

Was sind die Auswirkungen des Klimawandels?

Michael Schmitt
Institut für Physikalische Chemie I
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Ergänzung zur letzten Vorlesung

Angesichts des großen Anteils von Wasser am natürlichen Treibhauseffekt wurde gefragt, warum ich diesen nicht auch beim anthropogenen Treibhauseffekt quantifiziert habe.

Darüber hinaus sorgte für Verwirrung, dass die Tabelle mit der Zusammensetzung der Atmosphäre keinen Wasserdampf ausgewiesen hat.

Auf beide Punkte möchte ich, da sie sehr wichtig sind, heute vorab gesondert eingehen.

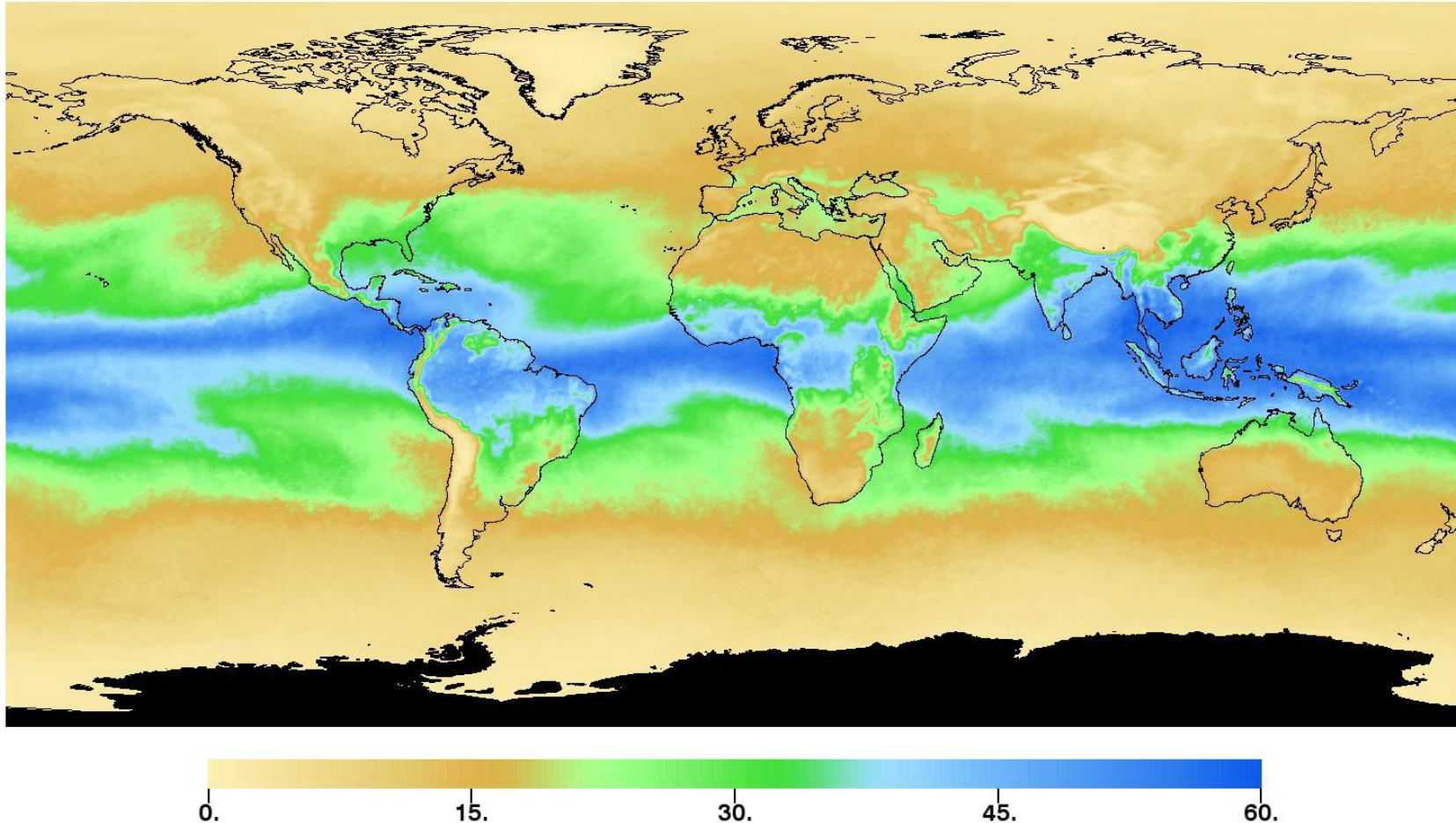
Wie ist die Atmosphäre zusammengesetzt?

Substanz	Formel	Volumenanteil	Massenanteil	Quelle(n)
Stickstoff	N ₂	78,084%	75,518%	Biogen
Sauerstoff	O ₂	20,948%	23,135%	Biogen
Argon	Ar	0,923%	1,288%	Inert
Kohlendioxid	CO ₂	410 ppmV	580 ppm	Biogen, anthropogen
Neon	Ne	18,18 ppmV	12,67 ppm	Inert
Helium	He	5,24 ppmV	0,72 ppm	Inert
Methan	CH ₄	1,9 ppmV	0,97 ppm	Biogen, anthropogen
Wasserstoff	H ₂	0,55 ppmV	36 ppb	
Lachgas	N ₂ O	0,317 ppmV	480 ppb	Biogen, anthropogen
Kohlenmonoxid	CO	50 – 200 ppbV	50 – 200 ppb	Photochemisch, anthropogen
Ozon (Troposphäre)	O ₃	10 – 500 ppbV	15 – 750 ppb	Photochemisch
Ozon (Stratosphäre)	O ₃	0,5 – 20 ppmV	0,7 – 30 ppm	Photochemisch
Halogenverbind.		3,8 ppbV		Biogen, anthropogen

Spurengas	Quellen		Senken	mittlere	Konzentration		Änderung
	anthropogene	natürliche		Verweilzeit	vorindustriell	derzeit	% pro Jahr
CO ₂	Fossile Brennstoffe, Waldrodungen	Respiration	Photosynthese Absorption Ozean	50-200 a	280 ppm	400 ppm	+0.4
H ₂ O (Tropo)	vernachlässigbar	Verdampfung	Niederschlag	10 d	10 ppm-2%	10 ppm-2%	±0
H ₂ O (Strato)	Flugzeugemission	Verdampfung aus Gewässern	Niederschlag	2 a	2 ppm	2 ppm	±0
O ₃ (Tropo)	Photochemie von Kfz-Abgasen	photochemisch	Oxidation	30-90 d	<0.01 ppm	0.03 ppm	+1.0
O ₃ (Strato)	keine	Photochemie	Photochemie	1-2 a	8-10 ppm	5-10 ppm	-0.4
N ₂ O	Stickstoffdüngung	Bakterien	Photochemie Stratosphäre	120 a	0.28 ppm	0.31 ppm	+0.25
CH ₄	Reis, Vieh, Müll	Bakterien	Photochemie Troposphäre	12-17 a	0.7 ppm	1.71 ppm	+0.8
FCKW	Kühlmittel, Lösungsmittel	keine	Photochemie Stratosphäre	50-100 a	0	0.3 ppb	+4.0
NH ₃	Viehhaltung, Düngung	bakterielle Aktivität	Photochemie	7-14 d	k. A.	0.1 ppb	k. A.
CO	Fossiler Brennstoffe	Oxidation KW, Waldbrände	Photochemie Troposphäre	2-6 m	k. A.	50-200 ppb	+1.5

Wasser in der Atmosphäre

AIRS TOTAL PRECIPITABLE WATER VAPOR (mm), May 2009



Die einfache Antwort...

- Wasserdampf kommt im Gegensatz zu den anderen atmosphärischen Bestandteilen in sehr stark variierendem Anteil vor. Diese Variationen umfassen Höhen-, geographische, tageszeitliche, jahreszeitliche, etc. Verteilungen des Wasserdampfs. Sobald der Taupunkt des Wassers unterschritten wird bilden sich Wassertröpfchen (Nebel, Wolken, Regen) und der Luft wird dampfförmiges Wasser entzogen.
- Deshalb sprechen wir auch von Wasserdampf und nicht Wassergas, da Wasser bei Normalbedingungen eine Flüssigkeit ist und je nach Temperatur und Druck verdampft oder kondensiert
- Der Anteil, an Wasserdampf, der durch anthropogene Einflüsse zum natürlichen Anteil in der Atmosphäre hinzukommt ist sehr klein und unbedeutend.

Etwas ausführlicher...

- Die Konzentration von Wasserdampf in der Atmosphäre wird durch die Temperatur wesentlich stärker beeinflusst als durch Emissionen. Warme Luft kann mehr Wasser aufnehmen als kalte Luft. Ohne den Einfluss des Wasserdampfes wäre unsere Erde ein Eisklumpen.
- Das unterscheidet H_2O als Treibhausgas dramatisch von CO_2 . Obwohl H_2O beim **natürlichen** Treibhauseffekt die klar dominierende Rolle spielt, ist es beim **anthropogenen** Treibhauseffekt nur untergeordnet beziehungsweise sekundär.

