autors als eine interessante Alternative zu den vorher genannten Bypassing-Verfahren angesehen werden und könnte dazu beitragen, das Problem der Lee-Erosion bei der Anlage von Marinas an Brandungsküsten zu entschärfen. Wichtig wäre es, Informationen über praktische Anwendungen zu sammeln und Erfahrungen auch unter Einschluss wirtschaftlicher Gesichtspunkte auszuwerten.

2.4 Anmerkungen zu offshore angeordneten Häfen

Wegen der in den vorigen Abschnitten angesprochenen Problematik wurde verschiedentlich erwogen, den Sportboothafen vor der Küste, also offshore anzuordnen trotz zusätzlicher Kosten, die z. B. durch eine Zuwegung (Brücke) und weitere Nachteile im Vergleich zu einer landseitigen Anbindung entstehen.

Lösungen wurden in Mecklenburg-Vorpommern beispielsweise für die Lokationen Göhren/Rügen, Prerow/Darß und Zinnowitz/Insel Usedom erwogen.

Generell wird bei einem offshore angeordneten Hafen das Problem der Lee-Erosion abgeschwächt, auch hat ein Hafen in tieferem Wasser Vorteile durch geringere Aufwendungen für die Nassbaggerarbeiten bei der Erstellung und möglicherweise auch bei der Unterhaltung.

Grundsätzlich lässt sich aber, wie aus den Überlegungen in Abschnitt 2.1 hervorgeht, die Lee-Erosion nicht vollständig vermeiden. Abb. 4 zeigt, dass sich im Schatten eines Offshorebauwerks ein Salient oder – in letzter Konsequenz – ein Tombolo bilden wird. Das im Tombolo (tombolo von lat. tumulus = Haufen) festgehaltene Material fehlt aus Gründen des Materialhaushalts natürlich in Lee.

Die zu erwartenden Lee-Effekte werden bei vorgegebenen Bedingungen vor allem durch die Abmessung des Hafens und seine Entfernung zum Ufer bestimmt.

Im Einzelfall können offshore angeordnete Häfen unter dem Blickwinkel der Sedimentdynamik – ähnlich wie uferferne Wellenbrecher im Küstenschutz – immer eine überlegenswerte Alternative darstellen, wie das Beispiel Abb. 8 verdeutlicht.

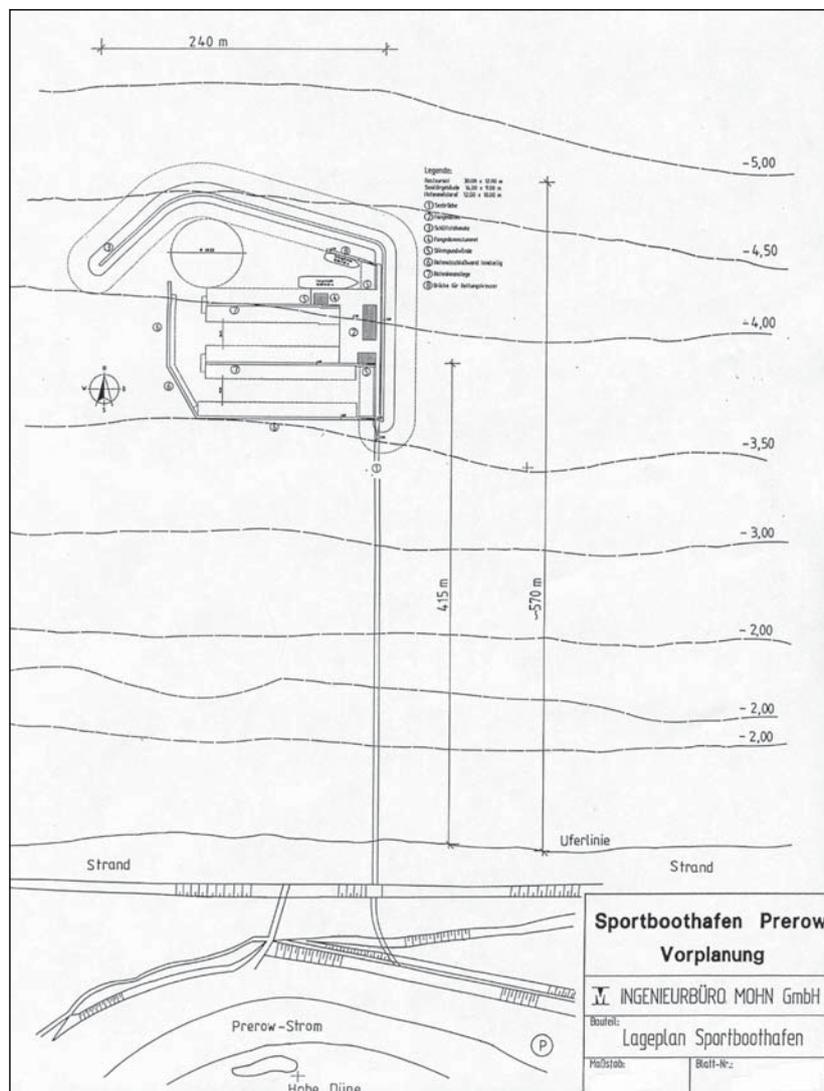
Der Küstenabschnitt im Naturschutzgebiet des Darß ist morphologisch außerordentlich sensibel. Ein Ausbau des Nothafens Darßer Ort (Abb. 8a) für die Freizeitschiffahrt kommt auch wegen der jährlichen Unterhaltungsaufwendungen nicht in Betracht, so dass verschiedene Varianten für die Marina im Bereich der Ortslage Prerow untersucht wurden. Einen Vorschlag für einen Offshore-Hafen bei Prerow zeigt Abb. 8c.



