

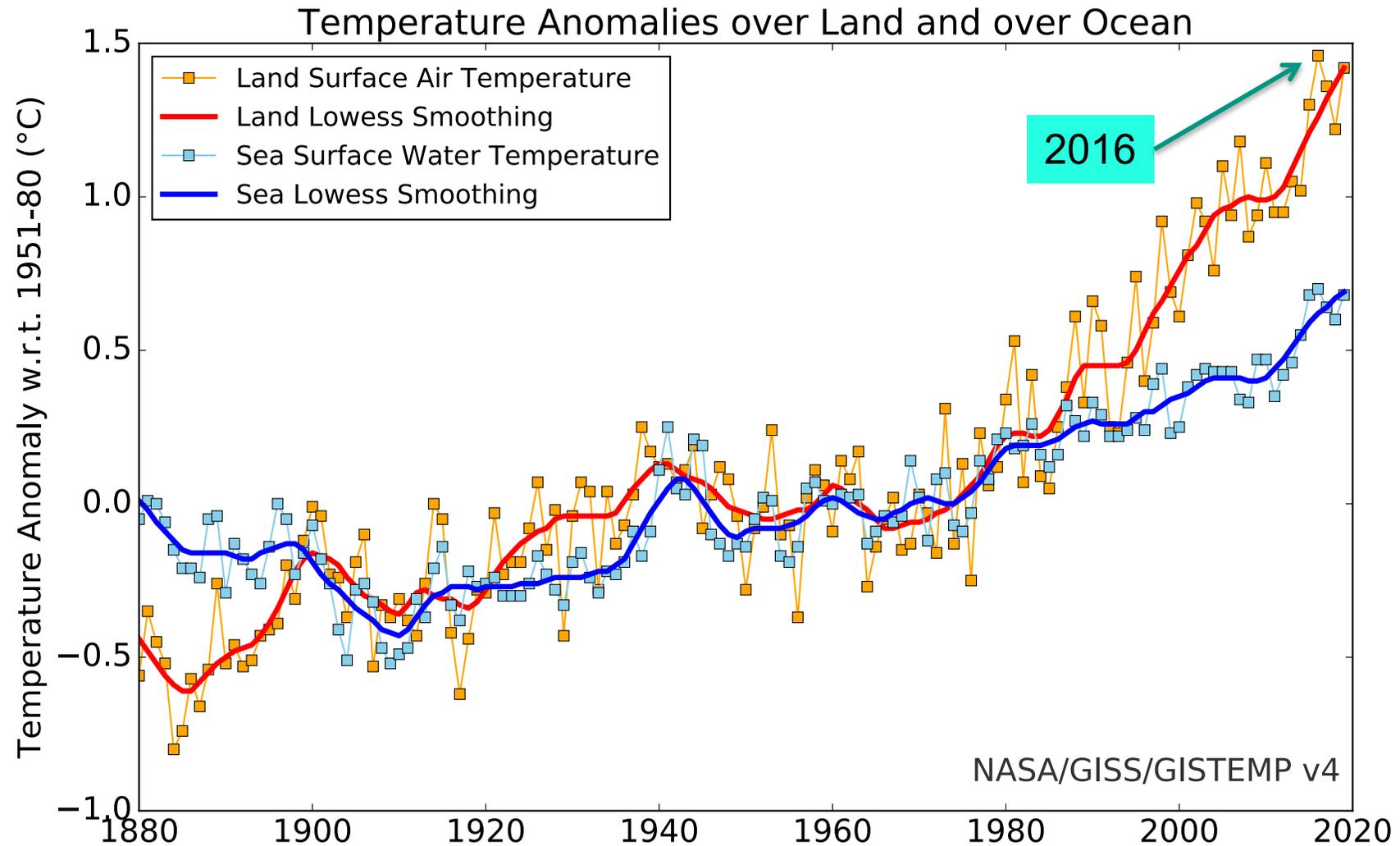
Wie verändern sich Winterstürme in Mitteleuropa und tropische Zyklonen in einer wärmer werdenden Welt?

Andreas H. Fink

INSTITUTE OF METEOROLOGY AND CLIMATE RESEARCH, TROPOSPHERE RESEARCH



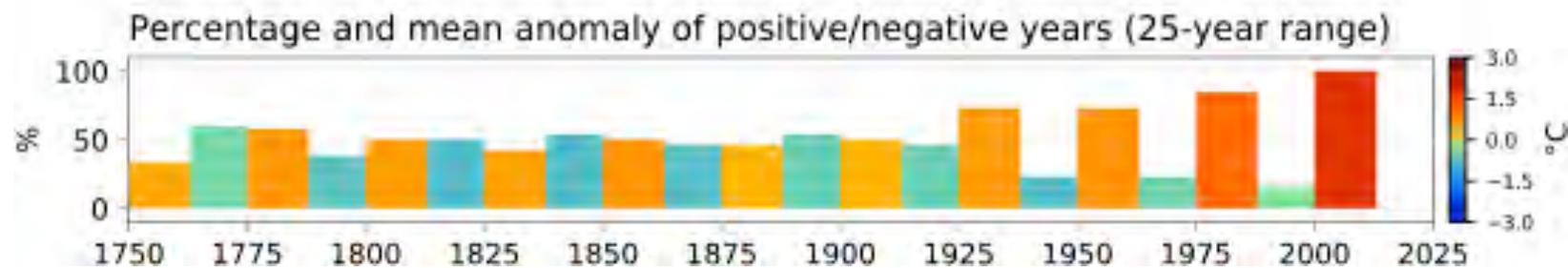
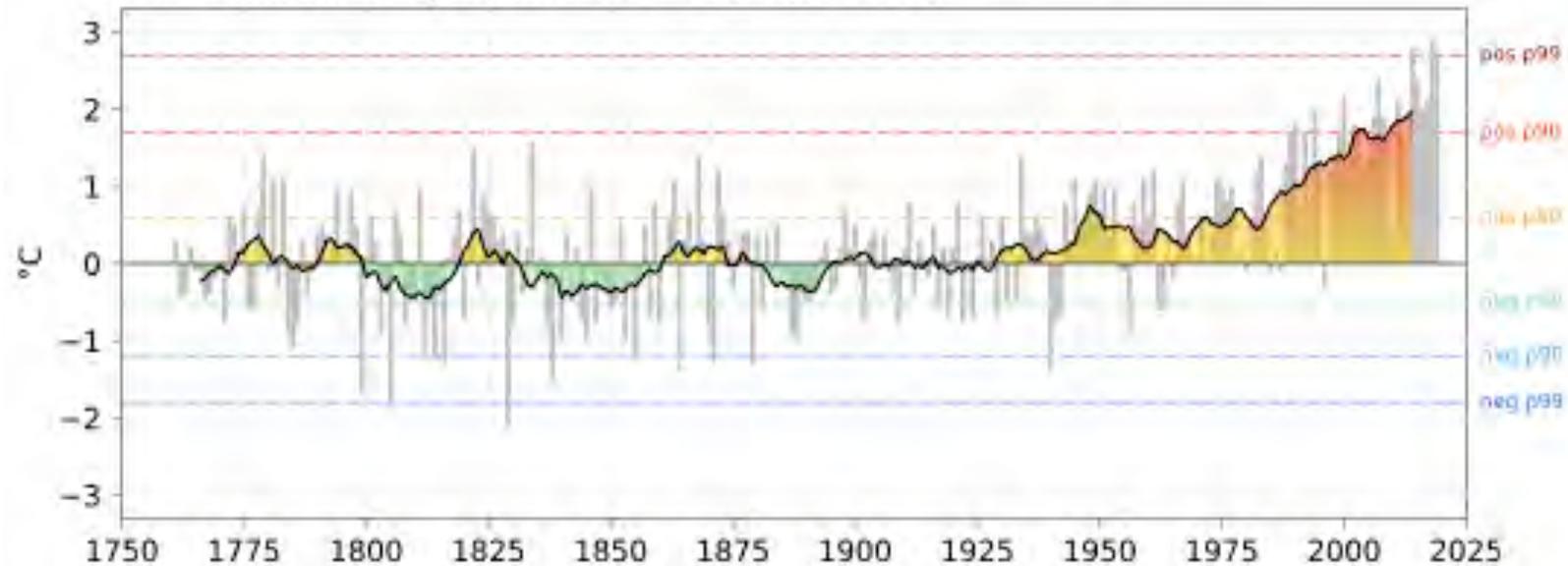
Die globale Mitteltemperatur am Boden steigt seit 1980 drastisch an



Quelle: <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/>

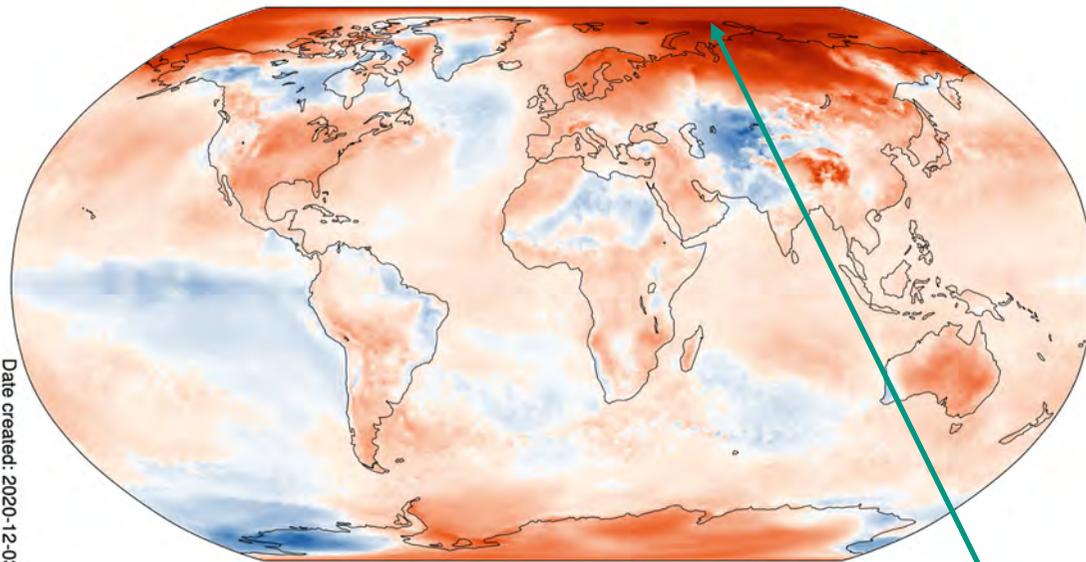
Baur-Zeitreihe für Mitteleuropa

Annual temperature anomalies for Central Europe (1761-2019)
Mean annual temperature: 8.9 °C (1761-1970)

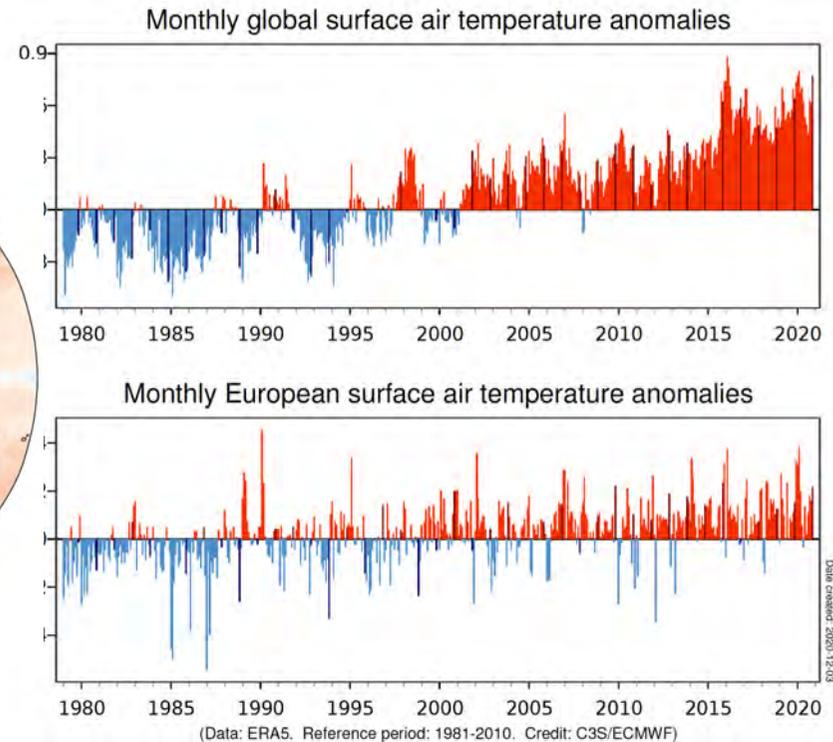


<https://www.imk-tro.kit.edu/10295.php>

November 2020: Wärmste seit Messbeginn



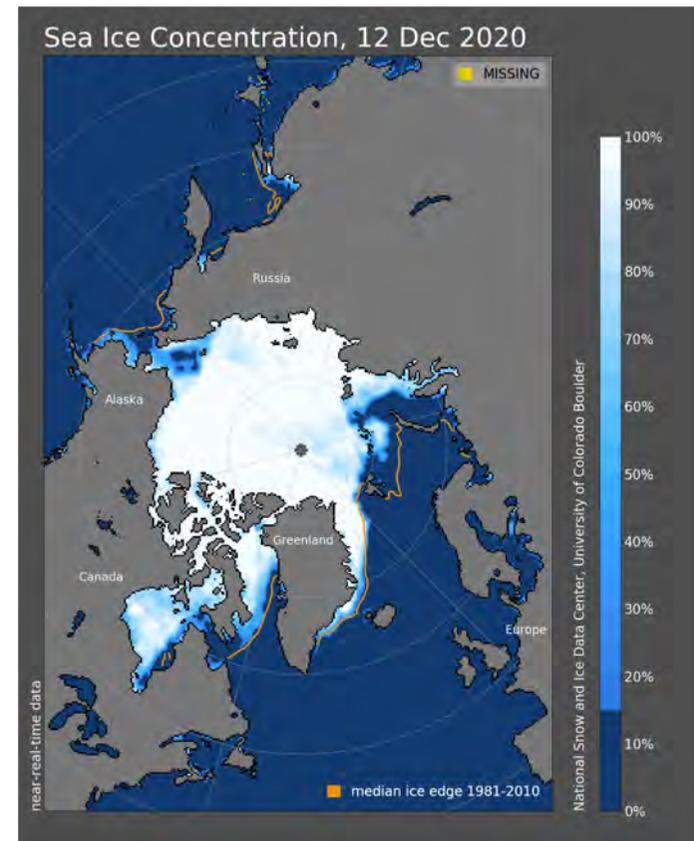
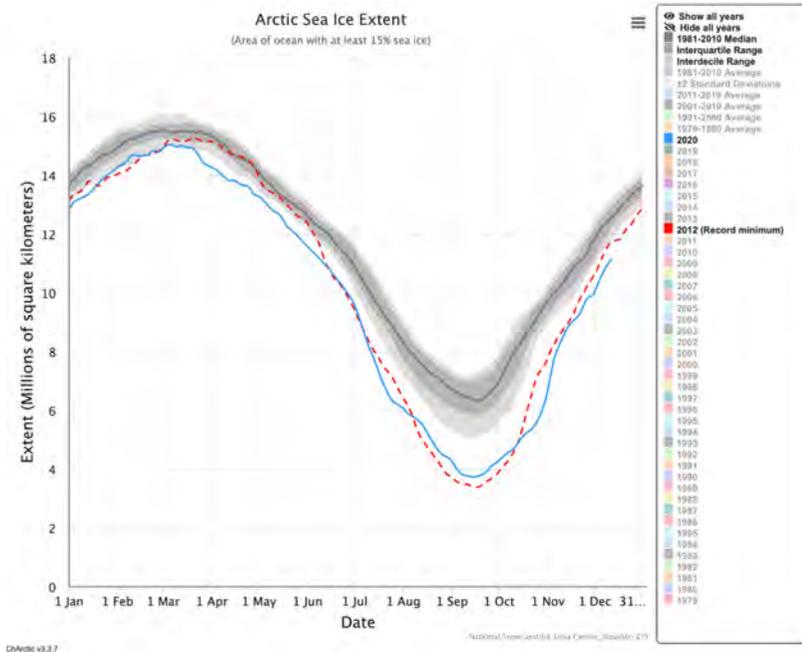
Quelle: <https://climate.copernicus.eu/>



