4.4. Das Klima der letzten 25 Jahre

In den letzten 25 Jahren hat sich das globale Klima stark verändert. Grund dafür ist in erster Linie der Mensch. Neben der globalen Klimaveränderung gab es aber auch verschiedene grossräumige Klimaschwankungen. In diesem Kapitel wird das Klima der letzten 25 Jahre behandelt. Die Frage des anthropogenen Einflusses wird dabei diskutiert, allerdings nicht als zentrales Thema, da hier andere Vorlesungen mehr bieten. Im ersten Unterkapitel werden die Methoden vorgestellt, die wichtigsten Stichworte für die letzten 25 Jahre sind dabei: Satellitendaten, Reanalysen und Modelle. Anschliessend wird der globale Temperaturverlauf in seiner vertikalen Struktur diskutiert. Wichtige Themen im Bereich grossräumige Klimaschwankungen der letzten 25 Jahre sind El Niño-Ereignisse (es gab mehrere starke Ereignisse in dieser Zeit), Vulkanausbrüche (zwei grosse tropische Ausbrüche: El Chichon und Pinatubo), Veränderungen in der Nordatlantischen Oszillation und in der Dynamik der Stratosphäre und Veränderungen in der Antarktischen Oszillation. Diese Themen werden (ausser den beiden Vulkanausbrüchen, welche bereits in früheren Kapiteln diskutiert worden sind) hier behandelt. Das letzte Unterkapitel handelt von den schweren Dürren in den USA, dem Mittelmeerraum und dem Nahen und Mittleren Osten von ungefähr 1998 bis 2002. In Teilen der USA halten die Dürren immer noch an. Dazu werden Modellsimulationen vorgestellt.

4.4.1. Methoden

Die wichtigste Neuerung in den Daten und Methoden, welche für das Studium der Klimaschwankungen in den letzten 25 Jahren zur Verfügung steht, sind de Satellitendaten. Der erste Wettersatellit (TIROS) wurde 1960 gestartet und lieferte erste Wolkenbilder aus dem All. Es folgten ein Reihe von weiteren Satelliten in den 1960er und 1970er Jahren. Aus heutiger Sicht, und zum Studium von Klimaschwankungen, kann allerdings erst die Periode ab ungefähr 1974 oder spätestens ab 1978 als Satellitenperiode gelten. Seither haben wir eine Fülle von Information über die Temperatur, Strahlung und Zusammensetzung der Atmosphäre. Diese Daten sind vor allem für die Erforschung der Stratosphäre wichtig. Satelliten liefern aber auch Information über die Land- und Ozeanoberfläche, beispielsweise die arktische Meereisfläche (Fig. 95). Satelliten liefern auch präzise quantitative Information über wichtige Forcingfaktoren (spektral aufgelöste Sonnenstrahlung, vulkanische Aerosole).

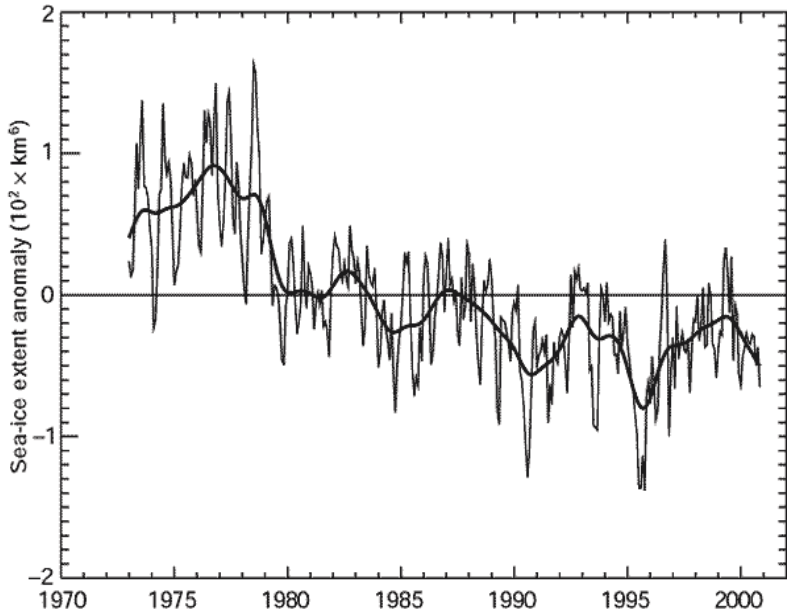

Fig. 95: Arktische Eisbedeckung seit 1973, von Satelliten aus gemessen (IPCC, 2001).

Solche räumliche aufgelöste Information entspricht den Bedürfnissen der Klimamodelle. Entsprechend sind für die letzten 25 Jahre viel bessere Simulationen des atmosphärischen Systems möglich – und die Simulationen können besser validiert und besser mit den Beobachtungen verglichen werden. Oft werden für de letzten 25 Jahre chemische Klimamodelle (Chemical Climate Models, CCM) verwendet, welche die stratosphärische oder auch troposphärische Chemie berücksichtigen und eine Rückkopplung mit dem Klima zulassen. Der Einfluss des Ozonabbaus auf das Klima kann so nachvollzogen werden.

Eine weitere wichtige Methode zum Studium des Klimas der letzten 25 Jahre ist die Reanalyse (vgl. Kapitel 4.3). Dank dem Einbezug von Satellitendaten ab den 1970er Jahren sind die Reanalysen vor allem in höheren Schichten und in den Tropen sehr viel besser geworden.

