

Uwe SELIG\*, Arne SCHOOR & Hendrik SCHUBERT

\*Universität Rostock, Institut für Biowissenschaften, Albert-Einstein-Straße 3, 18051 Rostock  
uwe.selig@uni-rostock.de

## **Maßnahmenprogramme zur Sanierung von Küstengewässern – bisherige Erfahrungen und neue Strategien**

**Management concept for the restoration of coastal waters – knowledge and new strategies**

### **Abstract**

The aim of the EU Water Framework Directive is the “good ecological status” of all water bodies in 2015. Reasons and effects of degradation of the coastal waters are well known, but the knowledge about management activities to reverse the actual impact in a reliably short period is less well established.

The major problem of coastal waters is their eutrophication. With the implementation of the HELCOM agreement, the input of phosphorus and nitrogen were reduced by building waste water treatment. The respective reduction of external nutrient load is insufficient to achieve the good ecological status in 2015. The calculation of nutrient input from the catchment area underlines a high input by agriculture and from the atmosphere. The comparison of external and internal P-load shows the importance of P-release from the sediment. Therefore, the article discusses the knowledge about restoration strategies in coastal waters.

**Keywords:** coastal water, eutrophication, restoration strategy, nutrient load, biofiltration, dredging, energy recycling

### **1 Einführung und Zielsetzung**

Bodden, Haffe und Förden sind entsprechend der Typisierung nach der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) innere Küstengewässer an der Ostsee. Sie unterliegen neben einer sehr hohen natürlichen Variabilität (Salinitäts- und Wasserstandsschwankungen) auch einer starken anthropogenen Nutzung. Aufgrund der hohen Nährstoffeinträge über die letzten Jahrzehnte hinweg, stellt die Eutrophierung ein Hauptproblem vieler Küstengewässer dar. Die Eutrophierung führte zum Rückgang der submersen Vegetation und einer ganzjährigen Dominanz des Phytoplanktons.

Bisher standen die Küstengewässer kaum im Blickpunkt des Gewässerschutzes, hingegen existierten sowohl für den Schutz limnischer Gewässer als auch für den Meeresschutz umfangreiche Programme. So orientierten sich mehrere und

relativ große Verbundvorhaben in den 1990er Jahren auf die limnischen Gewässer. Diese Vorhaben befassten sich sowohl mit der Sanierung von Fließgewässern als auch mit der von Standgewässern (JÄGER & KOSCHEL 1995, THIELE & MEHL 1995, HUPFER & SCHARF 2002). So wurden also bereits in den 1980er Jahren konkrete Sanierungs- und Restaurierungsmaßnahmen an Seen durchgeführt, jedoch liegen für Küstengewässer keine praktischen Erfahrungen vor. Erste Konzepte für Küstengewässer wurden aber auch bereits in den 1980er Jahren für die Schlei (RIPL 1986) und später für die Darß-Zingster Boddenkette (DZBK - SCHLUNGBAUM et al. 1998, 2001) entwickelt. Praktische Umsetzungen dieser Konzepte und Vorschläge fanden aber bisher nicht statt.

Mit der Umsetzung der EU-WRRL entsteht auch für die inneren Küstengewässer die Zielstellung, den „guten“ ökologischen Zustand bis 2015 herzustellen. Neuere Untersuchungen und Nährstoffbilanzierungen belegen, dass ohne Pläne für „interne Maßnahmen“ diese Zielstellung nicht erreicht werden kann. Im Rahmen dieses Beitrages sollen erste Konzepte für Maßnahmenpläne vorgestellt und diskutiert werden.

## **2 Ergebnisse von drei Workshops**

Im November 2004, Juni 2005 und Oktober 2006 wurden Workshops zu den Fragestellungen bei der Erarbeitung von Sanierungsstrategien für Küstengewässer durchgeführt:

- 1 Workshop in Rostock am 16./17.11.2004 mit den Komplexen Zustandsanalyse, Nährstoffbelastung sowie Verbauung und Substratverlust
- 2 Workshop in Rostock am 01./02.06.2005 mit den Komplexen Modellierung, Senkung externer Einträge, interne Maßnahmen sowie Makrophyten-Wiederbesiedlung
- 3 Workshop in Kiel am 12./13.10.2006 mit den Komplexen Küstenmanagement, stark veränderte Wasserkörper (HMWB) sowie Substrateinbringung und Re-Eutrophierung

Die meisten Beiträge wurden in drei Sonderheften der Rostocker Meeresbiologischen Beiträge veröffentlicht und sind unter <http://www.biologie.uni-rostock.de/oekologie/RMB.htm> einsehbar. Aus diesen Beiträgen lassen sich folgende Schwerpunkte im Sinne der Degradation von Küstengewässern ableiten:

- Eutrophierung durch kommunale Einleitungen, Landwirtschaft und interne Nährstoffspeicher (Sediment)
- Morphologische Veränderungen aufgrund von Küstendynamik und Erosion, Küstenschutz sowie Hafenausbau
- Hartsubstratmangel durch Steinfischerei und Verschlickung der Gewässer
- Toxische Belastungen aufgrund von Schadstoffeinträgen und Rüstungs-altlasten (Munitionsverklappung)

Insbesondere der Senkung der Nährstoffeinträge und damit Verlangsamung bzw. der Unterbindung der Eutrophierung muss in den kommenden Jahren im Zuge der Umsetzung der EU-WRRL mehr Aufmerksamkeit eingeräumt werden. Da hier das „Hauptproblem“ der Küstengewässer liegt, soll ihm in diesem Artikel besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