Wiese-Insel (nördliche Karasee, Novemberanomalie +16°C)

(Quelle: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatenweltweit/klimadatenweltweit.html>)

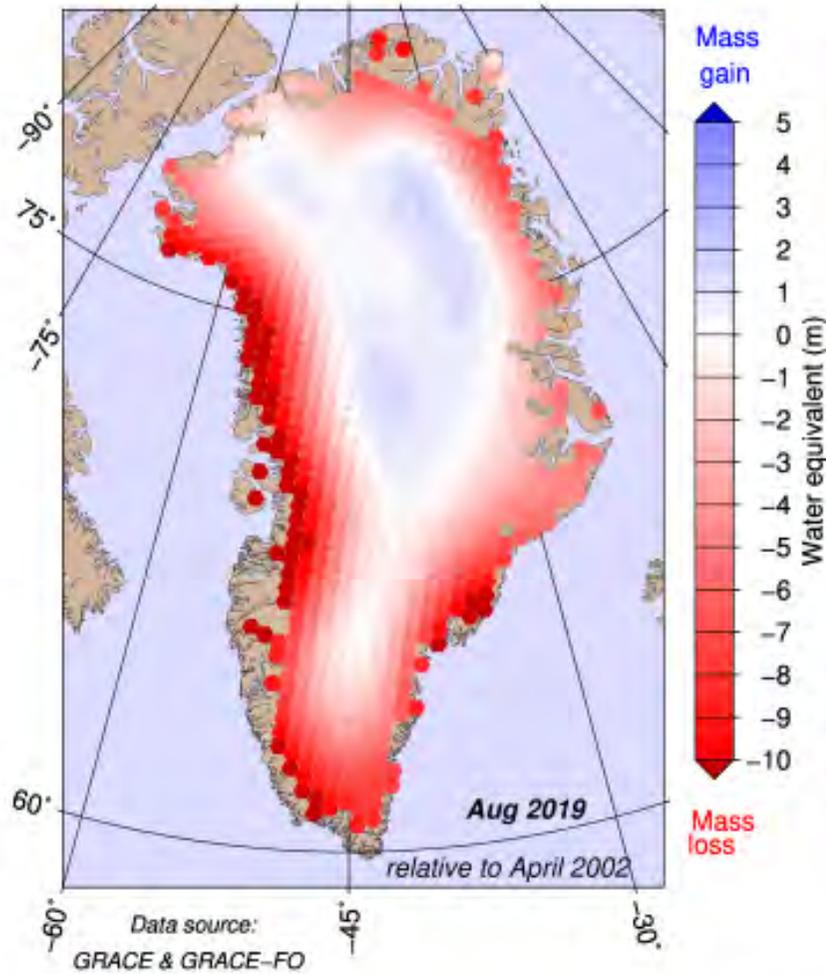
Konsequenzen: (I) so wenig Meereis wir nie



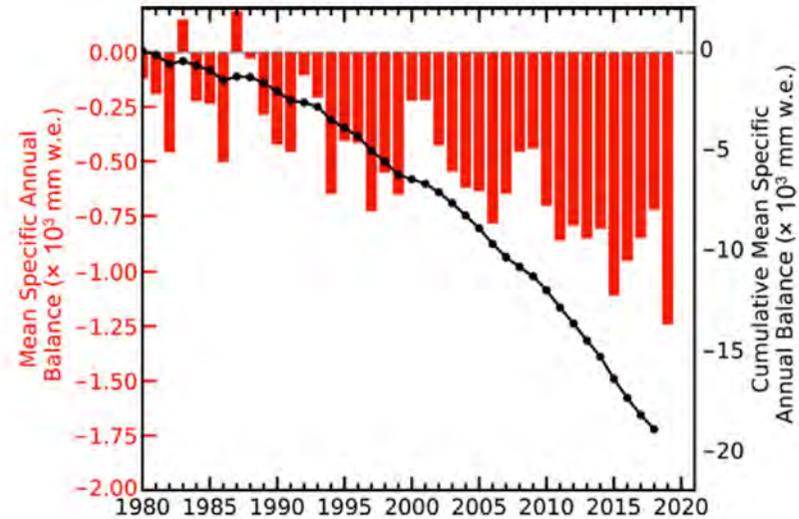
<http://nsidc.org/arcticseaicenews/charctic-interactive-sea-ice-graph/>

Das Arktische Meer wird im Sommer schon zu fast 2/3 eisfrei!
-> durch Eis-Albedo-Rückwirkung extreme Erwärmung, Meer friert später zu
-> dadurch Auftauen des Permafrost auf arktischen Inseln und Kontinenten
-> starke Gletscherschmelze in der Arktis

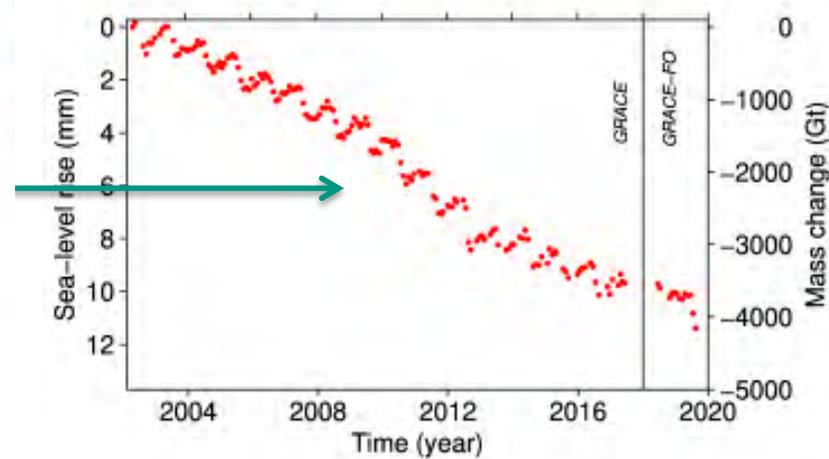
Konsequenzen: (II) Eisschilde und Gletscher schmelzen weltweit deutlich beschleunigt



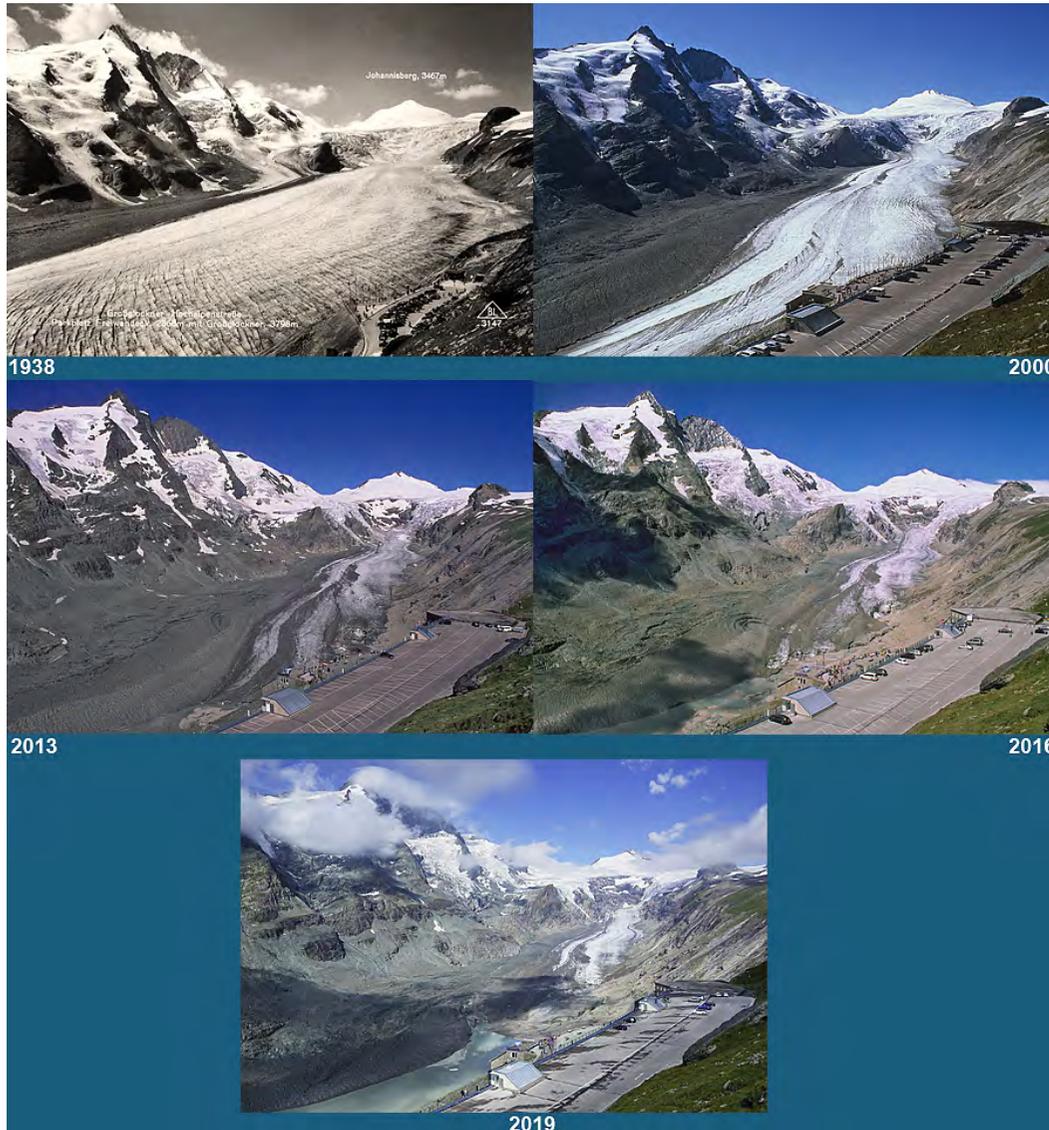
Quelle: <http://polarportal.dk>



Quelle: Blunden und Arndt (2020)



Konsequenzen: (III) Auch die Alpengletscher schmelzen beschleunigt



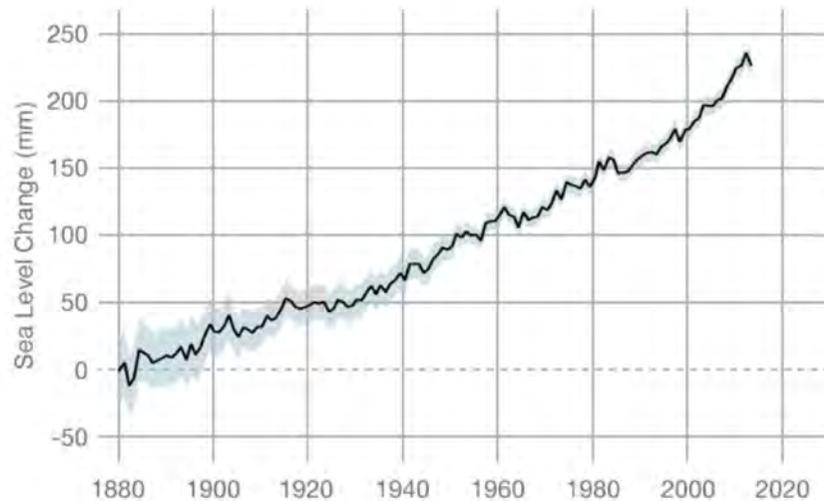
Pasterze, Österreich

Quelle: <http://gletscherarchiv.de>

- Seit 1980er hat sich auch der Schwund der Alpengletscher erheblich beschleunigt
- Erhöhung der Temperatur in den Alpen höher als Globalmittel

Siehe auch: Galvin, J., and A. Fink, 2019: Retreating Alpine glacier. *Weather*, doi:10.1002/wea.3616.

Konsequenzen: (III) Meeresspiegel steigt schneller

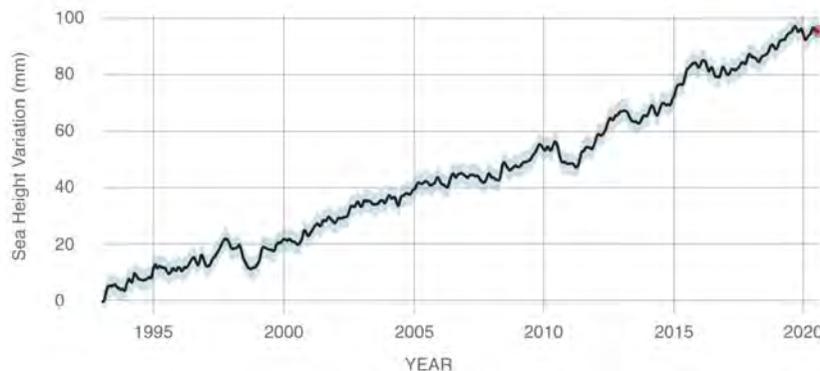


SATELLITE DATA: 1993-PRESENT

Data source: Satellite sea level observations.
Credit: NASA Goddard Space Flight Center

RATE OF CHANGE

↑ 3.3
millimeters per year

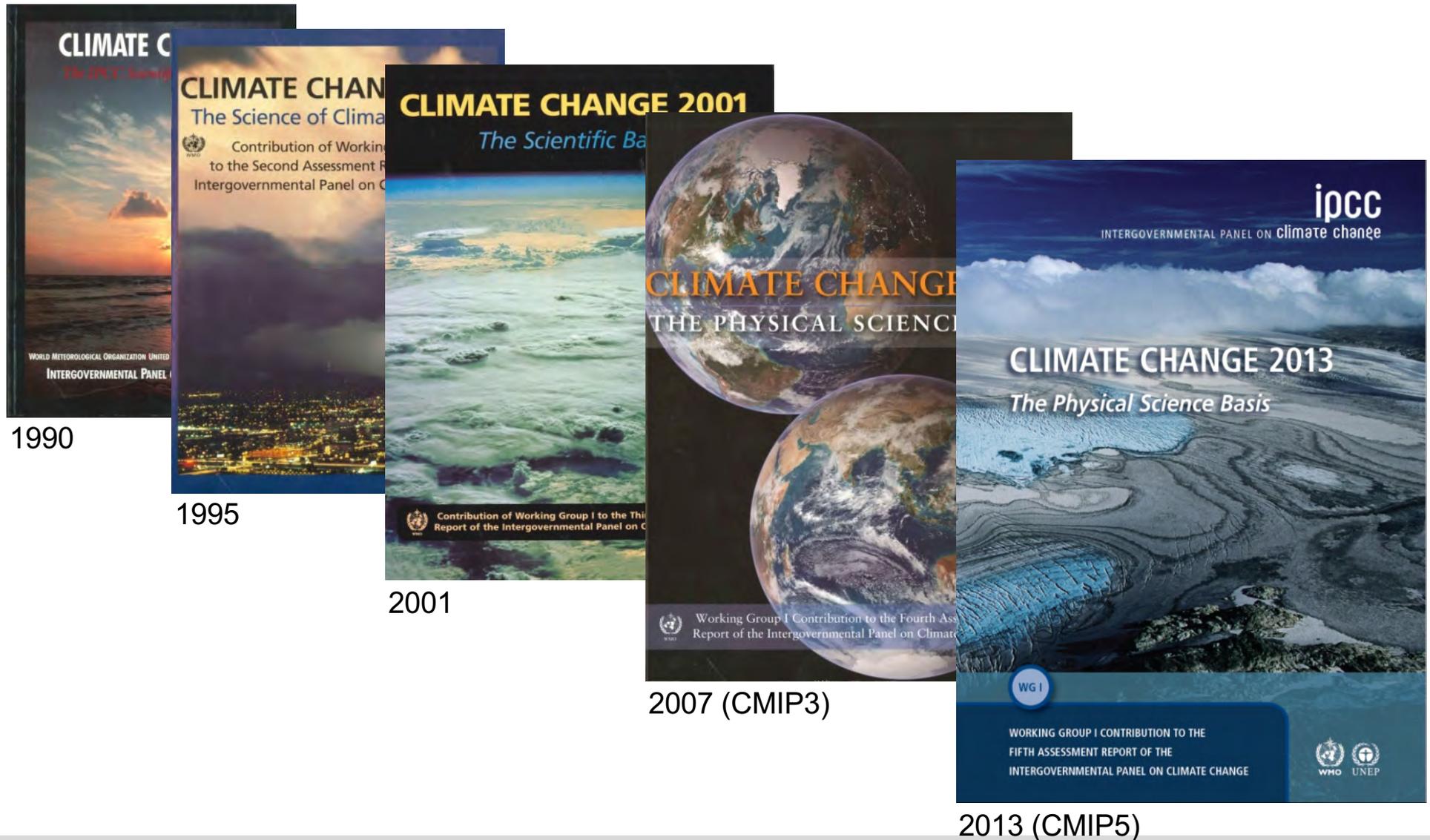


- Anstieg seit 1880-2013 ca. 23 cm
 - Derzeit 3.3 mm/Jahr
 - Anstieg durch Erwärmung der Ozeane und Eisschmelze
- > zunehmende Küstenerosion und Salzwasserintrusion in Flussdeltas

Quelle: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level/>

Ist der Mensch für die beschleunigte Klimaerwärmung verantwortlich?