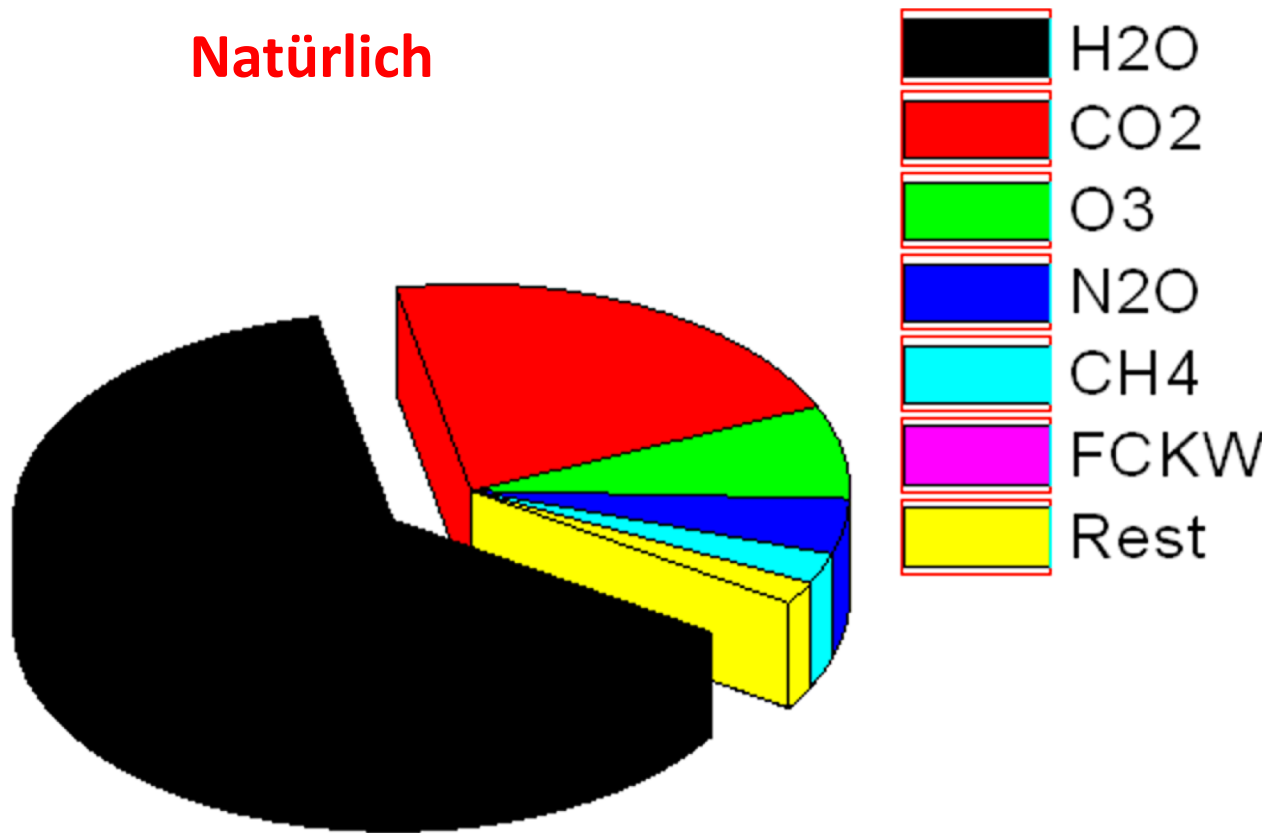
Natürlich vs. anthropogen

Natürlich	H ₂ O	CO ₂	O ₃	N ₂ O	CH ₄	Rest	Summe
Temperaturbeitrag ΔT_i in K	20.6	7.2	2.4	1.4	0.8	0.6	33
ΔT_i in %	62.4	21.4	7.3	4.3	2.4	1.8	100

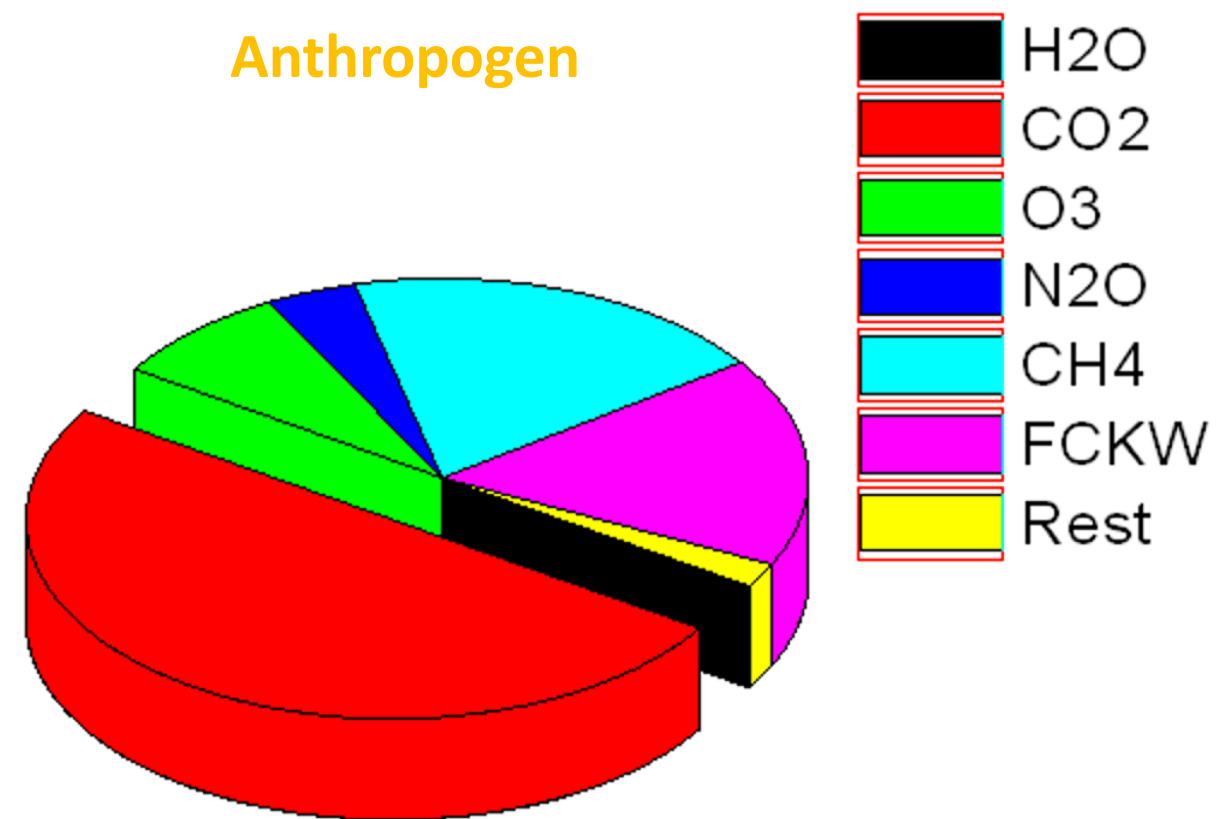
Anthropogen	CO ₂	CH ₄	FCKW	O ₃	N ₂ O	Rest	Summe
Temperaturbeitrag ΔT_i in K	0.42	0.17	0.13	0.06	0.04	0.01	0.83
ΔT_i in %	50	19	17	8	4	2	100

Zahlen sind Schall und Rauch...

Natürlich



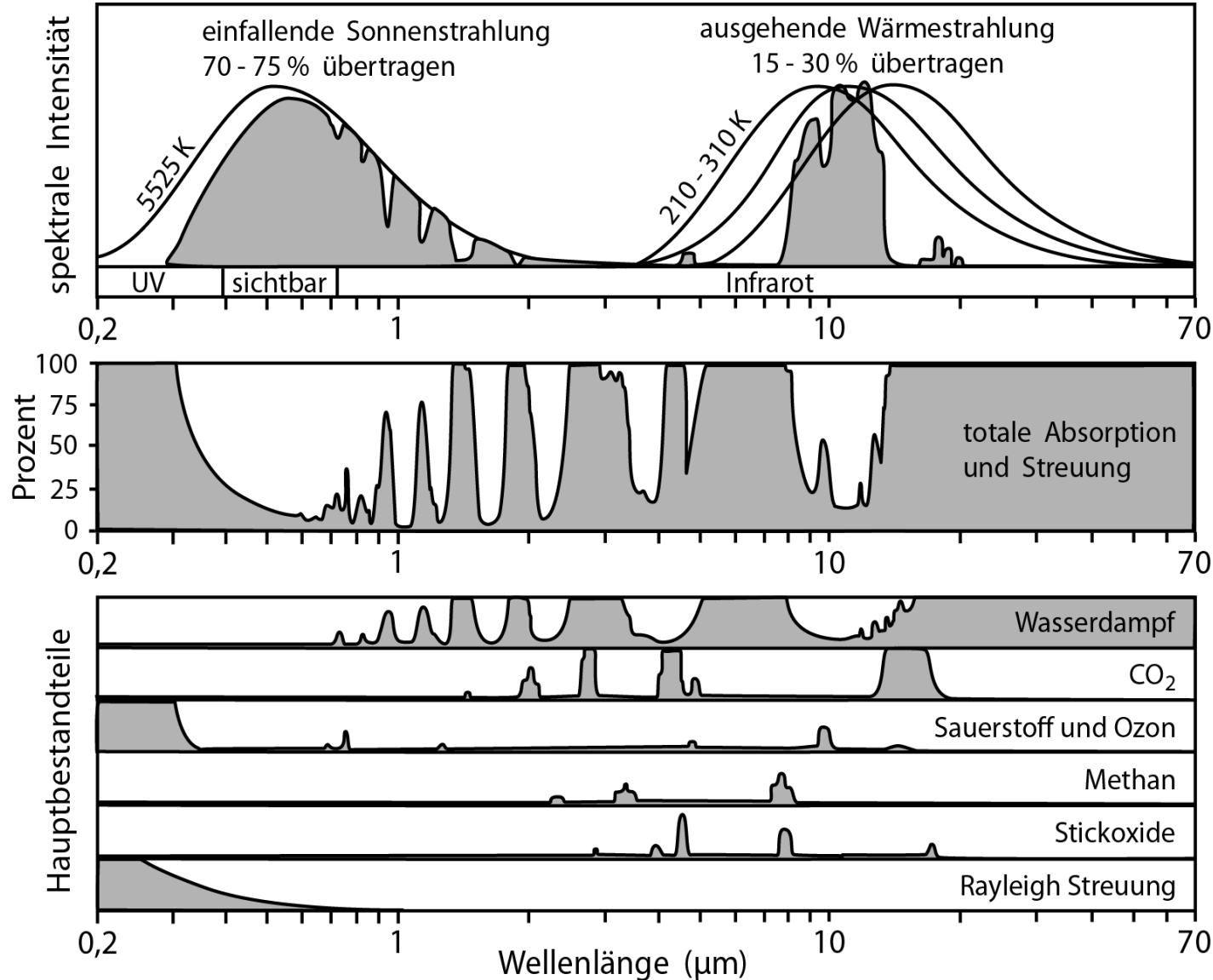
Anthropogen



Wie ist das nun mit dem Wasser?

- Da sich der Wasserdampfanteil durch anthropogene Handlungen praktisch nicht ändert ist das CO_2 die treibende Kraft hinter dem Treibhauseffekt.
- Steigt allerdings die Temperatur durch die Zunahme von CO_2 in der Atmosphäre, dann steigt auch die Wasserdampfsättigung, d.h. es ist mehr Wasserdampf in der Atmosphäre.
- Dieses führt in der Folge zu einer weiter steigenden Temperatur, da H_2O ja ein wirksameres Treibhausgas als CO_2 ist.
- Es handelt sich also um eine klassische positive Rückkopplung.
- Überspitzt könnte man sagen, dass H_2O das eigentliche Treibhausgas ist und CO_2 nur die Funktion eines „Regelknopfes“ übernimmt.

IR-Absorption von Gasen



Verschiedene Gase können infrarotes Licht („Wärme“) absorbieren.

Manche Gase können das nicht.

Allgemein:

- Atomare Gase absorbieren kein IR.
- Homoatomare Moleküle absorbieren kein IR.
- Alle anderen Gase absorbieren IR-Strahlung.

Ist das Wasserspektrum nicht gesättigt?

Vom Erdboden wird IR Strahlung emittiert und in einer Schicht in der Höhe z mit der Dicke Δz absorbiert. Von hier aus emittieren die Moleküle in alle möglichen Richtungen. Wir betrachten im Folgenden nur zwei Richtungen: nach oben und nach unten.

Die nach unten gerichtete IR-Strahlung erwärmt den Erdboden (oder die darunterliegende Schicht). Nach oben gerichtete Strahlung erwärmt die darüber liegende Schicht, von wo der Prozess bis zum Rand der Atmosphäre weitergeht.

