

Summary

Earth's climate bears a close relation to the vertical exchange of water masses in the global ocean. This relation originates from the transport of heat, carbon, and nutrients with the subduction and upwelling of water masses. The majority of this vertical exchange occurs in the Southern Ocean, where carbon- and nutrient-rich deep waters re-surface. To date, the mechanisms, which control long-term changes in this upwelling, are not firmly established. Both changes in either surface winds or surface freshwater fluxes could hypothetically alter the upwelling. Strong meridional gradients in the surface wind field propel a surface divergence that pulls waters from the deep. This process is facilitated by a marginally stable vertical density stratification, which is mainly set up by salinity and therefore by surface freshwater fluxes. So far, the exploration of stratification changes has been limited by the availability of observational freshwater flux data and by their poor representation in climate models. In this dissertation, I investigate recent changes in surface freshwater fluxes and their effect on the hydrography, circulation, as well as the vertical exchange of heat and carbon in the Southern Ocean. A particular focus of this thesis is on yet unconstrained freshwater fluxes which originate from the seasonal formation and melting of sea ice.

In the first part of this thesis, I provide the first comprehensive data set of annual freshwater fluxes arising from the formation, transport, and melting of sea ice in the Southern Ocean over the time period from 1982 to 2008. For this purpose, I combine numerous satellite, in-situ, and reanalysis data of sea-ice concentration, thickness, and drift. The resulting freshwater flux estimates reveal that 410 ± 110 mSv ($1 \text{ mSv} = 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) of freshwater are removed and added to the surface waters by the formation and melting of sea ice each year. Compared to the available data of the atmospheric and land-ice freshwater fluxes, sea ice provides the dominant freshwater flux in the seasonally ice-covered region of the Southern Ocean. Most of the sea ice forms in the coastal ocean; and 130 ± 30 mSv of this sea ice are transported towards the sea-ice edge, where it melts. Thereby, it increases the salinity in coastal and bottom waters and lowers the open-ocean surface and intermediate water salinity. This northward transport of freshwater has increased by $20 \pm 10\%$ over the observational period, which corresponds to a freshening of $-0.02 \pm 0.01 \text{ g kg}^{-1}$ per decade in the open-ocean waters. From this analysis, I conclude that the increased northward transport of freshwater by sea ice explains the majority of the observed freshening of the open-ocean waters. In fact, ocean salinity data shows that the largest freshening signal coincides with the region of largest increased sea-ice melting in the Pacific sector.

In order to better understand the ocean's response to changing freshwater fluxes, I am using the newly derived sea-ice–ocean freshwater fluxes to constrain a regional ocean circulation model in the second part of this thesis. By perturbing the model with the observed recent changes in these fluxes, I find that the increased northward sea-ice transport could also be responsible for most of the observed surface cooling in the Southern Ocean that occurred over recent decades, despite global warming. The model simulations suggest that this cooling originates from a freshening and enhanced surface density stratification in the upwelling region that delays and shoals the deep winter-time mixing. As a consequence, the total heat capacity of the mixed layer decreases and less warm deep water enters the surface layer, which results in a surface cooling and sub-surface warming. Moreover, about 25% less carbon-dioxide (CO_2) is released to the atmosphere from the upwelling region. This response can be explained, on the one hand, by the surface cooling that increases the solubility of CO_2 in seawater and, on the other hand, by reduction in upwelling. The reduced CO_2 release is opposed by a reduced subduction of CO_2 into Antarctic Intermediate Water and Subantarctic Mode Water due to the increasing stratification. These findings suggest that the increased surface density stratification could explain why the Southern Ocean carbon sink has not saturated but has rather strengthened over recent decades, despite increasing surface winds.