Seit 1990 wird der Stand der Wissenschaft umfassend in Klimastatusberichten für die Politik dargestellt



19 Schlagzeilen auf < 2 Seiten

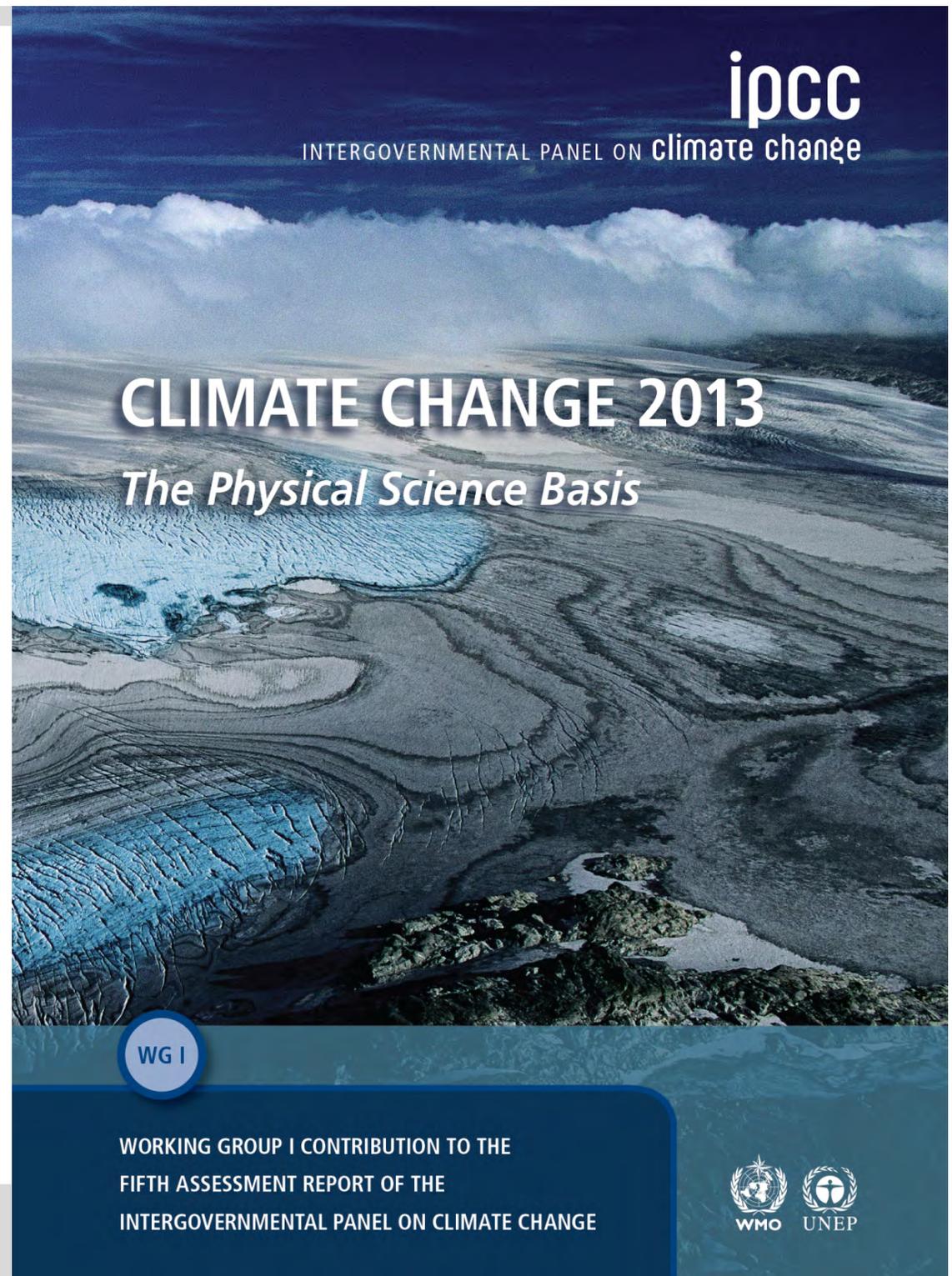
Zusammenfassung für Politik:
ca. 14,000 Worte

Bericht: 14 Kapitel
> 1000 Seiten

259 Autoren

54677 Kommentare
von 1089 Experten

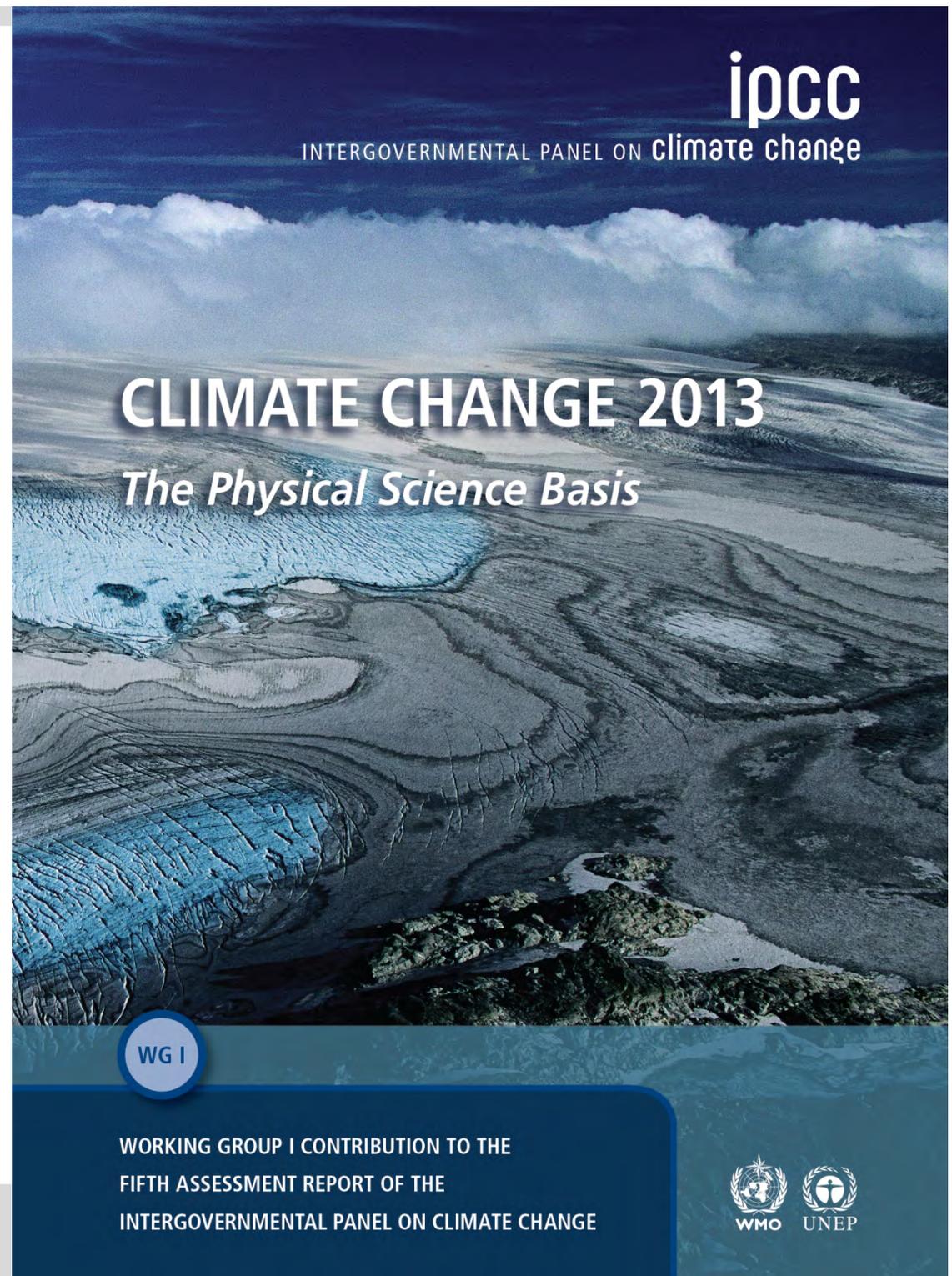
9200 Fachpublikationen



Der IPCC –Bericht ist:

- ehrenamtlich und transparent von den Autoren erstellt
- umfassend
- verbindlich
- eher konservativ (*)

(*) Der Bericht muss von den UN Staaten (Politikern !!!) genehmigt werden, darunter auch Ölförderländer



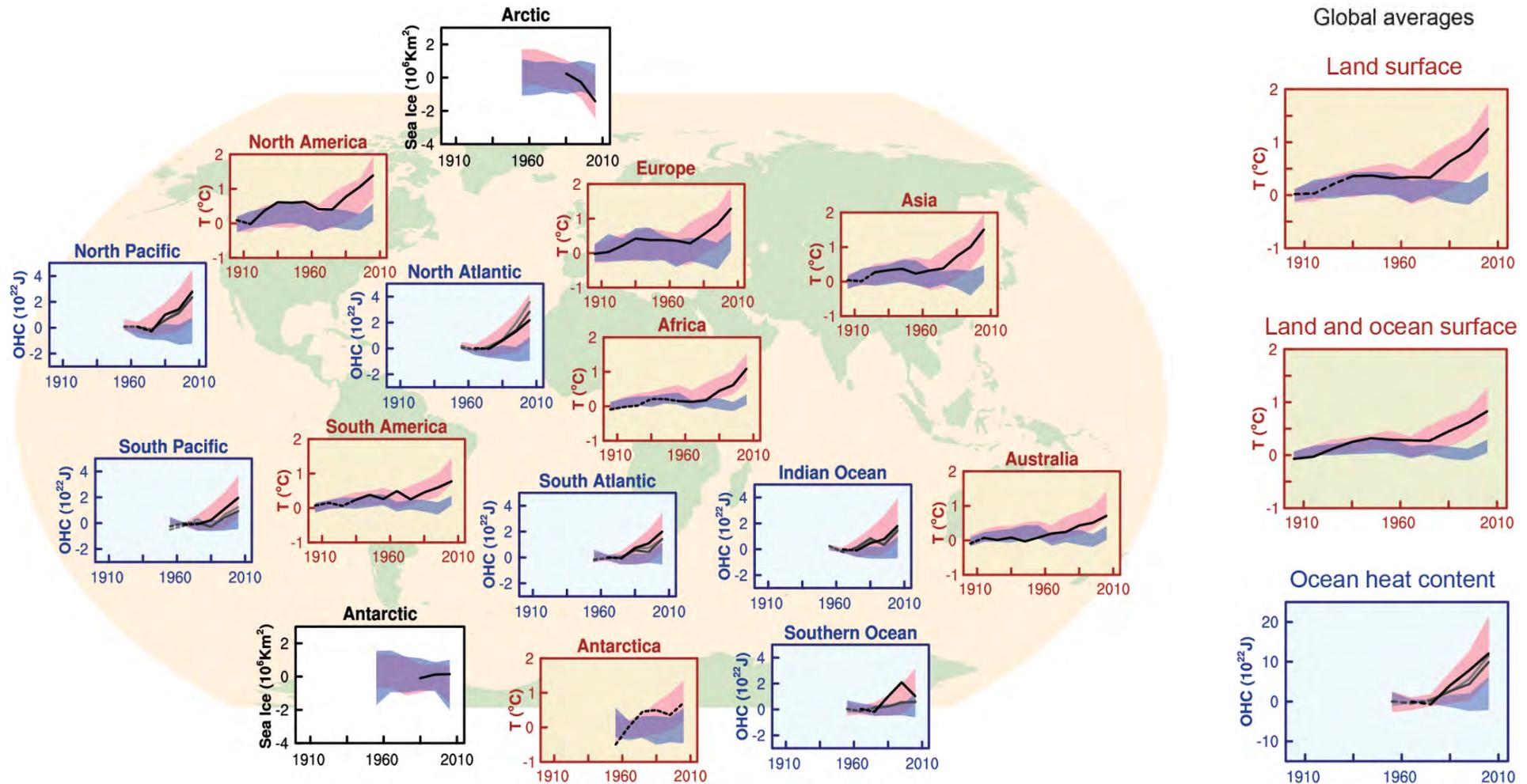
IPCC-Bericht 2013:

“Der Einfluss der Menschen auf das Klima ist klar”

“Es ist extrem wahrscheinlich (> 95%) dass der menschliche Einfluss der dominante Grund der Erwärmung seit 1950 ist”

Und: USA und Europa haben in den letzten 100 Jahren mehr als 50% der Treibhausgase in die Atmosphäre eingetragen.

