

# Numerische Modellierung des Ozean-Sediment-Systems in großen Meeresbecken

## Das Spätquartär im nördlichen Nordatlantik

### Abstract

Numerical modeling of oceanic circulation and its sedimentary response provides a quantitative means for evaluating and understanding the complex interactions of the ocean-sediment system.

SCINNA (Sensitivity and Circulation in the Northern North Atlantic) and IMOC (Intermediate numerical Model of the Ocean Circulation), two 3-dimensional fully prognostic ocean general circulation models, are used for modeling the paleoceanography of the Greenland, Iceland and Norwegian (GIN) Seas. The models are forced by prescribed sea surface temperatures and salinities, thereby introducing the effects of surface heat and freshwater fluxes. The prognostic sedimentation models SENNA (SEdimentation in the Northern North Atlantic) and PATRINNA (PARTicle TRacing In the Northern North Atlantic) are driven by the thermohaline oceanic circulation and are coupled to SCINNA or IMOC.

Modeling the Last Glacial Maximum on the 21600 calendar years time slice, the most probable scenario for the glacial summer resembles closely the modern winter with ice-free GIN seas in contrast to the CLIMAP scenario with ice-covered GIN seas.

The simulated sedimentation patterns and particle paths fit very well the observed sediment distributions, e. g. the large sediment drifts south of the Greenland-Scotland Ridge. Particle paths and accumulation in fine grained sediments depend strongly on deep convection and vertical mixing-depth.

### 1 Einführung

Numerische Modelle des Ozean-Sediment-Systems sollen zu einem besseren Verständnis der Beziehungen und Wechselwirkungen zwischen Ozean und Sediment und deren Abhängigkeit von externen Faktoren wie Klima und Geodynamik beitragen. Die numerische Modellierung dieser großskaligen, gekoppelten Systeme erfordert eine Verbindung von ozeanischen Zirkulationsmodellen (OZM) mit Sedimentations-

modellen (SM). Im OZM werden 3D-Zirkulationsmuster und Geschwindigkeitsfelder der Wassermassen berechnet, die für die Simulation von Erosion, Transport und Ablagerung der Sedimente und der Partikelbahnen im SM verwendet werden. Während aus der Ozeanographie verschiedene ausgereifte OZM zur Verfügung stehen, gibt es nur wenige Ansätze für daran koppelbare großräumige Sedimentationsmodelle.

Die Verbindung zwischen OZM und SM wird hier am Beispiel des nördlichen

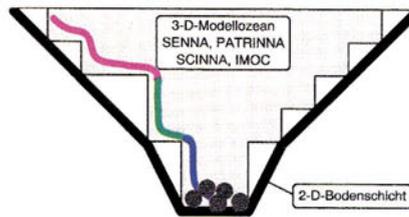


Abb. 1. Verbindung der ozeanischen Zirkulations- und Sedimentationsmodelle.

Nordatlantik vorgestellt. Die numerischen Modelle mit ihren bisherigen Ergebnissen wurden im Sonderforschungsbereich 313 „Veränderungen der Umwelt: Der nördliche Nordatlantik“ erarbeitet.

Die Modellrechnungen haben das Ziel,

- (1) mit Hilfe der zahlreichen aus Sedimentkernen vorliegenden Proxydaten über Temperatur und Salzgehalt im Ozean physikalisch konsistente Antriebsfelder der ozeanischen Zirkulation zu erzeugen,
- (2) die ozeanische Zirkulation und die daraus resultierende Sedimentation für die Zeit der letzten Maximalvereisung in der Zeitscheibe 21600 Kalenderjahre vor heute im Vergleich zum heutigen Zustand, dem Kontrollexperiment, dreidimensional zu simulieren,
- (3) die Übergänge zwischen Kalt- und Warmzeiten zu modellieren und
- (4) in enger Zusammenarbeit zwischen

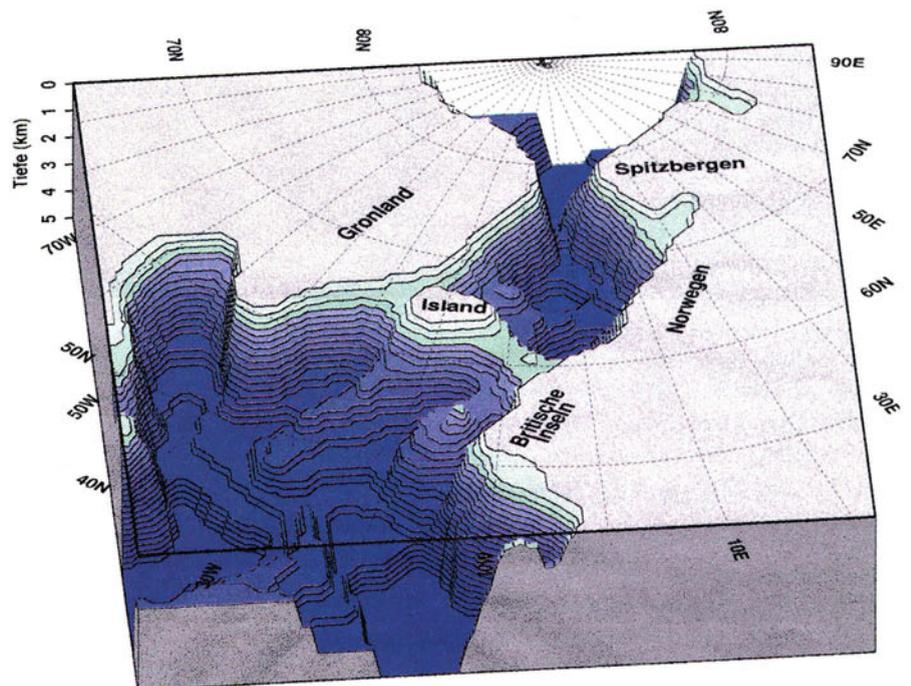


Abb. 2. Glaziale Modelltopographie.

