

3.7 Klimaveränderung und Eutrophierung

UWE BROCKMANN & DILEK TOPCU

Climate change and eutrophication: Anthropogenic eutrophication is the discharge of elevated concentrations of nutrients and organic matter to the sea. It causes especially in inshore and near coastal waters significant problems, such as elevated phytoplankton production, reduction of the light climate with limitation of macrophytes, accumulation of organic matter in bottom waters, oxygen depletion in bottom waters causing fish kills and kills of benthic organisms. Climate warming will increase eutrophication by elevated nutrient discharges, extension of stratification by sea surface warming, prolonging the enclosure and oxygen depletion of bottom waters. By oxygen depletion complete benthic and pelagic ecosystems will be destroyed. The climatic enforcing of eutrophication processes requires an acceleration of measures to reduce nutrient discharges.

Klimaveränderung bedeutet für uns heute die durch Treibhausgase verursachte Erwärmung unserer Umwelt, eine Erwärmung, die die physikalischen und biogeochemischen Prozesse im Oberflächenwasser und damit die Eutrophierungsprozesse beeinflussen wird. Oberflächengewässer sind die flachen Gewässer von Flüssen, Seen und Küsten, die von der Eutrophierung, der Überdüngung der Gewässer durch Nährstoffe (Phosphat, Nitrat, Ammonium, Harnstoff und andere organische Verbindungen aus Landwirtschaft, Industrie, Abwässern) besonders betroffen sind, da dort das Wachstum des Phytoplanktons nicht durch das Licht limitiert ist und zusätzliche Einträge von Nährstoffen direkt zu einer verstärkten Vermehrung des Phytoplanktons führen.

Damit wird eine Kaskade von Effekten ausgelöst (COLIN et al. 2002, ÖSTERBLOM et al. 2007): In überdüngten flachen Gewässern behindern dichte Planktonwolken die Lichteinstrahlung und damit die Entwicklung von bodenlebenden Makrophyten, die sich unter normalen Bedingungen bis in Tiefen von über 40 m entwickeln können und den Lebensraum einzigartig vielfältiger Biotope bilden. Zusätzlich kann es zur Bildung von Grünalgentepichen kommen, die ebenfalls das Lichtklima einschränken (REISE & SIEBERT 1994). Durch die Überdüngung kommt es häufig im späten Frühjahr zu Silikat-Mangel. Dann können sich keine Kieselalgen entwickeln, und zahlreiche Arten von Flagellaten, unter denen auch giftige Arten sein können, werden dominant. Blüten (Massenvermehrungen) von Kieselalgen oder Flagellaten führen zur Bildung grosser Biomassen, organischer Substanzen, die nach dem Verbrauch der Nährstoffe in das Bodenwasser absinken und dort von Bakterien unter Sauerstoffverbrauch abgebaut werden.

Da dort meistens nicht genügend Licht eindringt, können sich dort keine Pflanzen und auch kein Phytoplankton entwickeln, das Sauerstoff produzieren könnte. Also kommt es zum Sauerstoffmangel, wenn das Bodenwasser unter einer stabilen Schichtung abgeschlossen bleibt, was Wochen bis Jahre dauern kann,

wie in der zentralen Ostsee beispielsweise. Es kann sogar Schwefelwasserstoff gebildet werden. Unter diesen Bedingungen sterben oder fliehen Fische, und die bodenlebenden Tiere gehen ein. Gleichzeitig finden spezifische Stoffumsetzungen statt, wie die Bildung von Sulfiden und die Freisetzung von Phosphat aus dem Sediment. Daher ist die Erschöpfung der Sauerstoffvorräte einer der gravierendsten Effekte der Eutrophierung, da das gesamte Ökosystem betroffen ist. (CONLEY et al. 2009, ZHANG et al. 2010)

Anhaltender Sauerstoffmangel im Bodenwasser wurde sogar in der eigentlich stürmischen (durchmischten) Nordsee in den Sommer- und Herbstmonaten immer wieder beobachtet (DETHLEFSEN & VON WESTERNHAGEN 1983, BROCKMANN et al. 1990) und ist leider in den tiefen Becken der Ostsee zum Dauerzustand geworden, wobei an den menschlichen Einflüssen kaum ein ernstzunehmender Zweifel besteht (DIAZ & ROSENBERG 2008).

Es gibt daher zahlreiche Bemühungen, die Eutrophierung durch eine Verminderung der Nährstoffeinträge einzuschränken und schließlich ganz zu vermeiden. Das ist nicht schnell zu erreichen, da die Überdüngung unserer Gewässer auch zu einer Nährstoffanreicherung im Grundwasser geführt hat und der massiven Einschränkung der Einträge ebenso massive wirtschaftliche Interessen mit ihren Lobbyverbänden gegenüberstehen.