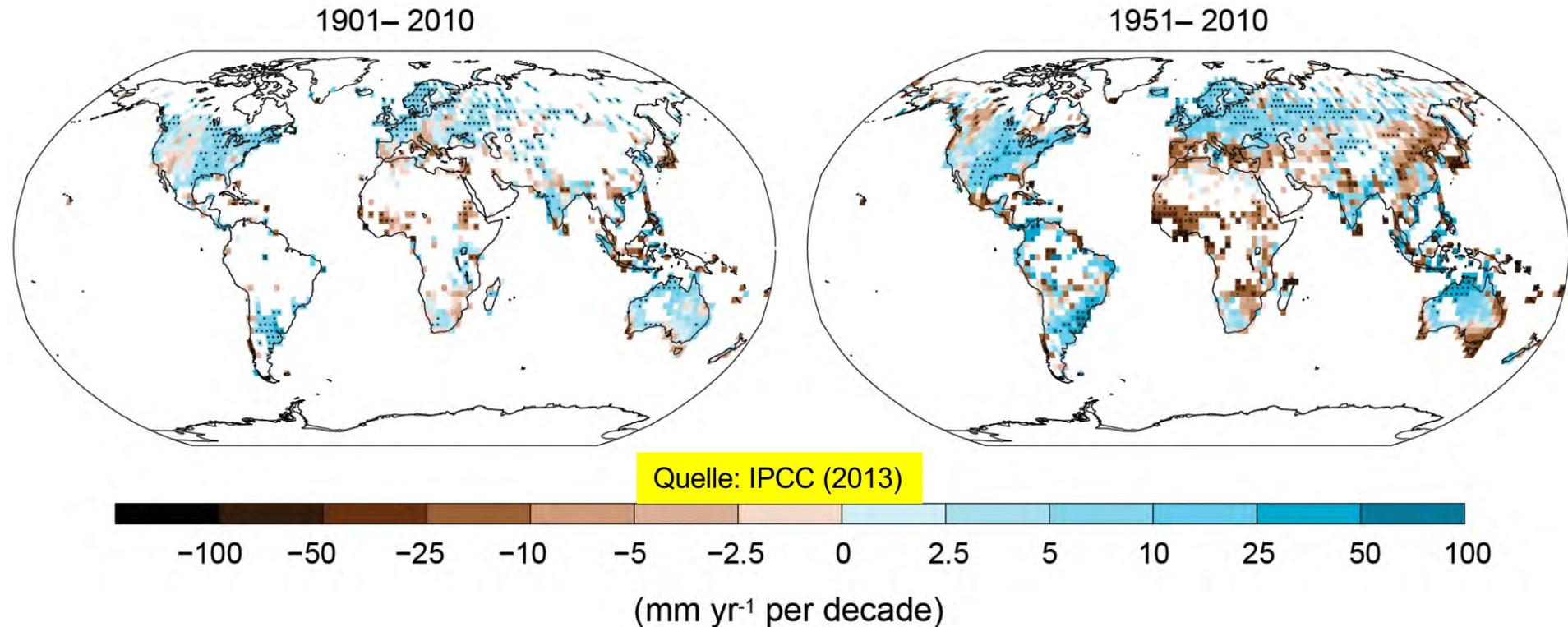
Ohne Treibhausgase kann in Klimamodellen der Temperaturanstieg der letzten 50a nicht nachsimuliert werden



Quelle: IPCC (2013)

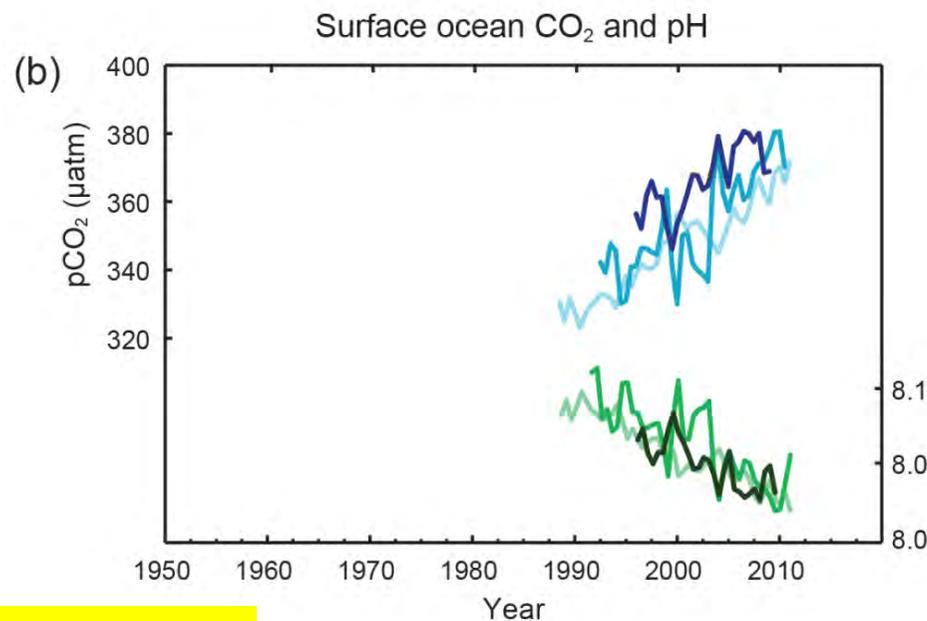
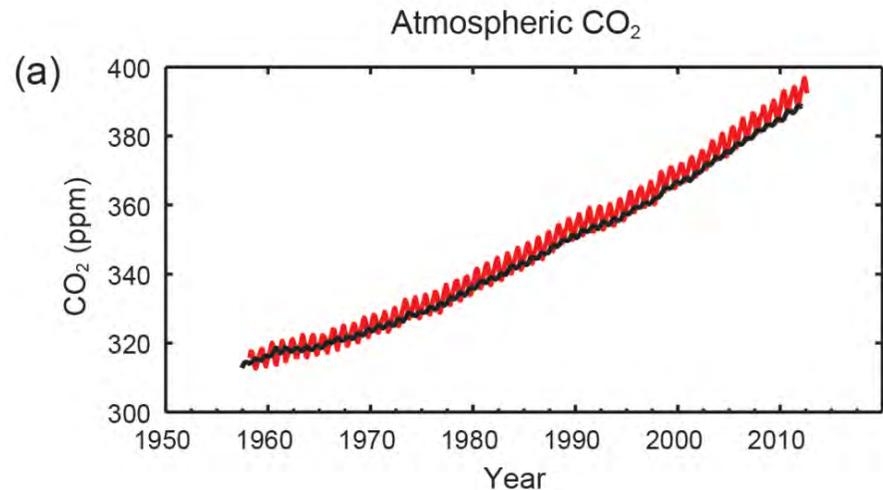
 Observations
  Models using only natural forcings
  Models using both natural and anthropogenic forcings

Beobachtete Niederschlagstrends lassen sich nicht so einfach auf den Klimawandel zurückführen!!!!



Zunehmende Trockenheit der Mittelmeerregion einschließlich Nordafrika ->
Verbindung mit dem vom Menschen verursachten Klimawandel sehr wahrscheinlich
Trockenheit der Sahelzone -> Bezug zum Klimawandel nicht zweifelsfrei nachweisbar

Der CO₂ Gehalt ist der höchste seit > 800000a (!!!) und die Weltmeere versauern



Mensch hat seit 1850 den CO₂ Gehalt um mehr als 1/3 erhöht

Dadurch der höchste Wert seit 800000 Jahren

Dadurch versauert der Ozean (höherer pH Wert)

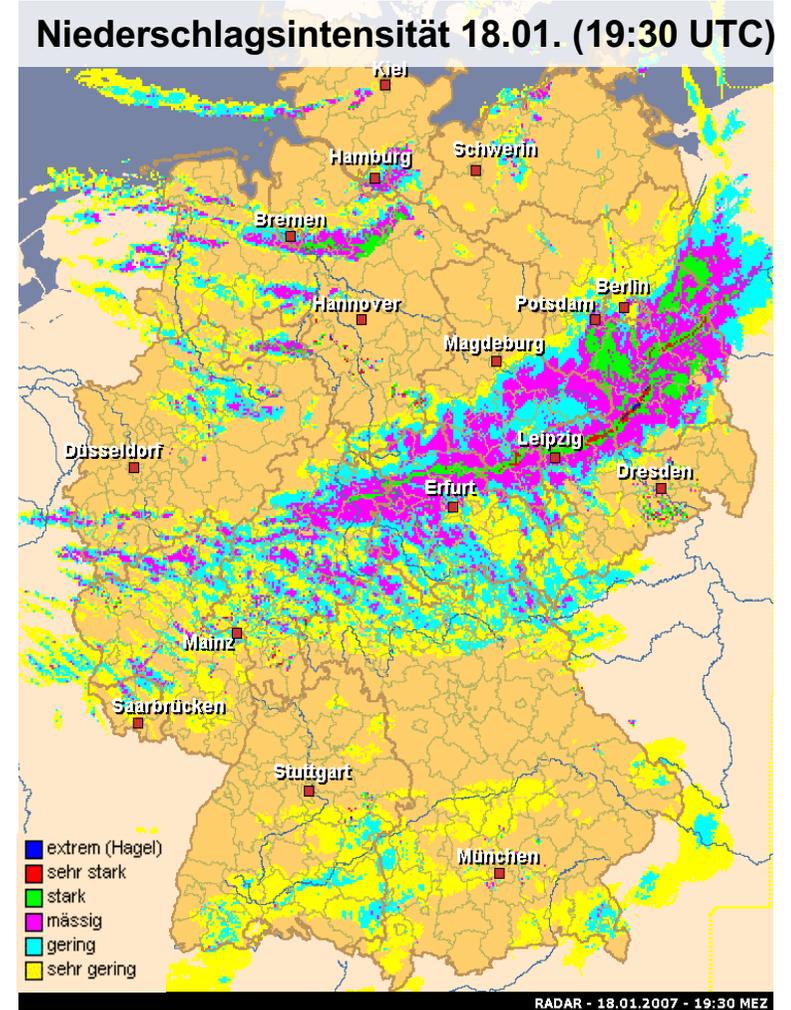
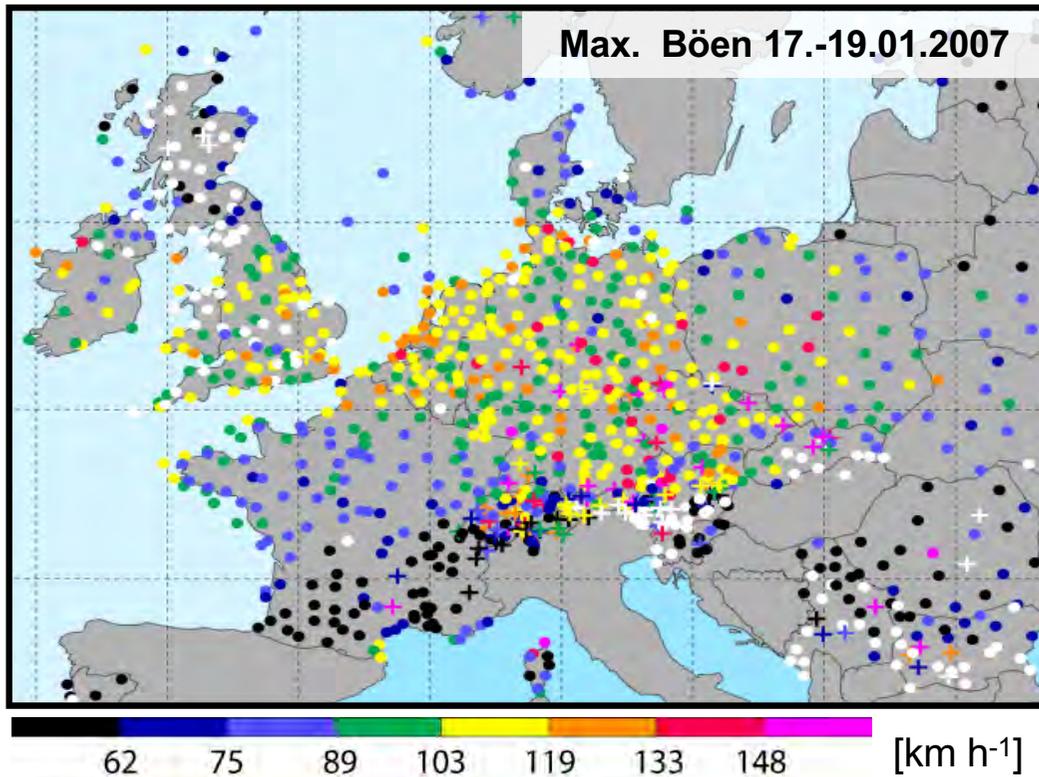
Dadurch und hohe Wassertemperaturen sterben Korallenriffe

Letztere sind in **den Tropen** wichtig für den Küstenschutz, besonders bei ansteigendem Meeresspiegel

Quelle: IPCC (2013)

Werden Winterstürme in Europa heftiger?

Extreme Winterstürme am Beispiel Kyrill



Fink et al. (2009, NHESS)

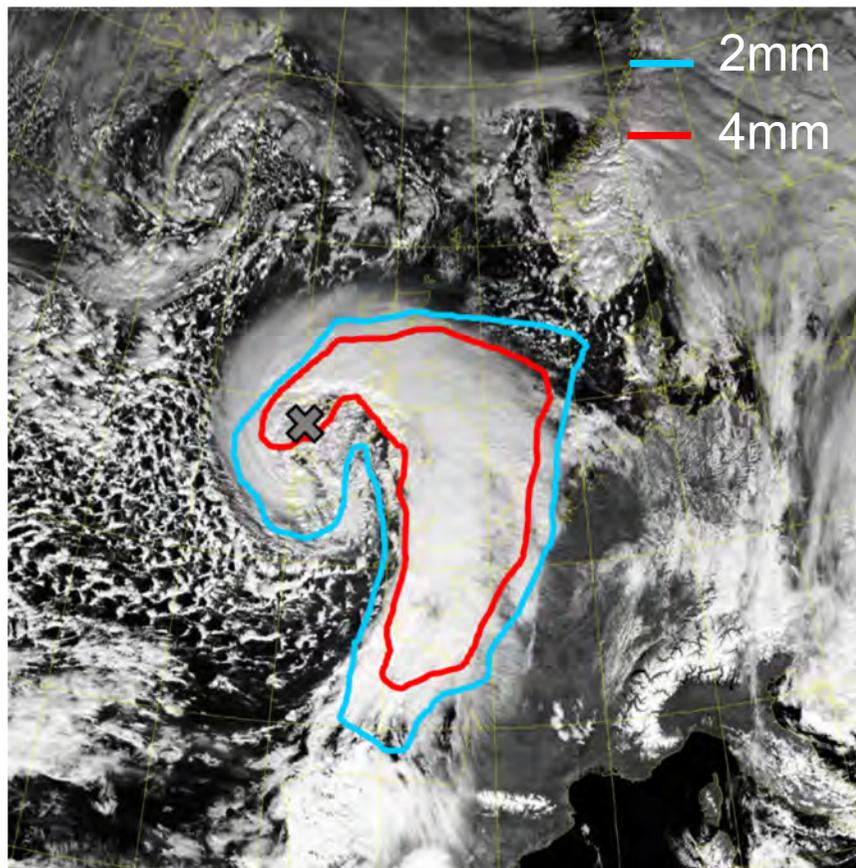
Sturm Kyrill:

- 47 Todesopfer in Europa
- Deutsche Bahn stellte bundesweit den Verkehr ein
- 2,8 Mrd. € versicherte Schäden

Winter 2013/14 – Überschwemmungen U.K.

Dieser Winter war der stürmischste seit Aufzeichnung für Großbritannien (Matthew et al., 2014, Nat.Clim.Ch.)

Wiederholtes Auftreten von Stürmen über den Britischen Inseln (37 im DJF), verbunden mit zeitweiligem stationären Phasen.