Datenproduzenten und Modellierern die empirischen Daten, deren Interpretation und die Modellergebnisse kritisch zu vergleichen und zu verbessern.

**2 Numerische Modelle und Modellgebiet**

Für die Modellierungsarbeiten wurden folgende numerische Modelle entwickelt und benutzt [1]:

- SCINNA – Sensitivity and Circulation in the Northern North Atlantic;
- IMOC – Intermediate numerical Model of the Ocean Circulation;
- SENNA – SEDimentation (erosion, transport and deposition) in the Northern North Atlantic;
- PATRINNA – PArticle TRacing In the Northern North Atlantic.

**2.1 SCINNA und IMOC**

SCINNA ist ein dreidimensionales, hochauflösendes Zirkulationsmodell, das auf dem Modular Ocean Model, MOM [2], dem Nachfolger des bekannten Princeton-Zirkulationsmodells, aufbaut. SCINNA basiert auf den primitiven Gleichungen, ist voll prognostisch und erfüllt die Erhaltungssätze für Masse, Wärme, Salzgehalt und Impuls. Das Modell ermöglicht

- die Verwendung beliebiger Beckenformen, vor allem im Hinblick auf Änderungen der Topographie durch Meeresspiegelschwankungen oder geodynamische Prozesse,
- die Vorgabe beliebiger Temperatur und Salzgehaltsanfangsverteilungen,
- den Einsatz beliebiger Wind-, Eis- und Oberflächentemperatur- bzw. -salzgehaltsfelder und
- die Benutzung eines einfachen prognostischen Eismodells wahlweise statt einer fest vorgeschriebenen Eisdecke.

SCINNA ist auf einem rotierten sphärischen Koordinatensystem formuliert, bei dem der Schnittpunkt von Äquator und Nullmeridian gegenüber dem normalen geographischen System entlang des Nullmeridians um 60° nach Norden verdreht ist. Auf diese Weise wird die Meridiankonvergenz minimiert, die sonst zu unnötig kleinen Gitterweiten in hohen Breiten und damit zu unpraktikabel kurzen Zeitschritten und hohem Modellrauschen führt. Das Modellgebiet umfaßt das Europäische Nordmeer, das Polarmeer bis zur Linie 90°W-Pol-90°E, die Barents-, Nord- und Labradorsee sowie den Nordostat-

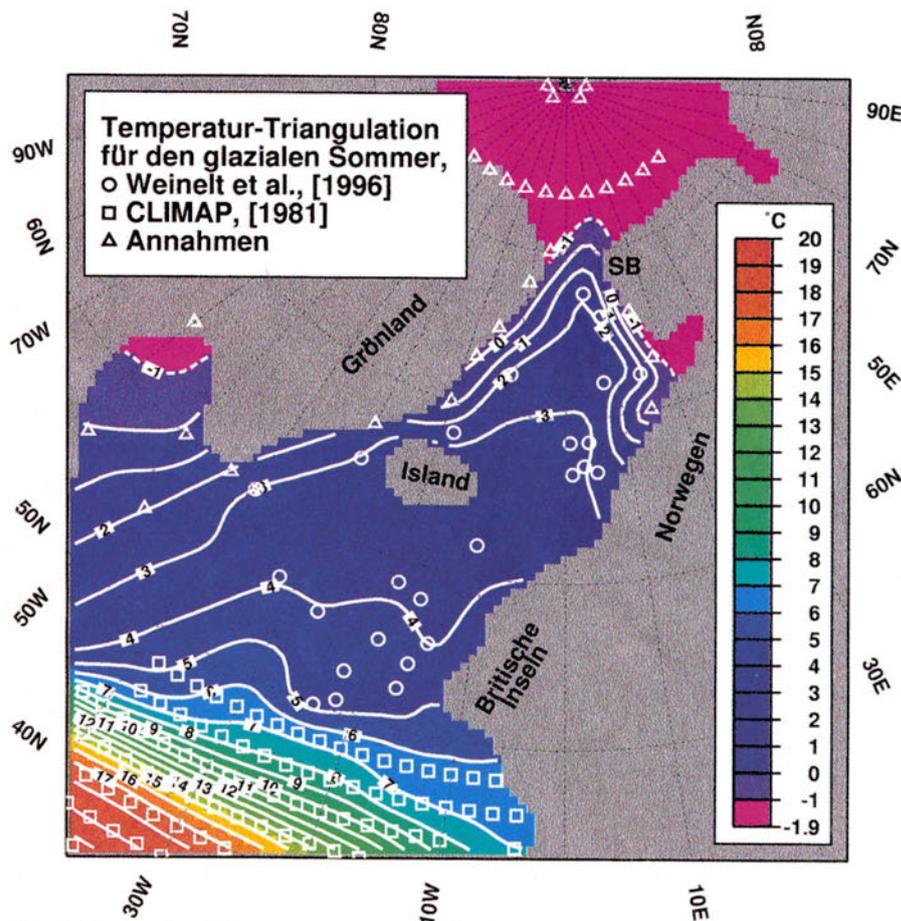


Abb. 3. Meeresoberflächentemperaturen des glazialen Sommers.

