



© Mac99 – iStockphoto

### 3.1.2 Die globale Niederschlagsverteilung und ihre Veränderung im 20. Jahrhundert

LUTZ JAEGER

*The global precipitation pattern and its changes in the 20th century: Air temperature and measurable, falling precipitation are meteorological parameters to be utilised in calibration and validation of general circulation models. The popularity of precipitation being a conservative element of climate for this purpose may be explained by its apparently simple method of areal determination in contrast to more difficult estimates of energy balance components, e.g. net radiation or turbulent fluxes of latent heat, which would be more suitable to check model output. The aim of this chapter – seen against the background of the total draft of this electronical book – is to present problems and limits of precipitation determination and its temporal changes above continents and oceans.*

Neben der Lufttemperatur ist der messbare, fallende Niederschlag der zweite meteorologische Parameter, der üblicherweise zur Validierung (und Kalibrierung) von Klimasimulationsmodellen herangezogen wird. Die Beliebtheit dieses konservativen Klimatelements in diesem Bereich erklärt sich durch seine scheinbare simple flächenhafte Erfassungsmöglichkeit, im Gegensatz zu eigentlich für die Modellüberprüfung besser geeigneten, aber schwieriger zu erfassenden Elementen der Energiebilanz, wie z.B. der Strahlungsbilanz oder dem turbulenten Strom latenter Wärme. Der Sinn dieses Kapitels im Rahmen des Gesamtkonzeptes des Warnsignal-Buches besteht in dem Bemühen, den Leser auf die Problematik und die Grenzen der Niederschlagsermittlung hinzuweisen und über die Bestimmungsmöglichkeiten der globalen Niederschlagsentwicklung über Kontinenten und Ozeanen und deren zeitlicher Entwicklung zu informieren.

#### Die Bestimmung der Niederschläge

Zur Erfassung von Klimaänderungen – hier am Beispiel des Klimatelementes Niederschlag – werden drei sich ergänzende und ineinander greifende methodische Komplexe eingesetzt. Mitte des vorletzten Jahrhunderts begann die Periode der Instrumentenbe-

obachtungen, zunächst mit punkthaft messenden Niederschlagssammlern, heute auch durch flächenhafte Erfassung. Davor steht das weite Feld der Proxidaten zur Verfügung. Dabei geht es um die Interpretation von direkten und indirekten Aufzeichnungen aus Archiven und Bibliotheken im Hinblick auf Informationen, die zu qualitativen und quantitativen Niederschlagsangaben verarbeitet werden können (DOSTAL 2005). Paläoklimatologie, das weiter in die Vergangenheit des Systems Erde – Atmosphäre zurückreichende Werkzeug, lässt nur grobe Abschätzungen längerer Zeitabschnitte zu, wie auch die Interpretation schriftlicher Quellen mit zunehmender Entfernung von der Gegenwart immer schwieriger und ungenauer wird. Neben der Analyse von Mess- und Proxidaten tritt die numerische Simulation lokaler und globaler Niederschlagsverhältnisse, wobei die Prozesse in Atmosphäre, den Ozeanen und auf den terrestrischen Oberflächen aktuell vollzogen wird, in die Vergangenheit hineinreicht und auch in die Zukunft projiziert werden kann.

#### Die Messung auf Kontinenten und Ozeanflächen

Bei der Ermittlung von Niederschlagssummen sowohl für flächenhafte Betrachtungen auf der Erde, als auch

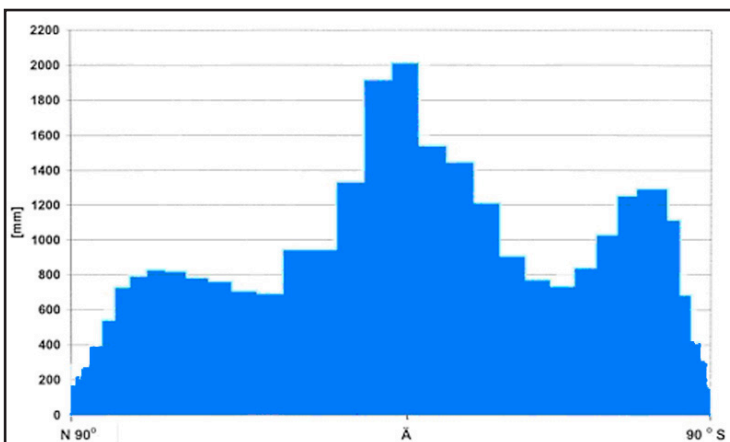
bei der Betrachtung und Interpretation von Zeitreihen ist es sinnvoll, zunächst einmal ins Lehrbuch zu schauen und sich die Definitionen des Niederschlags klar zu machen. Man unterscheidet zwischen fallenden Niederschlägen (fest-flüssig), abgesetzten Niederschlägen (ebenfalls fest-flüssig), abgelagerten Niederschlägen (Schneedecken) und aufgewirbelten Niederschlägen, die als Schnee bereits in der Kategorie fallend auftraten. Auf terrestrischen Oberflächen wird der fallende Niederschlag üblicherweise an Beobachtungsstationen in Sammelgefäße geleitet (RUDOLF 1995) und anschließend durch Ablesung im Messglas, Registrierung mit Schwimmerschreiber, Tropfenzählung, Wippen oder Waagen ermittelt. Hierbei kann der Schnee zum Problem werden, da er aus der Auffangöffnung wieder herausgeweht werden kann und sich dadurch der quantitativen Messung entzieht. In zentralen polaren Bereichen der Erdoberfläche, wo ganzjährig nur Schnee fällt, ist die Sammlung durch den Windeinfluss ganz ausgeschlossen. Man behilft sich dort mit den Meldungen der »Tage mit driftendem Schnee« und Akkumulationsmessungen der Schneedecke. Glücklicherweise sind diese Gebiete flächenmäßig bezogen auf die gesamte Erdoberfläche recht klein und die Schneemengen sind aufgrund der geringen Temperaturen weit unter 0°C ebenfalls gering (ca. 50–100 mm pro Jahr, siehe *Abb. 3.1.2-1*), so dass sie in der Globalbilanz nur eine geringe Rolle spielen (JAEGER 1976). Andererseits führen Lufttemperaturerhöhungen in polaren Bereichen – und man spricht dort von möglichen 10°C in den nächsten 100 Jahren – zu einem höheren Sättigungsdampfdruck über den Eisschilden mit der Möglichkeit höherer fester Niederschläge, was zu einer stärkeren terrestrischen Wasserfixierung führt mit der Folge von Absinktendenzen des globalen Meeresspiegels (STERR 1998, siehe *Abb. 2* dort).

Die Quantität abgesetzter Niederschläge wie Tau oder Reif ist ebenfalls schwer bestimmbar. Dies

gilt auch für den Nebelniederschlag, der in manchen (montanen) Gebieten der Kontinente in der Summe zu beträchtlichen Mengen anwachsen kann. Die konventionelle Bestimmung des (fallenden) Niederschlags ist eine Punktmessung. Zur Ermittlung von Gebietsniederschlägen, d.h. von flächenhaften Verteilungen, die dem Charakter der Niederschläge eher angemessen sind, werden heutzutage allgemein objektive Verfahren angewandt, die einerseits zur Konstruktion von Isohyetenkarten, als auch zur Gewinnung von Rasterdaten verwendet werden. In diesem Zusammenhang ist die verdienstvolle Arbeit des Weltzentrums für Niederschlagsklimatologie (WZN) in Offenbach zu nennen, eine von der WMO eingerichtete und vom Deutschen Wetterdienst betriebene Institution, in der klimatologisches und operationell gewonnenes Niederschlagsdatenmaterial unterschiedlichster Messmethodiken gesammelt wird und auch methodische Untersuchungen durchgeführt werden (RUDOLF 1995). Kritisch betrachtet werden muss die objektive Niederschlagsbestimmung in Gebieten mit scharfen horizontalen und vertikalen (Hochgebirge) Niederschlagsgradienten. Hier kann mit geographischen Kenntnissen und Beobachtererfahrung in die Rechenergebnisse eingegriffen und korrigiert werden.