8a) Luftaufnahme Nothafen Darßer Ort



8b) Lageplan, Darß/Zingst



8c) Vorplanung für einen Offshore-Sportboothafen

Abb. 8: Zur Planung eines Offshorehafens bei Prerow/Darß

3. Konzeptionelle Überlegungen zur Anlage einer Marina an Außenküsten mit minimiertem Einfluss auf die Küstendynamik

3.1 Grundüberlegungen

Einführend und unter Abschnitt 2 wurde dargestellt, dass die Anlage einer Marina an einer Außenküste, sofern sie – welches der Regelfall ist – für den Schutz und den Komfort der Sportboote durch Bauwerke geschützt werden muss, zwangsläufig einen i.a. als negativ einzustufenden Einfluss auf die Küstendynamik nach sich zieht. Küstenerosion kann meistens nicht hingegenommen werden, zumindest aber werden Ausgleichsmaßnahmen – etwa aus Gründen des Küstenschutzes – erforderlich. Die Problematik ist von grundsätzlicher Art, denn generell führen Einbauten in See zu Störungen des morphologischen Zustands. Hierbei kann die Akkumulation von Sand für den Küstenschutz, z.B. in einem Buhnsystem oder hinter einem Offshore-Wellenbrecher, gewünscht sein. Im Hafenaufbau aber führt sie meist zu Problemen, wenn der durch die Wellenschutzbauwerke gebildete Retentionsraum für die Akkumulation von Sedimenten erschöpft ist, sich der Sand in der Einfahrt zum Hafen und im Hafen selbst ablagert oder wenn eine Gefährdung von Strand oder Gebäuden infolge von Erosion nicht mehr toleriert werden kann. Dann können für den Hafen hohe Kosten entstehen, für deren Begleichung nach dem Verursacherprinzip (eigentlich) der Investor oder der Hafenaufbauer zuständig ist. Die Genehmigungsbehörden verlangen aus diesem Grund zunehmend eindeutige Zusagen zur Finanzierung von ggf. erforderlichen Folgemaßnahmen.

Die im Folgenden dargestellten Varianten eines Marinaentwurfs gehen von der Zielvorstellung aus, dass Einflüsse von Bauwerken auf die Sedimentbewegung weitestgehend vermieden werden müssen. Die Überlegungen sind weiterhin durch einige Besonderheiten der mecklenburg-vorpommerschen Ostseeküste mitgeprägt. Hier finden wir immer wieder große Wasserflächen (Bodden) im Hinterland, die häufig nur durch eine schmale Landenge von der See getrennt sind. Der Wunsch so mancher Gemeinde, die Bodden durch einen Durchstich mit der Ostsee zu verbinden, liegt daher auf der Hand. So wurden beispielsweise etliche Studien zur Schaffung eines Durchstichs bei Wustrow, Halbinsel Fischland erstellt, aber immer wieder verworfen. Ein Vorschlag eines Erfinders sieht für die Überwindung der Landenge den Transport auf einem Wagen vor, ähnlich wie beim Übergang für Binnenschiffe in Buchwald im Elbing-Oberländischen Kanal auf einer geneigten Ebene, die – um 1860 gebaut – noch heute voll funktionsfähig ist. Das technische Prinzip einer Trockenförderung ist aber auf eine Marina nicht so ohne weiteres übertragbar, denn für den Schutz des Wagens beim Aufslippen wird ebenfalls ein Wellenschutz benötigt. Allein die Anlage einer Sliprampe in einem morphologisch sensiblen Bereich einer offenen Küste und die Gefahr von Versandung oder Kolkbildung stellen aus betrieblichen und wasserbaulichen Gründen den Planer vor Probleme.