### 3 Reduzierung der externen Nährstoffeinträge

Die Degradation der Küstengewässer erfolgt durch die menschliche Nutzung der Gewässer selbst und ihrer Einzugsgebiete. Aus diesem Grunde kennzeichnen nicht nur die Eingriffe im Gewässer selbst, sondern implizit auch die Veränderungen im Einzugsgebiet - dem „Vorfluter“ der offenen Ostsee - die Degradation der Küstengewässer. BEHRENDT et al. (1999) bilanzierten erstmalig die Nährstoffeinträge aus den einzelnen Flussgebieten und ermittelten so die Nährstoffeinträge für die gesamte deutsche Ostseeküste. Im Zuge der Vereinbarungen von Helsinki (HELCOM 1988) sollten die Nährstoffeinträge in die Ostsee durch die Anrainerstaaten bis 1995 halbiert werden. Um diese Vorgabe zu erfüllen, wurden die Kläranlagen der größeren Städte mit Nährstoffeliminationsanlagen ausgestattet. Dadurch wurden um 95 und 80% reduzierte Einträge von Phosphor und Stickstoff aus kommunalen Kläranlagen erzielt (BACHOR 2005). Mit diesen Maßnahmen konnte aber nur für Phosphoreinträge die Zielstellung der Helcom erfüllt werden. Bei den Stickstoffeinträgen lagen die Reduzierungen in den meisten Gewässern nur bei 20 bis 30%. Die Stickstofffracht der Gewässer wird stärker durch die zuflussbedingten Einträge geprägt als durch die Einleitungen über Kläranlagen (BACHOR 2005). Trotz dieser Verringerung sind die Nährstofffrachten in die Ostsee somit weiterhin hoch. Eine weitere Reduzierung der Nährstoffeinträge – insbesondere der Stickstoffeinträge – ist nur durch geminderte Einträge aus dem Einzugsgebiet erreichbar. Eine weitere Belastungsquelle stellen die atmosphärischen Einträge dar. So hat Deutschland in den 1990er Jahren allein über 30% des aerogenen Eintrages von Stickstoff in die Ostsee verursacht.

Den Schwerpunkt der zu entwickelnden Maßnahmenpläne zur Umsetzung der EU-WRRL müssen daher Aktivitäten im Einzugsgebiet der Küstengewässer bilden. Hier müssen vor allem die Nährstofffrachten in den Zuflüssen weiter gesenkt werden. Dieses Ziel kann nur durch die Veränderung der landwirtschaftlichen Nutzung erreicht werden. Dazu sollten den Landwirten nicht nur Beschränkungen auferlegt, sondern Nutzungskonzepte erarbeitet werden, die Nährstoffretention und Bewirtschaftung intelligent verbinden. So wurde durch MEWES (2007) ein Modell zur Kosten-Wirksamkeitsanalyse entwickelt. Dieses nutzt das MONERIS-Modell (BEHRENDT et al. 2002) zur Berechnung der Nährstoffemission. Ziel ist es, die diffusen Nährstoffeinträge durch eine Optimierung der landwirtschaftlichen Nutzung zu reduzieren. Hierfür werden spezielle Beratungen der Landwirte durchgeführt und mit Hilfe der Kosten-Wirksamkeitsanalyse Maßnahmen vorgeschlagen, welche u. a. die Anlage von Gewässer-Uferrandstreifen, Stilllegungen von Flächen oder die Errichtung von Feuchtgebieten auf Niedermoorboden umfassen.

Einen weiteren Ansatz zur Minderung der diffusen Nährstoffeinträge ist die modellgestützte Düngeempfehlung für Landwirte (MIEGEL & ZACHOW 2006). In dem zugrunde liegenden MINERVA-Modell wird der standort- und witterungsspezifische Stickstoffbedarf von Pflanzenbeständen simuliert. Mit Hilfe der Simulation sollen den Landwirten Empfehlungen gegeben werden, welche einzusetzende Stickstoffmengen und Düngezeitpunkt betreffen. Weiterhin wurde durch die Simulation von Fruchtfolgegestaltungen nachvollziehbar, dass die Stickstoffverluste im Boden mit diesem klassischen Mittel der landwirtschaftlichen Praxis beträchtlich gesenkt werden können.

Die beiden angeführten Modelle zeigen auf, dass auch durch die Optimierung der landwirtschaftlichen Nutzung - in Analogie zur Flächenstilllegung - bedeutende Erfolge bei der Minderung von Nährstoffeinträgen erreicht werden können. Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit der Landwirtschaft stehen in diesem

Kontext somit nicht *per se* im Widerspruch. Nachhaltige Nutzungskonzepte müssen verstärkt in den Förderkriterien zur Steuerung der europäischen Landwirtschaftsentwicklung verankert werden.

Die Bilanzierungen unterstreichen, dass die Nährstoffbelastung der Gewässer weiter gesenkt werden muss, um die Zielsetzungen der EU-WRRL zu erreichen. Für die Entwicklung von Maßnahmenplänen sind im konkreten Fall zwei Fragestellungen besonders relevant:

- 1 Auf welches Niveau muss die Nährstoffbelastung durch externe Einträge gesenkt werden, um den „guten“ ökologischen Zustand zu erreichen?
- 2 Kann durch die Minderung der externen Nährstoffeinträge der „gute“ ökologische Zustand überhaupt erreicht werden oder müssen auch interne Maßnahmen ergriffen werden?

Zur Berechnung der geogenen bzw. natürlichen Nährstoffbelastung durch das Einzugsgebiet wurden unterschiedliche Modelle entwickelt bzw. Berechnungen durchgeführt. Die Modelle basieren in erster Linie auf Kalkulationen der Stickstoffbelastung. So modellierte BROCKMANN et al. (2006) unter Berücksichtigung des MONERIS-Modells die geogenen Flusseinträge für die Ostseeküste, welche durch die LAWA (LAWA 2007) übernommen wurden. Für die inneren Küstengewässer wurden mit anderen Modellen und durch andere Autoren sehr viel höhere Referenzwerte ermittelt (u. a. DAHLKE & SAGERT 2003, SCHERNEWSKI et al. 2006). Diese Kalkulationen zielten auf die Beschreibung der geogenen, natürlichen Nährstoffbelastung und kennzeichnen somit die Referenzzustände der Gewässer. Es bleibt die Frage offen, welche Belastungen für den „guten“ ökologischen Zustand vertretbar sind. Mit der Festlegung der Klassen „gut“ und „mäßig“ für den Bewertungsparameter wurde bei der ostseeweiten Interkalibrierung die Abweichung vom Referenzwert mit 50% veranschlagt. Dabei basiert die Berechnung der Referenzwerte für Chlorophyll auf den Stickstoffkonzentrationen. Dies wird so auch von SAGERT et al. (2008) im Bewertungsverfahren des Phytoplanktons umgesetzt. Hier erfolgte anhand der Regressionsanalysen zwischen Chlorophyll und Stickstoff auch eine Ausweisung von Stickstoffkonzentrationen für die Klassengrenzen. Eine solche pragmatische Herangehensweise verdeutlicht die Bedeutung der Festlegung von Referenzwerten für die gesamte Bewertung im Kontext der EU-WRRL.