Da die Küstengewässer, beginnend bereits in den Ästuaren, im steten Austausch mit benachbarten, offenen Gewässern stehen, ist aus der Eutrophierung ein internationales Problem geworden, das für die angrenzenden Meere untersucht wird, für die Ostsee durch HELCOM (2009) und für die Nordsee durch OSPAR (2008). Durch OSPAR (2003) wurde beispielsweise auch die Forderung aufgestellt, die Nährstoffeinträge um 50% in Bezug auf 1985 zu senken, eine Forderung, die für die kontinentaleuropäische Nordseeküste weitgehend erreicht wurde. Da aber die Einträge 1985 im Vergleich zu natürlichen Bedingungen auf einem sehr hohen Niveau lagen (95% darüber), sind mit der 50-

prozentigen Verminderung die küstennahen Gebiete noch nicht erkennbar entlastet worden, und die Ausdehnung der Großalgen ist weiterhin eingeschränkt, die Entwicklung von z.T. giftigen Flagellaten blüht (im wahrsten Sinne des Wortes) immer noch im Sommer, und Gebiete mit ausgedehntem Sauerstoffmangel werden weiterhin beobachtet. Hinzu kommt, dass es durch die Vertiefung der Fahrrinnen und der damit verstärkten Strömungen und Schwebstoffmengen bereits in den Ästuaren zur Sauerstoffzehrung kommt und das unter-sättigte Wasser auch im Küstenbereich die Eutrophierungsprobleme verstärkt.

Mit der erwarteten Erwärmung des Klimas werden sich viele Eutrophierungsprozesse verstärken, und die Anstrengungen, die Nährstoffeinträge zu vermindern, müssen vervielfacht werden, wenn wir die marinen Ökosysteme in einen guten Zustand überführen wollen, wie von der EU in ihrer Wasserrahmenrichtlinie für die Küsten und Meeresschutzstrategie für das offene Meer gefordert (EC 2002, 2009).

Beide Prozesse, die Klimaerwärmung und die Eutrophierung, werden durch übermäßige Produktion von Abfallstoffen erzeugt und beschleunigt: CO₂, Methan, N₂O für das Klima und Abwässer mit hohen Gehalten an organischen sowie mineralischen Düngern für die Eutrophierung.

Klimaeffekte auf Eutrophierungsprozesse

Folgen wir schrittweise den Effekten des Klimawandels auf die Eutrophierungsprozesse, so werden nach den Voraussagen der Klimaforscher die Niederschläge zunehmen, da durch die Erwärmung der geo-atmosphärische Kreislauf des Wassers beschleunigt wird. Dies führt zu erhöhten Auswaschungen von oberflächennahen Nährstoffen (Gülle, Mineraldüngung) in die Fließgewässer. Dort erhöhen sich die Konzentrationen. Die Folgen sind eine Verstärkung der Nährstofffrachten durch die erhöhten Konzentrationen und durch die erhöhten Abflussmengen des Süßwassers in die Küstengewässer. Zu befürchten ist, dass den Auswaschungsverlusten in den Böden mit einer Erhöhung der Düngung begegnet wird (RABALAIS et al. 2009).

Durch verstärkte Erosion, wechselnde Auswaschung und Austrocknung kommt es zu einer beschleunigten Remobilisierung und damit weiterhin zu einer Erhöhung der Nährstoffeinträge. Durch erhöhte Fließgeschwindigkeiten wird die Selbstreinigungskapazität der Fließgewässer vermindert, denn beispielsweise die Denitrifizierung, durch die Stickstoff aus dem Wasser als N₂ in die Atmosphäre überführt wird, ist stark von der Verweilzeit in den Gewässern abhängig (NIXON et al. 1996). Ebenso wird die Ablagerung in Sedimenten

vermindert, und immer mehr Nährstoffe erreichen die Küstengewässer.

Erhöhte Schwebstoffführungen durch erhöhte Abflüsse werden das Lichtklima in den Gewässern weiter einschränken und damit die Dominanz der Abbauprozesse mit begleitender Sauerstoffzehrung und Phosphatfreisetzung aus Sedimenten fördern (FULWEILER & NIXON 2009). Der unter anoxischen Bedingungen gebildete Schwefelwasserstoff bildet Eisensulfide und entzieht damit das Eisen den Phosphat-Eisen-Komplexen der Sedimente. Dadurch wird Phosphat freigesetzt. Dieser Prozess wird regelmäßig im Sommer im Wattenmeer beobachtet, wenn die Abbauprozesse der Schlicksedimente, die reich an organischem Material sind, ihren saisonalen Höhepunkt erreichen (VAN BEUSEKOM et al. 1999). Hiermit wird saisonal die Phosphor-Überdüngung verstärkt und damit bisherige Bemühungen, durch die Einführung phosphatfreier Waschmittel und Phosphatfällungen in den Klärstufen, zeitweise wieder zunichte gemacht.