3.2 Komponenten einer möglichen Alternativlösung und technischer Varianten

Um die Einflüsse einer Marina auf die Sedimentbewegung gering zu halten, ist es aus Sicht des Verfassers dennoch überlegenswert, auf das Prinzip der Trockenförderung zurückzugreifen. Gedankliche Vorlagen für eine Marina, in der Einflüsse auf die Sedimentbewegung weitgehend ausgeschaltet werden können, waren:

- die Schwebbahn in Wuppertal, ein Verkehrssystem, das seit nunmehr über 100 Jahren in Betrieb ist und das – abgesehen von einem wartungsbedingten Unfall im Jahre 1999 – bis heute weitgehend störungsfrei funktioniert
- die Schwebefähre in Rendsburg, über den Nord-Ostsee-Kanal
- Seilbahnen für die Personen- und Lastenbeförderung in Deutschland, in den Alpenländern und vielen anderen Ländern der Welt. Transportsysteme dieser Art werden auch für große Lasten (z.B. in Werften) hergestellt, die die von Sportbooten weit übertreffen.

Ein schönes Beispiel aus dem Internet zu dieser Thematik ist in Abb. 9 wiedergegeben.



Abb. 9: Schwebefähre für große Lasten, Beispiel „Sardinentransport“ im Hafen von Marseille (Internet)

Die folgenden Varianten einer Marina an einer sensiblen Brandungsküste gehen, an diese Vorbilder angelehnt, von einem schwebenden Transport des jeweiligen Schiffs/Sportbootes aus. Dabei wird auf im Hafengebäude übliche Lift- und Transportsysteme zurückgegriffen.

Wesentliches Merkmal ist die Halterung des Bootskörpers in verstellbaren Tragegurten. Tragegurte bieten im Vergleich zu seitlichen Stützkonstruktionen Vorteile, weil sie sich an den Bootsrumph innig anschmiegen und dadurch örtliche mechanische Beanspruchungen vermieden werden.



Abb. 10: Travel-Lift im Hafen Rostock-Bramow. Segelyacht „Nicola“ in Gurthalterung
(Foto IWR)

Abb. 10 zeigt beispielhaft ein mit Haltegurten versehenes Transport- bzw. Liftsystem, das heute in der Praxis des Marinabaus weit verbreitet und von den Skippern akzeptiert ist und auf die die Vorstellungen des Verfassers zurückgreifen.

Komponenten für eine vom Verfasser vorgeschlagene Alternativlösung für eine konventionelle Marina mit technischen Varianten sind in Abb. 11 schematisch dargestellt. Kennzeichnend ist in allen Varianten, dass die Liegestellen für die Sportboote aus dem exponierten Seebereich landwärts verlagert werden. Hierfür sind erforderlich (vgl. Abb. 11):

- a) eine seeseitige Übergangsstation [a]) außerhalb der Brandungszone. Die Übergangsstation ist eine Art Hafen, jedoch mit minimalen Abmessungen, lediglich vorgesehen für die Übergabe der Sportboote auf eine Fördereinrichtung. Die Größe der Übergangsstation kann auf die Flächenbedarfe für einige wenige Boote begrenzt werden, so dass deren Einfluss auf den Sedimenttransport, der außerhalb der Brandungszone ohnehin gering ist, minimiert werden kann.

Generell nimmt der Einfluss eines Offshore-Bauwerks auf die Morphologie (Salientbildung, Grenzfall Tombolo) mit der Entfernung von der Brecherlinie ab (s. auch Abschnitt 2.4). Je kleiner die geometrischen Abmessungen sind, desto geringer ist der Einfluss auf (unvermeidbare) Veränderungen der Küste.

Ob der Mini-Hafen einen besonderen Wellenschutz benötigt, ist abhängig von den hydrologischen Bedingungen im Seegebiet. Sofern ein Betrieb auf die übliche Saison der Freizeit-Schifffahrt begrenzt wird, kann u.U. auf einen Wellenschutz ganz verzichtet werden. Auch die Verwendung von schwimmenden Wellenbrechern für einen zeitweisen Schutz ist im Einzelfall zu überlegen.

Auf jeden Fall kann davon ausgegangen werden, dass die technischen und finanziellen Aufwendungen für den Wellenschutz im Vergleich zu den einer herkömmlichen Marina sehr viel geringer sind.

- b) In der Übergangstation (Außenhafen) werden die Sportboote an eine Fördereinrichtung [b]) übergeben. Die Aufnahme des Bootes in die Tragegurte unter dem Rumpf erfordert einigermaßen ruhiges Wasser sowie seitliche Stegkonstruktionen für die Bedienung. Denkbar sind Rahmen- oder Spreader-Konstruktionen an einem handelsüblichen Hafenkran [b1]) oder Fördereinrichtungen mit einem Förderkorb (Gondelprinzip) und Gurthalterungen für das zu transportierende Sportboot, in die das Boot eingehängt wird [b2]).