4.4.2. Der Temperaturverlauf am Boden, in der freien Troposphäre und in der Stratosphäre

Der Verlauf der Temperatur der Erde in verschiedenen Höhenschichten sowie weitere wichtige Reihen sind für die letzten 40 Jahre in Figur 96 dargestellt. Die Stratosphärischen Temperaturen, sowohl aus Radiosonden als auch aus Satelliten, zeigen eine starke Abkühlung über diese Zeit, die durch die starken Vulkanausbrüche (Mt. Agung, El Chichon, Pinatubo) unterbrochen wird.

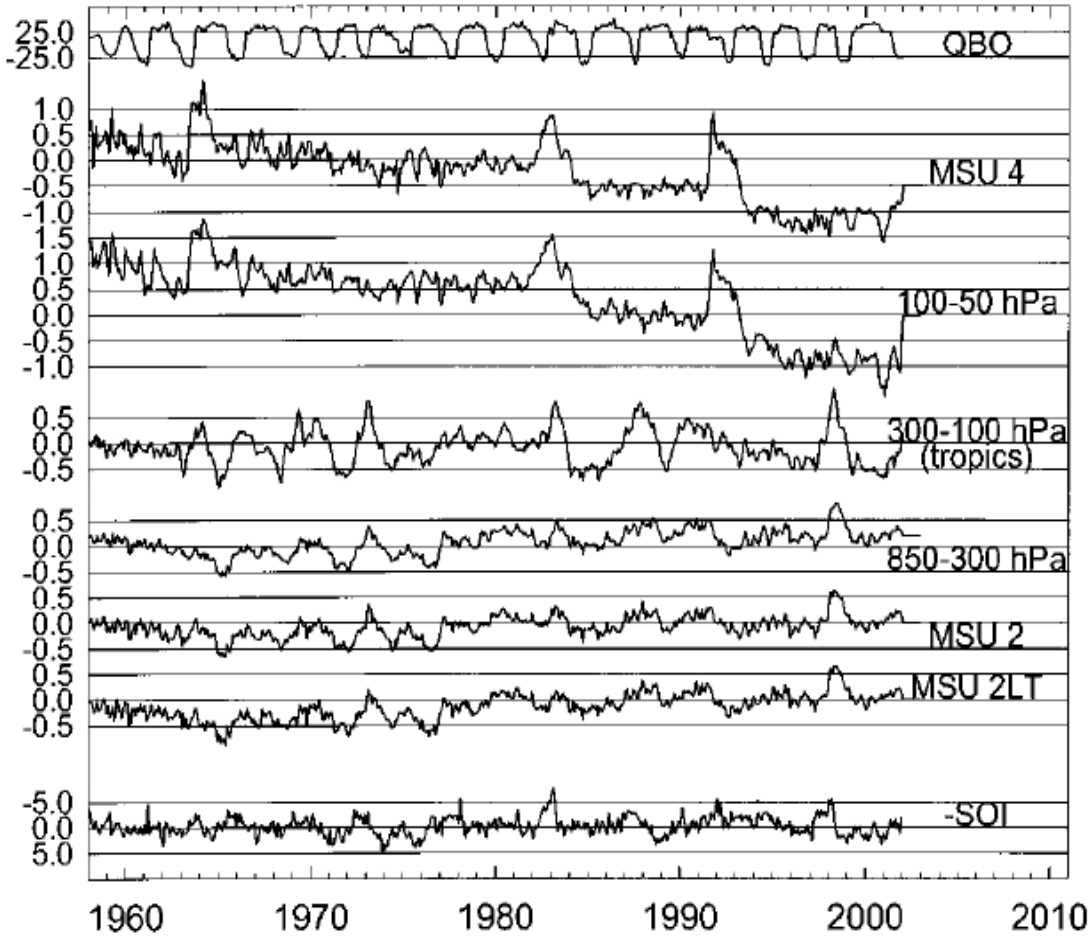

Fig. 96: Zeitreihen der Quasi-Biennial Oscillation (QBO), der globalen Temperatur in der unteren Stratosphäre (MSU 4 Satellitendaten, 100-50 hPa Radiosondendaten), in der tropischen oberen Troposphäre (300-100 hPa, Radiosonden), in der freien Troposphäre (850-300 hPa Radiosondendaten, MSU 2 Satellitendaten), in der unteren Troposphäre (MSU 2LT Satellitendaten) sowie der negative Southern Oscillation Index (Seidel et al. 2003).

In der oberen Troposphäre in den Tropen erscheint kein klarer Trend, hingegen zeigen sich einige kürzere Spitzen. Diese Spitzen erscheinen auch in der globalen freien Troposphäre und in der unteren freien Troposphäre. Hier werden sie überlagert durch einen positiven Trend, eine Zunahme der Temperatur, die dem Trend am Erdboden entspricht und ungefähr die gleiche Grössenordnung hat. Die unterste Kurve zeigt den Southern Oscillation Index (mit umgekehrtem Vorzeichen). Der Vergleich zeigt, dass El Niño Ereignisse der Grund sind für die starken Spitzen in den troposphärischen Reihen.

