

### 1.3 Wasserkreislauf und Wasserbilanz – globale Übersicht

JOACHIM MARCINEK

*Hydrologic cycle and water balance – global survey: The hydrologic cycle is the main phenomenon of hydrology. Only water, mostly drinking water, will be renewed in this cycle very quick and continuous. Gigantic quantities of water are present, from which the hydrologic cycle takes the water. The history of hydrologic cycle is very long and interesting. The knowledge of hydrologic cycle in form of today was born in the renaissance. So Leonardo da Vinci is named »father of the science of water«. Now in beginning of the 20th century E. Brückner presented the first water balance of the earth (1905). The newest water balance is the water balance from R. K. Klige et al. from 1998, published in 2000. She is shown also in a scheme of hydrologic cycle.*

Alles auf der Erde vorhandene Wasser ist im Wasserkreislauf – der ständigen Orts- und Zustandsänderung des Wassers, bedingt durch die Wirkung der Energiezufuhr von der Sonne und durch die Wirkung der Schwerkraft – verbunden. Der Wasserkreislauf läuft – unter naturgesetzlichem Diktat – als ständiger, in sich geschlossener Prozess der Wasserzirkulation auf dem Erdkörper ab. Als Wasserhaushalt hingegen lässt sich das Zusammenwirken der Wasserhaushaltsele-

mente wie Niederschlag (N), Abfluss (A), Verdunstung (V), Rücklage (R) und Verbrauch (B) in einem vorgegebenen Gebiet oder auf dem gesamten Erdkörper definieren. Das Zusammenwirken der Wasserhaushaltselemente vollzieht sich somit im Wasserkreislauf, dem hydrologischen Zyklus, im grundlegenden Phänomen der Hydrologie – der Lehre vom Wasser (Abb. 1.3-1).

Es kommt darauf an, die im Kreislauf befindlichen Wasserflüsse und ihre Bilanz sowie die zugehörigen

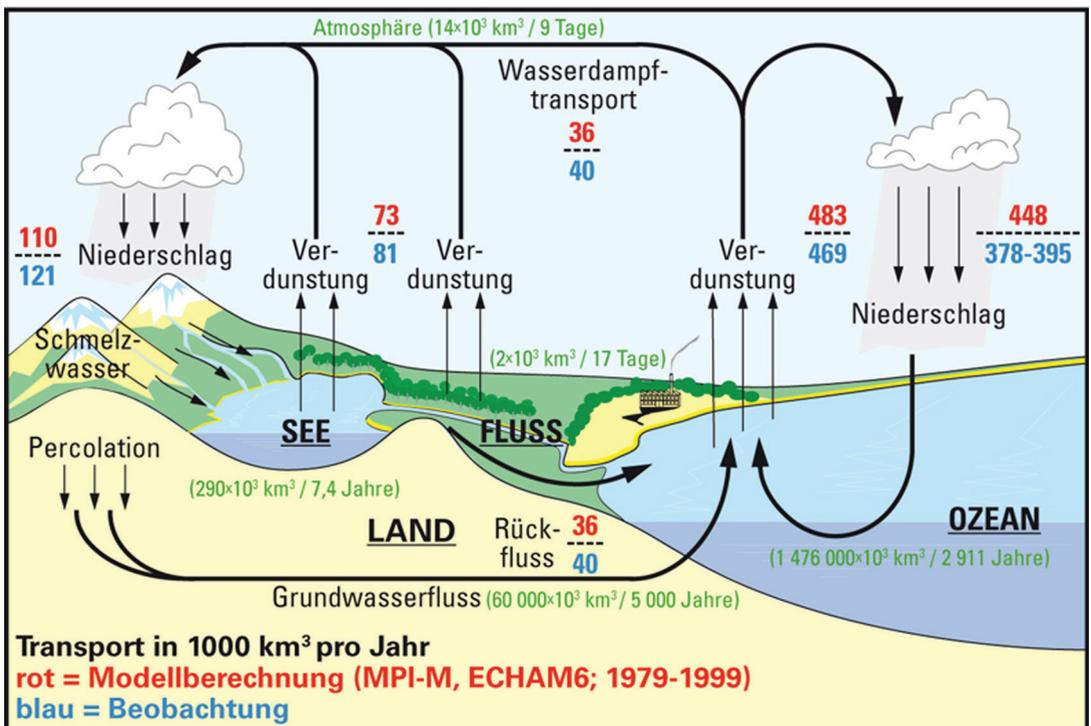


Abb. 1.3-1: Globaler Wasserkreislauf: Zahlenwerte für jährliche Flüsse in 1.000 km<sup>3</sup>. Werte (grün) in Klammern geben das Wasservolumen im Kompartiment und dessen mittlere Verweilzeit (s. auch Tafel 1) Es werden die im Wasserkreislauf beteiligten Prozesse gezeigt. Sie werden teilweise durch Forschungsprogramme und in Routinedienste, wie etwa zur Wetter- oder Hochwasservorhersage beobachtet. Schwierig sind die Beobachtungen und Modellierung der aus Wasser und Eis bestehenden Wolken, die u.a. auch den Strahlungshaushalt der Erde stark beeinflussen (Quelle: Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, ergänzt).

Aus: WARNSIGNAL KLIMA: Genug Wasser für alle? 3.Auflage (2011)  
 Hrsg.: Lozán J. L., H. Graßl, P. Hupfer, L. Karbe & C.-D. Schönwiese

Reservoirs zahlenmäßig möglichst genau zu erfassen – eine Aufgabe, die seit 100 Jahren besteht und auch heute noch nicht als gelöst angesehen werden kann.