BIANCI & ALLISON (2009) sehen im System der Flussfahnenfronten einen Anzeiger für globale Umweltänderungen in Bezug auf Eutrophierung und die Entstehung von Sauerstoffmangel im Bodenwasser. Erhöhte Süßwassereinträge werden die Ausdehnung der nährstoffreichen Flussfahnen vergrößern, die sich je nach Windrichtung bis weit in die offene Deutsche Bucht erstrecken können (BROCKMANN & EBERLEIN 1986). Da in der Umgebung der Flussfahnen die Nährstoffkonzentrationen geringer sind, ist das zunächst in der Flussfahne geförderte Phytoplanktonwachstum bald begrenzt, und die absinkende Biomasse erreicht unterschichtetes Bodenwasser und verstärkt direkt den lokalen Sauerstoffabbau.

Eingeschleppte fremde, wärmeliebende Algenarten werden heimisch und können Nahrungsnetze komplett verschieben und damit den Stoffumsatz im Netz einschränken (HAYS et al. 2005). Auch das führt zu einer Anreicherung organischen Materials und Erhöhung der bakteriellen Abbauprodukte unter Sauerstoffverbrauch. Es wird vermutet, dass infolge von Eutrophierung und Klimawandel die Vermehrung giftiger Algenarten zunimmt und damit die Giftigkeit von Muscheln, die in Küstennähe kultiviert werden (JAMES et al. 2010). Die Nutzung von Muschelkulturen wird damit eingeschränkt, denn die Muscheln werden im Sommer regelmäßig auf ihre Marktfähigkeit hin untersucht. Unter den Phytoplanktonarten gibt es auch solche, die sich von organischen Stoffen ernähren können. Es gibt auch Hinweise darauf, dass die beobachtete Zunahme von Quallen auf Eutrophierungseffekte und Klimawandel zurückzuführen ist (DONG et al. 2010). Auch für die Nordsee wird eine Zunahme der Quallenpopulation erwartet (ATTRILL et al. 2007).

Die Entwicklung von Flagellaten wird durch Überschüsse von N und P gegenüber Silikat begünstigt. Gleichzeitig werden sie begünstigt durch längere und ausgedehntere Schichtung, denn sie sind im Gegensatz zu den Kieselalgen in der Lage, Vertikalwanderungen durchzuführen, und können damit von der Trennung der lichtreichen Deckschicht von der nährstoffreichen Bodenschicht profitieren. Oft reicht es aus, wenn sie sich im Bereich der Dichteschicht aufhalten.

Nährstoffe und Biomasse können sich im Meer an horizontalen Schichten und vertikalen Fronten zwischen unterschiedlichen Wassermassen anreichern. Sie können außerdem über weite Distanzen von den Strömungen transportiert werden. Durch Klimaänderungen veränderte Schichtungs- und Strömungsprozesse können damit Eutrophierungsprobleme verlagern.

Ganz direkt wird die Klimaerwärmung zu einer saisonal früheren, länger andauernden und stärkeren Erwärmung der Wasseroberflächen führen (Abb. 3.7-1). In tieferen Küstengewässern und der offenen See bilden sich Temperatursprungschichten, in denen die Wassertemperatur zum Bodenwasser hin um einige Grade niedriger ist (SHARPLESS et al. 2006). Dieser Prozess der sommerlichen Deckschichtbildung ist üblicherweise verbunden mit dem Abschluss bodennaher Schichten vom Gasaustausch mit der Atmosphäre. Durch die Temperaturerhöhung wird die Schichtung weiter stabilisiert, es können sich auch mehrere Temperatursprungschichten übereinander bilden, die dann auch nicht durch kurze Gewitterstürme aufgebrochen werden können. Damit werden sich die Wassermas-

sen über dem Meeresboden mit Sauerstoffmangel zeitlich und räumlich weiter ausdehnen und der Sauerstoffmangel wird durch verlängerten Abschluss des Bodenwassers intensiviert. Dies führt zu einer katastrophalen Veränderung der betroffenen Ökosysteme. Sauerstoffmangel ist zwar während aller geologischen Zeiträume aufgetreten, in tiefen Becken, in der Nähe von Auftriebsgebieten und in tiefen Fjorden, doch wird er seit Jahrzehnten in vielen Gebieten durch die Eutrophierung erheblich verstärkt.