Wegen der zu überwindenden Höhenunterschiede für den eigentlichen (horizontalen) Transport über die Brandungszone hinweg in die landseitige Übergangseinrichtung scheint die Verwendung eines einfachen Hafenkran (Lösungsvariante b1) gegenüber einer Korblösung (b2) günstiger, letztere hat aber für den eigentlichen

- c) Transport auf der Transporteinrichtung [c]) Vorteile. In der Transportstrecke wird das Sportboot schwebend zu einer landseitigen Übergangstation transportiert. Für den Transport sind wiederum einige Varianten denkbar, von denen der Transport auf einer auf Pfählen aufgeständerten Transportbahn [c2]) gegenüber einer Seilförderung [c1]) vorteilhafter erscheint und weniger Akzeptanzprobleme mit sich bringt. Sicherheitsanforderungen beim Transport des Sportboots und der Besatzung erfordern besondere Überlegungen z.B. für den Transport bei starkem Wind. Sie sind bei einem „geführten“ Transport auf einer starren Konstruktion sehr viele einfacher beherrschbarer, indem beispielsweise für den Personentransport eine besondere Plattform, die vom Lastentransport (Boot) getrennt ist, vorgesehen wird. Der Einfluss der Stützenreihen, auf die die Transportbahn aufgelagert ist, auf den Sedimenttransport kann als sehr gering angesehen werden, da die Gewichte der Boote vergleichsweise gering und für die Stützen entsprechend nur geringe Pfahldurchmesser erforderlich sind. In einzelnen Fällen wäre die Nutzung einer vorhandenen Seebrücke für die Konstruktion der Transporteinrichtung für den schwebenden Bootstransport [c3]) sicher überlegenswert.

- d) Von der Transporteinrichtung werden die landwärts transportierten Sportboote an eine landseitige Übergabestation [d] übergeben, die von der Funktion ähnlich wie die seeseitige Übergabestation, z.B. mit einem handelsüblichen Hafenkran ausgeführt werden kann. Von der Übergabestation ist ein Übergang in ein natürliches Binnengewässer [d1]), ein künstliches Gewässer, z.B. eine landseitige Marina mit Liegeplätzen und üblicher Infrastruktur [d2]) möglich. Auch ein Übergang auf andere Verkehrsträger [d3]) ist natürlich denkbar, eine Möglichkeit, die in der früheren DDR, als ein Zugang zur Ostsee aus politischen Gründen nicht geduldet wurde, durchaus praktiziert wurde.

Insgesamt ergeben sich also etliche Vergleichsvarianten, die funktionell, konstruktiv und finanziell im Einzelfall bewertet werden müssen. An den Übergangseinrichtungen wäre z.B. auch die Anordnung von geneigten Transportbahnen (Slip-Einrichtungen) möglich. Auch wäre es denkbar, mehrere Transportwagen auf der Transportbahn von der See ins Binnenland anzuordnen oder eine umlaufende Bahn zu bauen, um den Durchsatz und damit die Leistungsfähigkeit der Anlage zu erhöhen. Transporte vom Binnenland in Richtung See wären prinzipiell in gleicher Weise durchzuführen, welches keiner besonderen Erläuterung bedarf.