Eine andere Möglichkeit der Prognose tolerierbarer Nährstoffbelastungen ergibt sich mit der Hydrographie der Gewässer. SCHLUNGBAUM & KRECH (2001) nutzten das Vollenweider-Modell, um die tolerierbaren Nährstoffbelastungen der Darß-Zingster Boddenkette (DZBK) zu ermitteln. Dieses Modell wurde für limnische Seen entwickelt und trägt der Tatsache Rechnung, dass diese Gewässer durch die P-Belastung gesteuert werden. Aus dem Verhältnis von mittlerer Tiefe zur Wasseraufenthaltszeit in Gegenüberstellung mit der flächenbezogenen P-Belastung wird die Trophiestufe der Gewässer abgeleitet. Nach diesen Berechnungen ist eine P-Belastung von weniger als  $0,12 \text{ g P m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  notwendig, um einen mesotrophen Zustand dieses Gewässers zu erreichen.

Reichen nun die Minderungen der externen Nährstoffeinträge aus, um den „guten“ ökologischen Zustand für die Küstengewässer zu erreichen? Für die DZBK wurde durch BIELE et al. (2007) eine Berechnung der aktuellen Nährstoffbelastungen sowie der Nährstoffreduktion durchgeführt. So liegt derzeit eine externe P-Belastung von  $27,4 \text{ t P a}^{-1}$  für dieses Gewässer vor. Die interne P-Belastung aus dem Sediment wurde mittels unterschiedlicher Abbaukonstanten ( $0,1$  und  $0,3 \text{ a}^{-1}$ ) nach PENN et al. (1995) mit  $105$  bzw.  $285 \text{ t P a}^{-1}$  bilanziert (DAHLKE 2006). Die tolerierbare

P-Belastung wurde, auf den Berechnungen von SCHLUNGBAUM & KRECH 2001 basierend, für dieses Gewässer mit  $118 \text{ t P a}^{-1}$  veranschlagt. Da ein natürlicher Phosphoreintrag von  $14,6 \text{ t P a}^{-1}$  für dieses Gewässer ermittelt wurde (Anwendung der Seen LAWA Richtlinie 1999 – BIELE et al. 2007), kann nur durch die Senkung der internen P-Einträge die Zielsetzung, ein mesotrophes Gewässer wiederherzustellen, erreicht werden. Allerdings verdeutlicht die große Schwankungsbreite der berechneten internen P-Belastung, dass derzeit unzureichende Kenntnisse darüber vorliegen, um welchen Betrag diese exakt gesenkt werden müssen.

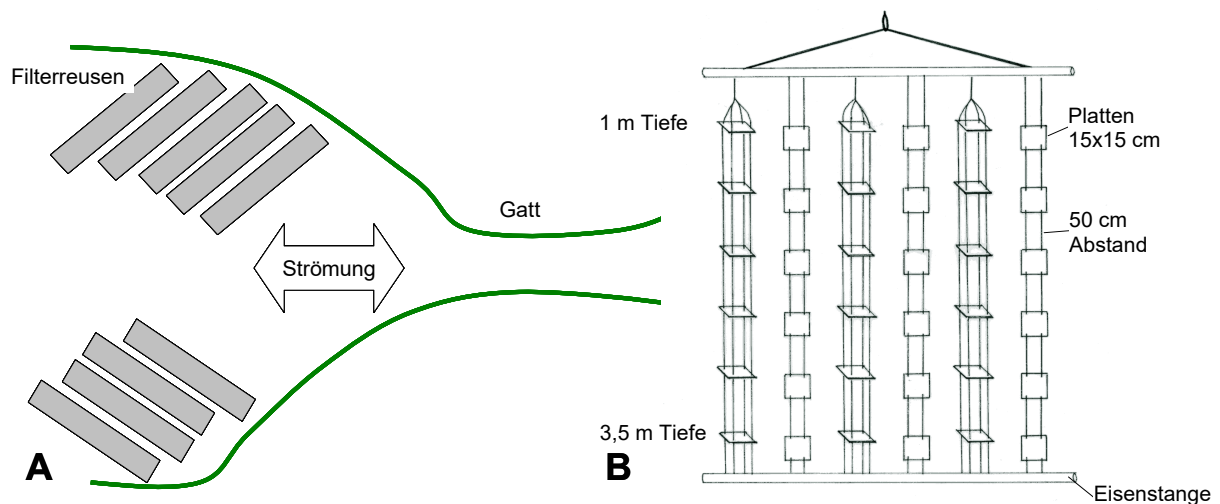
## 4 Reduzierung der internen Nährstoffbelastungen

Die Kalkulationen für die DZBK verdeutlichen, dass trotz einer bereits erzielten bzw. geplanten Minderung der externen Nährstoffeinträge für die meisten inneren Küstengewässer der „gute“ ökologische Zustand bis 2015 (und auch nicht im Verlängerungszeitraum bis 2027) ohne interne Sanierungsmaßnahmen (Restaurierung) nicht erreicht wird. Aufgrund der Größe der Küstengewässer sowie der intensiven Sedimenttransportprozesse werden die meisten in der Limnologie entwickelten und zur Anwendung kommenden Restaurierungsmaßnahmen zur Verminderung der Nährstoffrückführung als nicht praktikabel bzw. nicht finanzierbar angesehen. Es gibt derzeit zwei Konzepte zur Minimierung der internen Nährstoffbelastung.