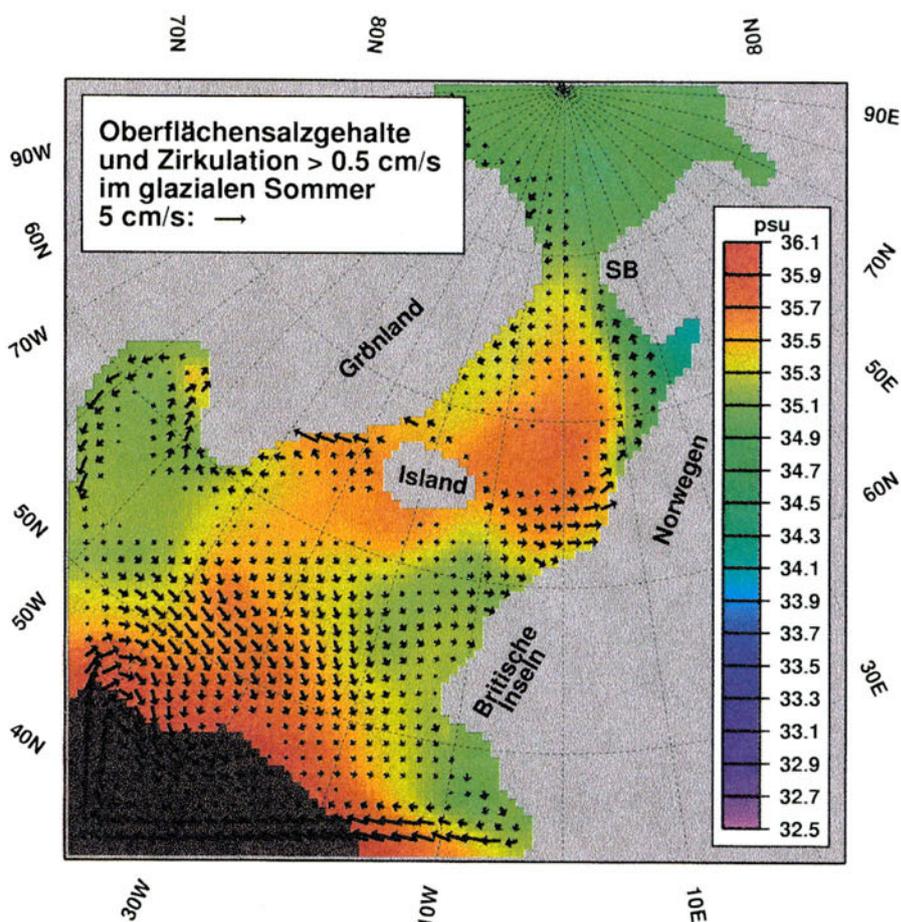


Abb. 4. Oberflächensalzgehalte und Zirkulation im glazialen Sommer.