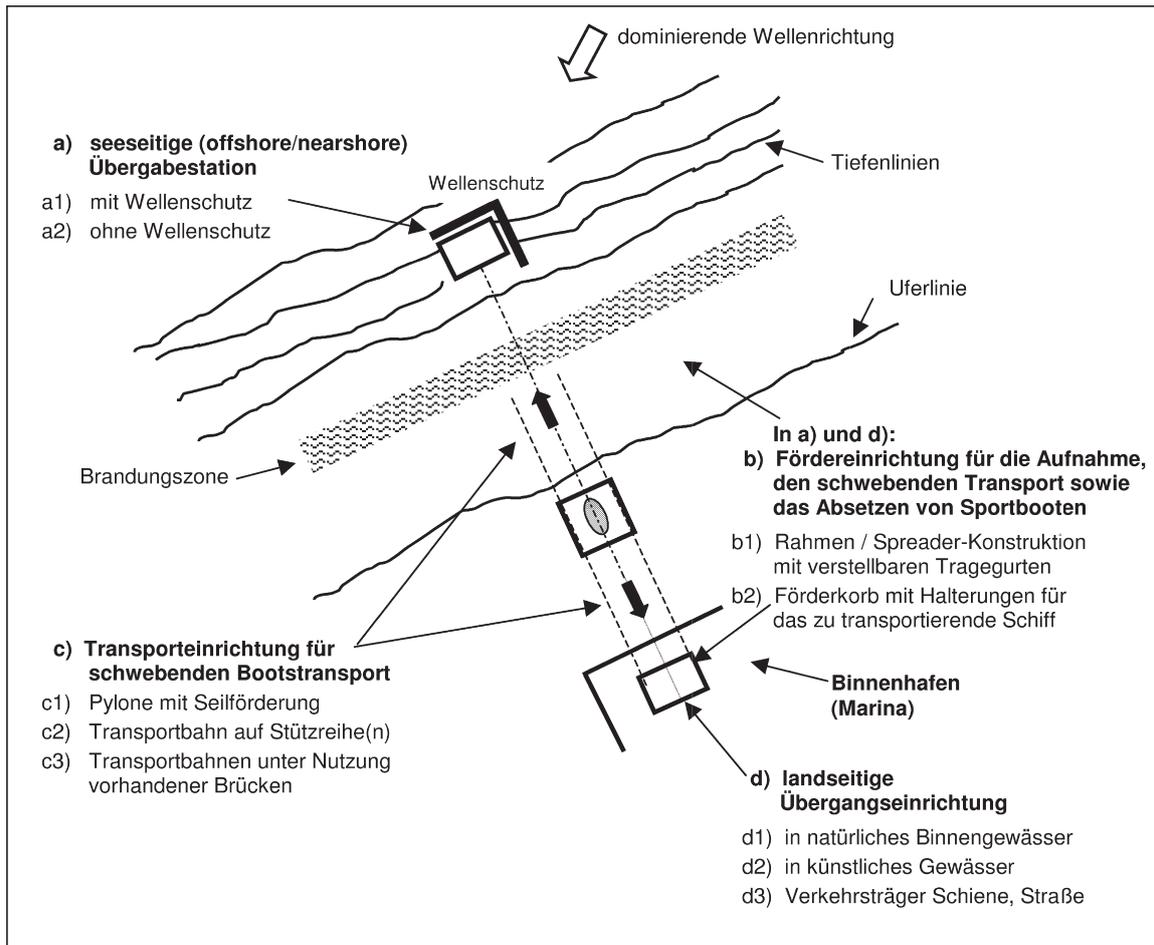


Abb. 11: Elemente eines Sportbootübergangs mit minimiertem Einfluss auf die Küstendynamik, schematisch

3.3 Beispielhafte Darstellung eines schwebenden Sportbootübergangs

3.3.1 Planungsgrundlagen und hydrografische Bedingungen des Seegebiets

Nach den vorher dargestellten Überlegungen sind für eine Marina verschiedene Varianten denkbar, um den Übergang zwischen offener See und geschütztem Hafen technisch zu realisieren. Von konventionellen Häfen unterscheiden sich alle erheblich.

Das folgende schematisierte Beispiel ist an die Situation an der Ostseeküste auf dem Fischland angelehnt, einem Küstenabschnitt, der durch eine starke Sandwanderung in Richtung NNO geprägt ist (Abb. 12).

Ähnliche Situationen sind an der mecklenburg-vorpommerschen Küste beispielsweise in Rerik oder am Buger Hals zu finden.

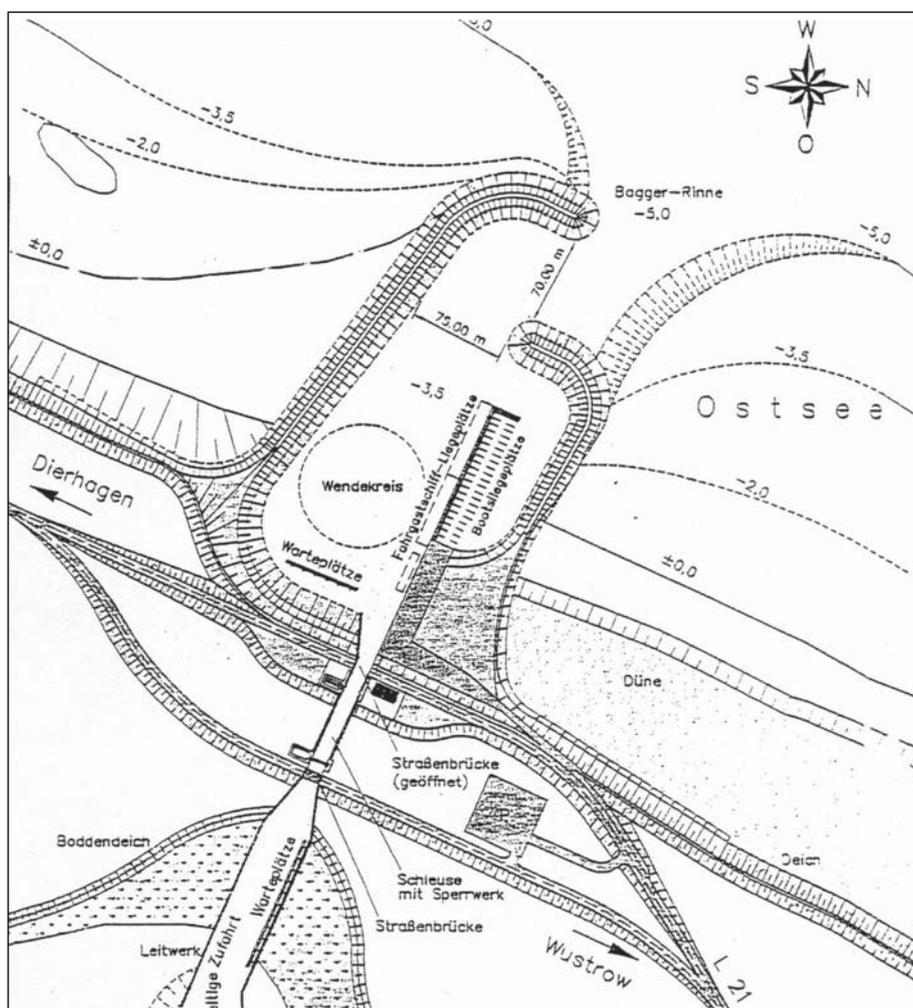
Die Landenge zum Saaler Bodden ist mit stellenweise weniger als 400 m sehr eng. Das ist hinsichtlich eines künstlichen Durchstichs von Vorteil, bezüglich zu erwartender Erosion im Wellenschatten der die Einfahrt schützenden Molen aber auch besonders gefährlich.