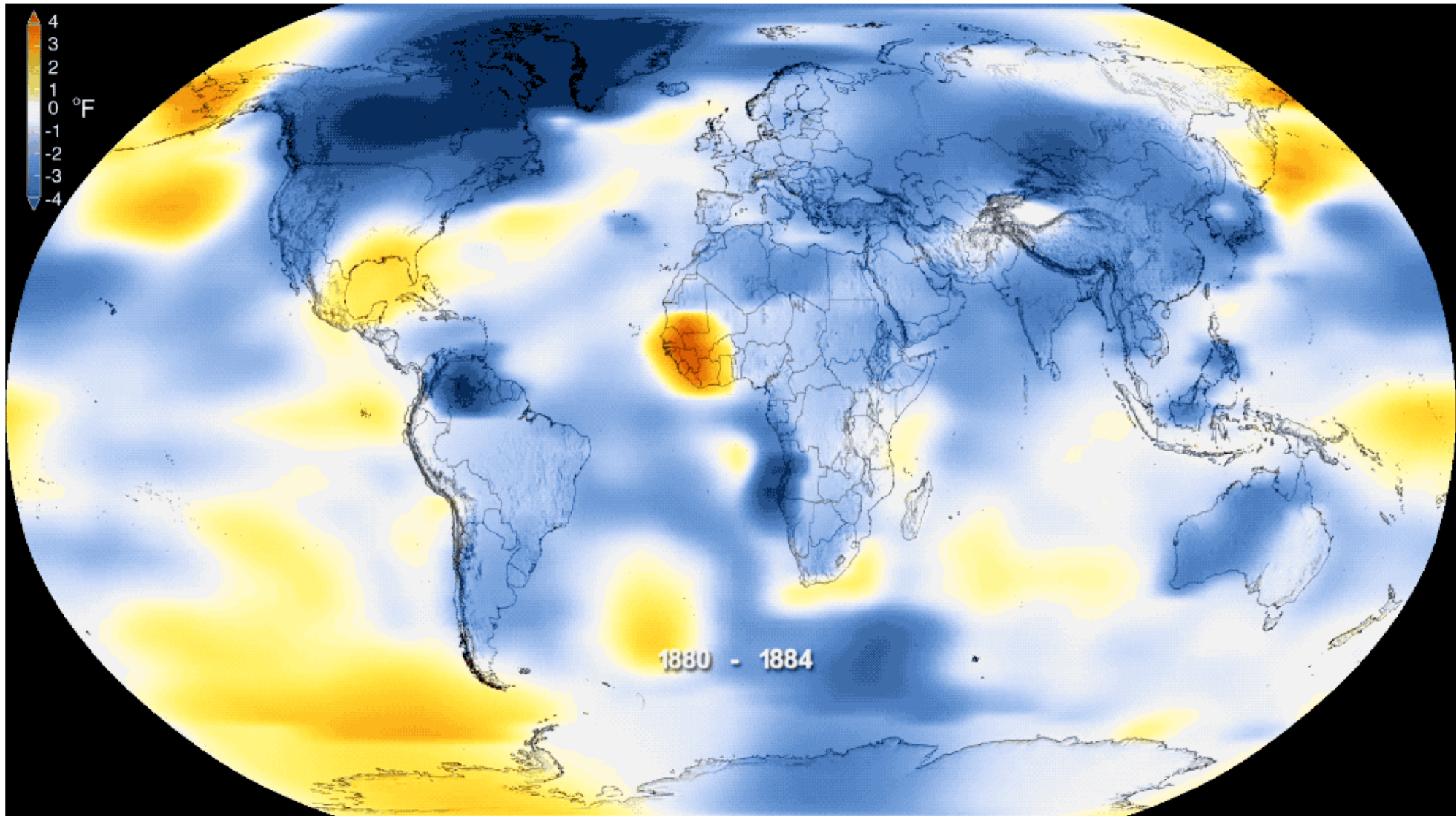
Da die Dichte der Atmosphäre nach oben abnimmt, ist irgendwann so wenig H_2O vorhanden, dass die Wärmestrahlung schließlich in den Weltraum entweichen kann. In diesem Bereich ist der H_2O Gehalt so gering, dass keinerlei Sättigung auftritt.

Mehr H_2O führt also zu einer Verschiebung der Schicht ab der die Strahlung in den Weltraum entweicht, zu größeren Höhen. In diesen Höhen ist die Temperatur niedriger und die Wärmeabstrahlung deshalb geringer

Auswirkungen des Klimawandels

- Änderung der Oberflächentemperatur
- Veränderung der Niederschlagsverteilung
- Anstieg des Meeresspiegels
- Versauerung der Ozeane
- Abnahme der Süßwasserreserven durch Abschmelzen der Gletscher
- Zunahme von Starkwetterereignissen
- Abnahme der Nettoproduktivität der Biosphäre
- Massenaussterben von Tierarten
- Klimamigration
- Zunahme von Infektionskrankheiten

Änderung der Oberflächentemperatur



Oberflächentemperatur - Kippelemente

- Das 1.5°C Maximum für die globale Erwärmung ist aus dem Prinzip der Vermeidung des Erreichens von Kippelementen abgeleitet.
- Als Kippelement wird in der Klimaforschung eine Größe bezeichnet, deren Änderung über einen gewissen Punkt hinaus, das System **abrupt** und meistens **irreversibel** in einen neuen Zustand versetzt, der sich vom alten Gleichgewichtszustand extrem unterscheidet.
- Kippelemente sind häufig Folge einer **positiven Rückkopplung** des Systems.
- Einige Kippelemente können auch andere Kippelemente auslösen. Das sukzessive gegenseitige Auslösen mehrerer Kippelemente wird auch als **Dominoeffekt** bezeichnet.

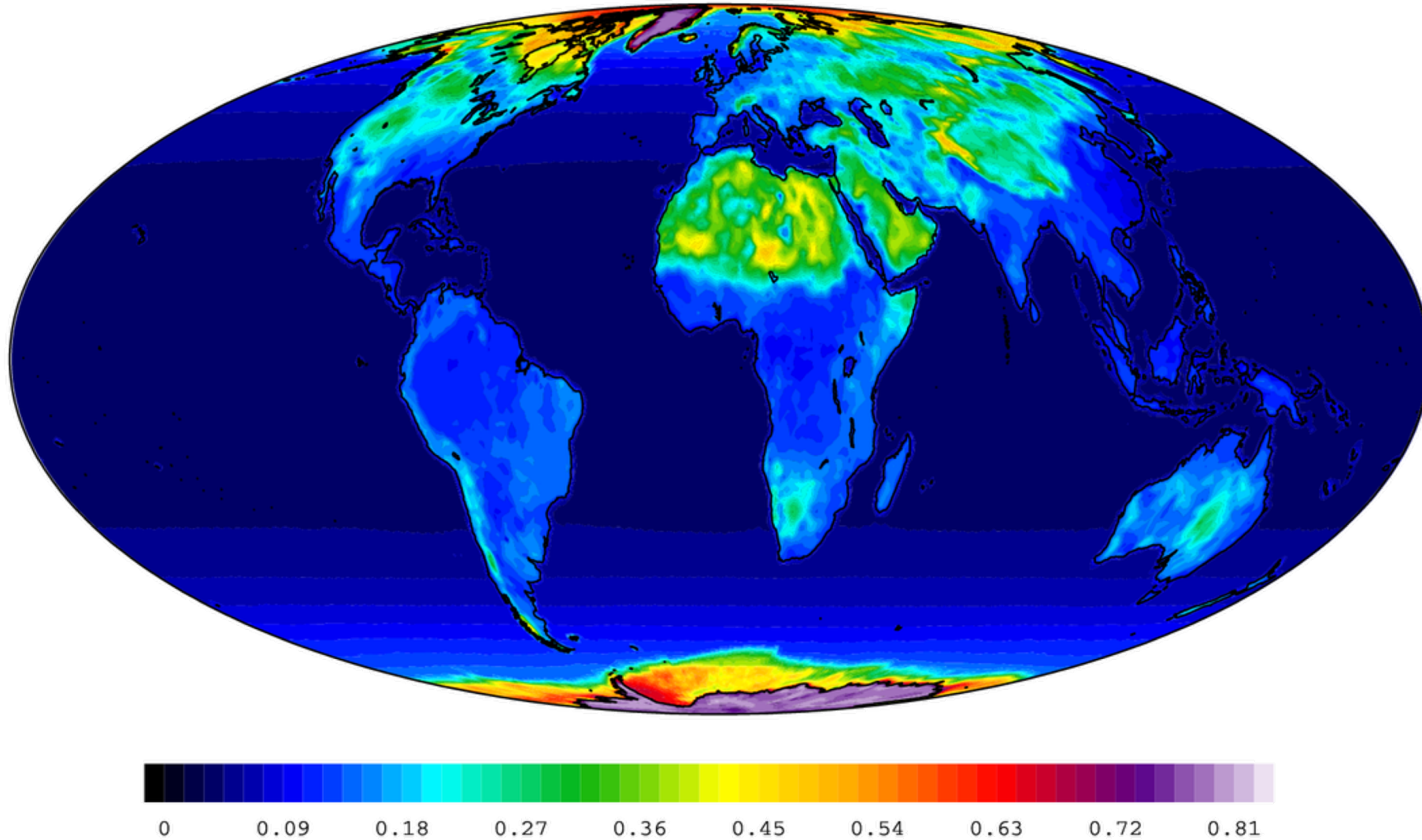
Oberflächentemperatur - Kippelemente

1. Abschmelzen der Polkappen
2. Erlahmen der atlantischen thermohalinen Zirkulation
3. Auftauen der Permafrostböden mit Methanfreisetzung
4. Methanausgasung aus unterseeischen Methanhydratlagerstätten
5. Rückgang der Nettoproduktivität der Biosphäre
6. Zunahme der Konzentration von gasförmigem Wasser in der Atmosphäre
7. Veränderung der *El Niño-Southern Oscillation*

