

100 JAHRE GLOBALE WASSERBILANZ VON EDUARD BRÜCKNER, EINE WÜRDIGUNG AUS HEUTIGER SICHT

Mit 6 Abbildungen und 7 Tabellen

LUTZ JAEGER, PETER HUFFER und ALBRECHT KESSLER

Summary: 100 years global water balance by EDUARD BRÜCKNER, an appreciation from today's point of view

After paying tribute to the pioneering study of EDUARD BRÜCKNER on the total water balance of the planet earth, including its components, published in 1905, we give a short account of its further development up to now. Estimates of the quantities of water in the different reservoirs still show considerable uncertainties, as does the calculation of the components of the water balance. We present in detail the close relation between the temporal and areal distribution of the terms of the water balance and the elements of the heat balance of the globe. The conclusion of the study consists of a short discussion of the marine water balance and its importance, and the problematics of changes in the global water balance related to climate change.

Zusammenfassung: Nach der Würdigung der 1905 erschienenen, bahnbrechenden Arbeit von EDUARD BRÜCKNER zur vollständigen Bestimmung des globalen Wasserhaushaltes und seiner Komponenten wird die Entwicklung bis zur Gegenwart kurz umrissen. Ebenso wie bei der Berechnung der Wasserhaushaltskomponenten bestehen auch bei der Schätzung der Wassermengen in den verschiedenen Reservoiren noch erhebliche Unsicherheiten. Ausführlich wird die enge Verbindung zwischen der raum-zeitlichen Verteilung der Wasserhaushaltsgrößen und den Elementen des Wärmehaushaltes der Erde dargelegt. Kürzere Ausführungen zum ozeanischen Wasserhaushalt und seiner Bedeutung sowie zur Problematik der Veränderung des globalen Wasserhaushaltes im Fall eines Klimawandels beschließen die Arbeit.

1 Einleitung

Die Frage, ob für die ständig wachsende Menschheit in Zukunft genügend Wasser hinreichender Menge und Qualität zur Verfügung stehen wird, hängt eng mit den sich vollziehenden globalen Umweltveränderungen und dem sich anbahnenden Klimawandel zusammen (u.a. GLEICK 1993; WBGU 1997; LOZÁN et al. 2005). Ausgangspunkt für allgemeine Untersuchungen des Wasserproblems ist der globale Wasserkreislauf als einer der mächtigsten Naturprozesse. Lange Zeit war das Woher und Wohin des Wassers Gegenstand von Mythen und abenteuerlichen Vorstellungen, wenngleich realistische Ansichten seit der Antike nicht fehlten. Der Durchbruch zur Aufstellung der Wasserbilanzgleichung und der Abschätzung ihrer Komponenten gelang vor 100 Jahren dem Geographen EDUARD BRÜCKNER (* 1862, Jena, † 1927, Wien). Er formulierte die grundlegende Erkenntnis, dass die globalen Mittelwerte von Niederschlag und Verdunstung gleich sind. Dieser Leistung ist der vorliegende Beitrag gewidmet.

Die geographischen Wissenschaften zählen EDUARD BRÜCKNER bis heute zu einem ihrer großen Fachvertreter. Vor allem seine allgemeinen geomorphologischen Arbeiten (BRÜCKNER 1897) sowie seine glazial-

morphologischen Forschungen in den Alpen zusammen mit ALBRECHT PENCK (1858–1945, PENCK u. BRÜCKNER 1909) sind die Grundlage seiner wissenschaftlichen Bedeutung. Aber auch BRÜCKNERS Arbeit auf dem Gebiet der Klimatologie ist zu würdigen. 1890 trat er mit der Entdeckung einer 35-jährigen Niederschlagsschwankung an die Öffentlichkeit, in den Folgejahren als „Brücknersche Periode“ bezeichnet (BRÜCKNER 1905). Erst 1940 wurde diese Hypothese durch WAGNER (1940) endgültig ad acta gelegt. In der hier gewürdigten Arbeit drückte BRÜCKNER erstmals den Wasserhaushalt der Erde in je einer Grundgleichung für das Festland und für das Weltmeer mit einer ersten quantitativen Abschätzung der Komponenten aus, die gleichzeitig die Wechselbeziehungen zwischen Land und Ozean anzeigten (bspw. MARCINEK 2005).

Das Wirken EDUARD BRÜCKNERS wurde in der Gegenwart auch dadurch gewürdigt, dass sein Name den eines für Verdienste auf dem Gebiet der Klimatologie gestifteten Preises trägt. STEHR und VON STORCH (2000) hoben BRÜCKNERS Publikationen zum Problem der Klimaschwankungen hervor, indem sie seine wichtigen Arbeiten erneut, nun in englischer Übersetzung, einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich machten. Unser Beitrag nimmt das Erscheinen von BRÜCKNERS Aufsatz über „Die Bilanz des Kreislaufs des Wassers auf

der Erde" vor hundert Jahren zum Anlass, auch an diesen Meilenstein seiner Forschungen zu erinnern. BRÜCKNER war ein Protagonist der ganzheitlichen Betrachtung und Abschätzung des globalen Wasserhaushaltes.

Der Zufall will es, dass auch eines anderen Jubiläums in diesem Zusammenhang gedacht werden kann. Die kürzlich publizierte Antrittsvorlesung des berühmten Physikers HEINRICH HERTZ (1857–1894) über „Der Energiehaushalt der Erde“ fand vor 120 Jahren in Karlsruhe statt (HERTZ 1927). Wie weiter unten gezeigt wird, steht dieses Thema in engem Zusammenhang mit dem globalen Wasserhaushalt.

2 Zur Erforschung der globalen Wasserbilanz

Als Folge der Aufklärung entwickelten sich Ende des 18. Jahrhunderts neue Ansichten über den Wasserkreislauf auf der Erde, die sich von den bis dahin überwiegend mystischen und metaphysischen Vorstellungen zu Gunsten einer rein naturwissenschaftlichen Betrachtungsweise lösen konnten.

Zwar hatte LEONARDO DA VINCI (1452–1519) um das Jahr 1500 bereits auf die heute gültigen Zusammenhänge hingewiesen, aber Meteorologie und Hydrologie blieben weiterhin vom Gedankengut der griechischen Philosophen (THALES VON MILET, ca. 600 BC; ARISTOTELES, 384–322 BC oder SENECA, 4 BC – 65 AD) und der Bibel geprägt. So steht im Alten Testament, 1. Prediger, Vers 7: „Alle Flüsse gehen zum Meere, und doch wird das Meer nicht voll; an dem Ort, wohin die Flüsse gehen, dahin gehen sie immer wieder.“

An der neuen forschungsgeschichtlichen Strömung war EDUARD BRÜCKNER beteiligt, indem er zunächst konzeptionell und in qualitativer Weise in seiner Kommentierung der Arbeiten von MURRAY (1887) und LOOMIS (1883) wirkte. Das wurde besonders in seinem Aufsatz „On the total annual Rainfall on the Land of the Globe“ in der Meteorologischen Zeitschrift von 1887 und weiterhin in der Arbeit „Über die Herkunft des Regens“ im Jahre 1900 in der Geographischen Zeitschrift deutlich. Darin berichtete er über weitere methodische Vorarbeiten, so etwa über die Berücksichtigung untermeerischer Quellen oder über das Austreten von Grundwasser an Küsten.

Schließlich legte BRÜCKNER 1905 erstmals eine quantitative Erfassung und Diskussion des globalen Wasserhaushaltes vor, was zu den zwei Grundgleichungen für das Festland und die Ozeane führte (siehe Tab. 1):

$$N_M = V_M - D_M + D_L = V_M - (D_M - D_L) = V_M - A_L \quad (1)$$

und

$$N_L = V_L + D_M - D_L = V_L + (D_M - D_L) = V_L + A_L \quad (2)$$

mit:

ozeanische Niederschläge:	N_M
Meeresverdunstung:	V_M
Wasserdampfmenge vom Meer auf das Land übertretend:	D_M
vom Land auf das Meer übertretende Wasserdampfmenge:	D_L
Wasserführung der Flüsse zum Ozean:	A_L
Niederschläge auf dem Land:	N_L
Verdunstung auf dem Land:	V_L

Diese Werte sind als Jahresmittel zu verstehen. Sie werden entweder auf das Volumen bezogen in km^3/Jahr , oder auf die Masse bezogen, in Gt/Jahr angegeben.

Aus den Gl. (1) und (2) ergibt sich für die gesamte Erde die grundlegende Beziehung

$$N_{\text{Erde}} = V_{\text{Erde}} \quad (3)$$

Seine Ergebnisse sah BRÜCKNER durchaus kritisch und erwartete eine Verbesserung der Genauigkeit und eine weitere „Annäherung an die Wahrheit“ in der Zukunft, indem er schreibt: „nichtsdestoweniger scheinen mir auch Schätzungen nicht uninteressant, weil sie einen Begriff von der Größenordnung der bewegten Wassermassen geben“ (BRÜCKNER 1905).

Für die Landflächen der Erde benutzte BRÜCKNER die Niederschlagswerte von MURRAY (1887), die dieser aus der Niederschlagskarte von LOOMIS (1883) gewonnen hatte. Zwar war die LOOMISSche Karte nach BRÜCKNERS Meinung zu diesem Zeitpunkt bereits durch eine Karte von SUPAN (1898) überholt, er benutzte aber trotzdem die MURRAYschen Werte für seine Auswertung, da er die Abweichungen in der Neubearbeitung für nach beiden Richtungen gehend und für unbedeutend hielt. Hierin erwies sich EDUARD BRÜCKNER durchaus als wissenschaftlicher Pragmatiker.