In conclusion, the insights gained from my dissertation point towards much higher sensitivity of the upwelling in the Southern Ocean to changes in the sea-ice freshwater fluxes than previously assumed. My combined analyses of observational data and model experiments elucidate that sea ice effectively re-shovels freshwater from the lower overturning cell to the upper overturning cell and thereby increases the meridional and vertical salinity and density gradients in the Southern Ocean. In the long-term, changes in this system could alter the atmospheric CO_2 concentration and therefore the global climate. A potential warming of the sea-ice region in the future could reverse the changes observed over recent decades and enhance the release of CO_2 from the ocean to the atmosphere, which might amplify global warming. In contrast, in colder glacial climates, increased sea-ice formation could reduce the upwelling of carbon-rich waters to the surface ocean and lower the atmospheric CO_2 concentrations. This interpretation of my results is in line with the hypothesis that past glacial–interglacial variations in the global atmospheric CO_2 concentration could originate from changes in the Southern Ocean density stratification.

Zusammenfassung

Der vertikale Austausch von Wassermassen im globalen Ozean hat einen grossen Einfluss auf das Klima der Erde, da das Absinken und Aufsteigen der Wassermassen Wärme, Kohlenstoff und Nährstoffe zwischen dem tiefen und oberflächennahen Ozean umverteilt. Diese Umverteilung findet vorwiegend im Südpolarmeer statt, wo kohlenstoff- und nährstoffhaltiges Tiefenwasser an die Oberfläche kommt. Bis heute sind die Ursachen von längerfristigen Veränderungen dieses Auftriebs noch nicht fest etabliert. Diese könnten entweder von Veränderungen der oberflächennahen Winde oder des Süsswassereintrags hervorgerufen werden. Starke meridionale Gradienten in den Winden treiben das Oberflächenwasser in dieser Region auseinander und sorgen für den Auftrieb des Wassers aus der Tiefe. Dieser Prozess wird durch eine nur geringfügig stabile Dichteschichtung der Wassersäule erleichtert, welche über den Salzgehalt des Wassers und somit durch den Süsswassereintrag bestimmt wird. Die Erforschung von Veränderungen in der Dichteschichtung wurde bis jetzt weitgehend von einem Mangel an Beobachtungsdaten von Süsswasserflüssen und deren Unsicherheiten in Simulationen mit Klimamodellen eingeschränkt. In dieser Doktorarbeit untersuche ich kürzliche Veränderungen im Süsswassereintrag und deren Einfluss auf die Hydrographie, die Zirkulation und den vertikalen Austausch von Kohlenstoff und Wärme im Südpolarmeer. Dabei ist der weitgehend unbestimmte Beitrag von Süsswasserflüssen des sich jahreszeitlich bildenden und abschmelzenden Meereises ein zentrales Thema.

Der erste Teil dieser Arbeit beschreibt den ersten umfassenden Datensatz von jährlichen Süsswasserflüssen, die durch die Bildung, den Transport und das Abschmelzen von Meereis zwischen 1982 und 2008 entstanden sind. Dieser beruht auf verschiedenen Satellitenmessungen, bodennahe Beobachtungen und Reanalysedaten von Meereiskonzentration, -dicke und -drift. Die daraus resultierenden Abschätzungen zeigen auf, dass jährlich 410 ± 110 mSv ($1 \text{ mSv} = 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) Süsswasser durch das Bilden und Abschmelzen von Meereis dem Oberflächenozean entzogen und wieder hinzugefügt werden. Im Vergleich zum Süsswassereintrag aus der Atmosphäre oder vom Landeis der Antarktis, formt Meereis somit die Hauptkomponente der Süsswasserflussbilanz in der Meereisregion. Das meiste Meereis bildet sich in Küstennähe, wovon 130 ± 30 mSv zur Meereiskante nach Norden transportiert werden, wo das Eis abschmilzt, dabei erhöht es den Salzgehalt des küstennahen Ozeans und des sich dort bildenden Bodenwassers und reduziert den Salzgehalt des Oberflächen- und Zwischenwassers im offenen Ozean. Dieser Nordwärtstransport von Meereis hat über den Beobachtungszeitraum um $20 \pm 10\%$ zugenommen, was einer Reduk-

tion des Salzgehaltes im offenen Ozean um $-0.02 \pm 0.01 \text{ g kg}^{-1}$ pro Dekade entspricht. Aus dieser Analyse ziehe ich die Schlussfolgerung, dass sich durch den erhöhten Nordwärtstransport von Süswasser durch das Meereis der grösste Teil der beobachteten Salzgehaltsabnahme im offenen Ozean erklären lässt, welche im Pazifischen Teil des Südpolarmeeres am stärksten ist, wo auch die grösste Zunahme im Süswassereintrag durch das Meereis stattgefunden hat.