Abschmelzen der Polkappen

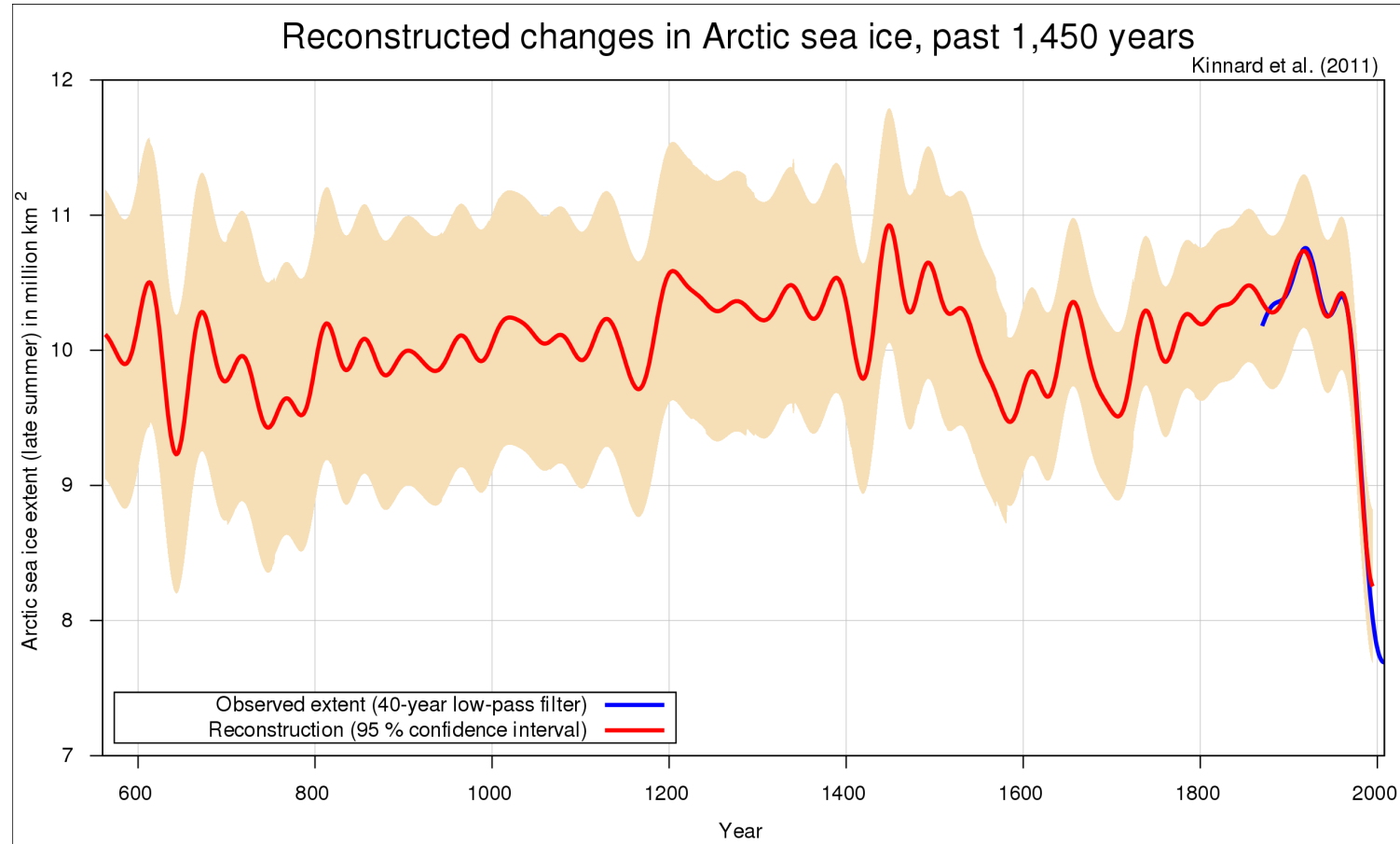
- Das Abschmelzen der Polkappen führt zu einer Verringerung des Rückstrahlungsvermögens (**Albedo**) der Erde.
- Im Moment beträgt die Albedo etwa 30%, das heißt 30% der Energie die die Sonne auf die Erde einstrahlt werden direkt in den Weltraum reflektiert.
- Helle, stark reflektierende Eisflächen haben eine große Albedo, dunkles Meerwasser eine kleine. Abschmelzen von Eisflächen führt also zu einer Verminderung der Albedo und in Folge davon zu einer zunehmenden Temperatur.
- Diese erhöhte Temperatur führt zu weiterem Abschmelzen von Eisflächen, u.s.w.
- Solche Prozesse, die sich selbst verstärken bezeichnet man als **positive Rückkopplungen**.

Albedo



Abschmelzen des arktische Meereises

Wahrscheinlich hat das Abschmelzen des arktischen Meereises bereits einen Kipppunkt überschritten¹.



¹ Kinnard et al. Nature **479**, 509–512 (2011)

Abschmelzen des Grönländischen Eisschilds

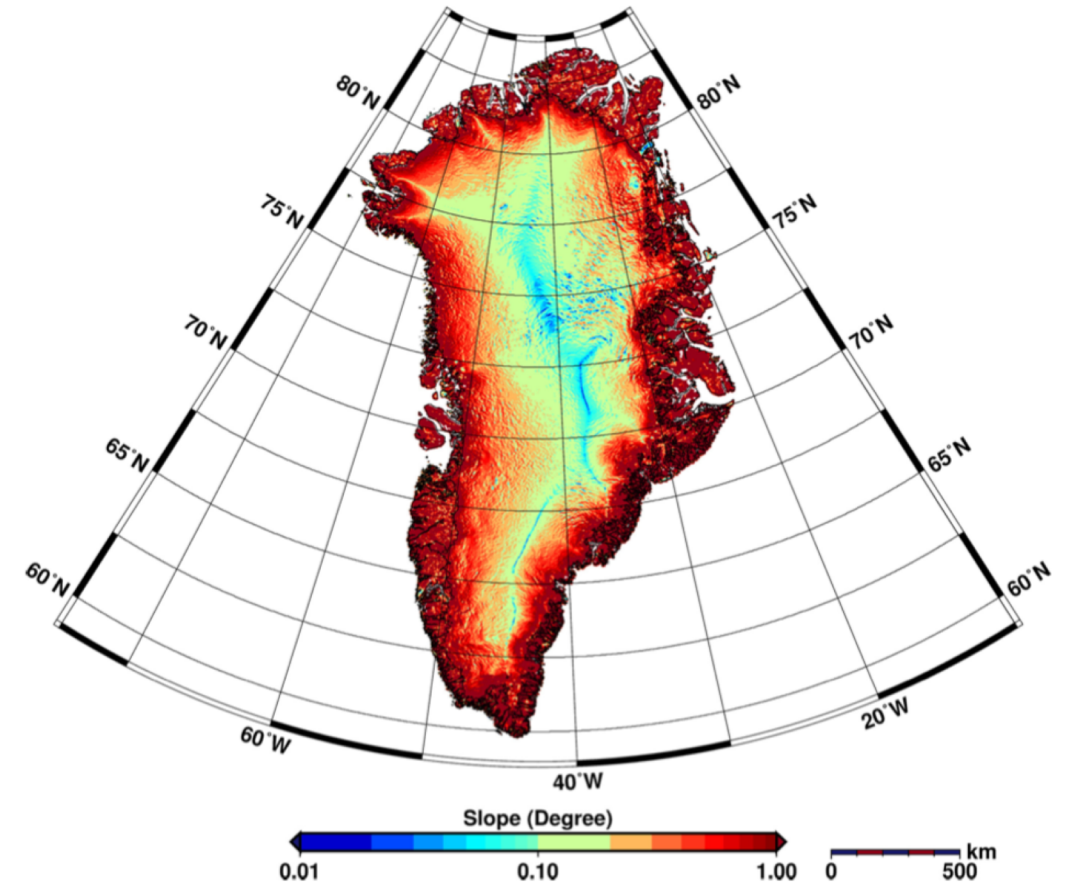
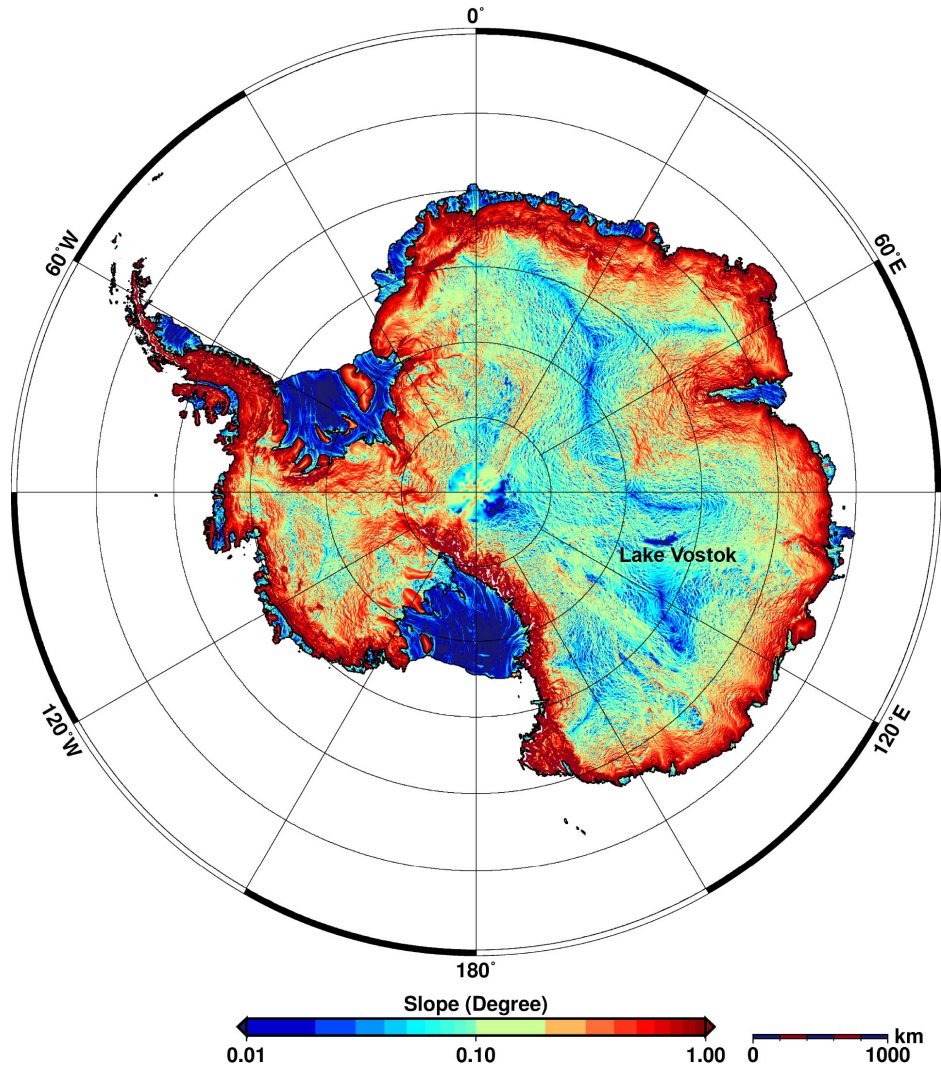
- Der Grönländische Eisschild hat eine Mächtigkeit von 3000 m. Dadurch liegt seine obere Begrenzung in einer sehr kalten Zone, die eigentlich ein Abschmelzen verhindert.
- Es wird damit gerechnet, dass der Kipppunkt für das vollständige Abtauen des Grönländischen Eisschilds bei einer Temperaturerhöhung zwischen 1,5 und 2,0°C liegt.
- Beim Ansteigen der Temperatur und einer beim Abschmelzen auftretenden Verminderung der Mächtigkeit kommen immer größere Bereiche in Regionen mit höherer Temperatur.
- Dadurch kommt es auch hier zu einer positiven Rückkopplung und einem beschleunigten Abtauen.
- Ein vollständiges Abtauen würde zu einer Erhöhung des Meeresspiegels um etwa 7m führen (4 - 6 m während des Eem-Interglazials vor 126.000 Jahren).

