

4.3. Das Klima der letzten 150 Jahre

Das Klima der letzten 150 Jahre erschliesst sich uns durch globale Messungen. Im ersten Kapitel wird der globale und hemisphärische Temperaturverlauf diskutiert. Dabei steht die Frage im Vordergrund, inwiefern die starke Erwärmung in der ersten Jahrhunderthälfte anthropogen oder natürlichen Ursprungs ist. Die Erwärmung war besonders stark in der Arktis. In Kapitel 4.3.3 wird diskutiert, inwiefern es sich hier um ein Feedback-Mechanismus handelt oder um eine interne Variabilität des arktischen Klimasystems. In den folgenden Kapiteln werden starke Dürreperioden betrachtet: die verheerenden „Dust Bowl“ Dürren in den USA in den 1930er Jahren und die Dürren im Sahelraum in den 1970er und 1980er Jahren. Im letzten Kapitel werden globale Klimaanomalien im Zusammenhang mit einem starken und lang anhaltenden El Niño Ereignis 1940-1942 vorgestellt.

4.3.1. Methoden

Für die letzten 150 Jahre liegen instrumentelle Messungen vor aus verschiedenen Teilen der Erde vor. Die ganze Zeitspanne decken Reihen der Temperatur, des Niederschlags und des Luftdrucks an der Erdoberfläche ab – von Landstationen wie auch von Schiffen. Aus diesen Daten können mit statistischen Methoden (z. B. Reduced Space Optimal Interpolation) globale Felder erstellt werden. Diese sind heute auf der Basis von Monatsmittelwerten vorhanden. Im Rahmen laufender Bestrebungen werden auch tägliche Felder für gewisse Regionen (Nordatlantik Europa) erstellt. Höhendaten liegen vor allem für die Zeit nach 1948 vor, vor allem Radiosondendaten. Auch hier gibt es Bestrebungen, Höhendaten weiter zurück zu digitalisieren und daraus mittels Rekonstruktion Felder der Höhenzirkulation zu gewinnen.

Die Standardmethode zur „Analyse“, der Gewinnung von meteorologischen Feldern aus verstreuten Punktdaten, ist die Datenassimilation. Mit Hilfe eines Wettermodells liefert sie 6-stündliche, globale, dreidimensionale Felder verschiedenster meteorologische Grössen. Solche Datensätze liegen zur Zeit bis 1948 zurück („Reanalysen“) vor. In Zukunft sollen neue Reanalysen zurück bis 1900 gerechnet werden, wobei sich die Höhenzirkulation einerseits durch sporadische Höhenmessungen, andererseits durch ihre Spur am Erdboden erschliesst.

4.3.2. Der Temperaturverlauf der Nord- und Südhemisphäre

Der Verlauf der Temperatur der Erde sowie der Nord- und Südhemisphäre seit 1855 ist in Fig. 85 dargestellt. Augenfällig ist die starke Erwärmung. Es können vier Phasen unterschieden werden, welche mit gewissen Einschränkungen in allen drei Reihen auftreten. Zwischen 1855 und 1900 blieb die Temperatur ungefähr konstant. Danach begann eine Phase rascher Erwärmung, insbesondere zwischen 1910 und 1945. Darauf folgte eine „Plateauphase“ (1945-1970) in welcher die Temperatur stabil blieb. Seit 1970 nimmt die Temperatur wieder stark zu.

In dieser Vorlesung wird nur am Rand auf die anthropogene Klimaerwärmung eingegangen; die letzte der vier Phasen wird hier nicht im Detail diskutiert (vgl. Vorlesung von Christoph Appenzeller). Interessant im Hinblick auf grossräumige Klimaschwankungen ist jedoch die starke Erwärmung in der ersten Jahrhunderthälfte und die Frage, inwiefern diese extern angetrieben ist oder durch interne Variabilität im Klimasystem entstanden ist und, falls externe Faktoren dominieren, ob es sich um natürliche Forcingfaktoren wie Sonnenaktivität und Vulkanausbrüche handelt oder um den (frühen) Einfluss des Menschen. Diese Frage wird anhand von Modellsimulationen untersucht. Die natürlichen Forcingfaktoren sind dabei (im Vergleich zu den letzten 1000 Jahren) gut bekannt (Fig. 86). Bei den anthropogenen Faktoren sind die langlebigen Treibhausgase ebenfalls bekannt, grössere Unsicherheiten bestehen bei anderen Einflüssen wie Aerosole, troposphärisches Ozon und Landnutzungsänderungen.