## **Der Wasserkreislauf – eine lange, aber interessante Geschichte**

»Den Lauf der Wasser von den Bergen zu den Thälern, von dem Lande zum Meere sehen wir unaufhörlich vor unseren Augen sich vollziehen, und dennoch wird das Meer nicht voller und die Quellen und Ströme versiegen nicht« (PFAFF 1878, S. 33).

Ursache dieses Naturschauspiels, die Folge der stetigen Integration, des fortwährenden Ineinandergreifens von Atmosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre auf dem Erdball ist der Wasserkreislauf. Aus dem Riesenraum des Weltmeeres (361,1 Mio. km<sup>2</sup>) greift der Kreislauf des Wassers über auf den kleineren Festlandbereich (148,9 Mio. km<sup>2</sup>). Er zieht die Festländer der Erde – durch Ausweitung des Kreislaufes über dem Weltmeere – in das Gesamtgeschehen mit ein und schließt den Kreis durch den Abfluss in den Flüssen und die Verfrachtung von Wasserdampf in der Atmosphäre vom Lande zum Meere im Bereich des Weltmeeres völlig.

Heute gehört die Kenntnis des von der Sonnenenergie angetriebenen Wasserkreislaufes zum Allgemeinwissen. Gerade aber die Entstehung der Flüsse und mit ihr verbunden die Erkenntnis des Wasserkreislaufes lag merkwürdigerweise außerordentlich lange im Dunkeln.

Der altgriechische Naturphilosoph Thales von Milet (um 600 v.u.Z.) erkannte, dass das Wasser die wichtigste Voraussetzung für alles Leben auf der Erde bildet. Er – wie auch andere altgriechische Gelehrte – glaubte an unterirdische Verbindungen der Flüsse mit dem Okeanos, dem Ozean. Über die unterirdischen Verbindungen mit dem Weltmeer sollte sich das Wasser in den Flüssen erneuern.

Thales von Milet dachte sich die Erdscheibe auf dem Ozean schwimmend und deutete die unablässige Erneuerung des Wassers auf der festen Erdscheibe als Wanderung des Meereswassers durch die scheibenförmige feste Erde. Während der Wanderung des Meereswassers durch die Erdscheibe sollte sich nach seiner Auffassung das Salz- in Süßwasser wandeln.

Die in Kalkgesteinen unübersichtlichen Flussläufe mit plötzlichem Verschwinden in und Auftauchen aus unterirdischen Hohlräumen förderten Ansichten über unterirdische Verbindungen der Flüsse mit dem Meere. Es war deshalb nicht verwunderlich, dass solche Auffassungen im griechischen Einflussbereich herrschten.

Glaubten andere altgriechische Gelehrte an eine teilweise Erneuerung des abfließenden Wassers durch Niederschläge, so dachten sie gleichzeitig immer an

eine teilweise Speisung der Flüsse aus unterirdischen, wassererfüllten Hohlräumen, die wiederum Wasser vom Meere erhielten. Selbst über weite Strecken wurden unterirdische Flusslaufverbindungen mit teilweisen oberirdischen Laufstrecken vermutet.

Auch der bekannteste altgriechische Wissenschaftler Aristoteles (384–322 v.u.Z.) lehnte die Wassererneuerung, vor allem die Grundwasserbildung, durch das Einsickern von Niederschlagswasser ab. Aus seinem hohlräumreichen Lande, seiner Umwelt, der er sich bei der Gewinnung von Erkenntnissen nicht entziehen konnte, leitete er die Meinung ab, dass sich Wasser in Hohlräumen bei Abkühlung durch Ausscheiden aus der Luft (Kondensation) bilde.

Schließlich bestritt auch Seneca (4 v.u.Z.– 65 u.Z.) die Ansicht von Vitruv (kurz vor der Zeitenwende), dass alles Quellwasser als in den Boden eingesickertes Regenwasser aufzufassen sei.

Obwohl im Mittelalter nicht nur einfach die Lehren der Antike übernommen wurden, sondern zahlreiche originelle Ansichten hinzukamen, herrschten die Anschauungen der Antike in ihren Grundzügen weiter. Die Bibel, die auch auf dem Gebiet der Naturwissenschaft als vollkommen galt, gestattete nur Auffassungen, die mit ihrem Inhalt übereinstimmten.

Das Paradieswasser wäre, so wurde angenommen, der Urquell aller Flüsse. Gern wurde über unterirdische Flussläufe zum Garten Eden nachgedacht. Allmählich fand eine Rückkehr zur antiken Lehre statt, dass der Ozean alle Flüsse nähre.

Die Stelle in Prediger Salomo (Die Heilige Schrift – Zürcher Bibel – Lizenzausgabe 1951, 2. Auflage. Der Prediger – Das beständige Einerlei im Kreislauf aller Dinge, 1,7): »Alle Flüsse gehen zum Meere, und doch wird das Meer nicht voll; an den Ort, wohin die Flüsse gehen, dahin gehen sie immer wieder«, hemmte die Entwicklung der Gewässerkunde.

