

2. MEER UND KLIMA

Über 70% der Erdoberfläche sind von den Meeren bedeckt. Es ist daher nicht verwunderlich, dass die Meere in Wechselwirkung mit der Atmosphäre entscheidend unser Klima prägen. In diesem Kapitel werden die Themen behandelt, die die enge Verbindung zwischen Meer und Klima belegen. Neben den äußeren Einflussfaktoren wie Solaraktivität und orbitalen Erdparametern gibt es eine interne Variabilität hauptsächlich durch die Wechselwirkung zwischen Atmosphäre und Ozean. Die Schwankungen beider haben das Klima der Eiszeiten und der Warmzeiten beeinflusst. Diese Informationen über Klimaschwankungen sind in den Meeressedimenten gespeichert, deren Analysen die Rekonstruktion des Klimas vergangener Zeiträume erlaubt. Weitere Artikel in diesem Kapitel befassen sich mit den Phänomenen El-Nino/Southern Oszillation, Nordatlantische (NAO) und Atlantische Multidekadische Oszillation (AMO), den Veränderungen des Meereises, der Erwärmung des Meeres und der Zunahme der Niederschläge sowie regionaler und globaler Veränderung des Meeresspiegels.

2.1 Thermohaline Meeresströmungen in Kalt- und Warmzeiten

HENDRIK KIENERT

Thermohaline Circulation in glacial and interglacial periods: The Thermohaline Circulation (THC) is a system of ocean currents that connect the different oceans. In the Atlantic Ocean, surface waters move towards the North where their density is increased and they sink. This North Atlantic Deep Water flows back towards the South and the resulting heat transport from the South to the North contributes significantly to the climate in the North Atlantic region. With a very high probability, known massive and abrupt climate changes - at least on regional scale - during the last glacial period are connected to changes of the THC or are partly caused by them. Paleodata indicate regular abrupt warming in Greenland followed by slower readjustment of the temperature (Dansgaard-Oeschger events) as well as less frequent abrupt cooling in the North Atlantic region (Heinrich-events), which occurred simultaneously with global climate changes. These effects could be explained by shifts of the deep water formation region between the Nordic Seas and a region south of Iceland as well as collapses of the circulation due to increased freshwater flux as a consequence of partial calving of the Laurentide Ice Sheet. There are also indications of THC-changes during the current interglacial, but they have been significantly less pronounced. Thus one can assume a higher sensitivity of the THC during the last glacial period compared to the Holocene, but still this does not exclude significant changes of the Thermohaline Circulation in the context of anthropogenic climate change.

Die Thermohaline Zirkulation (s. Kap. 1.2: Fährbach) ist ein System von Ozeanströmungen, deren Stärke zu einem großen Teil von der Dichtestruktur des Wassers, die sich aus Salzgehalt und Temperatur ergibt, bestimmt wird. Im Atlantik fließt warmes und salzreiches Wasser aus südlichen Regionen in den o-

bernen Meeresschichten nach Norden, wo es abkühlt und folglich dichter wird. Dieses Wasser sinkt und wird zu Tiefenwasser, bevor es in einer mittleren Tiefe von etwa zwei Kilometern zurück nach Süden fließt (Abb. 2.1-1). Dies führt zu einem nach Norden gerichteten Wärmetransport der Strömung im Atlantik von etwa

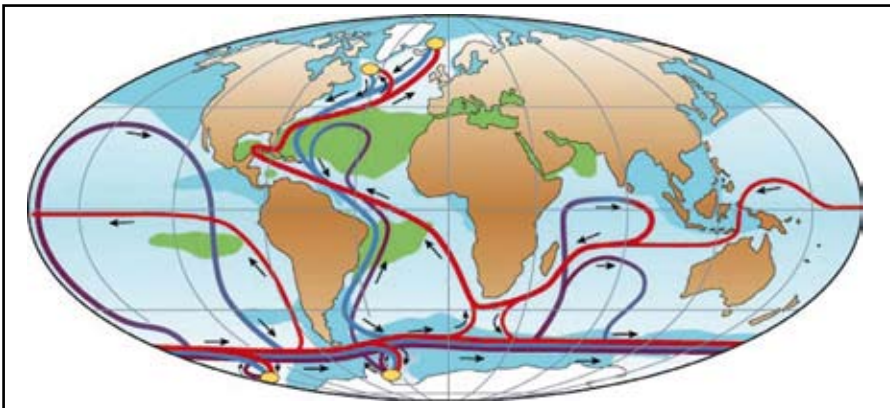


Abb. 2.1-1: Weltkarte (RAHMSTORF 2002) mit Thermohaliner Zirkulation und den gegenwärtigen Tiefenwasserbildungsregionen (Kreise). Mit freundlicher Genehmigung des Autors.

1,2 Petawatt und ist für eine Erwärmung des Nordatlantikraums verantwortlich. Die Lufttemperatur über dem Europäischen Nordmeer wird so in etwa um 10 Grad Celsius gegenüber dem Breitenkreismittel erhöht. Neben Dichteänderungen des Wassers beeinflussen auch die Winde über dem Südpolarmeer die Strömungsstärke, indem sie Wasser aus der Tiefe an die Oberfläche ziehen (Ekman-Upwelling).

