

BAYERISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN
MATHEMATISCH-NATURWISSENSCHAFTLICHE KLASSE

SITZUNGSBERICHTE

JAHRGANG

1997

MÜNCHEN 1997

VERLAG DER BAYERISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN

In Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München

El Niño

Eine Meeresströmung verändert Klima und Umwelt

mit 12 Abbildungen

Von **Wilhelm Lauer** (Bonn)

Öffentlicher Vortrag vom 4. November 1996

In den letzten Jahrzehnten wird mit Hilfe globaler Modellrechnungen und Fernerkundungsmethoden nach steuernden Phänomenen großräumiger Witterungsanomalien gesucht, die letztlich zu globalen Klimaschwankungen führen. In zunehmendem Maße wird das Augenmerk auf die Interaktion von Vorgängen zwischen der Atmosphäre und den Meeresströmungen gerichtet. Dies ist verständlich, wenn man bedenkt, daß das Meer 71% der Erdoberfläche einnimmt, wo die fundamentalen Parameter des Strahlungs-, Wärme- und Wasserhaushalts großen Einfluß auf die planetarische Zirkulation der Atmosphäre mit ihren jahrezeitlichen Verlagerungen und ihren episodischen Anomalien ausüben und damit das Klima bestimmen. Ein wesentliches Beispiel ist das sog. El Niño-Phänomen.

Unter der Bezeichnung El Niño verbirgt sich ein kleiner warmer Meeresstrom, der in der Regel zur Weihnachtszeit vor der Südküste von Ecuador auftaucht, angetrieben durch Nordwinde, die ihrerseits die sommerliche Regenzeit einleiten. Küstenfischer haben ihn El Niño-Strom getauft (*Corriente del Niño*, Christkindstrom). Er beendet die Fangzeit für kaltwasser-adaptierte Meeresfrüchte aus der sonst vorherrschenden kühlen Humboldtströmung und leitet die Fangzeit für schmackhafte Warmwasserfische ein.

Im Abstand von 7–10 Jahren sorgt das „Christkind“ aber für Unruhe, wenn die Warmwasserzunge an der peruanischen Nordküste weit nach Süden ausgreift und für längere Zeit die übliche,

durch kalte Auftriebswässer gekennzeichnete nährstoffreiche Humboldtströmung fast völlig verdrängt, zugleich die Atmosphäre erwärmt und ungewöhnliche, katastrophenartige Niederschlagsprozesse auslöst. In der wüstenhaften Kontrastlandschaft verändert sich sowohl das terrestrische als auch infolge der Verdrängung des kalten Humboldtstroms das marine Ökosystem gründlich.

Hat man das El Niño-Phänomen bis vor wenigen Jahrzehnten noch als eine örtliche Erscheinung angesehen, so weiß man heute, daß dies nur ein kleiner Teil eines großräumig gesteuerten Systems ist, das sich im gesamten pazifischen Ozean zwischen Indonesien und Südamerika abspielt. Es wird als „*El Niño Southern Oscillation* (ENSO)“ bezeichnet.

Dieser Anomalie schreibt man heute sehr große Wirkung auf das gesamte irdische Klimasystem zu (sog. Telekonnektionen), da besonders durch das Erwärmen der tropischen Ozeane Impulse in die atmosphärische Zirkulation gegeben werden, die zu einer Intensivierung der Energie in der Atmosphäre führen und auf dem Erdball weiträumig wirksam werden.

Die wissenschaftliche Diskussion begann mit einem katastrophenartigen Niño-Ereignis 1891. Erst 1925, wiederum beim Auftreten eines intensiven Niños, erkannte man, daß der Niño-Strom durch eine Südschwenkung der äquatorialen Gegenströmung vor der Küste Ecuadors die tropischen Wassermassen nach Süden führte und den kalten Humboldt-Strom zum Teil verdrängte (MURPHY 1926, G. SCHOTT 1931, C. TROLL 1930). Seitdem ist das volle Ausmaß der Zusammenhänge um den Begriff El Niño in die wissenschaftliche Literatur eingegangen als ein großregionales, bedeutendes Klimaphänomen.

Die Erklärung des El Niño-Phänomens als eine weltumspannende Erscheinung ging von dem englischen Meteorologen Gilbert WALKER (1923) aus, der die später nach ihm benannte Walker-Zirkulation entdeckte. Sie umkreist die Erde in der Tropenzone beiderseits des Äquators. Sie bildet mehrere Zirkulationszellen je nach Verteilung der Tief- und Hochdruckgebiete (Abb. 1). Der norwegische Meteorologe J. BJERKNES war es, der 1966 das lokale El Niño-Phänomen mit der „Südlichen Schwankung“ der atmosphärischen Zirkulation längs des Äquators im pazifischen Ozean eng verbunden sah.

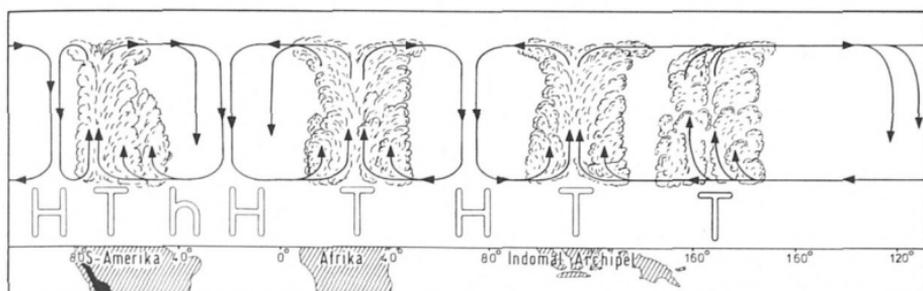


Abb. 1: Schematische Darstellung der Walker-Zirkulation

Die Walker-Zirkulation im pazifischen Ozean wird im *Normalfall* durch das südostpazifische Hochdrucksystem und das umfangreiche Tiefdruckgebiet im indomalayischen Archipel gesteuert (Abb. 2). Diese Situation bedingt eine kräftige Ost-West-gerichtete, bodennahe Passatströmung zwischen der peruanischen Küste und dem indomalayischen Archipel. Die absinkenden Luftmassen über der peruanischen Küste verursachen exzessive Trockenheit. Die konvektiven Prozesse im indomalayischen Archipel bewirken über dem westpazifischen Ozean intensive Wolkenbildung und kräftige Niederschläge (Abb. 3). Der steife SE-Passat über dem Pazifik verfrachtet riesige Warmwassermassen in Richtung Westen (*Windschub*) mit der Konsequenz, daß an der peruanischen Küste kaltes ozeanisches Tiefenwasser an der Meeresoberfläche aufquillt (*upwelling*) unter Anhebung der „*Thermokline*“, dem Dichtesprung zwischen dem wärmeren Oberflächenwasser und den kalten Tiefenwässern. Zugleich sinkt der mittlere Wasserspiegel um ca. 20 cm unter Normalnull. An den E-Küsten Indomalaysiens und Australiens kommt es zu Stau warmen Wassers mit einem Meeresspiegelanstieg um 50 cm ü. NN. Zugleich wird im Westpazifik durch den Wasserstau die Thermokline um 200 m abgesenkt. Die mittlere Oberflächentemperatur der kühlen Humboldt-Strömung beträgt an der Küste von Peru ca. 20 °C. Sie mündet in den Südäquatorialstrom ein, der sich dann auf dem Weg in den indomalayischen Archipel im Normalfall beständig auf bis zu 30 °C erwärmt.