### 4.1 Verminderung des Schwebstoffgehaltes und Nährstoffeliminierung durch den Einsatz von Filtrierern

Der Einsatz von Filtrierern wurde bisher für drei innere Küstengewässer diskutiert: für das Oderhaff mit der Wandermuschel *Dreissena polymorpha* (FENSKE 2005), für die Kieler Förde mit der Miesmuschel *Mytilus edulis* (FRERK & GÜLDENZOPH 2007) sowie mit beiden Organismen für die DZBK (RIELING et al. 2002). Die Autoren schlugen unterschiedliche Verfahrensweisen und Ansiedlungsobjekte vor (Abb. 1). Eine konkrete Umsetzung dieser Konzepte (Finanzierung) ist bisher nicht geplant. Ziel dieser Maßnahmen ist es, neben der Nährstoffelimination auch eine Verbesserung des Lichtklimas in den Gewässern zu erreichen, um eine schnelle bzw. intensivere Wiederbesiedlung mit Makrophyten zu ermöglichen.

Ein gemeinsamer Schwachpunkt aller vorliegenden Konzepte offenbart sich bei der Frage nach praktikablen Verfahren für die Entnahme und die Verwertung der Biomasse. Weiterhin ist beim Einsatz von Netzen und Leinen zur Kultivierung nicht auszuschließen, dass es unmittelbar unterhalb der Anlagen zu einer sehr starken Anreicherung von organischem Material und damit zur Faulschlamm-Bildung kommt. Diese kann wieder zur Veränderung der Sauerstoffverhältnisse und zur Erhöhung der internen P-Freisetzung führen.



**Abb. 1** Schematische Darstellung von Filterreusen (A - RIELING et al. 2002) und Anstiegsgestellen (B - FENSKE 2005).

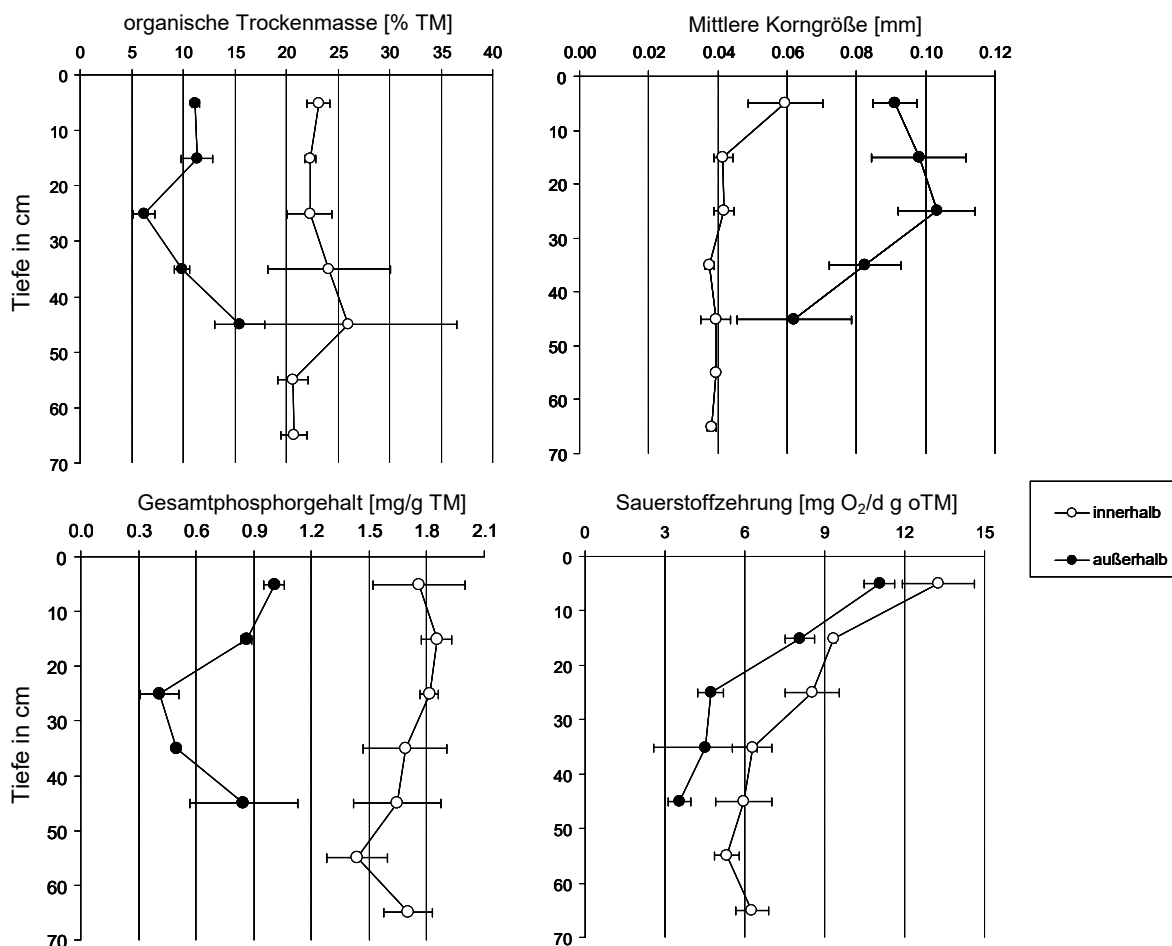
## 4.2 Stabilisierung und Entnahme von Gewässersedimenten

Bereits in den 1980er Jahren gab es erste Konzepte zur Gewässerrestaurierung für die DZBK und die Schlei, welche die lokale Schlammabnahme bzw. Schlammstabilisierung (Einsatz von Fällungsmitteln und Nitratzugabe) vorschlugen (FEIBICKE 1997, SCHLUNGBAUM et al. 1998). SCHLUNGBAUM et al. (2001) analysierten ihre Forschungsergebnisse und verglichen diese mit limnischen Verfahren. Danach sahen die Autoren nur die partielle Entschlammung sowie eine Erhöhung des Stoffaustuges in die Ostsee als geeignete Methoden an, um die interne Nährstoffbelastung zu senken. Die anderen Verfahren – u. a. Nährstoff-fällung, Sedimentoxidation, Biomanipulation – wurden dagegen für die flachen Boddengewässer als ungeeignet eingestuft. Obwohl lange Zeit selbst der erfolgreiche Einsatz von Fällungsmitteln in limnischen Flachgewässern sehr skeptisch diskutiert wurde, liegen hier nun erste erfolgreiche Anwendungen vor (Schwandter See in Mecklenburg-Vorpommern – MATHES 2008). Ob der erzielte Effekt auch in großflächigen Küstengewässern mit erhöhter Salinität zu erwarten ist, bleibt weiterhin kritisch zu hinterfragen.