Eine Veränderung der Randbedingungen vor allem in den Tiefenwasserbildungsregionen kann die Stärke der Strömung massiv beeinflussen. So führt eine Verringerung des Salzgehalts, wie sie zum Beispiel durch erhöhte Niederschläge oder das Schmelzen von Landeis hervorgerufen werden kann, zu einer geringeren Dichte, was wiederum die Tiefenwasserbildung im Extremfall zum Erliegen bringen kann.

Neben externen Einflüssen auf die Dichte der Wassermassen spielen auch Rückkopplungsmechanismen eine Rolle. Den größten Einfluss hat hierbei das folgende, 1961 von Henry Stommel (STOMMEL 1961) beschriebene sogenannte Stommel-Feedback: Aufgrund relativ hoher Verdunstung im subtropischen Atlantik herrscht dort ein erhöhter Salzgehalt an der Meeresoberfläche. Wenn die THC stärker wird, so wird mehr salzreiches Wasser nach Norden transportiert und die Dichte in der Tiefenwasserbildungsregion wird größer. Da dies wiederum die THC verstärkt, spricht man von einer »positiven Rückkopplung«. Im Falle einer Abschwächung der Strömung und damit eines reduzierten Salztransports folgt eine geringere Dichte in der Tiefenwasserbildungsregion und somit insgesamt eine nichtlineare Abschwächung der Strömung. Das Stommel-Feedback wirkt also auf eine Verstärkung der anfänglichen Störung des Systems hin.

Um diesen Effekt unter stark vereinfachten Annahmen mathematisch zu untersuchen, ging Stommel von einem aus zwei homogenen, idealisierten Ozeanbecken

bestehenden theoretischen Modell aus. Seine Untersuchung ergab, dass in diesem Fall die Strömungsstärke ein Hysterese-Verhalten unter externen Süßwasserflüssen zeigen kann (Abb. 2.1-2). Das bedeutet, dass ein Abbruch der Strömung durch Hinzugabe von Süßwasser nicht rückgängig gemacht werden kann, indem man den Eingriff beendet. Stattdessen ist die Hinzugabe von Salz notwendig, um die kritische Schwelle zum Wiedereinsetzen der Zirkulation zu überschreiten. Der gegenwärtige Zustand ist damit von der Vorgeschichte abhängig und sowohl mit einer »angeschalteten« als auch einer »ausgeschalteten« Zirkulation langfristig kompatibel; es liegt eine Bistabilität der THC vor. Dieses Verhalten wurde später in einigen Computermodellen mit realistischer Geographie beobachtet (RAHMSTORF et al. 2005), jedoch in anderen nicht. Man kann zeigen, dass die Stabilität des zweiten Zustands davon abhängt, ob die THC in dem Modell einen positiven oder negativen Netto-Süßwasserfluss in den Atlantik bewirkt. Auch wenn eine Monostabilität unter aktuellen Bedingungen auf der Basis von Messdaten eher unwahrscheinlich erscheint, stellen viele neuere Modelle für die gegenwärtigen Randbedingungen eine monostabile THC (Salz-Export aus dem Atlantik) dar (DRIJFHOUT et al. 2010). Dies ändert sich teilweise, wenn die Strömung unter erhöhten Treibhausgaskonzentrationen simuliert wird. Dies zeigt, wie stark die Reaktion auf externe Störungen von den klimatischen Randbedingungen abhängen kann. Allerdings ist zu beachten, dass selbst im Falle eines einzigen stabilen Zustandes Wechsel zu instabilen Zuständen für die Dauer von Jahrhunderten möglich sind.

Klima- und THC-Änderungen während der letzten Kaltzeit

Eine Untersuchung vergangener THC-Änderungen während unterschiedlicher klimatischer Zeitalter sowie

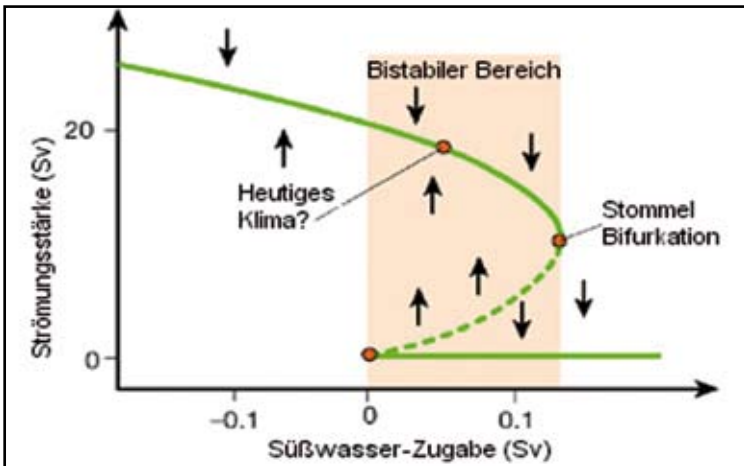


Abb.2.1-2: Skizze des Hysterese-Verhaltens der THC unter Hinzugabe von Süßwasser in den Nordatlantik (abgeändert, RAHMSTORF 2002) (1 Sverdrup = 10⁶ m³/s). Mit freundlicher Genehmigung des Autors.

deren Zusammenhänge mit Änderungen wichtiger Klimakenngrößen wie zum Beispiel der Temperatur ist in zweierlei Hinsicht relevant: Zum einen ist ein besseres Verständnis der Strömungsstabilität wichtig, um das Risiko einer möglichen zukünftigen Abschwächung der THC einschätzen zu können. Zum anderen kann man Schlussfolgerungen über deren Konsequenzen ziehen bzw. eine Einschätzung gewinnen, in welchem Maß die THC an bisherigen Klimaänderungen beteiligt war.

