

### 3.4 Meeresspiegelanstieg: Gefährdung flacher Küsten

KARSTEN REISE

*Sea level rise and its coastal consequences: An accelerating rise in sea level would be a threat to people living in coastal plains. The ultimate magnitude of the rise may be too high to proceed with traditional strategies. New approaches should be developed in time to (1) accommodate coastal people on higher terrain, (2) to initiate coastal adaptations which promote the rising of shallow coasts in synchrony with the level of the sea, and (3) to adopt attitudes towards living with more water and coastal dynamics rather than fighting against.*

**B**eschleunigt sich der Anstieg des Meeresspiegels, so könnte dies zur größten Herausforderung durch den selbst ausgelösten Klimawandel werden. Flache Küsten sind überproportional dicht besiedelt und sind wichtige Wirtschaftsräume. Sie sind in Wechselwirkung mit einem nur langsam steigenden Meer in den letzten 6.000 Jahren entstanden (s. Kap.1.7: Reise). Eine Beschleunigung des Anstiegs stellt daher eine grundsätzlich neue Situation dar. Mit welchen Meereshöhen ist zu rechnen? Sind alle flachen Küsten gleich betroffen? Lässt sich der Meeresanstieg abwehren oder ist Anpassung der langfristig bessere Weg? Reichen technische Lösungen oder müssten wir uns auch im Lebensstil auf ein schneller ansteigendes Meer einlassen?

#### Wie hoch steigt das Meer?

Belastbare Prognosen zum Ausmaß eines künftigen Anstiegs des Meeresspiegels sind derzeit kaum möglich und wird es auch angesichts der Komplexität dieses Vorgangs so schnell nicht geben können (s. Kap. 2.7: Köhl&Stammer). Zwei unterschiedliche Forschungswege erlauben aber wenigstens die wahrscheinliche Größenordnung einzuschätzen: der Blick zurück auf Warmphasen der Erdgeschichte einerseits und die Auswertung laufender Messzeitreihen kombiniert mit Modellen zu den relevanten physikalischen Prozessen andererseits. Je konkreter der Anstieg eingeschätzt werden kann, um so eher könnte es gelingen vorsorgliche Anpassungen mit den Betroffenen zu beraten und die Finanzierung bereit zu stellen. Das macht allerdings nur Sinn, wenn bald ein weiteres Anheizen des Klimas gestoppt werden kann.

In den letzten 5 Mio. Jahren gab es superwarme Pha-

sen, in denen selbst die mächtigen Eisschilde auf Grönland und der westlichen Antarktis geschmolzen waren (HUYBRECHTS 2009). Der Meeresspiegel stieg dadurch auf 15 oder mehr Meter über den heutigen an. Dieses starke Abschmelzen zog sich über Jahrtausende hin und ist damit jenseits menschlicher Planungshorizonte. Es gab auch Warmphasen wie im letzten Interglazial vor 120.000 Jahren, die der heutigen sehr ähnlich waren. Da lag der Meeresspiegel um 4 bis 6 Meter höher als heute und stieg 1 bis 2 Meter pro Jahrhundert an (ROHLING et al. 2008). Das ist direkt mit heute vergleichbar. Eine Zunahme der Globaltemperatur um etwa 2°C bis 2100 gilt als nicht mehr vermeidbar und das entspricht dem Temperaturmaximum der letzten Warmzeit. Es muss nicht genau so wieder kommen, aber plausibel wäre das schon.

Laufende Messungen zum Meeresspiegel und Modelle führen zu einer ähnlichen Einschätzung. Gemittelt über das letzte Jahrhundert, ist ein Anstieg von 1,8 mm pro Jahr gemessen worden. Das entspricht 18 cm im Jahrhundert und basiert auf Pegelmessungen entlang der Küsten (Tab. 3.4-1). Diese Rate ähnelt auch dem rekonstruierten Mittel über die letzten 6.000 Jahre. Da sich die Erwärmung in der Atmosphäre nur langsam auf die Wassermasse der Weltmeere überträgt, kann in dieser Messung auch kaum schon etwas von der aktuellen Erwärmung stecken.

