

Turbulentes Paradoxon unter dem Eis

Turbulenz im arktischen Ozean bringt das Eis zum Schmelzen. Erstaunlicherweise schmilzt Eis langsamer, als die Theorie vorhersagt. Das hat mit dem Salz der Meere zu tun.

Im Rahmen seiner Doktorarbeit hat Thomas Keitzl mit seinen Betreuern Juan Pedro Mellado und Dirk Notz das Geheimnis um die turbulente Vermischung von Wärme und Salz unter dem Meereis gelüftet. Sie konnten das Transport-Gleichgewicht ermitteln, das den Gefrierpunkt und die Schmelzgeschwindigkeit des Eises bestimmt. Dazu bedienten sie sich einer neuen Methodik, die erst durch die neuesten Hochleistungsrechner ermöglicht wurde. Sie verwendeten hierfür dreidimensionale Simulationen der Turbulenz unter dem Eis.

Turbulenzen kennen wir vor allem aus dem Flugzeug, wenn uns ein Unheil verheißendes Gefühl in die Magengrube fährt. Doch was sind eigentlich Turbulenzen? Turbulenz beschreibt das Phänomen chaotischer Verwirbelung einer Strömung, obgleich es keine allgemein anerkannte Definition gibt. Turbulenz ist unerlässlich für die effektive Durchmischung der Luft in der Atmosphäre, des Wassers im Ozean und der Milch in unserem Kaffee. Im Fall unseres Schlechtwetter-Fluges vermischen sich die Luftmassen so wild, dass sie das Flugzeug ein kleines Stückchen mit sich reißen. Die daraus resultierende, unvorhersehbare Beschleunigung, bekommen wir unangenehm zu spüren. Selten nehmen wir Turbulenz so bewusst wahr wie im Flugzeug. Doch Turbulenz ist keine Seltenheit. Eine wichtige Rolle spielt sie zum Beispiel für die Entwicklung des arktischen Meereises an seiner Unterseite.

Unter dem Meereis der Arktis vermischen sich Wassermassen verschiedener Dichte. Die Art der Vermischung trägt erheblich zum Transport von Wärme bei. Findet die Vermischung durch Turbulenz statt, kann viel Wärme zum Eis transportiert werden. Das Eis schmilzt dann um einiges schneller, als wenn die Vermischung nur durch Molekularbewegung stattfindet. Die Situation unter dem Eis ist besonders interessant, da Turbulenz hier nicht nur Wärme transportiert. So wie die turbulente Vermischung der Luftmassen am Himmel das Flugzeug mit sich reißt, transportieren die Wassermassen einen weiteren Einflussfaktor mit sich, der das Schmelzen beeinflusst: Das Salz der Meere.

Die Wirkung von Salz auf Eis lässt sich gut im Winter beobachten, wenn zum Beispiel große Mengen Salz auf den Straßen verteilt werden. Das Salz senkt den Gefrierpunkt des Wassers. Somit wird das Eis bei gleicher Umgebungstemperatur flüssig und die Straße ist wieder eisfrei. Ähnlich verhält es sich in der Arktis. Wenn die Turbulenz unter dem Eis besonders salzhaltiges Wasser zum Eis befördert, ändert sich dessen Gefrierpunkt und es schmilzt schon bei niedrigerer Ozeantemperatur. Das Salz löst das Eis auf.

Der turbulente Transport von Wärme und von Salz hin zum Meereis hat den gleichen Effekt: das Eis schmilzt und löst sich auf. Beim Auflösen und Schmelzen bildet sich eine sehr dünne Schicht aus Schmelzwasser unter dem Eis. Paradoxerweise behindern sich die beiden Mechanismen dabei gegenseitig. Löst sich das Eis durch den Salztransport auf, ist diese dünne Schicht sehr kühl und schützt das Eis vor Wärmetransport. Schmilzt das Eis durch den Wärmetransport, ist diese dünne Schicht sehr salzarm und schützt das Eis vor Salztransport. Das Paradoxon löst sich dadurch, dass die turbulente Vermischung von Wärme und Salz ein Wärme-Salz-Transport-Gleichgewicht einstellt. Dieses Transport Gleichgewicht bestimmt den Gefrierpunkt und damit die Geschwindigkeit des Schmelzens. Wenn Forscher die Schmelzgeschwindigkeit vorhersagen möchten, müssen sie daher das Transport-Gleichgewicht kennen.

Da sich dieses Wechselspiel von Wärme und Salz in der sehr dünnen Schicht direkt unter dem Meereis abspielt, ist es bis heute nicht gelungen, das Transport-Gleichgewicht direkt zu messen. Die Unwirtlichkeit der Umgebung, einer Wüste aus Eis, macht es den Forschern dabei nicht leichter.

Man behilft sich daher mit gewissen Tricks. Statt das Wechselspiel direkt unter dem Eis zu messen, arbeiten Forscher mit Laborexperimenten oder leiteten das Transport-Gleichgewicht aus anderen Messungen indirekt ab. Deshalb waren das Transport-Gleichgewicht und die Schmelzgeschwindigkeit bislang nur vage bekannt.

Thomas Keitzl und seine Betreuer bedienten sich einer neuen Methodik, die erst durch die neuesten Hochleistungsrechner möglich ist. Statt in der Arktis mit klammen Fingern Löcher in die Eisdecke zu bohren und vor Ort zu messen, verwendeten sie dreidimensionale Simulationen der Turbulenz unter dem Eis.