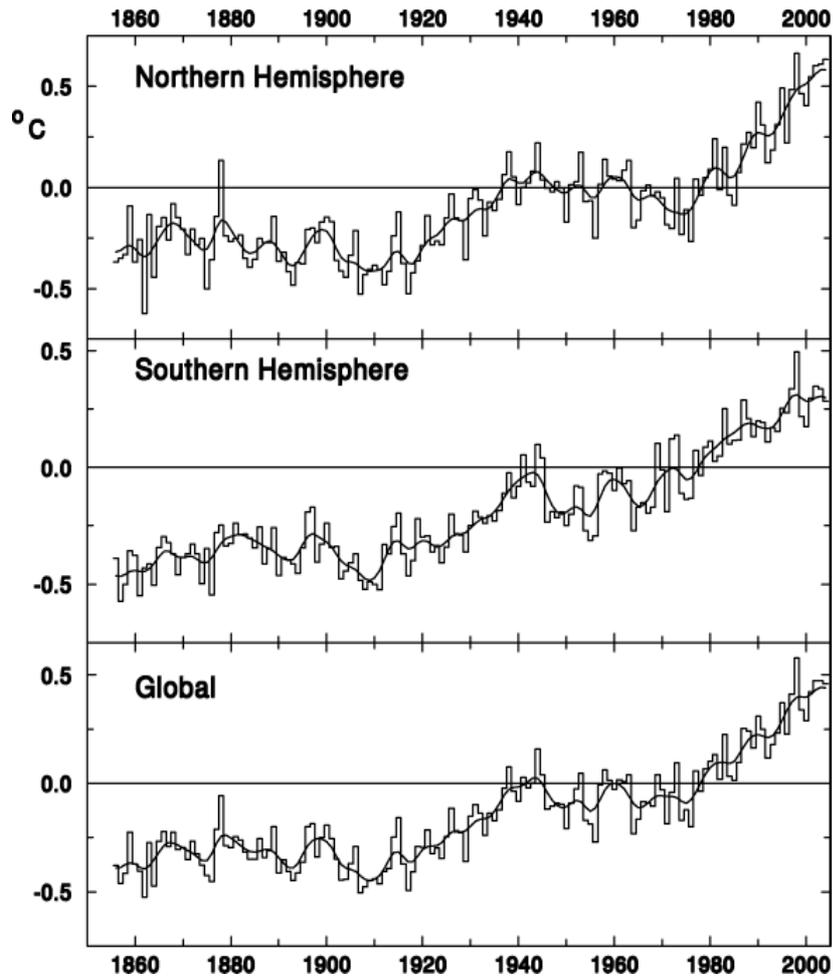


Fig. 85: Temperaturverlauf der Erde, der Nord- und Südhemisphäre aus Messungen seit 1855 (CRU, Norwich).

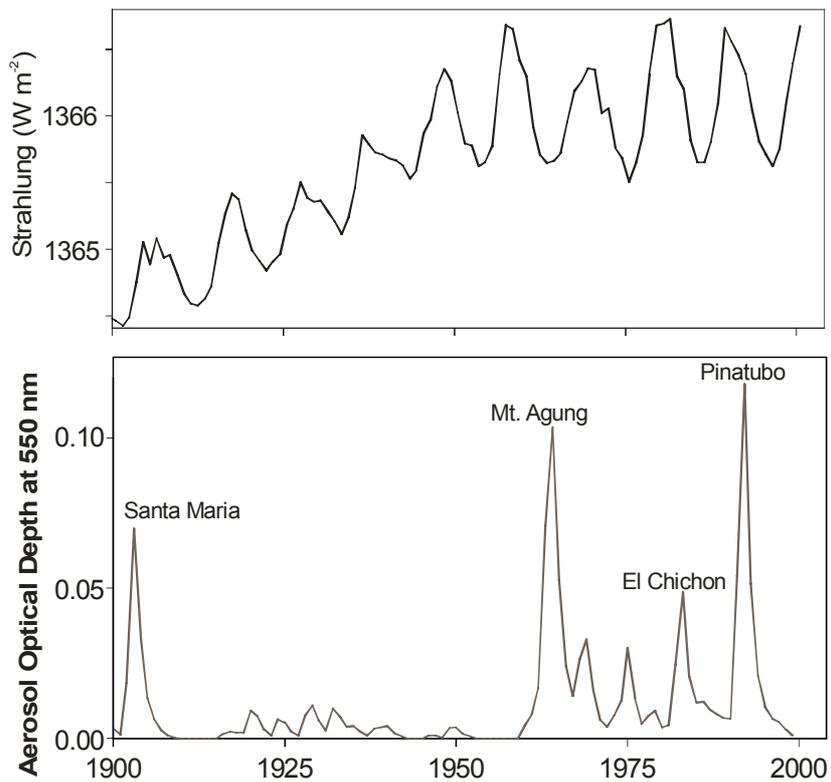


Fig. 86: Sonnenstrahlung (Lean 2004) und optische Aerosoltiefe bei 550 nm (NASA-GISS) im 20. Jahrhundert.