Sichtbares Bild des Sturms Tini am 12.02.2014, 12 UTC, mit ERA-I-Niederschlagsschätzungen (mm)



Priestley et al (2017)

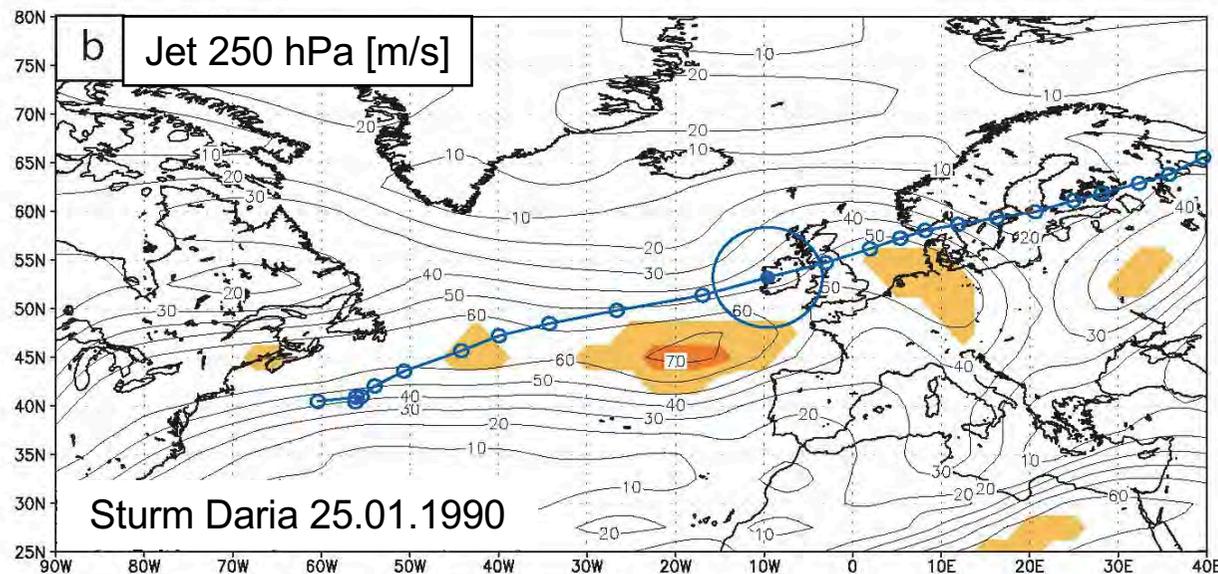
Europäische Winterstürme: “Kochrezept”

Starker Strahlstrom: z. B. Wernli et al. (2002, *QJRMS*)

Intensive “Baroklinität” : z.B Charney (1947, *J. Meteor*) Eady (1949, *Tellus*)

Divergenz in der oberen Troposphäre: z. B. Uccellini und Johnson (1979, *MWR*)

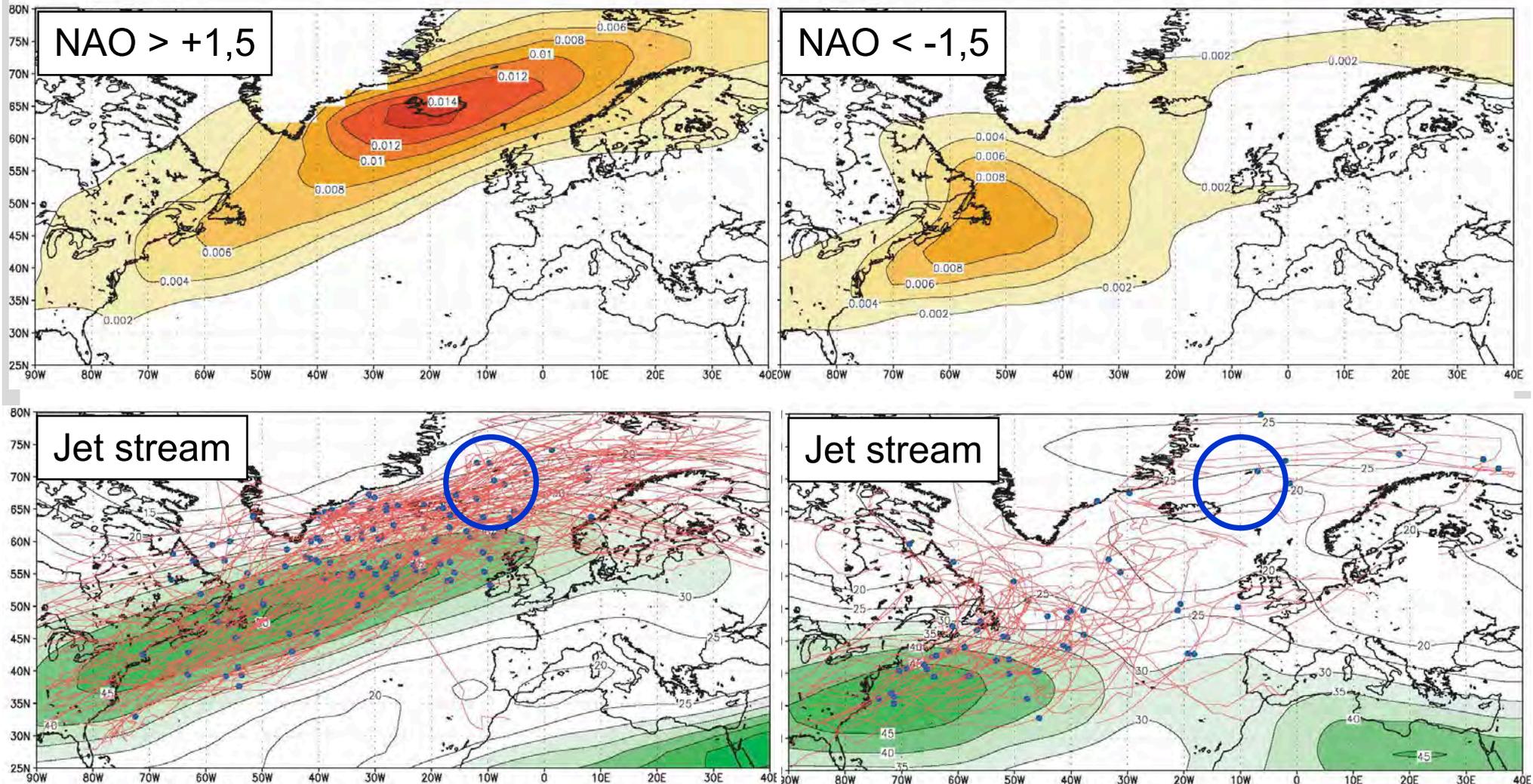
Warme und feuchte Luft im Warmsektor – Latente Wärme: z. B. Chang et al. (1984, *MWR*)



Stronger development e.g. through intense eddy-driven jet stream and baroclinicity

Pinto et al. (2009, Clim. Dyn.)

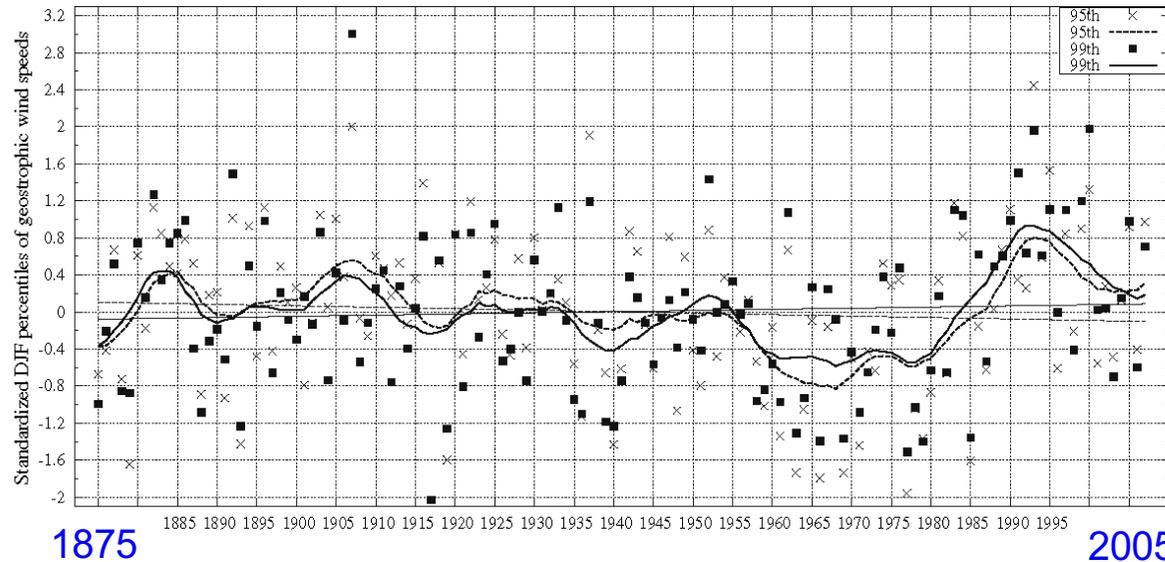
Die Nordatlantik-Oszillation (NAO)



Pinto et al. (2009, Clim. Dyn.)

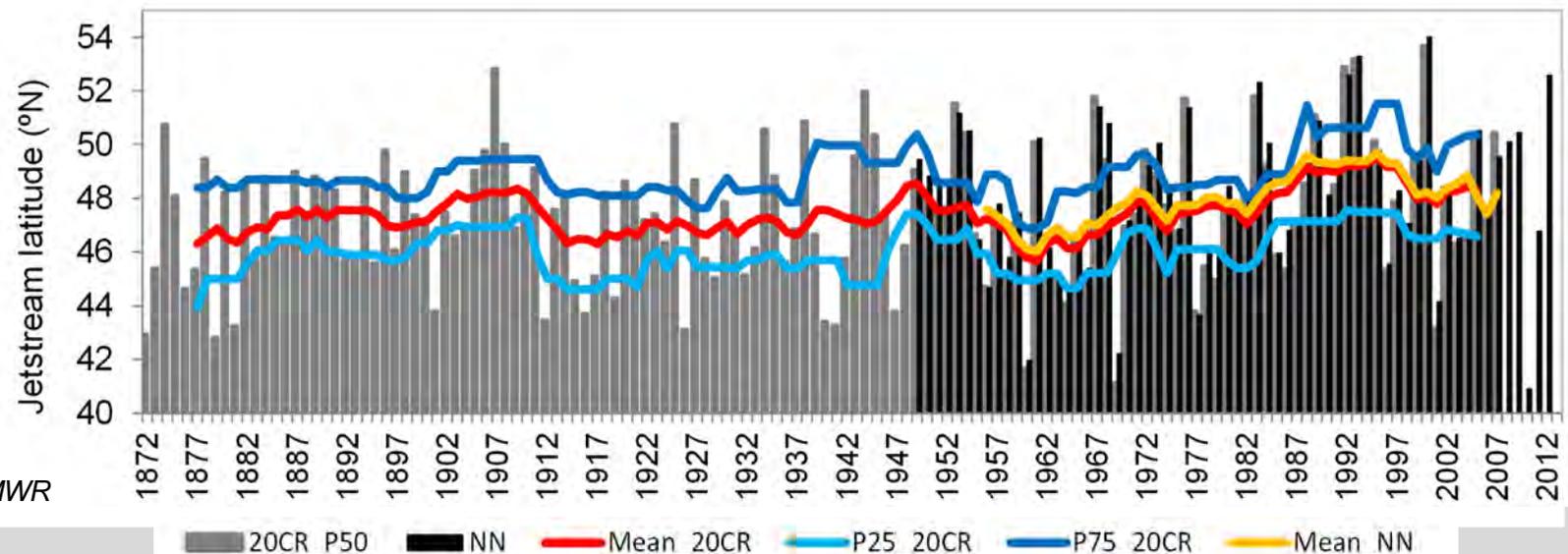
Stürme Nordsee / Breite des Polarjet

Nordsee 99. / 95. Perzentile der geostrophischen Windgeschwindigkeiten, tiefpassgefilterte Kurven und lineare Trends (DJF)



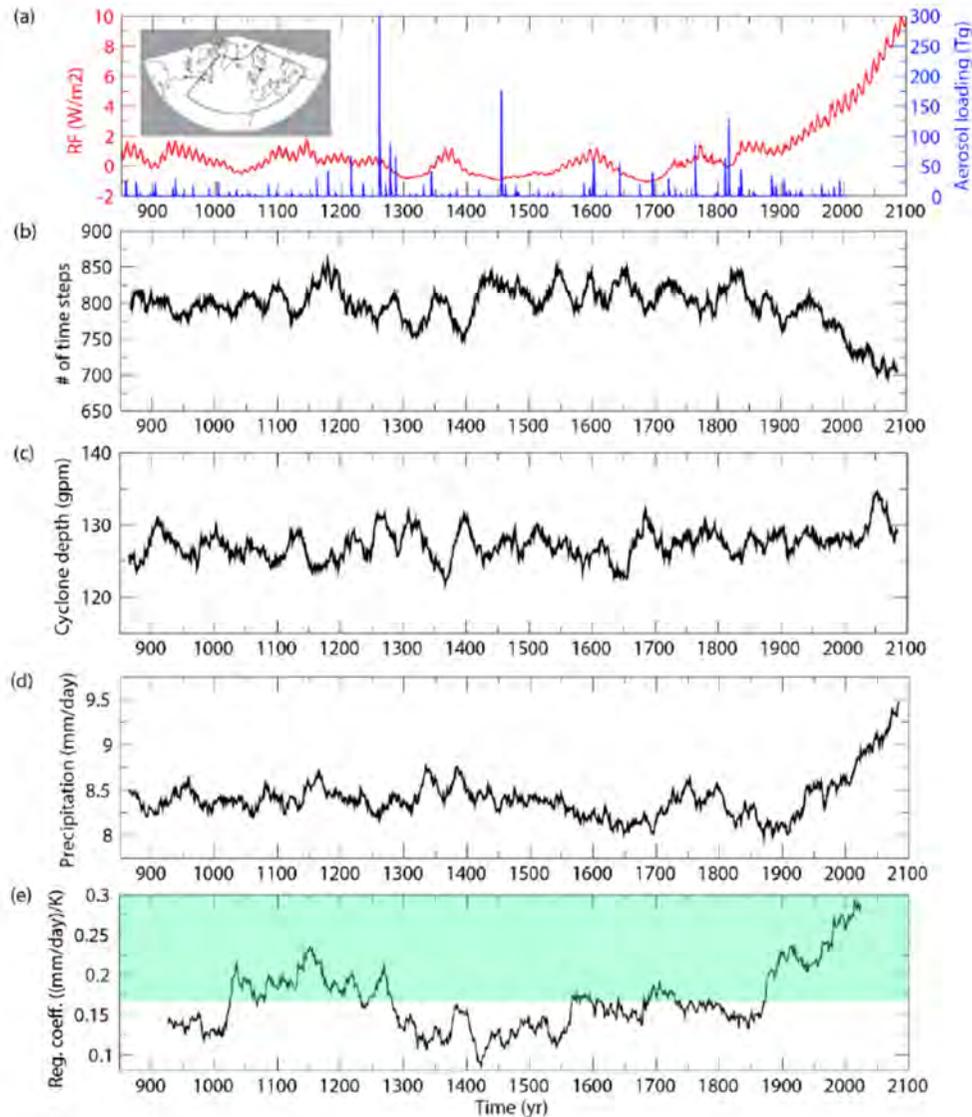
Wang et al. (2009, Clim. Dyn)

Jet-Breitengrad (DJF) NCEP 1950-2012 (schwarz), 20CR-Ensemble 1871-2010 (grau) + ausgew. Perzentile



Source: Santos et al. (2013) MWR

Extratrop. Stürme in Vergangenheit u. Zukunft



Strahlungs-/Aerosolantrieb

Zeitschritte mit Zyklonen (Winter)

Stärke Zyklonen

Niederschlag in mm/Tag

Regressionskoeffizient Temperatur
Zyklone und Niederschlag

Raible et al. (2020)

Klimaprojektionen (CMIP5)