Um die Reaktion des Ozeans auf Veränderungen im Süswassereintrag vom Meereis zu untersuchen, verwende ich im zweiten Teil meiner Doktorarbeit den neuen Datensatz um ein regionales Ozeanzirkulationsmodell anzutreiben. Eine Veränderung der Meereissüswasserflüsse im Modell um den beobachteten Wert zeigt, dass die Zunahme im Nordwärtstransport vom Meereis auch für eine Abkühlung des Oberflächenwassers in die vergangenen Jahrzehnte verantwortlich sein könnte, die in dieser Region trotz der globalen Erwärmung festgestellt wurde. Die Abkühlung in der Modellsimulation ist die Folge einer verstärkten Dichteschichtung in der Auftriebsregion, welche die tiefe Mischung der Wassermassen in den Wintermonaten zeitlich verzögert und abflacht. Daraus resultiert eine verringerte Wärmekapazität der gemischten Schicht und ein verringertes Eindringen von Wärme in die oberen Schichten, was eine oberflächennahe Abkühlung und eine Erwärmung unterhalb der Oberfläche zur Folge hat. Zusätzlich nimmt die Freisetzung von Kohlenstoffdioxid (CO_2) in die Atmosphäre in der Auftriebsregion um ungefähr 25% ab. Diese Abnahme kann zum einen durch die verstärkte Löslichkeit von CO_2 im kühleren Oberflächenwasser und zum anderen durch einen geringeren Auftrieb erklärt werden. Diesem Prozess wirkt eine verringerte Aufnahme von CO_2 mit dem Antarktischen und Subantarktischen Zwischenwasser durch die verstärkte Dichteschichtung entgegen. Diese Erkenntnisse zeigen auf, dass eine verstärkte Dichteschichtung erklären könnte, wieso trotz einer Zunahme der Westwinde über die letzten Jahrzehnte keine Sättigung, sondern eher eine Verstärkung der CO_2 -Aufnahme des Südpolarmeeres in Beobachtungsdaten zu erkennen ist.

Abschliessend lässt sich die Erkenntnis ableiten, dass der Tiefenwasserauftrieb im Südpolarmeer wesentlich stärker auf Süswasserflussveränderungen vom Meereis reagiert als zuvor angenommen. Die Analysen von Beobachtungsdaten und Modellexperimenten veranschaulichen, dass Meereis Süswasser von der unteren in die obere Ozeanzirkulationszelle umverteilt und dabei die meridionalen und vertikalen Salz- und Dichtegradienten im Ozean verstärkt. Auf längeren Zeitskalen könnten Veränderungen in diesem System den atmosphärischen CO_2 -Gehalt und somit das globale Klima beeinflussen. Eine mögliche zukünftige Erwärmung der Meereisregion hätte eine Umkehr der hier beschriebenen Veränderungen zur Folge, was zu einer verstärkten Freisetzung von CO_2 in die Atmosphäre und einer Verstärkung der globalen Klimaerwärmung führen könnte. Im Gegensatz dazu könnte eine erhöhte Meereisbildung während Eiszeiten den Auftrieb von kohlenstoffhaltigem Tiefenwasser an die Oberfläche reduziert und somit zu einer tieferen CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre geführt haben. Diese Interpretation meiner Resultate stimmt mit der Hypothese überein, dass die Schwankungen der globalen atmosphärischen CO_2 -Konzentration zwischen Eiszeiten und Warmzeiten durch Veränderungen in der Dichteschichtung des Südpolarmeeres bedingt werden.