Viele Simulationen mit verschiedenen Modellen wurden vorgenommen, um die Erwärmung im 20. Jahrhundert zu untersuchen. Die Übereinstimmung ist am besten, wenn sowohl natürliche als auch anthropogene Einflüsse berücksichtigt werden. Natürliche Faktoren alleine erklären einen Teil der Erwärmung durch zunehmende Sonnenstrahlung sowie durch ein Fehlen starker Vulkanausbrüche. Aber selbst wenn alle Forcingfaktoren berücksichtigt werden, unterschätzen fast alle Simulationen den Anstieg. Das ist in Fig. 87 dargestellt: Fünf Simulationen wurden gemacht (oben), nur eine (unten) repräsentiert annähernd den starken Temperaturanstieg 1910-1945. Verschiedene Autoren sprechen deshalb von einer starken internen Variabilität, welche dazu beigetragen habe.

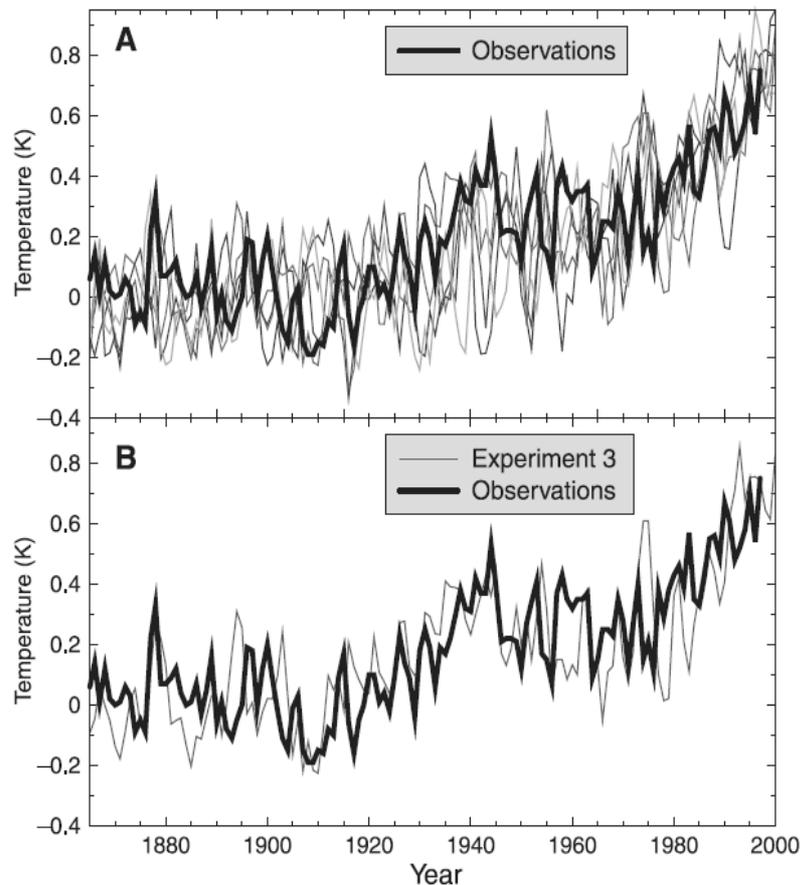


Fig. 87: Simulierte (alle Forcings, 5 Ensemblesimulationen) und beobachtete globale Mitteltemperatur 1870-2000 (Delworth und Knutson, 2000). Unten: Experiment das am nächsten an den Beobachtungen ist.

4.3.3. Erwärmung der Arktis

Die Erwärmung in der ersten Jahrhunderthälfte war am ausgeprägtesten in der Arktis (Fig. 88). Hier stieg die Temperatur um 1.8 °C (unten), in der zweiten Phase der Erwärmung verminderte sich die Meereiskonzentration vor der russischen Arktisküste stark (oben). Es stellt sich die Frage, ob es sich bei dieser Erwärmung um eine Verstärkung der globalen Erwärmung in der Arktis handelt („Polar amplification“) oder ob das Klimasystem in der Arktis eine niederfrequente Eigendynamik aufweist, welche in diesem Fall die globale Erwärmung überlagern würde. Die Diskussion in diesem Bereich ist nicht abgeschlossen. Neuere Modellsimulationen weisen jedoch darauf hin, dass in der Arktis durchaus Feedback-Zyklen existieren, welche zu einer starken Erwärmung führen könnten. Dabei ist insbesondere die Eisbedeckung in der Barents-See von zentraler Bedeutung. Wenn sich hier die Meereiskonzentration ver-