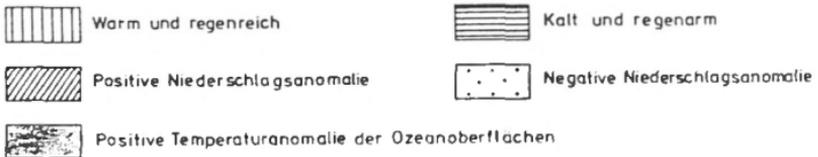
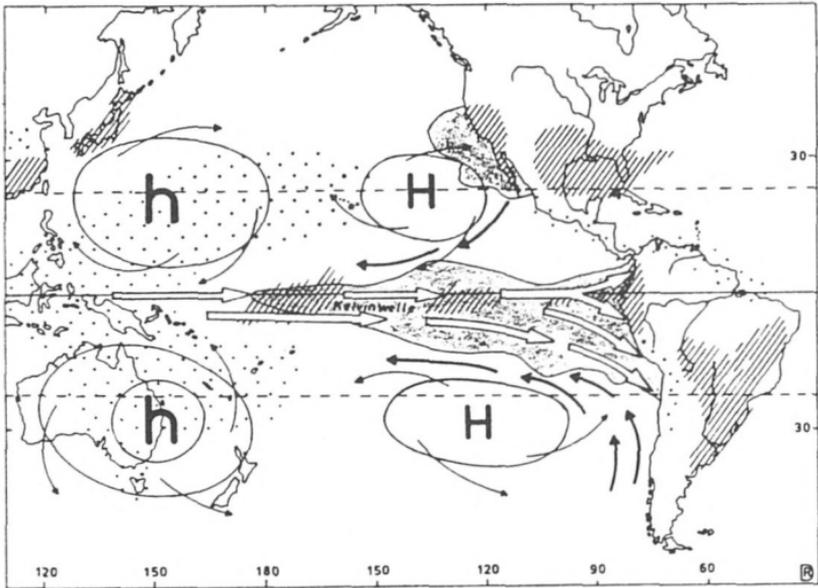
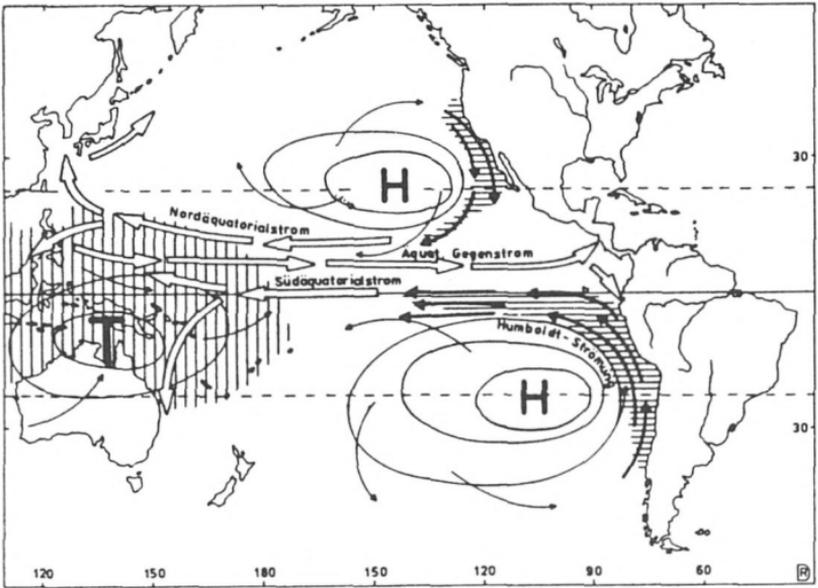


Abb. 2: Schematische Darstellung der Walker-Zirkulation mit den Meeresströmungen (oben), die Umkehr der Zirkulation und das Verhalten des Wasserkörpers sowie Telekonnektionen während der Niño-Phase 1982/83 (unten)

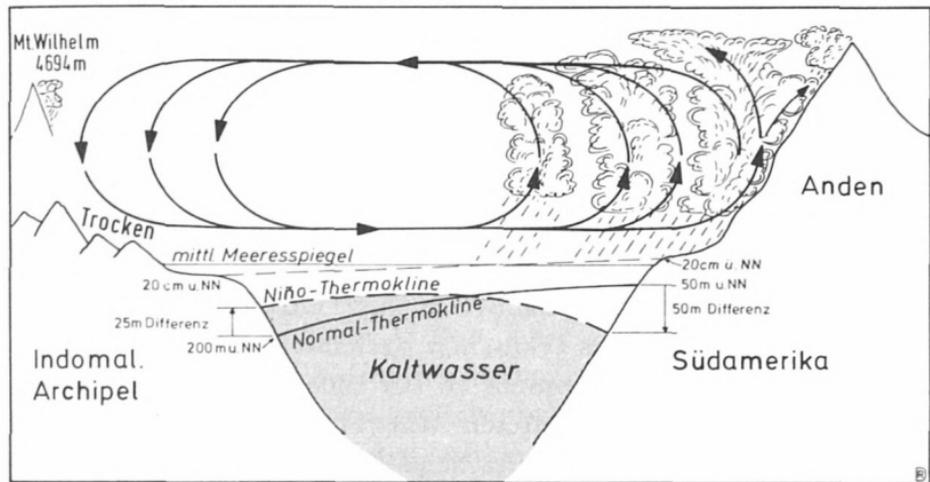
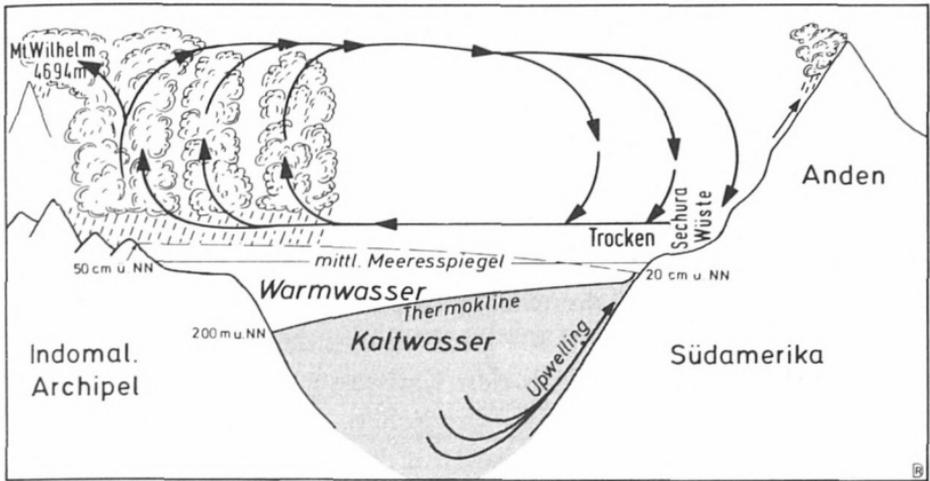


Abb. 3: Schematische Darstellung des *El Niño Southern Oscillation*-Phänomens und die Konfiguration von Kalt- und Warmwasserkörpern im Pazifischen Ozean während einer normalen Walker-Zirkulation (oben) und die Veränderungen während einer Niño-Phase (unten) (verändert nach ROEDEL 1992)

Die Walker-Zirkulation ist im allgemeinen stabil. Dennoch kippt das Ozean-Atmosphären-System im Abstand von ca. 7–10 Jahren ohne erkennbare Regelmäßigkeit um (*El Niño-Fall*), und zwar durch eine Verschiebung der atmosphärischen Zirkulation, verbunden mit einer Verlagerung der innertropischen Konvergenzzone auf die Südseite des Äquators (*southern oscillation*) als Folge einer Verminderung des Druckgegensatzes zwischen dem abgeschwächten südpazifischen Hoch und dem asiatisch-australischen Tief. Der

Ost-West-gerichtete SE-Passat schwächt sich ab und kommt fast zum Erliegen (Abb. 2, 3 unten). Während dieser Niño-Phase verlagert sich die Warmwasserbedeckung vom indomalayischen Archipel mit einer West-Ost-gerichteten Welle (*Kelvinwelle*) innerhalb des äquatorialen Gegenstroms unmittelbar südlich des Äquators bis an die südamerikanische Westküste und speist den dort südgerichteten El Niño-Strom entlang der Küste Ecuadors und Perus. Die Oberflächenwassertemperatur steigt dann in diesem Bereich sukzessive bis auf 30° an. Dabei sinkt die *Thermokline* ab und unterbindet fast vollends den Kaltwasserauftrieb (vgl. Abb. 3, unten). Über dem Ostpazifik – zwischen der Datumsgrenze und der Küste von Peru – kommt es dann durch intensive Konvektion über der leicht gestauten Warmwasserschicht, die sogar den mittleren Wasserspiegel um einige Dezimeter erhöht, zu sehr hohen Niederschlägen über den wüstenhaften Landstrichen der nordperuanischen Küstenlandschaften (Abb. 2, unten). Zur gleichen Zeit herrscht im indomalayischen Archipel und in Ostaustralien länger andauernde Trockenheit, verursacht durch divergente Höhenströmung, die über der Meeresoberfläche als monsunartiger Westwind in das zentrale Niederschlagsgebiet über dem mittleren und östlichen Pazifik bis zur peruanischen Küste einströmt.