Gemittelt nur über die letzten zwei Jahrzehnte und mit Satelliten-Altmetrie gemessen, ist allerdings ein deutlich schnellerer Anstieg festgestellt worden (Tab. 3.4-1). Diese Zeitspanne ist noch zu kurz, um sie schon als Trend werten zu können. Stagnieren und Phasen schnelleren Anstiegs sind an den meisten Küstenpegeln

**Tab. 3.4-1:** Veränderungen des globalen Meeresspiegels in Millimeter pro Jahr, entnommen dem Bericht des IPCC 2007 und CHAO et al. 2008. Die berechneten Anteile liegen zusammen um ein Drittel unter dem gemessenen Wert. Vermutlich wird das Abschmelzen der polaren Eisschilde noch unterschätzt.

Pegelmessungen entlang der Küsten (1900-2000)	+ 1,80
Satellitenvermessung der Meeresoberfläche (1993-2007)	+ 3,36±0,40
Summe berechneter Anteile des Anstiegs	+ 2,24
Davon entfallen auf:	
Erwärmung oberer Meeresschichten (1993-2003)	+ 1,60±0,40
Schmelzwasser der Gebirgsgletscher (1993-2003)	+ 0,77±0,22
Schmelzwasser Grönland (1993-2003)	+ 0,21±0,07
Schmelzwasser der Westantarktis (1993-2003)	+ 0,21±0,04
Stauseen seit 1950	- 0,55

im vergangenen Jahrhundert aufgetreten. Eine Extrapolation in die Zukunft wäre anfechtbar, obwohl diese Zunahme im Anstieg den Erwartungen entspricht.

Mit Bezug auf verschiedene Szenarien gibt der Klimabericht des IPCC von 2007 als maximale Rate einen Anstieg von 59 cm bis 2100 an, hat aber wegen unzureichender Kenntnisse ein beschleunigtes Abschmelzen des Polareises nicht einbezogen. RAHMSTORF (2007) schätzte den Anstieg auf 50 bis 140 cm. Der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung (WBGU 2006) hob hervor, dass allein die schon stattgefundene Erwärmung in der Atmosphäre wegen der sehr viel langsameren Erwärmung des Meeres auch nach 2100 den Meeresspiegelanstieg noch beschleunigen wird und gibt bis 2300 eine Spanne von 250 bis 510 cm an (s. auch Kap. 2.7).

Mit dem Meeresspiegelanstieg erhöht sich auch das Ausgangsniveau der Sturmfluten. Für einzelne Küstenregionen ist das globale Mittel des Meeresspiegelanstiegs nicht allein entscheidend. Bedingt durch Änderungen im System kalter und warmer Strömungen unterschiedlicher Dichte, durch Änderungen von Windstärken und Windrichtungen oder durch Heben und Senken des Landes kommt es zu einem relativen Anstieg, der vom globalen Mittel weit abweichen kann.

Zwei Handlungsoptionen zum Schutz der Küstenbevölkerung lassen sich derzeit begründen: (1) Abwarten bis belastbarere Prognosen vorliegen oder (2) schon heute auf der Grundlage der Annahme, dass ein beschleunigter Anstieg unausweichlich ist, vorsorgliche Planungen umsetzen. Genauere Prognosen können dann später in die Vorsorgemaßnahmen integriert werden. Für die zweite Option spricht, dass irrtümlich keine Beschleunigung des Anstiegs anzunehmen tödlich für viele Menschen ausgehen kann. Die irrtümliche Annahme eines beschleunigten Anstiegs schon vor dessen Zeit könnte zu Anpassungen führen, die erst

für spätere Generationen überlebenswichtig werden. Vielleicht gibt es aber auch Anpassungen, die jetzigen Generationen schon neue Lebenschancen an den Küsten eröffnen?