Die Bestimmung der Wasserkreisläufe führte BRÜCKNER zur Aufgliederung der Erde in drei globale Großareale: der Gesamtheit der Weltmeere, der peripheren Gebiete der Landoberfläche und der abflusslosen Gebiete. Zur Herkunft der von ihm verwendeten Werte der ozeanischen Niederschläge äußerte sich BRÜCKNER

nicht. Wie den meisten der ihm nachfolgenden Autoren war es BRÜCKNER verständlicherweise nicht möglich, die von ihm bestimmten Wasserhaushaltskomponenten auf eine bestimmte Periode zu beziehen. Vielmehr mussten alle erreichbaren Daten berücksichtigt werden.

Der Übergang von Jahreswerten des globalen Niederschlags zu saisonalen Bilanzen (Dezember – Februar, März – Mai, Juni – August, September – November) wird erst von MÖLLER (1951) eingeleitet. JAEGER (1976) ging noch einen Schritt weiter und zerlegte den globalen Jahresgang des Niederschlags in Monatsschritte, verbunden mit einem Datensatz im 5°-Gitterpunktraster. Diese Werte wurden vielfach zur Validierung von Simulationsmodellen genutzt (z.B. BOER et al. 1992). LEGATES und WILLMOTT (1990) zogen die Gittermaschenweite noch enger (2,5°), aber sie bewegten sich auch in dem durch Monatsmittelwerte ausgedrückten Jahresgang. In weiten Bereichen der ozeanischen Südhemisphäre griffen sie auf die 5°-Gitterpunktweite von JAEGER (1976) zurück und verfeinerten sie. Heute repräsentiert das von der Meteorologischen Weltorganisation (WMO) beim Deutschen Wetterdienst (DWD) in Offenbach eingerichtete Weltzentrum für Niederschlag (GPCC, global precipitation climatology center) den “state of the art” (RUDOLF 1995). Auch die Ergebnisse internationaler Forschungsprojekte zur Verbesserung der Niederschlagsmessungen laufen im GPCC ein, z.B. aus dem WMO-Programm IPWG (International Precipitation Working Group, z.B. JOYCE et al. 2004) oder aus EURainSAT (TURK et al. 1999). Dessen ungeachtet stehen im GPCC in Offenbach für die Landflächen nach wie vor Messungen mit den konventionellen Niederschlagssammlern im Vordergrund, während über den Ozeanen heute die Satellitenmessung dominiert.

Bei der Bestimmung der kontinentalen Abflusswerte griff BRÜCKNER wieder auf die Arbeiten von MURRAY (1887) zurück. Dort standen Abflussmessungen von 33 großen Strömen zwischen 60° N und 40° S zur Verfügung. Als aktuelles Standardwerk für eine präzise Bestimmung der globalen Festlandsabflüsse (und der übrigen Glieder des globalen Wasserhaushalts) ist die 1975 erschienene Weltwasserbilanz von BAUMGARTNER und REICHEL anzusehen. Die beiden Autoren verzichten allerdings auf Jahresgänge. Weiterhin ist auf die Zusammenstellung bei KORZUN (1974) und bei VAN DER LEEDEN et al. (1990) hinzuweisen.

Den größten Arbeitsaufwand, auch textlich nachvollziehbar, steckte BRÜCKNER in die Beschaffung und Bewertung seiner Verdunstungswerte. Man muss die von BRÜCKNER zusammengetragenen Verdunstungsangaben als Werte der *potenziellen Verdunstung* ansehen,

Tabella 1: Zusammenfassende und einzelne Angaben über Berechnungen der Komponenten des globalen Wasserhaushalts in Gt/Jahr (obere Zahl) und in Millimetern (untere Zahl; kursiv). Eingetragen sind auch die Ergebnisse der Berechnung der Größen mit Hilfe eines dreidimensionalen Atmosphäre-Ozean-Klimamodells

Prozess	N_L	V_L	A_L	N_M	V_M	$V_E = N_E$
Dimension	10^3 Gt a^{-1}					
	mm a^{-1}					
Berechnungen vor 1905						
Anzahl	3	2	4	1	0	
Maximum	124 <i>820</i>	96 <i>652</i>	17 <i>114</i>	359 <i>1019</i>	–	–
Minimum	78 <i>524</i>	61 <i>410</i>	56 <i>376</i>	359 <i>1019</i>	–	–
EDUARD BRÜCKNER 1905						
	122	97	25	359	384	481
	<i>824</i>	<i>655</i>	<i>169</i>	<i>992</i>	<i>1061</i>	<i>938</i>
Berechnungen zwischen 1906 und 2002						
Anzahl	39	34	35	38	35	41
Mittelwert	105 <i>710</i>	68 <i>459</i>	38 <i>258</i>	371 <i>1025</i>	410 <i>1133</i>	479 <i>934</i>
Standardabweichung	8,4 <i>56,4</i>	7,0 <i>47,4</i>	5,5 <i>36,8</i>	54,4 <i>150,4</i>	64,5 <i>178,1</i>	56,2 <i>109,5</i>
Maximum	120 <i>810</i>	81 <i>547</i>	50 <i>338</i>	477 <i>1317</i>	575 <i>1588</i>	577 <i>1125</i>
Minimum	81 <i>547</i>	51 <i>344</i>	30 <i>203</i>	242 <i>668</i>	273 <i>754</i>	354 <i>690</i>
gegenwartsnahe Berechnungen						
WBGU 1997*)	119 <i>803</i>	72 <i>485</i>	47 <i>317</i>	458 <i>1265</i>	505 <i>1394</i>	577 <i>1125</i>
KLIGE et al. 1998	120 <i>810</i>	70 <i>473</i>	50 <i>338</i>	457 <i>1262</i>	507 <i>1400</i>	577 <i>1125</i>
SHIKLOMANOW 1998	119 <i>803</i>	74 <i>500</i>	45 <i>304</i>	458 <i>1265</i>	503 <i>1309</i>	577 <i>1125</i>
OKI 1999	115 <i>775</i>	75 <i>506</i>	40 <i>270</i>	391 <i>1080</i>	431 <i>1163</i>	506 <i>987</i>
TRENBERTH 2002	103 <i>695</i>	69 <i>466</i>	34 <i>230</i>	399 <i>1102</i>	433 <i>1168</i>	502 <i>979</i>
Berechnungen mittels Klimamodell ECHAM4_OPYC nach IPCC-Szenario IS 92a						
1990–1999	118 <i>796</i>	78 <i>527</i>	46 <i>311</i>	411 <i>1135</i>	453 <i>1251</i>	529 ≠ 531 <i>1032 ≠ 1035</i>
2000–2099	127 <i>858</i>	82 <i>554</i>	51 <i>344</i>	411 <i>1135</i>	459 <i>1268</i>	538 ≠ 541 <i>1049 ≠ 1055</i>

*) auf der Grundlage von Daten aus BAUMGARTNER und LIEBSCHER (1990)

ein Begriff, der erst 1944 von THORNTHWAITE und WILM eingeführt wurde. Alle Messungen wurden mit Verdunstungspfanzen und Evaporimetern verschiedenster Bauart durchgeführt, darunter auch in großem Maße das einfach zu handhabende Atmometer von PICHE (1872). Bei der Verwendung des zur Verfügung stehenden Datenmaterials achtete BRÜCKNER auf die klimatologische Relevanz der geographischen Breiten. Seine Korrekturen können auf der Grundlage des Einflusses verdunstungssteuernder Faktoren gesehen werden:

$$\text{Verdunstung} = f(\text{Energiezufuhr, Ventilation, Sättigungsdefizit der Luft}) \quad (4)$$

Die Verdunstung über dem Meer wurde von BRÜCKNER aus Evaporimetermessungen angrenzender Landstationen gewonnen. Er suchte Messungen über möglichst großen Wasserflächen, um Oaseneffekte zu vermeiden. In den USA wurden PICHE-Werte auf freie Wasserflächen „reduziert“. Die russischen Messdaten schienen BRÜCKNER zu gering. Die Exposition der Evaporimeter nach Vorschrift in der unten offenen WILDSchen Hütte vermindert die Luftzirkulation (sowie das Energieangebot für die Verdunstung).

In den auf die Arbeit von BRÜCKNER 1905 folgenden Jahrzehnten haben bis heute zahlreiche Wissenschaftler Berechnungen der globalen Wasserbilanz vorgelegt. Ausführliche Tabellen findet man bei JAEGER (2005) und MARCINEK (2005). Komprimierte Angaben enthält die Tabelle 1. Die Werte sind hier in Gt/Jahr angegeben und entsprechen numerisch km^3/Jahr unter der Voraussetzung, dass die Dichte des Wassers 1.000 kg/m^3 beträgt. Damit wird vermieden, den thermisch bedingten Anstieg des Meeresspiegels in die Betrachtungen über die rezenten Änderungen des Wasserhaushaltes einzubeziehen. Bis zu jüngsten Berechnungen des globalen Wasserhaushaltes variieren die Jahreswerte der verschiedenen Komponenten nicht unerheblich. Das kann sowohl auf die noch unzureichende Datenbasis, als auch auf Mängel in den Berechnungsverfahren zurückgeführt werden. Vergleicht man die Ergebnisse von BRÜCKNER mit den Mittelwerten aus zahlreichen Berechnungen, so findet man die größten prozentualen Abweichungen für V_L und A_L , während der Wert für die Summe von Verdunstung und Niederschlag fast gleich ist.