Die Simulationen der Turbulenz ermöglichen es, auch die feinen Prozesse in der sehr dünnen Schicht direkt unter dem Eis korrekt darzustellen und zu messen. Während man durch Messungen im Labor und im Feld meist nur punktuellen Einblick in eine einzelne Messgröße (z. B. die Temperatur) bekommt, eröffnet die Simulation die komplette raumzeitliche Entwicklung aller Messgrößen des simulierten Systems (z.B. Strömungsgeschwindigkeit, -richtung, Temperatur- und Salztransport, u.v.m.). Das jedoch ist Fluch und Segen zugleich: Einerseits repräsentiert eine einzige Simulation somit nicht nur eine einzelne, sondern eine Vielzahl von Messungen aller Messgrößen zugleich. Andererseits müssen die Simulationen dazu eine gewisse Mindestauflösung einhalten und erfordern enorme Rechenkapazitäten. Der Supercomputer JUQUEEN in Jülich, Europas zweitschnellster Superrechner, hat diese Rechenkapazitäten. Für eine einzige Simulation rechnen dort 8196 Prozessorkerne etwa eine Woche lang. Das bedeutet, dass ein PC mit einem einzelnen Prozessorkern seit Beginn des 19. Jahrhunderts ununterbrochen rechnen müsste, etwa 200 Jahre lang, um heute das Ergebnis zu präsentieren.

Bei der Arbeit mit den Simulationen gingen die Forscher in zwei Schritten vor. Im ersten Schritt wurde sichergestellt, dass die Simulationen die Wirklichkeit repräsentieren. Dazu vereinfachten sie das physikalische System und verglichen die Simulationsergebnisse mit Laborexperimenten. Anstelle der Turbulenz unter Meereis, analysierten sie die Turbulenz unter der Eisdecke eines Süßwassersees. Um in diesem vereinfachten Fall der dünnen Schicht unter dem Eis auf die Spur zu kommen, variierten die Forscher die Temperatur des eisbedeckten Sees – teilweise fast bis zum Siedepunkt. Laborexperiment und Simulation stimmten überein. Dabei gelang ihnen als Nebenprodukt dieses ersten Schrittes eine bemerkenswerte Entdeckung: Zwar ist der Menschheit seit einem Vierteljahrtausend bekannt, wie viel Energie benötigt wird, um Eis zu schmelzen. Wie schnell es jedoch schmilzt, ist unbekannt. Für den eisbedeckten Süßwassersee fanden die Forscher nun die Formel, welche die Schmelzgeschwindigkeit korrekt beschreibt. Formel, Laborergebnis und Simulation stimmten überein.

Im zweiten Schritt wurde der Simulation der Einflussfaktor Salz hinzugefügt. Dabei machten die Forscher eine Entdeckung, die die bisherige Unsicherheit im Transport-Gleichgewicht erklärt. Entgegen der geläufigen Annahmen hat es keinen konstanten Wert, sondern hängt von der Entfernung zum Eis ab. Nur in der sehr dünnen Schicht direkt unter dem Eis stellt sich ein stabiler Wert ein. Aber Messungen des Salztransports so nah unter dem Eis waren zuvor unmöglich. Das erklärt, warum Feldmessungen, die in zu großem Abstand vom Eis durchgeführt wurden, falsche Abschätzungen ergaben. Das Ergebnis der Forscher ist, dass sich durch Turbulenz ein Transport-Gleichgewicht einstellt, bei dem der Wärmetransport (im Vergleich zum Salztransport) etwa dreimal so effizient ist, als zuvor angenommen. Dadurch ist der Salzgehalt in der dünnen Schicht geringer.

Das bedeutet, dass die Gefriertemperatur des Eises bisher zu tief vermutet wurde und dass die Schmelzgeschwindigkeit bisher überschätzt wurde. Damit gibt es keineswegs Entwarnung für das Abschmelzen der Eiskappen in der Arktis und Antarktis.

Denn die Schmelzgeschwindigkeiten hängen neben dem Wärmetransport im Ozean von vielen weiteren Faktoren ab. Nicht zuletzt hat auch die Atmosphäre einen Einfluss auf die Entwicklung des Meereises. Die Ergebnisse von Thomas Keitzl und seinen Betreuern erlauben vielmehr ein besseres Verständnis des ozeanischen Beitrags zur Meereisentwicklung und eine genauere Beschreibung in künftigen Klimamodellen.

Publikationen:

Keitzl, T., Mellado, J.-P. & Notz, D. (2016). Reconciling heat flux and salt flux estimates at a melting ice-ocean interface. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 121, 8419-8433, doi:10.1002/2016JC012018

Keitzl, T., Mellado, J.-P. & Notz, D. (2016). Impact of thermally driven turbulence on the bottom melting of ice. *Journal of Physical Oceanography*, 46, 1171-1187, doi:10.1175/JPO-D-15-0126.1

Kontakt:

Dr. Thomas Keitzl
E-Mail: t@keitzl.com

Dr. Juan-Pedro Mellado
Max-Planck-Institut für Meteorologie
Tel.: 040 41173 354
E-Mail: juan-pedro.mellado@mpimet.mpg.de

Dr. Dirk Notz
Max-Planck-Institut für Meteorologie
Tel.: 040 41173 163
E-Mail: dirk.notz@mpimet.mpg.de