### Meeresanstieg trifft auf künstliches Erbe

Für steile Felsküsten ist ein Anstieg um einen oder mehr Meter nahezu belanglos. Flache Küstenebenen aus Fluss- oder Meeressedimenten können dagegen unter Wasser geraten, die Sedimente werden umgelagert und das Ufer wandert landwärts. Erdgeschichtlich ist das normal, aber außer in den Polarregionen werden solche Küstenebenen mit zunehmender Dichte von sesshaften Menschen besiedelt, die in der Regel nicht umziehen wollen oder können. Die Problemlage kann aber sehr unterschiedlich sein, je nachdem wie die Küstenregion und das benachbarte Binnenland von Menschen genutzt wird und welche regionalen Klimaänderungen hinzutreten (Abb.3.4-1).

### Überschwemmungen

Insbesondere wo tropische Starkregen auf abschüssige, entwaldete Hänge fallen, schwellen die Flüsse an und verursachen Überschwemmungen. Im Deltabereich solcher Flüsse nehmen die Überschwemmungen bei erhöhtem Meeresspiegel zu. Im 80.000 km<sup>2</sup> großen Delta von Ganges und Brahmaputra führte insbesondere das Zusammentreffen von Monsunregen am Südhang des Himalaya mit Zyklonen im Golf von Bengalen zu vielen Todesopfern und Obdachlosen. Bei Überschwemmungen in 1970 und 1991 gab es jeweils über 100.000 Tote und in 1998 wurde die Zahl der Obdachlosen mit über 20 Mio. in den Medien angegeben. Weite Teile liegen kaum einen Meter über dem mittleren Meeresspiegel.

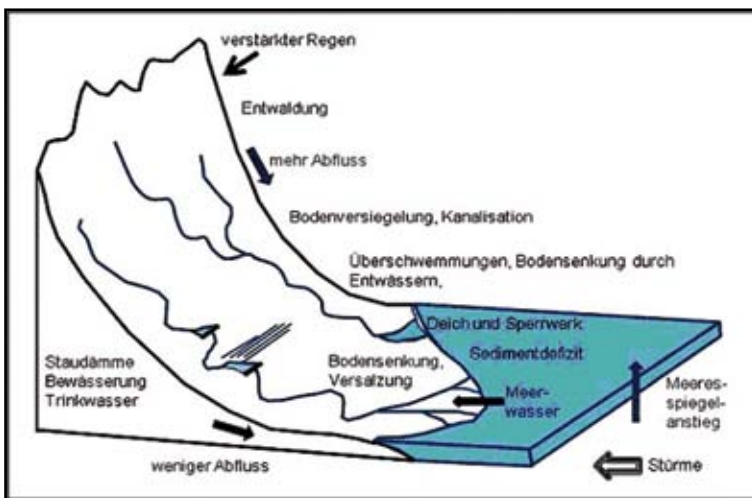


Abb. 3.4-1: Klimabedingter Meeresspiegelanstieg und veränderte Flusseinträge von den Gebirgen, verstärkt durch gegensätzliche Landnutzungen, treiben Küstenebenen in die Enge.

### **Austrocknung**

Doch auch das Gegenteil kann im selben Gebiet in Trockenzeiten eintreten. Dadurch werden Reiskulturen wegen Versalzung aufgegeben und stattdessen Teiche für Garnelenzucht angelegt. Trifft dann ein Taifun auf die bengalische Küste wie im Mai 2009, dringt Meerwasser tief ins Delta ein. Sackendes Land und gestiegener Meeresspiegel tragen dazu bei, dass das Meerwasser bleibt. Ähnlich im Indus Delta. Vom Oberlauf des Indus wird fast alles Wasser für Bewässerung der Felder abgezweigt. Daher dringt Meerwasser ins Delta ein und der Meeresspiegelanstieg verstärkt diese Entwicklung. Reisbauern und Viehhirten geben wegen Versalzung auf und werden Fischer, was dann schnell zu Überfischung führte. Mangroven verkümmern wegen Versalzung.