mindert, verändert sich der regionale Energiehaushalt. Mehr Strahlung wird absorbiert (Eis-Albedo-Feedback) und dadurch der sensible und latente Wärmefluss an die Atmosphäre vergrößert. Im Modell erhöht sich dadurch die Zyklonalität der Strömung, das heisst, es gibt vermehrt Tiefdrucklagen, welche mit westlicher Strömung nördlich von Norwegen verbunden sind. Durch die verstärkte Westströmung würde auch die Nordatlantische Drift verstärkt und mehr warmes Wasser in die Barents-See transportiert, was wiederum die Eisbildung vermindern würde. Das ist sicher eine interessante Hypothese, allerdings stützt sie sich bislang nur auf Modellrechnungen.

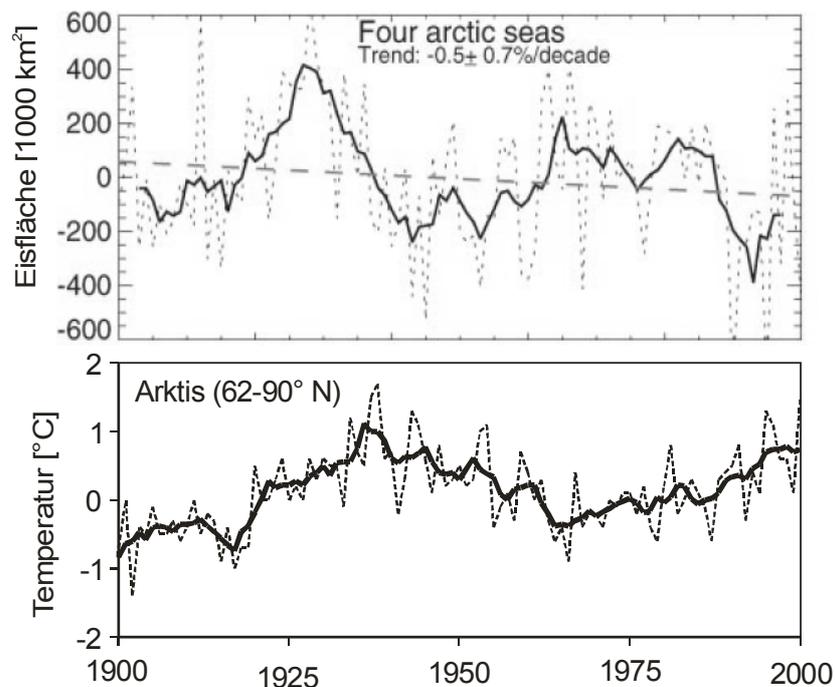


Fig. 88: Meereisfläche vor der arktischen Küste Russlands (oben) und Jahresmitteltemperatur der Arktis (unten) im 20. Jahrhundert sowie gefilterte Kurven (aus Polyakov et al. 2002).

4.3.4. „Dust Bowl“ Dürren in den USA

Eines der herausragendsten klimatischen Ereignisse in Nordamerika im 20. Jahrhundert waren die verheerenden Dürren in den 1930er Jahren. Fig. 89 zeigt rechts die beobachteten Niederschlagsanomalien in der Zeit 1932-1938. Die Dürre betraf am stärksten den mittleren Westen der USA und dauerte fast ein Jahrzehnt.