12a) Luftbild des Fischlands an der Durchstichstelle



12b) Lageplan



12c) Beispiel für eine der untersuchten Varianten (KNABE u. KNABE, 1998, aus VOGEL, 1998)

Abb. 12: Zur Anlage des Sportbootübergangs bei Wustrow/Fischland

Für die Ortschaft Wustrow wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt, um Möglichkeiten für die Anlage einer Marina im Saaler Bodden zu eruieren. In den Aussagen zum Sedimenttransport und zum Einfluss eines Durchstichs auf die Sedimentdynamik unterscheiden sich die Studien z.T. erheblich.

Nach Abschätzungen nach dem CERC-Ansatz mit Seegangseingangsdaten, die auf der Basis von Winddaten für die Stadion Warnemünde ermittelt wurden, muss von einem resultierenden Sedimenttransport in nördlicher Richtung (Richtung Darß) in einer Größenordnung von rd. 150.000 m³/Jahr ausgegangen werden.

Ein durch Wellenbrecher geschützter Durchstich lässt also erhebliche Küstenrückgänge im Lee-Bereich (d.h. in Richtung Darß) erwarten. Ohne Ausgleichsmaßnahmen (Strandersatz) wäre dieses in diesem Küstenabschnitt mit ohnehin negativer Bilanz nicht hinnehmbar (vgl. VOGEL, 1998).

Der Bemessungshochwasserstand im betrachtenden Bereich liegt nach dem Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz Mecklenburg-Vorpommern bei + 2,80 m NN. Signifikante Wellenhöhen sind nach oben erwähnter Seegangsvorhersage bis zu $H_{1/3}$ entspr. $H_{mo} = \text{rd. } 3,5 \text{ m}$ zu erwarten (bei einem als extrem zu bezeichnenden Sturm mit Windgeschwindigkeiten $U_{10} = 25 \text{ m/s}$).

Ein schwebender Übergang in den Bodden müsste in einer Höhe erfolgen, in der eine Beeinflussung des Schiffs durch Welleneinwirkung und erhöhte Wasserstände ausgeschlossen werden kann, doch sollten die Randbedingungen für den Entwurf nicht zwangsläufig auf der Grundlage extremer Ereignisse festgelegt werden.

Eine gute Grundlage für den Entwurf liefern die Höhenlagen vorhandener Seebrücken an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns.