Dieses unbekanntes Meer oder dieser Meeresteil, dieses Quellmeer ermöglichte ebenfalls mannigfache Spekulationen. Es wurden unterirdische Kanäle als Verbindungen ebenso wie die Verdunstung von Meereswasser mit Regenausfall, Einsickerung und Sammlung in großen Hohlräumen erwogen. Der weitbekannteste mittelalterliche Gelehrte Albertus Magnus (Graf v. Bollstädt, 1193–1280 u.Z.) vermochte sich ebenso wenig – wie in der Antike Aristoteles seiner Umwelt – seiner Zeit zu entziehen.

Erst in der Renaissance erkannte (um 1500 u.Z.) Leonardo da Vinci die Zusammenhänge des Wasserkreislaufes. Seine Erkenntnis fand jedoch noch keinen Widerhall. Zum allgemeinen Umschwung der Auffassungen trug erheblich der von de la Métherie geäußerte, in seinem Kern heute noch geltende Grundsatz

vom Wasserkreislauf bei (de la Métherie-Eschenbach: Theorie der Erde, II. Leipzig 1797).

Im 19. Jahrhundert verbreitete sich die Ansicht über die Erneuerung des Wassers auf dem Festlande durch den Kreislauf des Wassers mehr und mehr und fasste festen Fuß in den geographischen Lehrbüchern.

Ein längeres Zitat aus einem dieser Lehrbücher soll stellvertretend die Darlegungen in dieser Zeit belegen (Daniel, H. A.: Handbuch der Geographie, 1. Teil, 2. Auflage, Leipzig 1866, S. 151 mit der Fußnote<sup>1)</sup>, S. 151/152 »Das fließende Wasser ist ein lebendiges Band zwischen der starren und flüssigen Erdrinde und gehört beiden Formen an: dem Lande wie einer zu durchwandernden Fremde, dem Ocean wie einem Stammhaus und einer Heimath. Denn die Quelle aller Quellen ist das Meer; das große Reservoir für alle Bäche, Flüsse und Ströme. Seine weite Fläche ist in einer fortdauernden Verdunstung begriffen. Die aufsteigenden Dämpfe bilden Wolken, um aus diesen wieder in der Form von Regen, Schnee usw. auf die Erde niederzufallen, in sie einzudringen, als continentales Wasser wieder aus ihr hervorzugehen. Alles Wasser auf der Erde ist in beständiger Cirkulation, in dauerndem Kreislauf begriffen, wie das Blut im menschlichen Leibe oder wie Schubert es in einem gemüthlichen Bilde ausspricht, „gleich einer sorgsamten Mutter, die ohne Aufhören in allen Räumen ihres Hauses herumwandelt, bald hinab zu dem Keller, bald zum Speicher des Oberbodens steigt, um alle die Ihrigen mit dem, was ihnen noth thut, zu versehen, strömt das Wasser der Erde in den Flüssen und Bächen hinab zu dem Meere, steigt von da nach kurzem Verweilen als Dampf hinauf in die Luft, träufelt als Thau, ergießt sich als Regen über das durstende Land, sammelt sich auf dem kühlen Gebirge oder auf dem waldigen Hügel zum Quell oder Bach und rinnt, indem es seine nährenden Gaben rings umher vertheilt, von neuem hinab zur Tiefe!« Die dazugehörige Fußnote<sup>1)</sup>, S. 151/152 lautet: »Aeltere Geographen glaubten verkehrter Weise nach Pred. Sal. 1, 7 einen unterirdischen Zusammenhang des Meeres mit Quellen und Flüssen annehmen zu müssen, eine Ansicht, die im Altertume die gewöhnliche war. Sie findet sich auch beim Cartesius, der das Meerwasser in unterirdische Behälter unter den Bergen strömen, dort durch die Hitze des Zentralfeuers in Dampf verwandelt werden und dann erst als Niederschlag hervortreten läßt. Ausnahmsweise kommen so entstehende Quellen indeß in der Nähe von Vulkanen und des Meeres wirklich vor«.

Mit der Erkenntnis des Wasserkreislaufs war die Herkunft des Wassers auf den Landflächen der Erde geklärt. Wegweisend für die späteren Untersuchungen dürfte die wohl erste, textlich eindeutige Darstellung des Wasserkreislaufes und Wasserhaushaltes nicht nur

für das Festland, sondern für die gesamte Erde durch MURRAY (1887) gewesen sein. BRÜCKNER (1887, 1900) bestätigte die Überlegungen von MURRAY (1887) und trug viel zum Nachweis ihrer grundsätzlichen Gültigkeit bei. Die Untersuchungen von BRÜCKNER (1905) gipfelten in einer formelmäßigen Darstellung der Wasserhaushaltsbilanz der Erde in Form der Wasserhaushaltsgleichungen für das Festland und das Weltmeer. Schließlich gelang es ihm in der gleichen Arbeit, erstmals die Wasserhaushaltsgrößen (Niederschlag und Verdunstung für Festland und Meer sowie den Abfluss vom Festlande) der Wasserhaushaltsbilanz für die gesamte Erde mengenmäßig zu erfassen.

### **Erforschung von Wasserkreislauf und Wasserhaushaltsbilanz**

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts waren die Überlegungen zum Wasserkreislauf auf der Erde soweit gediehen, dass nicht nur das Kreislaufgeschehen allgemein anerkannt wurde, sondern auch die Frage einer ausgeglichenen Wasserhaushaltsbilanz und der dabei mitwirkenden Größen diskutiert und einer Lösung zugeführt werden konnte.