### **Eingedeicht und entwässert**

Die Niederländer begannen schon im Mittelalter die Überschwemmungsgebiete entlang der Küste einzudeichen und zu entwässern. Weil der Meeresspiegel stieg und das eingeschlossene Land durch Entwässerung und Torfabbau unter den Meeresspiegel sank, mussten die Deiche immer massiver gebaut werden. Nach einer Sturmflut in 1953 mit 1836 Todesopfern in der Rheinmündung wurde die Nordsee durch den Bau gigantischer Sperrwerke nahezu ausgeschlossen. Ohne Sperrwerke und Deiche wären 60% der Niederlande bei Hochwasser überschwemmt. Soll das Risiko nicht zunehmen, wachsen die Kosten bei beschleunigtem Meeresspiegelanstieg rasant an (DELTA COMMISSIE 2008).

Das Nildelta wurde schon vor 5.000 Jahren dicht besiedelt und kultiviert. Bewässerungsgräben wurden gezogen, Flussarme umgelenkt und kanalisiert. Für Nilpferde und Nilkrokodile blieb kein Platz. Durch den Assuan-Staudamm bleiben seit 1964 die saisonalen, fruchtbaren Überflutungen im Delta aus. Die Böden schrumpfen, versalzen und geraten immer tiefer unter das Niveau des Mittelmeeres. Den vor dem Meer schützenden Sandnehrungen geht der Sand aus. Aquakulturen und Reisfelder sind bedroht und schließlich auch die 34 Mio. Menschen, die in der Deltaregion leben. Durch höheren Meeresspiegel nähme die Brisanz der Lage zu (SYVITSKI et al. 2009). Die Entwicklung scheint in eine Sackgasse zu geraten.

### **Befestigt**

Sandige Küsten werden vom Meeresspiegelanstieg in Bewegung gehalten. Vorspringende Ufer werden abgetragen und anderswo entstehen aus dem verlorenen Sand Nehrungshaken und Dünen. Um trotzdem Ansiedlungen am selben Fleck zu halten, wurden Ufer mit Steinwerken gesichert und wandernde Dünen bepflanzt. Kurzfristig hilft das, aber langfristig nimmt

die Reibung mit dem weiter steigenden Meer zu. Die Diskrepanz zwischen Befestigung und natürlichem Sollwert wächst. Dem höher gestiegenen Meer fehlt vor festen Uferwerken der Sand, um einen flachen Übergang zur optimalen Verteilung der Wellenenergie aufrecht zu erhalten. Das führt zu Unterspülungen und Sandverlusten, wo die Befestigung endet. Um diesen Sandhunger des Meeres zu stillen, bleibt dann oft nur die künstliche Versorgung der Küste mit Sand aus dem Offshore-Bereich (FRENCH 2001).

### **Dilemma zwischen Küstenschutz und Seeverkehr**

Seehäfen brauchen freien Zugang zum Meer. Deswegen müssen die Sperrwerke des Küstenschutzes mit Schleusen versehen werden, müssen Flussmündungen für immer größer werdende Schiffe immer weiter vertieft werden oder eigens Kanäle gebaut werden. Kompromisse zwischen Schutz vor Überschwemmungen und freiem Seeverkehr engen oft die Handlungsoptionen bei schneller steigendem Meeresspiegel erheblich ein. Wahrscheinlich benötigt in der Zukunft der Seeverkehr Häfen vor der Küste.

### **Anpassungen**

Die Besiedlung von nur wenig über oder unter dem Meeresspiegel gelegenen Küstenebenen und an befestigten Ufern ist nicht an einen Meeresspiegelanstieg von einem Meter und mehr angepasst. An ungeschützten Küsten könnten zwar erhöhte Fluchräume angelegt werden, aber das sichert nicht die Landnutzung. Vorhandene Deiche und Uferbefestigungen könnten zwar weiter verstärkt werden, aber dennoch nimmt das Risiko mit einem ansteigenden Meer zu, das immer mehr in seiner natürlichen Ausdehnung eingeschränkt ist.