Der Vergleich zwischen Satellitendaten und Radiosondendaten sorgt seit Jahren für Diskussionsstoff. Die absolute Kalibration von Satellitendaten ist ein Problem, ein weiteres Problem ist die Langzeitstabilität. Die Lebensdauer von Satelliten ist relativ kurz und lange Reihen sind stets aus den Daten mehrere Satelliten zusammengesetzt. Verschiedene Homogenisierungen von Satellitendaten zeigen nicht immer die gleichen Resultate. Auch bei Radiosondendaten ist die Langzeitstabilität ein Problem. Doch gerade die vertikale Struktur des Temperaturtrends ist ein wichtig zur Beurteilung des anthropogenen Einflusses. Man erwartet die grösste Zunahme in der Troposphäre und eine Abkühlung in der Stratosphäre.

Modelle reproduzieren den aktuellen Temperaturtrend am Erdboden sehr gut wenn alle anthropogenen Forcings einbezogen werden. Obschon es auch hier noch viele unbekannte Faktoren gibt (z. B. indirektrer Einflüsse von Aerosolen), ist die Übereinstimmung nicht schlecht. Die Temperaturabnahme in der Stratosphäre wird ebenfalls reproduziert und ist zu einem Tel auf den Treibhauseffekt, zu einem mindestens ebenso grossen Teil aber auf den Rückgang der Ozonschicht zurückzuführen. Dies kann auch Klimaschwankungen am Erdboden zur Folge haben (vgl. Kapitel 4.4.5.).

4.4.3. El Niño und La Niña

Figur 97 zeigt nochmals die globale Mitteltemperatur am Erdboden seit 1970. Neben der starken Zunahme zeigt sich auch eine interannuelle Variabilität. Jahre welche auf starke El Niño-Winter folgen sind dunkel hervorgehoben. Wie bereits oben erwähnt beeinflussen El Niños die globale Mitteltemperatur. Das wärmste Jahr bisher war 1998 – einhergehend mit dem stärksten El Niño-Winter des Jahrhunderts. Auch die anderen El Niño-Jahre zeigen positive Abweichungen (das Jahr 1992 war vor allem wegen des Pinatubo-Ausbruchs kalt).

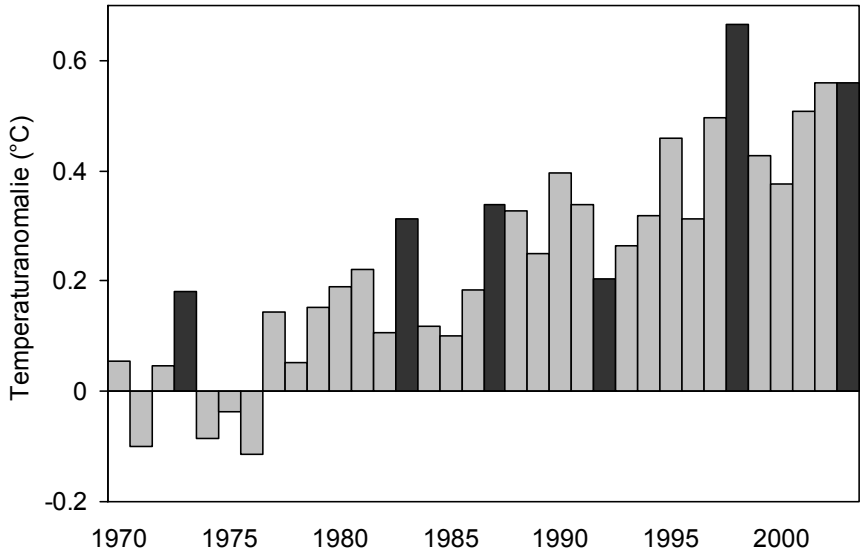

Fig. 97: Abweichungen der globalen Mitteltemperatur (CRU) seit 1970. Jahre welche auf starke El Niño-Winrer folgen sind dunkel gefärbt.