Auch WOEIKOF (1887) erkannte allgemein eine Ausgeglichenheit der im Wasserkreislauf umlaufenden Wassermengen an. Er nahm an, dass ein Viertel vom Niederschlag auf die Landflächen abfließt, drei Viertel jedoch verdunsten würden. Anschließend engte er aber diese Aussage mit den Worten ein »...oder auch teilweise für die Wasserzirkulation verloren gehen« (1887, 1. Teil, S. 50).

Im Gegensatz zu ihm ging MURRAY (1887) in einem Aufsatz über den jährlichen Gesamtniederschlag auf die Landflächen der Erde und dessen Beziehung zum jährlichen Abfluss der Flüsse außerordentlich konsequent vor. Er untersuchte eine Reihe möglicher Faktoren, die Einfluss auf die Ausgeglichenheit der Wasserhaushaltsbilanz nehmen könnten, wies ihnen auf Grund von Überlegungen einen angemessenen Platz im Kreislaufgeschehen zu und schloss einige von ihnen wegen geringfügiger Bedeutung von der Teilnahme am Wasserkreislauf aus.

Als logische Konsequenz resultierte daraus die wohl erste textlich klare Formulierung des Wasserkreislaufes und der Wasserhaushaltsbilanz nicht nur für die Landflächen, sondern für die gesamte Erde (1887, S. 69).

MURRAY (1887) berechnete nach einer Niederschlagskarte von E. Loomis (1882 bzw. 1883) den mittleren jährlichen Niederschlag auf die Landflächen und auf zwei Wegen den mittleren jährlichen Abfluss von den Landflächen.

Tab. 1.3-1: Werte für Wasserhaushaltsbilanzen der Erde (in 1.000 km<sup>3</sup>) nach verschiedenen Autoren.

		N <sub>L</sub>	V <sub>L</sub>	A <sub>L</sub>	V <sub>M</sub>	N <sub>M</sub>	N <sub>E</sub> = V <sub>E</sub>
E. BRÜCKNER	1905	122	97	25	384	359	481
R. FRITZSCHE	1906	112	81	31	384	353	465
W. SCHMIDT	1915	112	81	31	273	242	354
G. WÜST	1922	112,1	75	37,1	304,2	267,1	379,2
A. A. KAMINSKIJ	1925	81	51	30	337	307	388
W. MEINARDUS	1934	99	62	37	449	412	511
W. HALBFASS	1934	100	52	48	458	410	510
G. WÜST	1936	99	62	37	334	297	396
W. WUNDT	1937	99	62	37	383	346	445
F. MÖLLER	1951	99	62	37	361	324	423
E. REICHEL	1952	100	70	30	345	315	415
M. I. BUDYKO U. A.	1956	105,1	67	38,1	407,9	369,8	474,9
M. I. BUDYKO U. A.	1963	107	61	46	450	404	511
J. MARCINEK	1966	100	63,5	36,5	411,2	374,7	474,7
M. I. L'VOVIÈ	1967	108,4	71,3	37,1	448	410,9	519,3
M. I. BUDYKO U. A. (BEI DYCK 1968)	1968	107	61	46	449	403	510
M. I. L'VOVIÈ	1972	113,5	71,8	41,7	-	-	-
J. MARCINEK (ERGÄNZT)	1975	100	62,5	37,5	411,2	373,7	473,7
V. I. KORZUN U. A.	1974	119	72	47	505	458	577
M. I. L'VOVIÈ	1974	113,5	72,5	41	452,6	411,6	525,1
A. BAUMGARTNER U. E. REICHEL	1975	111,1	71,4	39,7	424,7	385	496,1
R. K. KLIGE (FÜR 1894–1975)	1982	119,8	69,9	50,2	507,1	457,2	Δ 0,3
R. K. KLIGE U. A. (aktualisiert)	1998	119,83	69,91	50,53	507,15	457,23	577,06
M.T. CHAHINE	1992	107	71	36	434	398	505
I.A. SHIKLOMANOV	1998	119	74	45	503	458	577
T. OKI	1999	115	75	40	431	391	506
K.E. TRENBERTH et al.	2006	113	73	40	413	373	486
MITTELWERT		107	69	38	411	373	480
STANDARDABWEICHUNG		9,2	9,6	6,3	60,8	56,5	60,6
MAXIMUM		122	97	50	273	242	354
MINIMUM		81	51	25	273	242	354
SCHWANKUNGSBREITE IN PROZENT DES MITTELWERTES <sup>38</sup>		68	67	57	58	46	
MODELLRECHNUNGEN MIT ECHAN <sub>4</sub> OPYC <sup>3)</sup>							
1990–1999 NACH DEM IPCC-SZEANRIOS IS92A <sup>4)</sup>		118	78	46	453	411	529–531
2090–2099 NACH DEM IPCC-SZEANRIOS IS92A <sup>4)</sup>		127	82	51	459	411	531–541

<sup>1)</sup> Die Tabelle wurde durch M. Quante und die Herausgeber ergänzt

<sup>2)</sup> In der Statistik nicht berücksichtigt

<sup>3)</sup> Max-Planck-Institut für Meteorologie und Deutsches Klimarechenzentrum, Hamburg

<sup>4)</sup> Das Szenario IS92a geht von einer weiteren Zunahme der Treibhausgasemissionen im 21. Jahrhundert aus

Noch im gleichen Jahr (1887) äußerte sich Brückner über die Arbeit von MURRAY in der Meteorologischen Zeitschrift (S. 63/64) und fügte ihr zwei vorwärtsweisende Verbesserungen hinzu. Er berechnete auf den Grundlagen von MURRAY (1.) den Abfluss der in Frage kommenden 10°-Breitengürtel und war damit auf der textlichen Formulierung des Wasserhaushaltes durch Murray in der Lage, (2.) die Verdunstung für die Landflächen als Differenz des Niederschlages und Abflusses für die entsprechenden 10°-Breitengürtel festzustellen.

