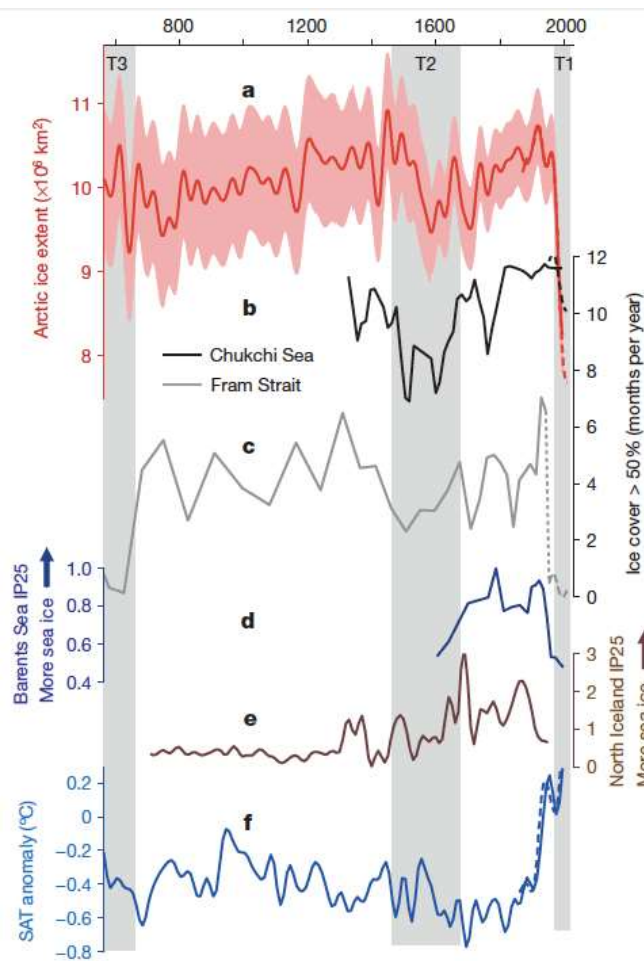


Eis und Pole



Quelle: Christophe Kinnard et al. *Nature*
Vol 479 509-512

Wenn Eis ins Meer kippt, Gletscher und Polkappen abgetragen werden, landet viel Masse im Meer, welche vorher nicht dort war. Dadurch steigt der Meeresspiegel und es greift der Albedo-Effekt. Dieser besagt, dass weiße Eismassen Sonnenlicht reflektieren, dunkles Meerwasser die Wärme allerdings schluckt. So haben wir wieder sich selbst verstärkende Effekte. Statt dass das Eis die Wärme reflektiert, erwärmt die Sonne das Wasser. Aktuell reflektieren die Eisflächen 30% des Sonnenlichts. Zusätzlich reflektieren Tundren, Salzwüsten und auch Sandwüsten in dieser Reihenfolge auch ein Drittel bis ein Viertel des Sonnenlichtes wieder zurück. Doch die Pole tragen mit 80-90% den größten Anteil an Reflektion bei, während Ozeane nur wenige Prozent zurückgeben.

Wir sehen links oben die Abnahme des arktischen schwimmenden Eisschildes über die letzten 1450 Jahre. Zu beachten ist besonders den Abfall ganz rechts. An der *University of Toronto* fand man zudem heraus, dass das permanente arktische Meereis mit 4 cm im Jahr doppelt so schnell abschmilzt wie das bisher gefährdete saisonale Eis. Das beschleunigt es noch einmal, bis die Arktis eisfrei sein wird.

Schwimmendes Eis hat allerdings kaum Einfluss auf den Meeresspiegel, nur auf den Albedo-Effekt. Durch die unterschiedliche Dichte von Salz- zu Süßwasser gibt es durchaus einen Effekt, welcher allerdings zu vernachlässigen ist. Gefährlicher ist Landeis, welches den Meeresspiegel durchaus anhebt! Grönland hat 3000 Meter dickes Eis auf sich, wessen obere Begrenzung so kalt ist, dass es eigentlich nicht tauen sollte. Grönland war vor 126.000 Jahren einmal eisfrei und Messungen ergaben, dass die Meere dadurch 5-7m höher lagen, was wenig klingt, aber viel ausmacht!