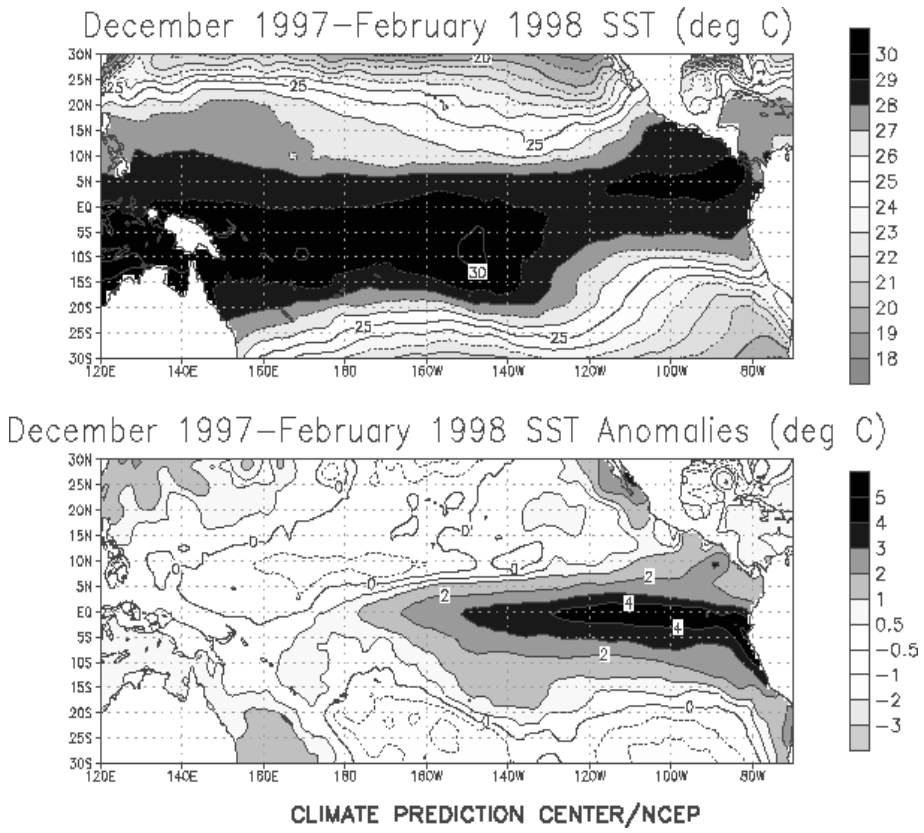

Fig. 98: Meeresoberflächentemperaturen (oben) und Abweichungen vom langjährigen Mittel (unten) für den El Niño-Winter 1997/98.

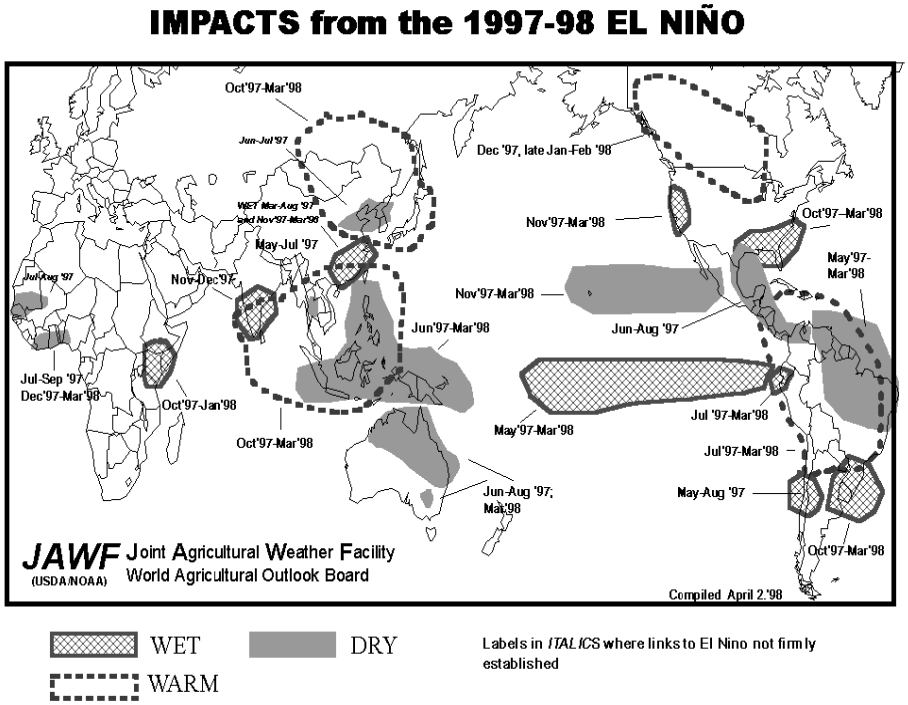

Fig. 99: Auswirkungen des El Niños 1997/98.

Der stärkste El Niño-Winter des 20. Jahrhunderts war vermutlich der Winter 1997/98. Die gemittelten Temperatuanomalien erreichten 5 °C (Fig. 98). Der El Niño zeichnete sich im Frühling 1997 ab und erreichte im Winter 1997/98 Rekordstärke. Das El Niño-Ereignis war

auch ein mediales Thema und führte zu einem regelrechten „El Niño-Hype“. Nach dem sehr starken El Niño 1982/83 mit globalen Auswirkungen zeigte der 1997/98 El Niño, dass solche Ereignisse wiederkehren, dass 1982/83 kein Einzelfall war. Er zeigt auch die Schwierigkeit der Prognose und noch viel mehr die Schwierigkeit, was mit einer Prognose anzufangen ist. Zwar prognostizierten einige Wissenschaftler (u.a. die NOAA) den 1997/98 El Niño bereits im April, aber die Stärke des Ereignisses wurde falsch eingeschätzt, und die Warnungen an die Bevölkerung beispielsweise in Simbabwe, hatten wenig oder sogar negative, marktverzerrende Auswirkungen.

Figur 99 zeigt die globalen klimatischen Auswirkungen dieses Jahrhundert-El Niños. Er führte zu Tausenden von Toten und Verletzten durch schwere Stürme, Hitzewellen, Feuer, Überflutung und Dürre und einem geschätzten Schaden in der Höhe von 32-96 Mrd. US$. Seit diesem Ereignis gab es keinen starken El Niño mehr.

4.4.4 Die Nordatlantische Oszillation

Der Verlauf des Nordatlantischen Oszillationsindexes (NAOI) seit 1960 ist in Figur 100 gezeigt. Charakteristisches Merkmal ist die Zunahme über dese Zeit, ein Trend von negativem hin zu positivem NAOI. Vergleiche mit NAO-Rekonstruktionen (vgl. Kapitel 4.1. und 4.2.) der letzten 350 Jahre zeigen, dass es zwar schon früher interdekadale Schwankungen gab, dass aber der Anstieg in den letzten 30 Jahren doch in seiner Stärke wohl einmalig war.