Im Jahre 1900 schätzte BRÜCKNER die Beziehungen

zwischen Grundwasser und Flusswasser folgendermaßen ein (S. 91): »Die Bedeutung unterseischer Quellen entzieht sich allerdings der direkten Schätzung; doch dürfte sie schon deswegen gering sein, weil das Austreten des oberen Grundwassers an den Küsten in gleichem Niveau stattfinden muss, wie die Einmündung des Flusswassers – im Meeresniveau; das Grundwasser vereinigt sich hier noch im letzten Augenblick mit dem Flusswasser«. MURRAYS und BRÜCKNERS Stellung zum Grundwasser im Wasserkreislauf war nahezu einmütig. Das Grundwasser wurde als Teil des Gesamtabflusses

aufgefasst, der durch die Wechselbeziehungen von Grund- und Oberflächenwasser im Abfluss der Flüsse im Allgemeinen mit enthalten ist.

Von wesentlich größerer Tragweite für eine ausgeglichene Bilanz zwischen Weltmeer und Festland dürfte die folgende Feststellung aus der gleichen Arbeit von Brückner sein (1900, S. 93): »Die Wassermasse des Ozeans muss innerhalb längerer Zeiträume als konstant angenommen werden; andernfalls würden allgemeine Veränderungen des Wasserstandes erfolgen, die sich der Wahrnehmung nicht hätten entziehen können. Es muss also ebensoviel Wasser dem Ozean zurückgegeben werden, als ihm durch Verdunstung entzogen wird<sup>2)</sup>«. Im letzten Satz des Zitates lässt sich eine völlige Übereinstimmung mit MURRAY (1887) feststellen. Im ersten Teil des Zitates lieferte Brückner jedoch ein nachprüfbares Argument, das bis heute wesentlich für einen ausgeglichenen Wasserhaushalt zwischen Weltmeer und Festland geblieben ist. Die dazugehörige Fußnote 2) lautet: »Würden jedes Jahr nur 2% des mittleren jährlichen Regenfalls der Landflächen der Erde, also 20 mm Regen, dem Ozean dauernd entzogen werden, so müsste der Wasserstand überall jährlich um etwas über 1 cm, in 10 Jahren also um etwa 10 cm sinken. Selbst ein Sinken um einen Bruchteil (1/4 - ?) dieses Betrages hätte der Beobachtung schwerlich entgehen können« (BRÜCKNER 1900, S. 93. Fußnote 2).

Im Jahre 1905 drückte E. Brückner den Wasserhaushalt erstmals durch je eine Grundgleichung für das Festland und das Weltmeer aus, die gleichzeitig die Wechselbeziehungen zwischen Land und Ozean anzei-

gen. Heute werden in der deutschsprachigen Literatur andere Symbole verwendet, die im Zitat in Klammern gesetzt wurden.

In einer Bilanz des Kreislaufs des Wassers müssen sonach folgende Posten berücksichtigt werden:  
 die jährliche Verdunstung vom Meer  $V_M$ ; ( $= V_M$ )  
 der jährliche Regenfall auf dem Meer  $R_M$ ; ( $= N_M$ )  
 die jährlich in der Atmosphäre vom Meer auf das Land übertretende Wasserdampfmenge  $D_M$ ; ( $= D_M$ )  
 die jährliche Verdunstung vom Land  $V_L$ ; ( $= V_L$ )  
 der jährliche Regenfall auf dem Land  $R_L$ ; ( $= N_L$ )  
 die jährlich in der Atmosphäre vom Land auf das Meer übertretende Wasserdampfmenge  $D_L$ ; ( $= D_L$ )  
 die jährliche Wasserführung der Flüsse zum Ozean  $F$ . ( $= A_L$ )

Alle diese Posten sind in Kubikkilometern flüssigen Wassers auszudrücken (BRÜCKNER 1905, S. 436). Dürfen wir einen solchen stationären Zustand des Kreislaufs des Wassers annehmen, dann stehen jene 7 Größen in einem derartigen Abhängigkeitsverhältnis von einander, dass die Kenntnis von dreien genügt, um zwei andere abzuleiten, während zwei überhaupt aus den Gleichungen ausscheiden. Der Regenfall auf dem Meer ist dann gleich der Verdunstung vom Meer, vermindert um die Menge des vom Meer auf das Land und vermehrt um die Menge des vom Land auf das Meer übertretenden Wasserdampfes. Der Regenfall auf dem Land ist gleich der Dampfmenge, die vom Meer auf das Land übertritt, vermehrt um den Betrag der Verdunstung vom Land und vermindert um die vom Land auf das Meer übertretende Dampfmenge. Die Flüsse

Tab. 1.3-2: Mittlere Wasserhaushaltsgrößen für die Kontinente und Ozeane in mm/Jahr (aus: HUPFER & JAEGER 2006).