Die Eisschmelze in Grönland hat sich in den vergangenen zehn Jahren bereits vervierfacht auf 400.000.000.000 Tonnen im Jahr. Das zweitgrößte Eisreservoir der Erde bringt dabei so viel Süßwasser in den Nordatlantik, dass auch die Meeresströmungen dort blockiert werden und damit auch Europas Klima beeinflusst wird. 2019 wurde außerdem herausgefunden, dass schmelzendes Wasser zu dicken Eisschilden verdichtet ist, welche Schmelzwasser schneller ins Meer leiten. Dadurch kann sich das schmelzende Eis auf über 1000 Gigatonnen im Jahr erhöhen. Die wachsende Geschwindigkeit der Schmelze sorgt dafür, dass das Alteis (Firn) nicht mehr genug Schmelzwasser absorbieren kann und so füllt das Wasser die Schichten auf und gefriert als Platte, die dann schneller ins Meer rutscht.

Bereits in diesem Jahrhundert hat sich die Eisschmelze verdreifacht, Tendenz steigend. 100 Wissenschaftler des IPCC sind im Weltklimabericht darauf eingegangen. Die Meere steigen dadurch 4

mm im Jahr an und das erhöht sich jedes Jahr um gut 0,1 mm. Seit ich lebe, verlor die Cryosphäre der Erde etwa 28 Billionen Tonnen Eis. Das entspricht dem worst case Szenario des Weltklimarates und wird noch in diesem Jahrhundert heftige Auswirkungen auf Küstenstädte haben. Das Traurige: Die damit aufgenommenen knapp 9 Trilliarden Joule Energie entsprechen nur 3,2% des von den Menschen verursachten Energieüberschusses auf der Welt. Die Ozeane schluckten das Meiste.³⁶ Durch die steigenden Meerestemperaturen verlagern sich auch Wirbelstürme weiter westlich und nördlich (30 km pro Dekade) und fegen immer extremer über Küstenregionen hinweg.³⁷

Die Amundsensee kalbt aktuell dermaßen viele Eisberge und die Abstände verringern sich so stark, dass man dort von einem Kippunkt sprechen muss, der wohl bereits überschritten ist. Ergo wird man das Abtauen dieser Polarsee nicht mehr umkehren können, was die Meere um das Achtfache schneller ansteigen lassen wird, als bereits im 20. Jahrhundert geschehen. Dies würde allerdings nicht sofort geschehen, sondern kann selbst noch einmal Jahrhunderte dauern, da solche Entwicklungen teilweise sehr langsam sind. Wir reden von 1,5 - 3 Metern Meeresspiegelanstieg auf der gesamten Welt durch ein Abtauen der Amundsen-See.

Das Abtauen des Thwaites-Gletschers wird in den nächsten Jahrhunderten die Meeresspiegel weiter anheben und dadurch weitere Eismassen gefährden, so schrieb unter anderem *I. Joughin* 2014 in der 344. Science-Ausgabe³⁸. Forscher fanden außerdem heraus, dass vor 130.000 Jahren während der EEM-Warmzeit über 20.000 Jahre hinweg die Temperaturen ungefähr zwei Grad höher als heute lagen. Dabei stiegen die Meeresspiegel um bis zu acht Meter an.

2017 berichtete das Science Magazine von einem sehr alten Eisbohrkern vom Anfang der Eiszeit. Normalerweise schmilzt das untere alte Eis durch den warmen Kontinent ab, doch manchmal stürzt Eis um und faltet sich auf. Stark komprimiertes Eis wirkt dann schon blau. Der Eisbohrkern war 2,7 Millionen Jahre alt. Das Packeis des Nordens wird von jedem Deutschen pro Jahr um etwa 30 - 40 Quadratmeter verringert.

