

## ERANET-BONUS: HYPER

Hypoxia Vermeidung zur Ökosystemrestauration in der Ostsee  
(TP 2)

HYPER (HYPoxia mitigation for Baltic Sea Ecosystem  
Restoration)



Abschlussbericht  
(Schwerpunkt des Berichts sind Ergebnisse des TP 2)

Fördernummer: 03F0487A

Zeitraum: 1.1.2009-31.12.2011

# Teil I

## **1. Aufgabenstellung, Planung und Ablauf**

Das Projekt HYPER beschäftigte sich mit der zunehmenden Sauerstoffarmut (Hypoxie) der Ostsee. Ziel war es, die Ursachen und Auswirkungen auf das Ökosystem zu ermitteln, um Konzepte für eventuelle Gegenmaßnahmen zu entwickeln. Damit schafft HYPER eine Grundlage für das NEST decision support system.

Das Hauptaugenmerk des Teilprojektes 2.2. lag dabei auf dem Stickstoffkreislauf, der einen wichtigen Teil der biogeochemischen Prozesse in den Meeren darstellt. Stickstoffverbindungen sind ein notwendiger Nährstoff für die Primärproduktion, können jedoch bei übermäßiger Konzentration zu Biomasseansammlungen (Eutrophierung) und bei deren Abbau zu Sauerstoffmangel führen. In der Ostsee wurde ein Zusammenhang zwischen Eutrophierung und Sauerstoffmangel zuerst von Larsson et al. 1985 [Larsson, 1985 #1957] erkannt. Die Geschichte der Eutrophierung geht jedoch schon viele hundert Jahre zurück, als die Rodung der Wälder begann [Zillén, 2008 #3019] und ist heute am deutlichsten sichtbar in den Nährstofffrachten die von Flüssen aus den landwirtschaftlich genutzten Flächen ableiten [Voss, 2006 #2507]. Ein wichtiger Teil des Stickstoffumsatzes findet an der Grenzfläche von oxischen zu anoxischen Wasserschichten statt, da Sauerstoff ein regulierender Faktor für viele Umsatzprozesse der Stickstoffverbindungen ist. Dieses Teilprojekt konzentriert sich daher auf diesen Grenzbereich und die Prozesse, die in diesem Wasserkörper als auch Sediment ablaufen. Es sollte versucht werden über die isotopische Fraktionierung von Stickstoff und Sauerstoff im Nitrat und Ammonium die Prozesse in der Redoxkline zu identifizieren und zu quantifizieren. Anhand von 3 Ausfahrten im Sommer 2009, 2010 und 2011 konnten dazu Daten gesammelt werden und im Weiteren im Labor gemessen und ausgewertet werden. Eine zentrale Rolle spielte dabei die chemolithoautotrophe Denitrifikation [Brettar, 1991 #589; Grote, 2008 #3393], deren Einfluss auf die Isotopen-zusammensetzung des Nitrats im Laborexperiment untersucht wurde. Als zweiter Ansatz sollte anhand von  $^{15}\text{N}$  - Ratenmessungen der Stickstoffverlust in der zentralen Ostsee im Sediment als auch in der Wassersäule abgeschätzt werden. Dieser Teil wurde durch die Universität Helsinki ausgeführt.

Das erste Projektjahr war durch einen Personalwechsel geprägt. Der Dipl. Chemiker Sven Meyer wollte aus persönlichen Gründen nicht in Rostock bleiben. Mit der Diplom Biologin Claudia Frey wurde eine sehr gute Kandidatin gefunden. Allerdings war die 0,5 Personalstelle durch den Wechsel einige Monate nicht besetzt. Frau Frey hat für ihre Promotion einen vollständigen 3-Jahres Vertrag bekommen, der aus dem Institutshaushalt auf 3 Jahre aufgestockt wurde. Sie befindet sich zum Zeitpunkt dieses Berichtes im 2. Drittel ihrer Promotionszeit.

- Brettar, I., Rheinheimer, G., 1991. Denitrification in the central Baltic: evidence for H<sub>2</sub>S-oxidation as motor of denitrification at the oxic-anoxic interface. *Mar Ecol Prog Ser* 77, 157-169.
- Grote, J., Jost, G., Labrenz, M., Herndl, G.J., Jürgens, K., 2008. *Epsilonproteobacteria* represent the Major Portion of Chemoautotrophic Bacteria in Sulfidic Waters of Pelagic Redoxclines of the Baltic and Black Seas. *Applied and Environmental Microbiology* 74, 7546–7551, doi:7510.1128/AEM.01186-01108.
- Larsson, U., Elmgren, R., Wulff, F., 1985. Eutrophication and the Baltic Sea: causes and consequences. *AMBIO* 14, 9-14.
- Voss, M., Deutsch, B., Elmgren, R., Humborg, C., Kuoppo, P., Pastuszak, M., Rolff, C., Schulte, U., 2006. Source identification of nitrate by means of isotopic tracers in the Baltic Sea catchments. *Biogeosciences* 3, 663-676.
- Zillén, L., Conley, D.J., Andrén, T., Andrén, E., Björck, S., 2008. Past occurrences of hypoxia in the Baltic Sea and the role of climate variability, environmental change and human impact. *Earth-Science Reviews* 91, 77-92.

## **2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Die Arbeiten fanden am IOW hauptsächlich in der AG Mariner N-Kreislauf statt und hatten somit optimale technische und personelle Voraussetzungen. Frau Liskow, die Leiterin des Labors, unterstützte die Arbeiten aktiv und beratend und hat zudem auf den Ausfahrten mitgearbeitet. Sie führte Nährstoff-, und Schwefelwasserstoffanalysen durch und unterstützte die Anzucht der Denitrifizierer für die  $\delta^{15}\text{N}$  und  $\delta^{18}\text{O}$  Analyse im Nitrat nach (Sigman et al. 2001).

- Sigman, D.M., Casciotti, K.L., Andreani, M., Barford, C., Galanter, M., Böhlke, J.K., 2001. A bacterial method for the nitrogen isotopic analysis of nitrate in seawater and freshwater. *Anal. Chem.* 73, 4145-4153.

## **3. Planung und Ablauf des Vorhabens**

Jährliche Treffen fanden von allen Projektteilnehmern an wechselnden Orten der Projektpartner statt, in Utrecht, Danzig und Lund. Hinzu kamen Treffen der leitenden Wissenschaftler zum planerischen Austausch, an denen vom IOW Frau Voß teilnahm.

Es wurden drei Schiffsausfahrten für die Probennahme organisiert. Dies waren Prof. A. Penck Fahrt (07PE0908) vom 5.3.-17.3.2009, Heincke Fahrt 330 vom 26.6.-8.7.2010 und eine Teilnahme an einer Pelagia Ausfahrt im März 2011 (organisiert und weitgehende finanziert von Frau C. Slomp, Utrecht University).