Die Asymmetrie dieses zyklischen Verhaltens, d. h. das seltenere Auftreten des Niño-Phänomens an der südamerikanischen Westküste und das geringe Eintreten von Trockenheit im indomalayischen Archipel im Sinne der Schaukelbewegung ist sicher bedingt durch die Erddrehung von West nach Ost, bei der das Überwiegen des SE-pazifischen Hochdrucks und des indomalayischen Niederdrucks der Regelfall ist und das Niño-Phänomen seine Abweichung. Das läßt sich auch daran ablesen, daß die Westküste von Peru eine Trockenwüste und Indonesien ein Archipel höchster Niederschläge auf der Erde ist.

Große Wirkungen des El Niño-Phänomens sind immer nur dann gegeben, wenn der sog. *Southern Oscillation Index (SOI)* zwischen den beiden Druckgebilden Ostpazifik und Indonesien negative Werte aufweist; positive Werte bestimmen den Normalfall (Abb. 4).

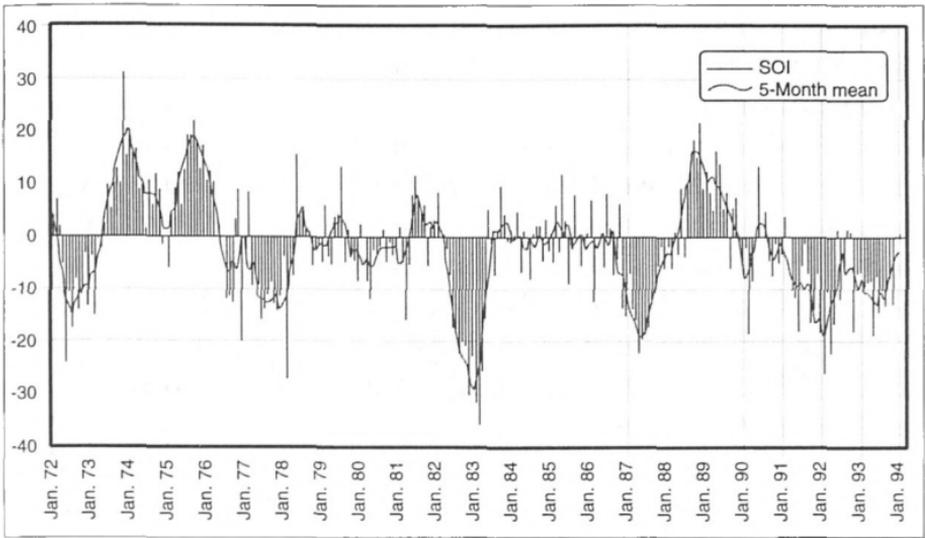


Abb. 4: Southern Oscillation Index zwischen 1972 und 1994 (n. World Meteorological Organisation, 1994)

Die dargelegte Beschreibung betrifft die auffälligen Gegensätze zwischen Normalfall und einem sog. Super-Niño. Nach Studien der Forschergruppe von W.H. QUINN gab es in den letzten 100 Jahren drei „sehr strenge“ Niño-Ereignisse (1891/92, 1925/26 und 1982/83), die auch als Super-Niños bezeichnet werden. „Strenge“ Niños gab es in den Jahren 1939, 1941, 1957/58, 1972/73 und 1992/93. Vergleicht man sie in ihrer Wirkung untereinander, so waren sie dennoch unterschiedlich in ihrem räumlichen Ausmaß und in ihrer Wirkung auf die terrestrischen und marinen Ökosysteme.

Der Typ des Super-Niño am Beispiel von 1982/83 basierte auf der fast völligen Umkehr des passatischen Windfeldes von Ost nach West zu einem West-Ost-gerichteten monsonalen Windsystem, wodurch eine starke Kelvinwelle mit Wassertemperaturwerten um 30° die Westküste Perus überflutete. „Moderate“ Niño-Ereignisse basieren auf einer Schwäche der Passate im Westpazifik, wodurch die Kelvinwelle häufig durch den fehlenden Winddruck im äquatorialen Warmwasser-Gegenstrom bei schwacher *southern oscillation* gerade noch die südamerikanische Küste südlich des Äquators erreicht. Diese Konstellation tritt periodisch häufiger auf. Die Erwärmung an der peruanischen Küste hält sich dann in Grenzen. Die unmittelbare Wirksamkeit des Niño-

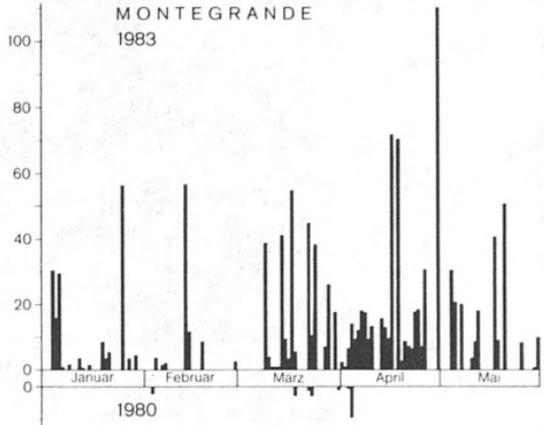
Phänomens betrifft vor allem die regenarmen Gebiete der halbwüstenhaften Regionen im nördlichen Peru.

CAVIEDES und ENDLICHER (1989) haben an 25 Stationen dieses Gebietes Niederschläge eines Normaljahres am Beispiel von 1980 und denen des Super Niño-Jahres 1982/83 vergleichend gegenübergestellt. Das Beispiel dreier Stationen zeigt (Abb. 5), daß in Normaljahren an den Berghängen der Anden die maximalen, im ganzen spärlichen Niederschlagsmengen zwischen 2700 und 3000 ü. NN gemessen werden. Während der Niño-Phasen fallen hingegen die Spitzenwerte mitten in der Küstenwüste, wo sich durch den hohen Wasserdampfgehalt über der nunmehr warmen Meeresströmung konvektive Wolken-Cluster vom Cumulonimbus-Typ entwickeln und sich schon vor dem Andengebirge entladen.

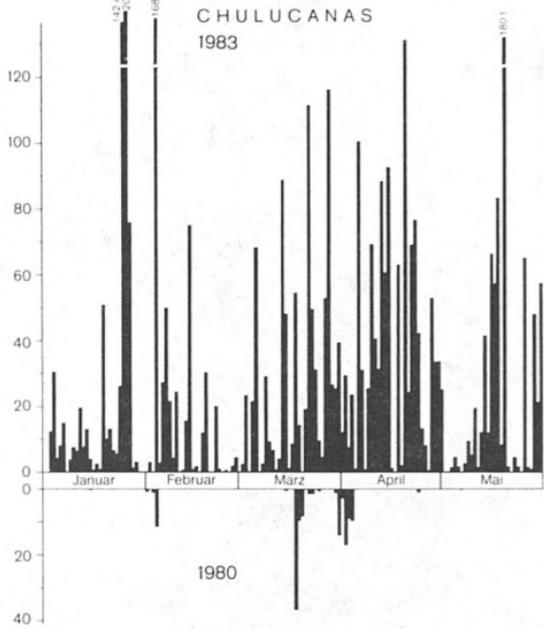
In der Sechura-Halbwüste nahe der Küste steigerte sich während des Niño-Ereignisses 1982/83 die Niederschlagsmenge um 5000% (von 15 auf 1000–2000 mm). Im Hochland der Kordillere wurde ein 50%-iger Überschuß gemessen (ca. 200–300 mm). An der Ostabdachung Ecuadors gingen die Regenmengen hingegen um 11% zurück (BENDIX 1994).

Unsere Bonner Arbeitsgruppe (Jörg und Astrid BENDIX) hat sich im Rahmen der Kommission für Erdwissenschaftliche Forschung der Mainzer Akademie den Niederschlagsereignissen während des Niño-Jahres 1992 gewidmet und eine Reihe von Ergebnissen mit Hilfe des Vergleichs der digitalen Auswertung von Satellitenbildern und Daten der Bodenstationen erzielt. Über eine Analyse der Oberflächentemperatur der Wolken ließen sich mit Hilfe von Satellitenbildern Regenmengen und die Andauer von Niederschlagsereignissen ermitteln, zugleich die räumliche Verteilung der positiven Niederschlagsanomalien von der Küste über das Hochland und den Ostabhang zum Amazonas hin feststellen und schließlich die genetischen Ursachen der Niederschlagsereignisse während der Niño-Phase herausfinden (Abb. 6).