Abschmelzen des Westantarktischen Eisschildes

- Während es in der Ostantarktis zu keinem Abschmelzen kommt, ist die kleinere Westantarktis davon stark betroffen.
- Die größten Gletscher der Westantarktis enden im Meer, das sich dort bereits stark erwärmt hat.
- Wahrscheinlich ist der Kipppunkt für das Abschmelzen des Thwaites-Gletschers bereits erreicht, was zu einer Erhöhung des Meeresspiegels in einem Zeitraum von 200 bis 900 Jahren führt³.
- Auch hierbei wird eine positive Rückkopplung beobachtet: Da sich die Gletscherzunge im Meer befindet, wird sie durch einen ansteigenden Wasserspiegel weiter destabilisiert.

³ I. Joughin, B. E. Smith, B. Medley Science. **344**, 735–738 (2014)

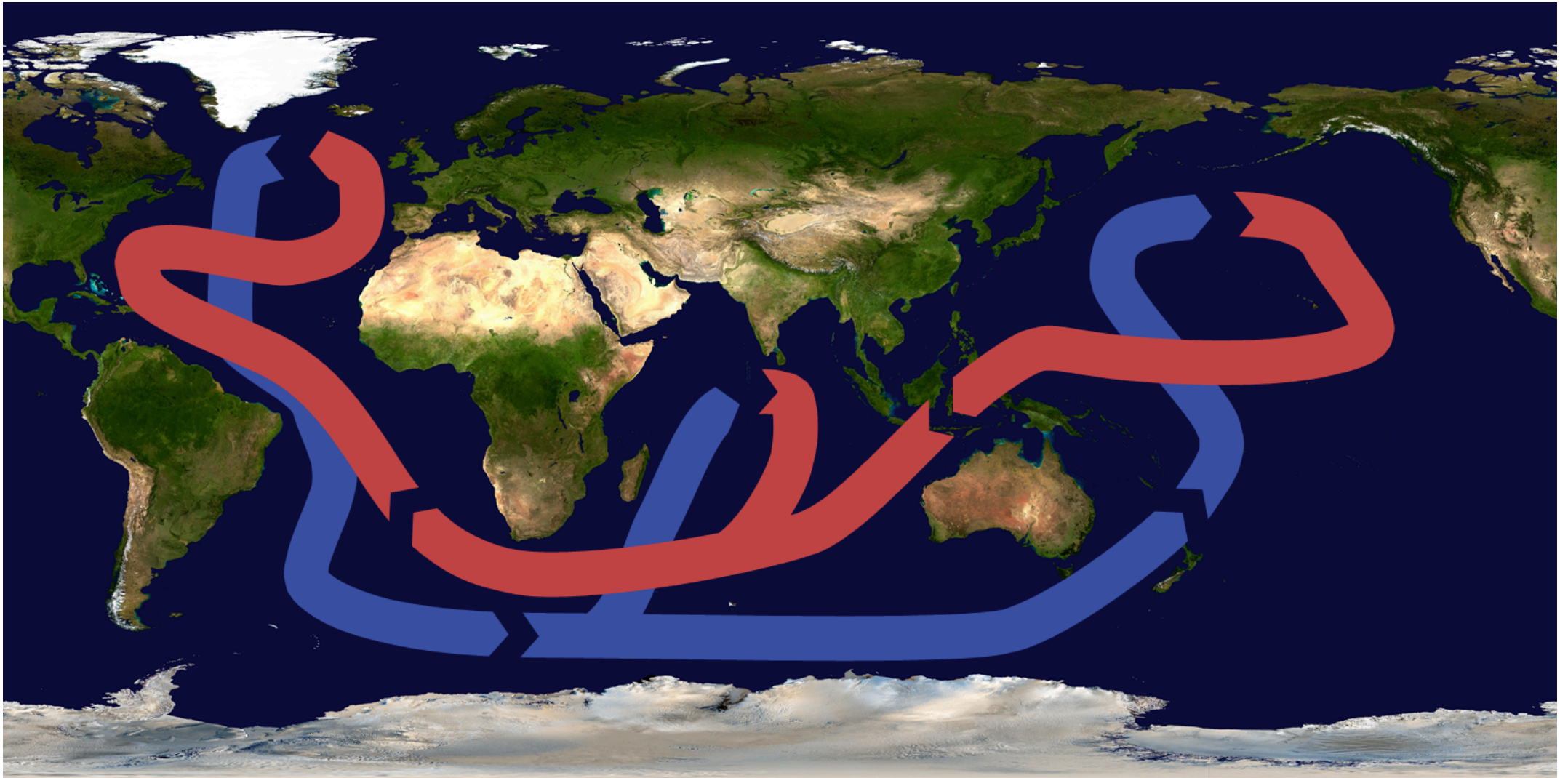
Westantarktis vs. Grönland



Erlahmen der atlantischen thermohalinen Zirkulation

- Atlantische thermohaline Zirkulation bezeichnet eine Kombination von Meeresströmungen, welche die Ozeane miteinander verbinden und dabei einen globalen Kreislauf bilden.
- Der Antrieb für diesen Massen- und Wärmeaustausch sind Temperatur- und Salzkonzentrations-unterschiede innerhalb der Weltmeere, die für die unterschiedliche Dichte des Wassers verantwortlich sind.
- Verursacht wird der Temperaturunterschied durch die Breitengradabhängigkeit der Sonneneinstrahlung, der Salzkonzentrationsunterschied durch Verdunstung.
- Die thermohaline Zirkulation beginnt mit dem Absinken des salzreichen kalten Meerwassers im Nordatlantik auf 1 bis 4 km Tiefe. Am Meeresgrund fließt das Wasser als kalte Tiefenströmung bis zum Südatlantik und wird dann mit dem Zirkumpolarstrom in den Indischen Ozean und Pazifik transportiert.

Erlahmen der atlantischen thermohalinen Zirkulation

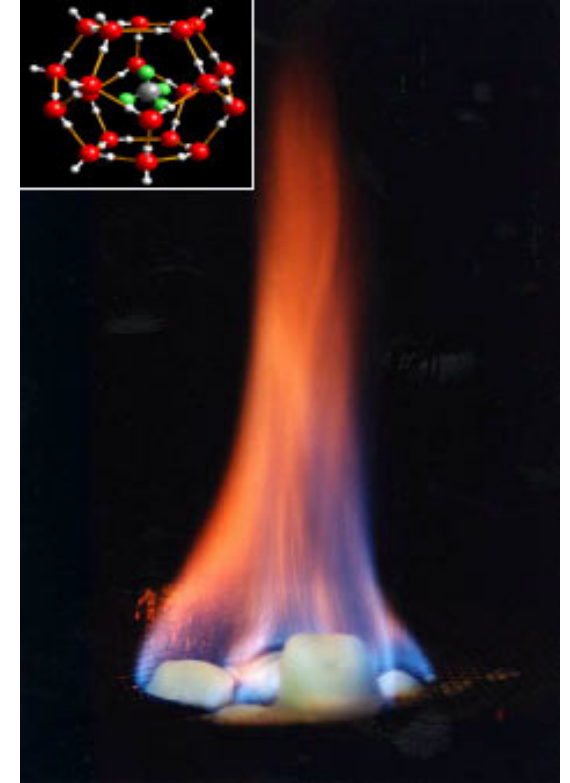


Auftauen der Permafrostböden mit Methanfreisetzung

- In Gebieten, in denen die Temperatur langfristig unter 0°C liegt, bildet sich dauerhaft gefrorener Boden (Permafrost).
- Taut der Permafrost oberflächlich auf, so wird durch Zersetzung von organischem Material CO_2 gebildet. Unter anaeroben Bedingungen, zum Beispiel unter Wasser wird Methan, CH_4 gebildet.
- Beim nächsten Gefrieren werden CO_2 und CH_4 im gefrorenen Boden gespeichert.
- Die im Permafrost gespeicherte Menge wird auf 1.600 Gt Kohlenstoff geschätzt, das ist etwa die Hälfte der in Böden gespeicherten Kohlenstoffverbindungen.
- Zum Vergleich: In der Atmosphäre sind im Moment etwa 810 Gt Kohlenstoff gespeichert, in der Hydrosphäre 38.000 Gt und in der Lithosphäre 76.000.000 Gt.

Methanfreisetzung aus Permafrostböden und Methanhydrat

- Neben den im Permafrost gespeicherten Kohlendioxid und Methan existieren weiter große Mengen an Methan als Methanhydrate in der Tiefsee (etwa 10.000 Gt).
- Methanhydrate bilden sich bei Temperaturen knapp über dem Gefrierpunkt von Wasser unter hohem Druck. Sie sind unter diesen Bedingungen metastabil.
- Freisetzung von Methan durch Auftauen des Permafrosts setzt ebenfalls eine positive Rückkopplung in Gang:



Methanfreisetzung → Temperaturerhöhung → Weiteres Abtauen von Permafrost



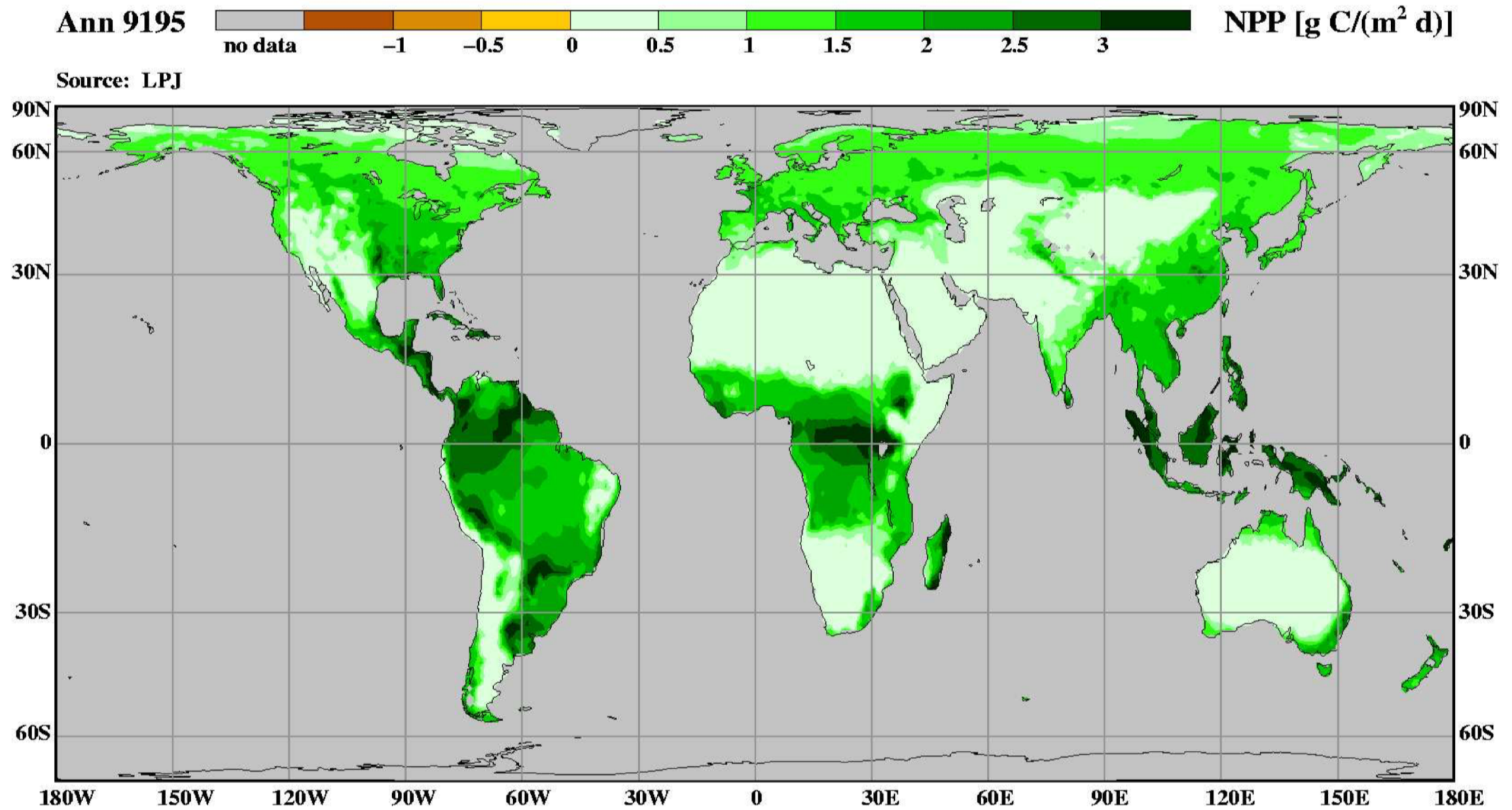
Rückgang der Nettoproduktivität der Biosphäre

- Das System „Erde“ stellt heute eine Senke für CO₂ dar.
- Etwa ¼ wird hierbei von den Ozeanen aufgenommen („gelöst“) und ein weiteres Viertel in der Biosphäre (Bäume, Blätter, Humus, etc) gespeichert.
- Steigt die Temperatur, regeln Pflanzen in Hitzewellen und Dürren ihre Photosynthese herunter, gleichzeitig sterben Pflanzen ab.
- Dadurch wird zum Einen weniger CO₂ der Atmosphäre entnommen, andererseits stellen die abgestorbenen Pflanzen eine weitere CO₂ Quelle dar.
- Die Nettoprimärproduktivität der Biosphäre beträgt etwa 60 Gt Kohlenstoff pro Jahr, die Nettobioproduktivität 2 Gt Kohlenstoff pro Jahr.

Kohlenstoffspeicher Biosphäre

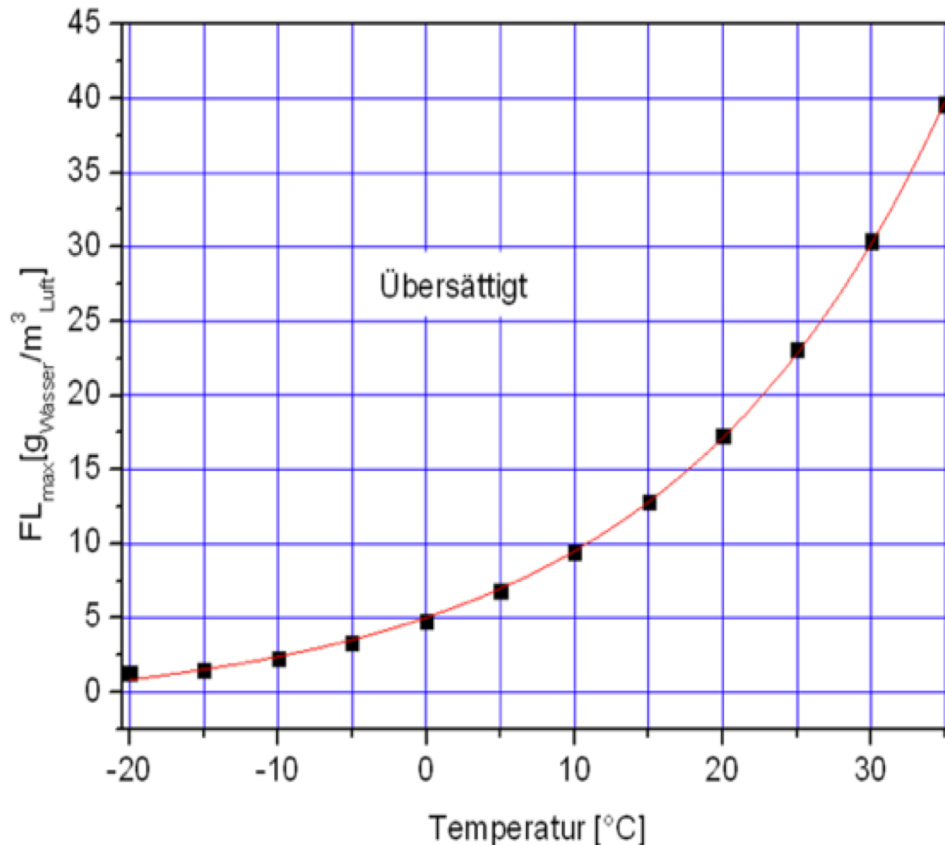
Biom	Fläche (10 ⁶ km ²)	Kohlenstoffvorrat (Gt C)		
		Vegetation	Soils	Total
Tropische Wälder	17,6	212	216	428
Temperierte Wälder	10,4	59	100	159
Boreale Wälder	13,7	88	471	559
Savannen	22,5	66	264	330
Temperierte Grasländer	12,5	9	295	304
Wüsten & Halbwüsten	45,5	8	191	199
Tundra	9,5	6	121	127
Feuchtgebiete	3,5	15	225	240
Landwirtschaft	16	3	128	131
Total	151,2	466	2011	2477

Nettoprimärproduktivität der Biosphäre



Zunahme von gasförmigem Wasser in der Atmosphäre

- 1 kg Luft kann bei 30°C und 1 atm etwa 26 g Wasser aufnehmen.
- Die aufnehmbare Wassermenge (der Sättigungsdampfdruck) steigt mit steigender Temperatur stark an.



- Bei steigender Temperatur kann die Luft also mehr Wasser (Treibhausgas) aufnehmen, was zu einer weiter steigenden Temperatur führt.
- Diese Wasserdampfdruckkopplung stellt einen der wichtigsten Rückkopplungsmechanismus dar.
- Während der letzten 35 Jahre ist die Luftfeuchtigkeit um durchschnittlich ca. zehn Prozent gestiegen

Rückgang der Nettoproduktivität der Biosphäre

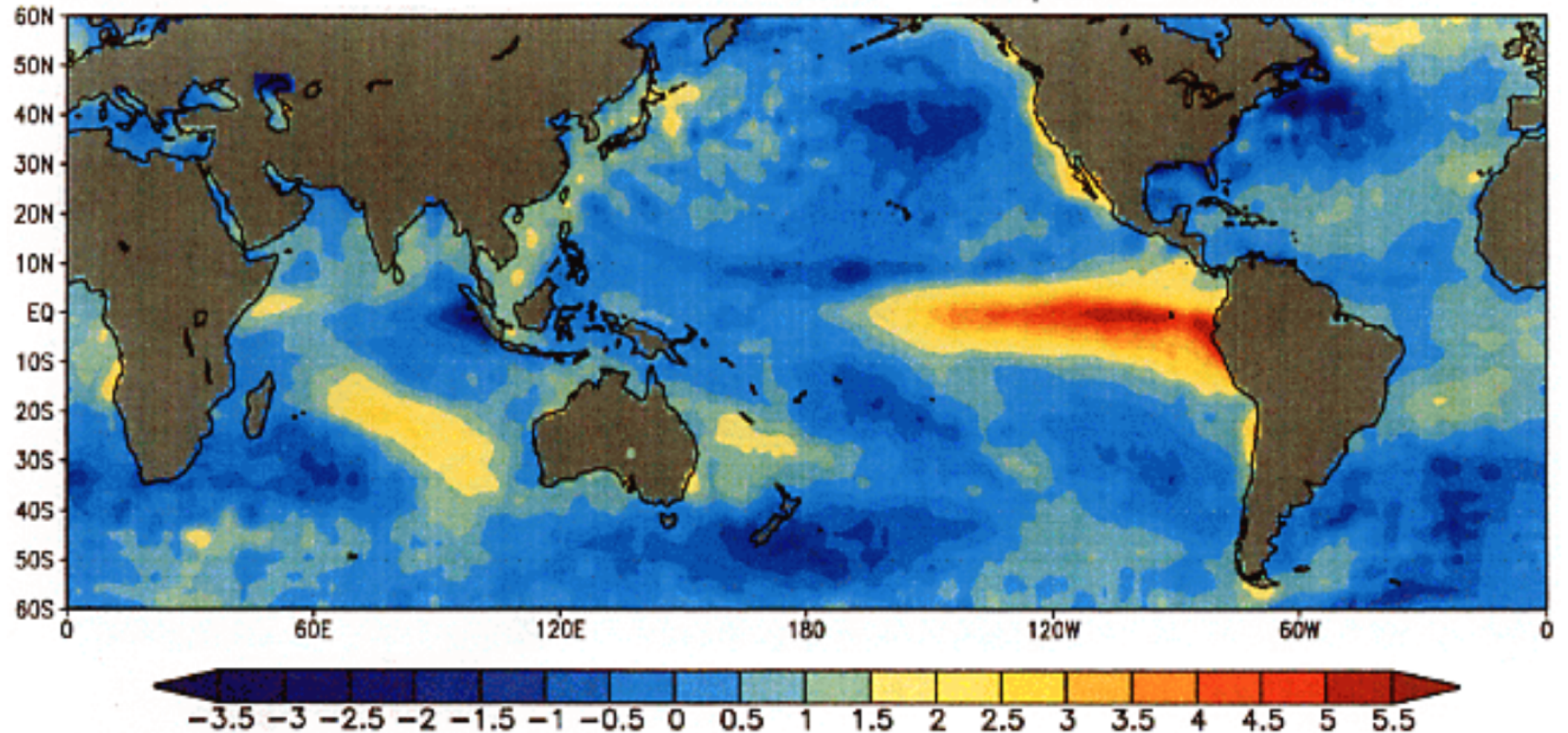
- Das System „Erde“ stellt heute eine Senke für CO₂ dar.
- Etwa ¼ wird hierbei von den Ozeanen aufgenommen („gelöst“) und ein weiteres Viertel in der Biosphäre (Bäume, Blätter, Humus, etc) gespeichert.
- Steigt die Temperatur, regeln Pflanzen in Hitzewellen und Dürren ihre Photosynthese herunter, gleichzeitig sterben Pflanzen ab.
- Dadurch wird zum Einen weniger CO₂ der Atmosphäre entnommen, andererseits stellen die abgestorbenen Pflanzen eine weitere CO₂ Quelle dar.
- Die Nettoprimärproduktivität der Biosphäre beträgt etwa 60 Gt Kohlenstoff pro Jahr, die Nettobioproduktivität 2 Gt Kohlenstoff pro Jahr.