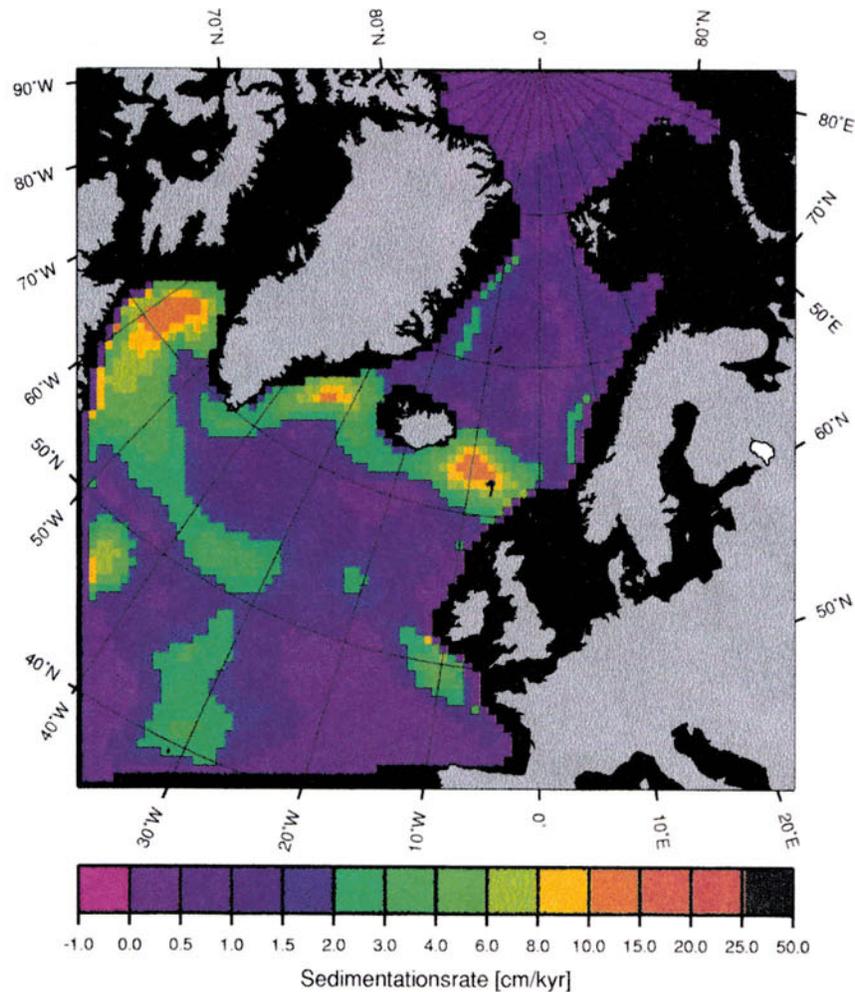
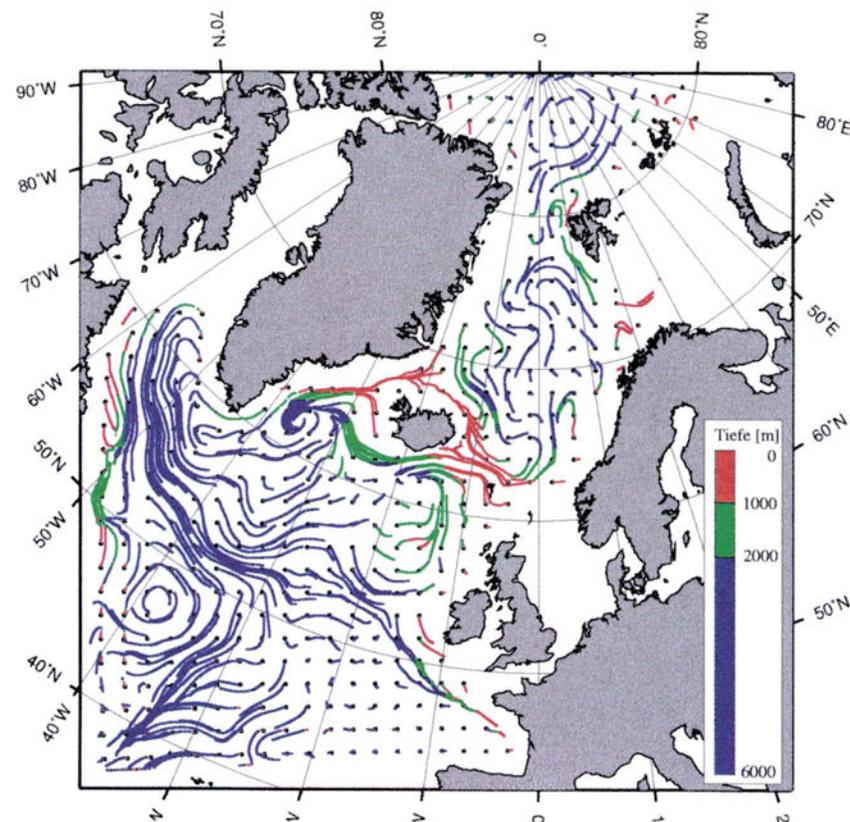


Abb. 5. Glaziale Sedimentationsmuster im eisfreien Europäischen Nordmeer.



12 Abb. 6. Glaziale Partikeltransportbahnen über zwei Jahre integriert.

lantik ab 40°N. Bei einer horizontalen Auflösung von 0,5° (ca. 50 km) und 17 Schichten in der Vertikalen enthält es rund 53 000 Gitterpunkte. Die Ränder im Polarmeer, der Barents-See und im Atlantik sind geschlossen. Entlang dieser Ränder werden in einem wenige Gitterpunkte breiten Streifen die Modelltemperaturen und -salzgehalte zurück zu klimatologisch vorgegebenen Werten gezwungen. Diese Technik („Restoring“) simuliert die Wassermassentransformation, die im gesamten Weltozean stattfindet.

IMOC ist als grobauflösendes, intermediäres geostrophisches Zirkulationsmodell entwickelt und für ein vergrößertes Modellgebiet, den Nordatlantik zwischen 10° und 80°N adaptiert worden [3]. Dieses Modell leistet mit relativ geringem Rechenaufwand

- das rasche Erfassen genereller Änderungen der Zirkulationsmuster bei Änderungen der klimatischen Randbedingungen,
- die Überprüfung der Konsistenz der Eingabedaten und damit bessere Initialisierungs- und Antriebsfelder für SCINNA.

## 2.2 SENNA, PATRINNA

Mit SENNA ist ein Sedimentationsmodell mit vereinfachter Modellphysik entwickelt worden, um in großen Sedimentbecken Langzeitsimulationen der Sedimentdynamik mit Resuspension und Umlagerung ausgehend von terrigenem und biogenem Sedimenteintrag durchführen zu können. Zur Modellinitialisierung wird der Output der OZM SCINNA und IMOC zusammen mit sedimentphysikalischen Parametern verwendet [1].

SENNA besteht aus zwei gekoppelten Modellen. Das erste enthält den dreidimensionalen Sedimenttransport in der Wassersäule, das zweite die zweidimensionalen bodennahen Prozesse in einer einen Zentimeter dicken Bodenschicht [1] (Abbildung 1).