Küstenwüste
 $5^{\circ} 21' S - 80^{\circ} 43' W$
 27 m NN



Bergfuß der Anden
 $5^{\circ} 06' S - 80^{\circ} 10' W$
 95 m NN



Hochkordillere
 $4^{\circ} 55' S - 79^{\circ} 51' W$
 3010 m NN

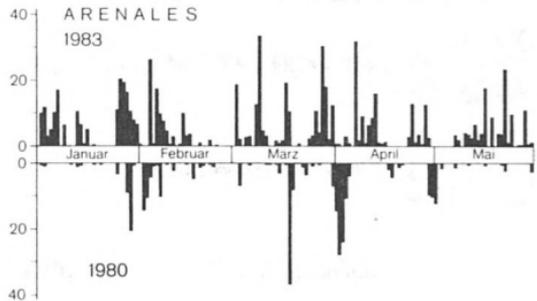


Abb. 5: Tagesniederschläge von Januar bis Mai 1980 und 1983 an drei Stationen von Nordperu (aus Caviedes/Endlicher 1989)

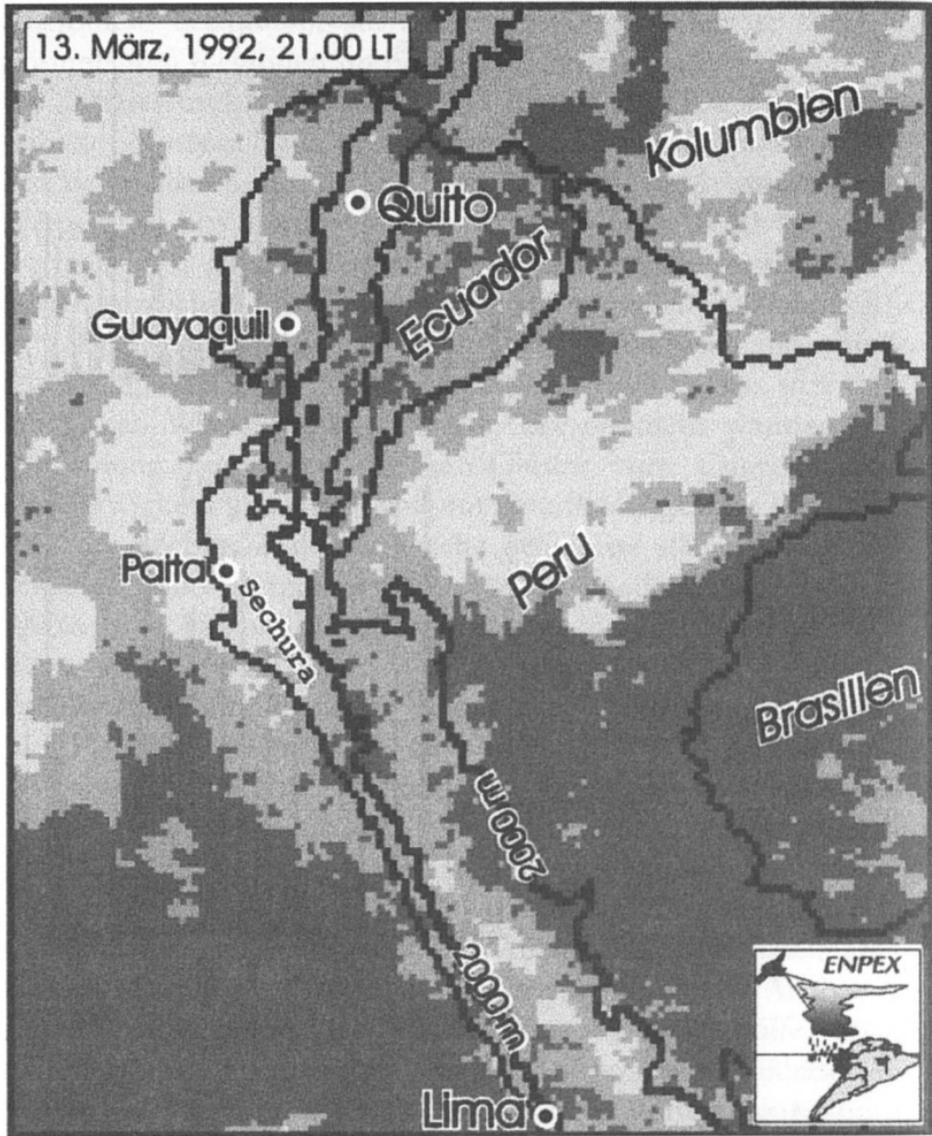


Abb. 6: Satelliten-Szene vom 13. März 1992 (21.00 Uhr Ortszeit) mit hochreichenden Konvektionszellen über der Sechura-Wüste (Bildverarbeitung A. BENDIX)

Extremniederschläge fallen in der Regel aus hochreichenden Cumulonimbus-Wolken, in deren oberem Eisschirm sehr mächtige Eiskristalle heranwachsen, so daß aus einer Wolke mit einer Oberflächentemperatur von ca. 233 K ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) mit großer Sicherheit heftige Regen niedergehen. Sie erreichen in der vollen Ausbildungsphase sogar Oberflächentemperaturen von $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ und können im Satellitenbild gut abgegrenzt und deren Niederschlagsbürtigkeit ermittelt werden. Je kälter die Oberflächentemperatur der Wolke ist, um so größer wird die Menge der Niederschläge.

Genetische Ursachen der Niederschlagsanomalien mit den äußerst regenbeladenen Clusterbildungen lassen sich aus der freiwerdenden Wärmeenergie bei den hohen Oberflächentemperaturen des Küstenwassers herleiten (vgl. BENDIX 1994: 62). Es ist bekannt, daß aufgrund des exponentiellen Verhältnisses von spezifischer Feuchte bei Sättigung der Luft und einer Meeresoberflächentemperatur von mehr als ca. $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ keine nennenswerte Steigerung der Verdunstung mehr möglich ist, so daß bei dieser Oberflächentemperatur des Meeres und auch des nahen Landes fühlbare Wärme an die Luft abgegeben wird. Ein interessantes Ergebnis war es daher, daß man mit Hilfe der Satellitenbild-Klimatologie die Konstellation der Verteilung von Wolkenclustern für einzelne Phasen mit dem Verlauf der $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ -Isotherme in den Niño-Phasen 1971/72, 1982/83 und 1992 parallelisieren konnte (BENDIX 1994: 62). Es stellte sich heraus, daß die regionale Verbreitung der Oberflächentemperatur an der Küste in deutlichem Zusammenhang mit der Häufung und Ergiebigkeit der Wolkencluster über dem Küstenstreifen steht.

Die große Wasserdampfmenge im Bereich der Niño-Strömung vor der Küste von Ecuador und Peru regt die regenreiche Monsoon-Zirkulation kräftig an. Reste von Kaltwasserlinsen des Humboldt-Stroms sind gleichfalls in die energetischen Prozesse der Konvektion eingeschaltet.

Auswirkungen des Super-Niño 1982/83 auf das terrestrische Ökosystem

Nicht alle Niño-Ereignisse an der ecuatorianischen und peruanischen Küste sind von gleicher Stärke. Vorwiegend bewirken die sog. Super-Niños Naturkatastrophen, weil hier Mensch, Tier und Pflanze an einen Lebensraum angepaßt sind, der den Niño-Schock nicht verkraftet. Die terrestrischen wie ozeanischen Ökosysteme werden überaus strapaziert. Auch der Mensch ist den katastrophalen Einwirkungen des Super-Niños nicht gewachsen, insbesondere wenn die Bindung an Grund und Boden sowie die Küstengewässer Lebensgrundlage ist. Der torrentielle Abfluß der Wassermassen zerstörte beim Super-Niño 1982/83 die Flußoasen samt Bewässerungsanlagen. Viele Staubecken hielten den Fluten nicht stand. Trockentäler, die über Jahrzehnte keinen Tropfen Wasser



Abb. 7: Die aus Adobeziegeln gebauten Ruinen des Tambo de Mora in der Oase von Chíncha (Südperu) wurden während des Super-Niño 1982/83 stark in Mitleidenschaft gezogen. Das Foto zeigt die Kulturstätte während einer Ausgrabungsphase im Jahre 1987 (Foto: RAFIQPOOR)

geführt hatten, verwandelten sich in reißende Ströme, winzige Bäche wurden zu Flußläufen. In der Sechura-Halbwüste bildeten sich große Süßwasserseen, die länger als zwei Jahre überdauerten. Schließlich wurden Straßen und Brücken zerstört, das Hochwasser drang in die Siedlungen ein. Häuser, die aus naturgetrockneten Adobeziegeln gebaut sind, zergingen förmlich zu einem feuchten Brei. Das galt auch für die in Ruinen liegenden Stätten alter Kulturen (Abb. 7).