Nahe den Küsten erzeugen nicht nur Flusseinträge erhöhte Nährstoffgradienten, sondern auch aufquellendes Tiefenwasser kann nährstoffreiches Wasser an die Oberfläche bringen und damit Eutrophierungsprozesse auslösen (LEVIN et al. 2009). Auftriebsprozesse werden z.B. von ablandigen Winden gesteuert und durch stabile Temperatur-Sprungschichten eingeschränkt. Eine Klimaänderung wirkt also nicht unbedingt fördernd für Auftriebsprozesse. Bei küstennahen Auftriebsprozessen wird es schwierig, den Ursprung der Nährstoffe nachzuweisen, doch mit Hilfe der Isotopenanalyse gelingt es, anthropogene und natürliche Nährstoffbeiträge zu unterscheiden (SERNA et al. 2010). Die Klimaänderung wird sich aber negativ auf alle Sauerstoffmangelgebiete auswirken, gleichgültig ob sie überwiegend natürlichen Ursprungs sind oder anthropogen verursacht werden.

Untersuchungen haben gezeigt, dass biologische Effekte einer Sauerstoffverarmung bereits ab 15% Untersättigung nachweisbar sind (TOPCU et al. 2009). Stärkerer und länger andauernder Sauerstoffmangel führt

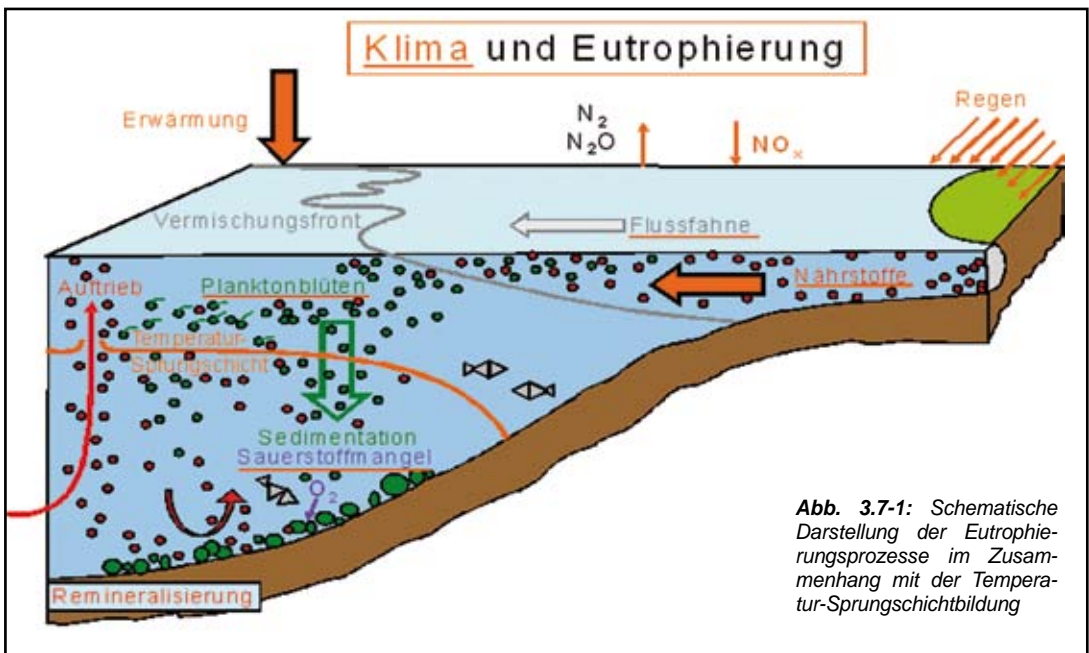


Abb. 3.7-1: Schematische Darstellung der Eutrophierungsprozesse im Zusammenhang mit der Temperatursprungschichtbildung

zum Absterben von Bodenorganismen und Fischen (DETHLEFSEN & VON WESTERNHAGEN 1983). Damit treten nachhaltige Störungen der regionalen Ökosysteme auf, die zu einer Verarmung und Veränderung der Bodenfauna führen, da sich resistere Arten von den Rändern der betroffenen Gebiete her ausbreiten werden.

Die Entwicklung sauerstoffarmer Zonen im Bodenwasser ist durch die Überdüngung zu einem globalen Problem geworden, das zur Zerstörung mariner Ökosysteme führt (ZHANG et al. 2010). CONLEY et al. (2009) führen aus, dass die Empfänglichkeit von Küsten-Ökosystemen für Eutrophierungsprozesse durch eine Klimaveränderung zunehmen wird, dass die Bildung von sauerstofffreien Zonen schwere Störungen des marinen Ökosystems darstellen, die nicht nur den Lebensraum von Nutztieren erfassen, sondern auch die gesamte Wasserchemie verändern wie beispielsweise die Denitrifizierung, die in vielen Gebieten der Stickstoffüberdüngung entgegenwirkt. Dies wäre ein weiterer negativer Rückkopplungseffekt.