KONTINENTE	$V_L$	$N_L$	$V_L - N_L$	$A_L$	$N_L - A_L - V_L$
EUROPA	507	790	-283	283	0
ASIEN	416	740	-324	324	0
AFRIKA	587	740	-153	153	0
NORDAMERIKA	418	756	-338	339	-1
SÜDAMERIKA	910	1600	-690	685	5
AUSTRALIEN+OZEANIEN	511	791	-280	280	0
ANTARKTIKA	0	165	-165	165	0
OZEANE	$V_M$	$N_M$	$V_M - N_M$	$A_L$	$N_M + A_L - V_M$
ATLANTISCHER OZEAN	1130	760	370	200	-170
PAZIFISCHER OZEAN	1200	1290	-90	70	160
INDISCHER OZEAN	1290	1040	250	70	-180
Nordpolarmeer	50	100	-50	310	360

endlich bringen Wasser, das als Dampf vom Meer auf das Land übergetreten war, wieder zum Meer zurück. Ihre Wasserführung stellt jedoch nicht die ganze zum Ozean zurückkehrende Wassermenge dar. Denn auch in der Atmosphäre tritt Wasser als Dampf vom Land auf das Meer über (DI). Die gesamte vom Meer auf das Land übertretende Dampfmenge (Dm) ist um diesen Betrag (DI) größer als die Wassermenge (F) der Flüsse, beträgt also  $F + DI$ . Anders ausgedrückt: die jährliche Wasserführung der Flüsse zum Ozean stellt genau die Differenz zwischen der Wasserdampfmenge dar, die vom Meer auf das Land, und derjenigen, die vom Land auf das Meer übertritt.

Es ergibt sich sonach folgende einfache Formulierung der Bilanz des Kreislaufs des Wassers:

$$R_m = V_m - D_m + DI = V_m - (D_m - DI) = V_m - F \quad (1)$$

$$R_l = VI + D_m - DI = VI + (D_m - DI) = VI + F \quad (2)$$

(BRÜCKNER 1905, S. 437)

In heute in der deutschsprachigen Literatur gebräuchlichen Symbolen ausgedrückt, lautet nach BRÜCKNER (1905) die Grundgleichung für das Meer:

$$N_M = V_M - A_L \quad (3)$$

die Grundgleichung für das Land:

$$N_L = V_L + A_L \quad (4)$$

Schließlich steuerte BRÜCKNER (1905) als letztes wesentliches Glied der Wasserhaushaltsbilanz der Erde die durchschnittliche jährliche Verdunstung von den Meeresflächen bei. Aus ihr ergibt sich nach der Wasserhaushaltsgleichung für das Meer unter Abzug des Abflusses von den Festlandsflächen der Niederschlag auf die Meeresflächen.

Mit der Ermittlung der Verdunstung von den Meeresflächen konnte BRÜCKNER (1905, S. 443) erstmalig die im Wasserkreislauf im langjährigen Durchschnitt umlaufenden Wassermassen mengenmäßig erfassen (s. Tab. 1.3-1):

Verdunstung vom Meer	384.000 km <sup>3</sup>
Regenfall auf dem Meer	359.000 km <sup>3</sup>
Wasserführung der Flüsse zum Ozean	25.000 km <sup>3</sup>
Verdunstung vom Land	97.000 km <sup>3</sup>
Regenfall auf das Land	122.000 km <sup>3</sup>

»Unsere oben aufgestellte Bilanz des Kreislaufs des Wassers wird manchem kühn erscheinen; in der Tat möchte ich wiederholen, dass sie keinen Anspruch auf große Genauigkeit machen kann, weil dazu die Unterlagen noch zu unsicher sind... Genauere Werte zu finden, muss der Zukunft vorbehalten bleiben ... Mehr als eine solche erste Annäherung wollen unsere Ergebnisse nicht sein« (BRÜCKNER 1905, S. 445 im letzten Absatz der Arbeit).

## Wassermengen auf der Erde

Bisher ließen sich die auf der Erde vorhandenen Wassermengen nicht exakt erfassen, obwohl die Gesamtmenge als konstant angenommen wird. Einerseits beruhen die Kenntnisse über die auf der Erde vorkommenden Wassermengen auf Näherungswerten, andererseits noch auf Schätzungen. Deshalb sollen – nach Abwägen unterschiedlicher Vorstellungen – die bei KLIGE et al. (1998, S. 339) aufgeführten Werte hier genannt werden (s. Tafel 4).

### Wasserhaushaltsgleichung für die Erde

Unter zwei wichtigen Voraussetzungen ist die mittlere jährliche Wasserhaushaltsbilanz der Erde ausgeglichen, d.h., zwischen den Wasserhaushaltsgrößen des Meeres und des Festlandes herrscht ein Gleichgewichtszustand, wenn

- das Klima der Erde über längere Zeit – aber in kürzeren als geologischen Zeiträumen – gleich bleibt und
- dem zufolge der mittlere Meeresspiegel eine konstante Lage über längere Zeit besitzt.