Die Modellrechnungen ergeben ebenfalls Werte gleicher Größenordnung, bei geringen Differenzen der Summe der Niederschlags- und Verdunstungswerte. Die meisten Daten für das 21. Jahrhundert (voraussichtliches Eintreten des Klimawandels) sind gegenüber den Daten für das 20. Jahrhundert etwas erhöht, was

auf eine tendenzielle Intensivierung des Wasserkreislaufes hindeuten kann. In Abbildung 1 ist der globale Wasserkreislauf einschließlich der Wasserreservoirs und der mittleren Verweilzeiten des Wassers in diesen schematisch dargestellt.

An dieser Stelle sei festgestellt, dass eine wichtige Voraussetzung für die Aufstellung von globalen Wasserbilanzen die Kenntnis der Gesamtwassermenge auf der Erde und der in den verschiedenen Reservoirs enthaltenen Wasservolumina ist. Nach den meisten Berechnungen liegt die Gesamtwassermenge bei knapp $1,4 \cdot 10^9 \text{ km}^3$. Eine detaillierte Aufteilung der riesigen, in den drei Aggregatzuständen flüssig, fest und dampfförmig vorkommenden und in unterschiedlicher Weise am Kreislauf beteiligten Wassermenge enthält Tabelle 2. Bei diesen Aufstellungen wird angenommen, dass die Gesamtwassermenge konstant ist. Das heißt, dass neu in den Kreislauf eintretendes Wasser (juveniles Wasser) sich mit dem aus dem Kreislauf ausscheidenden Wasser (vadoses Wasser) gerade die Waage hält.

Man findet in der Literatur auch heute noch erhebliche Diskrepanzen in der Wassermengenberechnung bzw. -schätzung. So findet man bei KLIGE et al. (1998) entsprechende Angaben (s.a. Abb. 1), nach denen die Gesamtwassermenge fast $1,6 \cdot 10^9 \text{ km}^3$ beträgt. Der größte Unterschied betrifft das Grundwasser, das mit $60 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ durch Einbeziehung des tiefen, für den Menschen nicht nutzbaren Grundwassers an die zweite Stelle der Reservoirs nach dem Ozean rückt. Auch hier wird deutlich, dass auch 100 Jahre nach Beginn der wissenschaftlichen globalen Wasserbilanzuntersuchungen noch erheblicher Forschungsbedarf besteht.

3 Ergebnisse globaler Wasserbilanzschätzungen, ermittelt mit der Wärmehaushaltsmethode

Eine häufig angewendete Möglichkeit, das globale Jahresmittel des Niederschlages N_E und der Verdunstung V_E zu bestimmen, besteht in der Abschätzung des globalen Wärmehaushalts. Als BRÜCKNER 1905 seinen Aufsatz veröffentlichte, waren weder die dafür notwendigen Daten in ausreichendem Umfang vorhanden, noch waren die theoretischen Voraussetzungen für detaillierte Berechnungen gegeben. Sie wurden erst in den folgenden fünf Jahrzehnten bereitgestellt und entwickelt. Schließlich stellte Ende des 20. Jahrhunderts die Anwendung von Satellitentechniken einen bedeutenden Fortschritt in der Erfassung globaler Datensätze dar. Endlich konnten auch große Ozeanareale erfasst werden, von denen bis dato nur schütterere meteorologische Informationen vorlagen.

Tabelle 2: Die Wasserreservoir auf der Erde (nach SHIKLOMANOV 1993)

Water reservoirs of the earth (after SHIKLOMANOV 1993)

Reservoir	Fläche 10 ⁶ km ²	Volumen 10 ⁶ km ³	Mittlere Schicht- dicke m	Anteil Gesamt- wasser %	Anteil Süßwasser %
Weltmeer	361,300	1338,000	3700	96,5	–
Grundwasser	134,800	23,100	174	1,7	–
Süßwasser		10,530	78	0,76	30,1
Bodenfeuchte		0,0165	0,2	0,001	0,05
Gletscher, ständige Schneedecke	16,227	24,064	1463	1,74	68,7
Antarktis	13,980	21,600	1546	1,56	61,7
Grönland	1,802	2,340	1298	0,17	6,58
Arktische Inseln	0,226	0,0835	369	0,006	0,24
Hochgebirge	0,224	0,0406	181	0,003	0,12
Grundeis/Permafrost	21,000	0,300	14	0,022	0,86
Seen	2,058	0,1764	85,7	0,013	–
Süßwasser	1,236	0,091	73,6	0,007	0,26
Salzwasser	0,822	0,0854	109,8	0,006	–
Sümpfe und Moore	2,683	0,01147	4,28	0,0008	0,03
Flüsse	148,80	0,00212	0,014	0,0002	0,006
Biomasse	510,00	0,00112	0,002	0,0001	0,003
Atmosphäre	510,00	0,0129	0,025	0,001	0,04
Gesamtes Wasser	510,00	1385,984	2718	100	–
Gesamtes Süßwasser	148,00	0,03503	23,5	2,53	100

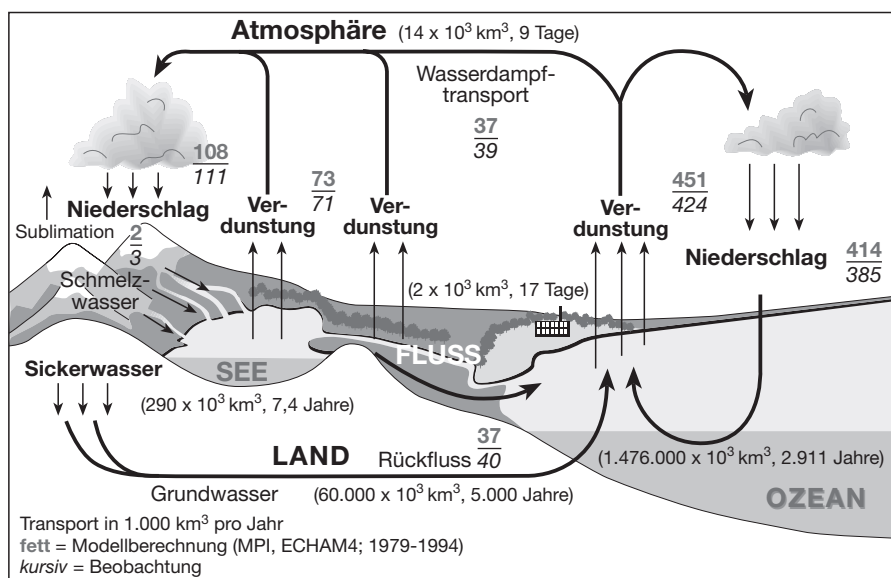


Abb. 1: Schematische Darstellung des globalen Wasserkreislaufes (Jahresmittelwerte) mit Berechnungen auf der Grundlage von Beobachtungen (einschl. Schätzungen der Wassermengen in den verschiedenen Reservoirs sowie mittlere Verweilzeiten eines Wasserteilchens in diesen) und von Modellrechnungen (Quelle: LOZÁN et al. (2005) nach Daten von KLIGE et al. (1998) und des Max-Planck-Instituts für Meteorologie Hamburg)

Schematic representation of the global water balance (annual means), with estimates based on observations (including estimates of the amounts of water in the different reservoirs and the mean retention times of a water particle in the individual reservoirs) and based on simulations (source: LOZÁN et al. (2005) after data from KLIGE et al. (1998) and the Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg)

Die mittlere globale jährliche Wassermenge des Niederschlags N_E bzw. der Verdunstung V_E für die $N_E = V_E$ (3) gelten soll, kann über den mit der Verdunstung gesetzmäßig verknüpften globalen latenten Wärmestrom $\lambda \cdot V_E$ (mit λ = Verdunstungswärme) abgeschätzt werden.

Für die Strahlungsbilanz des Planeten Erde und für die Energiebilanz des Systems Erde – Atmosphäre Q , die für die Abschätzung des latenten Wärmestroms gebraucht wird, gilt:

$$Q = (J/4)(1 - \alpha) - W \quad (5)$$

mit J = Solarkonstante (solare kurzwellige Einstrahlung am Außenrand der Atmosphäre in mittlerer Entfernung Erde/Sonne), α = planetare Albedo, W = langwellige Strahlung des Planeten Erde in den Weltraum (α dimensionslos, sonst $[W/m^2]$).

Die Größen J , α und W können heute mit Satelliten gemessen werden. Q ist im Jahresmittel etwa gleich Null, was für die Abschätzung von $\lambda \cdot V_E$ in unserem Zusammenhang wichtig ist, weist allerdings einen Jahresgang auf. Bei größter Entfernung von der Sonne in der Jahresmitte und bei gleichzeitig höchsten Temperaturen des Planeten ist Q negativ (KANDEL et al. 1998). Der Verlust wird um den Jahresanfang bei Sonnennähe wieder ausgeglichen, so dass für die Abschätzung im Jahresmittel $Q = 0$ gesetzt werden kann.