Häufig wurden die mit der Sauerstoffzehrung verbundenen Prozesse in der Ostsee untersucht, in der die Probleme wegen der anhaltenden Schichtung besonders gravierend sind (LOZAN et al. 1996, DIAZ & ROSENBERG 2008, CONLEY et al. 2007). Es wurde trotz relativierender Studien, in denen physikalische Aspekte als Gründe diskutiert werden (CONLEY et al. 2002), schließlich festgestellt, dass der ausgedehnte Sauerstoffmangel im Bodenwasser der Ostsee seinen Ursprung überwiegend in der Überdüngung und Einleitung unzureichend geklärter Abwässer hat (ZILLEN & CONLEY 2010). In der Ostsee besteht ein zusätzliches Problem darin, dass die aus dem Bodenwasser freigesetzten Phosphatmengen im Spätsommer zur Massenentwicklung giftiger Cyanobakterien führt, die Luftstickstoff zu binden vermögen (KONONEN & LEPPÄNEN 1996, ZILLEN & CONLEY 2010). Damit wird die regionale Eutrophierung noch verstärkt.

Die Ausdehnung und die Dauer von Sauerstoffmangel reguliert in der Ostsee den Umsatz der zentralen Biomasse-Elemente Phosphor und Stickstoff sowohl im Sediment als auch in der Wassersäule (CONLEY et al. 2009). Der Austausch von Wassermassen mit der Nordsee ist für die Dauer der Schichtung in der Ostsee von zentraler Bedeutung. Da dieser Austausch wetterabhängig ist, wird er ebenfalls damit auch von Klimaveränderungen beeinflusst.

Ein bisher wenig beachteter Aspekt ist die biologisch gesteuerte Freisetzung von Nährstoffen aus Sedimenten, abgesehen von turbulenter Resuspendierung oder dem Wechsel von oxischem und anoxischem Milieu. Die Bioturbation, die Durchdringung und Aufarbeitung von Sedimenten durch Würmer und andere bo-

denlebende Organismen beeinflusst die Austauschraten erheblich. Da die Bioturbation temperaturabhängig ist, bei 21°C wird tiefer gebohrt als bei 15°, ist auch dieser Prozess, der den Nährstoffkreislauf über sandigen Sedimenten beeinflusst, klimaabhängig (SOETERT & MIDDELBURG 2009, PRZESLAWSKI et al. 2009).

Nach der Aufhebung der Dichte-Sprungschichten im Spätsommer, Herbst oder während der Winterstürme kommt es dann zu einer erheblichen Freisetzung von Nährstoffen aus dem Bodenwasser und Sedimenten. Diese Nährstoffe tragen, wenn sie saisonal nicht regional verbraucht werden (Ostsee), zur Eutrophierung in anderen Meeresgebieten bei. Bekannt ist beispielsweise, dass Nährstoffe in die Deutsche Bucht aus den südlichen holländischen und belgischen Küstengewässern eingetragen werden, die von lokalen Einträgen und Einträgen von den französischen und englischen Küsten betroffen sind. Die Nährstoffe aus der Deutschen Bucht werden zum großen Teil mit dem Jütland-Strom die dänische Küste entlang bis in den Skagerrak transportiert, wo sie dann zu den Eutrophierungsproblemen in den norwegischen Fjorden beitragen können (QSR 2010).

Zusammenfassend sind folgende mit der Eutrophierung verbundenen Prozesse vom Klimawandel betroffen:

- Niederschläge
- Süßwassereinträge
- Nährstoffeinträge und haline Schichtung im Küstenwasser
- Erwärmung der Meeresoberfläche
- Primärproduktion, Bildung von Toxinen
- Ausdehnung der Temperatur-Schichtung (räumlich und zeitlich)
- Anreicherung organischer Stoffe im Bodenwasser
- Sauerstoffzehrung und Sauerstoffmangel im Bodenwasser
- Verminderte Denitrifizierung
- Verzögerung von Effekten auf Reduktionsmaßnahmen
- Bioturbation
- Remobilisierung von Nährstoffen aus Sedimenten
- Intensivierung der Produktion von N₂O (Rückkopplungseffekt)
- Erneuerung von Bodenwasser durch Austauschströmungen (Ostsee)
- Verstärkte Komplexität kausaler Wechselwirkungen

Durch die Erderwärmung wird also die Verminderung von Nährstoffeinträgen noch dringlicher. Die Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Eutrophierungsprozesse sind sehr variabel, denn die Variabilität der Eutrophierungsprozesse wird hauptsächlich von den wechselnden Zuflüssen und den Vermischungsvor-

gängen vor der Küste geprägt, die von Niederschlägen und Windfeldern abhängig sind, also auch vom Klima beeinflusst werden. Aus diesem Grund sind die klimatischen Einflüsse auf die Eutrophierungsprozesse nur in langjährigen Trends erkennbar (KEMP et al. 2009). Selbst für die Küstenzonen mit ihren hohen direkten Nährstoffzufuhren wird eine Klimaänderung die Erkennung und Quantifizierung kausaler Zusammenhänge weiter erschweren. Dennoch ist wegen zahlreicher Wechselwirkungen und Rückkopplungseffekte das gesamte System zu betrachten, um die Veränderungen mariner Ökosysteme und deren Effekte zu erfassen und zu verstehen, dass die Verminderung von Nährstoffeinträgen nicht sofort zu einer linearen Verminderung der Eutrophierungseffekte führt (DUARTE 2009).