Die Topographie, die horizontale und vertikale Ausdehnung bzw. Auflösung sind bis auf die zusätzliche Bodenschicht identisch mit SCINNA bzw. IMOC. Angetrieben wird SENNA durch die von den OZM simulierten dreidimensionalen Temperatur-, Salzgehalts- und Geschwindigkeitsfelder. Ein wichtiges Ziel der Modellierung besteht darin, dass bei Erreichung von kritischen Geschwindigkeiten Sediment aufgewirbelt, transportiert und somit umgelagert werden kann.

Mit Hilfe von PATRINNA kann der Weg einzelner Partikel von der Sedimentquelle bis zur Ablagerung entsprechend den Strömungen im Ozean verfolgt werden [1, 4].

PATRINNA besteht wie SENNA aus zwei gekoppelten Modellen: mit dem dreidimensionalen werden die Transportbahnen im Ozean und mit dem zweidimensionalen die Transportbahnen am Ozeanboden simuliert. Der Modellantrieb erfolgt ebenfalls wie bei SENNA aus dem OZM-Output und sedimentphysikalischen Parametern. In PATRINNA wird bei der Verfolgung einzelner Partikel in der Wassersäule im Falle vertikaler instabiler Schichtung die vertikale Vermischungstiefe mit berücksichtigt.

### 3 Modellergebnisse für die Zeit der letzten Maximalvereisung

Als Beispiel für ein klimarelevantes Szenario werden die Modellergebnisse der ozeanischen Zirkulation und der Sedimentation für die Zeitscheibe der letzten Maximalvereisung, 21 600 Kalenderjahre vor heute, vorgestellt. Für diese Zeitscheibe existieren umfangreiche Daten der Sauerstoffisotopen ( $\delta^{18}O$ ) von Foraminiferenschalen aus Sedimentkernen für die punktuelle Rekonstruktion von Paläotemperaturen und -salzgehalten [5].

#### 3.1 Ozeanische Zirkulation

Nach der Modellvalidierung mit der erfolgreichen Simulation des heutigen Zustandes im Europäischen Nordmeer [1, 3] lag der erste Schritt der Paläo-Modellierung in der Anpassung des Modellgebietes an die glaziale Topographie (Abbildung 2).

Aus den neuen Paläo-Oberflächentemperaturen, die an der Universität Kiel für das glaziale Europäische Nordmeer bestimmt worden sind [6], sowie den CLIMAP-Temperaturen [7] ist ein das Modellgebiet überdeckendes Oberflächentemperaturfeld des eiszeitlichen Sommers interpoliert worden. Mit einem eisfreien Europäischen Nordmeer zeigt es große Ähnlichkeiten zur heutigen Wintersituation (Abbildung 3).

Die Oberflächensalzgehalte sind aus den Sauerstoff-Isotopenverhältnissen fossiler planktischer Foraminiferenschalen neu berechnet worden [8]. Die mit diesen Temperatur- und Salzgehaltspfeln modellierte Zirkulation (Abbildung 4) belegt, dass zur Zeit der

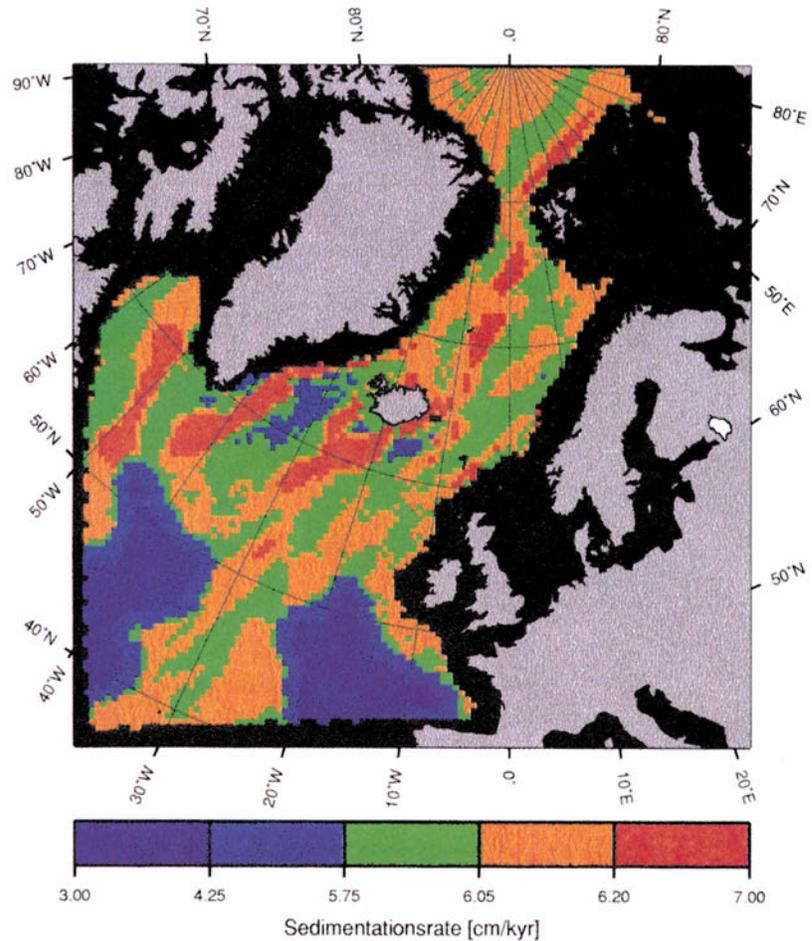


Abb. 7. Glaziale Sedimentationsmuster im eisbedeckten Europäischen Nordmeer.