Ebenfalls im Eis eingeschlossen sind Unmengen an Kohlenstoffen. Die Permafrostböden binden 1,5 Billionen Tonnen CO₂, welche nicht in die Atmosphäre gelangen sollten. Das *Permafrost Carbon Research Network* spricht allerdings davon, dass es erst bei fünf Grad Erderwärmung zum kompletten Abtauen kommen würde, während wir gerade erst auf zwei Grad zugehen. Doch bereits seit acht Jahren ist bekannt, dass mehr CO₂ ausströmt, als die Tundra wieder einspeichern kann. Die Erwärmung setzte Methanhydrate frei und schmolz Gletscherzungen – in etwa das, was heute auch in der Antarktis passiert. Hochrechnungen ergaben, dass bei einem erneuten Auftreten solcher Umstände nur zwei Jahrhunderte ausreichen, um die Ozeane um beinahe vier Meter zu heben.³⁹

Es gibt Ideen, durch Geo-Engineering das Meereis zu retten. Dabei sollen Abermillionen Pumpen im Winter Wasser vom Ozean hochpumpen und ein bis zwei Meter Meerwasser an der Eisoberfläche so wieder zu Eis gefrieren zu lassen. Das würde die Temperaturen im Sommer durch das Mehr an Eis um 1,3 Grad abkühlen, im Winter allerdings durch das warme hochgepumpte Meerwasser um 1 Grad erwärmen. Außerdem fressen die Pumpen Energie, was den Effekt auf lange Sicht ins Gegenteil verkehren würde, den aktuellen Klimawandel dabei nur um das ein oder andere Jahrzehnt hinausschöbe. So berichtet das Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung.⁴⁰

³⁶ <https://tc.copernicus.org/articles/15/233/2021/>

³⁷ <https://science.sciencemag.org/content/371/6528/514>

³⁸ <https://science.sciencemag.org/content/344/6185/735>

³⁹ <https://www.pnas.org/content/early/2020/02/10/1902469117>

⁴⁰ <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019EF001230>

2016 las man Berichte von der Evakuierung von Teilen Spitzbergens, weil statt Schnee und Eis 100mm Regen auf den qm niederregneten. Ende 2019 gab es in Alaska Hitzewellen um den Gefrierpunkt herum. Für Europa wirkt das frisch, aber in Alaska sollte es zwanzig Grad kälter sein als gegeben war. Die arktischen Zonen spüren den Klimawandel aktuell besonders enorm. Außerdem wurde in dem Jahr der Hitzerekord um 2,8 Grad getoppt. 125.000.000.000 Liter Schmelzwasser fließen jährlich in die Ozeane. Noch schlucken die Ozeane mehr als 90% der Energie, die der Klimawandel in die Welt trägt. Doch wenn diese Grenze übertreten wird, geht es erst richtig los.

Der Sentinel-2-Satellit deckte auf, dass das letzte 4000 Jahre alte Schelfeis Kanadas brach, so Derek Müller von der *WIRL Carleton University*. Zu Zeiten der Weltkriege war die kanadische Arktis von acht bis neun tausend Quadratkilometern Eisschilden bedeckt, die bis zur Milleniumwende auf sechs fragmentierte Flächen reduziert wurden. Das Milne-Schelfeis galt mit einer Dicke von bis zu 90 Metern als stabil, auch wenn es Risse bekam und man 2015 subglaziale Kanäle entdeckte, doch 2020 brach ein 80qm großer Tafelberg ins Meer ab, nachdem ohnehin weniger als 500qm Schelfeis geblieben waren. Luke Copland von der *University of Ottawa* sprach von 5 Grad Erwärmung in der kanadischen Arktis und das Abtauen der dortigen Eisflächen werden viele von uns wohl noch miterleben.