#### **4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Obwohl über das Auftreten von Hypoxie in der Ostsee viel bekannt ist, existieren nach wie vor große Lücken im Verständnis was die grundlegenden und systemweiten Auswirkungen dessen betrifft um das Nährstoff-Management der Ostsee gezielt zu ändern und anzupassen. Es existieren Abschätzungen über den Stickstoffverlust innerhalb der südlichen Ostsee (855 kt/a), aber beckenspezifische Abschätzungen beruhen auf älteren Modellierungsarbeiten. Neue Studien in der Ostsee zeigen einen negativen Zusammenhang zwischen dem Volumen des hypoxischen Wassers und der Konzentration an gelösten anorganischen Stickstoff, welches eine größere Stickstoffentfernung mit zunehmender Hypoxie vermuten lässt. Auch in den weltweiten großen Sauerstoffminimumzonen konnte ein großer Stickstoffverlust gefunden werden, welches die Ostseestudie unterstützt. Allerdings wurden in der Ostsee auch gegenteilige Ergebnisse gefunden werden, bei welchen keine Denitrifizierung in der hypoxischen Wassersäule gefunden wurde. Hingegen konnten auch andere Prozesse wie Anammox und dissimilatorische Nitratreduktion zu Ammonium (DNRA) nachgewiesen werden. Besonders DNRA führt nicht zum Stickstoffverlust aus dem System sondern N verbleibt als  $\text{NH}_4^+$  im Wasser. Wesentliche Fragen bestehen also noch bezüglich unseres momentanen Verständnisses des Stickstoffkreislaufes unter Hypoxie in der Ostsee. In diesem Projekt sollten also mit Hilfe von verlässlichen state-of-the-art Techniken beckenweite Abschätzungen des Stickstoffverlustes gemessen werden.

Im Rahmen früherer Projektes der AG mariner Stickstoffkreislauf am IOW konnte die Denitrifizier-Methode zur Analyse von Stickstoff und Sauerstoff Isotopen im Nitrate etabliert werden, welche für die hier gesammelten Proben genutzt werden konnte.

#### **4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden**

Nicht bekannt

#### **4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste,**

Planung und Aufarbeitung der Ergebnisse erfolgter unter Verwendung der aktuellen internationalen Literatur recherchiert in ISI Web of Science, ASFA und in anderen Internet-Suchmaschinen (siehe auch Manuskripte)

#### **5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Planung und Durchführung der Ausfahrten erfolgte in Kooperation mit allen Projektkooperationspartnern des Bonus+ Projektes HYPER. Im HYPER Projekt arbeiteten folgende Pis eng zusammen.

Institut	Projektpartner
National Environmental Research Institute, University of Aarhus, Denmark	Jacob Carstensen (Coordinator)
Finnish Environment Institute, Finland	Alf Norkko
University of Helsinki, Department of Biological and Environmental Sciences, Finland	Jorma Kuparinen
Environmental and Marine Biology, Åbo Akademi University, Finland	Erik Bonsdorff
Lund University, Sweden	Daniel Conley
Zoological Institute of the Russian academy of sciences, Russia	Alexey Maximov
Department of Earth Sciences – Geochemistry, Faculty of Geosciences, Utrecht University, The Netherlands	Caroline Slomp
Leibniz Institute for Baltic Sea Research, Germany	Maren Voss
University of Gdansk, Poland	Urszula Janas
Stockholm University, Sweden	Fredrik Wulff

Weitere wichtige BONUS-Projekte, mit denen auf verschiedenen Ebenen ein Austausch bestand waren:

- INFLOW (hierfür wurden Analysen von  $\delta^{13}\text{C}$  und  $\delta^{15}\text{N}$  im Sediment durchgeführt)
- AMBER (Durchführung gemeinsamer Ausfahrten P. A. Penck März 2009)

Zudem wurde kooperiert mit:

- HZG Geesthacht (eine Methodenvergleich zur Denitrifizierung in der Nordsee fand statt)
- AG Physik und Messtechnik IOW (Wasseraustausch in der Redoxkline) und 3 monatige Finanzierung einer Doktorandin (Eefke van der Lee)

## Teil II Eingehende Darstellung

### 1. Erzielte Ergebnisse

#### Methodenvergleich – Kooperation mit HZ-Geesthacht

Die Bestimmung von Denitrifizierungsraten in der Wassersäule und in den Sedimenten ist für das Verständnis der Verluste an Stickstoff essentiell. Diese Raten werden mit der sogenannten „Isotope Pairing Methode“ (IP) bestimmt. Allerdings gibt es methodische Unstimmigkeiten für IP Raten im Sediment, wenn die Zufuhr an markiertem Nitrat nicht homogen erfolgen kann. Dies ist z.B. der Fall in Sedimenten die ihre Redoxkline in einigen Zentimeter Tiefe haben und nicht an der Wasser-Sediment Grenzschicht. Zudem können die Markersubstanzen im Laufe der Inkubation verbraucht werden. Daher wurde in einem gemeinsamen Experiment mit der GKSS (AG Prof. Emeis), IP-Raten sowohl im Durchflussverfahren (flow-through-mode) und in Kerninkubationen (batch-mode) bestimmt. Es fand eine Reise vom Elbeästuar bis in die Nordsee statt, an der die rot markierten Stationen (Abb. 1) im Vergleich vermessen wurden.

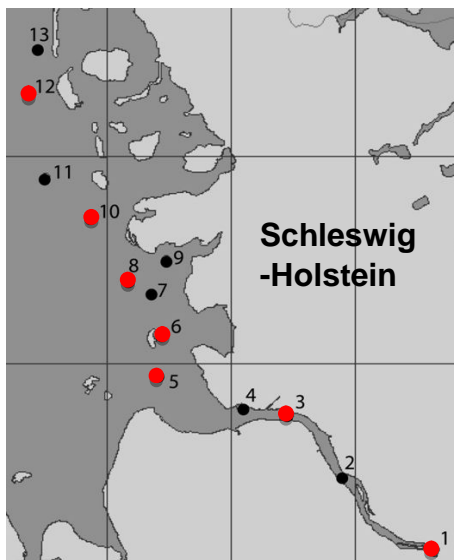


Abb. 1 Stationskarte Methodenvergleich.

Es zeigte sich, dass die Denitrifizierungsraten in der inneren Elbe im März und September höher waren als in der Nordsee ( $10\text{--}78 \mu\text{mol N}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ). Limitierend war die Nitratverfügbarkeit im September. Der sedimentäre  $\text{O}_2$  Verbrauch (SOD) war im März niedriger mit  $750 \mu\text{mol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  als im September mit maximal  $1450 \mu\text{mol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Positive Korrelationen bestanden zwischen Denitrifizierungsraten und SOD. Werden die durchschnittlichen Raten von  $2.9 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  extrapoliert errechnen

sich Nitrataufnahmeraten von 1.6 and 3.3 kt N im Frühling und Sommer, die die Nitratfrachten der Elbe um  $79 \text{ kt y}^{-1}$  verringern, was ca. 5% der Frachten entspricht.