Veränderung der *El Niño-Southern Oscillation*

- ***El Niño*** bezeichnet ein nichtperiodisches Phänomen sich ändernder Strömungen im Bereich des äquatorialen Pazifiks. Im Schnitt tritt es etwa alle vier Jahre auf.
- Südöstliche Passatwinde treiben in normalen Jahren warmes Oberflächenwasser von der Westküste Südamerikas in Richtung Südostasien. Dadurch kann vor der Küste Perus kaltes Tiefenwasser aufsteigen und sich mit dem warmen (24°C) Oberflächenwasser vermischen.
- In *El Niño* Jahren ist die Passatströmung abgeschwächt, so dass der kalte und nährstoffreiche Humboldtstrom zum Erliegen kommt. Das Oberflächenwasser erwärmt sich in der Folge so stark, dass das Plankton abstirbt und die Nahrungskette zusammenbricht.
- Durch die sich ändernden Temperaturverhältnisse vor den Küsten kommt es zu einer Umkehr der normalen Luftströmungen und Wasser wird von den Küsten Asiens nach Südamerika getrieben

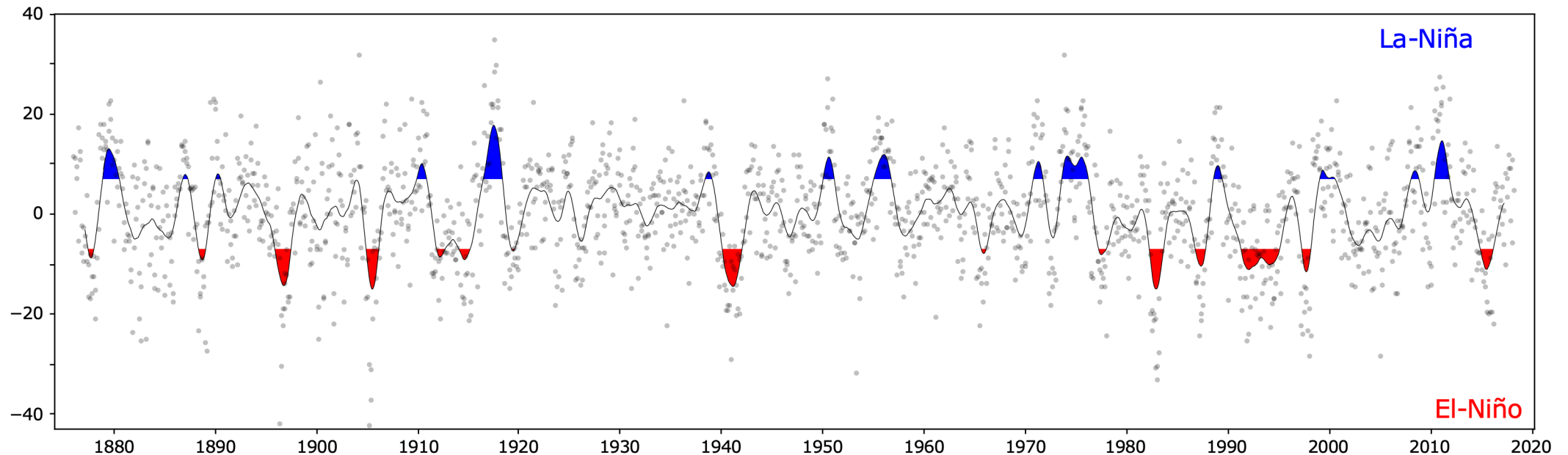
El Niño 1997

Anomalien der Meeresoberflächentemperatur Dez. 1997



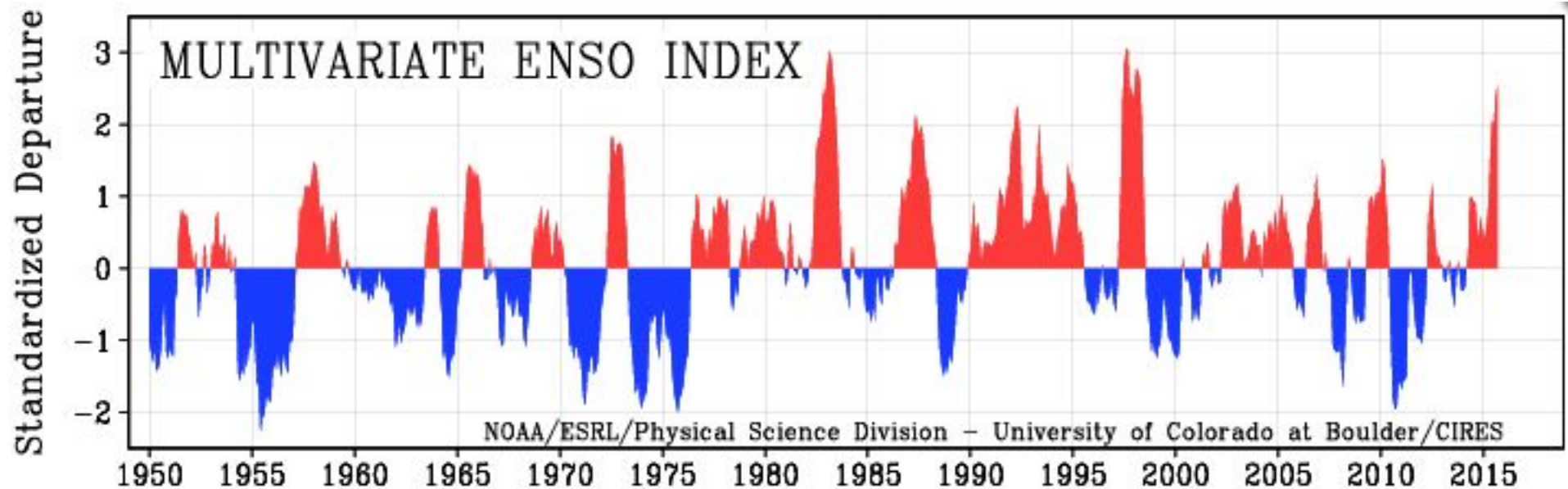
Southern Oscillation

- Die *Southern Oscillation* bezeichnet ein System von Luftdruckänderungen über den Pazifik.
- Der *Southern Oscillation Index* (SOI) ist die normalisierte Luftdruckdifferenz zwischen Tahiti im zentralen Pazifik und Darwin in Nordaustralien.
- Während *El Niño* eher das System von Meeresströmungen abbildet, beschreibt die *Southern Oscillation* die atmosphärischen Prozesse



Veränderung der *El Niño-Southern Oscillation*

- Die gemeinsamen Effekte von *El Niño* und *Southern Oscillation* werden im ENSO Index abgebildet.

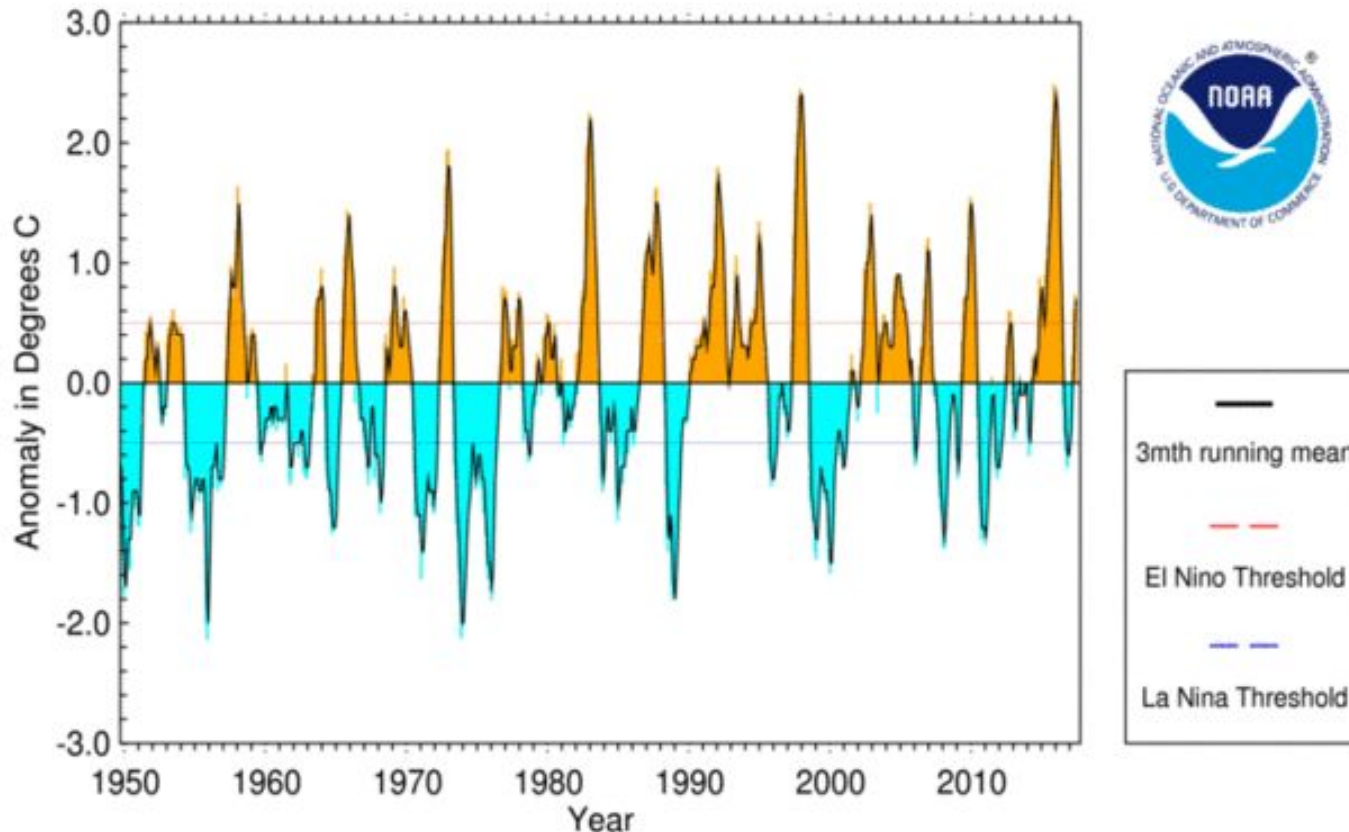


- El Niño Jahre sind hier rot, La Niña Jahre blau gekennzeichnet.