Die Baggerung von Sedimentfallen (partielle Entschlammung über Sedimentationsräume) ist eine Restaurierungsmaßnahme, welche nicht aus der angewandten Limnologie übernommen wurde, sondern für die Flussmündungsgebiete in den Küstengewässern erstmalig in den 1980er Jahren anhand von drei Sedimentfallen erprobt wurde (KLEEBERG 1996). Ziel dieser Maßnahmen war es, den Stoffeintrag aus den Zuflüssen zu minimieren. Diese Sedimentfallen hatten aber nur eine Eliminationsleistung von 3 bis 21% für suspendiertes Material und von nur bis zu 4% für Phosphor (KLEEBERG 2005). Insgesamt muss eingeschätzt werden, dass die Eliminationsleistung der Sedimentationsfallen von den gewässerspezifischen Faktoren (Tiefe des Gewässers, Morphometrie der Fallen, Abfluss bzw. Fließgeschwindigkeit, Partikelgröße und -beschaffenheit) abhängig ist. Weiterhin besteht die Gefahr, durch Bildung anoxischer Bereiche an der Sediment-Wasser Kontaktzone wieder Nährstoffe (insbesondere Phosphat) freizusetzen. SCHLUNGBAUM et al. (1998) versuchten durch Zugabe von Fällungs- und Oxidationsmitteln eine Stabilisierung des organischen Materials in den Sedimentfallen zu erreichen. Diese

Versuche waren aufgrund verfahrenstechnischer Probleme nicht erfolgreich. In limnischen Gewässern wird durch die Ausbringung von „Depotstoffen“ versucht, eine zeitlich nachhaltige Nitratzugabe zu erreichen, um die Redoxverhältnisse im Sediment zu stabilisieren (WAUER et al. 2005).

Während die künstlichen Sedimentationsräume die Stoffeinträge aus den Zuflüssen nicht ausreichend minimieren konnten, belegen die Untersuchungen von MARTENSEN (2005) eine erhöhte Akkumulation von organischen und nährstoffreichen Sedimenten in der Barther Sedimentfalle. Auch nach 17 Jahren waren noch signifikante Unterschiede in der Sedimentzusammensetzung von Bereichen innerhalb und außerhalb der Sedimentfalle nachweisbar (Abb. 2). Neben der erhöhten Nährstoffbelastung und voneinander abweichenden Partikelgrößen konnte eine höhere Sauerstoffzehrung des Sedimentes in der Falle nachgewiesen werden, die einen geringeren Abbaugrad dieses Sedimentes belegt. GRACA et al. (2004) untersuchten künstliche Sedimentationsräume in der Puck Bay (Polen). Hier wurde eine bedeutend höhere Akkumulationsleistung in den Rinnen festgestellt, allerdings auch eine 7fach höhere P-Freisetzung gegenüber den umliegenden Sedimenten.



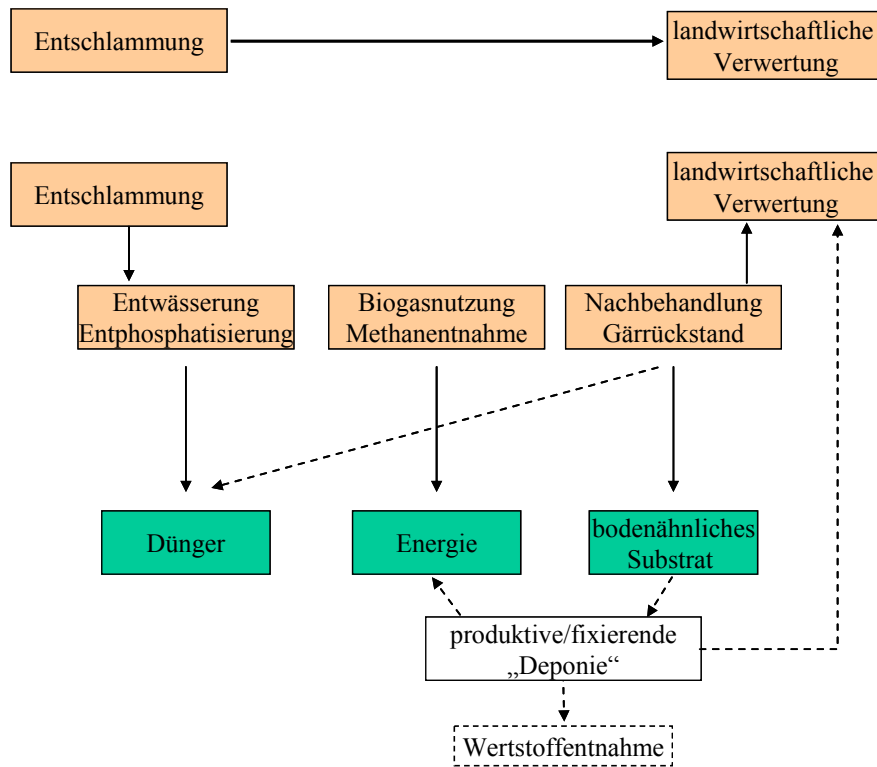
**Abb. 2** Vergleich chemischer Parameter der Sedimente innerhalb und außerhalb der Barther Sedimentfalle (MARTENSEN 2005).

