

## Interne Gezeiten unter realitätsnahen Bedingungen mit hochauflösendem globalem Ozeanmodell simuliert

Den Wissenschaftlerinnen Zhuhua Li und Jin-Song von Storch in der Gruppe „Statistik des Ozeans“ in der Abteilung „Ozean im Erdsystem“ am Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) sowie Malte Müller vom Norwegischen Meteorologischen Institut ist es erstmals gelungen, mit dem hochauflösenden Ozeanmodell MPI-OM des MPI-M lange interne Gezeitenwellen unter realitätsnahen Bedingungen zu simulieren und ihre Eigenschaften zu untersuchen. Dabei haben sich die Forscher insbesondere mit der internen Gezeitenwelle  $M_2$  beschäftigt. Sie stellt mit einer Periode von knapp 12,5 Stunden die energetisch stärkste Komponente in dem Gesamtwellenmix der Gezeitenwellen dar.

Was sind langwellige interne Gezeiten und warum sind sie für die Ozeanografen interessant? Gezeiten sind periodische Wasserbewegungen über die gesamte Tiefe des Ozeans. Sie entstehen durch gezeitenerzeugende Kräfte wie die Anziehungskräfte von Erde, Mond und Sonne, sind aber auch durch die Erdrotation beeinflusst. Die Gezeiten führen zu Wellen an der Meeresoberfläche, an den Küsten sind sie als Ebbe und Flut zu erleben. Zusätzlich entstehen im Inneren des geschichteten Ozeans durch das Überströmen des ungleichmäßigen Meeresbodens Wellen an den Grenzflächen zwischen Wassermassen unterschiedlicher Dichte. Diese Wellen nennt man interne Gezeiten. Sie haben verschiedene Wellenlängen. Gezeitenwellen mit langen Wellenlängen können sich über große Entfernungen ausbreiten und zerfallen unterwegs. Die mit kürzeren Wellenlängen zerfallen meist direkt an ihren Entstehungsorten.

Die internen Gezeiten liefern durch ihren Zerfall die notwendige Energie, um die globale Meridionale Umwälzbewegung (MOC – Meridional Overturning Circulation) aufrecht zu erhalten. Im großräumigen Atlantischen Strömungssystem (AMOC) beispielsweise kühlt sich das vom Äquator nach Norden strömende warme Oberflächenwasser im Bereich Nordeuropas und der Arktis ab und sinkt in die Tiefe, wo es als kaltes dichteres Wasser südwärts bis in den Südatlantik strömt. Für den notwendigen Vermischungsprozess des kalten Tiefenwassers mit wärmerem Wasser muss mechanische Energie zur Verfügung gestellt werden. Diese Energie liefern die internen Wellen im tiefen Ozean. Dabei sind die langen internen Gezeitenwellen neben langen Trägheitswellen die energiereichsten internen Wellen.

Die Bedeutung dieser langen internen Gezeitenwellen für die Vermischung und letztendlich für die AMOC ist hinsichtlich ihrer Ausbreitung und ihres Zerfalls in kürzere Wellen noch weitestgehend unbekannt. Es ist bisher nicht möglich, Information darüber direkt aus Beobachtungen zu gewinnen. Dies führt dazu, dass die Vermischung, die auf die langwelligen internen Gezeiten zurückzuführen ist, bisher in den meisten Ozeanzirkulationsmodellen durch einen räumlich konstanten Diffusionskoeffizienten dargestellt (parametrisiert) wird. Wenn überhaupt wird damit nur der Effekt der kurzwelligen internen Gezeiten erfasst. Diese kurzwelligen internen Gezeiten zerfallen direkt an ihrem Entstehungsort und sind daher leichter zu parametrisieren; sie machen jedoch nur ca. 30% von allen internen Gezeiten aus. Da die AMOC in Klimamodellen jedoch sensibel auf die geographische Verteilung der Vermischung reagiert, ist es von großer Bedeutung, mit globalen realitätsnahen Modellen die langwelligen internen Gezeitenwellen und ihre Ausbreitung zu simulieren und zu untersuchen.

Interne Gezeiten können nicht mit herkömmlichen („state of the art“) Ozeanzirkulationsmodellen simuliert werden. Zum einen werden normalerweise die gezeitenerzeugenden Kräfte in Ozeanzirkulationsmodellen nicht berücksichtigt, da traditionell Gezeiten als Bewegungen der gesamten Wassersäule mit Flachwassergleichungen und somit getrennt von 3-dimensionaler Ozeanzirkulation untersucht werden. Zum anderen ist das Gitter herkömmlicher Ozeanzirkulationsmodelle zu grob um interne Gezeiten auflösen zu können. Die Zehntelgrad-Simulation, die in Zusammenarbeit mit Malte Müller in Rahmen des Konsortialprojekts STORM entstanden und als STORMTIDE-Simulation bekannt ist, gehört zu den ersten, in denen Gezeiten, insbesondere interne Gezeiten, in einer Wellenumgebung mit realistischer Schichtung und Zirkulation global simuliert wurden. Diese Simulation ermöglicht einen ersten wichtigen Schritt zu einem detaillierten Verständnis langwelliger interner Gezeiten in einem quasi realen Ozean.