Veränderung der *El Niño-Southern Oscillation*

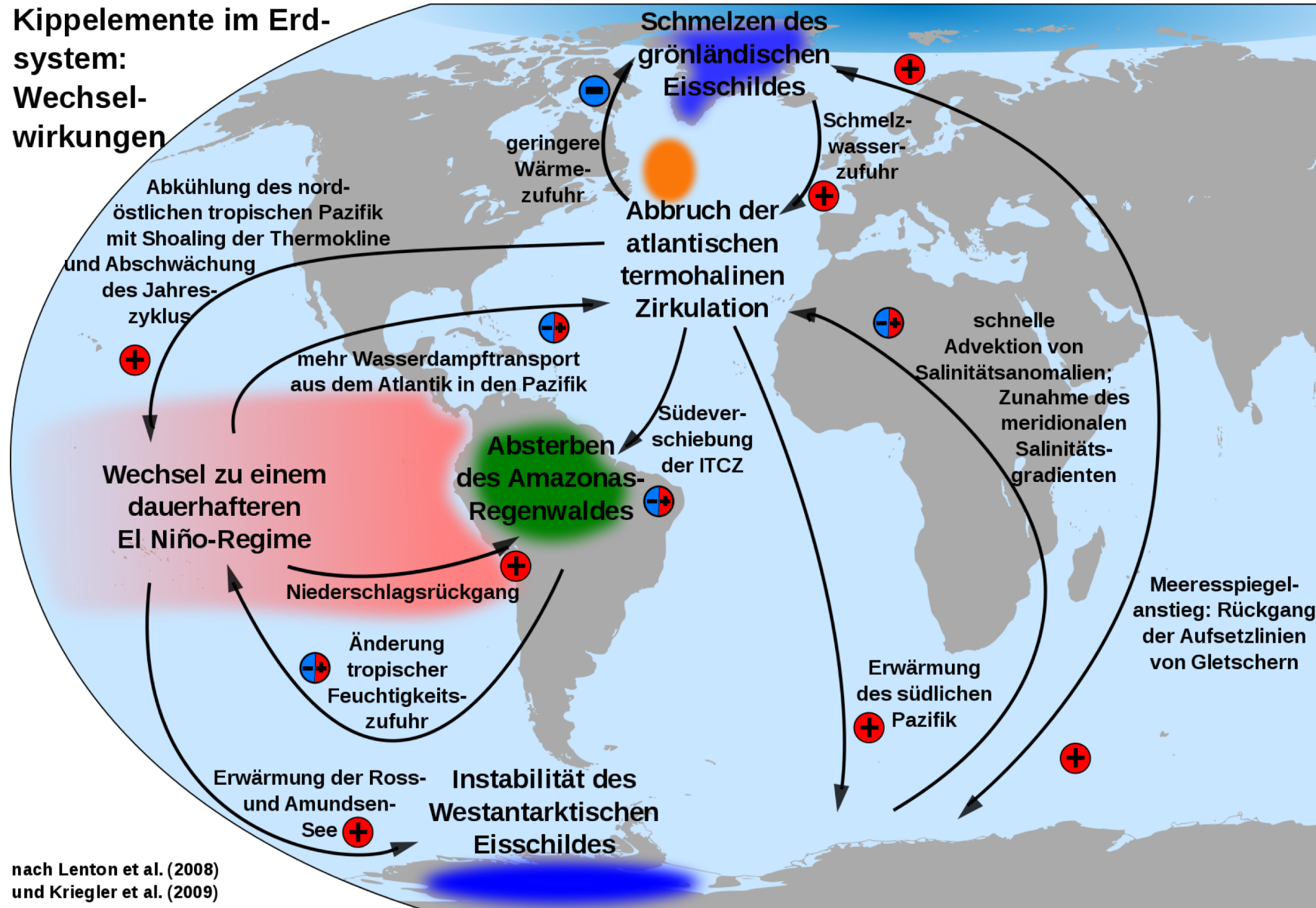
- Es wird diskutiert, wie groß die Verstärkung der ENSO durch die Erwärmung durch den Klimawandel ist.

SST Anomaly in Nino 3.4 Region (5N-5S,120-170W)



- Es scheint ein Trend zu höheren Amplituden des ENSO zu bestehen, aber hier werden noch mehr Daten nötig sein.
- El Niño hat katastrophale Auswirkungen auf die Population von Meerestieren vor der Westküste Südamerikas und auf die Niederschlagsverhältnisse dort.

Zusammenhänge der Kippelemente



Timothy M. Lenton et al. PNAS
105 1786-1793 (2008)

Elmar Kriegler et al.
PNAS 106 5041-5046 (2009)

Bildquelle:
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Climate-tipping-points-interactions-de.svg>

Veränderung der Niederschlagsverteilung

- Die Erwärmung durch den Klimawandel führt auch zu einer Veränderung der lokalen und der zeitlichen Niederschlagsverteilung.
- In Deutschland werden die Winter niederschlagsreicher, die Sommer niederschlagsärmer.
- Sinkende Grundwasserspiegel werden kleinere Oberflächengewässer austrocknen und die Artenvielfalt in kleinen Flüssen, Seen und Mooren stark abnehmen lassen.
- Wasserreservoirs werden im Sommer leerlaufen und die Schifffahrt auf Flüssen eingeschränkt.
- Durch geringere Pegelstände erwärmt sich das Wasser in Flüssen stärker, so dass die Kühlleistung wassergekühlter Kraftwerke abnimmt, die dann heruntergeregelt werden müssen.

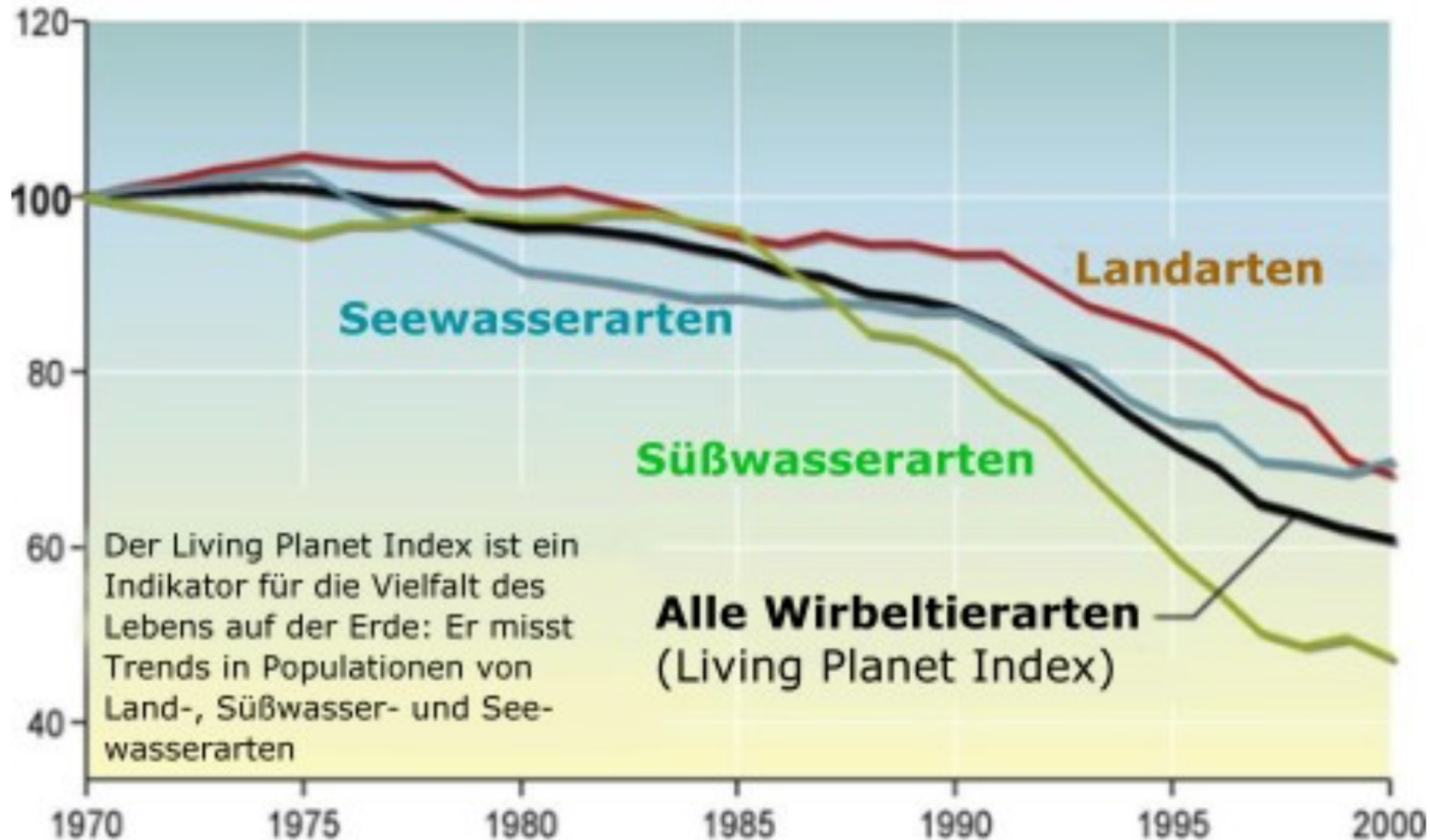
Anstieg des Meeresspiegels

- Während der Warmzeit von 35 Millionen Jahren waren beide Pole eisfrei. Der Meeresspiegel lag damals 70 m höher als heute.
- Die letzte Warmzeit, in der auch die polaren Temperaturen höher waren als heute, vor 125.000 Jahren sah einer Meeresspiegelanstieg von 4 bis 6 m.
 - Vor 9.000 Jahren sah die Nordsee so aus:



Aussterben von Tierarten

- Wir leben gegenwärtig in der 6. Phase eines Massenausterbens.



Fazit

- Die Auswirkungen des Klimawandel auf unsere Lebensbedingungen sind vielfältig.
- In erster Linie werden wir mit Effekten zu tun haben, die durch die höheren globalen Durchschnittstemperaturen verursacht werden.
- In deren Folge ändern sich die Niederschlagsverhältnisse und der Meeresspiegel.
- Tropische Krankheiten werden sich nach Norden ausbreiten.
- Die Folgen für den Anbau von Nahrungsmitteln sind noch nicht abzusehen.
- Es muss mit einer großen Zunahme der Klimamigration gerechnet werden.

Klimawandel und Ich

- Verringerung der CO₂ Emissionen.

Drängt auf die Durchsetzung eines Tempolimits.

- Verringerung der CH₄ Emissionen.

Weitgehender Verzicht auf tierische Produkte. Setzt Euch für eine CO₂e Bepreisung aller Emissionen ein.

- Zusätzlich zur Änderung eigener Verhaltensweisen seid Multiplikatoren dieser Entwicklung.