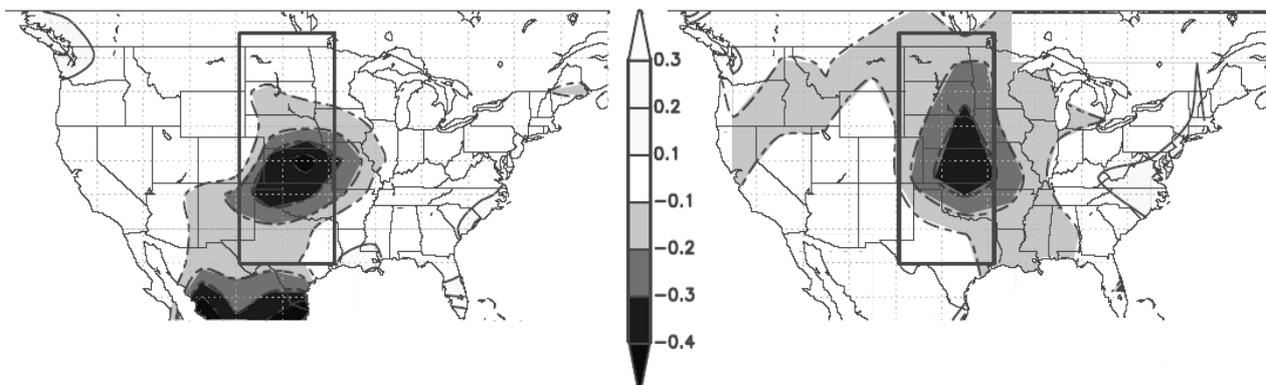


Fig. 89: Simulierte (links, Mittel aus 14 Simulationen) und beobachtete (rechts) Niederschlagsanomalie der Jahre 1932-1938 (in mm/Tag) (aus Schubert et al., 2004).

Die Dürre war begleitet von starken Staubstürmen, welche der Region, und auch der Dürre, den Namen „Dust Bowl“ gaben (Fig. 90). Die Dürre traf zusammen mit der Wirtschaftskrise und strukturellen Problemen in der US-Agrarwirtschaft. Diese Faktoren sowie unangepasste Anbaumethoden führten dazu, dass viele Farmer ihrer Existenzgrundlage beraubt wurden und in grosser Zahl aus dem mittleren Westen (Kansas, Oklahoma) in Richtung Kalifornien zogen. Dieses klimatische Extremereignis ist im Bewusstsein der amerikanischen Bevölkerung noch heute tief verankert.



Fig. 90: Staubsturm während der “Dust Bowl” Dürre.

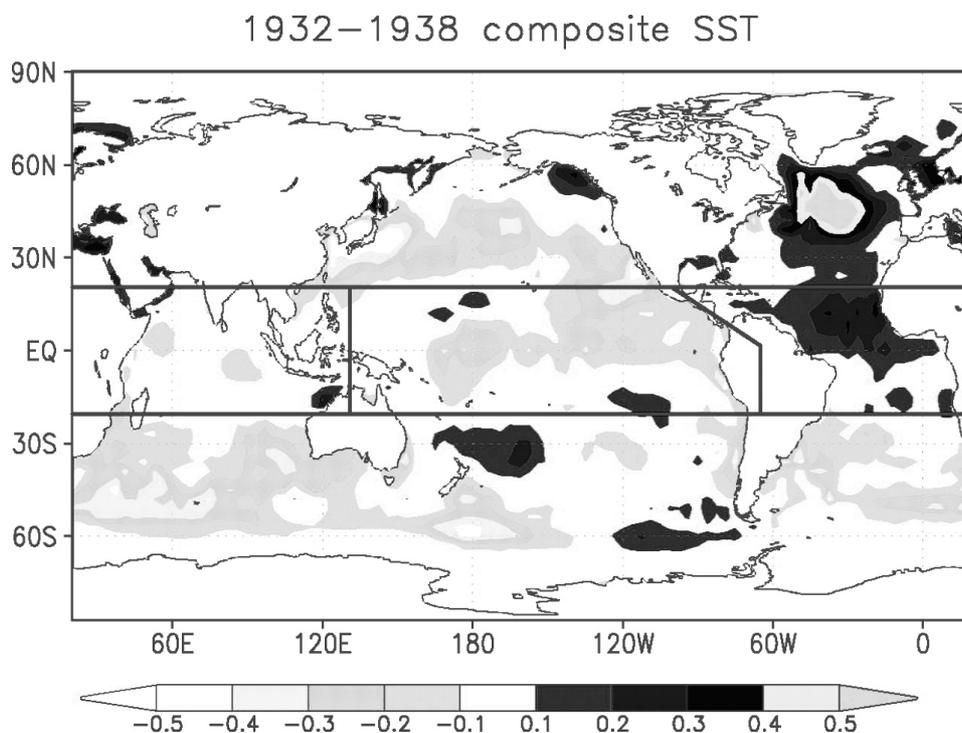


Fig. 91: Anomalien der Meeresoberflächentemperaturen 1932-1938 (aus Schubert et al., 2004).