Randerscheinungen

CODISPOTI (2010) beschrieb, dass sich die N_2O -Konzentrationen, ein ebenfalls wichtiges Klimagas, während der letzten 400.000 Jahre parallel zu denen des CO_2 verändert haben. Die N_2O -Konzentrationen im Meer können sich durch Eutrophierung, Erwärmung und Versäuerung erheblich erhöhen. Da das Meer eine Quelle für N_2O ist, wird ein Großteil dieser Produktion an die Atmosphäre abgegeben und damit in Rückkopplung die Produktion und den Klimaeffekt weiter erhöhen.

Auch für Eutrophierungsprobleme in amerikanischen Flüssen wurden Scheinlösungen bemüht, nämlich die Bewaldung der Ufer, die effektiver (Beschattung) und kostengünstiger wäre als die Verminderung von Nährstoffeinträgen (HUTCHINS et al. 2010). Dass damit das Problem nur weitergereicht wird, ist nicht thematisiert. Ähnlich verhält es sich mit den erheblichen Nährstoffeinträgen englischer Flüsse in die Nordsee, die im dortigen Küstenwasser wegen der starken Durchmischung in tiefere Zonen (größere Wassertiefe und Tidenhub) wenige Massenblüten verursachen. Da das englische Küstenwasser auch in den kontinentalen Küstenstrom eingeschleust wird, trägt es dort zu den Eutrophierungsproblemen bei (WESTON et al. 2004).

In OSPAR und HELCOM wurde der Einfluss des Klimawandels auf die Eutrophierungsprozesse als spezielles Arbeitsthema definiert, das in Arbeitsgruppen behandelt wird. Allerdings werden auch in internationalen Foren oft nationale Standpunkte mit unterschiedlichen Argumenten gestützt, um regionale wirtschaftliche Ansprüche zu schützen. Bei der Begutachtung von eingereichten Veröffentlichungen sind Einflüsse geschickter Lobbyisten nicht auszuschließen, ähnlich wohl wie in der Klimaforschung. Zu fordern sind daher reproduzierbare, transparente Bewertungsverfahren für die Einschätzung von Klimafaktoren auf das Aus-

maß der Eutrophierung vor unseren Küsten, gespeist aus nahen und entfernt liegenden Quellen. Dabei wird die Fernwirkung immer schwieriger zu bemessen sein, durch variable Klimaänderungen noch erschwert.

Schlussfolgerungen

Die Effekte der Klimaveränderung werden die Eutrophierungsprozesse verstärken, wie den Eintrag von Nährstoffen durch verstärkte Erosion und erhöhte Niederschläge. Nährstoffreiche Flussfahnen werden sich in den Küstengewässern weiter ausbreiten. Vor allem wird der Abschluss von Bodenwasserkörpern durch Erwärmung des Oberflächenwassers zunehmen. Damit werden sich anoxische Zonen weiter ausdehnen und ihre Dauer wird sich verlängern und damit der Sauerstoffmangel zunehmen, mit der Folge tiefgreifender Schädigungen regionaler Ökosysteme.

Generell werden durch eine Erwärmung Stoffwechselprozesse beschleunigt und die Ausbreitung eingeschleppter, wärmeliebender Arten begünstigt. Durch die verstärkte Schichtung wird auch die Entwicklung von Flagellaten gefördert wie auch durch die erhöhte Zufuhr von Nährstoffen. Giftige Flagellaten beeinträchtigen Ökosysteme und Aquakulturen.

Wegen der natürlichen Verhältnissen liegenden anthropogenen Nährstoffeinträgen müssen die Anstrengungen fortgeführt und intensiviert werden, die Nährstoffeinträge zu reduzieren, um den Klimaeffekten entgegen zu wirken.