Der Autor hat 1976 eine »subjektive« Auswertung von globalen Niederschlagsmessungen erarbeitet, die sowohl die Kontinente, als auch die Ozeanflächen der Erde abgedeckt hat (JAEGER 1976). Die damaligen Neuerungen, die dazu führten, dass der Datensatz auch heute noch Verwendung findet (ADLER et al. 2003), waren folgende:

- Verwendung von Datenmaterial aus der klimatologischen Normalperiode 1931–1960. Dabei wurden nur wenige Lücken mit Daten abweichender Registrierperioden geschlossen.
- Konstruktion von Monatskarten und einer Jahreskarte für die Gesamfläche der Erde mit Berechnung von



**Abb. 3.1.2-1:** Mittlere zonale Jahresniederschläge in mm. Die Abszisse entspricht den Flächenanteilen der 5°-Breitenzonen (JAEGER 1976). Mittelungszeitraum: klimatologische Normalperiode 1931–1960.

Jahresgängen für die Gesamterde.

- Erstellung eines monatlichen Gitterpunkt-Datensatzes in 5°-Raster mit Vergleichsrechnungen und Anwendungsmöglichkeiten für Klimamodelle (BOERS et al. 1992).

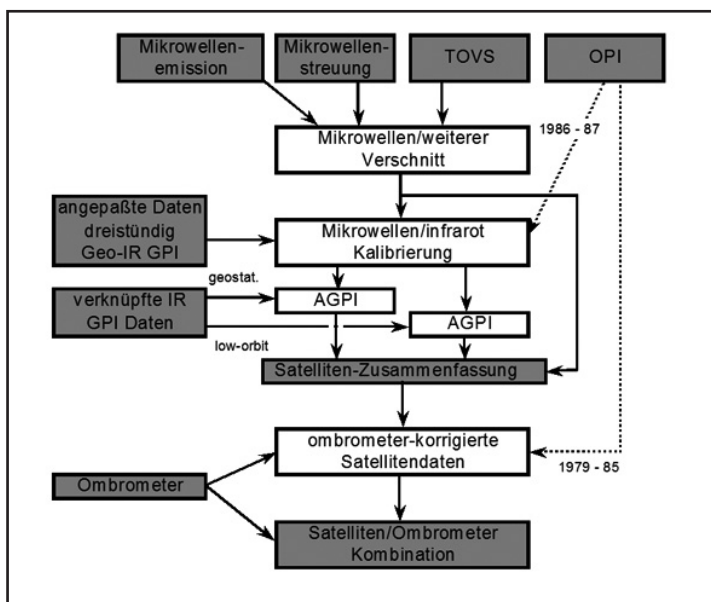
Zur vollständigen Bilanz der globalen Niederschläge gehört auch die Ermittlung der Niederschläge auf den Ozeanflächen des Planeten. Hier gilt als konventionelle Methode die Auswertung von Schiffsbeobachtungen (qualitativ) und die Auswertung von Atlanten, denen die Schiffsbeobachtungsdaten und Inselmessungen zu Grunde liegen (JAEGER, 1976, LEGATES, 1987). Ein Problem hierbei ist die ungleiche Verteilung der maritimen Handelsrouten, die dazu führt, dass es über ausgedehnten Ozeanflächen nur sehr unvollständige Informationen gibt, die keine quantitative Niederschlagsbestimmung von hoher Qualität ermöglichen. Die Extrapolation von Inselmessungen auf die umliegenden Meeresflächen erfordert ebenfalls ein hohes Maß an Fingerspitzengefühl, da Landoberflächen durch ihre stärkere Erwärmung konvektionsbedingt Niederschläge erzeugen können, die bei ihrem Fehlen so nicht auftreten würden. Auch orographische Effekte der Inseln lassen die daraus abgeleiteten Flächenwerte nicht unbedingt als repräsentativ für den freien Ozean erscheinen. Nicht umsonst nennt TAYLOR (1973) seine flächendeckenden Regenuntersuchungen im Stillen Ozean selbstkritisch: „An Atlas of Pacific Islands Rainfall“. Die direkte Messung des Niederschlags auf See gestaltet sich als schwierig und kann nur in geringer Dichte erfolgen. Nach Abschaffung der fest verankerten Wetterschiffe,

die auch Niederschlag gemessen haben, kommen zunehmend Bojen zum Einsatz, die maritime Regenfälle optisch und akustisch bestimmen können. Auch das fahrende Schiff wird als Geräteträger benutzt, wobei spezielle Niederschlagsmesser mit zusätzlicher vertikaler Auffangfläche eingesetzt werden, deren optisches Messprinzip einer weiteren Kalibrierung bedarf. Insgesamt bleibt die konventionelle Niederschlagsmessung über den Ozeanflächen der Erde ein schwieriges Feld, auch aufgrund der gegenüber den Landflächen überdominanten Flächenausdehnung.

### Satellitentechniken

Bei der qualitativen und quantitativen Bestimmung von Hydrometeoren ist die elektromagnetische Welle heutzutage nicht mehr wegzudenken. Optische Messgeräte können wie konventionelle Niederschlagssammler punkthaft Niederschlagsmengen messen, indem durch Lichtstrahlabschwächung Tropfen gezählt und deren Größen gemessen werden. Ein weiteres bodengestütztes Verfahren zur Niederschlagsmessung, in Westeuropa bereits flächendeckend installiert, ist der Einsatz von Niederschlagsradargeräten. Das Radarecho ist abhängig von der sechsten Potenz der Tropfendurchmesser, was die Erfassung von Tropfenspektren mit sog. Distrometern (ebenfalls punkthaft arbeitende optische Geräte) nötig macht, um die Radarbilder durch die daraus gewonnenen Kalibriermöglichkeiten interpretieren zu können.

Die größte Bedeutung aber hat der Einsatz elektromagnetischer Wellen in der Satellitentechnik gefunden, wobei hier die Atmosphäre von oben betrachtet wird.



**Abb. 3.1.2-2:** Flussdiagramm der Satelliten-Ombrometer-Kombinationstechnik (Version 2) des globalen Niederschlagsklimatologie Projektes (Verändert nach ADLER et al. 2003). TOVS: TIROS operational vertical sounder, OPI: Niederschlagsindex basierend auf langwelligen Strahlungsmessungen von Satelliten in niedrigen Orbitalen (OLR: outgoing longwave radiation), Geo-IR: Infrarot-Information geostationärer Satelliten, GPI: geostationary operational environmental satellite (GOES) precipitation index, AGPI: korrigierter (ajusted) GPI, differenziert nach geosynchron und auf tiefen Umlaufbahnen (low orbit) fliegenden künstlichen Erdtrabanten.