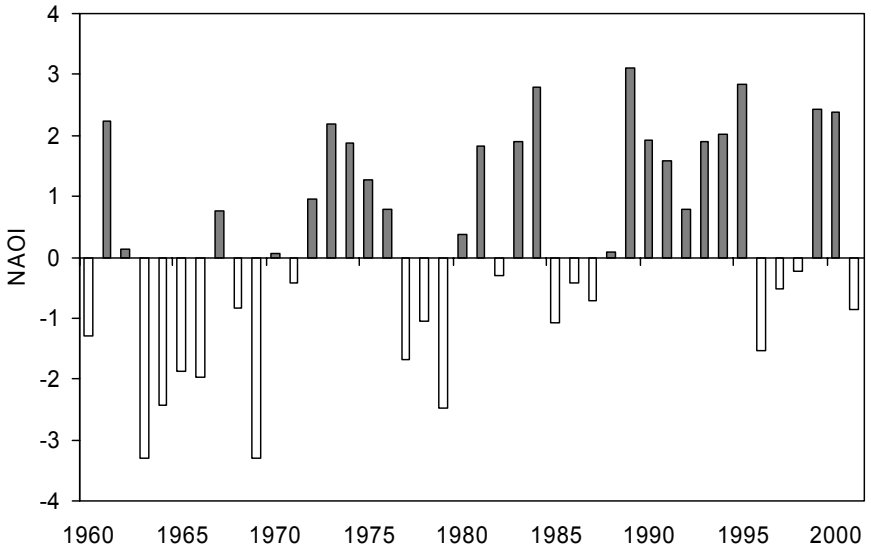

Fig. 99: Verlauf des Nordatlantischen Oszillationsindexes (NAOI) im Winter (Dez. bis Feb.) seit 1960.

Interessant dabei ist, dass verschiedene Klimamodelle mit erhöhtem Treibhausgasforcing eine Tendenz zu einem positiven Modus der NAO zeigen. Ist dieser Trend in den letzten Jahrzehnten also bereits eine Erscheinung des Treibhauseffekts? Zumindest ist die Tendenz in Übereinstimmung mit dieser Hypothese.

Zum Schluss dieses Unterkapitels soll noch ein Blick auf die stratosphärische Zirkulation geworfen werden. Auch hier gab es in den letzten Jahrzehnten prägnante Schwankungen. So waren die letzten 4 Winter in der arktischen Stratosphäre recht warm, während vorher eine Tendenz zu sehr kalten Wintern zu beobachten gewesen war. Schwankungen gab es auch im „Wave-driving“ der Stratosphäre, das heisst der Stärke der Brewer-Dobson Zirkulation. Die

Veränderung des stratosphärischen Ozons in nördlichen Breiten korrelierte in den letzten 20 Jahren gut mit Grössen des „Wave-drivings“ wie beispielsweise dem meridionalen Eddy-Wärmefluss auf 100 hPa. Dieser ist wiederum verknüpft mit der Zirkulation der Troposphäre. Anders als beim NAO ist hier allerdings kein klarer Trend auszumachen.

4.4.5. Die Antarktische Oszillation

Ähnlich wie der NAO zeigt auch die Antarktische Oszillation, der wichtigste Zirkulationsmodus der südlichen Aussertropen, eine Zunahme in den letzten Jahren (Fig. 100). Diese Zunahme ist verbunden mit einer Abnahme der Temperatur am Erdboden in weiten Teilen der Antarktis (Fig. 101), was wiederum in der ganzen „global Warming“ Diskussion ein wichtiges Diskussionsthema ist. Es stellt sich auch hier die Frage, inwiefern diese Zunahme natürlich ist oder nicht. Über die Geschichte der Zirkulation über der Antarktis ist wegen der fast völlig fehlenden Messungen vor 1957 viel weniger bekannt als beim NAO. Eine kürzlich erschienene Arbeit zeigt anhand von Rekonstruktionen, dass es in der Vergangenheit bereits einmal eine ähnlich starke Zunahme gab, in den 1940er und 1950er Jahren. Die Zunahme der letzten Jahre ist allerdings auch in sehr guter Übereinstimmung mit dem Einfluss des Ozonlochs in den letzten Jahrzehnten. Wegen des fehlenden Ozons erwartet man eine kältere polare Stratosphäre und damit einen stärkerer Wirbel und damit einen Trend hin zu einem positivem Antarktischen Oszillationsindex (Fig. 101). Dies wiederum führt zu einer Abkühlung am Erdboden.

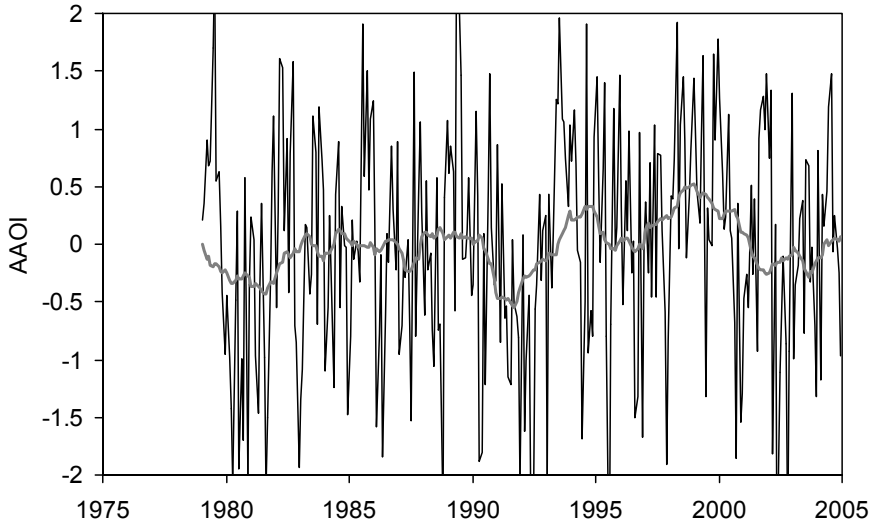

Fig. 100: Verlauf des Antarktischen Oszillationsindexes (AAOI) seit 1978 sowie geglättete Kurve.