Literatur

- AHLHEIT J., C. MÖLLMANN, J. DUTZ, G. KORNILOVS, P. LÖWE, V. MOHRHOLZ & N. WASMUND (2005): Synchronous ecological regime shifts in the central Baltic and the North Sea in the late 1980s. *ICES J.Mar.Sc.* 62, 1205-1215.
- ATTRILL M.J., J. WRIGHT & M. EDWARDS (2007): Climate-related increases in jellyfish frequency suggest a more gelatinous future for the North Sea. *Limn.Oceanogr.* 52, 480-485.
- BIANCI T.S. & M.A. ALLISON (2009): Large-river delta-front estuaries as natural recorders of global change. *Proc.Natl. Acad.Sci.USA* 106, 8085-8092.
- BROCKMANN U.H. & K. EBERLEIN (1986): River input of nutrients into the German Bight. In: S. Skreslet (ed.) *The role of freshwater outflow in coastal marine ecosystems*, Springer 231-240.
- BROCKMANN U.H., R.W.P.M. LAANE & H. POSTMA (1990): Cycling of nutrient elements in the North Sea. *Neth. J. Sea Res.* 26, 239-264.
- CODISPOTI L.A. (2010): Interesting times for marine N_2O . *Science* 327, 1339-1340.
- COLIJN F., K.-J. HESSE, N. LADWIG & U. TILLMANN (2002): Effects of large-scale uncontrolled fertilisation process along the continental coastal North Sea. *Hydrobiologia* 484: 133-148.
- COLIJN F. & G.C.CADÉE (2003): Is phytoplankton growth in the Wadden Sea light or nitrogen limited? *Journal Sea Research* 49: 83-93.