Seit deutlich mehr als 30 Mio. Jahren ist der Südpol der Erde und seit etwa 2,7 Mio. Jahren der Nordpol kontinuierlich vereist. Allerdings gab es in dieser Zeit massive Schwankungen der mittleren Temperatur. So unterscheidet man Kalt- und Warmzeiten, deren Wechsel durch Umverteilung der auf die Erde auftreffenden Sonnenenergie ausgelöst werden. Während sich die Erde seit etwa 11.700 Jahren in einer Warmzeit (Interglazial), dem Holozän, befindet, ging dieser eine etwa 100.000 Jahre andauernde Kaltzeit, das Weichsel-Glazial, voraus. Für diese Kaltzeit liegen verschiedene zuverlässige indirekte Messreihen vor, die aus Eisbohrkernen und Sedimentablagerungen gewonnen wurden.

Aus diesen Daten lässt sich unter anderem auf mehrere abrupte regionale Klimaänderungen schließen (CLEMMENT & PETERSON 2008), die sogenannten Dansgaard-Oeschger- und Heinrich-Ereignisse. Im verbleibenden Teil dieses Abschnitts wird in Ausschnitten auf deren Charakteristika sowie die Messdaten, aus denen wir von den Ereignissen wissen, eingegangen. Auch wenn Meereiseffekte und Wechselwirkungen zwischen dem Ozean und der Atmosphäre in den Tropen ebenfalls als Gründe für die massiven regionalen, aber auch global spürbaren Auswirkungen dieser Ereignisse diskutiert werden, so sind mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit THC-Änderungen die Ursache. Daher werden wir zunächst kurz Möglichkeiten zur Bestimmung früherer Strömungsgeschwindigkeiten bzw. der damaligen Tiefenwasserbildung betrachten.

An verschiedenen Stellen des Atlantiks wurden in unterschiedlicher Wassertiefe (beispielsweise an Übergängen zum Kontinent und in anderen Gebieten mit unterschiedlicher Tiefe) Sedimentbohrungen durchgeführt. Bestimmt man das Alter einer Schicht sowie das Verhältnis des Vorkommens zweier Kohlenstoffisoto-

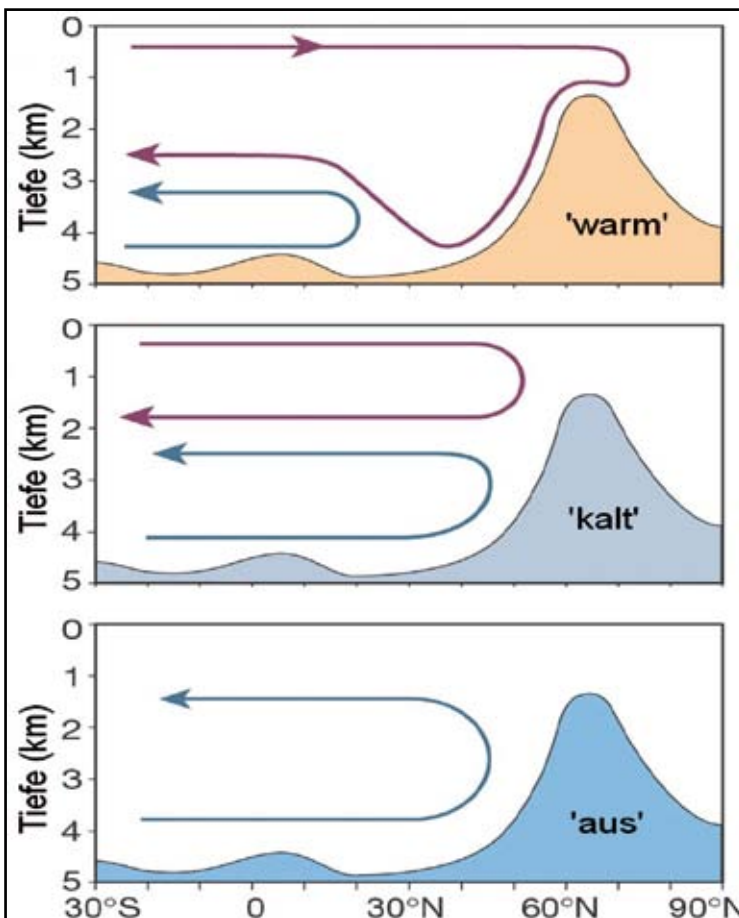


Abb. 2.1-3: Drei Zustände der THC während der letzten Kaltzeit: Tiefenwasserbildung im Europäischen Nordmeer (»warm«), südlich von Island (»kalt«) oder Strömungsabbruch (»aus«) (abgeändert, RAHMSTORF 2002). Mit freundlicher Genehmigung des Autors.