Im Weltniederschlagszentrum in Offenbach laufen dabei die Fäden zusammen. Die komplexen, permanent zur Erde gefunkten Beobachtungsinformationen der verschiedenen Plattformen werden von den zum jeweiligen Satellitensystem zugeordneten Arbeitsgruppen ausgewertet und die entstehenden Fernerkundungsprodukte in Offenbach weiterverarbeitet (ADLER et al. 2003). Für diese Kooperation im Rahmen des sog. globalen Niederschlagsklimatologie-Projektes (GPCP, global precipitation climatology project) wurde inzwischen bereits eine Version 2 definiert, die die zusammengetragenen Niederschlagsdaten vereinigt und für den Registrierzeitraum 1986 bis heute repräsentativ ist. Die Arbeiten sind im WZN (Global Precipitation Climatology Center) unter <http://gpcc.dwd.de> abrufbar. Auch beim »Weltzentrum A« bei der NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, dem amerikanischen Wetterdienst) sind Produkte der Niederschlagsmessung und Auswertung online erhältlich: <http://lwf.ncdc.noaa.gov/oa/wmo/wdcamet-ncdc.nasa.gov> oder <http://precip.gsfc.nasa.gov>.

Einen Eindruck von der Komplexität der Niederschlagsbestimmung durch Fernerkundung und einen Einblick in die dabei verwendete Methodik soll *Abb. 3.1.2-2* bieten. Dabei ist festzuhalten, dass eine vernünftige, die gesamte Erdoberfläche umfassende Niederschlagsbestimmung durch Fernerkundung auch heute noch nicht ohne Mithilfe erdgebundener Niederschlagsmessungen auskommt.

Die Nutzung der unterschiedlichen Spektralbereiche auf den verschiedenen Satellitenplattformen hat Rechenverfahren zur Folge, deren Anwendung Einschränkungen erfährt, in Abhängigkeit von geographischer Breite als Indikator für unterschiedliche Niederschlagsbildungsprozesse sowie für Ozeane und Landflächen.

Vom Satelliten ermittelte Infrarotdaten (Spektralbereich 10,5–12,5 nm) können zur Bestimmung der Ausdehnung von konvektiven Wolkensystemen herangezogen werden, wobei der Bedeckungsgrad mit hoher, kalter Bewölkung (Schwellenwert = 235 K) mit einer Niederschlagschätzung korreliert werden kann (ARKIN & MEISNER 1987). Der für die Absolutwertbildung vorgegebene Schätzwert von 3 mm Niederschlag pro Stunde hat die empirischen Radar und Regenmessungen auf Forschungsschiffen während GATE (GARP Atlantic Tropical Experiment) zur Grundlage. Die GARP-Grundlagen wurden inzwischen zu einem Verfahren weiterentwickelt, das nun operationell im tropischen und subtropischen Bereich zwischen 40°N und 40°S angewendet wird, sowohl maritim als auch terrestrisch. RUDOLF (pers. Mitteilung, 2004) schlägt allerdings vor, das Verfahren an die jahreszeitliche Verlagerung der

ITC zu koppeln, da bei der formal angewendeten 40°-Grenze zu den gemäßigten Breiten hin auch zyklonale Cirrusbewölkung mit erfasst wird, deren Eiskristalle nichts mit konvektiver Niederschlagsbildung zu tun haben und daher zu Fehlinterpretationen führen.

Die Niederschlagsschätzung im Mikrowellenbereich wird seit 1987 durch einen polumlaufenden Satelliten mit der Bezeichnung »special sensor microwave/imager« (SSM/I) in den vier Frequenzkanälen 19, 22, 37 und 85 GHz durchgeführt. Dabei wird die Emission der Wasserwolken und Regentropfen in ihrer horizontalen und vertikalen Polarisation getrennt erfasst (HOLLINGER et al. 1987). Zunächst wurde die Mikrowelleninformation nur über den Meeresflächen zur Anwendung gebracht, in absolute Niederschlagswerte umgerechnet mit von WILHEIT et al. (1991) auf der Basis von Emissions-Histogrammen entwickelten Algorithmen. Die globalen Meeresflächen haben den Vorteil, dass ihre Hintergrundstrahlung arithmetisch einfacher zu handhaben ist, als das Patchwork terrestrischer Natur- und Kulturlandschaften. *Abb. 3.1.2-3* bietet ein Beispiel im 5°-Raster für den Januar 1989 (aus RUDOLF 1995). Die Einbeziehungen der festen Erde in die mikrowellenbasierte Niederschlagsbestimmung erfolgt durch den von FERRANO (1997) beschriebenen Streuungsindex im 85 GHz-Bereich. Dieser wird aktuell mit von Bodenradar ermittelten Niederschlagsraten kalibriert und ermöglicht eine Sensitivität von 1 mm/h (FERRANO & MARKS 1995). Der Ausfall des 85 GHz-Kanals 1990 und 1991 wurde durch Signalauswertung im 37 GHz-Bereich ausgeglichen, allerdings unter Inkaufnahme eines Sensibilitätsprinzips auf 5 mm/h.

Eine weitere Fernerkundungsmethode zur Niederschlagsermittlung bietet der TIROS-Satellit (television and infrared observation satellite) mit seinem »operational vertical sounder« (TOVS) (SUSSKIND et al. 1997). Das System schließt auf Niederschlagshöhen ausgehend von tiefen, ausgedehnten Wolken mit einer Regressionsbeziehung aus zugeordneten Ombrometerdaten und verschiedenen vom Satelliten ermittelten Parametern, die das Wolkenvolumen bestimmen: oberer Wolken-Druck, Wolkenbedeckungsgrad und Vertikalprofil der relativen Luftfeuchte.

Alle Fernerkundungsniederschlagsdaten laufen operationell im Weltniederschlagszentrum in Offenbach ein und werden zu Niederschlagskarten und Datensätzen etwa als Monatssummen und im 2,5°-Raster zusammengesetzt. Diese Produkte sind im WZN online abrufbar. Daraus können Niederschlagsklimatologien berechnet werden. Die zeitliche und räumliche Variabilität des globalen Niederschlags verbessert die in diesem Buch angesprochene Klimadiagnose und wird für genauere Wettervorhersagen und Klimamodellierung benutzt.



## Fehlerbehandlung

Die Notwendigkeit, wie oben ausgeführt, satellitengestützte operationelle Niederschlagsermittlungen auch heute noch mit Ombrometern aneichen zu müssen (z.B. ARKIN & MEISNER 1987), unterstreicht die Bedeutung dieser erdgebundenen Messungen und mithin auch den Zwang zur Behandlung der Fehler in den gewonnenen Datensätzen. Dabei ist es notwendig, sich über die Charakteristik der Niederschläge in den Niederschlags-sammlern, die systematischen Messfehler und deren Korrekturmöglichkeiten auch in den unterschiedlichen Zeitskalen klar zu sein. SEVRUK (z.B. 1989) hat in den Achzigerjahren des vergangenen Jahrhunderts intensive Untersuchungen zur Niederschlagsmessung durchgeführt und Abhängigkeiten des Sammelergebnisses von gerätebedingten und atmosphärischen Einflussgrößen präzisiert. LEGATES (1987) hat basierend auf den Arbeiten SEVRUKs eine Korrekturformel für monatliche Niederschlagshöhen angegeben, die mit an den Messstationen verfügbaren meteorologischen Informationen handhabbar ist (zitiert nach RUDOLF 1995):