Flora und Fauna reagierten teils positiv, teils negativ auf die Ereignisse. Vielerorts verwandelte sich die Wüste in einen grünen, z. T. blühenden Teppich (Abb. 8).



Abb. 8: Die blühende Wüste mit ephemerer Vegetation (Loasaceen) in Nordperu nach dem El Niño-Ereignis 1982/83 (Foto: RAUH 1983)

Die infolge der warmen Regenfeuchtigkeit des Niño-Ereignisses aus dem Boden schießenden Pflanzen der wüstenhaften Landstriche bestehen nicht nur aus einjährigen, sondern auch mehrjährigen Pflanzen. Auffällig sind unter ihnen die kurzlebigen Malvengewächse, Schmetterlingsblütler sowie Nachtschatten- und Nelkengewächse und Gräser. Viele von ihnen produzieren in dieser Zeit Samen, die im Boden verbleiben und beim nächsten Niño wieder



Abb. 9: Ausschnitt aus der Kakteen-Felsregion der Sechura-Halbwüste vor (oben) und nach dem El Niño-Ereignis 1982/83 (unten)

reagieren. In der Kakteen-Felsregion der Sechura-Halbwüste (Abb. 9), die offenbar viele Keimlinge in sich birgt, entwickeln

sich während der Niño-Phase in kurzer Zeit aus den Samen kleine Bäume wie z. B. der Algarrobo (*Prosopis juliflora*).

Negativ wirkte sich das Super-Niño auf die epiphytischen *Tillandsien* aus, die auf dem Wüstensand als graublättrige, vollständig wurzellose Organismen den Dünen aufliegen und die nötige Feuchtigkeit durch einen Haarmechnismus der Blattoberflächen aus der feuchten Nebeldecke auskämmen. Sie gehen in der Niño-Zeit ein, weil sie den Starkregen nicht verwerten können und in der kurzen Trockenphase an Wassermangel leiden (Abb. 10). Außerdem unterliegen sie teilweise den auftretenden, zerstörerischen Wasserfluten.

Auswirkungen des Super-Niño 1982/83 auf das ozeanische Ökosystem

Der enorme Reichtum des Meeres an Lebewesen vor der peruanischen Küste gründet auf den kalten Küstengewässern des Humboldt-Stroms und deren niedrigem Salzgehalt. Die kühlen Temperaturen machen das Wasser reich an Gasen und an ausschlaggebenden Nährstoffen wie Phosphorsäure, Stickstoffverbindungen und Silikate. Sie sorgen für eine reiche Phytoplankton-Biomasse.

Normalerweise reicht das kühle und nährstoffhaltige Tiefenwasser bis nahe an die Oberfläche durch das Auftriebswasser-Phänomen im Humboldt-Strom, bewirkt durch die ablandigen Passatwinde. Gute Lichtverhältnisse optimieren außerdem die Biomassenproduktion. Auf dieser Basis hat sich über die Jahrtausende eine biologische Kette von Mikroorganismen bis zum menschlichen Dasein entwickelt. Die Kette reicht vom Phytoplankton über das Zooplankton, Würmer, Krebse, Quallen, auch Fischarten, wie Sardinen und Sardellen und geht weiter zu größeren Raubfischen wie Makrelen, Seehechte u. a. m. Die Fische schließen den Kreislauf aber nicht. Ihnen folgen Scharen von fischenden Vögeln wie Kormorane und Pelikane, aber auch Robben, Seelöwen und See-elefanten, die von der reichhaltigen Nahrung leben. Dazu gehört auch der Mensch, der in den Küstengewässern Fischerei betreibt.

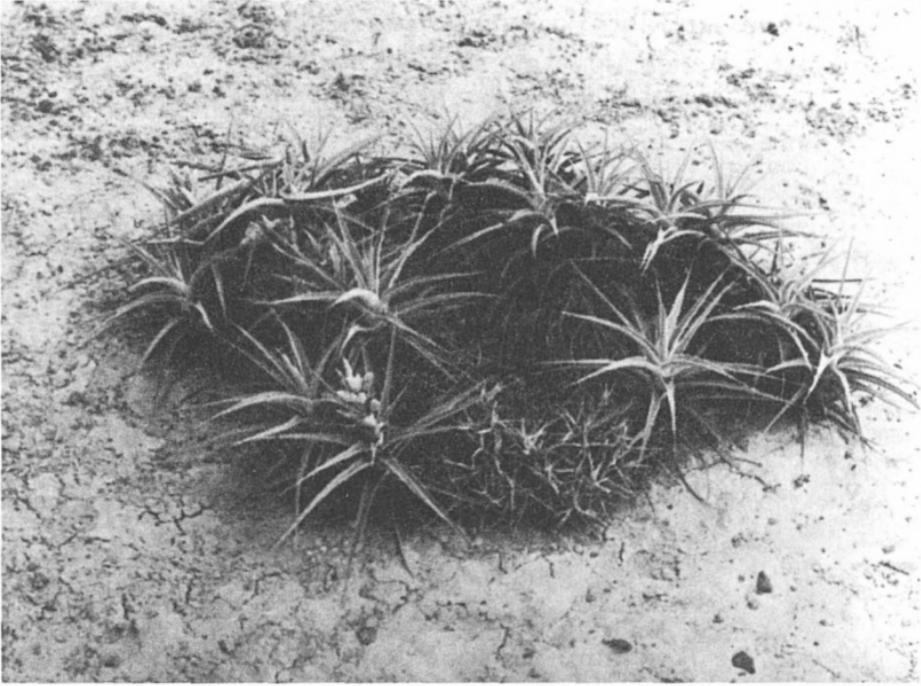


Abb. 10: Eine Kolonie von *Tillandsia latifolia* (oben: Foto RAFIQPOOR 1987) und durch Niño-Regen abgestorbene *Tillandsia latifolia*-Bestände (unten: Foto RAUH 1983)

Umfangreicher Warmwassereinfluß während des Niño-Ereignisses stört die biologische Kette ganz erheblich. Die Sprungschicht zwischen warmem und kaltem Wasser (sog. *Thermokline*) sinkt ab. Warmes und nährstoffarmes Wasser verursacht starke Einbrüche in die Primärproduktion. Während des Niños 1982/83 stiegen die Wassertemperaturen bis auf 29–30 °C weit entlang der peruanischen Küste. Die Folge war, daß die Sardellen- und Sardinien-Schwärme in dem planktonarmen Wasser keine Nahrung fanden, entweder abstarben oder in tiefere Schichten des Wassers abwanderten. Wolf ARNTZ (1991) hat festgestellt, daß nach dem Ereignis von 1982/83 größere Schwärme von Sardinien und Sardellen überlebt haben müssen, was durch höhere Fangquoten der Fischer im Bereich von Chile – also weiter südlich – deutlich wurde. Viele Muschel-, Schnecken-, Krebs- und Stachelhäuter-Populationen des Flachwassers starben ebenfalls und wurden als Schalenansammlungen an die Küste gespült (ARNTZ 1991).