Hypothesen zu den Ursachen der ‘‘Dust Bowl’’ Dürren gruppieren sich um zwei Hauptursachen: grossräumiges ozeanisches Forcing und lokale Feedbacks der Landoberfläche. Figur 91 zeigt die Anomalien der Meeresoberflächentemperaturen in der Zeit 1932-1938. Interessant ist der Gegensatz zwischen dem kalten Pazifik und dem warmen Atlantik. Modellsimulationen mit diesen SSTs als Randbedingungen reproduzieren die Dürre sehr gut, sowohl die Stärke als auch das räumliche Muster sind gut wiedergegeben (Fig. 89 links), was die Hypothese des grossräumigen ozeanischen Forcings bestätigt. Weitere Sensitivitätsexperimente zeigten, dass es die tropischen Meeresoberflächentemperaturen sind (sowohl Pazifik als auch Atlantik), welche ausschlaggebend sind; der Einfluss der aussertropischen Ozeane ist gering. Feedbacks an der Landoberfläche spielen aber ebenfalls eine Rolle. Wenn diese Feedbacks im Modell ausgeschaltet werden, reproduziert das Modell zwar immer noch eine Dürre, aber eine wesentlich schwächere. Die Vermutung liegt nahe, dass auch vergangene Dürren (vgl. Kapitel 4.1) durch dekadale Schwankungen der Meeresoberflächentemperaturen ausgelöst wurden.

4.3.5. Dürren im Sahelraum 1970er und 1980er

In den 1970er und 1980er Jahren erregten die Dürren im Sahelraum und die damit verbundenen Hungerkatastrophen weltweite Aufmerksamkeit. Fast zwanzig Jahre lang blieb der Niederschlag stark unterdurchschnittlich, nach zwei sehr niederschlagsreichen Jahrzehnten. Erst in den letzten Jahren hat sich die Lage wieder etwas entspannt (Fig. 92).

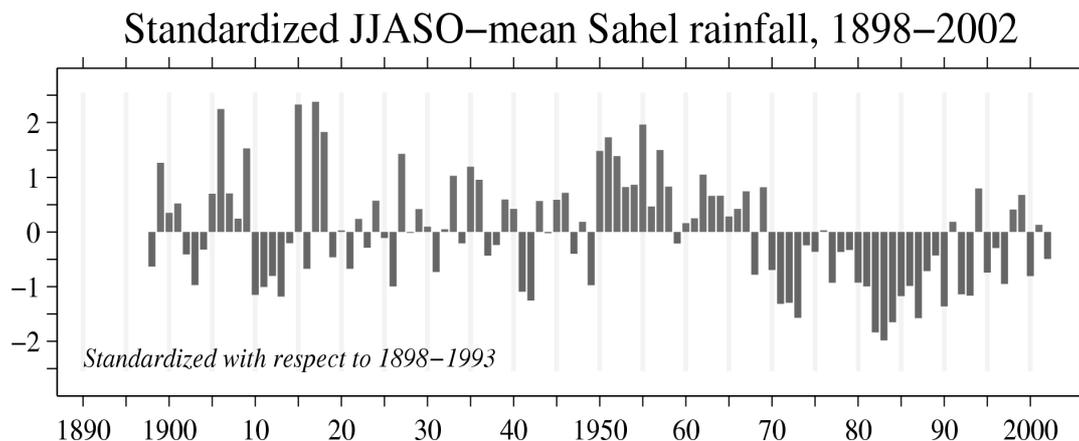


Fig. 92: Standardisierter Sommer/Herbst-Niederschlag im Sahelraum im 20. Jahrhundert (Quelle: Todd Mitchell, JISAO, Seattle).

Auch für die Saheldürren wurden als Ursachen zwei Hypothesenstränge verfolgt: grossräumiges ozeanisches Forcing und lokale Feedbacks der Landoberfläche. Ähnliche Simulationen wie im Fall der ‘‘Dust Bowl’’-Dürren wurden auch für die Sahel Dürren durchgeführt. Das Ergebnis ist ähnlich: Auf der interannuellen bis dekadalen Skala wird ein starker Einfluss der Meeresoberflächentemperaturen sowohl im tropischen Atlantik als auch im Indischen Ozean gefunden. Wenn die Ozeane warm sind, findet viel konvektive Aktivität und Niederschlag über dem Meer statt und die Monsunniederschläge fallen schwächer aus. Auch in diesem Fall wurde aber eine Verstärkung der Dürre durch lokale Feedbacks zwischen der Atmosphäre und der Landoberfläche festgestellt.

4.3.6. El Niño und globale Klima-anomalien 1940-1942

Zwischen 1940 und 1942 wurden weltweit starke klimatische Anomalien beobachtet (Fig. 93 unten). Am bekanntesten sind wohl die kalten Winter in Europa während des 2. Weltkriegs (Russlandfeldzug), die beiden kältesten Winter des 20. Jahrhunderts fallen in diese Periode. Auch in anderen Teilen der Welt waren die Anomalien extrem: kalt im zentralen Nordpazifik, warm in Alaska, gleichzeitig herrschte ein starker El Niño. Im Bodendruckfeld zeigte sich ein starkes Aleutentief und ein schwaches Islandtief. Die Klimaextreme hatten auch starke Auswirkungen: Waldbrände in Alaska, Dürren in Australien und Borneo, nicht zuletzt beeinflussten die kalten Winter in Europa den Verlauf des Kriegs.