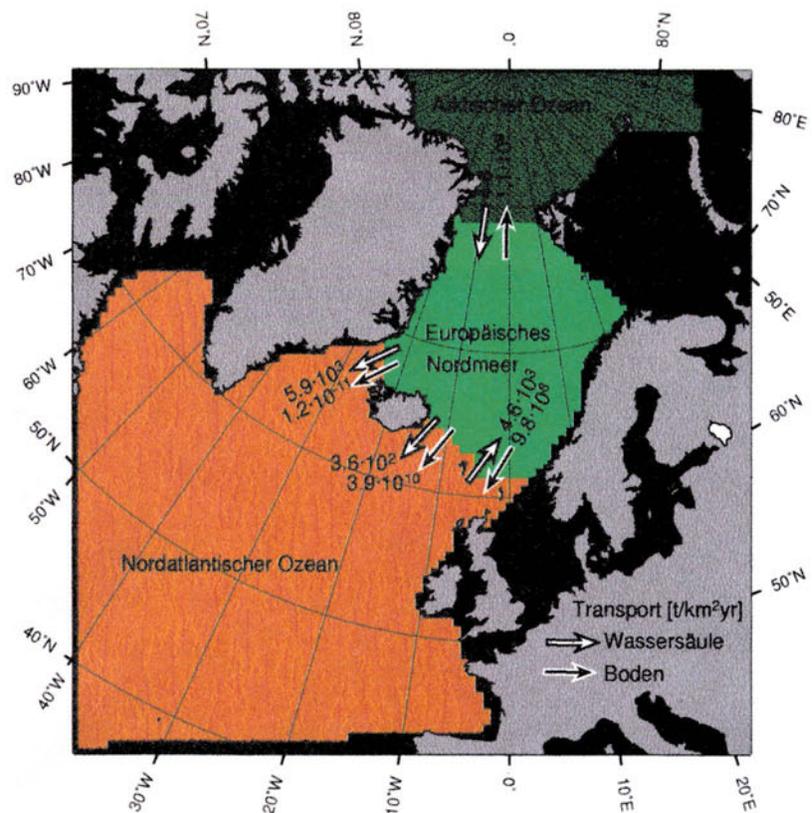


Abb. 8. Glaziale Sedimenttransporte zu Abbildung 7 in der Wassersäule und in der Bodenschicht.