- CONLEY D.J., C. HUMBORG, L. RAHM, O.P. SAVCHUK & F. WULFF (2002): Hypoxia in the Baltic Sea and basin-scale changes in phosphorus biogeochemistry. *Environ.Sci.Technol.* 36, 5315-5320.
- CONLEY D.J., J. CARSTENSEN, G. AERTEBJERG, P.B. CHRISTENSEN, T. DALSGAARD, J.L.S. HANSEN & A.B. JOSEFSON (2007): Long-term changes and impacts of hypoxia in Danish coastal waters. *Ecol.Appl.* 17, Suppl. 165-184.
- CONLEY D.J., J. CARSTENSEN, R. VAQUER-SUNYER & C.M. DUARTE (2009): Ecosystem thresholds with hypoxia. *Hydrobiologia*, 629, 21-29.
- DETHLEFSEN V. & H. VON WESTERNHAGEN (1983): Oxygen deficiency and effects on bottom fauna in the eastern German Bight 1982. *Meeresforschung* 30: 42-53.
- DIAZ R.J. & R. ROSENBERG (2008): Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science* 321, 926-929.
- DONG Z., D. LIU & J.K. KEESING (2010): Jellyfish blooms in China: dominant species, causes and consequences. *Mar.Poll. Bull.* 60, 954-963.
- DUARTE C.M. (2009): Coastal eutrophication research: a new awareness. *Hydrobiologia* 629, 263-269.
- EC (2002): Empfehlung des europäischen Parlaments und des Rates vom 30.5.2002 zur Umsetzung einer Strategie für ein integriertes Management der Küstengebiete Europas. *Amtsblatt Europ. Gem. L* 148, 24-27.
- EC (2009): Common implementation strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC), Guidance document 23, 136 pp. + annexes.
- EC (2002): Empfehlung des europäischen Parlaments und des Rates vom 30.5.2002 zur Umsetzung einer Strategie für ein integriertes Management der Küstengebiete Europas. *Amtsblatt Europ. Gem. L* 148, 24-27
- FULWEILER & NIXON (2009): Responses of benthic-pelagic coupling to climate change in a temperate estuary. *Hydrobiologia* 629, 147-156.
- HAYS G.C., A.J. RICHARDSON & C. ROBINSON (2005): Climate change and marine plankton. *Trends Ecol.Evolut.* 20, 6, 8 pp.
- HELCOM (2009): Eutrophication in the Baltic Sea, an integrated assessment of the effects of nutrient enrichment in the Baltic Sea region. *Baltic Sea Environment Proceedings* 115 B, HELSINKI Commission, Helsinki, 148 pp.
- HUTCHINS M.G., A.C. JOHNSON, A. DEFLANDRE-VLANDAS, S. COMBER, P. POSEN & D. BOORMAN (2010): Which offers more scope to suppress river phytoplankton blooms: reducing nutrient pollution or riparian shading? *Sci. Total Environm.* 408, 5065-5077.
- JAMES K.J., B. CAREY, J. O'HALLORAN, F. VAN PELT & Z. SKRABAKOVA (2010): Shellfish toxicity: human health implications of marine algal toxins. *Epidemiol.Infect.* 138, 927-940.
- KONONEN K. & LEPPÄNEN J.-M. (1996): Toxic Algae in the Baltic Sea. *DHZ*, suppl. 6, 33-36.
- KEMP W.M., J.M. TESTA, D.J. CONLEY, D. GILBERT & J.D. HAGY (2009): Temporal response of coastal hypoxia to nutrient loading and physical controls. *Biogeosciences* 6, 2985-3008.
- LEVIN L.A., W. EKAU, A.J. GOODAY, F. JORISSEN, J.J. MIDDELBURG, S.W. NAQVI, C. NEIRA, N.N. RABALAIS & J. ZHANG (2009): Effects of natural and human-induced hypoxia on coastal benthos. *Biogeosciences* 6, 2063-2098.
- LOZAN J.L., R. LAMPE, W. MATTHÄUS, E. RACHOR, H. RUMOHR & H. VON WESTERNHAGEN (eds.) (1996): *Warnsignale aus der Ostsee*. Parey, Berlin, 385 pp.
- MCQUATTERS-GOLLOP A., D.E. RAITOSOS, M. EDWARDS, Y. PRADHAN et al. (2007): A long-term chlorophyll data sets reveals regime shift in North Sea phytoplankton biomass unconnected to nutrient trends. *Limnol.Oceanogr.* 52, 635-648.
- NIXON S.W., J.W. AMMERMAN, L.P. ATKINSON, V.M. BEROUNSKY et al. (1996): The fate of nitrogen and phosphorus at the land-sea margin of the North Atlantic Ocean. *Biogeochemistry* 35, 141-180.
- ÖSTERBLOM H., S. HANSSON, U. LARSSON, O. HJERNE, F. WULFF, R. ELMGREN & C. FOLKE (2007): Human-induced trophic cascades and ecological regime shifts in the Baltic Sea. *Ecosystems* 10, 877-899.
- OSPAR (2003): 2003 strategies of the OSPAR Commission for the protection of the marine environment of the north-east Atlantic. Agreement 2003-21. OSPAR Commission, London.
- OSPAR (2008): Second OSPAR integrated report on the eutrophication status of the OSPAR maritime area. OSPAR, London, 372/2008, 107 pp.
- PRZESLAWSKI R., Q. ZHU & R. ALLER (2009): Effects of abiotic stressors on infaunal burrowing and associated sediment characteristics. *Mar.Ecol.Progr.Ser.* 392, 33-42.
- QSR (2010): OSPAR, 2010. Quality Status Report 2010. OSPAR Commission, London. 176 pp.
- RABALAISE N., R.E. TURNER, R.J. DIAZ & D. JUSTIC' (2009): Global change and eutrophication of coastal waters. *ICES J.Mar.Sci.* 2009, 1-10.
- REISE K. & I. SIEBERT (1994): Mass occurrence of green algae in the German Wadden Sea. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Supplement* 1: 171-180.
- SERNA A., J. PÄTSCH, K. DÄHNKE, M. WIESNER, C. HASS, M. ZEILER, D. HEBBELN & K.C. EMEIS (2010): History of anthropogenic nitrogen input to the German Bight/SE North Sea as reflected by nitrogen isotopes in surface sediments, sediment cores and hindcast models. *Cont.Shelf Res.* J. 30, 1626-1638.
- SHARPLESS J., O.N. ROSS, B.E. SCOTT, S.P.R. GREEN-STREET & H. FRASER (2006): Inter-annual variability in the timing of stratification and the spring bloom in the north-western North Sea. *Cont.Shelf Res.* 26, 733-751.
- SOETERT & MIDDELBURG (2009): Modelling eutrophication and oligotrophication of shallow-water marine systems: the importance of sediments under stratified and well-mixed conditions. *Hydrologia* 629, 239-254.
- TOPCU D., U. BROCKMANN & U. CLAUSSEN (2009): Relationship between eutrophication reference conditions and boundary settings considering OSPAR recommendations and the Water Framework Directive – examples from the German Bight. *Hydrobiologia* 629, 91-106.
- VAN BEUSEKOM J.E.E., U.H. BROCKMANN, K.-J. HESSE, W. HICKEL, K. POREMBA & U. TILLMANN (1999): The importance of sediments in the transformation and turnover of nutrients and organic matter in the Wadden Sea and German Bight. *Dt.Hydr.Z.* 51, 245-266.
- WESTON K., T.D. JICKELLS, L. FERNAND & E.R. PARKER (2004): Nitrogen cycling in the southern North Sea: consequences for total nitrogen transport. *Est.Coast.Shelf Sci.* 59, 559-573.
- ZHANG J., D. GILBERT, A.J. GOODAY, L. LEVIN et al. (2010): Natural and human induced hypoxia and consequences for coastal areas: synthesis and future development. *Biogeosciences* 7, 1443-1467
- ZILLEN L. & D.J. CONLEY (2010): Hypoxia and cyanobacteria blooms – are they really natural features of the late Holocene history of the Baltic Sea? *Biogeosciences* 7, 2567-2580.

Dr. Uwe Brockmann

Dr. Dilek Topcu

Universität Hamburg

Institut für Biogeochemie und Meereschemie

Martin-Luther-King-Platz 6, 20146 Hamburg

brockmann@uni-hamburg.de