In einer aktuellen Studie zur DZBK wird eine großflächige Entschlammung des inneren Teils der DZBK vorgeschlagen (BIELE et al. 2007). Hier wurde die Entnahme

von 6 bis 8 Mio. m<sup>3</sup> Schlicksediment errechnet, um eine Verbesserung des Gewässerzustandes zu erreichen. Während die technische Realisierung der reinen Baggerung aufgrund des gegenwärtigen technischen Standes als lösbar angesehen wird, ist die Unterbringung der entnommenen Schlammmenge problematisch. Eine landwirtschaftliche Verwertung dieser großen Mengen ist ökonomisch und logistisch nicht realisierbar. Durch die Autoren des Konzeptes werden darum eine P-Fällung und die Verklappung des Schlammes auf sogenannten Habitatinseln innerhalb des Gewässers vorgeschlagen (siehe auch QUANDT & KNAACK 2005). Hier wird auf Beispiele aus Holland bzw. an der amerikanischen Küste verwiesen. Diese Maßnahmen dort dienten aber nicht der Nährstoffreduzierung im Gewässer. Bisher fehlen Pilotstudien zu einem entsprechenden Vorhaben. Mit kalkulierten Kosten von ca. 40 bis 50 Mio. Euro ist eine Umsetzung dieses Konzeptes derzeit nicht finanzierbar. In den vorliegenden Kalkulationen bleibt bisher der Phosphor-Pool im Freiwasser unberücksichtigt. Dieser sollte stärker in die Bilanzierungen einbezogen werden. Es ist zu befürchten, dass allein durch diese Phosphormenge im Freiwasser und die dann wieder einsetzenden Wasser-Sediment Wechselwirkungen eutrophe Verhältnisse im System aufrechterhalten werden. Um dies Abschätzen zu können, sind weitere Untersuchungen zum Wasseraustausch mit der Ostsee erforderlich.

## **5 Biogenertische Verwertung von Biomasse und Gewässerschlamm**

Das Hauptproblem der internen Maßnahmen besteht in der Verwertung bzw. der Unterbringung von entnommener Biomasse bzw. des Gewässerschlammes. Vor allem zur Verwertung des Gewässerschlammes sollte über eine energetische Nutzung nachgedacht werden. Während aus gewässerökologischer Sicht die organischen Substanzen im Sediment als „Ballast“ und „Schadstoff“ aufgefasst werden, stellen sie allgemein ein großes Nährstoff- und Energiereservoir dar, welches sich zumindest in Jahrzehnten angesammelt hat. Die Verknappung sowie die Verteuerung von Rohstoffen und Energieträgern erfordern allgemein einen sorgsameren Umgang mit Rohstoffen und Energie, der mit dem Schlagwort „Recycling“ sowohl im Kontext von natürlichen Stoffflüssen als auch im Sinne menschlichen Wirtschaftens zusammengefasst werden kann. Im speziellen Fall der Sedimentnutzung ist aber die Entwicklung neuer Technologien bzw. die Anwendung oder Anpassung von etablierten Technologien aus anderen Bereichen erforderlich. So soll durch mehrere Zwischenstufen auf dem Weg von der Schlammmentnahme bis zur letztendlichen Lagerung bzw. Ausbringung auf landwirtschaftlichen Flächen eine effektivere stoffliche (Düngergewinnung) und energetische Verwertung (Biogasgewinnung) erreicht werden (Abb. 3). Ziel ist es, über entsprechende Verwertungskaskaden eine verbesserte Nutzung zu erreichen, um eine ökologisch und energetisch sinnvolle Strategie mit der Begrenzung von Restaurierungskosten zu verbinden. Hierfür liegt ein erstes Konzept bzw. eine Projektskizze vor (SCHOOR & SELIG 2006). Von der Vielfalt solcher Kaskaden wird es in der Zukunft abhängen, ob unter den spezifischen Bedingungen eines jeden zu restaurierenden Gewässers „sinnvolle“ Kaskaden ausgewählt und kombiniert werden können.



**Abb. 3** Schema von potenziell relevanten Bestandteilen und Produkten einer nachhaltigen Behandlung von Gewässerschlamm (Prozesslinien begrenzt und stark vereinfacht). Auf die Darstellung der klassischen, in der Regel untauglichen „Deponielösung“ wurde verzichtet.

## 6 Wiedereinbringung von Hartsubstraten

Während für die inneren Küstengewässer vor allem die Folgen der Eutrophierung Ursache der Degradation sind, stellt der Verlust von Hartsubstraten ein sehr spezifisches Problem für die äußeren Küstengewässer dar. Durch die Steinfischerei wurden bis 1976 etwa 3,5 Mio. t Steine aus den äußeren Schleswig-Holsteinischen Küstengewässern entnommen (KAREZ & SCHORIES 2005). Dadurch wurde vielen Makroalgen, u. a. dem Blasentang *Fucus vesiculosus*, das Substrat und somit der Lebensraum entzogen. Für die Mecklenburger Küste liegen keine Daten vor.

Eine Studie von RUDOLPHI (2007) ermittelte die Kosten für die Wiedereinbringung von Steinen vor der Küste von Schleswig-Holstein. Hier wurden potenzielle Gebiete betrachtet, für die durch historische Quellen eine Existenz von Steinfeldern bekannt war. Für diese Gebiete wurde ein aktuelles „Steindefizit“ von 3,5 Mio. t berechnet. Für die Beschaffung von Steinmaterial wurden unterschiedliche Bezugsmöglichkeiten (Natursteinkauf, Bergbau) geprüft. Dabei schwankten die Kosten zwischen 40 und 50 Euro pro Tonne. Für die Einbringung der berechneten 3,5 Mio. t wären somit 140 Mio. Euro notwendig.