Eine umgekehrte Tendenz zeigt dagegen der meridionale Eddy-Wärmefluss. Zwar ist die Datenqualität hier unsicher, vor allem was die langfristige Skala angeht, doch ist interessanterweise ein positiver Trend festzustellen. Das heisst, dass der Polarwirbel immer stärker durch planetare Wellenaktivität gestört wird. Der Wirbel ist in der Antarktis normalerweise viel stabiler als über der Arktis, „Major Warmings“ schienen hier nicht vorzukommen. Im September 2002 wurde jetzt zum ersten Mal überhaupt ein Major Midwinter Warming über der Antarktis beobachtet. Während dieses Ereignisses spaltete sich das Ozonloch in zwei Teile auf, der Ozonabbau war insgesamt viel schwächer ausgeprägt als in anderen Jahren. Dieses Major Warming wurde durch ungewöhnliche Wellenaktivität ausgelöst und ist in Übereinstimmung mit dem Trend hin zu einem stärkeren „Wave-driving“.

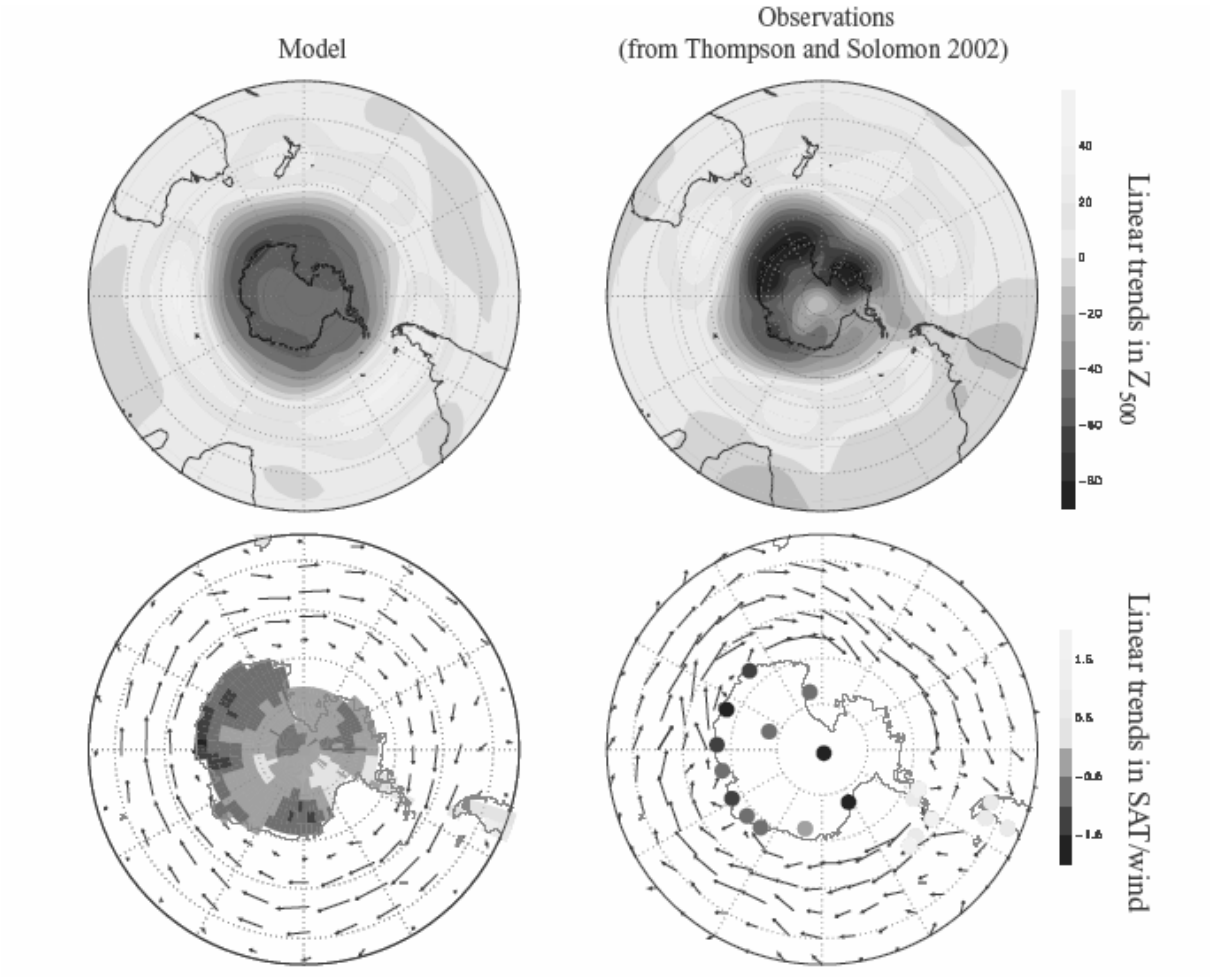

Fig. 101: Trends (Dezember-Mai) der geopotentiellen Höhe der 500 hPa Fläche (oben) sowie der Temperatur und des Windes am Erdboden aus Beobachtungen (rechts, 1979-2000 für Z500 und Wind, 1962-2000 für Temperatur) und aus einer Modellsimulation mit Vorgabe des Ozonabbaus (links, Dezember bis Februar, Differenz zwischen „normaler“ und „gestörter“ Ozonschicht) (aus Gillet und Thompson, 2003).