Dank ausdauernder Hochdruckgebiete im Jahre 2019 sind 320 Milliarden Tonnen mehr Eis auf Grönland geschmolzen, als sich wiederum bildete, was die Meere um 1,5 mm steigen ließ. Das in einem einzigen Jahr ist bisher mit Abstand ein Rekord seit Beginn der Aufzeichnungen.⁴¹ Ein weiterer aktualisierter Bericht spricht nun sogar von 2,2 mm alleine in zwei Monaten! Mittlerweile gewinnt Grönland nur noch an einem von hundert Jahren Eis zurück und der Kippunkt wurde damit überschritten. Grönland ist verloren.⁴²

Auch wurde herausgefunden, dass die eigentlich sichere Ostantarktis zu schmelzen beginnt. Zumindest schmilzt der Denman-Gletscher dank einer ungünstigen Schiefelage zum Meer um 45 Meter im Jahr!⁴³ Eine Arbeitsgruppe um Terrence Blackburn von der *University of California* in Santa Cruz fand heraus, dass die Ostantarktis während einer Warmzeit vor 400.000 Jahren mehrere hundert bis tausend Kilometer geschrumpft war und das bei gerade einmal einem bis zwei Grad mehr Wärme als heute. Das weist uns noch einmal darauf hin, dass wir weniger sicher sind, als wir dachten - was die Ostantarktis angeht.

2020 wurde ein Bericht veröffentlicht⁴⁴, nach dem in 14 Jahren 22.000.000.000 Tonnen Eis aus den Alpen abgeschmolzen sind, was 17% des Volumens aller Alpengletscher entspräche. Das ist eine Verlustrate von 1,8% der Fläche im Jahr. Das gefährdet Wasserkraft, Wasserdepots und Tourismus. Auch beunruhigend ist 2020 die Hitze in der Arktis gewesen. Im sibirischen Werkojansk wurden 38 Grad gemessen, was seit über 100 Jahren kein Ort am Polarkreis mehr erreicht hat. Durch die Hitze brennen dort Moore groß wie Bundesländer ab, was schon seit vielen Jahren vor sich hin schwelt und 2020 einen Höhepunkt erreichte. Die Gegend ist zu dünn besiedelt und zu arm um etwas zu unternehmen und so werden Unmengen Permafrostböden aufgetaut und Treibhausgase freigesetzt.

Im globalen Vergleich heizt sich die Antarktis immer weiter auf. Seit Beginn der Aufzeichnungen gab es 2002, 2009, 2013 und 2018 Hitzerekorde in der Antarktis. Die Winde und Strömungen liegen zum ersten Mal seit 1957 sehr ungünstig und halten sich bereits über eine Dekade erwärmend über der bisher als sicher angesehenen Ostantarktis.

⁴¹ <https://www.the-cryosphere.net/14/1209/2020/>

⁴² <https://www.nature.com/articles/s43247-020-0001-2>

⁴³ <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019GL086291>

⁴⁴ <https://www.nature.com/articles/s41467-020-16818-0>

Das schwindende Eis in der Arktis schluckt immer weniger Energie vom Oberflächenwasser. Auch sind Küsten weniger durch Eis geschützt und erodieren schneller. Weniger stark gefrorene Böden sind ebenfalls anfälliger. Wellen werden um ein bis sechs Meter höher und Sturmfluten werden alle paar Jahre, statt alle paar Jahrzehnte auftreten.⁴⁵

In Alaska ist 2018 doppelt so viel tausende Jahre alter Permafrost aufgetaut, als beim bisherigen Extrem 2006, was große Schmelzwasserseen auslaufen ließ – sogenannte Thermokarste. Diese Entwicklung wurde erst in vierzig Jahren erwartet. Es ging zehnmal so viel Seefläche verloren, wie normal. Der Permafrost scheint also instabiler zu sein, als bisher angenommen und setzt und umso mehr Treibhausgase frei. Außerdem beeinflussen sich die Pole aktuell ebenfalls. Schmelzendes Wasser aus der Arktis, lässt Eisflächen der Antarktis landen, umspülen und schneller abtauen.⁴⁶