## Ostsee

Im Bereich der Redoxkline, dem Übergang vom oxischen ins anoxische Milieu, wurden starke Gradienten in den hydrographischen Größen, Dichte, Temperatur, Sauerstoff und Salzgehalt gefunden (Abb. 2). Hier wurde in einer erhöhten vertikalen Auflösung beprobt um die erwartete Abnahme der Nitratkonzentration und die Zunahme im Ammonium gut zu dokumentieren. Mit Abnahme der Sauerstoffkonzentration erreicht die Nitratkonzentration zunächst ein Maximum nimmt aber darunter bis zur Nachweisgrenze ab. Die Stationen östlich von Gotland und im Landsorttief weisen dabei ein höheres Nitratmaximum auf ( $8 \mu\text{M}$ ) als westlich von Gotland ( $5 \mu\text{M}$ ). Gleichzeitig liegt das Maximum im Westen Gotlands ca. 20 m tiefer in der Wassersäule. In diesem Tiefenhorizont kann das Ammonium welches durch verstärkte Abbauprozesse von organischem Material, entstanden ist, sofort nitrifiziert werden, wobei sich das Produkt (Nitrat) akkumuliert.

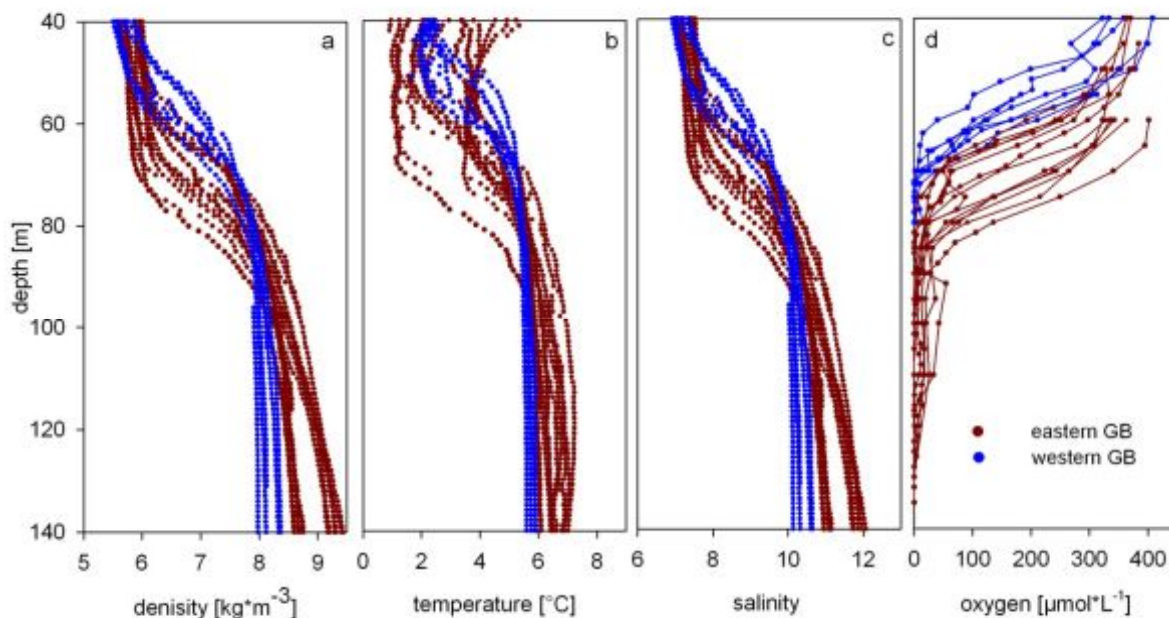


Abb.2: Profile der Dichte, Temperatur, Salzgehalt und Sauerstoffkonzentrationen; rot östliche Gotlandsee, blau westliche Gotlandsee

Die Unterschiede in den Profilen der Nitratkonzentrationen können sowohl auf eine höhere Produktivität im Oberflächenwasser als auch auf höhere Nitrifizierungsraten im östlichen Gotlandbecken hindeuten. Unterhalb der Nitratkline findet Denitrifizierung statt, die in der Ostsee hauptsächlich autotroph abzulaufen scheint d.h. unabhängig von der Versorgung mit organischem Kohlenstoff ist. Damit diese chemolithoautotrophe Denitrifikation stattfinden kann, müssen Elektronendonoren (hier vermutlich  $\text{H}_2\text{S}$ ) und Elektronenakzeptoren (Nitrat) vorhanden sein. An fast allen Stationen (außer GB1 und GB2) konnte eine Überlappung von Nitrat und Schwefelwasserstoff gefunden werden, die diesen Ablauf fördern würde. Gleichzeitig stellt die Redoxkline einen Bereich erhöhter autotropher Produktion dar, welcher sich durch ein hohes C/N-Verhältnis und einen heterogenen Pool aus partikulärem organischem Stickstoff (PON) auszeichnet.

Um die Bedeutung der Umsetzung von Ammonium in Nitrat und den Verlust von Nitrat durch Denitrifizierung zu entschlüsseln, wurden hier die Isotopie von Stickstoff und Sauerstoff im Nitrat und Ammonium herangezogen. Erste Analysen der N-Isotope im Nitrat zeigen, dass mit abnehmender Konzentration der  $\delta^{15}\text{N}$  ansteigt (Abb.4). Die Werte schwanken zwischen 2-13 ‰ und liegen damit niedriger als in anderen Sauerstoffminimumzonen (OMZ) wie dem Schwarzen Meer oder dem östlichen tropischen Nordpazifik (ETNP), wo sie bis auf 25‰ ansteigen.

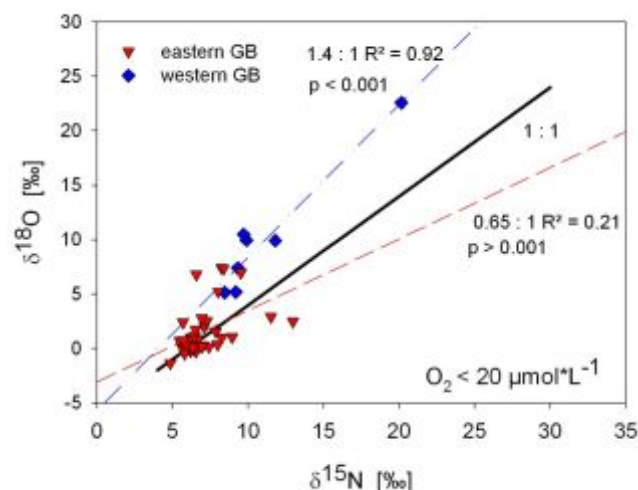


Abb. 3:  $\delta^{15}\text{N}_{\text{NO}_3}$  vs.  $\delta^{18}\text{O}_{\text{NO}_3}$  für Proben mit  $\text{O}_2$  Konzentrationen  $< 20 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , westliches (blau) und östliches (rot) Gotlandbecken.



Die N-Isotope geben ein zeitintegriertes Signal der Stickstoffprozesse in der Redoxkline wieder anhand welcher versucht werden soll den Verlust besser quantifizieren zu können. Die Analyse der  $\delta^{18}\text{O}$  -Werte wurde mittels der Denitrifizier – Methode durchgeführt.

In engen Abständen aufgelöste Profile von  $\delta^{15}\text{N}_{\text{NO}_3}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{NO}_3}$ ,  $\delta^{15}\text{N}_{\text{NH}_4}$  aus der Redoxcline der Ostsee zeigen unterschiedliche N-Umsatzraten an. Im Maximum der Nitratkonzentration wurden Werte von  $7.0 \pm 1.5 \text{ ‰}$  und  $0.1 \pm 1.8 \text{ ‰}$  angetroffen. Die Nitrat  $\delta^{15}\text{N}$  Werte entsprechen dabei denen des PON und lassen vermuten, dass die Remineralisierung des PON die einzigen Nitratquelle darstellt. Eine inverse Beziehung von delta-Werten und Nitratkonzentration ist dabei typisch für Sauerstoffminimumzonen.