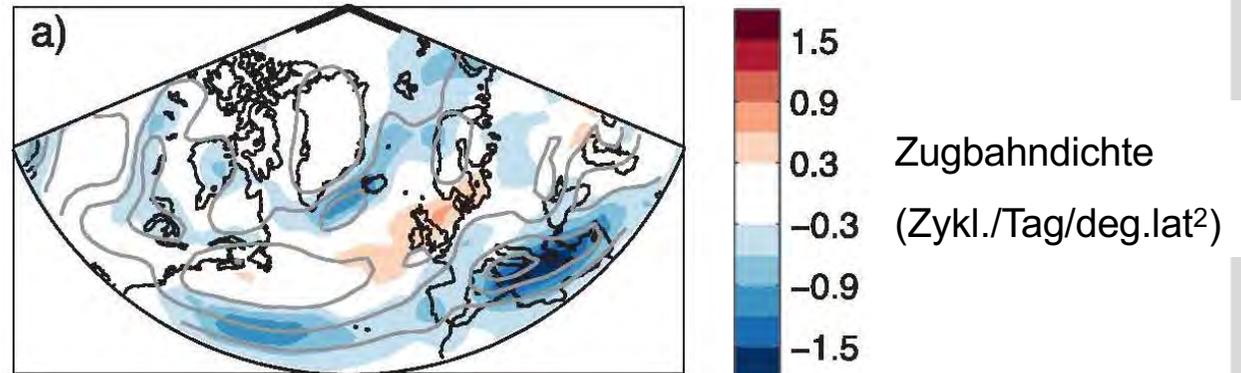
Weniger extratropische Zyklonen, häufiger Extremzyklonen über Britischen Inseln

Änderung der Zyklonenaktivität

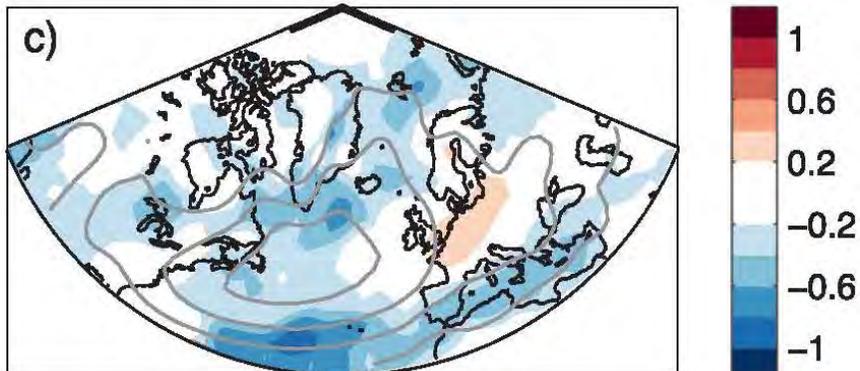
Szenario: RCP4.5 minus 20C

(2070-2099 minus 1976-2005)

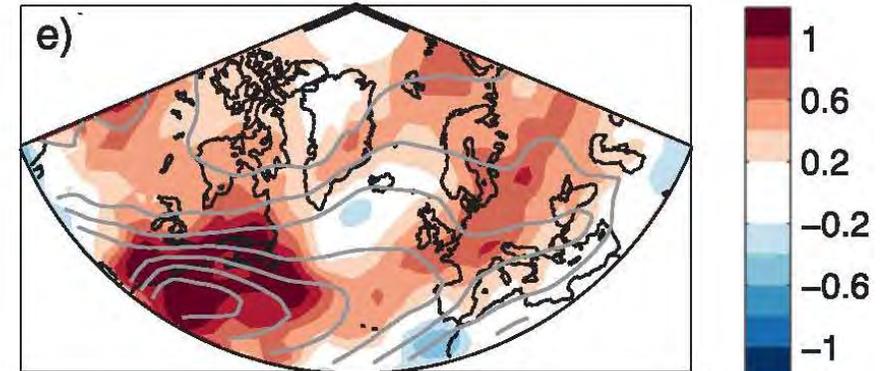
Winter (DJF)



Wind (m/s)



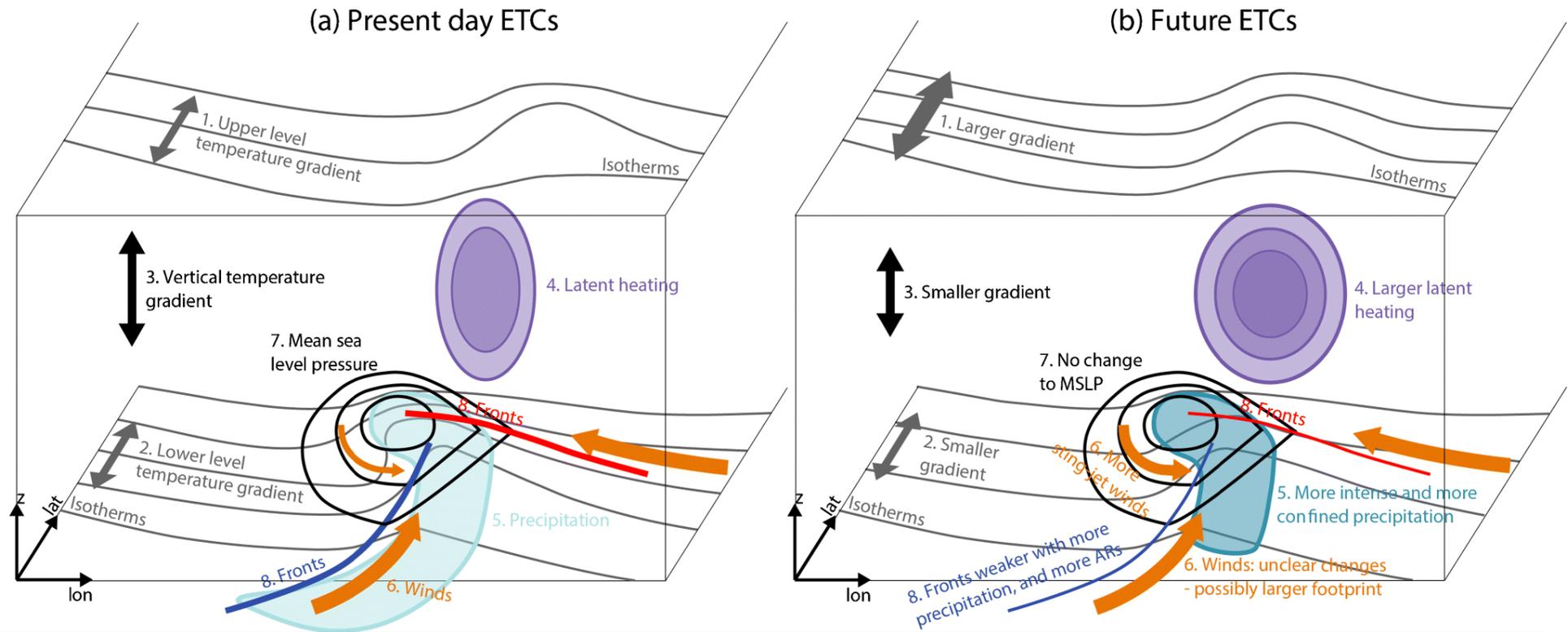
Niederschlag (mm/Tag)



Vergleichsweise kleine Änderung für Wind, größere Änderung für Niederschlag

Zappa et al. (2013, J. Clim.)

Changes in Structure



Feature	1	2	3	4	5 (intensity)	5 (extent)	6	7	8
Confidence	High	High	High	High	High	Low	Low	Medium	Low

Source: Catto et al (2019)

Wie verändern sich tropische Wirbelstürme?

Definitionen, (regionale) Bezeichnungen für tropische Zyklonen

„*Tropical Cyclone*“ (TC): (dt.: tropische Zyklone)

Generischer Name für ein Tiefdruckgebiet über tropischen oder subtropischen Ozeanen, in welchem organisierte Konvektion auftritt und in welchem die Bodenwinde zyklonal rotieren.

„*Hurricane*“ (dt.: Hurrikan)

„Huracan“, Maya-Sprachen, Gott des Windes
(Atlantik, Ostpazifik)

„*Typhoon*“ (dt.: Taifun)

wahrscheinlich aus dem Griechischen „Typhon“, 900 v.Chr.,
100-köpfiges Monster, besiegt von Zeus und begraben unter dem
Vulkan Ätna, Sizilien
(Westpazifik)

Klassifizierung tropischer Zyklonen

TC werden klassifiziert nach der mit der Dvorak-Technik geschätzten max. 1-minütigen (nur Atlantik & Ostpazifik) bzw. 10-minütigen Windgeschwindigkeit am Boden

Tropische Depression	$10 \text{ m/s} < \text{Wind} < 17 \text{ m/s}$
Tropische Zyklone	$\text{Wind} > 17 \text{ m/s}$ (62 km/h)
Tropischer Sturm (System erhält Namen)	$17 \text{ m/s} < \text{Wind} < 33 \text{ m/s}$
Hurrikan (Atlantik, Ostpazifik)	$\text{Wind} > 33 \text{ m/s}$ (119 km/h)
Taifun (Westpazifik)	$\text{Wind} > 33 \text{ m/s}$ (119 km/h)
„Major (intense) hurricane“ (Atlantik, Ostpazifik)	$\text{Wind} > 50 \text{ m/s}$ (180 km/h)
Super-Taifun (Westpazifik)	$\text{Wind} > 67 \text{ m/s}$ 240 km/h

Intensitätsskala (Atlantik/Ostpazifik) & Maßzahlen

Saffir-Simpson Skala (Quelle: Wikipedia, besucht am 08.11.2012):

(gültig für den Atlantik und Ostpazifik)

Saffir-Simpson-Hurrikan-Skala ab 2012

Stufe / Kategorie	Windgeschwindigkeit			Anstieg des Wasserspiegels
	Knoten	mph	km/h	m
Tropisches Tief	< 34	< 39	< 63	= 0
Tropischer Sturm	34 bis 64	39 bis 73	63 bis 118	0,1 bis 1,1
Hurrikan Kategorie 1	64 bis 82	74 bis 95	119 bis 153	1,2 bis 1,6
Hurrikan Kategorie 2	83 bis 95	96 bis 110	154 bis 177	1,7 bis 2,5
Hurrikan Kategorie 3	96 bis 112	111 bis 130	178 bis 209	2,6 bis 3,8
Hurrikan Kategorie 4	113 bis 136	130 bis 156	209 bis 251	3,9 bis 5,5
Hurrikan Kategorie 5	> 136	> 156	> 251	> 5,5

“Major Hurricanes”: Hurrikane der Kategorien 4 und 5

Super-Taifun: (1-)minütige Windgeschwindigkeit > 130 Kt (oberer Kat. 4 Sturm)

Zwei wichtige Maßzahlen für die Intensität tropischer Zyklonen

„Accumulated Cyclone Energy Index“
(ACE; Bell & Chelliah, 2006):

$$ACE = \sum_t v_{\max}^2$$

Power Dissipation Index
(PDI; Bister & Emanuel, 1998;
Emanuel, 1999; 2005):

$$PDI = \sum_t v_{\max}^3$$

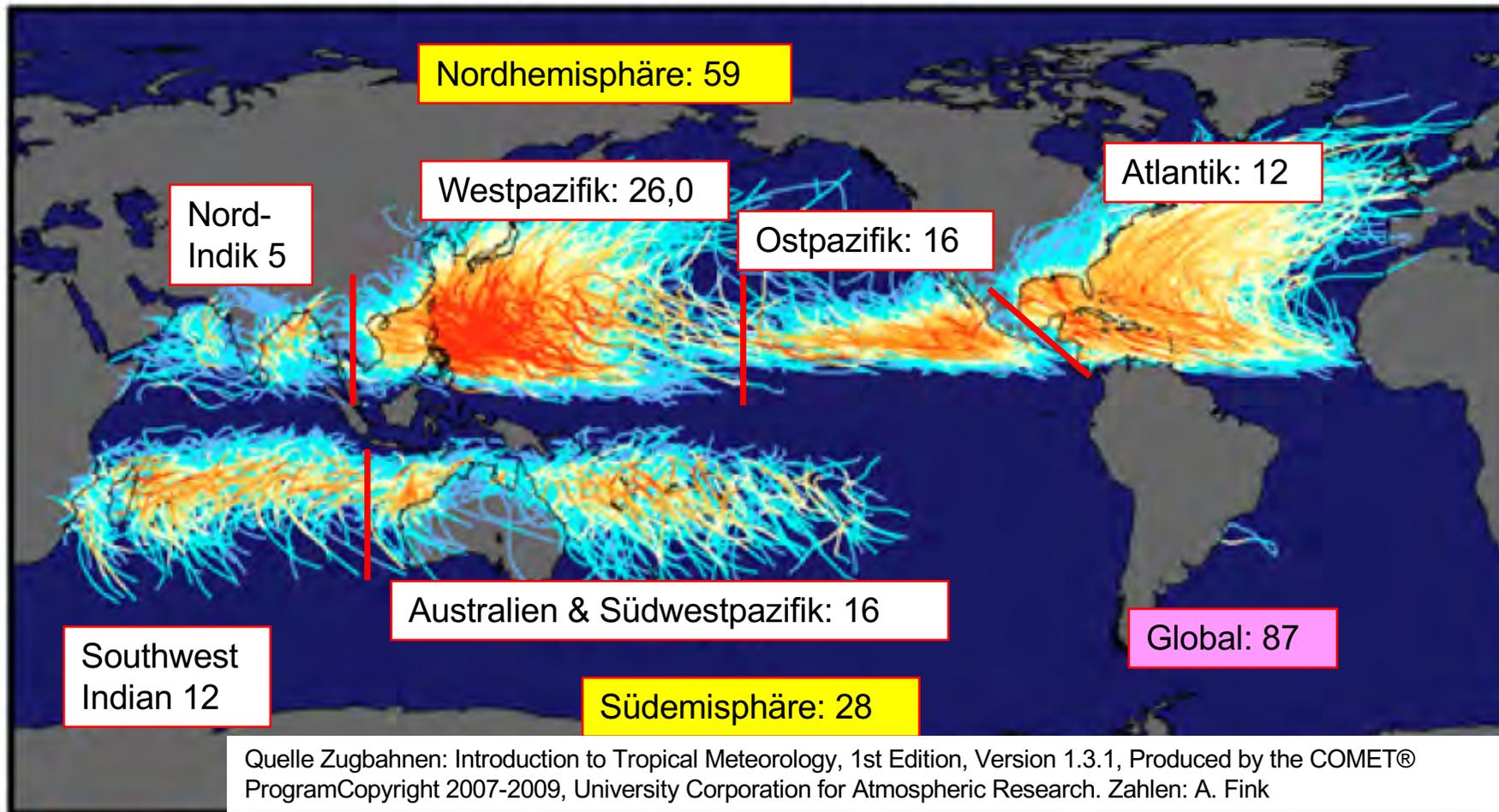
„Kochrezept“ für tropische Zyklogenese

Sechs **notwendige** Bedingungen („Hurrikan-Kochbuch“):

1. Bedingte Labilität
2. Ausreichende ozeanische thermische Energie (SST > 26,5°C, 60m tiefe warme Deckschicht)
3. Schwache vertikale Windscherung (Entstehungsort)
4. Mindestens 5° Breite polwärts vom Äquator
5. Hohe relative Feuchte in der mittleren Troposphäre (700 hPa, ~3 km))
6. Eine initiale Vorticity-Störung in Bodennähe (zum Anstoßen der Rotation)

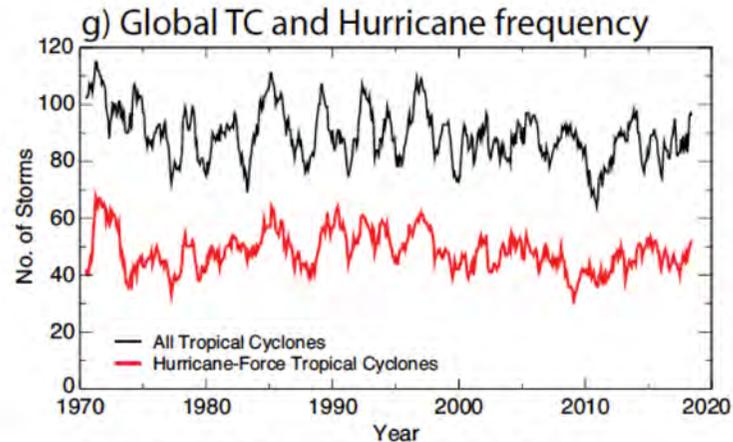
Empirisch gewonnen!