Während im Sublitoral Hartsubstrate erwünscht sind, sind Eindeichungen durch Steinpackungen eher ein unerwünschter Effekt. Der Küstenschutz erfordert solche Eindeichungen, jedoch fehlen so ausgedehnte episodische Überflutungsräume, und dies wirkt sich nachhaltig auf die Strandfauna aus. Künstliche Hartsubstrate ermöglichen hingegen die Ansiedlung von Makroalgen und Invertebraten, welche für die Uferbereiche vieler Düneninseln untypisch sind. Aus diesem Grund favorisieren

REISE & BUSCHBAUM (2007) Sandaufspülungen als ökologische und auch ökonomisch sinnvolle Alternative zur Eindeichung mittels Steinmauern. Werden solche Anspülungen nicht häufiger als alle drei Jahre durchgeführt, ist eine Ausbreitung und Anpassung der Strandfauna möglich (MENN et al. 2003).

## 7 Zusammenfassung

Da für ca. 80% der Küstengewässer (insbesondere die inneren Küstengewässer) der „gute“ ökologische Zustand derzeit nicht erreicht wird, müssen für die Umsetzung der EU-WRRL Maßnahmenpläne entwickelt werden. Besonderes Augenmerk gilt den Flusseinzugsgebieten, in denen der Eintrag aus landwirtschaftlichen Flächen reduziert werden muss. Eine Verbesserung des ökologischen Zustandes der inneren Küstengewässer wird aber ohne die Einbeziehung interner Maßnahmen nicht innerhalb der nächsten 15 Jahre erreichbar sein. Bisher sind entsprechende Maßnahmen nicht in die Maßnahmenpläne der Landesämter integriert. Neben den derzeit noch zu erwartenden problematisch hohen Kosten besteht das Problem, dass bisher keine praktischen Erfahrungen mit großtechnischen Maßnahmen notwendiger Größenordnung bestehen. Die Entwicklung neuer Technologien für die bioenergetische und stoffliche Verwertung der zu entnehmenden Biomassen könnte aber künftig zur verbesserten Effizienz der notwendigen Maßnahmen führen und darüber hinaus wirtschaftliche Impulse geben.

### Danksagung

Die Analysen zu den Sanierungs- und Restaurierungskonzepten der Küstengewässer erfolgten im Rahmen der Arbeiten im BMBF Projekt „Erarbeitung eines ökologischen Gesamtansatzes für die Bewertung der Küstengewässer an der deutschen Ostseeküste entsprechend der Vorgaben der EU-WRRL“ (FKZ: 0330678). Die Durchführung der drei Workshops wurde mit Hilfe von logistischer und finanzieller Unterstützung des Landesamtes für Natur und Umwelt Schleswig-Holstein (LANU) sowie des Landesamtes für Umwelt, Natur und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (LUNG) ermöglicht. Der dritte Workshop in Kiel wurde von Kollegen des IfM-GEOMAR (federführend Heye Rumohr) organisiert.

### Literatur

- Bachor, A., 2005. Nährstoffeinträge in die Küstengewässer Mecklenburg-Vorpommerns - eine Belastungsanalyse. Rostocker Meeresbiologische Beiträge 14: 17-32.
- Behrendt, H., M. Bach, P. Huber, M. Kornmilch, D. Opitz, W. G. Pagenkopf, O. Schmoll, G. Scholz, U. Schweikart & R. Uebe, 1999. Nährstoffbilanzierung der Flußgebiete Deutschlands. Texte des Umweltbundesamtes, Berlin, 288 pp.
- Behrendt H, M. Bach, R. Kunkel, D. Opitz, W. D. Pagenkopf, G. Scholz & F. Wendland, 2002. Quantifizierung der Nährstoffeinträge der Flussgebiete Deutschlands auf der Basis eines harmonisierten Vorgehens. Abschlußbericht zum UBA-Projekt 29922285, 195 pp.
- Biele, S., M. Thomas, T. Quandt & B. Voigt, 2007. Integriertes Restaurierungs- und Baggertgutverwertungskonzept Darß-Zingster Boddenkette. Rostocker Meeresbiologische Beiträge 17: 7-17.
- Brockmann, U., D. Topcu & M. Schütt, 2006. Referenz- und Schwellenwerte für die Küsten- und Übergangsgewässer an der deutschen Nord- und Ostseeküste. Bericht, BLM-AG
- Dahlke, S. & S. Sagert, 2003. Studie zur Ermittlung von Hintergrundwerten bzw. der natürlichen Variabilität von chemischen und biologischen Messgrößen im Meeresmonitoring, Teilprojekt Ostsee - Teilbericht Makrophyten und Phytoplankton. UFOPLAN 299 25 265/02: 56 pp.