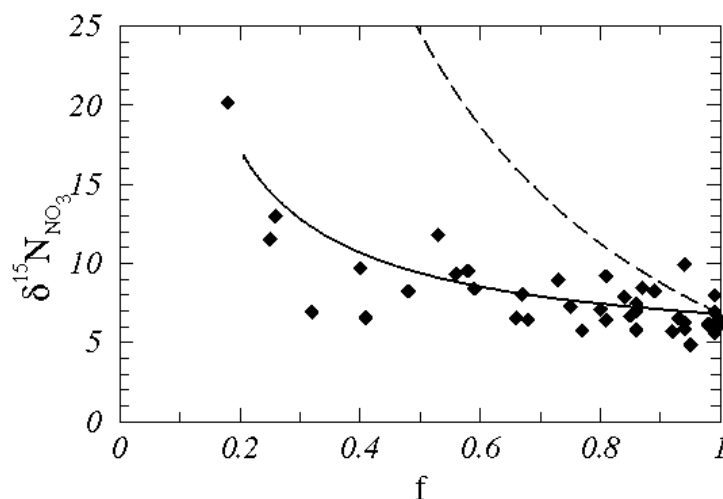


Abb. 4: Modellergebnisse die  $\delta^{15}\text{N}_{\text{NO}_3}$  and  $\delta^{15}\text{N}_{\text{NH}_4}$  Ergebnisse zeigen. Die gestrichelte Linie zeigt den fit für eine Fraktionierung von  $\epsilon_{\text{denitrification}} = -20 \text{ ‰}$  ohne Nitrifizierung. The durchgehende Linie zeigt den Fit für  $\epsilon_{\text{denitrification}} = -1.9 \text{ ‰}$  und gleichzeitiger Nitrifizierung von  $\epsilon_{\text{nitrification}} = 8.5 \text{ ‰}$ .

Obwohl unsere Daten die höchsten gemessenen Isotopenwerten darstellen, war der Anreicherungsfaktor niedrig und zeigte nicht das typische Denitrifizierungssignal von 20-25 ‰. Das Verhältnis von  $\delta^{18}\text{O}_{\text{NO}_3}$  zu  $\delta^{15}\text{N}_{\text{NO}_3}$  war 1.38 : 1 (Abb. 3) und weicht damit vom typischen 1:1 Verhältnis ab, deutet aber bereits auf eine sehr enge Kopplung von Nitratgenerierenden und –umsetzenden Prozessen hin. Dies gilt insbesondere für die westliche Gotlandsee (Abb. 4).

In der östlichen Gotlandsee gibt es keine solche Beziehung, was vermutlich mit der dynamischen Hydrographie der Region im Vergleich zum östlichen Becken

zusammenhängen könnte (Kooperation mit der Abteilung Physik und Modellierung, Eefke van der Lee). Ergebnisse eines dynamischen gekoppelten Reaktions-Diffusionsmodells zeigen, dass fast 50% des Substrates für die Denitrifizierung direkt aus der Nitrifizierung stammen müssen. Diese enge Kopplung und Weitergabe des Substrates ist bisher nicht gezeigt worden und könnte zu einer Unterschätzung der Umsatzraten bisher geführt haben.

Um die autotrophe Denitrifizierung besser zu verstehen wurde in Kooperation mit der AG Jürgens/Labrenz ein Experiment zur Ermittlung der Fraktionierungsfaktoren mit dem wichtigsten Organismus der Redoxcline geplant. Eine Bakterienkultur von *Sulforimonas* befindet sich am IOW in Kultur. Erste Vorversuche zum Einfluss der Kultivierungstemperatur auf die Fraktionierung der Stickstoff und Sauerstoffisotope im Nitrat wurden durchgeführt (Abb.5).

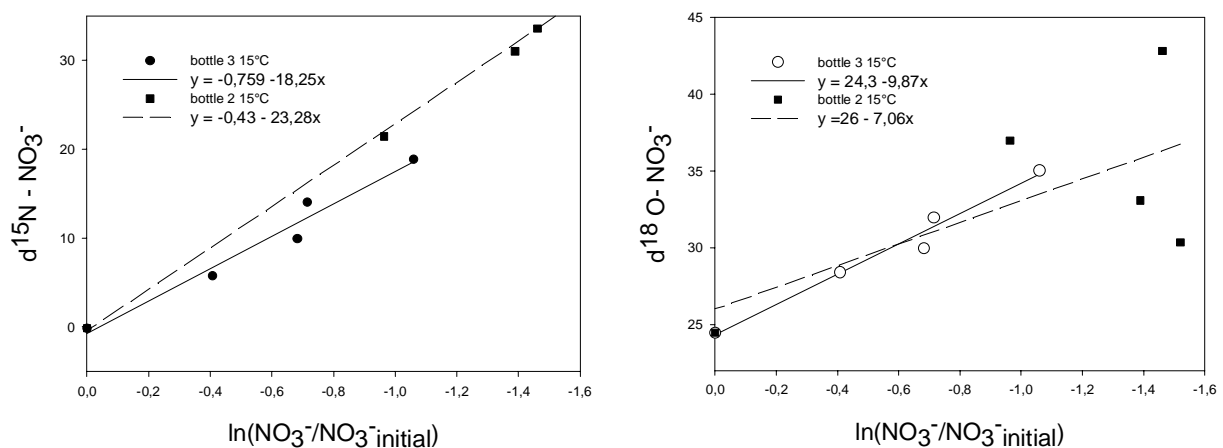


Abb. 5: Modellergebnisse zur Fraktionierung von Nitrat durch den Stamm GD 1 am IOW.

Erkennbar sind die offenbar geringeren Faktoren für die Fraktionierung als man es von heterotrophen Denitrifizierern erwarten würde. Hierzu werden derzeit weitere Experimente geplant, die am Jahresende 2012 im Rahmen der Promotion von Frau Frey stattfinden sollen.

### ***Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen***

Über Sauerstoffminimumzone wird derzeit wissenschaftliche viel gearbeitet und die Erkenntnisse über die Verknüpfung von N-Umsätzen wachsen. Es ist jedoch keine Arbeit bekannt, die die hier erzielten Ergebnisse vorwegnimmt. Daher haben wir ein

Papier zu einem sehr guten Journal geschickt, was durch unsere neuen Befunde gerechtfertigt erscheint (s. Publikationsliste).

#### **4.Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse nach Nr. 6**

##### Schriftliche Publikationen:

Frey, C., Voss, M., Dippner, J. W. (submitted) Isotopic evidence for close coupling of N- cycling processes in the redoxcline of the Baltic Sea. *Global Biogeochemical Cycles*

Voss, M., H. W. Bange, J. W. Dippner, J. Middelburg, J. P. Montoya<sup>4</sup>, B. Ward (submitted) The marine nitrogen cycle: recent discoveries, uncertainties and the potential relevance of climate change *Philosophical Transactions of the Royal Society B*

Hietanen, S., H. Jäntti, C. Buizert, K. Jürgens, M. Labrenz, M. Voss, and J. Kuparinen (2012), Hypoxia and nitrogen processing in the Baltic Sea water column, *Limnology & Oceanography*, 57(1), 325-337.