Bohrkerndaten der Westalpen offenbaren eisfreie Alpen vor 6000 Jahren, während des Klimaoptimums des Holozän, in dem die Grundlage für die folgenden ersten Hochkulturen gelegt wurden. Aktuelle Gletscherveränderungen in Verbindung mit diesen Daten zeigten in einem Forschungsbericht von Ende 2020 allerdings an, wie sensibel die Alpen beispielsweise auf Temperaturveränderungen reagieren und damit ebenfalls schnell ein kleiner Kipppunkt erreicht werden kann.⁴⁷

2017 kalbte das Larsen-C-Schelfeis erst eine Rekordmenge von 5800 km² Eis durch einen dicken Eisberg. Im Februar 2021 kalbte im Brunt-Schelfeis ein Berg von 1300 km² und das in einem Gebiet das eigentlich nicht als gefährdet galt. So das *British Antarctic Survey*. Jeder Quadratmeter fehlendes Meereis begünstigt 70 kg Wasserdampf im Jahr, was 2020 zu 140 Gigatonnen Dampf aus der Berentsee sorgte, welcher sich als Schnee über Europa entlud.

Wasser und Ozeane

Es gibt heiße Strömungen im Ozean, welche durch die äquatorialen Gewässer fließen und in der arktischen See versinken und kalte Strömungen in tieferen Schichten umherwälzen. Das Absinken klappt durch den konzentrierten Salzgehalt dieser sogenannten thermohalinen Strömung. Es ist klar, dass das Weltklima immer mehr zu Extremen neigen wird, wenn dieses ausgleichende System von sich umwälzenden einer Billion Litern zusammenbräche. Aktuell wandert das Strömungssystem jährlich 800 Meter polwärts und nimmt dabei im Schnitt an Fahrt auf.

Die relativ flache Ostsee wärmt sich viel zu stark auf, erlebt starke Algenblüten und bildet anoxische Zonen am Grund. Das sind Zonen, in denen der Sauerstoffgehalt zu stark absinkt und damit nur anoxisch lebende Organismen wie einige Bakterien und Algen dort leben können. Auch gibt es in der Ostsee kaum Strömungen, wodurch gefährliche Erreger den Tourismus bedrohen werden. Das *Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde* spricht davon, dass nur bei stringentem Meeresmanagement und Erreichung der Klimaziele eine Chance besteht, die Ostsee zu retten. Da wir wissen, wie klug die Menschheit ist, dürfen wir uns von der Ostsee bereits in den nächsten 20 - 30 Jahren verabschieden. Dann bleibt nur noch ein lauwarmer, durch Algen bunt gefärbter Todestümpel.

Das *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences* fand heraus, dass die Ozeane teilweise bis in mehrere hundert Meter Tiefe an Temperaturen gewöhnen. So sei in den letzten 25 Jahren die Energie aus 3.600.000.000 Hiroshima Bomben (228.000.000.000.000.000.000 Joule) an Wärme im

⁴⁵ <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019JC015745>

⁴⁶ <https://www.nature.com/articles/s41586-020-2916-2>

⁴⁷ <https://www.nature.com/articles/s41598-020-77518-9>

Ozean freigeworden. 2019 erwärmte sich das Meer um 75 Milligrad. Die Erwärmung der letzten 30 Jahre sei im Vergleich zu den davorliegenden 30 Jahren um 450% angestiegen.

Auch die Tiefsee bleibt nicht verschont. Die Ozeane sind gewaltig und Wasser ist viel konzentrierter als die Atmosphäre, kann daher viel mehr Energie absorbieren. Gut 90% unserer Wärme fließt in die Ozeane und macht sie zusätzlich saurer und sauerstoffärmer. Nach unten hin dauert es immer länger, bis die Temperaturen die tieferen Schichten berühren. Dort sind die Lebensräume extrem und die Tiere sind besonders spezialisiert, sodass leichte Veränderungen bereits zur Bedrohung werden. Forschungen von der *University of Queensland*⁴⁸ sagen voraus, dass um das Jahr 2100 eine Abwanderung der Tiefseefauna um 76km pro Dekade erreicht sein wird, wenn wir sofort aufhören, die Umwelt zu belasten. Ansonsten 114 km pro Dekade. Was wir auch tun, die Tiefsee scheint bereits verloren.