- Dahlke, S., 2006. Sequentielle Phosphorextraktion - Teilprojekt zu „Integriertes Restaurierungs- und Baggergutverwertungskonzept Darß-Zingster Boddenkette“. Forschungsbericht, 29 pp.
- Feibicke, M., 1997. Impact of Nitrate Addition on Phosphorus Availability in Sediment and Water Column and on Plankton Biomass: Experimental Field Study in the Shallow Brackish Schlei Fjord (Western Baltic, Germany). *Water, Air and Soil Pollution* 99: 445-456.
- Fenske, C., 2005. Renaturierung von Gewässern mit Hilfe der Wandermuschel *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771). *Rostocker Meeresbiologische Beiträge* 14: 55-68.
- Frerk, I. & C. Gülden-zoph, 2006. Machbarkeitsstudie "Sanierung durch Kultur". *Rostocker Meeresbiologische Beiträge* 17: 111-114.
- Graca, B., D. Burska & K. Matuszewska, 2004. The impact of dredging deep pits on organic matter decomposition in sediments. *Water, Air, and Soil Pollution* 158: 237-259.
- Helcom, 1988. Activities of the Commission 1987. Including: Declaration on the Protection of the marine Environment of the Baltic Sea. *Baltic Sea Environment Proceedings* 26: 1-170.
- Hupfer, M. & B. Scharf, 2002. Seentherapie: Interne Maßnahmen zur Verminderung der Phosphorkonzentration. In Steinberg C. E. W., W. Calmano, H. Klapper, R. D. Wilken (eds), *Handbuch Angewandte Limnologie - ecomed-Verlag, Landsberg Kap. VI-2.1.: 1-67.*
- Jäger, D. & R. Koschel, 1995. Verfahren zur Sanierung und Restaurierung stehender Gewässer. *Limnologie Aktuell, Band 8*, 330 pp.
- LAWA, 2007. AO-Rahmenkonzeption Monitoring Teil B: Bewertungsgrundlagen und Methodenbeschreibungen (Arbeitspapier II) Hintergrund- und Orientierungswerte für physikalisch-chemische Komponenten Stand 7.03.2007: 1-13.
- Karez, R. & D. Schories, 2005. Die Steinfischerei und ihre Bedeutung für die Wiederansiedlung von *Fucus vesiculosus* in der Tiefe. *Rostocker Meeresbiologische Beiträge* 14: 85-108.
- Kleeberg, A., 1996. Comparative investigations of the efficiency of dredged sedimentation traps for the elimination of phosphorus and suspended matter in river mouth areas: A case study. *Estuaries* 19: 21-30.
- Kleeberg, A., 2005. Effektivität gebaggerter Sedimentationsfallen zur Elimination von Phosphor und suspendiertem Material in Flussmündungsgebieten. *Rostocker Meeresbiologische Beiträge* 14: 43-54.
- Mathes, J., 2008. das Sanierungs- und Restaurierungsprogramm der Seen in Mecklenburg-Vorpommern. Abstractband zum 13. Gewässersymposium des Landesamtes für Umwelt, Naturschutz und Geologie, 18-21
- Martensen, G., 2005. Sedimentuntersuchungen zur Wirkung von Sedimentationsfallen in Flußmündungsgebieten am Beispiel der Darß-Zingster Boddenkette. Diplomarbeit, Universität Rostock, 74 pp.
- Menn, I., C. Junghans & K. Reise, 2003. Bureid alive: Effects of beach nourishment on the infauna of an erosive shore in the North Sea. *Senckengiana maritime* 32: 125-145.
- Mewes, M., 2006. Stoffausträge aus der Landnutzung und deren Vermeidungskosten – Ostseeinzugsgebiet von Deutschland. *Rostocker Meeresbiologische Beiträge* 15: 75-86.
- Miegel, K. & B. Zachow, 2006. Abbau von Stickstoff-Bilanzüberschüssen durch modellgestützte Düngeempfehlung. *Rostocker Meeresbiologische Beiträge* 15: 49-60.
- Penn, M. R., M. T. Auer, E. L. van Orman & J. Korienek, 1995. Phosphorus Diagenesis in Lake Sediments: Investigations using Fractionation Techniques. *Marine Freshwater Research* 46: 89-99.
- Quandt, T. & B. Knaack, 2005. Entnahme organischer Sedimente und Chancen seiner Unterbringung - dargestellt am Beispiel Ribnitzer See / Saaler Bodden. *Rostocker Meeresbiologische Beiträge* 14: 83-94.
- Reise, K. & C. Buschbaum, 2007. Mehr Sand statt Stein für die Ufer der Nordseeküste. *Rostocker Meeresbiologische Beiträge* 17: 77-86.
- Rieling, T., G. Graf & H. Schubert, 2002. Nachhaltige Verbesserung der Wasserqualität in degradierten Küstengewässern der südlichen Ostsee durch die Freilandkultivierung filtrierender Evertebraten. BMBF-Antragsskizze "Forschung für ein nachhaltiges Küstenzonenmanagement", 19 pp.
- Ripl, W., 1986. Restaurierung der Schlei. Bericht über ein Forschungsvorhaben. Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten, Kiel: D 5.

- Rudolphi, H., 2007. Kostenkalkulation und Ermittlung von Vorzugsgebieten zur Wiedereinbringung von natürlichen Hartsubstraten in die Ostsee. Rostocker Meeresbiologische Beiträge 17: 87-90.
- Sagert, S., U. Selig & H. Schubert, 2008. Phytoplanktonindikatoren zur ökologischen Klassifizierung der deutschen Küstengewässer der Ostsee. Rostocker Meeresbiologische Beiträge 20: 45-69.
- Schernewski, G., T. Neumann & M. Wielgat, 2006. Referenzwerte für Hydrochemie und Chlorophyll-a in deutschen Küstengewässern der Ostsee. Rostocker Meeresbiologische Beiträge 15: 7-23.
- Schoor, A. & U. Selig, 2006. Optimierte Verwertung von Gewässerschlamm - Integrierende Ansätze zur Gewässerrestaurierung durch Nährstoff- und Energierecycling: Projektskizze an das Landwirtschafts- und Umweltministerium Mecklenburg-Vorpommern, 12 pp.
- Schlunbaum, G., H. Baudler & R. Neumann, 1998. Sanierungs- und Restaurierungskonzepte für die Bodden und Haffe: Oxidative Schlammbehandlung mit Nährstofffestlegung in hocheutrophen flachen Küstengewässern der Ostsee (Mecklenburg - Vorpommern). DBU-Forschungsprojekt Az 03791, 80 pp.
- Schlunbaum, G., H. Baudler, M. Krech & B. Kwiatkowski, 2001. Die Darß Zingster Boddenkette – Eine Studie. Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie, Schriftenreihe, Heft 1: 1-209.
- Schlunbaum, G. & M. Krech, 2001. Ostsee-Übergangsgewässer in der EU-Wasserrahmenrichtlinie: Hintergrundkonzentrationen für Nährstoffe in Förden, Bodden und Haffen. Wasser und Abfall 5: 16-23.
- Thiele, V. & D. Mehl, 1995. Ökologisch begründete Sanierungskonzepte für das Gewässer-einzugsgebiet der Warnow (Mecklenburg-Vorpommern). Endbericht zum BMBF-Forschungs-vorhaben 0339517A, Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt und Natur Mecklenburg-Vorpommern 2: 1-158 und Anhang.
- Wauer, G., T. Gonsiorczyk, P. Casper, K. Kretschmer & R. Koschel, 2005. Sediment treatment with a nitrate-storing compound to reduce phosphorus release. Water Research 39: 494-500.