##### Poster

Frey, C., Voss, M. (2011) Isotopic composition of nitrate in the redoxcline of the Baltic Sea. SAME 12 (Symposium on Aquatic Microbial Ecology), 28 August-2 September 2011, Rostock, Germany, **Poster Prize Award – best young scientist poster**

Frey, C., Voss, M. (2011) Isotopic composition of nitrate in the redoxcline of the Baltic Sea. You Mares 2.0, 7 September- 9 September 2011, Bremerhaven, Germany

##### Vorträge

Frey, C. Nitrogen processes of the redoxcline and sediments from an isotopic perspective – PhD concept presentation. 1. Annual HYPER meeting, 22.March – 25.March 2010, Utrecht, Netherlands

Frey, C. Redoxcline processes as inferred from natural stable isotope signatures: PhD concept. Stable Isotope in Ecology Summer School, 15.September – 23.September 2010, Lund, Sweden

Frey, C. Redoxcline processes as inferred from natural stable isotope signatures: first results. 2. Annual HYPER meeting, 7.February – 10.February 2011, Gdynia, Poland

Frey, C. Redoxcline processes as inferred from natural stable isotope signatures: progress report. 3. Annual HYPER meeting, 21.November – 23.November 2011, Lund, Sweden

Voss, M. H. W. Bange, J. W. Dippner, J. Middelburg, J. P. Montoya, B. Ward (2011) The marine nitrogen cycle: recent discoveries, uncertainties and the potential relevance of climate change. Scientific Discussion meeting, The Royal Society, London, The Global Nitrogen Cycle, Dec 5-6 (**invited speaker**)

Voss, M., J. Carstensen, D. Conley, J. Dippner, C. Frey, S. Hietanen, T. Jilbert , F. Korth, C. Slomp (2011) On the role of land derived N and P input for eutrophication in The Baltic Sea. Baltic Sea Science Congress, St. Petersburg 22.-26.8.2011

# Teil III

## **1. Beitrag der Ergebnisse zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms /-schwerpunkt/-konzepts - soweit dies möglich ist - ,**

Das Verbundvorhaben HYPER trug zu den folgenden BONUS-169 Forschungsthemen bei:

- Verbesserung des Verständnisses zur Wirkung der Eutrophierung und damit zur potentiellen Reduktion der Eutrophierung.
- In Folge davon dienen die Ergebnisse dem Schutz der marinen Biodiversität.
- Das Thema Hypoxie wurde mehrfach der Öffentlichkeit nahegebracht und unterstützt den Aspekt zur Integration von Ökosystem und Gesellschaft.
- Zusätzlich liefert das Verbundvorhaben HYPER einen Beitrag zu den Forschungszielen von LOICZ, und BALTEX.

## **2. Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen**

Die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse sind im englischen Abschlussbericht aufgelistet (s. S 15-25). Deshalb werden im Folgenden nur die herausragenden wissenschaftlichen Ergebnisse sowie die Highlights des Projektes aufgelistet.

### **Wissenschaftliche Ergebnisse des TP 2**

- Denitrifizierung in der Wassersäule ist eine sehr variable aber dynamische Verlustgröße, die insgesamt schwer quantifizierbar ist.
- Die Verluste von Stickstoff in der Wassersäule und im Sediment scheinen in der dergleichen Größenordnung zu liegen.
- Die Daten der Isotopenmessungen im Nitrat legen eine sehr enge Kopplung von Prozessen der Nitratregeneration und Nitratreduktion nahe. Diese enge Kopplung kann zu einer Unterschätzung der aktuellen Raten führen.

-

### **Highlights**

Das Projekt hat eine Reihe von Highlights generiert (s. Abschlussbericht des Gesamtprojektes). Im TP 2 sind die Erkenntnis, dass die Verluste von N, aus zwei Gründen leicht unterschätzt werden können. 1. Wegen der hohen Variabilität der

Raten in Zeit und Raum, wenn man die isotope-pairing Methode anwendet 2. Durch die enge Kopplung der Prozesse [Hietanen, 2012 #3599], wenn man die Verteilung stabiler Isotope in N-Verbindungen als Grundlage benutzt (Frey et al Submitted).

### **3. Fortschreibung des Verwertungsplans.**

**3.1 Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte, die vom Zuwendungsempfänger oder von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen wurden, sowie deren standortbezogene Verwertung (Lizenzen u. a.) und erkennbare weitere Verwertungsmöglichkeiten,**

Entfällt

**3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) – z.B. auch funktionale/wirtschaftliche Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen, Nutzen für verschiedene Anwendergruppen/-industrien am Standort Deutschland, Umsetzungs- und Transferstrategien (Angaben, soweit die art des Vorhabens dies zulässt)**

ein verbessertes Verständnis der natürlichen Variabilität des Gesamtsystems Ostsee. Damit wird ein erster Schritt unternommen, in dem komplexen System Ostsee die natürliche Variabilität von anthropogenen Einflüssen zu trennen

**3.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) – u.a. wie die geplanten Ergebnisse in andere Weise (z.B. für öffentliche Aufgaben, Datenbanken, Netzwerke, Transferstellen etc.) genutzt werden können. Dabei ist auch eine etwaige Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen, Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen u.a. einzubeziehen.**

Das Verbundvorhaben HYPER war ein innovativer, interdisziplinärer Forschungsansatz zum verbesserten Verständnis der Prozesse zum Stoffumsatz in sauerstoffarmen Bereichen der Wassersäule.

**3.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der Ergebnisse**

**3.4.1. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben**

Nicht zutreffend.

**3.4.2. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer- z.B. Anwenderkonferenzen (Angaben, soweit die Art des Vorhabens dies zulässt)**

Zahlreiches Ergebnismaterial wird auf der Homepage des Projektes zur Verfügung gestellt, das für Nutzer und Anwender von Interesse sein kann

**3.4.3. Die Einhaltung der Ausgaben und Zeitplanung**

Alle Deliverables wurden vom BONUS Sekretariat akzeptiert. Das Vorhaben HYPER hat sowohl die Ausgaben als auch die Zeitplanung eingehalten. Mit den zugewiesenen Mitteln wurde sparsam und wirtschaftlich umgegangen.

**(Im Erfolgskontrollbericht kann auf Abschnitte des Schlussberichts (Nr. I. und II.) verwiesen werden.)**



**FINAL REPORT  
YEARS 1-3**

**HYPER-PROJECT**

## Executive summary

The objectives of HYPER were to 1) investigate the trends in hypoxia on both short-term (<100 years) and long-term (<10000 years) scales to identify relationships to climatic and anthropogenic trends and oscillations, 2) understand and quantify the relationships between oxygen concentrations, benthic organisms and biogeochemical processes, 3) obtain an improved description of the governing biogeochemical processes and mechanisms in different regions of the Baltic Sea that allow for upscaling field sampling to a holistic ecosystem assessment, and 4) combine the new knowledge gained in HYPER in such a way that it can be used in the Baltic Nest Institute (BNI) modelling framework for nutrient management. These objectives have been achieved through good and intense collaboration between geologists, ecologists, biogeochemists and modellers.