pe in Überresten von Mikroorganismen, so kann man daraus Rückschlüsse auf die Tiefenwasserbildung zur Zeit der Ablagerung ziehen. Solche Untersuchungen (SARNTHEIN et al. 1994) haben deutliche Hinweise auf drei verschiedene (nicht notwendig stabile) Zustände ergeben: eine der gegenwärtigen Situation entsprechende Tiefenwasserbildung im Europäischen Nordmeer, Tiefenwasserbildung südlich von Island und ein Zustand ohne Thermohaline Zirkulation (Abb. 2.1-3).

Auf Basis solcher Bohrkerne wurden auch sehr schwierige und somit ungenaue direktere Rekonstruktionen der Strömungsgeschwindigkeit durchgeführt. Hierfür wurde beispielsweise die Körnchengröße von Sedimenten, die von der Strömung in Bodennähe transportiert wurden, erfasst. Außerdem ist es möglich, aus der Rekonstruktion von Temperatur und Salzgehalt räumliche Dichteveränderungen zu bestimmen. Da diese in erster Näherung in einem festen Verhältnis zu den vorliegenden Strömungsgeschwindigkeiten stehen, stellen sie einen weiteren Indikator dar. Eine besonders aussagekräftige Methode zur Bestimmung früherer THC-Stärken nutzt Zerfallsprodukte von Uran: Proactinium-231 (Pa231) und Thorium-230 (Th230). Diese entstehen in einem festen Mengenverhältnis, wobei Pa231 eine deutlich längere Verweilzeit im Wasser hat, bevor es sich am Ozeanboden anlagert (McMANUS et al. 2004). Je nach Intensität der Umwälzzirkulation erreicht unterschiedlich viel Pa231 südlichere Regionen, und aus dem Verhältnis der beiden Elemente kann man Hinweise auf die Strömungsgeschwindigkeit in der Wassertiefe, in der die Sedimentbohrung durchgeführt wurde, bzw. zumindest auf den Ursprung der dortigen Wassermassen zu vergangenen Zeiten schließen. McMANUS et al. (2004) konnten mit dieser Methode zumindest eine massive Abschwächung der THC während des letzten Heinrich-Ereignisses und eine Verstärkung beim Übergang zum Holozän zeigen. Neueste Ergebnisse (NEGRE et al. 2010) sind auch mit dem Bild der zwei oben genannten Tiefenwasserbildungsregionen konsistent. Allerdings sind die Schlussfolgerungen aufgrund der hohen Komplexität der Methode nicht unumstritten. Trotzdem stützen diese und andere kinematische Paläodaten, die direkt auf THC-Variationen hindeuten, eine Verknüpfung unterschiedlicher THC-Zustände mit den regionalen abrupt eingetretenen Klimaänderungen der letzten Kaltzeit.

Dansgaard-Oeschger-Ereignisse

Die vielleicht deutlichsten Hinweise auf Klimaänderungen in der letzten Kaltzeit stammen von Grönland-Eisbohrkernen (GRIP, GISP2 und NGRIP). Diesen ist zu entnehmen, dass in Abständen von in etwa 1.500 Jahren (oder Vielfachen hiervon) eine Erwärmung

Grönlands um meist etwa 5 bis 10°C innerhalb weniger Jahrzehnte stattgefunden hat. Ob eine statistisch signifikante Periodizität vorliegt, ist allerdings umstritten (BRAUN 2009). Diesen Erwärmungen folgte jeweils ein über einige Jahrhunderte stattfindender langsamer Rückgang der Temperatur mit einem abschließenden schnellen Fall auf die niedrigen glazialen Temperaturen. Zeitgleich sind weit von Grönland entfernt Anomalien in anderen Datenreihen zu finden, wobei die am stärksten ausgeprägten Signale dieser Dansgaard-Oeschger-Ereignisse (D/O-Ereignisse, DANSGAARD et al. 1993) in der Region des nördlichen Atlantik vorliegen. Dies kann man als einen Indikator für eine bedeutende Rolle der THC interpretieren. So konnte beispielsweise aus Sedimenten die Veränderung der Anzahl spezieller Mikroorganismen bestimmt und so Rückschlüsse auf die Meeresoberflächentemperatur gezogen werden. Hierbei wurden im Rahmen der D/O-Ereignisse nicht nur Temperaturdifferenzen von 3–5° oder mehr im subtropischen Nordatlantik, sondern auch von z.B. bis zu 4–5° im subtropischen Gebiet um die Bermudainseln festgestellt (CLEMENT & PETERSON 2008).