Auch der Bestand an Raubfischen, wie z.B. Makrelen und Seehechte, ging stark zurück. Dagegen wanderten tropische Fischarten ein, die an das Warmwasser angepaßt sind. Die Guano-Vögel wie Kormorane, Tölpel, Pelikane und Fregattvögel wurden arg dezimiert. ARNTZ hat die verhungerten Seevögel auf mehrere Millionen geschätzt. Doch haben sie sich, wie man heute weiß, relativ rasch regeneriert, so daß 1986 bereits Millionen von Vögeln wieder an der peruanischen Küste auftauchten. ARNTZ hat darüber hinaus durch seine intensiven Studien festgestellt, daß dies vorwiegend im Pelagial, d.h. in der Oberflächenschicht, meist zu den negativen Auswirkungen geführt hat. Allerdings im Benthos, der Grundsicht in 30–40m Tiefe, wo sonst Sauerstoffmangel herrscht, sind die Niño-Einflüsse durch den Anstieg der Sauerstoffwerte eher positiv. Negativ waren hingegen die Auswirkungen im Gezeiten- und Strandbereich, wo ein Massensterben vieler Arten, die eine erhöhte Temperatur nicht ertragen können, erfolgte und wo ein kurzfristiger Meeresspiegelanstieg eintrat, der die sichtbare Küstenlandschaft für einige Jahre völlig veränderte. Die volkswirtschaftlichen Schäden hat ARNTZ (1991: 202) nach einzelnen Quellen für Ecuador, Peru und Chile im Mittel auf 2,5 Milliarden Dollar geschätzt.

Telekonnektion

Das Niño-Phänomen steuert offensichtlich auffällige meteorologische Fernwirkungen, genannt *Telekonnektion*. Sie betreffen die unmittelbaren Anrainergebiete wie auch den weiteren Einflußbereich der tropischen Walker-Zirkulation rund um den Erdball.

Es versteht sich von selbst, daß das sich über ein Viertel des Erdumfangs am Äquator erstreckende Niño-Phänomen, ausgelöst durch die beschriebene Luftdruck-Schaukel im stillen Ozean, nicht ohne Wirkung auf die restliche Atmosphäre der Erde ist. Am deutlichsten ist die Telekonnektion innerhalb des Raumes des Niño-Phänomens selbst (Abb. 2, unten). Mit dem Super-Niño 1982/83 gingen beispielsweise charakteristische Anomalien in den amerikanischen Anrainergebieten einher, so auf dem Altiplano von Südperu und Bolivien, wo es außerordentlich trocken war, wie ebenso in Teilen Mittelamerikas und im nordöstlichen Südamerika. Überdimensionierte Niederschläge und ungewöhnlich kräftige Kaltluftereinbrüche ereigneten sich in Teilen der Vereinigten Staaten. Heftige Regenfälle suchten Nordost- und Südbrasilien heim. Das Kapland und weite Teile Südostafrikas und Madagaskars wurden von ungewöhnlichen Dürren betroffen.

Da die Niño-Phänomene zu den verschiedenen Auftrittszeiten in Intensität und regionaler Verbreitung und damit im Entstehen und Wirken keineswegs völlig identisch sind, sind Prognosen schwierig. Die meisten Prognose-Versuche lehnen sich zur Zeit noch immer an den „Southern Oscillation-Index“ des Niño-Phänomens an, der die positiven und negativen Abweichungen der Luftdruckverhältnisse beschreibt, die ihrerseits wieder Änderungen der Druckfelder in den restlichen Erdzonen beeinflussen. Auch die Lufttemperatur-Anomalien in ihrem wechselnden Gang im Bereich des pazifischen Ozeans sind ein deutliches Kriterium. Wesentlich sind die großräumigen Wellen im Ozean (*Kelvinwelle*) und in der Atmosphäre (*planetarische Wellen*). Die Kelvinwellen wandern im System der Walker-Zirkulation innerhalb der tropischen Breiten, dehnen sich aber auch an den Küsten entlang weit in die

außertropischen Regionen aus. Die planetarischen Wellen können sich in der Atmosphäre über die ganze Erde ausbreiten.

Entscheidend für Prognosen sind Hilfsmittel, die heute durch EDV-gestützte Klimamodellierungen und statistische Verfahren bereits größere Erfolge zeitigen. Dennoch fehlt jeweils eine Systematik für eine durchgehende Kausalkette, da sich durchweg nur nichtlineare Vorgänge abspielen.

An verschiedenen Zentren, besonders in Amerika und Deutschland, sind hier durchaus Erfolge erzielt worden. Es besteht aber seitens der meteorologischen Forschung und der Klimageographie in Zukunft noch Forschungsbedarf.

Das El Niño-Phänomen und Paläoklimatologie

Man kann sich die Frage stellen, wie lang gibt es wohl das Niño-Phänomen in erdgeschichtlicher Zeit. Die Antwort könnte heißen: Solange globale *geologische* Prozesse (Kontinentaldrift, Konfiguration der Kontinente, Verhältnis von Land und Meer sowie Relief) sich wenig verändert haben, dürfte auch das derzeitige Klimasystem ähnlichen Oszillationen unterliegen, sei es in prononcierter oder abgeschwächter Form, gesteuert durch schwache Veränderungen der extraterrestrischen Parameter. Die atmosphärische Zirkulation und die Strömungsbedingungen der Ozeane dürften daher etwa seit dem späten Pliozän die ähnlichen gewesen sein wie heute, abgesehen von der starken Schwankung des Meeresspiegels, die während der Eiszeitphasen jeweils um ca. 60–120 m betrug.

Studien über den Ablauf der Eiszeit bezeugen Temperaturschwankungen im globalen Mittel von bis zu ca. 6–8 °C, die während des späten Pliozäns und Pleistozäns je nach Kalt- und Warmzeiten eine unterschiedliche Frequenz des Niño-Phänomens verursachten.

Es ist offensichtlich, daß „Paläostudien“ um so aussagekräftiger, je jünger sie sind. Die Quellenlage für die spanische Kolonialzeit ist durchaus ergiebig. Die amerikanische Arbeitsgruppe unter W.H. QUINN hat auf der Basis der Studien von Archivaufzeichnungen, historischen Quellen und Reiseberichten für die Jahre 1525–1993 117 Niño-Events ermittelt, deren 8 als „sehr streng“ und 33 als „streng“ beurteilt wurden. Weder die Häufigkeit noch

die Intensität von El Niño-Events erbrachten den Nachweis der „Kleinen Eiszeit“. Für die prähistorische Zeit ist durch archäologische Befunde und Arbeitsmethoden der Quartärforschung wie z.B. Datierungsverfahren der Pollenanalyse, der Dendrochronologie, der Radiokarbon- und anderer Isotopenmethoden, eine Reihe von Ergebnissen erzielt worden. Durch sedimentologische Befunde konnten Niño-Phasen nachgewiesen werden, die durch Flutwellen die Küste morphologisch verändert und beträchtliche Sedimentschichten aufgeworfen haben. Erkenntnisse der archäologischen Forschung haben überdies bestätigt, daß die Frequenz der Niños im Verlauf des Holozäns häufigem Wechsel unterlag. Bekannt sind Studien der fossilen Küchenabfälle der an der Küste lebenden Völker, denen Kalt- und Warmwasser-Arten im Wechsel als Nahrungsgrundlage dienten und zur Deutung des Niño-Effekts herangezogen werden konnten.

Die Diskussion über die mögliche Rolle von Niño-Ereignissen während der letzten Eiszeit und deren Spätglazial und Holozän ist in vollem Gang. In Anbetracht eigener Studien und der zur Verfügung stehenden Literatur ist anzunehmen, daß bei einem eiszeitlichen Klima unter der Bedingung hohen Drucks im östlichen Pazifik nahe der Küste eine stabile, kalte Humboldt-Strömung existierte. Das ständige Inversionsklima unterhielt eine Nebel-Feuchtluftwüste bei einer Absenkung des Meeresspiegels um ca. 60m und einer um 6° niedrigeren Temperatur. Das bedeutet, daß in dieser Epoche kaum El Niño-Events besonders wirksam sein konnten. Erst durch die Erwärmung der Temperatur auf den heutigen Stand ab 10000 v. h. haben sich durch die kühlen Wässer des Humboldt-Stroms und die Erwärmung durch El Niño die Bedingungen eingestellt, die der Gegenwart näherkommen. Selbst während des postglazialen Wärmemaximums zwischen 9000 und 5000 v. h. dürfte bei einer Temperaturerhöhung um etwa 2° über dem heutigen Niveau, von mittleren Verhältnissen der Atmosphäre her gesehen, die Niño-Frequenz sogar höher gewesen sein als heute. Berücksichtigt werden muß natürlich im Postglazial auch der kurzfristige Wechsel feuchterer und trockener Klimaepochen. Pollenanalysen im Andenbereich zeigen deutlich diesen Wärmesprung um 5000 v. h. zumindest im Bereich der Waldgrenze (VAN DER HAMMEN 1974, Kolumbien, und HANSEN et al. 1984, Peru).