Zugbahnen: Globale Verteilung 1851-2006 (wo verfügbar).
 Zahlen: Anzahl benannter Stürme pro Becken und Kalenderjahr (1969-2009)

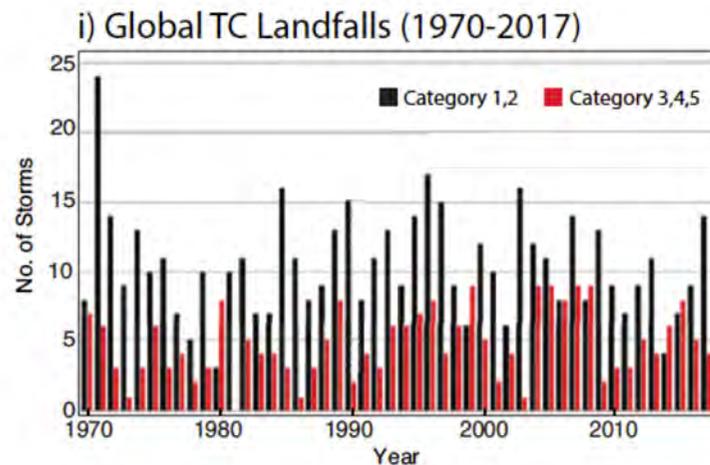


Saffir-Simpson Hurricane Intensity Scale

Kein Trend in der Anzahl und im Landgang von tropischen Zyklonen



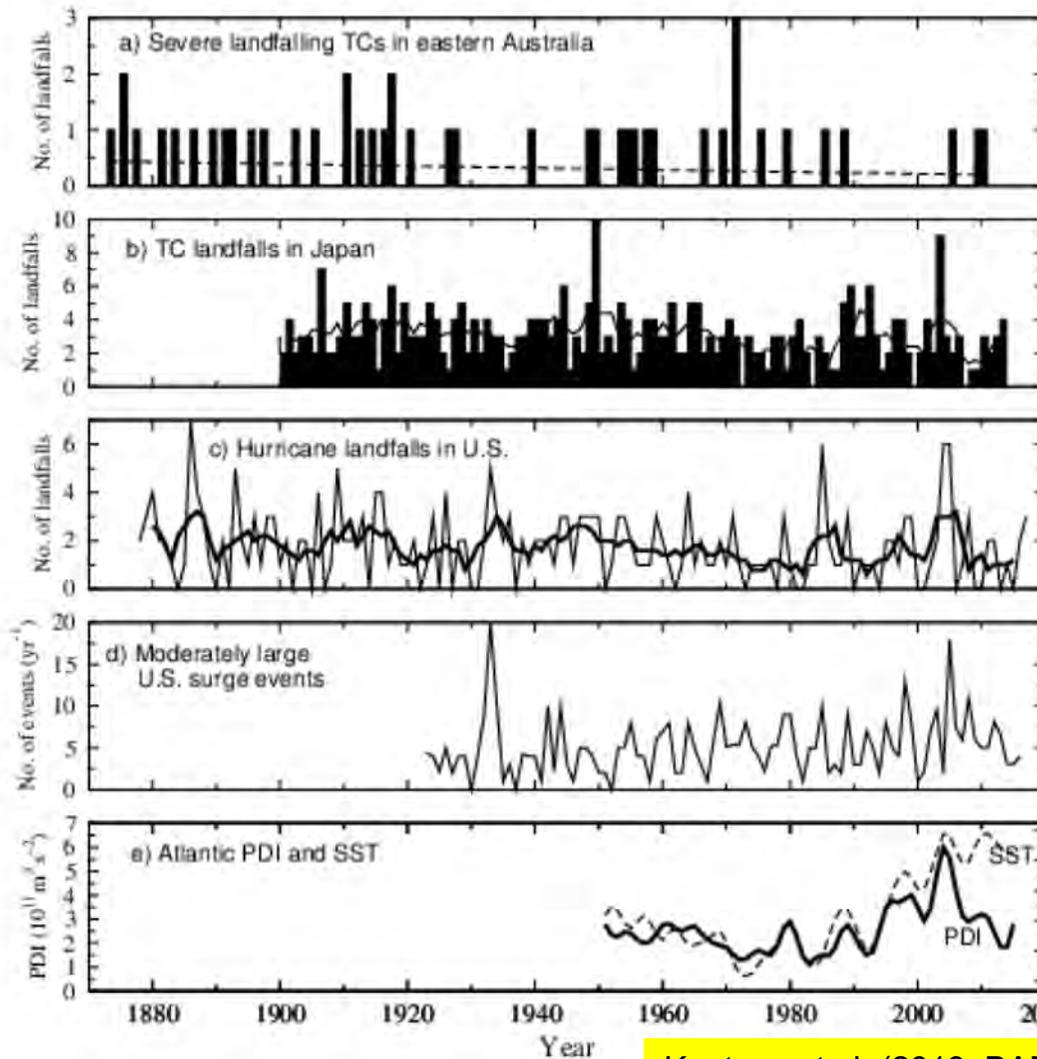
Häufigkeit global
Hurrikan-Stärke (> 119 km/h)



Landgänge global: Kat, 1+2
und „major hurricane“ Stärke

Knutson et al. (2019, BAMS)

Korrigierte bzw. relativ „sichere“ Maßzahlen zeigen keinen Trend
(Tropischen Zyklonen sind aber seltene Ereignisse)



Landgänge in Ostaustralien

Landgänge in Japan

Landgänge in den USA

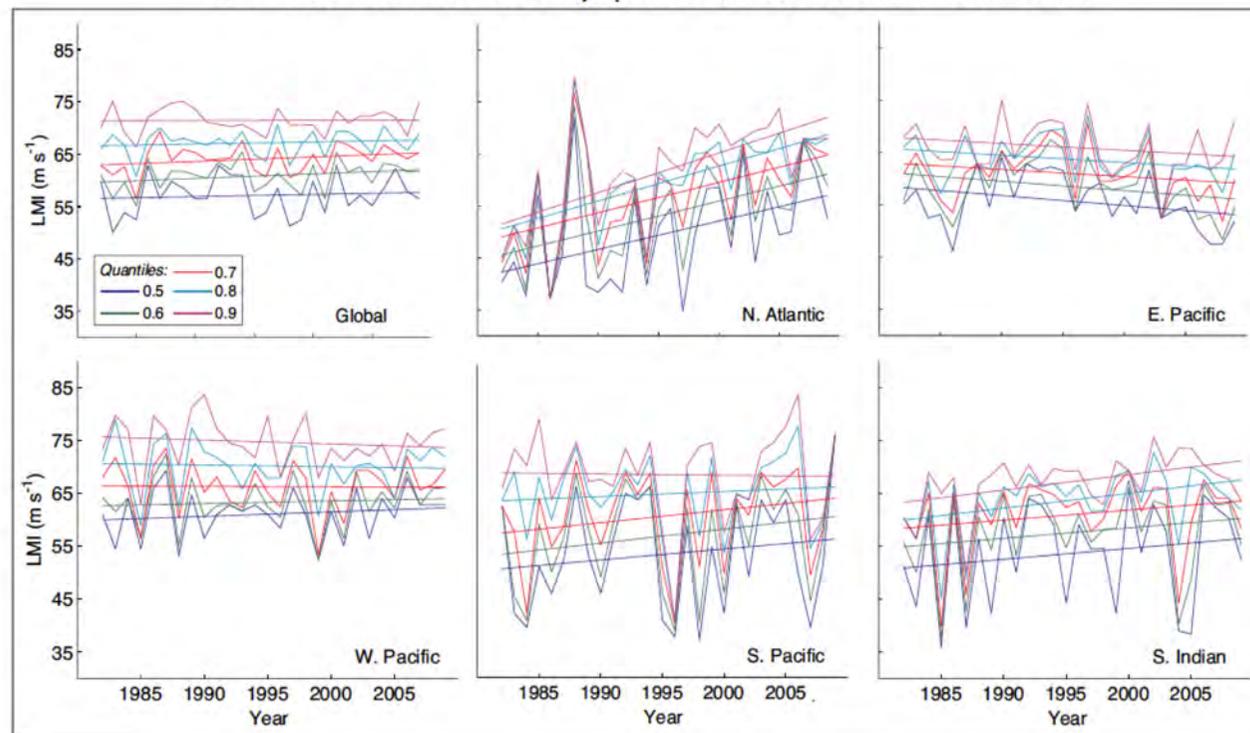
Mäßig starke Sturmfluten USA

Atlantik Wassertemperatur
und Power Dissipation Index

Knutson et al. (2019, BAMS)

Können wir einen Trend zu intensiveren tropischen Zyklonen beobachten?

Maximale Intensität während der Lebensdauer

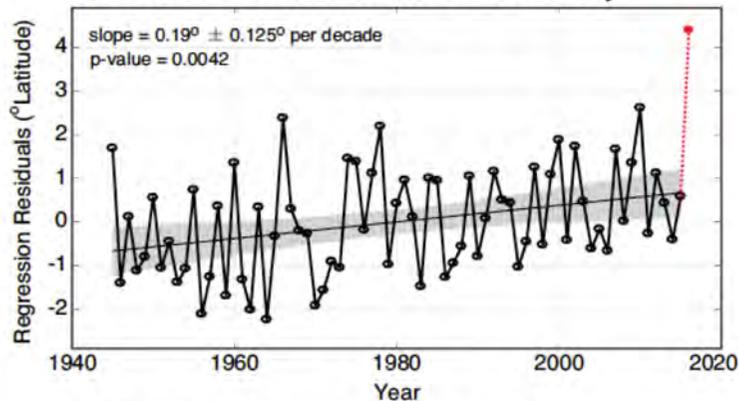


Knutson et al. (2019, BAMS)

N. Atlantik: Anstieg TC Aktivität im Atlantik seit 1970 ist „highly unusual“ ($p < 0.05$) gegenüber der natürlichen Variabilität, aber „confidence is low“, dass dies auf das Aerosol-Forcing zurückgeht; .

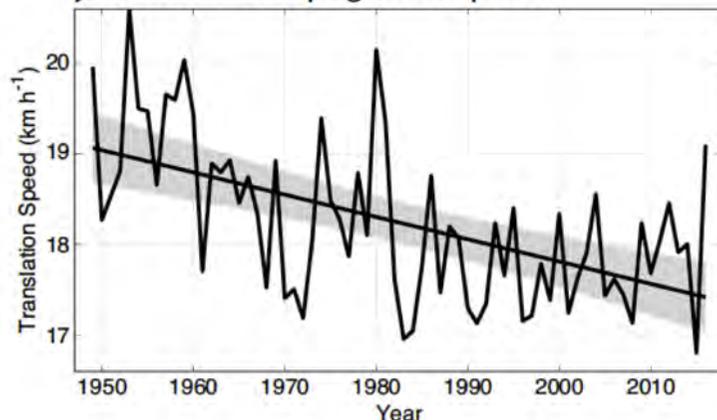
Erkennbare Trends: aber sind diese auf die anthropogene Erwärmung zurück zu führen?

h) Latitude of Maximum TC Intensity



Westpazifik : Polwärtige Migration der Breite maximaler Intensität ist „highly unusual“ ($p < 0.05$) gegenüber der natürlichen Variabilität, „aber confidence is low to medium“, bzgl. Trend und Attribution.

j) Global TC Propagation Speed

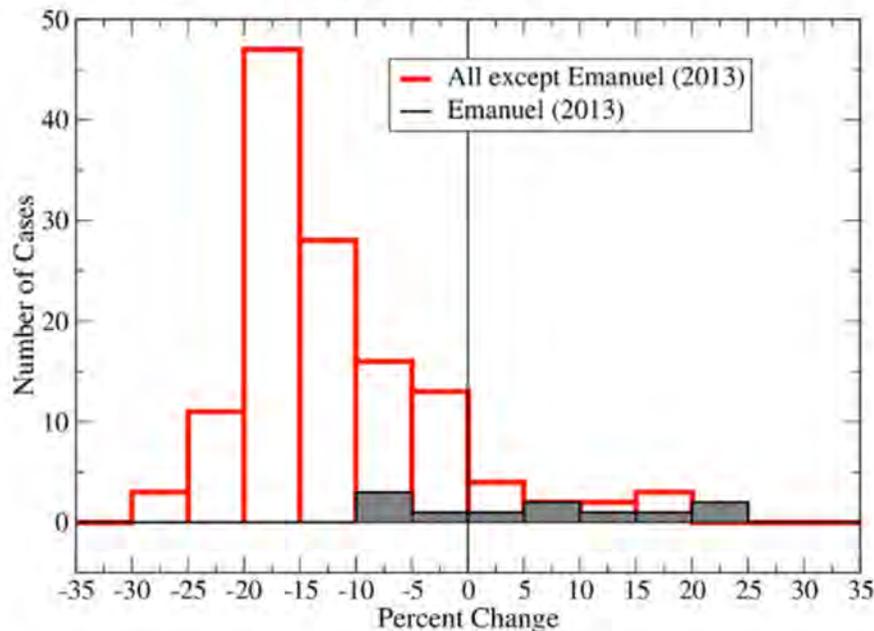


Global : Erkennbare Abnahme der Wanderungsgeschwindigkeit von Zyklonen im globalen Maßstab seit 1949 (73 % stimmen zu); und anthropogene Einflüsse haben zu dieser Abnahme beigetragen (9 % stimmen zu).