Bei Veränderungen der THC-Stärke und damit des meridionalen Wärmetransports erwartet man entgegengesetzte Temperaturreaktionen im Nord- und Südatlantik, den sogenannten hemisphärischen »saw«-Effekt (»Wippe«). Rekonstruktionen von D/O-Ereignissen auf Basis verschiedener Paläodaten zeigen diesen Effekt auf. Dass während des kalten Basiszustands des letzten Glazials Nordatlantisches Tiefenwasser gebildet wurde, spricht gegen eine überwiegend »ausgeschaltete« THC und damit gegen eine Erklärung der D/O-Erwärmungen durch ein zeitweises Einsetzen der Umwälzzirkulation. Um ein besseres Verständnis der THC während der letzten Kaltzeit zu erlangen, wurden verschiedene Computersimulationen durchgeführt (KAGEYAMA et al. 2010). GANOPOLSKI & RAHMSTORF (2001) konnten zeigen, dass man die Beobachtungen qualitativ reproduzieren kann, wenn im glazialen Basiszustand die Tiefenwasserbildung südlich von Island (einer der oben genannten rekonstruierten drei Zustände) stattfand und sich im Rahmen der D/O-Ereignisse in das Europäische Nordmeer verschoben hat. Darauf, dass dem glazialen Basiszustand eine Konvektion südlich von Island entsprach, deuten neben Simulationen mit Computermodellen mittlerer Komplexität auch Ergebnisse von Studien mit vollständigen »Globalen Zirkulationsmodellen« hin. So zeigten HEWITT et al. (2001) mit dem Modell HadCM3 für das letzte glaziale Maximum (vor etwa 20.000 Jahren) eine isolierende Meereisschicht im Nordmeer, die den Wärmeaustausch mit der Atmosphäre und somit Konvektion verhindert. Das Tiefenwasser wurde in der Modellsimulation in

großen Teilen des Nordatlantiks und in der Labradorsee gebildet. Mit einer während der D/O-Ereignisse weiter nach Norden vordringenden THC ging ein Schmelzen des Meereises im Nordmeer notwendig einher. Allerdings war dieser Zustand instabil und somit nicht von Dauer.

Die grundlegende Ursache der D/O-Ereignisse ist nach wie vor ungeklärt. In Frage kommen interne Variabilität oder ein externer Auslöser. Die statistischen Untersuchungen von DITLEVSEN et al. (2007) deuten auf eine zufällige Verteilung der Ereignisse und somit interne Variabilität hin. Im Gegensatz hierzu argumentiert RAHMSTORF (2003) auf Basis der GISP2-Daten für eine signifikante Periodizität von im Mittel 1.470 Jahren (oder Vielfachen) und damit eine externe Ursache. Diese könnte zum Beispiel in der Überlagerung zweier bekannter Sonnenzyklen liegen (BRAUN et al. 2005), die leichte Variationen (positiv und negativ) von regionalen Süßwasserflüssen und damit der Dichte des Wassers in den kritischen Gebieten zur Folge gehabt haben könnte. Aufgrund ihrer diesbezüglichen Nichtlinearität könnte die THC ein solch minimales Signal verstärkt und wegen ihrer zentralen Rolle für andere Klimakomponenten überregionale bis globale Konsequenzen herbeigeführt haben. Eine mögliche Erklärung dafür, dass sehr geringe äußere Einflüsse für den Effekt genügen, kann im Mechanismus der stochastischen Resonanz liegen: Wenn einer zufälligen internen Variabilität, deren Amplitude einen notwendigen Schwellenwert knapp nicht erreicht, ein minimales periodisches Signal überlagert wird, kann der Grenzwert regelmäßig überschritten werden (GANAPOLSKI & RAHMSTORF 2002). Je schlechter die Bedingungen für stochastische Resonanz sind, umso häufiger würde ein zeitlicher Abstand von zum Beispiel 3.000 oder 4.500 Jahren statt 1.500 Jahren auftreten.

Heinrich-Ereignisse

Abgesehen von den regelmäßigen D/O-Ereignissen, sind Heinrich-Ereignisse die auffälligsten Signale in den Paläomessdaten der letzten Kaltzeit. Grobkörnige Sedimentschichten auf dem Grund des Nordatlantiks, die am dicksten in der Labradorsee sind, können nur von Eisbergen transportiert worden sein. Aus dieser Beobachtung lässt sich auf ein unregelmäßiges Abrutschen von Teilen (bis zu 10%) des Laurentischen Eisschildes, das große Teile Nordamerikas bedeckte, schließen. Dies geschah in etwa in zeitlichen Abständen von 10.000 Jahren. Während die vorherrschenden ohnehin niedrigen Temperaturen Grönlands hiervon unbeeinflusst blieben, traten Abkühlungen im nördlichen Atlantikraum südlich von Grönland auf. So ha-

ben beispielsweise Analysen eines Bohrkerns in der Nähe der portugiesischen Küste Abkühlungen der Meeresoberfläche von mehreren Grad während der letzten drei Heinrich-Ereignisse ergeben. Das Vorhandensein eines ausgeprägten »see-saw«-Effekts, also deutlicher Erwärmungen im antarktischen Raum, spricht dafür, dass die THC im Rahmen von Heinrich-Ereignissen zeitweise abgebrochen ist. Ebenfalls kann man aus Messdaten darauf schließen, dass zu diesen Zeiten verstärkt Antarktisches Tiefenwasser gebildet wurde. Dieser Zustand einer abgebrochenen THC scheint unter damaligen Bedingungen allerdings ebenfalls instabil gewesen zu sein, sodass die Zirkulation zwangsläufig wiedereinsetzen musste.