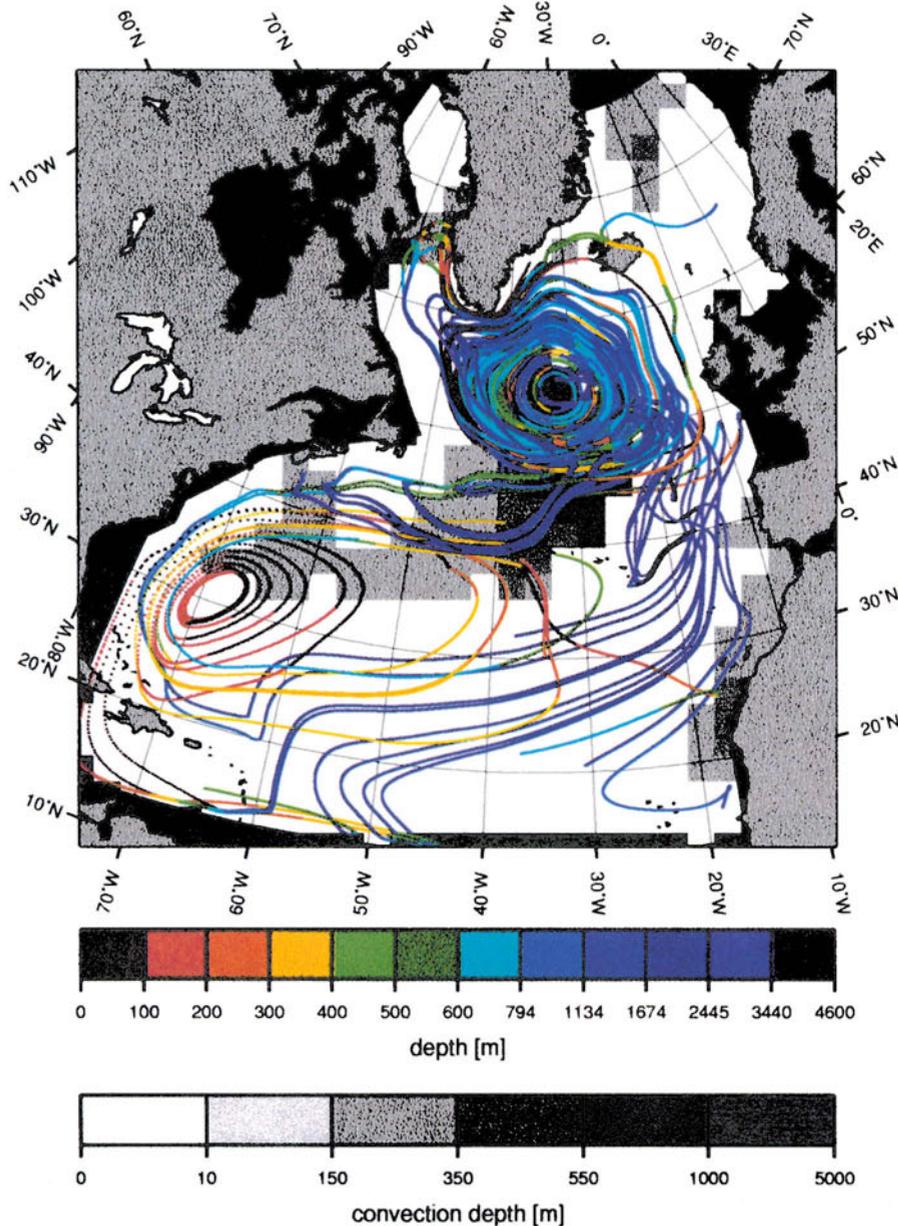


Abb. 9. Glaziale Partikeltransportbahnen mit Berücksichtigung der Tiefenkonvektion.

letzten Maximalvereisung der Norwegen- und Ostgrönlandstrom zusammen mit der antiästuarinzyklonalen Zirkulation im Europäischen Nordmeer existiert haben. Die Modellrechnungen mit dem eisfreien Europäischen Nordmeer im glazialen Sommer weichen deutlich von der CLIMAP-Rekonstruktion [8] mit der nach Süden bis Island reichenden Meeresvereisung ab.

**3.2 Sedimentation**

Die Modellierung der Sedimentation während der letzten Maximalvereisung benutzt den Modell-Output von SCINNA und IMOC zur Initialisierung von SENNA und PATRINNA. Modellrechnungen sind für die Sommersituation mit dem eisfreien Europäischen

Nordmeer und der CLIMAP-Rekonstruktion mit Eisbedeckung durchgeführt worden.

An der Meeresoberfläche wird ein geringer äolischer Sedimenteintrag aus der Atmosphäre mit  $1,0 \times 10^{-15} \text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  [9] vorgeschrieben, um nicht die Erosions- und Umlagerungsprozesse am Boden zu überdecken. Zusätzlich kann ein lateraler Sedimenteintrag durch angrenzende Flusssysteme aus den nicht vereisten Küstengebieten und dem Küstenabfluss vorgegeben werden [10].

Mit SENNA und PATRINNA ist es möglich, die bekannten großskaligen Sedimentdriften südlich des Grönland-Island-Faröer-Schottland-Rückens in guter Übereinstimmung mit den empirischen Befunden heraus-

zuarbeiten (Abbildung 5). In den Hauptakkumulationsgebieten betragen die Sedimentationsraten bis zu 15 cm/1000 Jahre. Die Entstehung der Sedimentationsmuster lassen sich mit der Darstellung einzelner Partikelbahnen in Abbildung 6 belegen und verdeutlichen. In diesem Experiment sind gleichmäßig an der Meeresoberfläche verteilte Partikel entsprechend der ozeanischen Zirkulation und einer Sinkgeschwindigkeit von 0,05 cm/sec in Bewegung gesetzt und ihre Transportbahnen zwei Jahre lang verfolgt worden.

Noch deutlicher bilden die berechneten glazialen Sedimentationsmuster für das eisbedeckte CLIMAP-Szenario [11] die nordatlantischen Sedimentdriften mit NE-SW orientierten Sedimentkörpern (Abbildung 7) ab. Für dieses Szenario werden die Sedimenttransporte in das und aus dem Europäischen Nordmeer heraus in Abbildung 8 angegeben.

Die Tiefenkonvektion bzw. die vertikale Vermischung ist für die Transportbahnen und Sedimentation feinkörniger Sedimente von großer Bedeutung, da sie den Sedimentpartikeln große Vertikalbewegungen in der Konvektionszelle ermöglicht. Während der letzten Maximalvereisung hat die Tiefenkonvektion gegenüber dem heutigen Zustand um etwa 30 % abgenommen und ist um etwa zehn Breitengrade nach Südosten verschoben [4]. Die glazialen Transportbahnen unterscheiden sich erheblich von den heutigen und den glazialen ohne Konvektion (Abbildung 9). Dabei bleiben die Lokationen der Sedimentdriften und damit der finalen Deposition relativ ortsstabil, aber es ändern sich die Sedimentationsraten in den Driften und der Transport durch die Meeresengen in das Europäische Nordmeer und aus ihm heraus.

**4 Ausblick**

Die numerische Modellierung der ozeanischen Zirkulation und der daraus resultierenden Sedimentation ist ein Werkzeug zur Quantifizierung und zum besseren Verständnis der komplexen klimagesteuerten Wechselwirkungen im Ozean-Sediment-System großer Meeresbecken. Das vorgestellte Beispiel der letzten Maximalvereisung zeigt, dass dieser Modellierungsansatz an ausreichend dokumentierten Zeitscheiben erfolgreich durchgeführt werden kann.