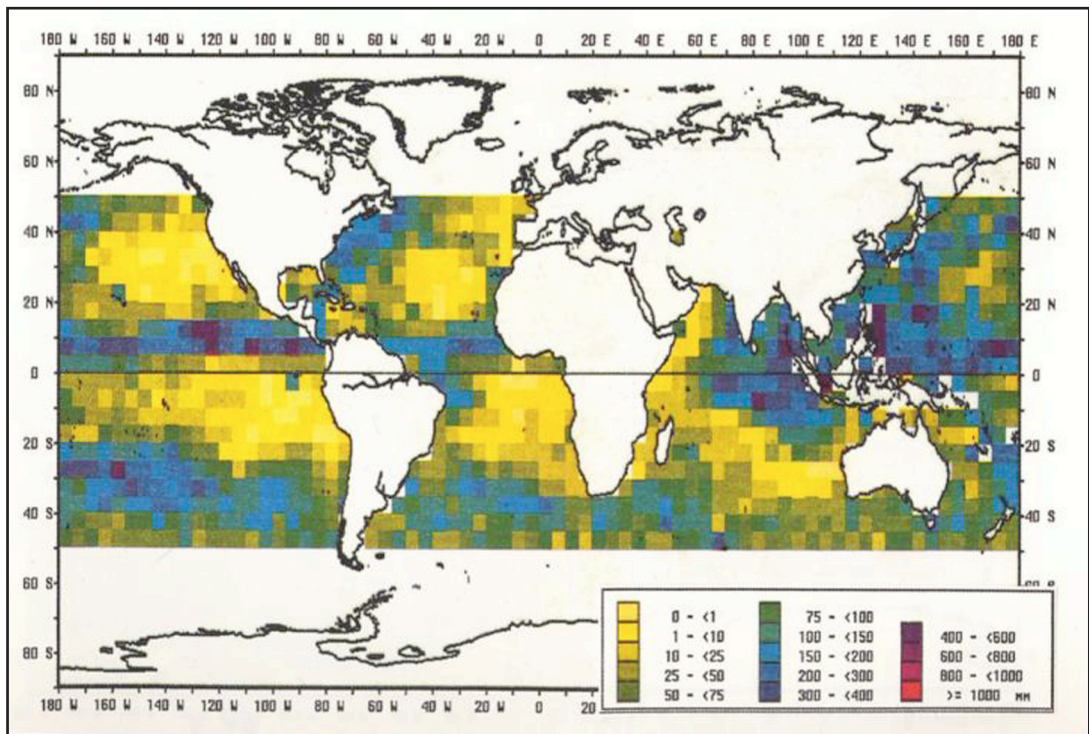
$$P_{CO} = (1-s) \cdot \Delta r \cdot (P_g + \Delta P_{wt} + \Delta P_{cr}) + s \cdot \Delta s \cdot (P_g + \Delta P_{ws} + \Delta P_{cs})$$

mit

- $P_{CO}$  = korrigierte mittlere monatliche Niederschlagshöhe,
- $P_g$  = gemessene mittlere monatliche Niederschlagshöhe,
- $s$  = Schneeeanteil in der mittlere monatlichen Niederschlagshöhe,
- $\Delta r$  = von der Windgeschwindigkeit abhängiger Korrekturfaktor bei Regen,
- $\Delta s$  = von der Windgeschwindigkeit abhängiger Korrekturfaktor bei Schnee,
- $\Delta P_w$  = Benetzungsverlust bei Regen (r) bzw. bei Schnee (s)
- $\Delta P_c$  = Verdunstungsverlust bei Regen (r) bzw. Schnee (s).

Lufttemperatur und Windgeschwindigkeitswerte liefern alle benötigten Schätzwerte für die Korrekturen und ergeben bei LEGATES eine korrigierte Summe des mittleren globalen Jahresniederschlags von 1.138 mm, gegenüber einem unkorrigierten Wert von 1.027 mm. Der starke Einfluss des turbulenten Windfeldes um die Niederschlagssammler wird durch Windschutzmaßnahmen abgemildert. Die Korrektur der Werte entfällt dadurch nicht, wird aber gegenüber ungeschützten Messungen, wie etwa dem in Deutschland verbreiteten HELLMANNschen Regenmesser stark reduziert (MICHELSON 2004).

Bei Niederschlagsmessungen über Wäldern, den dort sogenannten Freilandniederschlagsmessungen, entfällt das Anbringen von Windschutzringen um die Niederschlagsauffangöffnung, da die Baumwipfel ge-



**Abb. 3.1.2-3:** Monatliche maritime Gebietsniederschläge im 5°-Raster, mit der Methode von WILHEIT et al. (1991) aus SSM/I-Satellitendaten abgeleitet, für den Monat Juli 1989 (aus RUDOLF 1995).

nügend Turbulenzelemente darstellen, um das Windfeld für die Niederschlagsmessung günstig zu gestalten (JAEGER 1985). Leider werden derartige Messungen wegen der hohen Messturmkosten nur selten durchgeführt und fließen auch nicht in die Dateien der amtlichen Niederschlagsnetze ein.

### Simulation

Natürlich ist der Niederschlag auch Gegenstand und Outputgröße von Simulationsmodellen (GRASSL 2002). Modelle sind ein wichtiges Instrument in der Klimaforschung geworden. Für die Wettervorhersage wird die Gegenwart modelliert; weiterhin wird die Vergangenheit nachgebildet und mit den verschiedensten Datenquellen verglichen (Messdaten, Proxidaten, Paläogeologie). Für die Zukunft ist das Modell das einzige zur Verfügung stehende Werkzeug, wobei die derzeitigen Modellversionen, besonders wenn sie regionale Klimaänderungen simulieren sollen, noch in Genauigkeit und in quantitativen Aussagen unbefriedigend sind. Nur zusammengesetzte Niederschlagsprodukte, z.B. wie oben beschrieben aus Messungen und Satellitendaten abgeleitet (www.gewex.com), dürfen nicht mit Simulationen ergänzt werden, da ebendiese Produkte benutzt werden, um globale Klimamodelle zu verifizie-

ren. Abb. 3.1.2-4 zeigt den Wettstreit von sechzehn verschiedenen Zirkulationsmodellen (BOERS et al. 1992). Als Unterscheidungskriterium dient hierbei der simulierte zonal gemittelte Niederschlag im Nordsommer (Juni bis August) in mm/Tag, der zusammen mit den zonalen Mitteln (1931–1960) der Niederschlagsklimatologie von JAEGER (1976) dargestellt ist. Die Einheit von mm/Tag hat sich beim Niederschlags-Output von Modellergebnissen als Standard eingebürgert, wobei man sich klar machen muss, dass 1 mm/Tag bezogen auf das Gesamtjahr einer Niederschlagshöhe von 365 mm entspricht. D.h., eine vergleichsweise als gering anzusehende Niederschlagsänderung von einem Millimeter repräsentiert einen Jahreswert von einigen hundert Millimetern. Die Korrelationskoeffizienten gerasterter Beobachtungsergebnisse und den entsprechenden Modellergebnissen liegen zwischen 0,6 und 0,8. Dies gilt aber ebenso für die Betrachtung der Analysen von Niederschlagsbeobachtungen (HULME 1994).

### Entwicklung globaler Niederschlagsbilanzen

Die Geschichte der Bestimmung globaler Niederschlagsklimatologien ist eng verknüpft mit den Bilanzierungsversuchen der übrigen Wasserhaushaltsgrößen.