Direkt nach einem Heinrich-Ereignis waren die Dansgaard-Oeschger-Erwärmungen besonders stark. Während das Laurentische Eisschild anschließend wieder langsam an Volumen gewann, haben die Maximaltemperaturen der D/O-Ereignisse bis zum nächsten Heinrich-Ereignis schrittweise immer geringere Werte erreicht (BOND et al. 1993). Dies bezeichnet man als Bond-Zyklus. Die vorhandenen Messdaten beschränken sich zum großen Teil auf die von D/O und Heinrichereignissen besonders beeinflusste Region des Nordatlantiks sowie die Antarktis. Daher lassen sich kaum quantitative Aussagen über die viel geringeren Auswirkungen in anderen Regionen der Erde machen, die auch durch sekundäre Effekte wie veränderte Niederschläge hervorgerufen wurden. Den Computersimulationen eines THC-Abbruchs während der letzten Kaltzeit (z.B. GANAPOLSKI & RAHMSTORF 2001) lässt sich aber entnehmen, dass die Änderung der Lufttemperatur am Boden im hemisphärischen Mittel nicht mehr als etwa 1–2°C betragen hat. Dieser im Vergleich zu den Grönlandtemperaturen relativ geringe Wert unterstreicht die sehr starke regionale Ausprägung der hier betrachteten Ereignisse.

Für die vorletzte Eiszeit sind nur wenige auf der hier betrachteten Zeitskala hinreichend genaue Daten vorhanden. Trotzdem konnte gezeigt werden, dass solche den »see-saw«-Effekt aufzeigenden Ereignisse auch für diese Zeit charakteristisch waren (MARGARI et al. 2010), was eine signifikante Gemeinsamkeit der beiden Eiszeiten in Bezug auf die THC ist. Im Detail unterscheiden sich die Ereignisse allerdings von den Heinrich-Ereignissen des Weichsel-Glazials aufgrund der verschiedenen Randbedingungen.

Konzeptionelles Bild der THC-Änderungen der letzten Kaltzeit

Zusammenfassend lässt sich aus den beschriebenen Ereignissen ein Bild der Thermohalinen Zirkulation

während der Weichsel-Kaltzeit formen, das aus einem stabilen Basiszustand und zwei weiteren, instabilen Zuständen besteht (RAHMSTORF 2002). Der Basiszustand war durch Tiefenwasserbildung im offenen Atlantik südlich von Island gekennzeichnet. Im Rahmen der Dansgaard-Oeschger-Ereignisse lag zeitweise ein instabiler Zustand mit einer bis in das Europäische Nordmeer vordringenden THC vor, der der gegenwärtigen (allerdings stabilen) Situation des Holozäns entspricht und unter anderem zu der Erwärmung Grönlands geführt hat. Der zweite instabile Zustand entsprach einem Zusammenbruch der Umwälzzirkulation.

Das Holozän

Auch während des Übergangs zur aktuellen Warmzeit spielten Veränderungen der THC-Stärke eine wichtige Rolle, wie die im Folgenden beschriebenen Ereignisse verdeutlichen (RAHMSTORF 2002). Während des Holozäns selbst ist die Thermohaline Zirkulation wesentlich stabiler als in der letzten Kaltzeit, und periodische Schwankungen des Klimas im Nordatlantikraum sind nur gering.

Der Übergang vom Weichsel-Glazial zum Holozän begann mit einer Erwärmung der Antarktis vor 17.000 bis 20.000 Jahren. Der Übergangsprozess ist das Ergebnis eines Zusammenspiels verschiedener Faktoren, wobei eine Veränderung der Sonneneinstrahlung der Auslöser gewesen ist, auf den Änderungen der Treibhausgaskonzentrationen und auch der Ozeanzirkulation folgten. Auf die Relevanz der Ozeanströmung deutet auch hin, dass in Grönland zunächst keine Erwärmung in gleichem Ausmaß wie in anderen Regionen stattfand. Man kann hieraus schlussfolgern, dass die Thermohaline Zirkulation im Rahmen von Eisschmelze und dem letzten Heinrich-Ereignis nach wie vor nicht stark ausgeprägt war. Erst im Rahmen des D/O-Ereignisses 1 (Bølling-Erwärmung) setzte die Tiefenwasserbildung im Nordmeer ein. Diese Interpretation der Daten wird auch durch die Beobachtung einer mit dem »see-saw«-Effekt kompatiblen leichten Abkühlung im Antarktisraum gestützt. Als Reaktion auf einen hohen Schmelzwasserfluss (»meltwater pulse 1A«) folgte mit etwas Verzögerung eine Abkühlung im Nordatlantik: die Jüngere Dryas. In diesem Zeitraum intensivierte sich die Erwärmung in der Antarktis und vermutlich fand ein mit Heinrich-Ereignissen vergleichbarer Abbruch der THC statt. Eine anhaltende Umlenkung von Schmelzwasserflüssen trug vermutlich zur zeitweiligen Aufrechterhaltung dieses kalten Zustands bei. Die trotz der damals bereits herrschenden hohen CO₂-Konzentration von mehr als 240 ppm einsetzende Abkühlung im Nordatlantik auf ein Temperaturniveau, das nicht weit über dem der Heinrich-Ereignisse der Kaltzeit