The results from HYPER are highlighted with the following outstanding novel contributions that advance our understanding of hypoxia in the Baltic Sea, and together with other contributions address the first three objectives stated above:

### ***Reconstructing the history of hypoxia***

A statistical model has been developed to estimate the core characteristics of salinity and temperature profiles and analyse the temporal and spatial variations of these. Using this developed methodology trends of hypoxia for the last 110 years have been reconstructed. Before 1950 hypoxia was confined to a spatially restricted area, but in the following two decades hypoxia increased its extent to about 50,000 km<sup>2</sup>. The situation improved from 1982 to 1993, which was the so-called stagnation period without any major saltwater inflows. During the stagnation period stratification became weaker and the depth of the halocline moved from 70 m to 80 m depth. However, saltwater inflows after 1993 strengthened stratification again and the area of hypoxia doubled. In the last decade between 60,000 and 70,000 km<sup>2</sup> of bottom area were hypoxic. Oxygen debt, i.e. the amount of oxygen consumed in a parcel of saturated water, has been modelled in relation to changes in the vertical and horizontal mixing as well as nutrient inputs, and oxygen debt has increased by 2.0 mg/l in the Bornholm Basin and 3.1 mg/l in the Baltic Proper over the last 100 years when mixing effects are filtered out.

### ***Oscillations in hypoxia erodes the capability of sediments to store P***

HYPER has discovered that phosphorus can also accumulate in bottom sediments in organic matter. During periods of hypoxia phosphorus in organic matter is the major form of phosphorus burial. If the system becomes oxic again the sediments will start to accumulate iron and phosphorus. Oxygen is more corrosive to the organic matter and the organic phosphorus will be released, although it rapidly reacts with iron and is buried. With oscillating periods of oxic and hypoxic conditions, as we are observing today, the ability of the sediments to store organic phosphorus is greatly reduced. Ultimately, this reduces the capacity of Baltic Sea sediments to store phosphorus in the bottoms and makes phosphorus more available to cause harmful algal blooms. This result also has implications for the engineering approaches to add oxygen to the Baltic Sea. If the engineering system fails because of a storm for example, phosphorus will be rapidly released from the bottom creating a “phosphorus bomb” to the ecosystem. A massive release of phosphorus from sediments over a short period would be a catastrophe to the Baltic Sea ecosystem.

### ***Hypoxia has moved denitrification from sediments to water column***

During periods of hypoxia sediment denitrification does not occur because the process requires that oxygen is present. In fact, HYPER results demonstrate that for oxygen levels below 2-2.5 ml/l another process, dissimilatory nitrate reduction to ammonium (DNRA), becomes more important than denitrification. This is generally bad for the Baltic Sea because it means that nitrogen is not lost from the system and can remain to grow more algae. In the Baltic Sea denitrification occurs in the deep basins in the “redoxcline”, the interface between bottom water with no oxygen and the oxic intermediate water. In HYPER we made careful measurements of denitrification using specialized techniques in the water and found significant rates of denitrification. Our results confirm that the water column has become an important sink for nitrogen removal during periods of hypoxia, but the magnitudes and variability are not yet understood. Moreover, low oxygen concentrations may reduce the capacity to permanently remove nitrogen by denitrification when nitrification is inhibited, in addition to the shift from denitrification towards DNRA.



### ***A welcome can of worms?***

There is recent evidence that improved bottom-water oxygen conditions in coastal areas of the northern Baltic Sea coincide with increased abundances of the invasive polychaetes *Marenzelleria* spp. Significantly lower phosphate concentrations have been documented in the Stockholm Archipelago after *Marenzelleria* became abundant, and in HYPER we have demonstrated that bio-irrigating organisms can affect the sedimentary phosphorus dynamics on a system-wide scale. These results were further confirmed using a reactive-transport model, demonstrating that the long-term bio-irrigation activities of dense *Marenzelleria* populations may facilitate the switch from a seasonally hypoxic system back to a normoxic system by reducing the flux of phosphate from the sediment to the upper water column. Invasive species are generally considered to have a negative impact. In HYPER we have, however, shown that one of the main recent invaders in the Baltic Sea may provide important positive ecosystem services. Our results suggest that a rapid ecosystem recovery is possible, provided that oxygen conditions are improved to a level allowing bio-irrigating species to colonise the system

### **Summary**

Over the last 3 years HYPER has delivered significant scientific output, trained many young scientists and actively participated in the public discussion about the health of the Baltic Sea and measures to restore it. HYPER has produced 38 articles in peer-reviewed journals (37 published and 1 in press at present), 8 manuscripts currently under review for publication, and at least another 6 manuscripts are in preparation. All together, the scientific outcome of HYPER is expected to be more than 50 papers. Moreover, many of the papers have been published in high impact journals such as Proceedings of the National Academy of Science, Ecological Applications, Ecology, Limnology & Oceanography, Environmental Science & Technology, and Global Change Biology (all having impact factors above 3). The results from HYPER have also been presented at numerous scientific meetings (72 presentations and 21 posters), and participants from HYPER have been actively involved in formulating and chairing sessions on hypoxia at scientific conferences (CERF 2009 in Portland, EGU 2011 in Vienna, ASLO 2011 in Puerto Rico, BSSC 2011 in St. Petersburg, CERF 2011 in Daytona Beach). Furthermore, HYPER scientists have presented their results at HELCOM working group meetings to allow HELCOM to draw upon state-of-the-art knowledge.

Training of young scientists has been another prioritised objective of HYPER with 6 post.doc., 7 Ph.D. and 7 undergraduate students involved. Two Ph.D. courses have been organised within the framework of HYPER: 1) The Baltic Sea ecosystem (Lund, 19-24 April 2009) and 2) Benthic Ecology (Tvärminne, 2-7 May 2011). Making young people interested in natural science has also been stressed through participating in the 8<sup>th</sup> Baltic Festival of Science in Poland, giving lectures to school classes on Baltic Sea hypoxia and inviting a school class onboard the r/v Aranda to experience the work of scientists. Furthermore, HYPER scientists have actively been engaged with the press, resulting in many newspaper articles, and several radio and TV broadcasts.

Finally, two models have been developed to describe the biogeochemical processes and faunal responses in the sediments and combined with the BNI model to address the fourth objective of HYPER. The reactive-transport model investigates the effect of bio-irrigating organisms for transport of porewater across the sediment layers and how this affect the redox-dependent processes for nitrogen and phosphorus. This model has been calibrated using process rates and sediment profiles obtained from various cruises to improve the parameterisation of the sediment compartment in the BNI model. The fauna model has been linked to different scenarios from the BNI model to assess consequences of the Baltic Sea Action Plan and climate change on the fauna. The statistical analyses and models developed within HYPER have contributed to improving the BNI model.