Das Umsiedeln in höheres Terrain und die Aufgabe flacher Küstenebenen wäre naheliegend, aber ist nur bei kleinen Flächen praktikabel bzw. als Notlösung nach eingetretenen Katastrophen. Sich mit dem klimabedingt erhöhtem Meeresspiegel zu arrangieren ist ein Wagnis, zumal unklar bleibt, welche Höhe das Meer erreichen wird. Das Ideal wäre eine mit dem Meer mitwachsende Küste.

### **Schützende Funktion natürlicher Ökosysteme**

Natürliche Saum-Ökosysteme wie Dünen, Salzwiesen, Mangroven und Korallenriffe üben meist eine dämpfende Wirkung auf Wellen aus, die über die Breite des jeweiligen Gürtels einer Sättigungskurve folgt (BARBIER et al. 2008). Verschwinden sie ganz, ist dies oft irreversibel. Zumindest ist ein großer Aufwand erforderlich, wenn es gilt zerstörte Systeme mit der gleichen Schutzfunktion neu aufzubauen. Auch in Hinblick auf wei-

tere Leistungen dieser Saum-Ökosysteme sollte deren Schutz mit Priorität betrieben, nicht mehr nachrangig behandelt und keinesfalls durch starre Küstenschutzanlagen ersetzt werden. Natürliche Saum-Ökosysteme vermögen sich dem Anstieg des Meeresspiegels dynamisch anzupassen (Abb.3.4-2).

Viele Küstenentwicklungen laufen für unsere Wahrnehmung so langsam, dass wir höchstens auf Katastrophen reagieren. Die aber verstellen durch ihre plötzliche Not das Erkennen der allmählichen Entwicklungen, deren Risiken das Ausmaß der Katastrophe erst ermöglicht haben. Der Tsunami 2004 im Indischen Ozean mit über 200.000 Opfern ist dafür ein Beispiel. Zu viele Menschen lebten schutzlos zu nahe am Meer und tun es heute wieder.

### Sand

Flache Küsten sind von einem schützenden Band beweglicher Sände umsäumt. Die Sandverteilung folgt dem Anstieg des Meeresspiegels in der Regel mit erheblicher Verzögerung, weil Sand langsamer über Grund rollt als das Wasser fließt. Es könnte versucht werden, durch künstlichen Transport Sand vom Offshore-Bereich in den Küstennahbereich vor und auf Strände und Wattflächen zu bringen. Dort stillt er den Sandhunger des ansteigenden Meeres, dämpft die Wirkung der Wellen und kann zur Bildung neuer Dünen beitragen. Das Ziel sollte sein, die gesamte vom Seegang beeinflusste Zone so mit Sand zu versorgen, dass sie zusammen mit den natürlichen Sandverlagerungen den Anstieg des Meeresspiegels kompensieren kann.

Dazu gehört auch der Verzicht auf harte Uferbefestigungen, um die natürlichen Aufbauprozesse nicht zu blockieren. Strandnahe Erholungszentren sollten nur noch so gebaut werden, dass sie bei Bedarf versetzt werden können. Die künstlichen Sandinseln und Halbinseln

an der Küste von Dubai passen nicht in dieses Konzept wegen der mit Stein befestigten Ufer und der massiven Bebauung. Küstenschutz mit Sand ist nicht neu, aber meist wird er nur eingesetzt, um eine vorhandene Küstenposition zu stabilisieren (NORDSTOM 2000), nicht aber zur Unterstützung einer dynamischen Entwicklung mit natürlichen Dünen, Sandbänken und Nehrungen, in die sich der Mensch mit seiner Siedlungsweise einfügt.