Die Solarkonstante J wurde bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts von der Erdoberfläche aus gemessen, später von Ballons und Raketen sowie schließlich auf Satellitenplattformen (Tab. 3). Sie schwankt vor allem im elfjährigen Aktivitätszyklus der Sonne um ca. 0,1% (WILLSON 1997; FRÖHLICH u. LEAN 1998). Vor dem Satellitenzeitalter war der Wert der planetaren Albedo α mit großen Unsicherheiten behaftet. Astronomen hatten diese Größe aus der Intensität des aschgrauen Mondlichts abgeleitet (Tab. 3) und waren zu sehr viel höheren Werten gelangt, als die Satellitenmessungen ($\alpha \sim 30\%$) ergaben. Dass der globale Energieverlust durch W während des Sommers der Nordhalbkugel am größten sein muss, war bereits Anfang des 20. Jahrhunderts aus globalen Temperaturkarten bekannt (KESSLER 1968). Für die Energieumsätze an der Erdoberfläche gilt:

$$R + BO = H + \lambda \cdot V \quad (6)$$

Mit R = Strahlungsbilanz, BO = Boden- bzw. Ozeanwärmestrom, H = turbulenter Strom fühlbarer Wärme und $\lambda \cdot V$ = turbulenter Strom latenter Wärme. R und BO werden positiv gezählt, wenn sie zur Erdoberfläche

Tabelle 3: Die Solarkonstante J und die planetare Albedo α nach verschiedenen Quellen (HANN 1901; DRUMMOND 1971; VONDER HAAR u. SUOMI 1971; HUNT et al. 1986; FRÖHLICH u. LEAN 1998)

The solar constant J and the albedo of the planet earth α as given by various sources (HANN 1901; DRUMMOND 1971; VONDER HAAR u. SUOMI 1971; HUNT et al. 1986; FRÖHLICH u. LEAN 1998)

	Solarkonstante J W/m ²	Planetare Albedo α dimensionslos
POUILLET 1837	1228	
LANGLEY 1884	2142	
VERY 1912		0,89
RUSSELL 1916		0,41–0,49
ABBOT 1923/52	1352	
DANJON 1936		0,39
NICOLET 1951	1380	
DRUMMOND 1970	1360	
VONDER HAAR/SUOMI 1971		0,30
FRÖHLICH/LEAN 1998	1366 ± 0,5 im 11-jährigen Zyklus	

gerichtet sind, H und $\lambda \cdot V$ positiv, wenn sie zur Atmosphäre gerichtet sind $[W/m^2]$.

Für stabile Klimabedingungen des Planeten Erde ist das globale Jahresmittel von BO ähnlich wie Q gleich Null zu setzen. Ob allerdings diese Annahme für die aktuelle Klimasituation des Planeten Erde zutrifft, lässt sich jedenfalls für die Weltmeere durch Temperaturmessungen noch nicht hinreichend genau bestimmen und bestätigen. Auch für die Annahme $Q = 0$ müssen längere Zeitreihen abgewartet werden (vgl. LEVITUS et al. 2000). Aus der großen Zahl der Bestimmungen des globalen Wärmehaushalts der letzten 120 Jahre, die in LAUSCHER (1956), KESSLER (1968) und KIEHL und TRENBERTH (1997) übersichtlich zusammengestellt worden sind, werden nur einige wichtige in Tabelle 4 aufgeführt.

Weitgehend unbekannt war bisher ein Beitrag von HEINRICH HERTZ (1857–1894) aus dem Jahre 1885 geblieben. Deshalb sei hier kurz zu seinem 120-jährigen Jubiläum darauf eingegangen. HERTZ fand das Thema interessant genug, um es in seiner Karlsruher Antrittsvorlesung über „Der Energiehaushalt der Erde“ zu behandeln (HERTZ 1927; MULLIGAN u. HERTZ 1997; HERTZ u. MULLIGAN 1998). HERTZ hatte in jüngeren Jahren Kontakte zu GEORG VON NEUMAYER (1826–1909) geknüpft, dem Direktor der Deutschen Seewarte seiner Vaterstadt Hamburg. Dem Meteorologen der Anstalt WLADIMIR KÖPPEN (1846–1940) schickte er Sonderdrucke seiner Arbeiten und besuchte ihn, wenn er bei den Eltern in Hamburg weilte. HEINRICH HERTZ war

Table 4: Einzelne Terme des Energiehaushalts der Erde [Wm^{-2}]. \mathcal{J} Solarkonstante, α planetare Albedo [dimensionslos], R Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche, H Strom fühlbarer Wärme an der Erdoberfläche, $\lambda \cdot V_E$ latenter Wärmestrom an der Erdoberfläche, V_E Verdunstung an der Erdoberfläche [cm], N_E Niederschlag [cm]. (Nach verschiedenen Quellen: BUDYKO 1962; KIEHL u. TRENBERTH 1997; LAUSCHER 1956; MULLIGAN u. HERTZ 1997)

Individual terms of the energy balance of the earth [Wm^{-2}]. \mathcal{J} solar constant, α albedo of the planet [dimensionless], R net radiation at the earth's surface, H sensible heat flux at the surface of the earth, $\lambda \cdot V_E$ latent heat flux at the earth surface, V_E evaporation at the earth's surface [cm], N_E precipitation [cm]. (From various sources: BUDYKO 1962; KIEHL u. TRENBERTH 1997; LAUSCHER 1956; MULLIGAN u. HERTZ 1997)

Autoren / authors	\mathcal{J}	α	R	H	$\lambda \cdot V_E$	$V_E = N_E$
HERTZ 1885	1960	0,36			82	104
TRABERT 1911	1357	0,40	102		102	130
BUDYKO 1962	1382	0,42	97	17	80	102
KIEHL u. TRENBERTH 1997	1367	0,31	102	24	78	99

1878 in München Student von WILHELM VON BEZOLD (1837–1907) – des späteren Direktors des Preußischen Meteorologischen Instituts in Berlin – und ab Herbst 1878 in Berlin Student und Assistent von HERMANN VON HELMHOLTZ (1821–1894) gewesen. Er hatte in dieser Zeit einige kleinere Arbeiten über meteorologische Themen veröffentlicht. In Berlin wurde HERTZ auch mit WILHELM JULIUS FOERSTER (1832–1921), dem damaligen Direktor der Sternwarte, bekannt, der sich für seine Arbeiten interessierte. 1883 habilitierte sich HERTZ in Kiel. Der Titel seiner ersten Vorlesung lautete: „Mechanische Wärmetheorie“. HERTZ war deshalb mit der Fragestellung der Energiebilanz des Planeten Erde durch seine zahlreichen Kontakte zu maßgeblichen Forscherpersönlichkeiten seiner Zeit vertraut und konnte seinem gelehrten Publikum in Karlsruhe eine systematische und interessante Zusammenschau einzelner Terme des globalen Wärmehaushaltes vortragen. Dass die Frage nach der quantitativen Bestimmung in der Luft lag, bestätigt das Erscheinen einer Arbeit von VON BETZOLD (1892) kurz darauf in den Sitzungsberichten der Königl. Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin. An seine Eltern schrieb HERTZ, nach überstandenen öffentlichen Auftritt, in seiner bescheidenen Art indes: „Gestern habe ich wenigstens eine Unbehaglichkeit abgeschüttelt, die Antrittsrede. Das Professorenkollegium war ziemlich vollständig da. [...] Mein Vortrag befriedigte mich durchaus nicht, er war nach meinem Gefühl arg missglückt“.

Wenden wir uns nun wieder der Betrachtung der Daten der Tabelle 4 zu. Durch Anwendung der Satellitentechnik sind die jüngsten Werte für \mathcal{J} , α und W im Vergleich zu den übrigen Termen als die verlässlichsten anzusehen. Trotzdem zeigen die vorhandenen Zeitreihen der globalen Werte von \mathcal{J} , α und W noch Un-

stimmigkeiten untereinander (vgl. CHARLSON et al. 2005; HANSEN et al. 2005; RASCHKE et al. 2005; WIELICKI et al. 2005). Für H , $\lambda \cdot V$ und vor allem für R hat sich zwar die Datenlage (KESSLER 1985; GILGEN et al. 1998) verbessert, trotzdem variieren die Bestimmungen noch erheblich (vgl. WILD et al. 2005; PINKER et al. 2005). Immerhin gibt es eine Annäherung der globalen Jahresmittel von N_E und V_E , die mit den beiden unterschiedlichen und von einander unabhängigen Bestimmungsverfahren ermittelt werden (vgl. Tab. 1). Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass weder für N_E noch für V_E globale Werte angegeben werden können, die eine normale Klimaperiode von 30 Jahren umfassen und die den Anforderungen entsprechen, die man in der Klimatologie von Daten einer Referenzperiode erwartet (JAEGER 2005). Das liegt vor allem an der unzureichenden Datengrundlage über den Ozeanen (GARNIER et al. 2000).