Abbildung 1 zeigt die kinetische Energie der halbtägigen internen Gezeitenwelle  $M_2$ , auf die sich die Autoren wegen des höchsten Energieanteils im Wellenspektrum konzentrieren. Daraus wird deutlich, dass die Aktivität der internen  $M_2$ -Gezeiten stark räumlich variiert.

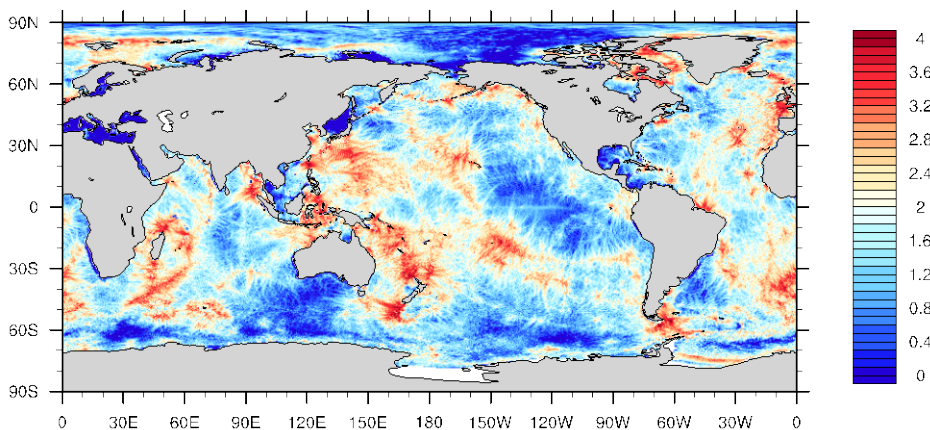


Abb. 1. Die vertikal integrierte kinetische Energie ( $\text{J/m}^2$ ) der internen Gezeitenwelle  $M_2$  in logarithmischer Skala, simuliert mit dem Modell STORMTIDE in einer Zehntelgrad-Auflösung.

In der Studie versuchen die Autoren in erster Linie zu klären, ob die mit STORMTIDE simulierten Bewegungen mit Gezeitenfrequenzen tatsächlich interne Gezeiten sind. Die Untersuchungsmethoden werden von den Autoren in der Studie entwickelt. Die Wellenlängen werden als diagnostisches Werkzeug benutzt, um die Wellen quantitativ zu bestimmen und folgende Fragen zu beantworten: Wie konsistent sind die simulierten Wellenbewegungen mit der Dispersionsrelation der linearen internen Wellen, so dass die simulierten Bewegungen als interne Gezeiten identifiziert werden können? Wie viele der langwelligigen internen  $M_2$ -Gezeiten (oder welche Moden) werden mit dem Zehntelgrad-STORMTIDE Modell aufgelöst? Welche Eigenschaften haben die simulierten internen  $M_2$ -Gezeiten, z.B. welche Wellenlängen haben sie und wie ist ihre geographische Verteilung? Und nicht zuletzt: welche Rollen spielen die lokale Schichtung des Ozeans und die Corioliskraft bei der Bestimmung der geographischen Verteilung? Die Fragen werden mit Hilfe von Wellenzahlspektralanalysen und der Lösung von Eigenwertproblemen untersucht.