4.4.6. Die anhaltende Dürre 1998-2004

Eine der prägnantesten Klimaschwankungen der letzten Jahre war die Dürre, welche den Süden der USA, den Mittelmeerraum und den nahen und mittleren Osten betraf und von 1998 bis mindestens 2002 dauerte. In einigen Regionen, so im Südwesten der USA, hält die Dürre noch immer an. Figur 102 zeigt einen verbreiteten Dürre Index (Palmer Hydrologic Drought Index oder PHDI) für den Südwesten der USA, 1900 bis 2004. Die jetzige Dürre war eine der stärksten in diesem Zeitraum und ist nur vergleichbar mit den Dürren zu Beginn des 20. Jahrhunderts und in den 1950er Jahren. Die Folgen der Dürre sind aus ökonomischer Sicht nicht vergleichbar mit den 1930er „Dust Bowl“-Dürren. Sie hatten trotzdem grosse Auswirkungen für Millionen von Menschen. Die mittleren Temperatur- und Niederschlagsanomalien der Zeit Juni 1998 bis Mai 2002 wurden bereits in Kapitel 1 in Figur 1 gezeigt. Die negativen Niederschlagsanomalien im subtropischen Raum von Nordamerika bis Zentralasien waren begleitet von überdurchschnittlichen Temperaturen im selben Raum. Dagegen waren die Temperaturen niedrig im östlichen tropischen Pazifik, hoch im Westpazifik. Hier herrschte während dieser Zeit ein La Niña-Phänomen (Fig. 103 oben).

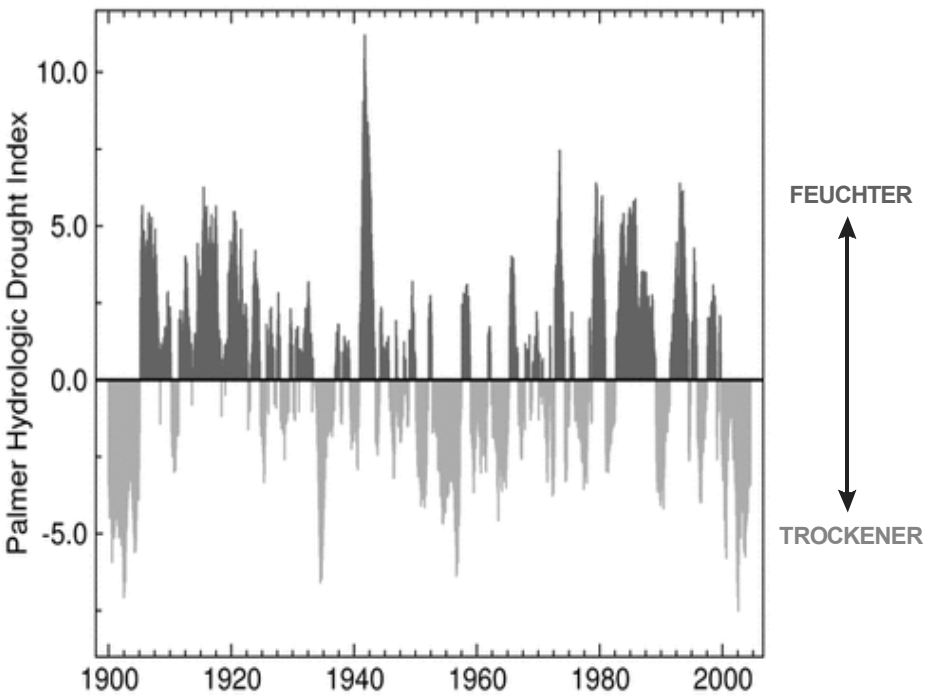

Fig. 102: Verlauf des Palmer Hydrologic Drought Index für den Südwesten der USA, 1900-2004 (NOAA).

Eine grosse Anzahl Modellsimulationen mit verschiedenen Modellen, bei welchen die beobachteten Meeresoberflächentemperaturen als Randbedingungen vorgegeben wurden, reproduzierten die Temperatur- und Niederschlagsanomalien und damit die Dürren recht gut (Fig. 103, unten). Auch hier dürfte also, wie auch für die „Dust Bowl"-Dürren und für die Sahel-Dürren vermutet, das grossräumige ozeanische Forcing eine wichtige Rolle gespielt haben. Die unmittelbare Ursache der Dürren waren Änderungen der Strömungsverhältnisse im Tropopausenbereich (200 hPa), wo sich rund um den Globus in den Mittelbreiten ein Hochdruckgürtel zeigte. Auch dieses Merkmal wurde von den Modellen recht gut reproduziert. Sensitivitätsanalysen zeigten, dass sowohl der warme westliche tropische Pazifik als auch der kalte östliche tropische Pazifik einzeln zu den Dürren beitrugen. Das Anomaliemuster der Meeresoberflächentemperaturen war vergleichbar, aber nicht ganz identisch, mit dem Muster, welches für die „Dust Bowl"-Dürren gefunden wurde (vgl. Kapitel 4.3). In beiden Fällen waren es La Niña-ähnliche Situationen.