Auf die zweite Voraussetzung wies bereits Brückner (1900, S. 93) mit Nachdruck hin. Aus den Wasserhaushaltsgleichungen für das Festland und Meer von BRÜCKNER (1905, S. 437) muss unter diesen beiden Voraussetzungen die mittlere jährliche Verdunstung auf der Erdoberfläche gleich dem mittleren jährlichen Niederschlag auf die Erdoberfläche sein. Die Grundgleichung für den Wasserhaushalt der Erde lautet deshalb:

$$V_E = N_E \quad (5)$$

Mit  $V$ = Verdunstung,  $N$ = Niederschlag,  $E$ = Erdoberfläche. Wie die Gleichungen von BRÜCKNER (1905, S. 437) zeigen, setzt sich die Verdunstung wie der Niederschlag auf der Erdoberfläche aus je zwei Wasserhaushaltsgrößen zusammen, nämlich der Verdunstung von den Meeres- und Landflächen ( $V_M$  und  $V_L$ ) und dem Niederschlag auf die Meeres- und Landflächen ( $N_M$  und  $N_L$ ). Es gilt demnach:

$$V_E = V_M + V_L = N_E = N_M + N_L \quad (6)$$

Da  $V_L$  aus direkten Messungen für die Landflächen der Erde bislang nicht in hinreichendem Maße festzustellen ist, wird die Verdunstung von den Landflächen bei Wasserhaushaltsbilanzstudien gewöhnlich mit Hilfe der Wasserhaushaltsgleichung für die Landflächen der Erde ermittelt:

$$V_L = N_L - A_L \quad (7)$$

Der Unterschied zwischen Niederschlag und Verdunstung für die Land- bzw. die Ozeangebiete muss zwi-

schen diesen ausgeglichen werden, damit die Gesamtbilanz für die Erde erfüllt ist. Das überschüssige Wasser des Festlandes wird über den resultierenden Abfluss  $A_L$  dem Ozean zugeführt, so dass

$$A_L = N_L - V_L \quad (8)$$

Auf der anderen Seite wird der Wasserdampf, der mit dem Überwiegen der Meeresverdunstung über den Meeresniederschlag in die Atmosphäre gelangt, über die Kontinente verfrachtet, wo er kondensiert und als Niederschlag ausfällt (s. Kap. 1.6: Quante). Damit wird der globale Wasserkreislauf geschlossen.

### **Wasserhaushaltsbilanzen für die Erde**

Die lange Reihe der Wasserhaushaltsbilanzen für die Erde (Tab. 1.3-1) wird durch die von BRÜCKNER (1905) eröffnet. Angeführt ist auch eine Bilanz, die vom Verfasser 1966 veröffentlicht wurde. Dabei berechnete er den Abfluss von den Landflächen 1964 neu. Es ergab sich ein Wert von 33.500 km<sup>3</sup>, der 1965 wegen neuer Abflussdaten für Amazonas, Orinoco und Brahmaputra auf 36.500 km<sup>3</sup> erhöht werden musste. Nachdem V. M. KOTLYAKOV [Kotljakov] 1970 (in L'vovìe 1971a) für das antarktische Inlandeis einen Abflusswert von 2200 km<sup>3</sup> angegeben hatte, wurde er erneut vergrößert und beträgt nunmehr 37.500 km<sup>3</sup>. Während dieser Wert dem Mittelwert aller in der Tabelle enthaltenen Berechnungen nahe kommt, variieren die Abflusswerte gerade bei den jüngsten Bestimmungen erheblich.

Der für den Niederschlag auf die Landflächen angegebene Wert basiert auf den Berechnungen von BROOKS & HUNT (1930), der von REICHEL (1952) auf 100.000 km<sup>3</sup> begründet abgerundet wurde. Der Wert von 99.000 bzw. 100.000 km<sup>3</sup> erscheint ab 1934 vielfach in den Bilanzen. In den jüngsten Berechnungen ist der Wert allerdings höher.

Die Werte von BUDYKO u.a. (1956) sowie ALBRECHT (1960) für die Verdunstung von den Meeresflächen stimmen nahezu überein. Der Verfasser dieses Beitrags verwendete 1966 den Wert nach ALBRECHT, was hier beibehalten wurde. Aus der Differenz Verdunstung von den Meeresflächen und Abfluss von den Landflächen ergibt sich der Niederschlag auf die Meeresflächen.

Weiterhin soll besonders die Wasserhaushaltsbilanz von BUDYKO et al. (1963) erwähnt werden (vgl. auch DYCK 1968). In der Grundgleichung für die Erde (Tab. 1.3-1; Spalte  $N_E = V_E$ ) kamen sie – wenn auch auf einem anderen Weg – zu dem gleichen Resultat wie MEINARDUS (1934).

In die Tabelle wurden zum Vergleich auch Werte des globalen Wasserkreislaufes aufgenommen, die mit Hilfe eines fortgeschrittenen globalen Klimamodells (ECHAM4\_OPYC) bestimmt worden sind

(Abb. 1.3-1). Die Zahlen liegen etwa im Bereich der herkömmlichen Bestimmungen. Es fällt auf, dass in beiden aufgeführten Berechnungen der Wasserkreislauf nicht geschlossen ist. Die Berechnungen für das letzte Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts deuten auf eine Verstärkung des globalen Wasserkreislaufes unter den Bedingungen des wahrscheinlichen Klimawandels hin (s. auch 3.1.3).

Tab. 1.3.2 gibt einen Einblick in die Wasserhaushaltsgrößen für die Kontinente und Ozeane, wobei der Arktische Ozean, hier Nordpolarmeer genannt, als eigene Einheit vom Atlantik abgetrennt ist. Bei den Kontinenten verfälscht das Zusammenziehen von Australien und Ozeanien übermäßig die Aussage für Australien.

### **Schlussbemerkung:**

#### **Offene Fragen nach 100 Jahren Forschung**

Wie oben ausgeführt, haben neuere und neueste Forschungen zum Ziel, auf unterschiedliche Art und Weise genauere Werte für die einzelnen Glieder bzw. Größen des Wasserkreislaufs bzw. Wasserhaushalts der Erde zu ermitteln.