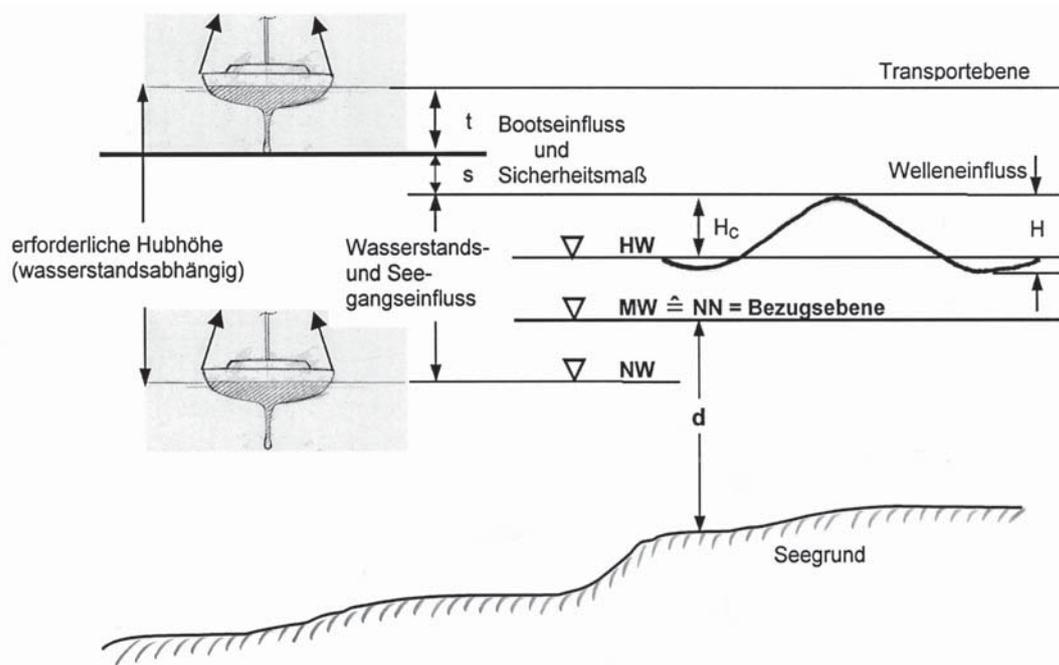
Der Bemessungshochwasserstand basiert auf dem Ereignis der Sturmflut 1872, auf das alle Hochwasserschutzmaßnahmen an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns bezogen werden. Dieses Ereignis lässt sich statistisch nicht einordnen. Bereits Wasserstände von 1,25 bis 1,50 m NN mit einer Überschreitungszahl von 0,2 bis 0,05 ($1 \times$ in 5 Jahren bzw. $1 \times$ in 20 Jahren, vgl. KOPPE, 2002) sind als schwere Sturmfluten zu bezeichnen. Sehr schwere Sturmfluten mit Scheitelwerten von über 1,50 m NN treten darüber hinaus nur in den Wintermonaten November bis April auf, in denen eine Marina üblicherweise nicht genutzt wird.

Funktionell wäre es aus der Sicht des Autors sinnvoll, für den Entwurf von Wasserständen um 1,0 m, maximal bis 1,5 m über NN auszugehen.

Für die Höhenlage der seeseitigen Komponenten einer Marina ist weiterhin der Einfluss der Wellen zu berücksichtigen. Hierbei ist zu beachten, dass der Seegang beim Einlaufen in flaches Wasser verformt wird. Für die Höhenlage von Bauwerken ist vor allem die horizontale Asymmetrie der Wellen wichtig. Näherungsweise kann für den Bereich steiler Wellen, d.h. vor dem Brechen infolge verringerter Wassertiefen, von einer Höhe des Wellenkamms entsprechend dem rd. 0,7-fachen der Wellenhöhe ausgegangen werden. Legt man ein Starkwindereignis von $U_{10} = 20 \text{ m/s}$ für die Nutzungsperiode der Marina als Grenzwert zugrunde, so sind nach der Seegangsvorhersage (Bezugswassertiefe $d = 10 \text{ m}$) Wellen von rd. $H_{1/3} = 3,0 \text{ m}$ zu erwarten mit entsprechenden Kammlagen von etwa 2,0 m über dem aktuellen Wasserstand.

Natürlich müssten für den konstruktiven Entwurf auch extreme Ereignisse betrachtet werden, und es müssen entsprechende Sicherheitsnachweise geführt werden.

Die aus Seegang und Wasserständen für den Entwurf und die Bemessung anzusetzenden Eingangsdaten sind für das Beispiel einer Brückenlösung in Abb. 13 schematisch dargestellt.



- MW** = mittlerer Wasserstand entspr. NN = Bezugsebene
HW = Hochwasserstand, im Extremfall: Bemessungshochwasserstand
NW = Niedrigwasserstand
t = Schiffstiefgang
d = örtliche Wassertiefe
 H_C = Kammlage der Wellen, örtlich veränderlich = rd. $0,7 \cdot H$
s = Konstruktions- und Sicherheitsmaß für Transporteinrichtung

Abb. 13: Schema der Wasserspiegel- und Höhenlagen

Eine Brückenlösung gemäß Variante c 2, Abschnitt 3 erscheint unter den bei Wustrow vorhandenen örtlichen Gegebenheiten als technisch realisierbar und wird im Folgenden zur Erläuterung der in diesem Beitrag entwickelten Vorstellungen ohne besondere Nachweise als Vorzugsvariante gewählt.