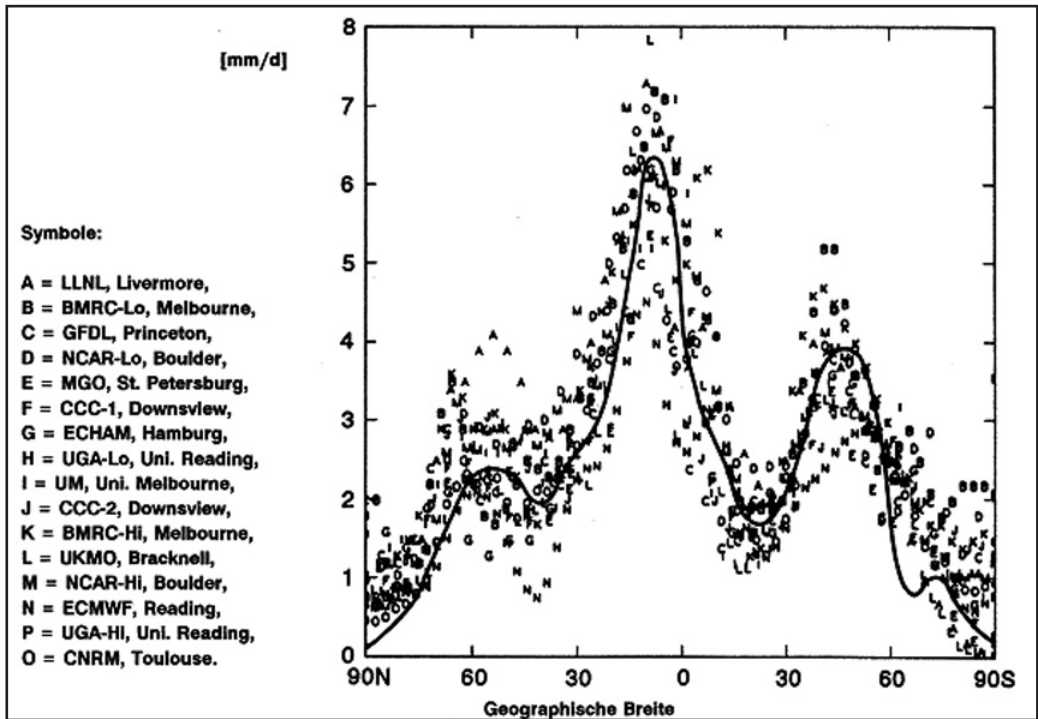


Abb. 3.1.2-4: Zonales Mittel der Nordsommerniederschläge (Juni – August in mm/Tag) für verschiedene Simulationsmodelle. Buchstaben: Symbole und Arbeitsgruppenbezeichnung links neben der Grafik, Linie: zonale Niederschlagsverteilung nach JAEGER (1976) (aus BOERS et al. 1992).

Tab. 3.1.2-1 zeigt hierbei eine Übersicht. Die Zahlen spiegeln eine immer besser werdende Datenlage, aber auch unterschiedliche methodische Ansätze wieder. Die Unterschiede im Jahresgang zonal gemittelter Globalniederschläge in Abb. 3.1.2-5 sind auf die Datverdichtung zurückzuführen. Während die Datensätze für die Kontinentalniederschläge fast ausschließlich aus Messungen mit Ombrometern hergeleitet wurden, spielen über den Ozeanen energetische Ansätze und Auswertungen von Schiffsjournalen der Kriegs- und Handelsflotten eine große Rolle. Auch der Salzgehalt des Meerwassers lässt sich zu Bestimmung der Wasserhaushaltsgrößen heranziehen und Verdunstungsmessungen an Land wurden auf die Ozeanflächen extrapoliert. Die Betrachtung der letzten Spalte in der Tab. 3.1.2-1 zeigt eine erhebliche Bandbreite des globalen Verdunstungs- und Niederschlagsgeschehens in ihrer zeitlichen Entwicklung. Zu einer Interpretation der Zahlen im Hinblick auf den globalen Klimawandel eignet sich deren Variabilität allerdings nicht. Zu unterschiedlich sind die methodischen Grundlagen; zu unterschiedlich die Dichte der verwendeten Daten und Metadaten und zu stark ist die Inhomogenität der verwendeten Zeitreihen.

### Regionale Verteilung der Niederschläge

Den Schwerpunkt auf eine Verwendung von Daten-

material in der klimatologischen Normalperiode 1931 bis 1960 legt die Analyse der globalen Niederschläge, kartographisch dargestellt am Beispiel des Jahresniederschlags in Abb. 3.1.2-6 (JAEGER 1976). Es handelt sich dabei um eine Auswertung von Klimaatlantanten mit mittleren monatlichen Niederschlagshöhen aus dieser Periode und dem daraus summierten Jahreswert. KESSLER (1968) schätzte eine mittlere jährliche Verdunstung und damit einen mittleren globalen Jahresniederschlag von 1.000 mm ab, was auch durch weitere globale Energiebilanzbetrachtungen und weitere Niederschlagsanalysen gestützt wird. Auf dieser Grundlage wurden die ozeanischen monatlichen 5°-Gitterpunktweite in ihren Absolutwerten um 6% erhöht, um den globalen Jahreswert von 1.000 mm zu erhalten.

Abb. 3.1.2-7 zeigt im Jahresgang die zonale Verteilung der Globalniederschläge, wobei drei Niederschlagsklimatologien miteinander verglichen worden sind (ADLER et al. 2003). Allen gemeinsam ist die geringe Niederschlagspende in den polaren Bereichen, bedingt durch den temperaturbedingt geringen Sättigungsdampfdruck und dem damit verbundenen geringen Aufkommen von »precipitable water«, den beiden sekundären Maxima in den gemäßigten Breiten, den Trockengebieten der Subtropenhochs und dem absoluten Maximum der Innertropen, bedingt durch die ITC. Interessant ist die Abweichung der Breitenmittel von LEGATES & WILLMOTT (1990) im innertropischen Bereich in der Größenordnung von 2 mm/Tag von den

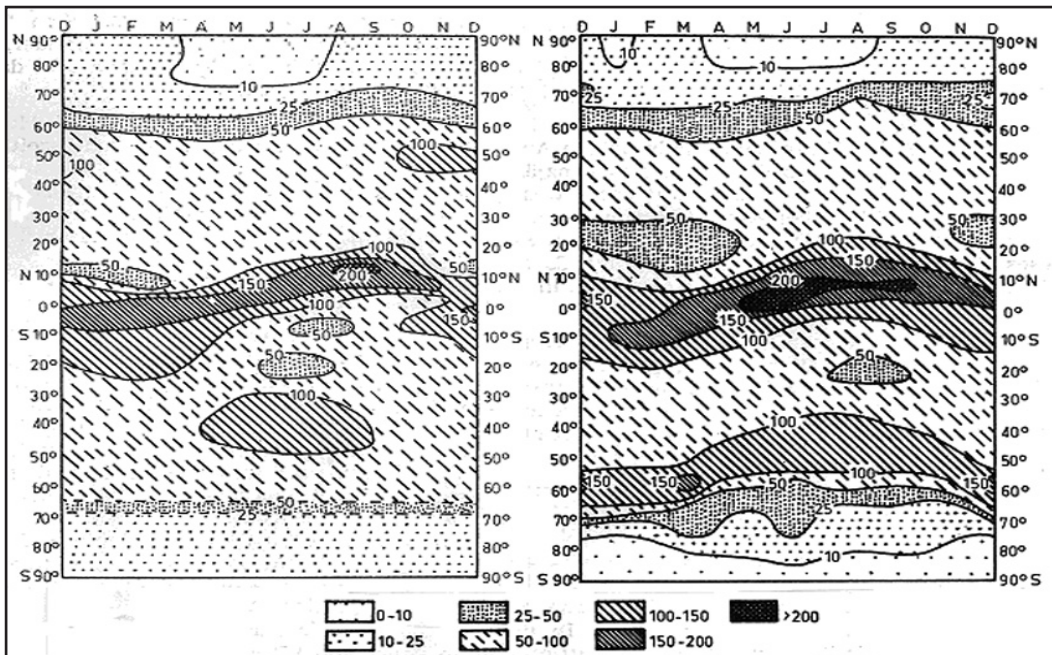


Abb. 3.1.2-5: Jahresgang der Niederschläge (mm) über der ganzen Erde. Links: nach BROOKS & HUNT (1930) Mittelungszeitraum unbekannt; rechts nach JAEGER (1976), Mittelungszeitraum: klimatologische Normalperiode 1931–1960.