Die Erwärmung des westlichen tropischen Pazifiks und des Indischen Ozeans (vgl. Fig. 103, oben) war extrem und könnte bereits die Folge des anthropogenen Treibhauseffekts sein. Langanhaltende Dürren werden in einem Treibhausklima gemäss verschiedenen Modellsimulationen häufiger werden. Die Dürre 1998-2004 war möglicherweise typisch für das kommende Klima. Wichtig sind die Erkenntnisse aber auch für die saisonale Vorhersage, da sich die Meeresoberflächentemperaturen im Pazifik nicht schnell ändern und damit vorhersagbar sind.

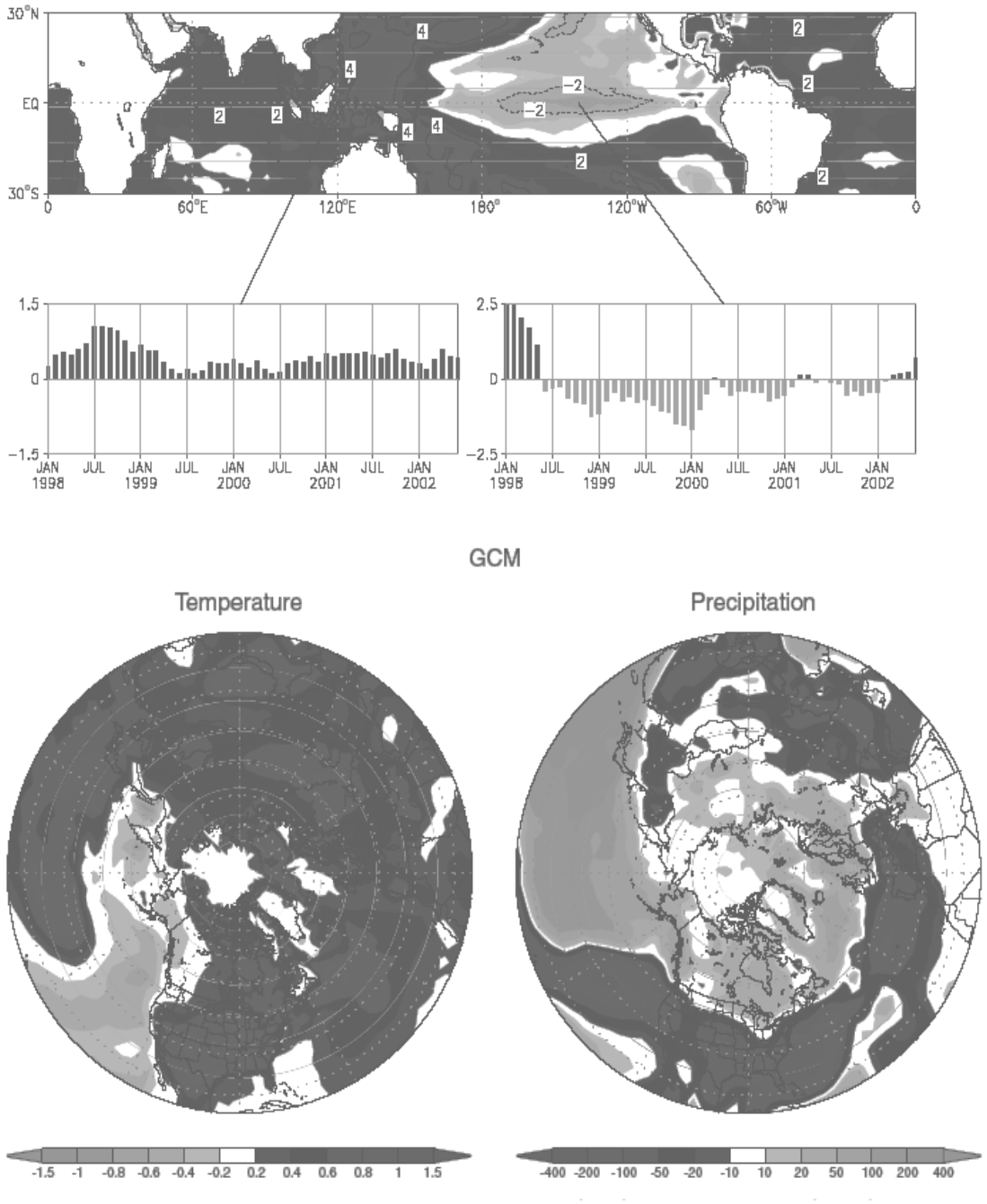

Fig. 103: Oben: Abweichungen der Meeresoberflächentemperaturen in der Zeit Juni 1998 bis Mai 2002 in den Tropen. Mitte: Verlauf der monatlichen Temperaturanomalien im westlichen tropischen Pazifik (links) und im östlichen tropischen Pazifik (rechts). Unten: Abweichungen der Temperatur (links, °C) und des Niederschlag (rechts, mm), gemittelt für die Zeit Juni 1998 bis Mai 2002. (aus Hoerling und Kumar 2003).