Die beiden Darstellungen (Abb. 11) verdeutlichen den Landschaftswandel in den genannten Epochen für die Zeitscheiben um 5000 v. h. und heute.

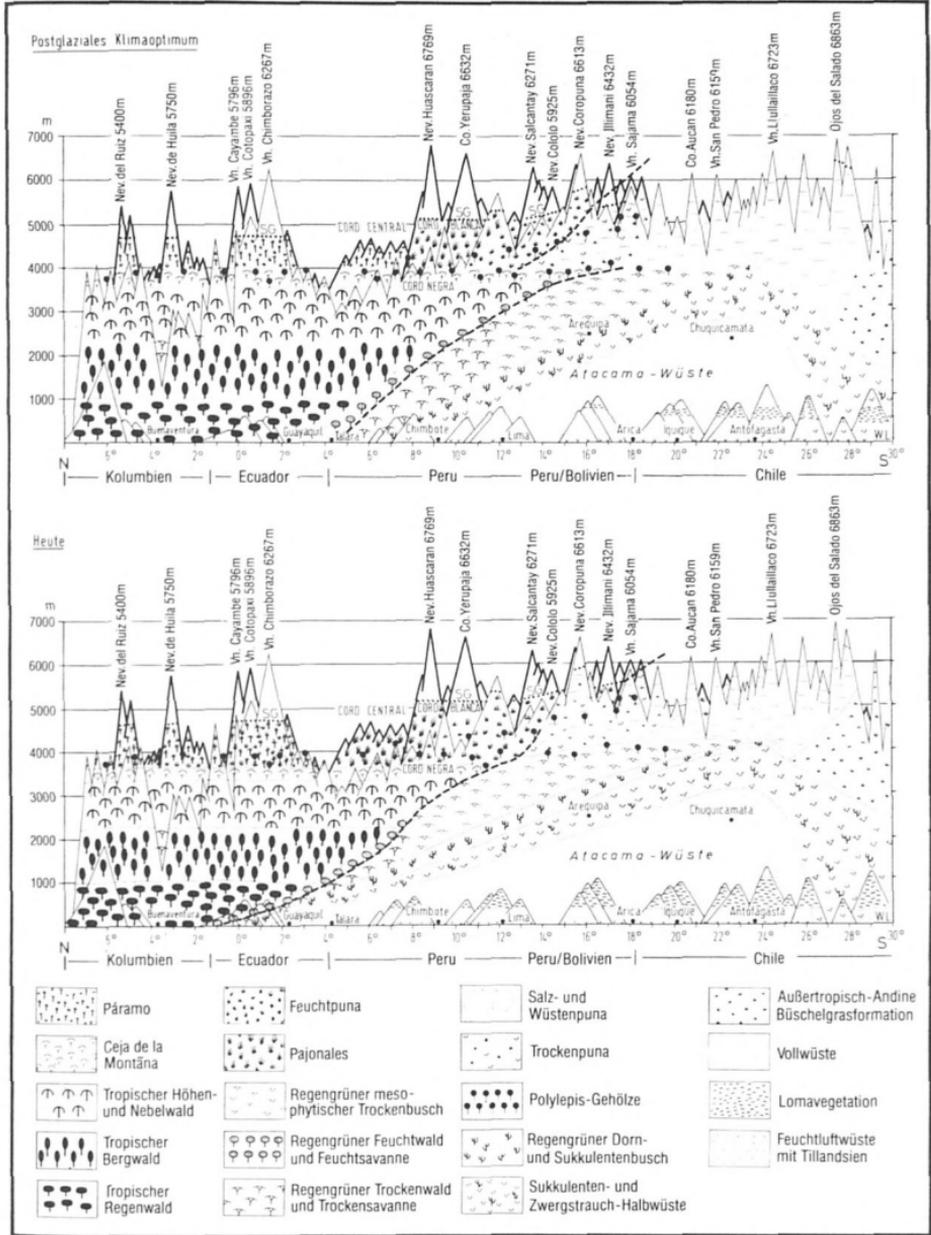


Abb. 11: Höhenstufen der Vegetation an der Westabdachung der Anden während des postglazialen Wärmemaximums (oben) und heute (unten)

Signale eines erneuten El Niño-Ereignisses

Dem nordhemisphärischen Klimabericht der „Berliner Wetterkarte“ zum Mai 1997 war zu entnehmen, daß sich im Bereich des tropischen Pazifik eine kräftige Warmwasser-Kelvinwelle ausbreitete als Signal eines erneuten El Niño-Ereignisses. Im Westteil des tropischen Pazifik hatte sich schließlich im malayischen Archipel ein großräumiger Luftdrucküberschuß ausgebildet, im Osten des Pazifiks dagegen durchweg ein Luftdruckdefizit eingestellt, charakterisiert durch einen negativen *Southern Oscillation Index* (SOI). Demzufolge waren die bodennahen Ostwinde auf dem zentralen äquatorialen Pazifik bereits abgeschwächt, und die warmen Ozeanoberflächenwässer bewegten sich in Richtung auf die südamerikanische Küste unter Zunahme konvektiver Niederschlagsprozesse.

Eine Karte der aktuellen Meeresoberflächentemperaturen des *Lamont-Doherty Earth Observatory* in New York (FAZ vom 27. August 1997) macht deutlich, daß sich nunmehr die Warmwasserzunge vom zentralen Pazifik in Richtung Osten an die südamerikanische Küste vorgeschoben hat, was dem allgemeinen Bild eines typischen Niño-Ereignisses entspricht (Abb. 12, vgl. auch Abb. 2).

Inzwischen stieg die Wasseroberflächentemperatur um 4 K im Bereich der Nordküste von Peru (Klimabericht der „Berliner Wetterkarte“ zum Juli 1997). Fischer bemerkten dies durch einen stärkeren Rückgang der Fangquoten von Sardinen- und Sardelenschwärmen. Andererseits berichten sie vom Fang tropischer Warmwasserfische, ähnlich wie in den Jahren 1982/83.

Als Kontrast häufen sich die Nachrichten über erneute, außergewöhnliche Trockenheit in der Inselwelt des malayischen Archipels, wo auf Borneo seit Juli dieses Jahres ca. 300000 ha Regenwald den Bränden zum Opfer gefallen sind (Weltspiegel vom 4. 9. 1997).

Das Kartenbild (Abb. 12) zeigt auch ausgedehnte Warmwasserareale längs der nordamerikanischen Pazifikküste. Hier hat die beginnende herbstliche Regenperiode bereits Anfang September Kalifornien und der Wüste von Nevada heftige Regenfälle beschert.

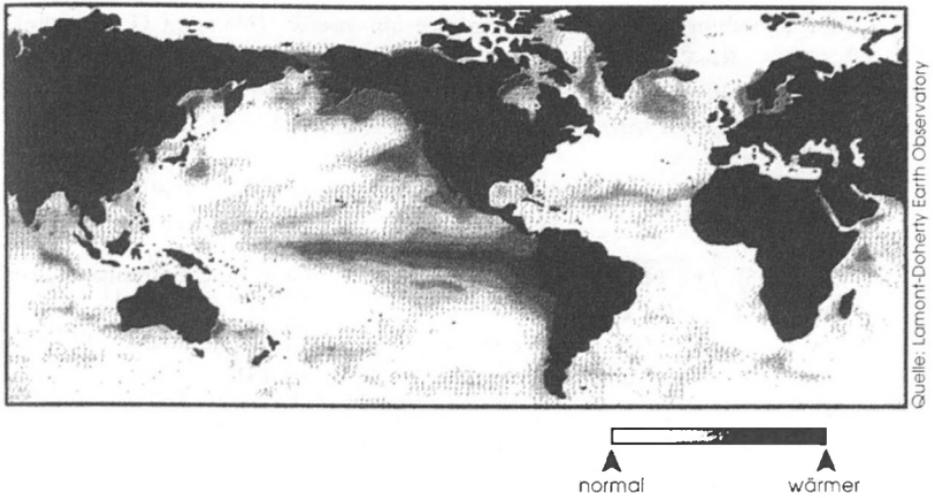


Abb. 12: Positive Abweichungen der Meeresoberflächentemperaturen im August 1997 (FAZ 28.08.97: *Lamont-Doherty Earth Observatory*, New York)

Sollte sich die Tendenz einer Ausbreitung des warmen Wassers an der Westküste Amerikas stabilisieren, so wird man während der südhemisphärischen Sommerregenzeit mit einem starken Super-Niño im Bereich von Ecuador und Nordperu rechnen müssen, dessen Ausmaße nach den Prognosen wahrscheinlich dem Ereignis von 1982/83 gleichkommen oder es sogar übertreffen. Dies wäre ein Hinweis auf den Beginn einer verkürzten Abfolge von Super-Niño-Ereignissen, verbunden mit einer Intensivierung von Konvektionsprozessen an der Westküste von Südamerika und verstärkter Aridisierung in der südostasiatischen Inselwelt.