**Tab. 3.1.2-1:** Mittlere jährliche Wasserhaushaltsgrößen (mm) für die Kontinente, die Meere und die ganze Erde zusammengestellt nach Quellen von JAEGER (1976), KESSLER (1985), RUDOLF (1995) und JAEGER et al. (2006).  $N_L$  = Kontinentalniederschlag,  $V_L$  = Landverdunstung,  $A_L$  = Kontinentalabfluss,  $N_M$  = Niederschlag auf den Ozeanen,  $V_M$  = Meeresverdunstung,  $N_E$  = globaler Niederschlag,  $V_E$  = Verdunstung auf der Gesamterde.

\* auf der Grundlage BAUMGARTNER & LIEBSCHER (1990) \*\*Berechnungen m. Klimamodell ECHAM4\_OPYC nach IPCC-Szenario IS 92a

<i>Autor</i>	<i>Jahr</i>	$N_L$	$V_L$	$A_L$	$N_M$	$V_M$	$N_E=V_E$
<i>Johnson</i>	?			376			
<i>Black</i>	1864/81				1019		
<i>Reclus</i>	1883			188			
<i>Woeikof</i>	1886	524	410	114			
<i>Murray</i>	1887	820	652	168			
<i>Bezdek</i>	1904	813					
<i>Brückner</i>	1905	820	652	168	994	1064	940
<i>Fritzsche</i>	1906	753	544	208	978	1064	910
<i>Lütgens</i>	1911					1402	
<i>Schmidt</i>	1915	753	544	208	670	756	690
<i>v. Kerner</i>	1919				1006		
<i>Wüst</i>	1922	753	504	249	740	842	743
<i>Kaminski</i>	1925	544	343	202	850	933	760
<i>Ekhart</i>	1930						970
<i>Brooks/Hunt</i>	1930	665			1102		975
<i>Cherubim</i>	1931	753	504	249	925	1028	880
<i>Meinardus</i>	1934	665	417	249	1141	1244	1002
<i>Halbfaß</i>	1934	672	349	323	1136	1269	1000
<i>Wüst</i>	1936	665	417	249	823	925	780
<i>Mosby</i>	1936					1061	
<i>Wundt</i>	1938	665	417	249	958	1061	880
<i>Lvovitch</i>	1945	719	477	242	1141	1241	1020
<i>Albrecht</i>	1949						770
<i>Möller</i>	1951	665	417	249	£ 897	£ 1000	£ 832
<i>Reichel</i>	1952	672	470	202	873	956	810
<i>Wüst</i>	1954	672	491	181	897	972	830
<i>Budyko</i>	1955	672	444	228/255	1025	1130	930
<i>Mosby</i>	1957	686			907		842
<i>Albrecht</i>	1960	672	450	222	1047	1138	940
<i>Budyko</i>	1963	719	410	309/322	1119	1252	1000
<i>Marcinek</i>	1964			242			
<i>Mira Atlas</i>	1964	726	484	242	1141	1241	1020
<i>Sellers</i>	1965						1004
<i>Strahler</i>	1965	679			828		784
<i>Nace</i>	1968	672	464	208	884	970	820
<i>Keßler</i>	1969	672	403	269	1136	1247	1000
<i>Lvovitch</i>	1969	732	484	249	1138	1241	1020
<i>Mather</i>	1970	712	464	249	1058	1161	955
<i>Budyko</i>	1970	719	430	289	1141	1260	1020
<i>Baumgartner &amp; Reichel</i>	1970	672	437	235	1061	1158	950
<i>Marcinek</i>	1973	670			1035		931
<i>Baumgartner &amp; Reichel</i>	1973	746			1066		973
<i>Schutz &amp; Gates</i>	1972/74						865
<i>Manabe &amp; Holloway</i>	1974	972			1077		1041
<i>Jaeger</i>	1976	756			1099		1000



Autor	Jahr	$N_L$	$V_L$	$A_L$	$N_M$	$V_M$	$N_E=V_E$
UNESCO	1978	800			1270		1130
WZN nach Shea	1986	801					
WZN nach Legates	1987	875			1278		1138
WZN nach Fiorino	1993	815			1524		
GPCP Version 1	1993	756			1141		1012
WZN mit EZMW Daten	1994	916			1393		1217
WBGU *)	1997	803	485	317	1265	1394	1125
Klige	1998	810	473	338	1262	1400	1125
Shiklomanow	1998	803	500	304	1265	1390	1125
Oki	1999	775	506	270	1080	1163	987
Trenberth	2002	695	466	230	1102	1168	979
IPCC***) [1990-1999]	2001	796	527	311	1135	1251	1032/1035
[2000-2099]	2001	858	554	344	1135	1268	1049/1055

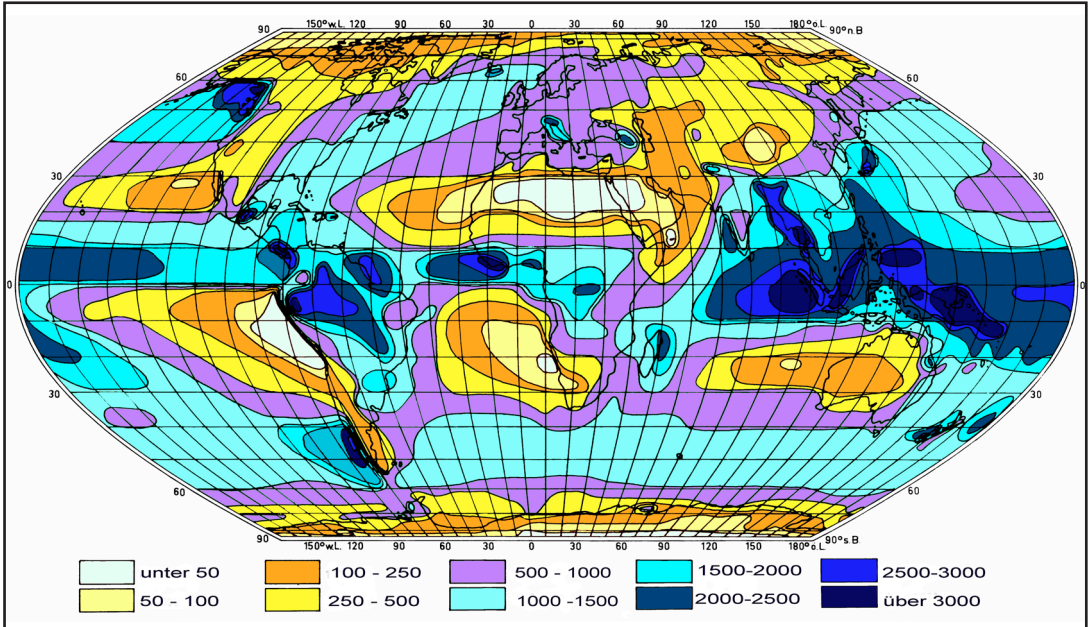


Abb. 3.1.2-6: Mittlerer globaler Jahresniederschlag [mm] aus JAEGER (1976), koloriert, Mittelungszeitraum: klimatologische Normalperiode 1931-1960.