Anhand von historischen Höhendaten konnte die Höhengzirkulation rekonstruiert werden. Sie zeigt ebenso starke Anomalien wie die Felder am Erdboden. Die wichtigsten Merkmale auf der 100 hPa Fläche (Fig. 93 oben) sind ein schwacher Polarwirbel und warme Temperaturen in der sibirischen Arktis. Radiosondendaten liefern ausserdem Hinweise auf Major Midwinter Warmings der mittleren Stratosphäre in jedem der drei Winter (1939/40, 1940/41, 1941/42).

Interessant sind auch die wenigen verfügbaren Gesamtzondaten: Hier zeigt sich eine extreme positive Abweichung. In der längsten verfügbaren Reihe (Arosa, seit 1926) weisen die beiden Jahre 1940 und 1941 die höchsten Mittelwerte auf. Aber auch alle anderen Reihen (Fig. 93 oben) zeigen starke positive Abweichungen im Vergleich zu den umliegenden Jahren.

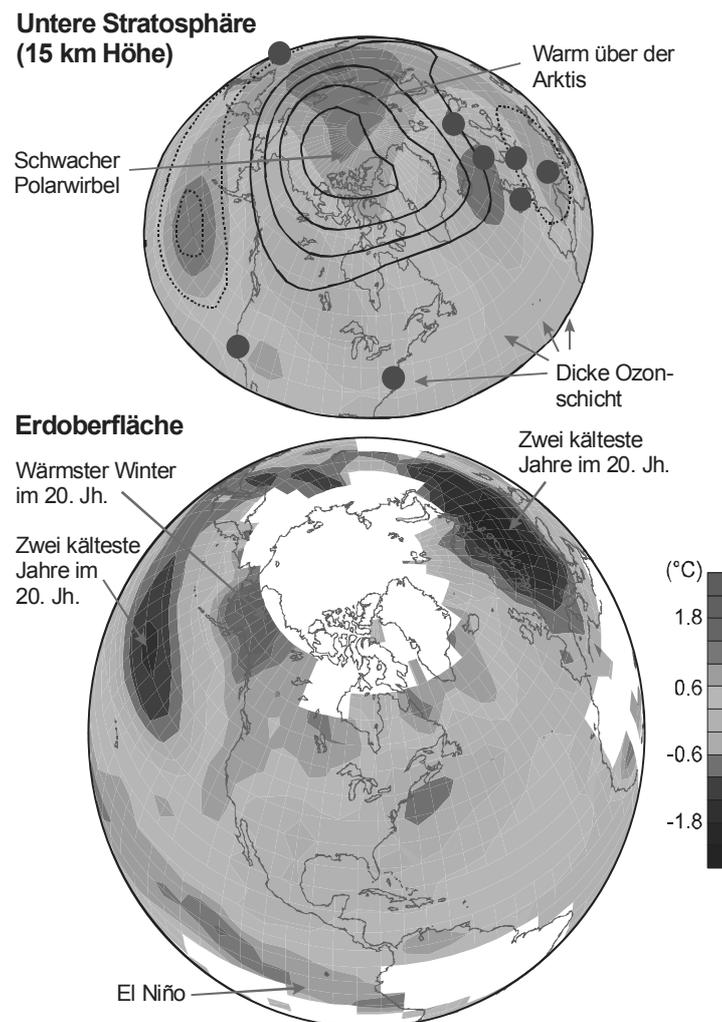


Fig. 93: Anomalien der Temperatur am Erdboden (unten) sowie der Temperatur und der geopotentiellen Höhe (Linien) der 100 hPa Fläche (oben) gemittelt von Januar 1940 bis Februar 1942. Punkte zeigen Gesamtzondationsmessungen an – über allen Stationen wurden erhöhte Gesamtzondationswerte festgestellt (Brönnimann 2005).

Anhand einer Simulation eines gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodells kann gezeigt werden, dass all diese klimatischen Abweichungen, am Boden wie in der Stratosphäre, durch den starken El Niño erklärt werden können. El Niño verändert die Zirkulation der Aussertropen vor allem im pazifisch-amerikanischen Sektor und führt zu einem starken Aleutentief und zu einer Verstärkung des PNA Musters. Diese Auswirkung kann sich als Wellenstörung stromabwärts ausbreiten und Europa erreichen. Die Auswirkung hier ist eine Abschwächung des Islandtiefs, was häufigere arktische Kaltluftvorstöße nach Europa zur Folge hat. Europa ist allerdings weit weg vom Pazifik, so dass das Signal hier nicht immer sichtbar (und auch nicht immer gleich) ist. Doch finden sich ähnliche Abweichungen wie 1940-1942 auch bei anderen El Niños im 20. Jahrhundert (Fig. 94). Ausnahmen sind in erster Linie diejenigen El Niños, welche auf starke tropische Vulkanausbrüche folgten (hier ist bekanntermassen der Effekt gerade umgekehrt: starker Polarwirbel, warme Winter in Europa).