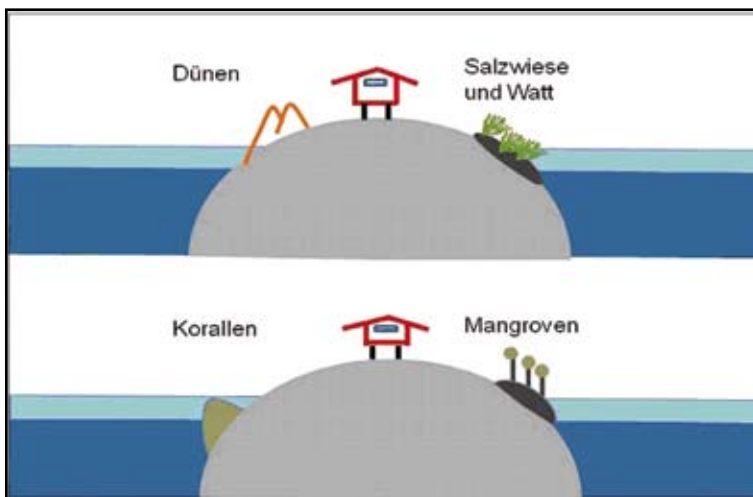
### Mitwachsende Küstenebenen

Mit Deichen vor Überflutung geschützte Küstenebenen können mit einem Anstieg des Meeresspiegels nicht mehr mitwachsen (SYVITSKI et al. 2009). Optimal wäre, solche umdeichten Ebenen kontrolliert zu fluten, um wieder Sinkstoffe einzufangen zu können (Abb.3.4-3). Dazu wäre es nötig, Häuser höher zu legen oder schwimmfähig zu bauen. Auch wichtige Verkehrswege und Versorgungsleitungen müssten überflutungssicher verlegt werden. Um tief liegendes Hinterland zu schützen, könnte insbesondere eine Pufferzone mit hoher Aufnahmekapazität für überflutendes Wasser unmittelbar hinter der ersten Deichlinie eingerichtet werden.

Solche Anpassungen sind sehr aufwändig und nur möglich, wenn sich auch die Einstellung der Küstenbewohner zum Leben an einem Meer ändert, das schneller steigt als bisher. Wie weit kann eine innovative Wasserwirtschaft die konventionelle Landwirtschaft ablösen? Welche weiteren Wirtschaftsformen könnten für tief liegende Küstenebenen entwickelt werden? Was für Vorteile hat ein Leben mit mehr Wasser zu bieten? Das sind neue Fragen für die Küstenforschung.

### Rechtzeitig beginnen

Anpassungen von Infrastrukturen, Wirtschaftsweise und Lebensstil an mehr Wasser und mehr Dynamik der Küstenlandschaft sind mit langen Entscheidungspro-



**Abb.3.4-2:** Saum-Ökosysteme passen sich Änderungen des Meeresspiegels an und dämpfen die Kraft der Sturmfluten.

zessen in der Küstenbevölkerung verbunden und außerdem mit hohen Kosten. Das setzt einen frühzeitigen Beginn voraus und eine Verteilung über mehrere Generationen. Sollen flache Küsten auf lange Zeit bewohnbar und nutzbar bleiben, müssten wir lernen über den Bedarf der gegenwärtigen Generationen hinaus zu planen und zu handeln. Das Miteinander von Meer und Mensch an der Küste müsste immer wieder neu justiert werden.

### Schlussfolgerungen

Das Baden im Meer galt lange Zeit als unmoralische Zerstreuung sittenloser Völker. Das hat sich gründlich geändert. Ebenso müssten sich auch die Gewohnheiten der Küstenbewohner ändern, um aus prekären Entwicklungen herauszukommen und mit einem beschleunigten Meeresspiegelanstieg leben zu können. Die Küste bleibt eine permanente Herausforderung.

Benötigt werden langfristige Entwicklungspläne und ein Generationen übergreifendes Handeln. Die für gewöhnlich langsamen Küstenveränderungen infolge eines schneller steigenden Meeresspiegels verleiten zum Aufschieben und Begnügen mit Zwischenlösungen. Wir werden lernen müssen mit mehr Wasser zu leben und uns der Küstendynamik anzupassen anstatt das Wasser mit Sperr- und Schöpfwerken zu bekämpfen und den bewegten Küstensand durch Stein und Beton zu verdrängen.