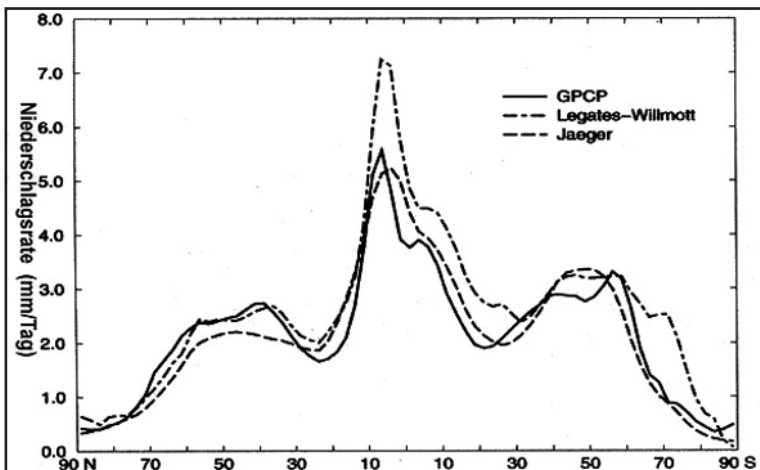
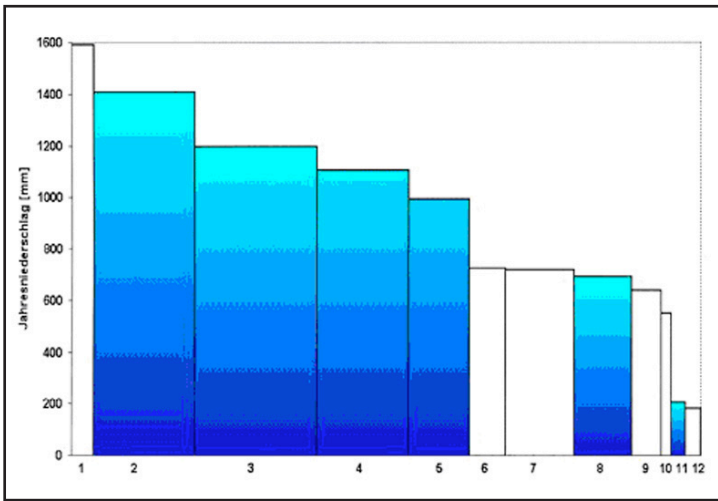
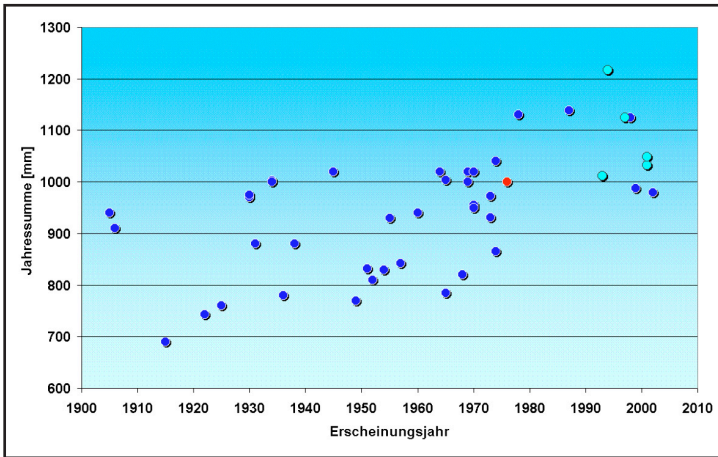


Abb. 3.1.2-7: Zonal gemittelte Niederschlagsklimatologien (mm/Tag). Durchgezogene Linie: GPCP (global precipitation climatology project), strichpunktiert: zonale Niederschläge nach LEGATES & WILLMOTT (1990) und gestrichelt: zonale Niederschläge nach JAEGER (1976), Mittelungszeitraum: klimatologische Normalperiode 1931-1960.



**Abb. 3.1.2-8:** Niederschlagsaufkommen auf zwölf globalen Großarealen. 1: Südamerika, 2: Nordpazifik, 3: Südpazifik, 4: Indischer Ozean, 5: Nordatlantik, 6: Afrika, 7: Eurasien, 8: Südatlantik, 9: Nordamerika, 10: Australien, 11: Arktisches Meer, 12: Antarktis. Die jeweiligen Abszissenabschnitte repräsentieren die Flächenausdehnungen der zugehörigen Arealen. Mittelungszeitraum: klimatologische Normalperiode 1931–1960.



**Abb. 3.1.2-9:** Entwicklung der Jahressumme des globalen Niederschlages im Laufe der Forschungsgeschichte. Die Darstellung beginnt mit BRÜCKNER (1905) (blaue Punkte); JAEGER (1976) ist der rote Punkt. Simulationen sind als türkise Punkte dargestellt.

beiden übrigen Bilanzierungen. LEGATES & WILLMOTT haben intensive Untersuchungen zur Fehlerkorrektur der Niederschlagsmessung durchgeführt und in die Niederschlagshöhen eingerechnet, wobei diese Korrekturen im innertropischen Bereich wohl zu hoch ausgefallen sind. Bemerkenswert ist außerdem die Niederschlagshöhe des GPC-Projektes am Südpol.

### Veränderung der Niederschläge global und regional

Eine Bilanzierung der Niederschläge aufgeteilt nach zwölf Arealen bietet *Abb. 3.1.2-8*. Südamerika weist die höchsten mittleren Niederschläge auf mit ca. 1.600 mm im Jahr, gefolgt vom Nordpazifik. Die Änderungen in der regionalen Verteilung des Niederschlags im letzten Jahrhundert sind in der Fläche schwer berechenbar. Zwar sind Trends im kleineren Scale und an einzelnen Stationen feststellbar, aber Inhomogenitäten in der Messung, wechselnde Messnetzdicke und Methoden-

wechsel erschweren die Berechnung von Änderungen.

### Schlußbetrachtung

Die Festlegung klimatologischer Normalperioden durch die World Meteorological Organisation (WMO) war eine Maßnahme um aus dem »Rauschen« der Atmosphäre das klimatologische Signal herauszudestillieren. Zur Bestimmung von Änderungen im globalen Verhalten der Niederschläge würde das vergleichende Arbeiten in den verschiedenen Normalperioden erfordern. Zwar liefert das WZN inzwischen Hybridprodukte von hoher Qualität in globaler Auflösung bis zu 1°-Feldern, aber die Verfügbarkeit ab 1979 ermöglicht noch keine belastbaren Aussagen im Hinblick auf »Climate Change« (ADLER et al. 2003). Das oben in seiner Ergebnisbreite kritisch betrachtete Werkzeug der Simulation liefert regional z.B. für Europa eine leichte Zunahme der Niederschläge. Die stärksten Änderungen treten aber dort auf, wo in den Modellen die größten

systematischen Fehler sind (JACOB 1998). Es wäre sinnvoll die inzwischen abgeschlossene Klimatologische Normalperiode 1961–1990 mit gleicher Methodik mit derselben Gitterpunktmaschenweise zu bearbeiten, um ohne Methodenbrüche die Variabilität mittlerer Niederschlagsmengen im Hinblick auf den globalen Klimawandel bewerten zu können.