Die mittleren Meeresschichten können allerdings gerettet werden. Bei ungebremstem Klimawandel allerdings, würde die Abwanderung der Mitten bei 135 km pro Dekade noch krasser sein. Die mesopelagische Schicht füttert allerdings die Tiefsee und auch die oberen Schichten mit Biomasse, welche für den Fischfang unerlässlich sind. Interessant ist auch, dass die Atomwaffentests bereits bis zum Marianengraben hingewirkt haben.⁴⁹ Zwar braucht Wasser Jahrhunderte, um von der Oberfläche bis in die tiefsten Spalten der See zu dringen, aber die Nahrungskette der Lebewesen ist schneller. Das zeigt wieder einmal unseren Einfluss auf die Welt.

Allgemein ist festzustellen, dass die Schichtung der Ozeane von warm, salzarm und dünn an der Oberfläche zu kalt, salzhaltig und dicht in der Tiefsee immer stärker gefestigt ist, während die Stabilität der Atmosphäre eher abnimmt. Die Durchmischung der Ozeanschichten geschieht also seltener, was das Oberflächenwasser wärmer, sauerstoffärmer und pH-saurer macht und dabei weniger in Bezug aufs Klima puffert.⁵⁰

In den letzten 60 Jahren nahmen die Ozeane 380 Trilliarden Joule Wärme auf und stiegen dadurch um 4,7 Zentimeter an. 2020 stieg die Wärmeaufnahme dabei mehr als drei Mal so stark an, wie im langjährigen Mittel, was der Energie von 1,3 Milliarden kochenden Kesseln entspricht. Das Aufheizen ist bereits achtmal schneller als noch zu Zeiten des Babybooms und des kalten Krieges. Die Schichtung der Ozeane und dadurch das Aufkommen anoxischer Zonen durch schwächere Durchmischung nahm zu. Das sorgt für eine schlechtere Aufnahme von Wärme und CO² und verringert die mögliche Pufferwirkung weiterhin. Außerdem nehmen die Stärke von Sturm, Wirbelsturm und Regen beträchtlich zu, während andere Gebiete zum Ausgleich verdorren.⁵¹

Die Atlantische Meridionale Umwälzströmung AMOC bewegt 20 Millionen Kubikmeter Wasser in der Sekunde zwischen den Tropen und dem Nordpol hin und her. Doch aktuell ist der Umwälzstrom so schwach wie seit 1000 Jahren nicht mehr. Das einfließende süße Oberflächenwasser verändert die Dichte zu stark. Damit sind natürliche Schwankungen ausgeschlossen. Das wird noch in diesem Jahrhundert Kippunkte umwerfen.⁵²

Ozeane reagieren unheimlich langsam auf den Klimawandel und Modellrechnungen sagen voraus, dass sich der Sauerstoffschwund der Ozeane noch vervierfachen muss, selbst wenn heute sofort alle Emissionen gestoppt würden. Denn die Auswirkungen werden noch Jahrhundertlang weiterreichen.

⁴⁸ <https://www.nature.com/articles/s41558-020-0773-5>

⁴⁹ <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2018GL081514>

⁵⁰ <https://www.nature.com/articles/s41558-020-00918-2>

⁵¹ <https://link.springer.com/article/10.1007/s00376-021-0447-x>

⁵² <https://www.nature.com/articles/s41561-021-00699-z>

Nur die Oberflächengewässer würden bereits nach wenigen Jahren ihren Tiefpunkt erreicht haben und die untersten Schichten werden noch in Jahrhunderten auf uns reagieren.⁵³

⁵³ <https://www.nature.com/articles/s41467-021-22584-4>