**FINAL REPORT 2011 (YEAR 1-3)**

<b>HYPER</b>	<b>WP1 - Trends of hypoxia</b>
Reporting period	Months 1 - 36
Gained scientific results during the reporting period	<p>In 2009 WP1 participated in one summer cruise, where twenty-six 6 m long cores - covering the post-glacial period - were retrieved from the Baltic Proper, Bothnian Sea and Bothnian Bay. From the Baltic Proper multi-cores were collected as well. The sediment cores have constituted the material basis for the work in WP1 throughout the project period.</p> <p>In 2010 two summer cruises were carried out and additional sediment cores were collected, and 2010 was thus characterised by intensive laboratory work. Furthermore, through research it was demonstrated that the lack of the absence of “sink-switching” from organic and Fe bound P to authigenic Ca–P makes the Baltic Sea extremely sensitive to sustained anoxia, since any P released from the labile P phases will return to the overlying water where it ultimately may fuel primary production.</p> <p>In 2011 we have participated in one successful cruise collecting additional sediment cores (RV Pelagia 10-23 May 2011) lead by our HYPER colleague Caroline Slomp (Utrecht). Our intensive laboratory work continued analyzing the numerous cores and the partners are working well together producing interesting results. Our final deliverable for WP1 highlights some of our research results.</p> <p>Our research on long-term trends in hypoxia has resulted in the first ever publication demonstrating widespread hypoxia in the coastal zone with over 200 monitored sites (ca 40%) showing hypoxia at least once. We have completed the analysis reconstructing hypoxia in the open waters of the Baltic Sea. Hypoxia was &lt;10,000 km<sup>2</sup> before WWII but increased in the 1950s and is now &gt;60,000 km<sup>2</sup>.</p>
Comparison with the original research and financial plan	WP1 has met all of the outcomes identified in the original research plan for the reporting period.

HYPER	WP2 - Biogeochemical processes
Reporting period	Months 1 – 36
Gained scientific results during the reporting period	<p>On five cruises in 2009 natural nitrogen removal in the sediments and in the water column was quantified in the Gulf of Finland, Baltic Proper and southern Baltic Sea. Also the effects of short and long-term anoxia and benthic fauna loss on nitrogen processes in the coastal zone were studied. On two cruises samples from the redoxcline were taken in order to analyse the stable isotope signatures of nitrate. On three cruises cores were collected and studied for sediment phosphorus dynamics and burial in the Southern Baltic, Baltic Proper, Bothnian Sea and in the Gulf of Finland. Further experiments were performed in order to assess P release mechanisms under anoxic conditions. P recycling burial at six locations in the Baltic was described and published in a scientific paper.</p> <p>In 2010 five manuscripts were prepared describing the experiments and the results obtained.</p> <p>Below follows a list of WP2 products :</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Hietanen S, Jäntti H, Buizert C, Jürgens K, Labrenz M, Voss M, Kuparinen J (2012) Hypoxia and nitrogen processing in the Baltic Sea water column. <i>Limnology and Oceanography</i> 57:325-337 DOI 10.4319/lo.2012.57.1.0325</li> <li>2. Jäntti H, Hietanen S: The effects of hypoxia on sediment nitrogen cycling in the Baltic Sea. <i>AMBIO</i>, DOI 10.1007/s13280-011-0233-6</li> <li>3. Nitrogen results from a HYPER experiment in Tvärminne are being finalized into a manuscript by Anna Villnäs (WP4)</li> <li>4. A PhD thesis was defended on 20.1.2012: Helena Jäntti: The roles of nitrification and nitrate reduction pathways in nitrogen cycling of Baltic Sea. Supervisor Susanna Hietanen, opponent Maren Voss.</li> <li>5. Claudia Frey, Maren Voss: Culture experiments with <i>Sulfurimonas gotlandica</i>, an epsilonproteobacteria isolated from the Baltic Sea oxic-anoxic interface, where it plays a key role for nitrogen cycling, were performed. During chemolithoautotrophic denitrification the isotopic fractionation factor of N &amp; O isotopes in nitrate were determined (<math>\epsilon^{15}\text{N} = 18\text{-}23\text{‰}</math> and <math>\epsilon^{18}\text{O} = 6\text{-}11\text{‰}</math>). The ratio of <math>\epsilon^{18}\text{O} : \epsilon^{15}\text{N}</math> is 0,5 :1 and deviates from the 1:1 ratio found in other oxygen minimum zones. Understanding isotopic fractionation of ecosystem key players is necessary for the interpretation of natural abundance isotope studies.</li> <li>6. Poster: Frey, C., Voss, M. (2011) Isotopic</li> </ol>

	<p>composition of nitrate in the redoxcline of the Baltic Sea. SAME 12 (Symposium on Aquatic Microbial Ecology), 28 August-2 September 2011, Rostock, Germany</p> <p>7. Jilbert T., C.P. Slomp, B.G. Gustafsson and W. Boer (2011). Beyond the Fe-P-redox connection: preferential regeneration of phosphorus from organic matter as a key control on Baltic Sea nutrient cycles. <i>Biogeosciences</i> <b>8</b>, 1699-1720</p> <p>8. Steenbergh A.K., P.L.E. Bodelier, H.L. Hoogveld, C.P. Slomp and H.J. Laanbroek (2011) Phosphatases relieve carbon limitation of microbial activity in Baltic Sea sediments along a redox-gradient. <i>Limnology and Oceanography</i> 56, 2018-2026 doi:10.4319/lo.2011.56.6.2018</p> <p>9. .Three additional papers on P dynamics are being prepared for submission.</p>
<p>Comparison with the original research and financial plan</p>	<p>Nitrogen loss quantification was carried out on four instead of two cruises and work on phosphorus was done on three instead of two cruises in 2009.</p> <p>In 2010 more has been done than originally planned (two manuscripts on P regeneration and burial) participated in a cruise on R/V Heincke (10 HYPER participants) and in a cruise with R/V Skagerak (1 HYPER participant).</p> <p>An additional HYPER research cruise was organized by Utrecht University in May 2011.</p>

HYPER	WP3 - Physical and biogeochemical modelling
Reporting period	Months 1 - 36
Gained scientific results during the reporting period	<p>Investigation of causes of hypoxia variation during the past 2000 years were carried out using the physical part of the BALTSEM model combined with a sub-model on oxygen. Additionally, in 2009 a test simulation of the Baltic Sea circulation 5500 years ago was performed. Also in 2009 a reactive transport model was developed and implemented for the Baltic Sea sediments.</p> <p>In 2010 the reactive transport model was ready and validated leading to a manuscript on the simulated effects from seasonal hypoxia on biogeochemical cycles (accepted for publication in Limnology and Oceanography)</p> <p>In 2011 the following was accomplished:  Task 3.2: Model of benthic fauna. A dynamic model of benthic fauna in the Baltic Sea has been developed and implemented with one way coupling from the Baltsem model. Simulations have been made to explore how the fauna biomass would change with implementation of management strategies improving oxygen conditions but reducing food supply. The results shows that benthic biomass increased between 0 and 700% after re-oxygenating bottom waters. Nutrient reduction scenarios indicated improved oxygen concentrations in bottom waters and decreased sedimentation of organic matter up to 40 % after a nutrient load reduction following the Baltic Sea Action Plan. The lower food supply to benthos reduced the macrofaunal biomass up to 35% especially in areas not currently affected by hypoxia, whereas benthic biomass increased up to 200% in areas affected by eutrophication-induced hypoxia. The expected changes in benthic biomass resulting from nutrient load reductions and subsequent reduced hypoxia may not only increase the food supply for benthivorous fish, but also significantly affect the biogeochemical functioning of the ecosystem. Further, implications from climate change on the benthic biomass was explored.</p> <p>Task 3.3: Application of sediment reaction transport model. The model developed in previous years was, in collaboration with WP4, used to investigate of the effects from the invasive species <i>Marenzelleria</i> on phosphorus retention. The result that the irrigation caused a significant increase in phosphorus retention has given raise to large scientific and public interest as an exceptional example of ecosystem services from an invasive species.</p> <p>Further, the RTM has been significantly developed during the year to include also the carbonate dynamics and formation of stable phosphorus mineral formations. The results are promising and will make it possible to quantify</p>