Abbildung 2 zeigt die globale Verteilung von R und $\lambda \cdot V$ für Januar, einen Wintermonat der nördlichen Halbkugel. Hier deutet sich insofern eine paradoxe klimatologische Situation an, als bei Strahlungsenergieverlust zwischen 90° N bis etwa 45° N und reduzierten R -Werten bis zum Äquator hin, eine maximale Verdunstung von den Weltmeeren zu beobachten ist. Diese verlieren zusätzlich Energie durch H (nicht in Abb. 2 dargestellt). Dieser enorme Energieverlust an der Ozeanoberfläche kann allein durch BO , infolge des hohen Wärmehalts der Ozeane, kompensiert werden. Die Ursache für diese bemerkenswerte Situation liegt im Auftreten hoher Wasserdampfgradienten über den Westteilen der nördlichen Ozeane, die durch westliche Advektion kalter und trockener Festlandsluft über den relativ warmen Ozeanen erzeugt werden. Auf den Kontinenten der Nordhalbkugel stehen dagegen im

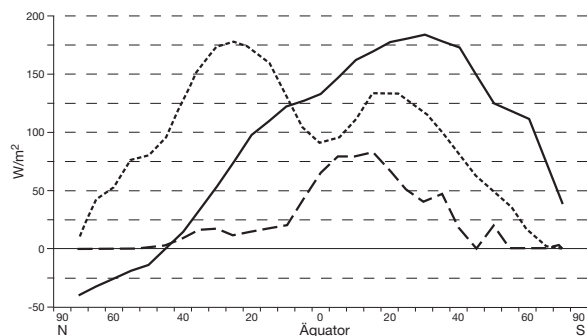


Abb. 2: Breitenkreismittelwerte der Strahlungsbilanz R für Land- und Wasserflächen (durchgezogene Linie), des Stromes latenter Wärme $\lambda \cdot V$ für Wasserflächen (kurz gestrichelt) und für Landflächen (lang gestrichelt), Monat Januar (Daten aus KESSLER (1968) nach BUDYKO (1963) und weiteren Quellen)

Latitudinal averages of the net radiation R on continents and oceans (continuous line), of the latent heat flux $\lambda \cdot V$ above the oceans (narrow broken line) and above the continental areas of the globe (wide broken line) in January (data from KESSLER (1968) after BUDYKO (1963) and further sources)

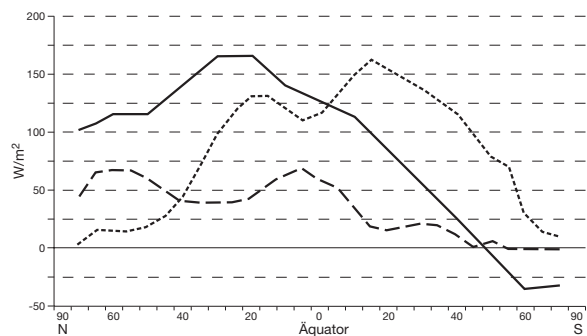


Abb. 3: Breitenkreismittelwerte der Strahlungsbilanz R für Land- und Wasserflächen (durchgezogene Linie), des Stromes latenter Wärme $\lambda \cdot V$ für Wasserflächen (kurz gestrichelt) und für Landflächen (lang gestrichelt), Monat Juli (Daten aus KESSLER (1968) nach BUDYKO (1963) und weiteren Quellen)

Latitudinal averages of the net radiation R on continents and oceans (continuous line), of the latent heat flux $\lambda \cdot V$ above the oceans (narrow broken line) and above the continental areas of the globe (wide broken line) in July (data from KESSLER (1968) after BUDYKO (1963) and further sources)

Wintermonat Januar für die Verdunstung V bis etwa 40° N durch den Bodenwärmestrom BO und durch H nur geringe Energiemengen zur Verfügung, da auch noch das Strahlungsdefizit ausgeglichen werden muss. In den subtropischen Trockengebieten ist es der Wassermangel, der höhere Verdunstungsraten verhindert. Die Wintersituation auf der Südhalbkugel (Abb. 3) zeigt weitgehend ähnliche Züge wie die kalte und strahlungsarme Jahreszeit der Nordhalbkugel. Der Vergleich der Breitenverteilung von $\lambda \cdot V$ (Abb. 2 und 3) lässt erkennen, dass die Verschiebungen der Maxima und Minima auf den Ozeanen im Laufe des Jahres gering sind, während auf den Landflächen, bei äquivalenter Strahlungssituation der entsprechenden Jahreszeiten, aus einer eingipfeligen Verteilung eine Kurve mit zwei Maxima entsteht. Der Grund liegt nicht nur in der Energiebereitstellung für $\lambda \cdot V$, sondern auch in der Bereitstellung von Wasser für die Verdunstung.

4 Hauptkreislauf vom Ozean zum Ozean

Sowohl aus den Berechnungen der Komponenten des globalen Wasserkreislaufes von BRÜCKNER, als auch aus allen folgenden Bestimmungen (Tab. 1) geht klar hervor, dass zwei Kreisläufe existieren. Der eine verläuft vom Festland zum Festland und ist wasser-

brauchend ($N > V$), der andere, intensivere dagegen vom Meer zum Meer und treibt den Gesamtprozess immer wieder neu an ($V > N$). Das gilt jedoch nicht für alle Teile des Weltmeeres. Immer wieder neu angetrieben und mit Wasser versorgt wird der globale Kreislauf von den verdunstungsstarken Regionen der Ozeane in den Subtropen und im Bereich der starken, polwärts gerichteten Meeresströmungen. Diese Bereiche sind die Nährgebiete des Wasserkreislaufes, die „Quellen aller Quellen“. Die Regionen im Weltmeer, in denen der Niederschlag höher ist als die Verdunstung, bezeichnet man entsprechend als die Zehrgebiete des Wasserkreislaufes. Man findet sie in den mittleren Breiten im Bereich der atmosphärischen Tiefdrucktätigkeit und in Äquatornähe. Niederschlag und Verdunstung sind über den Ozeanen, ähnlich wie über dem Festland, regelmäßigen (Tages- und Jahresgang) und unregelmäßigen zeitlichen Variationen unterworfen.

Die Verteilung der beiden Grundgrößen an der Meeresoberfläche hat Konsequenzen für Struktur und Dynamik der Ozeane. Zu deren Charakterisierung geht man am besten von der hydrologischen Differenz Verdunstung V minus Niederschlag N aus.

So zählen zu den weiteren Fortschritten nach BRÜCKNER seit etwa 20 Jahren realistischere Abschätzungen dieser wichtigen Wasserhaushaltsgröße ($V_M - N_M$) auf den Weltmeeren, die die Ursache für

Tabelle 5: Wassergewinn- (+) und Wasserverlust (-) infolge der Differenz Verdunstung minus Niederschlag ($V_{NA}-N_{NA}$) im Jahresdurchschnitt und Mittelwerte des Salzgehaltes S für den Nordatlantik nach 5°-Breitenzonen. (Daten: $V_{NA}-N_{NA}$ nach SCHMITT et al. 1989; S nach WÜST et al. 1954)

Water gain (+) and water loss (-) resulting from the difference evaporation minus precipitation ($V_{NA}-N_{NA}$), annual mean and mean values of the salinity S in the North Atlantic Ocean, 5-degree latitude zones. (data: $V_{NA}-N_{NA}$ after SCHMITT et al. 1989; S after WÜST et al. 1954)

Geograph. Breite	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0
Grad Nord	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5
Volumenrate $10^3 \text{ m}^3/\text{s}$	-7	-9	-27	-26	-2	+27	+79	+86	+143	+165	+164	+114	-44	-30
Salzgehalt PSU ¹⁾	33,5	32,4	32,9	34,6	34,8	34,9	36,7	36,9	36,8	36,7	36,2	35,9	35,2	23,0

¹⁾ PSU = Practical Salinity Unit (entspricht numerisch Promille)

nicht windbedingte Massenverlagerungen von Wasser von Überschuss- zu Defizitgebieten ist. In Abbildung 4 und Tabelle 5 sind die Verhältnisse für den Nordatlantik dargestellt, weil dort die Datengrundlage günstig ist. Auf dem Westatlantik (Abb. 4) muss bei 30° N im Jahresdurchschnitt eine Wasserschicht von mehr als 2 m durch Massenzufluss ersetzt werden. Die Verteilungen während der Winter- und Sommermonate zeigen die große Dynamik des Westatlantiks gegenüber dem Ostteil. Tabelle 5 zeigt, dass das jährliche Wasserdefizit der Subtropen des Nordatlantiks zwischen 45° N und 10° N durch Massenzuflüsse, sowohl aus nördlichen Breiten, wie auch von Süden her vom Südatlantik ausgeglichen werden muss.

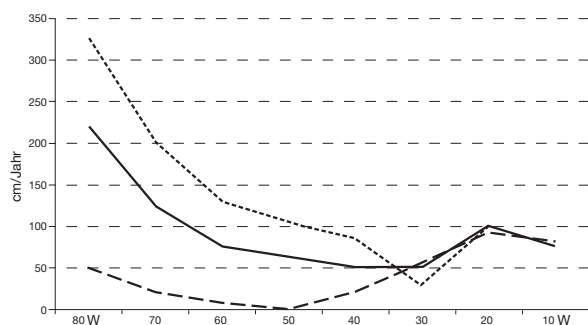


Abb. 4: Differenz Verdunstung minus Niederschlag ($V_{NA}-N_{NA}$) auf dem Nordatlantik entlang dem 30. Breitengrad in cm/Jahr für das Jahr (durchgezogene Linie), die Wintermonate (DJF, kurz gestrichelt) und die Sommermonate (JJA, lang gestrichelt), (Daten nach SCHMITT et al. 1989)

Difference of evaporation minus precipitation ($V_{NA}-N_{NA}$) above the North Atlantic Ocean along the 30th parallel (cm/year) for the year (continuous line), the winter month (DJF, narrow broken line) and the summer months (JJA, wide broken line), (data after SCHMITT et al. 1989)

Wie der deutsche Ozeanograph GEORG WÜST (1890–1977) zuerst zeigen konnte, ist die hydrologische Differenz $V_M - N_M$ eng mit der wichtigen Zustandsgröße Salzgehalt S in der Decksicht der Ozeane in dem Sinn verbunden, dass hohe Verdunstung mit relativ hohen Salzgehaltswerten und hohe Niederschlagswerte mit relativ niedrigen Salzgehaltswerten linear verbunden sind, was auch aus den in Tabelle 5 aufgeführten Daten deutlich wird. Das Massengebiet im Ozean kann durch die Verteilung der Wasserdichte beschrieben werden. Diese ist von Wassertemperatur und Salzgehalt (in geringem Maß auch vom hydrostatischen Druck) abhängig. Auch die Wassertemperatur variiert mit der hydrologischen Differenz, da sie in den verdunstungsstarken Gebieten tendenziell abnimmt. Auf diese Weise wirkt der Wasserhaushalt auf den ozeanischen Massenaufbau und damit auf die Ausbildung der thermohalinen Zirkulation. Ferner führen die mit V_M und N_M verbundenen Absenkungen oder Erhebungen des Meeresspiegels zu Neigungen der Meeresoberfläche und der isobaren Flächen im Meer, was zur Ausbildung barotroper Strömungsanteile führt.