lag, sowie Hinweise auf eine korrespondierende Abkühlung auf der Südhalbkugel erfordern allerdings eine zusätzliche Erklärung durch zum Beispiel eine globale Ursache wie die Sonnenintensität. Das langfristige Einsetzen der Tiefenwasserbildung im Europäischen Nordmeer folgte vor 11.500 Jahren auf diese Übergangszeit. Da dieser Zeitpunkt in die Periodizität der D/O-Ereignisse passt, liegt es nahe, dass deren Ursache letztlich auch für diesen permanenten Wechsel der THC in ihren Warmzeit-Zustand mitverantwortlich gewesen ist.

Dieser starke THC-Zustand hat sich während des Holozäns als vergleichsweise stabil erwiesen. Die weiterhin vorhandene prinzipielle Sensitivität bezüglich veränderter Süßwasserflüsse zeigt sich aber zum Beispiel am »8.2k-Ereignis«. Vor 8.200 Jahren ist im Rahmen des Abschmelzens des Laurentischen Eisschildes die einen großen Schmelzwassersee (Agassiz-See) zurückhaltende Eisbarriere durchbrochen bzw. unterspült worden. Dies hat zu einem enormen Süßwasserpuls in die Hudson Bay geführt, dessen Stärke bisher nicht gesichert rekonstruiert werden kann. Einer Modellierung der Unterspülung zu Folge könnte sie etwa 5 bis 10 Mio. m³ pro Sekunde für eine Dauer von weniger als einem Jahr betragen haben (CLARKE et al. 2003). In der Folge ist die THC zusammengebrochen und die Temperaturen um Grönland sind für 200 Jahre um ca. 5°C gefallen, was sich den Eisbohrkernen entnehmen lässt.

Von dieser massiven abrupten regionalen Klimaänderung im atlantischen Raum abgesehen, ergeben die Daten wenig Parallelen zwischen den Änderungen der THC in der letzten Kaltzeit und dem Holozän. Verschiebungen der Tiefenwasserbildung mit einem sich daraus ergebenden Sprung in den glazialen Zustand haben nicht stattgefunden. Trotzdem gibt es Hinweise, dass der 1500-Jahreszyklus – zwar frei von größeren Konsequenzen – auch während des Holozäns vorgelegen hat. Insbesondere könnte die »Kleine Eiszeit« des 16. bis 18. Jahrhunderts hiermit in Verbindung stehen (BOND et al. 2001).

Für die dem Weichsel-Glazial vorausgehende Eem-Warmzeit liegen nur wenige zuverlässige Daten vor. Analysen des NGRIP-Eisbohrkerns aus Nord-Grönland deuten jedoch auf ein in dieser Region stabiles Klima hin (NORTH GREENLAND ICE CORE PROJECT MEMBERS 2004).

Zusammenfassung und Ausblick

Verschiedene Proxydaten aus der letzten Kaltzeit und dieser Warmzeit deuten also auf ein weitgehend verschiedenes Verhalten der THC hin. Während der Kaltzeit war die Zirkulation empfindlicher gegenüber Änderungen der Randbedingungen. Somit könnten na-

türliche Schwankungen auf der Skala von 1470 Jahren temporäre Sprünge von einem kalten Basiszustand in einen instabilen warmen Modus ausgelöst haben (D/O-Ereignisse), während diese wahrscheinlich fortwährende Zyklizität in den Randbedingungen nur geringen Einfluss auf die THC während des Holozäns hat. Die Dynamik der gewaltigen Eismassen auf dem nordamerikanischen Kontinent hat während der Kaltzeit zu regelmäßigen Abbrüchen von Eis und damit großen zusätzlichen Mengen Süßwasser im Nordatlantik geführt, weswegen die THC jeweils abrisst (Heinrich-Ereignisse). Das einzig bekannte hierzu vergleichbare Phänomen im Holozän stellt das 8.2k-Ereignis dar. Solche THC-Änderungen können Computersimulationen zufolge die Klimaveränderungen, die in verschiedenen Regionen mit diesen Ereignissen zeitlich einhergegangen sind, erklären. Um diese Interpretationen weiter zu belegen und detaillierter auszubauen, sind jedoch weitere Studien notwendig.

Auch wenn die Daten darauf hinweisen, dass die THC im Holozän bisher deutlich stabiler gegenüber Störungen gewesen ist als während der letzten Kaltzeit, so lässt sich noch nicht sagen, wie die Strömung auf die massiven vom Menschen verursachten Klimaänderungen im 21. Jahrhundert reagieren wird. Allerdings ist die Wahrscheinlichkeit für einen Abbruch der Strömung gering und wird vom Weltklimarat im letzten Sachstandsbericht als maximal 10 Prozent angegeben (IPCC 2007).