	<p>the response to redox change in the deep basins of the Baltic Sea, whereas the previous version focused on processes involved with seasonal hypoxia and more labile sedimentary phosphorus compounds, e.g. iron bound phosphorus.</p> <p>Task 3.4 Model calibration and validation. During and within the project, the coupled physical-biogeochemical model Baltsem has been significantly developed and validated. A new “standard” version, encompassing also very long-term simulation capability was developed and is now being used for the revision of the Baltic Sea Action Plan. The Baltsem is also now implemented to the open Nest system, being one of the first models of this complexity available for any users to run through the internet.</p> <p>In parallel to the development of the standard version, more experimental work has been carried out especially investigating the role of iron bound phosphorus in the Baltic Sea. Here, the RTM was used to find a parameterization suitable for implementation in Baltsem. The results indicate that iron bound phosphorus may have played an important role to explain the observed large redox variations in the much more oligotrophic past of the Baltic.</p>
<p>Comparison with the original research and financial plan</p>	<p>No deviations</p>

HYPER	WP4 - Hypoxia and benthic fauna
Reporting period	Months 1 - 36
Gained scientific results during the reporting period	<p>2009 was characterised by two major sampling events: one cruise covering the major basins of the Baltic Sea, where sediment-water fluxes and benthic fauna were measured and a field experiment, where the effect of repeated short periods of hypoxia on benthic ecosystem function was studied. Through these two sampling efforts the field data necessary for completion of all WP4 deliverables were secured.</p> <p>2010 was characterised by the processing of field data collected in 2009. Furthermore, two papers were published and several other manuscripts were prepared.</p> <p>2011 has mainly involved working through material and data obtained from the field-surveys and experiments conducted in year one and two. All has gone according to plan; several papers have been submitted or accepted and several other manuscripts are being prepared for submission.</p>
Comparison with the original research and financial plan	<p>The research has progressed in line with the original research and financial plans. Thanks to additional funding from the ASSEMBLE network and transfer of funds from yr 2 to yr 3, we were able to conduct a comparative field study between the Baltic Sea and the fully marine Swedish west coast, which greatly improves the generality of the results gained from the HYPER project.</p>

HYPER	WP5 - Nutrient management
Reporting period	Months 1 - 36
Gained scientific results during the reporting period	<p>In 2009 two papers on synthesised knowledge on engineering solutions to mitigate hypoxia (evaluating 5 different options) were published. HYPER connected to HYPOX, a FP7 project aiming at improved monitoring of hypoxia and related processes across European seas. Several partners in HYPOX were involved in SCOR WG128 on "Natural and human-induced hypoxia and consequences for coastal areas". Furthermore, HYPER-partners chaired a scientific session at the CERF2009.</p> <p>In 2010 management activities included organising a HYPER consortium meeting in Utrecht for all scientists involved. Member of the consortium have been active in organising scientific sessions at various conferences: EUTRO2010 (Nyborg, June 2010), ASLO meeting (San Juan, February 2011), EGU meeting (Vienna, April 2011), Baltic Sea Science Congress (St. Peterburg, August 2011), CERF meeting (Daytona Beach, November 2011).</p> <p>The HYPER consortium has actively disseminated Baltic Sea Science to the public, school classes and media,</p> <p>In 2011 the long-term time series of hypoxia, developed in WP1 and in the TARGREV project, have been used for scenarios with the BALTSEM model to resolve nutrient reductions required to achieve an oxygen status comparable to the situation before the large eutrophication period from 1950 to 1980. The Baltic Sea Action Plan is capable of reducing hypoxia to a reasonable level, but this will take about a century. HYPER has also been active in the autumn's BONUS public outreach activities.</p> <p>HYPER has also been active in the autumn's BONUS public outreach activities.</p>
Comparison with the original research and financial plan	The final workshop was held in November 2011 and the two deliverables due by the end of the project will be completed by January 2012.

NB! Metadata for models, observations, and monitoring data produced in HYPER can be found here:

<http://hyper.dmu.dk/metadata/>



## Future research and exploitation of the results

With HYPER we have advanced our scientific understanding of how oxygen conditions affect the nitrogen and phosphorus cycles on both short and long terms, as well as the role of the benthic fauna in modulating these processes. Although introduction of bio-irrigating species may speed-up the recovery process, a precondition is that oxygen must first reach levels for these organisms to (re)colonise and consequently the solution to mitigating hypoxia in the Baltic Sea is to reduce the organic loading by reducing inputs of nutrients from land and atmosphere. The estimated process rates obtained in HYPER have been used to improve the parameterisation of the BNI model, which will be used for revising the BSAP, but corroboration of these results from additional studies will improve our understanding and prediction of the potential recovery process.

Nutrients from land are mediated through the coastal zone before entering the open Baltic Sea. The coastal zone has an important role of retaining nutrients, i.e. acting as a coastal filter to reduce nutrient exports to the open waters. However, this filter becomes percolated when coastal systems experience hypoxia, and as a result nutrient inputs to the open waters increase. In HYPER we have reported wide-spread occurrences of hypoxia along the coastal zone of the Baltic Sea, which could indicate an increasing leakage of nutrients from the coastal zone. As a consequence there could be no change in the nutrient export from the coastal zone over the last 2-3 decades, despite reductions in nutrient inputs from land, because the coastal filter capacity has been diminished. Understanding the role of the coastal zone in retaining nutrients, particularly in relation to oxygen conditions, is crucial to understand the cause-effect chain from nutrient inputs to hypoxia in the Baltic Sea and to estimate consequences of nutrient management of the ecosystem health.

In HYPER we have demonstrated the importance of bio-engineering organisms on nutrient cycles, but we have only started exploring this research field. Particularly, we need to study the dynamical interaction between fauna and biogeochemical processes during different phases of ecosystem recovery to assert the resilience of the new system. This will allow assessing the long-term effect of recovered ecosystems, which will be crucial for decision support models to describe the likely outcome of nutrient management plans at all levels of the Baltic Sea ecosystem.

These intriguing research questions and others as well will be pursued through collaboration of HYPER scientists after the end of the project. Within the consortium we have received support to a workshop in Utrecht in spring 2012 to further advance our understanding of hypoxia in the Baltic Sea. A laboratory experiment to support the findings from HYPER will be carried out at IOW in January 2012. During a workshop in April 2012 statistical relationships between benthic fauna, long-term trends in salinity and hypoxia as well as the coupling to flux measurements from r/v Aranda will be analysed. Finally, the HYPER consortium will constitute the core of a new consortium for the upcoming BONUS call.