Eine weitere Einwirkung der Hydrosphäre auf das Meer besteht in der zeitlichen Veränderlichkeit des Übergangs von Eis in Wasser. Die damit verbundene Ansammlung von relativ ausgesüßtem Wasser kann im Nordatlantik zur Verringerung oder gar Unterbindung der Vertikalkonvektion führen, was über die damit verbundene Störung der thermohalinen Tiefenzirkulation zu bedeutenden klimatischen Veränderungen führen kann (Abkühlung in weiten Teilen Europas). Auch die unregelmäßig verteilte Flusszufuhr (Tab. 6) wirkt sich zumindest regional auf das ozeanische Massengebiet aus, so dass man den Einfluss des Wasserkreislaufes auf die Ozeane als sehr komplex bezeichnen kann. Die Nebenmeere zeichnen sich durch spezifische Wasserhaushalts- und Salzgehaltsverhältnisse aus.

Tabelle 6: Die mittlere Wasserbilanz der Ozeane (nach BAUMGARTNER u. REICHEL 1975). Alle Angaben in mm (1 mm entspricht 361 km³)

Mean water balance of the oceans (after BAUMGARTNER u. REICHEL 1975), values in mm (1 mm equals 361 km³)

Ozean	Niederschlag \mathcal{N}_M	Verdunstung V_M	Differenz $V_M - \mathcal{N}_M$	Abfluss A_L	Saldo $\mathcal{N}_M + A_L - V_M$
Atlantischer Ozean	760	1130	940	200	-170
Pazifischer Ozean	1290	1200	-90	70	160
Indischer Ozean	1040	1290	250	70	-180
Nordpolarmeer	100	50	-50	310	360

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass die großen Ozeane unterschiedliche Wasserhaushaltsverhältnisse aufweisen (Tab. 6). Extrem verhält sich das überwiegend mit Eis bedeckte Nordpolarmeer, dessen hohe Flusswasserzufuhr (vor allem durch die sibirischen Ströme) die Erhaltung des polaren Meereises gewährleistet. Der Pazifik hat infolge des hohen Niederschlages (große tropische Fläche) im Mittel sogar eine negative hydrologische Differenz. Diese ist maximal für den Atlantischen Ozean, von dem aus weite Gebiete Eurasiens und Amerikas wegen des Fehlens küstennaher Hochgebirge mit Wasser versorgt werden. Der Saldenausgleich erfolgt vor allem über den Antarktischen Wasserring, wo die höchsten ozeanischen Wassertransportraten beobachtet werden.

5 Globale Wasserbilanz und Klimawandel

Das Gesamtwassersystem und das Klimasystem der Erde bilden eine Einheit, und das eine ist ohne das andere nicht denkbar. Daher spiegeln sich zeitliche Variationen der Klimaelemente, die in einem sehr breiten Frequenzbereich vorkommen, auch in der Hydrosphäre und in den anderen Teilen des Klimasystems wider. Auch hier war es BRÜCKNER, der Niederschlagsmessreihen auswertete und die nach ihm benannte 35-jährige Periode fand. Wenn sich diese auch nicht als persistent erwiesen hat, so gehört er doch zu den Pionieren der Erforschung rezenter Klimaschwankungen (STEHR et al. 1995). In der Paläoklimatologie wurden Schwankungen der Wasserbilanz für untersuchte Regionen nachgewiesen, so auch für Mitteleuropa im Holozän (JÄGER 2002). Mit Hilfe fortgeschrittener Klimamodelle ist es heute möglich, die Veränderungen der hydrologischen Differenz im Vergleich zu heute für das Pleistozän zu berechnen (für die

Weichsel-Kaltzeit etwa 20.000 Jahre BP s. LORENZ et al. 2005). In gleicher Weise kann diese Größe für das 21. Jahrhundert bestimmt werden, vorausgesetzt, dass die Annahmen (vor allem über die Zunahme der strahlungsaktiven Spurengase der Atmosphäre) tatsächlich zutreffen. Danach muss mit der Verschiebung von Niederschlagszonen (so Abnahme von \mathcal{N} im Mittelmeergebiet, Zunahme dagegen nördlich 50° N) gerechnet werden. Ebenso ist mit einer größeren Häufigkeit von Extremereignissen zu rechnen. Dies gilt sowohl für Hitzeperioden (SCHÄR et al. 2004), als auch für Starkniederschläge in zunehmenden sommerlichen Trockenperioden (PARRY 2000). Wie die Zahlen in Tabelle 1 zeigen, sind die Unterschiede zwischen den Modellrechnungen für das Ende des 20. Jahrhunderts und für das 21. Jahrhundert relativ gering und ohne statistische Signifikanz. Die Unterschiede deuten jedoch auf eine mögliche Intensivierung des Wasserkreislaufes hin.

Gewisse Aufschlüsse gibt die Untersuchung langer Beobachtungsreihen der Jahreswerte der verschiedenen Wasserreservoirs und der Wasserhaushaltskomponenten, gemittelt über die ganze Erde. So zeigt die Tabelle 7 empirisch ermittelte Veränderungen globaler Wasservolumina einiger Reservoirs im Zeitraum 1890–1990 und man kann für das 20. Jahrhundert eine Volumenzunahme für das Weltmeer (Anstieg des mittleren Wasserstandes, vor allem infolge thermischer Ausdehnung des Wassers in der Deckschicht), eine erhebliche Abnahme der Gletscher und leichte Rückgänge im Grundwasser und des Wassers in Seen feststellen. Nimmt man nur die Jahre 1986–1990, so gewinnt man den Eindruck, dass der Klimawandel hinsichtlich Ozean und Gletscher bereits voranschreitet, Effekte, die inzwischen unstrittig sind.

Die Abbildungen 5 und 6 enthalten die Darstellung von Zeitreihen der Jahresmittelwerte globaler Wasserhaushaltskomponenten für das Weltmeer und die

Tabelle 7: Veränderungen von Wassermengen 1890–1990 (nach KLIGE et al. 1998)

Changes in quantities of water 1890–1990 (after KLIGE et al. 1998)

Teile der Hydrosphäre	Volumenänderung km ³ /Jahr		relative Änderungen %	
	1890–1990	1985–1990	1890–1990	1985–1990
Weltmeer	+520	+1013	+100	+100
Gletscher	-500	-1616	-96	-160
Grundwasser	-40	+593	-8	+59
Seen	-20	-68	-4	-7
Talsperren	+40	+78	+8	+8

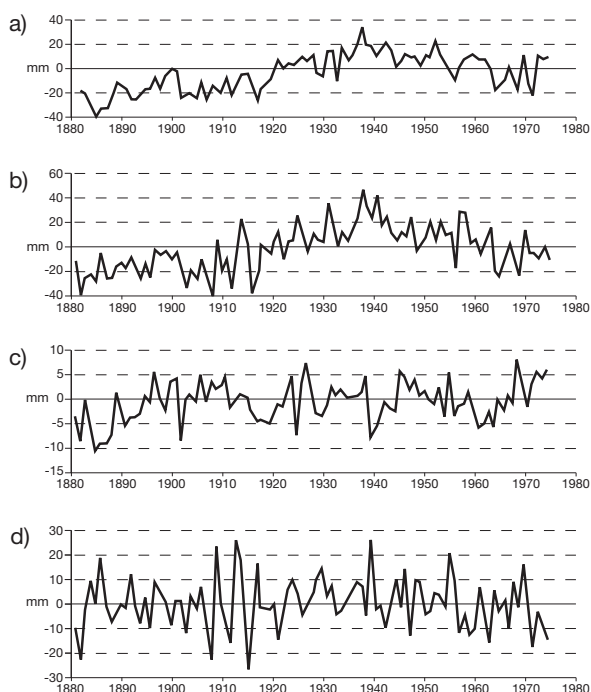


Abb. 5: Anomalien des ozeanischen Wasserhaushaltes, bezogen auf das Mittel 1880–1980. Jahreswerte in mm der Verdunstung (a), des Niederschlages (b), der Flusswasser- und Eiszufuhr (c) und der Volumenänderung des Weltmeeres (d) im Zeitraum 1880–1980 (nach KLIGE et al. 1998)

Anomalies of the water balance of the oceans, related to the mean values 1880–1980. Annual values in mm of the evaporation (a), of the precipitation (b), the inflow from the rivers and ice input (c) and the changes in the volume of the world ocean (d), period 1880–1980 (after KLIGE et al. 1998)

Landflächen für den Zeitraum 1880–1980 (KLIGE et al. 1998). Am auffälligsten sind die erhöhten Werte für N und V über dem Weltmeer mit dem Maximum um 1940 (Abb. 5). Dies deutet auf eine vorübergehende Intensivierung des ozeanischen Wasserkreislaufes hin, die mit dem ersten Maximum der global gemittelten Lufttemperatur in Bodennähe zusammenfällt. Über den Landflächen erscheint dieser Effekt bestenfalls bei der potenziellen Verdunstung (Abb. 6) angedeutet. Der Niederschlag N_L zeigt eine besonders hohe Veränderlichkeit von Jahr zu Jahr, die sich dann auch in den Abflusskurven widerspiegelt. Trends sind in den Kurven nicht zu erkennen. Die Darstellungen zeigen, wie wichtig es ist, über zuverlässige Daten zur Aufstellung von Zeitreihen der globalen Wasserhaushaltskomponenten zu verfügen.