Knutson et al. (2019, BAMS)

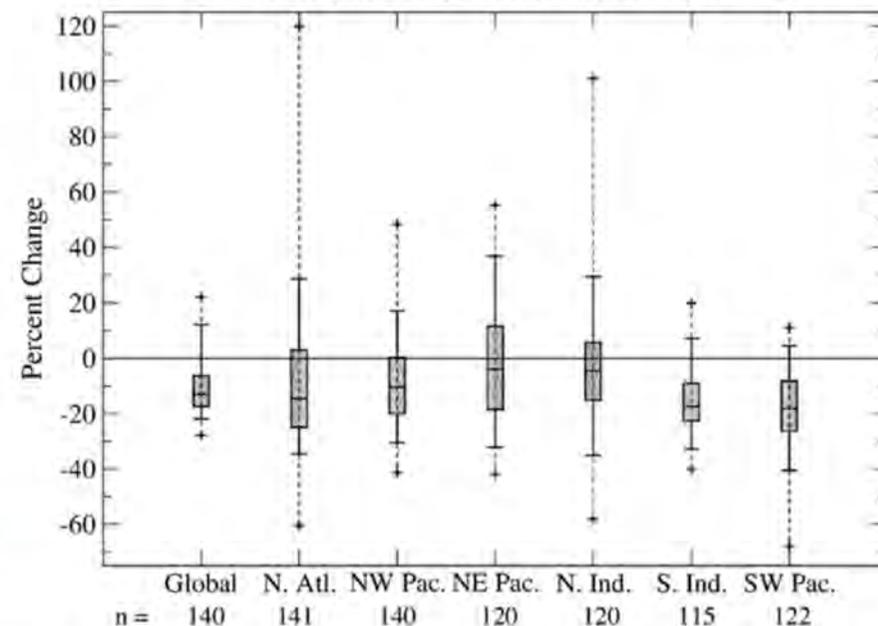
Häufigkeit von Tropischen Zyklonen in einer +2°C Welt

Häufigkeit, Kategorie 0–5, global



Knutson et al. (2020, BAMS)

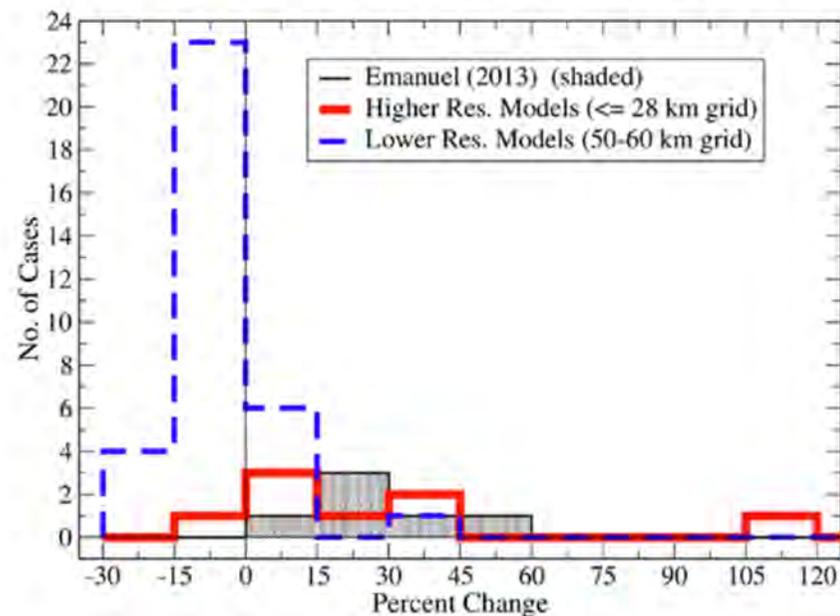
% Änderung global/Ozeanbecken



Obwohl die Mehrzahl der Studien weniger Tropische Zyklonen zeigen, schätzen 7 von 11 Experten dies als wenig vertrauenswürdig ein („low-to-medium“)

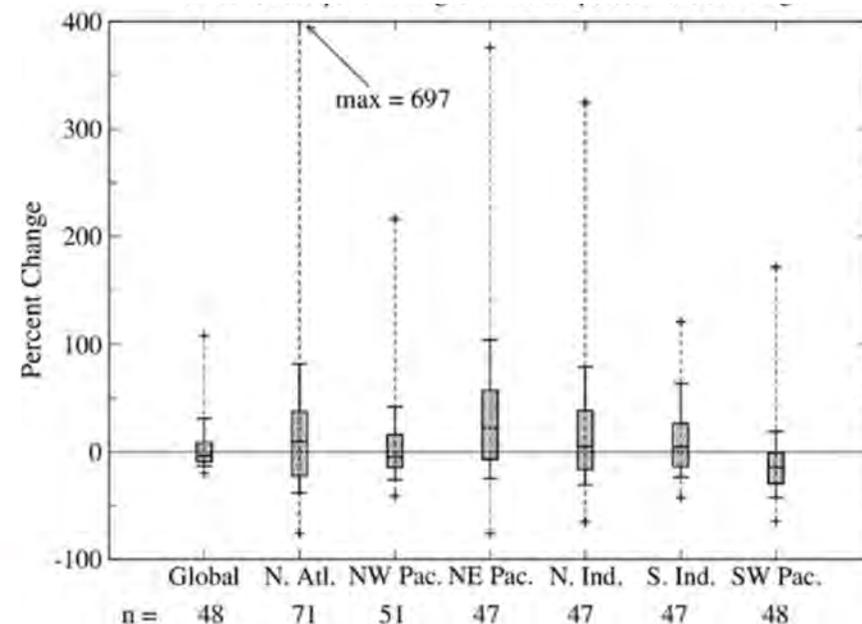
Mehr Stürme der stärksten Kategorien in einer +2°C Welt?

Änderung Häufigkeit, Kat. 4+5, global



Knutson et al. (2020, BAMS)

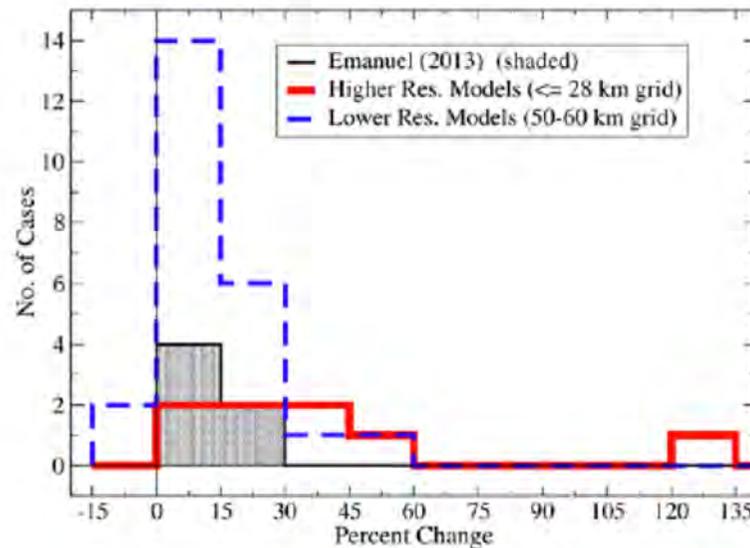
% Änderung Kat. 4+5 global/Ozeane



Obwohl einige Studien mehr Kat 4+5 Stürme voraussagen, ist die Einschätzung der Experten bezüglich der Vertrauenswürdigkeit gemischt.

Erreichen mehr Stürme die stärkste Kategorie in einer +2°C Welt? in einer +2°C Welt?

% Änderung Anteile der Stürme Kat. 4+5

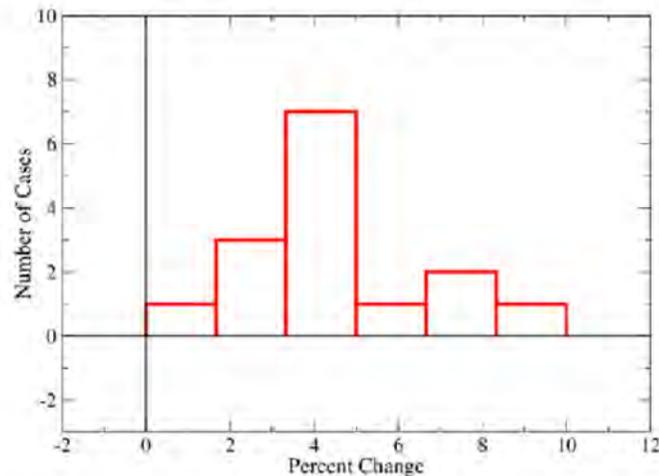


Knutson et al. (2020, BAMS)

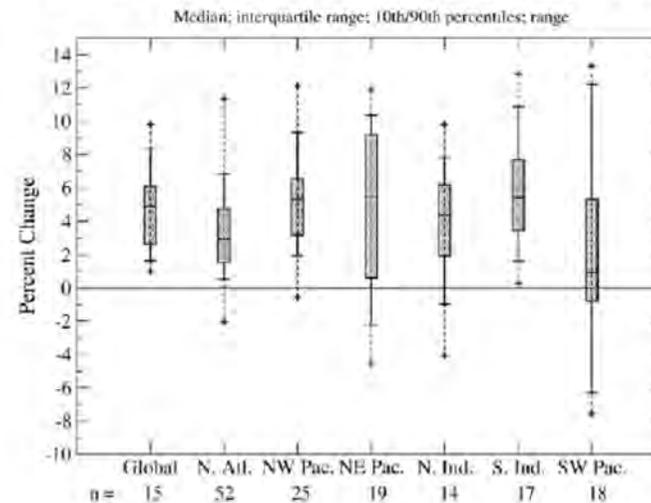
Hier sagen 8 der 11 Experten , dass mehr Stürme die beiden höchsten Kategorien erreichen sei vertrauenswürdig („medium-to-high)

Steigt sie maximale Windgeschwindigkeit in einer +2°C Welt?

Intensitätsänderung global



Intensitätsänderung global + Ozeanbecken

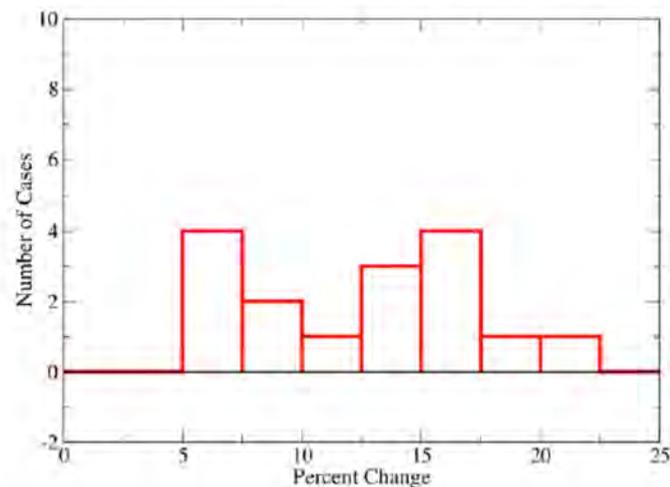


Knutson et al. (2020, BAMS)

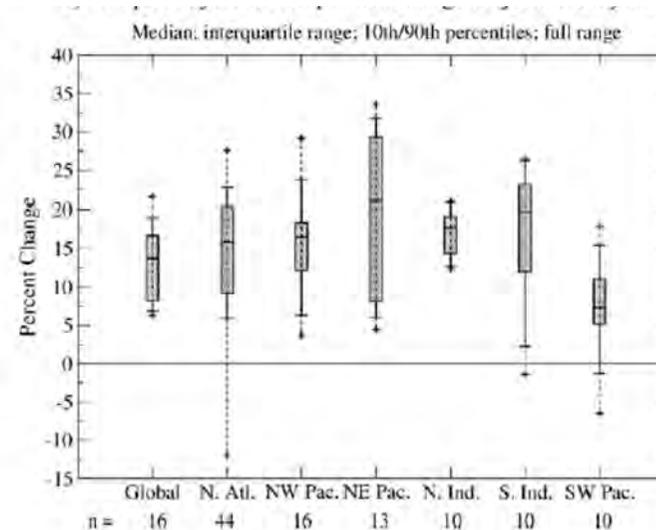
Hier sagen 10 der 11 Experten, dass die maximale Windgeschwindigkeit zunimmt, sei vertrauenswürdig (3x „high“, 7x „medium-to-high“)

Steigt die Nierschlagsrate in einer +2°C Welt?

% Änderung
Niederschlagsrate, global



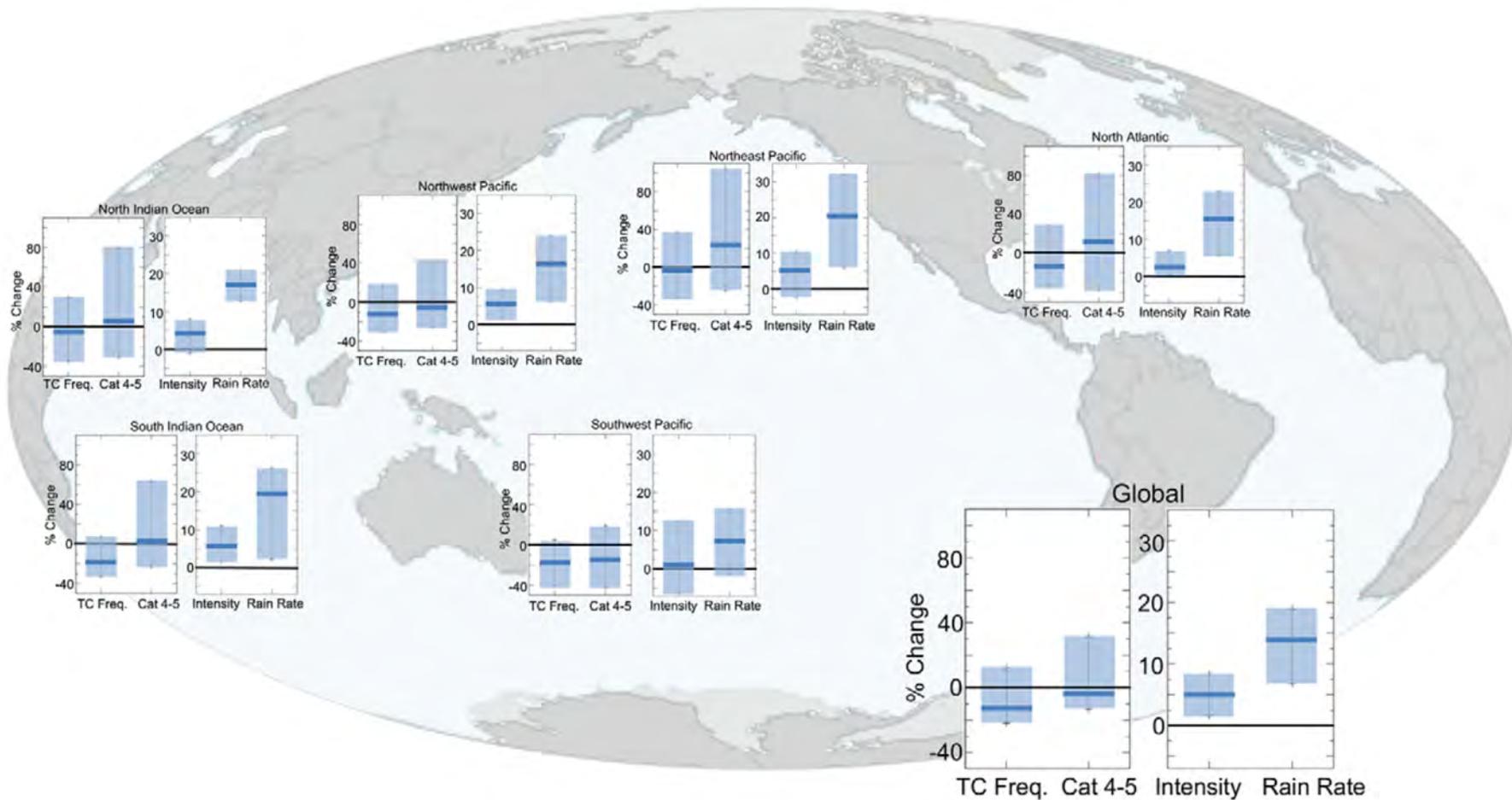
Änderung global + Ozeanbecken



Knutson et al. (2020, BAMS)

Hier sind sich die Experten einig: Die Niederschläge erhöhen sich um 14% (Median).
Das entspricht dem Anstieg des Wasserdampfgehalts bei 2°C

Tropische Zyklonen in einer +2°C Welt?



Alles skaliert auf eine +2° wärmeren Welt – derzeit sind wir auf einem +3°C Pfad

Die „Zukunft“ von extratropischen und tropischen Zyklonen

- Es gibt relativ zuverlässig abschätzbare Folgen des Klimawandels, z.B. mehr Hitzewellen im Sommer, Meeresspiegelanstieg (u.a. auch durch Gletscherschmelze), Versauerung der Ozeane, zunehmende Trockenheit im Mittelmeer, etc., etc.
- Bei tropischen und extratropischen Zyklonen ist der Sachverhalt komplex:
 - ❖ In einer wärmeren Welt werden weniger extratropische und möglicherweise auch weniger tropische Zyklonen auftreten.
 - ❖ Eine hohe Vertrauenswürdigkeit besteht in der Projektion, dass sowohl in extratropischen als auch tropischen Zyklonen mehr Niederschlag fällt.
 - ❖ Als vertrauenswürdig eingeschätzt wird, dass die Windgeschwindigkeit tropischer Zyklonen zunehmen und mehr Zyklonen die beiden höchsten Kategorien erreichen werden.