Literatur

- BOND G., W. BROECKER, S. JOHNSEN, J. McMANUS, L. LABEYRIE, J. JOUZEL & G. BONANI (1993): Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice. *Nature* 365, 143-147.
- BOND G., B. KROMER, J. BEER, R. MUSCHELER, M. EVANS, W. SHOWERS, S. HOFFMANN, R. LOTTI-BOND, I. HAJDAS & G. BONANI (2001): Persistent Solar Influence on North Atlantic Climate During the Holocene. *Science* 294, 2130-2136.
- BRAUN H., M. CHRISTL, S. RAHMSTORF, A. GANOPOLSKI, A. MANGINI, C. KUBATZKI, K. ROTH & B. KROMER (2005): Possible solar origin of the 1,470-year glacial climate cycle demonstrated in a coupled model. *Nature* 438, 208-211.
- BRAUN, H. (2009): Measures of periodicity for time series analysis of threshold-crossing events. *Eur. Phys. J. Special Topics* 174, 33-47.
- CLARKE G., D. LEVERINGTON, J. TELLER & A. DYKE (2003): Superlakes, megafloods, and abrupt climate change. *Science* 301, 922-923.
- CLEMENT A. & L. PETERSON (2008): Mechanisms of abrupt climate change of the last glacial period. *Reviews of Geophysics* 46.
- DANSGAARD W., S.J. JOHNSEN, H.B. CLAUSEN, D. DAHLJENSEN, N.S. GUNDESTRUP, C.U. HAMMER, C.S. HVIDBERG, J.P. STEFFENSEN, A.E. SVEINBJORNSDOTTIR, J. JOUZEL & G. BOND (1993): Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature* 364, 218-220.
- DITLEVSEN P.D., K.K. ANDERSEN & A. SVENSSON (2007): The DO-climate events are probably noise induced: statistical investigation of the claimed 1470 years cycle. *Climate of the Past* 3, 129-134.
- DRIJFHOUT S.S., S.L. WEBER & E. SWALUW (2010): The stability of the MOC as diagnosed from model projections for pre-industrial, present and future climates. *Climate Dynamics* (Online First).
- GANOPOLSKI A. & S. RAHMSTORF (2001): Rapid changes of glacial climate simulated in a coupled climate model. *Nature* 409, 153-158.
- GANOPOLSKI A. & S. RAHMSTORF (2002): Abrupt glacial climate changes due to stochastic resonance. *Physical Review Letters* 88, 038501.
- HEWITT C., A. BROCCOLI, J. MITCHELL & R. STOUFFER (2001): A coupled model study of the last glacial maximum: Was part of the North Atlantic relatively warm? *Geophysical Research Letters* 28, 1571-1574.
- IPCC (2007): Summary for Policymakers. In: SOLOMON S., D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K.B. AVERYT, M. TIGNOR & H.L. MILLER (Hrsg.). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- KAGEYAMA M., A. PAUL, D.M. ROCHE & C.J. VAN MEERBEECK (2010): Modelling glacial climatic millennial-scale variability related to changes in the Atlantic meridional overturning circulation: a review. *Quaternary Science Reviews* 29, 2931-2956.
- MARGARI V., L.C. SKINNER, P.C. TZEDAKIS, A. GANOPOLSKI, M. VAUTRAVERS & N.J. SHACKLETON (2010): The nature of millennial-scale climate variability during the past two glacial periods. *Nature Geoscience* 3, 127-131.
- McMANUS J., R. FRANCOIS, J. GHERARDI, L. KEIGWIN & S. BROWN-LEGER (2004): Collapse and rapid resumption of Atlantic meridional circulation linked to deglacial climate changes. *Nature* 428, 834-837.
- NEGRE C., R. ZAHN, A.L. THOMAS, P. MASQUE, G.M. HENDERSON, G. MARTINEZ-MENDEZ, I.R. HALL & J.L. MAS (2010): Reversed flow of Atlantic deep water during the Last Glacial Maximum. *Nature* 468, 84-88.
- NORTH GREENLAND ICE CORE PROJECT MEMBERS (2004): High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. *Nature* 431, 145-151.
- RAHMSTORF S. (2002): Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. *Nature* 419, 207-214.
- RAHMSTORF S. (2003): Timing of abrupt climate change: A precise clock. *Geophysical Research Letters* 30(10), 1510.
- RAHMSTORF S., M. CRUCIFIX, A. GANOPOLSKI, H. GOOSE, I. KAMENKOVICH, R. KNUTTI, G. LOHMANN, R. MARSH, L.A. MYSAK, Z.M. WANG & A.J. WEAVER (2005): Thermohaline circulation hysteresis: A model intercomparison. *Geophysical Research Letters* 32, L23605.
- SARNTHEIN M., K. WINN, S.J.A. JUNG, J.C. DUPLESSY, L. LABEYRIE, H. ERLKENKUEUSER & G. GANSSSEN (1994): Changes in east Atlantic deepwater circulation over the last 30,000 years: Eight time slice reconstructions. *Paleoceanography* 9, 209-267.
- STOMMEL, H. (1961): Thermohaline convection with 2 stable regimes of flow. *Tellus* 13, 224-230.

Hendrik Kienert

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)

P.O. Box 60 12 03 - 14412 Potsdam

kienert@pik-potsdam.de