6 Weitere Forschung notwendig

Der von BRÜCKNER vor 100 Jahren formulierte globale Wasserhaushalt ist scheinbar einfach und übersichtlich. Aber schon die Tatsache, dass in der Gegenwart Berechnungen der Komponenten publiziert werden, die immer noch spürbar voneinander abweichen, macht deutlich, dass weiterhin erheblicher Forschungsbedarf besteht, um diesen wichtigen Naturprozess zuverlässig zu erfassen. Dazu sind vor allem die Datenbasis zu verbessern und die Methoden ihrer Gewinnung zu erweitern. Wichtig ist, dass die Wasserhaushaltsgrößen auf die klimatologischen Referenzperioden (1931/60, 1961/90 oder 1971/2000) bezogen werden können, um den globalen Wasserhaushalt und seine Entwicklung zusammen mit den Klimaprozessen beurteilen zu können. In diesem Beitrag nicht eingegangen

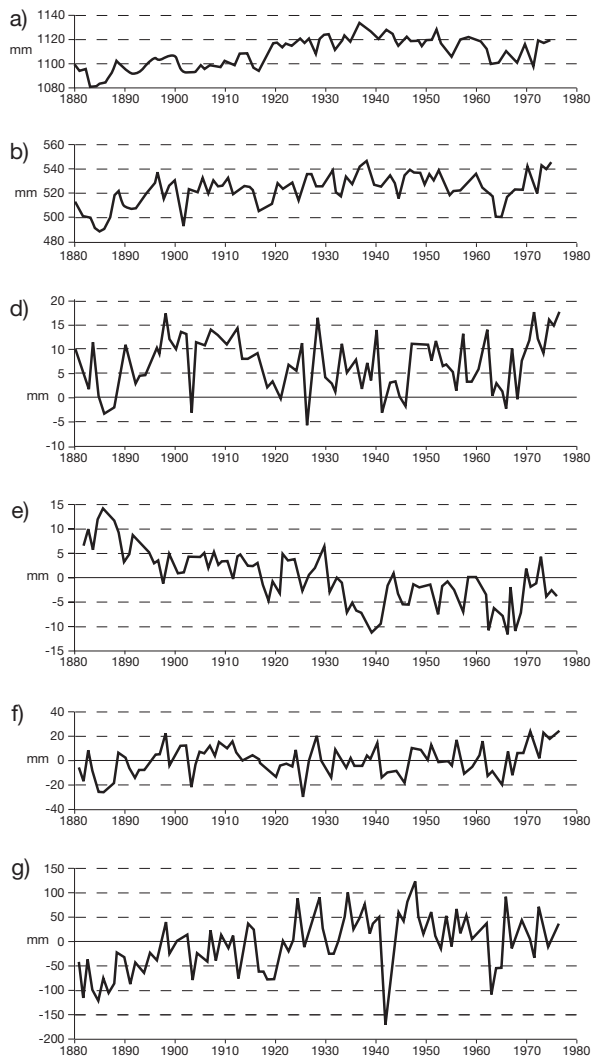


Abb. 6: Wasserhaushalt der Landflächen (mm). Jahreswerte der potenziellen Verdunstung (a), der Verdunstung (b), der Niederschläge (c), des gesamten Oberflächenabflusses (d), des Abflusses aus inneren Gebieten der Kontinente (e), des Abflusses an der Oberfläche und in tieferen Schichten von den Kontinenten (f) und des Abflusses von ozeanischen Inseln (g) im Zeitraum 1880–1980 (nach KLIGE et al. 1998)

Water balance of the continental areas (mm). Annual values of the potential evapotranspiration (a), of the actual evapotranspiration (b), of the precipitation (c), the total surface discharge (d), the discharge of the inner continental regions (e), the surface discharge and the discharge in deeper continental layers (f) and the discharge from oceanic islands (g), period 1880–1980 (after KLIGE et al. 1998)

wurde auf das Wasser in der Atmosphäre, das dort in allen drei Aggregatzuständen vorkommt und von entscheidender Bedeutung sowohl für das Wetter als auch für das Klima ist. Um bestehende Kenntnisdefizite zu verringern, besteht das internationale vieljährige Forschungsprogramm GEWEX (Global Energy and Water Budget Experiment, z.B. COE 2000). Es geht um die Beobachtung und Modellierung des Wärme- und Wasserhaushaltes in verschiedenen Maßstabsebenen, begleitet von der Untersuchung aller hydrometeorologischen Vorgänge, die mit dem Wasser- und Wärmehaushalt auf das engste zusammenhängen. Zur weiteren Erforschung der Kryosphäre der Erde, die für den Wasserhaushalt ebenfalls eine wichtige Rolle spielt, wird gegenwärtig das Internationale Polarjahr 2007/08 vorbereitet. Von dieser Gemeinschaftsunternehmung sind Ergebnisse zu erwarten, wie sich die Polargebiete unter den Bedingungen eines Klimawandels voraussichtlich verhalten werden.

Danksagung

Wir danken Alexandra Oberdörster für die Aufbereitung der Daten von KLIGE et al. (1998).

Literatur

- BAUMGARTNER, A. u. LIEBSCHER, H.-J. (1990): Lehrbuch der Hydrologie 1. Allgemeine Hydrologie, quantitative Hydrologie. Berlin, Stuttgart.
- BAUMGARTNER, A. u. REICHEL, E. (1975): Die Weltwasserbilanz / The World Water Balance. München, Wien.
- BEZOLD, W. VON (1892): Der Wärmehaushalt an der Erdoberfläche und in der Atmosphäre. In: Sitzungsber. K. Preuss. Akad. Wiss. 54, 1139–1178.
- BOER, G. J.; ARPE, K.; BLACKBURN, M.; DEQUE, M.; GATES, T. L.; HART, T. L.; LE TREUT, H.; ROECKNER, E.; SHEININ, D. A.; SIMMONDS, L.; SMITH, R. N. B.; TOKOIKI, T.; WETHERALD, R. T. u. WILLIAMSON, D. (1992): Some results from an intercomparison of the climates simulated by 14 atmospheric general circulation models. In: J. Geoph. Res. 97, 12771–12786.
- BRÜCKNER, E. (1887): Rez. zu JOHN MURRAY: On the total annual Rainfall on the Land of the Globe. In: Meteorol. Zeitschr. 4, Literaturber., [63–64].
- (1890): Klima-Schwankungen seit 1700 nebst Bemerkungen über die Klima-Schwankungen der Diluvialzeit. Wien, Olmütz.
- (1897): Die feste Erdrinde und ihre Formen. Ein Abriß der allgemeinen Geologie und Morphologie der Erdoberfläche. In: HANN, J.; HOCHSTÄTTER, F. VON u. POKORNY, A.: Allgem. Erdkunde 2. Prag, Wien, Leipzig.