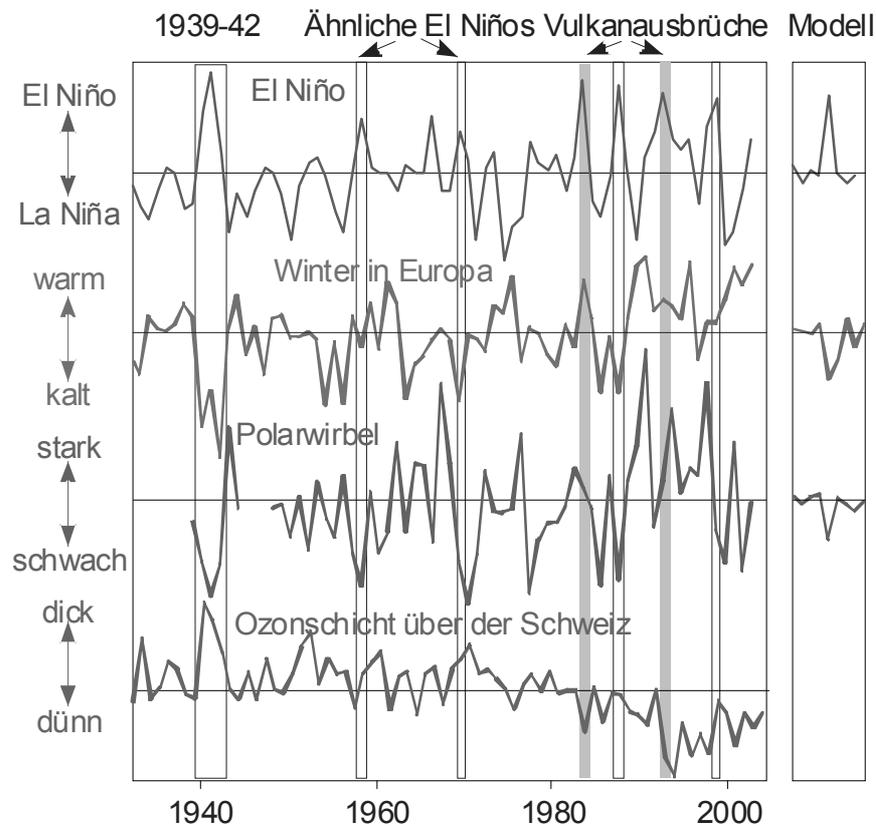


Fig. 94: Zeitreihen des NINO3.4 Index (Mittel Oktober bis September), der Temperatur in Mittel- und Osteuropa (Januar bis April), der Stärke des Polarwirbels auf 100 hPa (Januar bis April), und des Gesamtozons in Arosa (Jahresmittel). Rechts: Selbe Reihen gemittelt während 26 starken El Niño-Ereignissen aus einer Klimamodellsimulation (nach Brönnimann et al. 2004).

Die Auswirkungen auf die Stratosphäre sind auch durch die Veränderung der planetaren Wellenstruktur zu erklären: Mehr planetare Wellenaktivität erreicht die Stratosphäre, schwächt den polaren Vortex und führt zu häufigeren Major Midwinter Warmings. Dadurch wird die stratosphärische Residualzirkulation angetrieben und transportiert mehr Ozon aus den Tropen in die Aussertropen. Somit wirken zwei Einflüsse auf das Gesamtozon: Die Veränderung der planetaren Wellenstruktur in der untersten Stratosphäre (regionale Umverteilung von Ozon – mehr Ozon in Höhenträgen) und die Veränderung der Brewer-Dobson-Zirkulation in der mittleren Stratosphäre.

Zwar beinhaltet das verwendete Modell kein stratosphärisches Ozon, doch sind alle gefundenen Merkmale in den Beobachtungen konsistent mit einem solchen Mechanismus, und im Modell finden sich dazu ebenfalls klare indirekte Hinweise: eine Verstärkung der planetaren Wellenaktivität. El Niño kann somit auch in Europa und in der Stratosphäre extreme Auswirkungen haben. Allerdings haben nicht alle El Niños diese Auswirkungen, und warum das so ist, ist noch nicht bekannt.