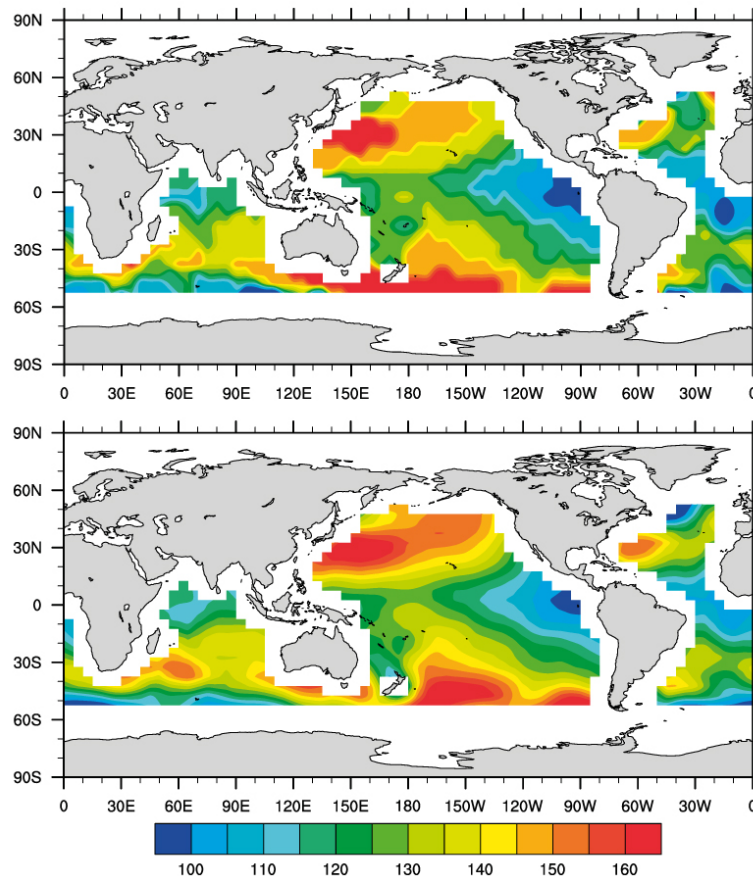


Abb. 2: Wellenlängen (km) der Mode 1 der internen Gezeitenwelle  $M_2$ , abgeleitet aus der STORMTIDE-Simulation mit Hilfe von zweidimensionalen Wellenzahlspektralanalysen (oben) und aus numerischen Berechnungen nach der linearen Wellentheorie (unten). Kurz: STORMTIDE kann interne  $M_2$ -Gezeiten simulieren.

**Ergebnisse:** Die simulierten Wellenlängen stimmen sehr gut mit denen von der linearen Wellentheorie (angewandt auf die simulierte Schichtung) vorausgesagten Wellenlängen überein (Abbildung 2). Die Wellenlänge der Mode 1 liegt bei 100-160 km. Extrem große und extrem kleine Werte finden sich im Pazifik. Geographisch zeigt sich eine zonale Asymmetrie und eine generelle Tendenz zu zunehmender Wellenlänge mit zunehmender geographischer Breite. Das STORMTIDE-Modell löst nicht nur die erste sondern auch die zweite Mode auf. Die Wellenlängen der Mode 2 liegen bei 45-80 km (hier nicht gezeigt). Werte größer als 75 km finden sich hauptsächlich in äquatorialen Gebieten im Pazifik und im Nordosten des Indischen Ozeans. Dominant für Mode 2 ist die zonale Asymmetrie, wohingegen die breitenabhängige Variation nicht so stark ausgeprägt ist wie bei Mode 1. Diese Charakteristiken lassen sich mit der Dispersionsrelation erklären. Die Asymmetrie der Wellenlängen leitet sich aus der lokalen Schichtung des Ozeans ab, wohingegen die meridionalen Variationen aus der Kombination der Effekte von lokaler Schichtung und Corioliskraft resultieren. Die Autoren fanden heraus, dass die Verteilung von Mode 1 durch Schichtung und Corioliseinfluss bestimmt ist, aber die von Mode 2 hauptsächlich durch Variationen in der Schichtung.

Die von STORMTIDE simulierten Bewegungen mit  $M_2$ -Gezeitenfrequenz können in erster Näherung als interne  $M_2$ -Gezeiten betrachtet werden.

Generell kann das globale Modell also die langwelligen internen Gezeiten gut erfassen und beschreiben, insbesondere dort wo die Wechselwirkung mit der Zirkulation schwach ist und lineare Wellen vorherrschen. Nichtlineare Anteile wie interaktive Prozesse zwischen Wellen und Strömungen oder zwischen den Wellen wollen die Forscherinnen zukünftig noch eingehender studieren, um herauszufinden, wie sich die internen Gezeitenwellen ausbreiten und ihre Energie auf kleinere Skalen übertragen.

**Originalveröffentlichung:**

Li, Z., J.-S. von Storch, and M. Müller (2015): The  $M_2$  Internal Tide Simulated by a  $1/10^\circ$  OGCM. J. Phys. Oceanography, 12, 3119-3135; doi: 10.1175/JPO-D-14-0228.1

**Informationen zum STORM-Projekt:**

[https://www.dkrz.de/Klimaforschung-en/konsortial-en/storm-en?set\\_language=en/](https://www.dkrz.de/Klimaforschung-en/konsortial-en/storm-en?set_language=en/)

**Kontakt:**

Dr. Zhuhua Li  
Max-Planck-Institut für Meteorologie  
Tel.: 040 41173 145  
E-Mail: [zhuhua.li@mpimet.mpg.de](mailto:zhuhua.li@mpimet.mpg.de)

Dr. Jin-Song von Storch  
Max-Planck-Institut für Meteorologie  
Tel.: 040 41173 155  
E-Mail: [jin-song.von.storch@mpimet.mpg.de](mailto:jin-song.von.storch@mpimet.mpg.de)