- (1900): Über die Herkunft des Regens. In: *Geogr. Zeitschr.* 6, 89–96.
- (1905): Die Bilanz des Kreislaufes des Wassers auf der Erde. In: *Geogr. Zeitschr.* 11, 89–96.
- BUDYKO, M. I. (1962): The heat balance of the earth. In: *Proc. All-Union Sci. Meteorol. Conf.* 1, 171–185.
- (Hg.) (1963): *Atlas Teplovogo Balansa Zemnogo Shara.* Mezhved. Moskva.
- CHARLSON, R. J.; VALERO, F. P. J. u. SEINFELD, J. H. (2005): In search of balance. In: *Science* 308, 806–807.
- COE, M. T. (2000): Modeling terrestrial hydrological systems at the continental scale: Testing the accuracy of an atmospheric GCM. In: *J. Clim.*, 13, 686–700.
- DRUMMOND, A. J. (1970): Precision radiometry and its significance in atmospheric and space physics. In: *Adv. Geophys.* 14, 1–52.
- (1971): Recent measurements of the solar radiation incident on the atmosphere. In: *Space Res.* 11, 681–693.
- FRÖHLICH, C. u. LEAN, J. (1998): The sun's total irradiance: cycles, trends and related climate change uncertainties since 1976. In: *Geophys. Res. Letters* 25, 4377–4380.
- GARNIER, E.; BARNIER, B.; SIEFRIDT, L. u. BÉRANGER, K. (2000): Investigating the 15 years air-sea flux climatology from the ECMWF re-analysis project as a surface boundary condition for ocean models. In: *Int. J. Climatology* 20, 1653–1673.
- GILGEN, H.; WILD, M. u. OHMURA, A. (1998): Means and trends of shortwave irradiance at the surface estimated from global energy balance archive data. In: *J. Climate* 11, 2042–2061.
- GLEICK, P. H. (Hg.) (1993): *Water in Crisis. A Guide to the World's Fresh Water Resources.* New York.
- HANN, J. (1901): *Lehrbuch der Meteorologie.* Leipzig.
- HANSEN, J.; NATZARENKO, L.; RUEDY, R.; SATO, M.; WILLIS, J.; DEL GENIO, A.; KOCH, D.; LACIS, A.; LO, K.; MENON, S.; NOVAKOV, T.; PERLWITZ, J.; RUSSELL, G.; SCHMIDT, G. A. u. TAUSNEV, N. (2005): Earth's energy imbalance: confirmation and implications. In: *Science* 308, 1431–1435.
- HERTZ, J. (1927): *Heinrich Hertz. Erinnerungen, Briefe, Tagebücher.* Leipzig.
- HERTZ, H. G. u. MULLIGAN, J. F. (1998): *Der Energiehaushalt der Erde von Heinrich Hertz.* In: *Fridericiana* 54, 3–15.
- HUNT, G. E.; KANDEL, R. u. MECHERIKUNNEL, A. T. (1986): A history of presatellite investigations of the earth's radiation budget. In: *Reviews of Geophysics* 24, 351–356.
- IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE) (2001): *Climate change 2001: HOUGHTON, J. T. et al. (Hg.): The scientific basis. Contribution of working group I to the Third Assessment Report of the IPCC.* Cambridge.
- JÄGER, K.-D. (2002): Oscillations of the water balance during the Holocene in interior Central Europe – features, dating and consequences. In: *Quaternary International* 91, 33–37.
- JAEGER, L. (1976): *Monatskarten des Niederschlags für die ganze Erde.* Ber. Dt. Wetterd. 139. Offenbach.
- (2005): Die globale Niederschlagsverteilung und ihre Veränderungen im 20. Jahrhundert. In: LOZÁN, J. L.; GRABL, H.; HUPFER, P.; MENZEL, L. u. SCHÖNWIESE, C.-D. (Hg.): Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle? Hamburg, 153–158.
- JOYCE, R. J.; JANOWIAK, J. E.; ARKIN, P. A. u. XIE, P. (2004): CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. In: *J. Hydromet.* 5, 487–503.
- KANDEL, R.; VIOLLIER, M.; RABERANTO, P.; DUVEL, J. P.; PAKHOMOV, L. A.; GOLOVKO, V. A.; TRISHCHENKO, A. P.; MUELLER, J.; RASCHKE, E.; STUHLMANN, R. u. INTERNATIONAL SCARAB SCIENTIFIC WORKING GROUP (ISSWG) (1998): The ScaRaB earth radiation budget dataset. In: *Bull. Americ. Meteorol. Soc.* 79, 765–783.
- KESSLER, A. (1968): *Globalbilanzen von Klimaelementen. Ein Beitrag zur allgemeinen Klimatologie der Erde.* Ber. Inst. Meteorol. Klimatol. 3. Hannover.
- (1985): *Heat balance climatology. World survey of climatology 1A.* Amsterdam, London, New York, Tokyo.
- KIEHL, J. T. u. TRENBERTH, E. (1997): Earth's annual global mean energy budget. In: *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 78, 197–208.
- KLIGE, R. K.; DANILOV, I. u. KONSICEV, D. (1998): *Geschichte der Hydrosphäre.* Moskva. (in Russisch)
- KORZUN, V. I. (Hg.) (1974): *World Water Balance and Water Resources of the Earth.* Leningrad. (in Russisch)
- LAUSCHER, F. (1956): *Strahlungs- und Wärmehaushalt.* In: *Ber. Dt. Wetterd.* 22, 21–29.
- LEGATES, D. R. u. WILLMOTT, C. J. (1990): Mean seasonal and spatial variability of gauge-corrected, global precipitation. In: *Int. J. Climatol.* 10, 111–127.
- LEVITUS, S.; ANTONOV, J. I.; BOYER, T. P. u. STEPHENS, C. (2000): Warming of the world ocean. In: *Science* 287, 2225–2229.
- LOOMIS, R. S. (1883): Productivity of agricultural systems. In: *Encyclopedia of plant physiology* NS 12 D, 151–172.
- LORENZ, S. J.; KASANG, D. u. LOHMANN, G. (2005): *Globaler Wasserkreislauf und Klimaänderungen – eine Wechselbeziehung.* In: LOZÁN, J. L.; GRABL, H.; HUPFER, P.; MENZEL, L. u. SCHÖNWIESE, C.-D. (Hg.): *Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle?* Hamburg, 153–158.
- LOZÁN, J. L.; GRABL, H.; HUPFER, P.; MENZEL, L. u. SCHÖNWIESE, C.-D. (Hg.) (2005): *Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle?* Hamburg.
- MARCINEK, J. (2005): *Wasserkreislauf und Wasserbilanz – globale Übersicht.* In: LOZÁN, J. L.; GRABL, H.; HUPFER, P.; MENZEL, L. u. SCHÖNWIESE, C.-D. (Hg.): *Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle?* Hamburg, 36–41.
- MÖLLER, F. (1951): *Vierteljahreskarten des Niederschlags für die ganze Erde.* In: *Petermanns Geogr. Mitt.* 95, 1–7.
- MULLIGAN, J. F. u. HERTZ, H. G. (1997): An unpublished lecture by Heinrich Hertz: “On the energy balance of the earth”. In: *Am. J. Phys.* 65, 36–45.
- MURRAY, J. (1887): On the total annual rainfall on the land of the globe, and the relation of rainfall to the annual discharge of rivers. In: *Scott. Geogr. Magazine* 3, 65–77.
- OKI, T. (1999): The global water cycle. In: BROWNING, K. A. u. GURNEY, R. J. (Hg.): *Global Energy and Water Cycles.* Cambridge, 10–29.

- PARRY, M. L. (Hg.) 2000: Assessment of potential effects and adaptations for climate change in Europe: The Europe ACACIA Project. Norwich.
- PENCK, A. u. BRÜCKNER, E. (1909): Die Alpen im Eiszeitalter. Leipzig.
- PICHE, A. (1872): Sans titre. In: Bull. Assoc. Sci. France 10, 166–167.
- PINKER, R. T.; ZHANG, B. u. DUTTON, E. G. (2005): Do satellites detect trends in surface solar radiation? In: Science 308, 850–854.
- RASCHKE, E.; GIORGETTA, M. A.; KINNE, S. u. WILD, M. (2005): How accurate did GCMs compute the insolation at TOA for AMIP-2? In: Geophys. Res. Letters 32, 23707–23710.
- RUDOLF, B. (1995): Die Bestimmung der zeitlich-räumlichen Struktur des globalen Niederschlags. Ber. Dt. Wetterd. 196. Offenbach.
- SCHÄR, C.; VIDALE, P. L.; LÜTHL, D.; FREI, C.; HÄBERLI, C.; LINIGER, M. A. u. APPENZELLER, C. (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. In: Nature 427, 332–336.
- SCHMITT, R. W.; BOGDEN, P. S. u. DORMAN, C. E. (1989): Evaporation minus precipitation and density fluxes for the North Atlantic. In: J. Physical Oceanography 19, 1208–1221.
- SHIKLOMANOV, I. A. (1993): World fresh water resources. In: GLEICK, P. H. (Hg.): Water in Crisis. New York, 13–24.
- (1998): World water resources, a new appraisal and assessment for the 21st century – summary. Cambridge.
- STEHR, N. u. STORCH, H. VON (Hg.) (2000): Eduard Brückner – The sources and consequences of climate change and climate variability in historical times. Boston, London.
- STEHR, N.; STORCH, H. VON u. FLÜGEL, M. (1995): The 19th century discussion of climate variability and climate change: analogies for present debate? MPI-Report 157. Hamburg.
- SUPAN, A. (1898): Die Verteilung des Niederschlags auf der festen Erdoberfläche. In: Petermanns Geogr. Mitt. 44, 179–182.
- THORNTHWAITE, C. W. u. WILM, H. G. (1944): Report of the Committee on Transpiration and evaporation 1943/1944. In: J. Geoph. Res. 5, 687.
- TRENBERTH, K. E. (2002): Earth system processes. In: MCCracken, M. C. u. PERRY, J. S.: Encyclopedia of Global Environmental Change. Chichester, 13–30.
- TURK, F. J.; ROHALY, G. D.; HAWKINS, J.; SMITH, E. A.; MARZANO, F. S.; MUGNAI, A. u. LEVIZZANI, V. (1999): Meteorological applications of precipitation estimation from combined SSM/I, TRMM and infrared geostationary satellite data. In: PAMPALONI, P. u. PALOSCIA, S. (Hg.): Microwave radiometry and remote sensing of the earth's surface and atmosphere. In: VSP Int. Sci. Publ., 353–363.
- VAN DER LEEDEN, F.; TROISE, F. L. u. TODD, D. K. (1990): The water encyclopedia 2. Chelsea, Michigan.
- VONDER HAAR, T. H. u. SUOMI, V. E. (1971): Measurements of the earth's radiation budget from satellites during a five-year period. Part I: Extending time and space means. In: J. Atm. Sci. 28 (3), 305–314.
- WAGNER, A. (1940): Klimaänderungen und Klimaschwankungen. Braunschweig.
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung für globale Umweltveränderungen) (1997): Welt im Wandel – Wege zu einem nachhaltigen Umgang mit Süßwasser. Berlin, Heidelberg.
- WIELICKI, B. A.; WONG, T.; LOEB, N.; MINNIS, P.; PRIESTLEY, K. u. KANDEL, R. (2005): Changes in earth's albedo measured by satellites. In: Science 308, 825.
- WILD, M.; GILGEN, H.; ROESCH, A.; OHMURA, A.; LONG, C. N.; DUTTON, E. G.; FORGAN, B.; KALLIS, A.; RUSSAK, V. u. TSVETKOV, A. (2005): From dimming to brightening: decadal changes in solar radiation at earth's surface. In: Science 308, 847–850.
- WILLSON, R. C. (1997): Total solar irradiance trend during solar cycles 21 and 22. In: Science 277, 1963–1965.
- WÜST, G.; BROGMUS, W. u. NOORDT, E. (1954): Die zonale Verteilung von Salzgehalt, Niederschlag, Verdunstung, Temperatur und Dichte an der Oberfläche der Ozeane. Kieler Meeresforschungen 10. Kiel.