Breite natürliche Küstensäume aus Sand, Marschen, Mangroven und biogenen Riffen sind unübertrefflich in ihrer flexiblen Anpassungsfähigkeit und Schutzfunktion bei schneller steigendem Meeresspiegel. Wo die noch vorhanden sind, sollten sie geschützt

werden, wo sie fehlen, sollte versucht werden sie wieder aufzubauen.

### Literatur

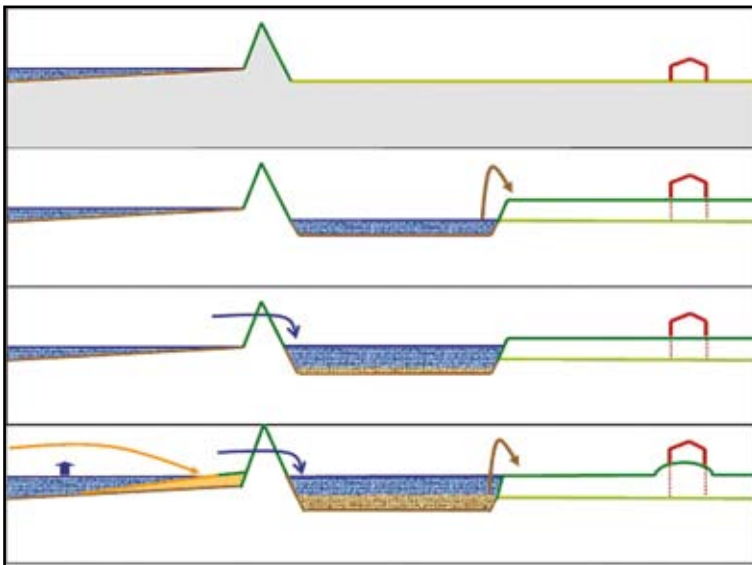
- BARBIER E.B. et al. (+ 15 Co-Autoren) (2008): Coastal ecosystem-based management with nonlinear ecological functions and values. *Science* 319: 321-323.
- CHAO B.F., Y.H.WU, Y.S.LI (2008): Impact of artificial reservoir water impoundment on global sea level. *Science* 320:212-214.
- DELTA-COMMISSIE (2008): Samen werken met water. Bevingden van der Deltacommissie. Hollandia Printing, Nederland. [www.deltacommissie.com](http://www.deltacommissie.com).
- FRENCH P.W. (2001): Coastal defences. Routledge, London. 366 pp.
- HUYBRECHTS P. (2009): West-side story of Antarctic ice. *Nature* 458: 295-296.
- IPCC (2007): Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II + III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 104 pp.
- NORDSTROM K.F. (2000): Beaches and dunes of developed coasts. Cambridge Univ. Press. 338 pp.
- RAHMSTORF S. (2007): A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science* 315:368-370.
- REISE K. (2009): Coastal adaptations. *Topos* 68:82-87.
- ROHLING E.J., K. GRANT, CH. HEMLEBEN, M. SIDDAL, B.A.A. HOOGAKKER, M. BOLSHAW, M. KUCERA (2008): *Nature Geoscience* 1:38-42.
- SYVITSKI J.P.M. et al. (+ 10 Co-Autoren) (2009): Sinking deltas due to human activities. *Nature Geosciences* 2:681-686.
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) (2006): Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer. Sondergutachten.

Professor Dr. Karsten Reise

Alfred Wegener Institut für Polar- und Meeresforschung

Wadden Sea Station Sylt - 25992 List

[karsten.reise@awi.de](mailto:karsten.reise@awi.de)



**Abb.3.4-3:** In eingedeichter Marsch werden Lagunen ausgehoben, Gezeitenwasser fließt durch Deichschleusen rein und raus und lagert dabei Sediment in der Lagune ab. Das wird zur Erhöhung angrenzender Marsch genutzt. Marschboden könnte so mit dem Meeresspiegel wachsen, ähnlich wie vor dem Deich (nach REISE 2009).