Im Jahr 2005 war es 100 Jahre her, dass E. BRÜCKNER in grundlegenden Ausführungen die Zusammenhänge darlegte. Die heutzutage als selbstverständlich geltende Grundbeziehung für den mittleren globalen Wasserhaushalt, dass der Niederschlag auf die Erde gleich der Verdunstung von der Erde sein muss, verdanken wir diesem bedeutenden Gelehrten. Zum hundertjährigen Jubiläum erschienen in deutschsprachigen Bereich zwei bedeutende Artikel: HUPFER & JAEGER (2006) und JAEGER et al. (2006). Sie umreißen das Umfeld neuerer und damals neuester Forschungen im Vergleich zu den Werten von E. BRÜCKNER, demonstrieren umfangreich den Forschungsstand und weisen auf die weiteren, nicht einfachen Forschungsaufgaben dazu im derzeitigen Klimawandel hin. Besonders in dem Artikel von JAEGER et al. (2006) ist die Literaturliste eine besondere Fundgrube für neuere Literatur; auf die hier nur verwiesen werden kann.

Der globale Wasserkreislauf der Erde kann prinzipiell als bekannt angesehen werden. Dessen ungeachtet bestehen nicht nur Kenntnisdefizite in vielen Details, sondern auch in der genauen Bestimmung der Grundgrößen. Obwohl in der Gegenwart viele neue Erkundungsmittel zur Verfügung stehen, ist der Fehler der Bestimmungen noch relativ hoch. Entscheidend ist die richtige Wiedergabe der Proportionen, die das Wesen des globalen Wasserkreislaufes bestimmen. In diesem Sinn sind alle in der Tabelle enthaltenen Ansätze »richtig« (Tab. 1.3-1). So schwankt das Verhältnis  $N_M/V_M$  nur geringfügig um den Mittelwert 0,91, während das

Verhältnis  $V_L/N_L = 0,64 \pm 0,06$  in den Grenzen zwischen 0,52 und 0,90 beträgt. Daraus ergibt sich, dass keine der in der Tabelle enthaltenen Abschätzungen verbindlich empfohlen werden kann. Hinsichtlich der verarbeiteten Datenmengen und angewendeten modernen Methoden sollte jedoch den jeweils neuesten Berechnungen der Vorzug gegeben werden.

## Literatur

- BAUMGARTNER A. & E. REICHEL (1975): Die Weltwasserbilanz. München / Wien 1975.
- BRÜCKNER E. (1887): On the total annual Rainfall on the Land of the Globe. Meteorol. Zeitschr. 4. Jg., Literaturber., 63-64.
- BRÜCKNER E. (1900): Über die Herkunft des Regens. Geogr. Zeitschr., 6. Jg., Leipzig. 89-96.
- BRÜCKNER E. (1905): Die Bilanz des Kreislaufes des Wassers auf der Erde. Geogr. Zeitschr., 11. Jg., Leipzig. 436-445.
- BUDYKO M.I. (1962): The heat balance of the Earth. In: Proc.All-Union Sci.Meteorol. Conf. I, 171-185.
- BUDYKO M.I. (ed.) (1963): Atlas Teplovogo Balansa Zemnogo Shara. Mezhved, Moska.
- HUPFER P. & L. JAEGER (2006): Der Wasserhaushalt der Erde. In: Naturwissenschaftliche Rundschau 59 (7) S. 353 – 359.
- JAEGER L., HUPFER, P. & A:KESSLER (2006): 100 Jahre globale Wasserbilanz von EDUARD BRÜCKNER. Eine Würdigung aus heutiger Sicht. In: ERDKUNDE (Archiv für wissenschaftliche Geographie) Bd. 60 S. 273 – 286.
- KLIGE R. K. (1982): Izmenenija global'nogo vodoobmena. Meteorologija i Gidrologija. Leningrad, 5. 19-30.
- KLIGE R. K. et al. (2000): Global Variations of the Environment (climate and water regime). Moscow state university by M. V. Lomonosov – Geographical department. Scientific World. Moscow.
- KLIGE R. K., I. DANILOV & D., KONIŠČEV (1998): Istorija Gidrosfery. Moskovskij gosudarstvennyj universitet im. M. V. Lomonossova. Naučnyj mir Moskva.
- KORZUN V. I. et al. (Hrsg.) (1974): Mirovoj vodnyj balans i vodnye resursy zemli, Leningrad.
- MARCINEK J. (1964): Der Abfluß von den Landflächen der Erde und seine Verteilung auf 5° Zonen. Mitteilung des Instituts für Wasserwirtschaft, Heft 21, 202 pp. und Ergänzung zu Heft 21, 1964.
- MARCINEK J. & E. ROSENKRANZ (1996): Das Wasser der Erde. Gotha. 3. Auflage. 328 pp.
- MARCINEK J. (1978): Das Wasser des Festlandes. Gotha. . 3. Auflage. 198 pp.
- 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. Scottisch Geogr. Magazine, 3, Edinburgh. 65-77.
- PFAFF F. (1874): Das Wasser. 2.Aufl. München
- WOEIKOF A. A. (1887): Die Klimate der Erde. Jena. Band I.

*Prof. J. Marcinek  
Humboldt-Universität zu Berlin  
Geographisches Institut  
Gieseestr. 12 12621 Berlin*