Darüber hinaus dienen die numerischen Modelle dazu, die Übergänge zwischen unterschiedlichen Klimazuständen zu simulieren. Zur Zeit wird von der Kieler Arbeitsgruppe an der Modellierung des Übergangs vom eiszeitlichen zum heutigen Klimazustand mit der besonderen Berücksichtigung von Schmelzwasserereignissen [3, 12] und deren Abbild im Sediment über den Eisbergdetritus gearbeitet.

**Literatur**

[1] B. J. Haupt, C. Schäfer-Neth & K. Stattegger: Three-dimensional numerical modeling of Late Quaternary paleoceanography and sedimentation in the northern North Atlantic; *Geol. Rundschau* 84 (1995) 137–150.  
 [2] R. Pacanowski, K. D. Dixon & A. Rosati: The G.F.D.L. Modular Ocean Model Users Guide. GFDL Ocean Group Tech. Rep. No.2 Geophysical Fluid Dynamics Laboratory / NOAA, Princeton University (1993) (veröff. als file /pub/ GFDL-MOM/VERSION\_1.1/READ\_ME1.1 auf dem server ftp. gfdl. gov.).  
 [3] D. Seidov, M. Sarnthein, K. Stattegger, R. Prien & M. Weinelt: North Atlantic ocean

circulation during the last glacial maximum and subsequent meltwater event: A numerical model; *J. Geophys. Res.* 101, C7 (1996) 16305–16332.  
 [4] D. Seidov & B.J. Haupt: Simulated ocean circulation and sediment transport in the North Atlantic during the Last Glacial Maximum and today; *Paleoceanography* (im Druck).  
 [5] M. Weinelt, M. Sarnthein, U. Pfaumann, H. Schulz, S. Jung & H. Erlenkeuser: Ice-free nordic seas during the Last Glacial Maximum? Potential sites of deep water formation; *Paleoclimates* 3 (1996) 25–57.  
 [6] U. Pflaumann, J. Duprat, C. Pujol & L. Labeyrie: SIMMAX, a transfer technique to deduce Atlantic sea surface temperatures from planctic foraminifera – the „EPOCH“ approach; *Paleoceanography* 11 (1996) 15–35.  
 [7] CLIMAP Project Members: Seasonal reconstructions of the Earths surface at the Last Glacial Maximum; *GSA Map and Chart Service MC-36*, Geol. Soc. America, Boulder (1981).  
 [8] C. Schäfer-Neth: Evidence for changes in the seawater salinity-oxygen isotope relation during geological history: data and modelling control; *Paleoclimates* (eingereicht).  
 [9] S. Honjo: Particle fluxes and modern sedimentation in the Polar Oceans. In: W. O.

Smith Jr. (Hrsg.): *Polar Oceanography, Part B*, Academic Press, Boston, Massachusetts (1990), S. 687–739.  
 [10] P. Enos: Sedimentary parameters for computer modeling. In: E. K. Franseen, W. L. Watney, C. G. St. C. Kendall & W. Ross (Hrsg.): *Sedimentary Modeling: Computer Simulation and Methods for Improved Parameter Definition*, Kansas Geological Survey Bull. 233 (1991) S. 63–98.  
 [11] B. J. Haupt, C. Schäfer-Neth & K. Stattegger: Modelling sediment drifts: a coupled oceanic circulation-sedimentation model of the northern North Atlantic; *Paleoceanography* 9 (1994) 897–916.  
 [12] C. Schäfer-Neth & K. Stattegger: Meltwater pulses in the northern North Atlantic: Retrodiction and forecast by numerical modelling; *Geol. Rundschau* (im Druck).

**Anschriften der Verfasser:**

Prof. Dr. Karl Stattegger, Prof. Dr. Dan Seidov, Geologisch-Paläontologisches Institut und Museum, Universität Kiel, Olshausenstraße 40, D-24118 Kiel.  
 Dr. Bernd J. Haupt, Dr. Christian Schäfer-Neth, Sonderforschungsbereich 313, Universität Kiel, Heinrich-Hecht-Platz 10, D-24118 Kiel.

# Eindrucksvolle Zeugen der Brückenbaukunst



Klaus Stiglat  
**Brücken am Weg**  
 Frühe Brücken aus Eisen und Beton in Deutschland und Frankreich  
 1997, 180 Seiten  
 mit 205 Abbildungen.  
 Format: 14 x 25,5 cm.  
 Gb. DM 68,- /GS 496,- /sFr 61,-  
 ISBN 3-433-01299-7

Die frühen Straßen- und Eisenbahnbrücken aus Eisen entstanden zu Beginn des 18. Jahrhunderts; nur wenige Jahrzehnte später folgten die ersten bemerkenswerten Ingenieurbauwerke aus dem neuen Werkstoff Beton. Sie wurden im Konkurrenzkampf gegen die immer kühneren – im Vergleich zu den neuen Baustoffen aber zu teuren – Steinbrücken von wagemutigen Ingenieuren entworfen und gebaut. Einige dieser beachtenswerten Zeugnisse der Ingenieurbaukunst sind bis heute erhalten; sie sind Geschichte zum Anfassen. Der Reiseführer will Bauingenieuren, Architekten und interessierten Laien den Zugang zu einigen dieser herausragenden Konstruktionen mit ausführlichen Wegbeschreibungen und mit wichtigen Hinweisen zu ihrer Entwicklung und ihrem Entstehen ermöglichen.



**Ernst & Sohn**