Dies wird auch durch *Abb. 3.1.2-9* verdeutlicht, die die Entwicklung der globalen Jahresniederschlagssumme im Laufe der Forschungsgeschichte erhellt. Der leichte Anstieg der Punktwolke zur Gegenwart hin darf auf keinen Fall im Hinblick auf einen Klimawandel interpretiert werden. Er wird nur durch eine Verbesserung und Präzisierung von terrestrischen Niederschlagsmessungen und Bearbeitungsmethodiken erklärbar. Einzig die Simulationsergebnisse (türkise Punkte) könnten eine Erhöhung der Jahresniederschläge nahe legen, da die anthropogene Erwärmung von Atmosphäre und ozeanischen sowie terrestrischen Erdoberfläche eine Beschleunigung des hydrologischen Kreislaufs bedeuten kann.

## Literatur

- ADLER R.F., HUFFMANN G.J., CHANG A., FERRARO R., XIE P.-P., JANOWIAK J., RÜDOLF B., SCHNEIDER U., CURTIS S., BOLVIN D., GRUBER A., ŠUSSKIND J., ARKIN P. & E. NEKLIN (2003): The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present). *J. Hydrometeorol.*, 4, 1147-1167.
- ARKIN P.A. & B.N. MEISNER (1987): The relationship between large-scale convective rainfall and cold cloud cover over the western hemisphere during 1982-1984. *Mon. Wea. Rev.*, 115: 51-74.
- BAUMGARTNER A. & LIEBSCHER H.-J. (1990): Lehrbuch der Hydrologie 1. Allgemeine Hydrologie, quantitative Hydrologie. Berlin, Stuttgart.
- BOERS et al. (1992): Some results from an intercomparison of the climates simulated by 14 atmospheric general circulation models. *J. Geoph. Res.* 97 (D12), 771-12, 786.
- BROOKS C.E.P. & T. M. HUNT (1930): The zonal distribution of rainfall over the earth. *Mem. Roy. Meteorol. Soc.* 3, 139 pp.
- DOSTAL, P. (2005): Klimarekonstruktion der Region Triehena mit Hilfe von direkten und indirekten Daten vor der Instrumentenbeobachtung. *Ber. Meteorol. Inst. Univ.*, 13, als Download erh.
- FERRANO R.R. (1997): SSM/I derived global rainfall estimates for climatological applications. *J. Geophys. Res.*, 102, 16 715-16 735.
- FERRANO R.R. & F. MARKS (1995): The development of SSM/I rain rate retrieval algorithms using ground based radar measurements. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 12, 755-770.
- GRABL H. (2002): Das Klimasystem. *Promet*, 28: Numerische Modelle - was können sie, wo müssen sie verbessert werden. 82-84.
- HULME M. (1994): Validation of large-scale precipitation fields in general circulation models. In: DESBOIS M. & DESALMAND F. (eds.): *Global precipitation and climate change*. NATO ASI, I 26: 387-405.
- HOLLINGER et al. (1987): *Special sensor microwave / imager user's guide*. Naval research Laboratory, Washington D.C.
- IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE) (2001): *Climate change 2001: HOUGHTON J. T. et al. (eds.): The scientific basis. Contribution of working group I to the Third Assessment Report of the IPCC*. Cambridge.
- JACOB D. (1998): Intensivierung des Wasserkreislaufs? In: LOZAN J., GRABL H. & P. HUPFER (Hrsg.): *Warnsignal Klima / Wissenschaftliche Fakten*. 177-178.
- JAEGER L., HUPFER P. & KESSLER A. (2006): 100 Jahre globale Wasserbilanz von EDUARD BRÜCKNER, eine Würdigung aus heutiger Sicht. *Erdkunde, Archiv f. wiss. Geographie*, 60: 273-286.
- JAEGER L. (1976): Monatskarten des Niederschlags für die ganze Erde. *Ber. Dt. Wetterd. Nr. 139*, Offenbach, 38 pp. & 13 Karten.
- JAEGER L. (1985): Eleven years of precipitation measurements above a small pole wood stand. In: SEVRUK B. (ed.): *Correction of precipitation measurements*. Zürcher Geogr. Schr., 23, 101-103.
- KESSLER A. (1968): *Globalbilanzen von Klimaelementen*. *Ber. Inst. f. Meteorol. & Klimatol. der TH Hannover*, 3, 141 pp.
- KESSLER A. (1985): *Heat balance Climatology. World Survey of Climatology*. In: LANDSBERG H. (ed.), Bd. 1A, Elsevier.
- KLIGE, R. K., DANILOV, I., KONSICEV, D. (1998): *Geschichte der Hydrosphäre*. Moskau (in Russisch).
- LEGATES D.R. (1987): *A climatology of global precipitation*. *Publications in Climatology* 40(1), Newark, Delaware.
- LEGATES D. R. & C. J. WILLMOTT (1990): Mean seasonal and spacial variability in gauge-corrected, global precipitation. *Int. J. Climatol.*, 10: 111-127.
- MICHELSON D.B. (2004): Systematic correction of precipitation gauge observations using analyzed meteorological variables. *J. Hydrol.*, 290: 161-177.
- OKI T. (1999): The global water cycle. In: BROWNING K. A. & GURNEY R. J. (ed.): *Global Energy and Water Cycles*. Cambridge, 10-29.
- RÜDOLF B. (1995): Die Bestimmung der zeitlich-räumlichen Struktur des globalen Niederschlags. *Ber. Dt. Wetterd. Nr. 196*, Offenbach 153 pp.
- SEVRUK B. (1989): Reliability of precipitation measurements. *Proc. WMO/IAHS/ETH Workshop on precipitation measurements*. St. Moritz, 13-19.
- SHKLOMANOV I. A. (1998): *World water resources, a new appraisal and assessment for the 21st century - summary*. Cambridge.
- STERR H. (1998): Auswirkung auf den Meeresspiegel. In: LOZAN J., H. GRABL & P. HUPFER (Hrsg.): *Warnsignal Klima / Wissenschaftliche Fakten*. 201-206.
- SUSSKIND J., PIRAINO, P., ROKKE, L., IREDELL, T. & A. METHA (1997): Characteristics of the TOVS Pathfinder Path A dataset. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 78, 1449-1472.
- TAYLOR R. C. (1973): *An atlas of Pacific islands rainfall*. Honolulu, Hawaii Institute of Geophysics. 1973.
- TRENBERTH K. E. (2002): Earth system processes. In: MCCracken M. C. & PERRY J. S.: *Encyclopedia of Global Environmental Change*. Chichester, 13-30.
- WILHEIT T., A. CHANG & L. CHIU (1991): Retrieval of monthly rainfall indices from microwave radiometric measurements using probability distribution functions. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 8:118-136.

Prof. Dr. Lutz Jaeger  
 Universität Freiburg  
 Meteorologisches Institut  
 Werthmannstraße 10 - 79098 Freiburg  
 lutz-jaeger@t-online.de