3.3.2 Brückenlösung

Es liegt auf der Hand, für den seeseitigen Übergang der Sportboote vorhandene Seebrücken in die Überlegung einzubeziehen. In der Nachwendezeit wurden etliche Seebrücken an der mecklenburg-vorpommerschen Ostseeküste gebaut, die ihrer eigentlichen Zweckbestimmung entsprechend, nämlich die Gemeinden an der Küste seeseitig und miteinander durch die Küstenschifffahrt zu erschließen und zu verbinden, kaum genutzt werden. Immerhin stellen die Brücken recht hohe Investitionen dar, und natürlich stellt sich die Frage, ob diese allein aus touristischen Gründen vertretbar sind. Heute werden die Brücken vor allem von Spaziergängern und Freizeitanglern genutzt.

Die Brücken haben eine unter vorgenannten Gesichtspunkten ausreichende Höhe. Sie sind in ihrer Breite ausreichend dimensioniert, um einen konventionellen Travel-Lift aufzunehmen. Vor einigen Jahren wurde überlegt, den Kopfbereich der Seebrücke in Zinnowitz/

Insel Usedom in einen Offshore-Hafen einzubeziehen, doch wurden die Planungen bislang nicht weiter verfolgt. Natürlich wären für eine Brückenlösung in Verbindung mit konventioneller Technik für das Heben und Transportieren der Sportboote – neben statischen Nachweisen – einige Veränderungen am Kopf der Brücke erforderlich, auf die in diesem Beitrag nicht näher eingegangen werden soll. Insbesondere müsste eine (modifizierte) Übergabestelle für das Anlegen und Heben der Boote gebaut und zur Erzielung ruhigen Wassers an der Übergabestelle durch wellendämpfende Bauwerke umgeben werden.

Da der Bootsbetrieb in den Wintermonaten ohnehin eingestellt wird, ist die Verwendung von großen Schwimmpontons überlegenswert, die in den Wintermonaten eingeholt und in ruhigem Wasser zwischengelagert werden. Landseitig wäre ein Übergang in die eigentliche Marina ebenfalls vergleichsweise einfach zu realisieren. An die Brückenwurzel müsste eine dammartige Zuwegung höhengleich angeschlossen werden; ein Fahrweg, über vorhandene Hochwasserschutzanlagen hinweg, müsste mit geringem Gefälle bis in den Liegeplatzbereich einer binnenseitigen Marina geführt werden.

4. Schriftenverzeichnis

- FRÖHLE, P.; KOHLHASE, S. u. WEICHBRODT, F.: Marinas an der Deutschen Ostseeküste – Planerische Aspekte aus Sicht des Küstenwasserbaus, Tagungsband Symposium Yachtentwurf, Yachtbau und Marina 2002, Rostock, 2002.
- KOHLHASE, S.: The Concept of Sediment Budget in the Nearshore Area, Proc. Sem. on Causes of Coastal Erosion in Sri Lanka, Colombo, 1991a.
- KOHLHASE, S.: The Need to Monitor the Coastal Response to Structural Interventions, Proc. Sem. on Causes of Coastal Erosion in Sri Lanka, Colombo, 1991b.
- KOHLHASE, S.: Konzeption von technischen Maßnahmen zur Küstensicherung mit Beispielen aus dem Küstengebiet der Nord- und Ostsee, Jahrbuch der HTG, Hamburg, 2004.
- KOPPE, B.: Hochwasserschutzmanagement an der deutschen Ostseeküste, Rostocker Bericht aus dem Fachbereich Bauingenieurwesen, Heft 8, 2002.
- PARKS, J.: Fluidized Sand Bypassing for Inlet Channel Maintenance, Proc. Third Intern. Conf. on Coastal and Port Eng. in Developing Countries (COPEDEC), Mombasa, Kenia; 1991.
- UMWELTMINISTERIUM MECKLENBURG-VORPOMMERN: Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin, 1995.

Unveröffentlichte Planunterlagen und Studien:

- B&O INGENIEURE HAMBURG: Planunterlagen und persönliche Mitteilungen für die Marina Kühlungsborn, Ostsee und verschiedene Seebrücken.
- INGENIEURBÜRO KNABE UND KNABE, Wedel: Technische Lösungen zur Ermöglichung der Schiffspassage zwischen Ostsee und Bodden beim Ostseebad Wustrow, unveröffentlichtes Gutachten, Mukran, 1998.
- INGENIEURBÜRO MOHN, Beratende Ingenieure Büro Husum: Sportboothafen in Prerow/Ostsee, Vorplanung.
- KÜHL, J.-U.: Sand Bypassing, eine Methode zur Minderung der Lee-Erosion im Hafenaufbau, Seminararbeit Institut für Wasserbau der Univ. Rostock, Rostock, 2004.
- VOGEL, M.: Durchstich des Fischlandes im Bereich Wustrow – Auswirkungen auf den Küsten- und Hochwasserschutz., Diplomarbeit am Institut für Wasserbau der Univ. Rostock, Wismar, 1998.