Mehrere internationale Institute, darunter das *International Research Institute of Climate Prediction* (IRI) im kalifornischen San Diego, widmen sich inzwischen auf der Basis von statistischen Simulationsmodellen, Fernerkundungsmethoden und Informationssystemen der Erforschung der Ursachen und Prognose des Niños zur Verbesserung wissenschaftlicher Erkenntnisse und zum Schutz der menschlichen Zivilisation.

Literatur

- ABELE, G. (1985): Die Nordchilenisch-peruanische Wüste – Eine Extremlandschaft. In: *Natur und Museum*, Bd. 115: 353–363.
- ARNTZ, W.E. (1985): Zur Entstehung von Organismenansammlungen: El Niño 1982/83 vor Peru. In: *Natur und Museum*, Bd. 115: 134–151.
- ARNTZ, W.E. & Fahrbach, E. (1991): *El Niño – Klimaexperiment der Natur*. Berlin.
- BENDIX, J. (1994): Zur Klimatologie des El Niño-Phänomens an der Westküste des tropischen Südamerika. In: *Anhuf/Frankenbergt: Beiträge zu globalen Umweltproblemen*. Abhandlungen der Mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse. Jg. 94, Nr. 2: 51–64, Stuttgart.
- BJERKNES, J. (1966): A possible response of the atmospheric Hadley-Circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. *Tellus* 18: 820–829.
- CANE, M.A. (1983): Oceanographic events during El Niño. *Science* 222:1189–1194.
- CARRANZA, L. (1891): Contracorriente marítima observada en Payta y Pacasmayo. *Bol. Soc. Geogr., Lima*, I: 344–345.
- CARRILLO, C. (1892): Hidrografía oceánica. *Bol. Soc. Geogr., Lima*, II: 72–110.
- CAVIENDES, C. & ENDLICHER, W. (1989): Die Niederschlagsverhältnisse in Nordperu während des El Niño Southern Oscillation-Ereignisses von 1983. *Die Erde* 120: 81–97.
- DAZ, H. F. & MARKGRAF, V. (1992): *El Niño, historical and paleoclimatic aspects of the southern oscillation*. Cambridge University Press.
- ENDLICHER, W., HABBE, K. A., PINZNER, H. (1988/89): Zum Niño Southern Oscillation-Ereignis 1983 und seinen Auswirkungen im peruanischen Küstengebiet. In: *Mitteilung der Fränkischen Geographischen Gesellschaft* Bd. 35/36: 175–201.
- FLOHN, H. (1994): Großräumige aktuelle Klimaänderungen: Anthropogene Eingriffe und ihre Rückwirkungen im Klimasystem. *Rundgespräche der Kommission für Ökologie, Bayerische Akademie der Wissenschaften*, Bd. 8 „Klimaforschung in Bayern“: 19–32, München.
- FRANCOU, B. & BICARRO, L. (1985): El Niño y la sequía en los altos Andes centrales (Peru y Bolivia). In: *Bull. Inst. Fr. Et. A&D*. 14, Nr. 1/2: 1–18.
- GLANTZ, M.H. (1984): Floods, fires and famine: Is El Niño to blame? *Oceanus*, Vol. 27/2: 14–19.
- GOLDBERG, R.A., TISNADO, G. & SCOFIELD, R.A. (1987): Characteristics of extreme rainfall events in NW Peru during the 1982/83 El Niño period. In: *Journal of Geophysical Research* 92/C13: 14 225–14 241.
- VAN DER HAMMEN, T. (1974): The pleistocene changes of vegetation and climate in tropical South America. *Journal of Biogeography* 1: 3–26.
- HANSEN, B.S., WRIGHT, H.E. (JR.) & BRADBURY, J.P. (1984): Pollen studies in the Junin area, Central Peruvian Andes. *Geol. Soc. Amer., Bull.*, Vol. 95: 1454–1465.

- HARRISON, D.E. (1984): Where did the strong equatorial westerlies of 1982 warm event begin? *Tropical Ocean-Atmosphere News Letter* 24: 17-18.
- KÄSE, R.H. (1985): El Niño. In: *Geowissenschaften unserer Zeit* Nr. 4:113-119.
- LATIF, M. (1996): El Niño – Eine Klimaschwankung wird erforscht. *Geogr. Rundschau*.
- LAUER, W. (1986): Die Vegetationszonierung der Neotropis und ihr Wandel seit der Eiszeit. *Ber. Deutsch. Bot. Ges.*, Bd. 99: 211-235.
- LAUER, W. (1988): Zum Wandel der Vegetationszonierung in den lateinamerikanischen Tropen seit dem Höhepunkt der letzten Eiszeit. In: *Jahrbuch der Geographischen Gesellschaft zu Hannover*: 1-44.
- MURPHY, R.C. (1926): Oceanic and climatic phenomena along the west coast of South America during 1925. *Geogr. Rev.* 16: 26-54.
- PHILANDER, S.G.H. (1990): El Niño, La Nina, and the Southern Oscillation. San Diego.
- PRESCOTT, W. (1951): Entdeckung und Eroberung von Peru. Baden.
- QUINN, W.H., NEAL, V.T. & DE MAYOLO, S.E. (1987): El Niño occurrences over the past four and half centuries. In: *Journal of Geophysical Research* 92: 14449-14461.
- RAMAGE, C.S. (1986): El Niño. *Spektrum der Wissenschaft*, August: 92-100.
- RASMUSSEN, M. (1984): El Niño. The Ocean/Atmosphere connection. *Oceanus*, Vol. 27/2: 4-12.
- RAUH, W. (1985): The Peruvian-Chilean Deserts. In: *Hot Deserts and Arid Shrublands*, ed. by Evenari. In: Elsevier Science Publishers, Amsterdam: 239-267.
- ROEDEL, W. (1992): *Physik unserer Umwelt – Die Atmosphäre*. Springer Verlag, Heidelberg.
- SCHOTT, G. (1931): Der Peru-Strom und seine nördlichen Nachbargebiete in normaler und anormaler Ausbildung. *Ann. d. Hydr. u. Mar. Met.* 59, H. 5: 161-169, 200-213, 240-249.
- SCHÜTTE, K. (1986): Untersuchungen zur Meteorologie und Klimatologie des El Niño-Phänomens in Ecuador und Nordperu. *Bonner Meteorologische Abhandlungen* 9. 152 S.
- SCHWEIGER, E. (1959): *Die Westküste Südamerikas im Bereich des Perustroms*. Heidelberg, München, 513 S.
- TOOLE, J.M. (1984): Sea-surface temperature in the equatorial pacific. *Oceanus*, Vol. 27, Nr. 2: 29-34.
- TROLL, C. (1930): *Die tropischen Andenländer*. Handbuch der Geographischen Wissenschaft. Herausgegeben von Fritz KLUTE, Bd. Südamerika. Potsdam.
- WALKER, G.T. (1923): *World weather I*. Mem. Indian Meteorol. Dept. 24: 74-131.
- WYRTKI, K. (1982): The southern oscillation. *Ozean-Atmosphere-Interaction and El Niño*. *Mar. Technol. Soc. Journal* 16: 3-10.
- YARNAL, B.: Extratropical teleconnections with El Niño Southern Oscillation (ENSO) events. In: *Progr. in Phys. Geogr.* Vol. 9, Nr. 3, 1985: 315-352.