

Das Wasserproblem der Erde: Vom Wasserkreislauf über das Klima bis zum Menschenrecht auf Wasser

LOZÁN, J. L., H. GRASSL, P. HUPFER, L. KARBE, L. MENZEL & C.-D. SCHÖNWIESE

(Der Artikel stellt in etwa eine Zusammenfassung des Buches dar und enthält mehrere Verweise auf verschiedene Kap.)

(Die zitierte Literatur befindet sich im Buches)

Schon immer war der Menschheit die Bedeutung von Wasser für die Existenz des Lebens bewusst. Seit Menschengedenken gelten Wasserquellen als Heiligtum. In den Werken sämtlicher Religionen wird auf die große Bedeutung des Wassers für das Leben hingewiesen. Das belegen auch zahlreiche Zeugnisse früher Kulturen in den verschiedenen Regionen der Erde. In Indien werden alle Flüsse als heilig angesehen. Auch in Europa gilt Wasser seit frühester Zeit als Lebenselixier. So unternahm bereits das römische Imperium große Anstrengungen, um eine Wasserversorgung zu errichten und instand zu halten. Man führte das begehrte Nass aus oft Dutzenden von Kilometern entfernten Quellgebieten heran und scheute sich nicht, Täler und andere Hindernisse mit gewaltigen Aquädukten zu überbrücken (s. Kap. 1.11: Fahlbusch).

Die existentielle Bedeutung des Wassers lässt sich in der deutschen wie auch in anderen Sprachen nachweisen. Viele Ausdrücke und Redewendungen wie »sich über Wasser halten«, »ein Schlag ins Wasser«, »das Wasser im Mund zusammenläuft«, »wie ein Fisch im Wasser«, »das Wasser bis zum Hals«, »das Wasser abgegraben« ... sind auf das Wasser, auf seine Vorzüge, aber auch auf seine Nutzen und Gefahren bezogen (s. Kap. 1.4: HaB).

Auch in der großen Anzahl von Fachgebieten, die sich mit dem Wasser befassen, wie Limnologie, Hydrobiologie, Hydrologie, Hydrographie, Hydrometeorologie, Hydrochemie, Ozeanographie, Hydrogeologie und Glaziologie, spiegelt sich seine gesellschaftliche Bedeutung.

Wasser: das Lebenselixier

Grundlegend für alle naturwissenschaftlichen Facetten des Wasserproblems ist das Wissen über die molekulare Struktur des Wassers und die daraus resultierenden anomalen thermischen und anderen Eigenschaften. Sie machen das Wasser (H₂O) zu »einem ganz besonderen Stoff«, vor allem im Vergleich mit Substanzen wie Schwefelwasserstoff (H₂S), die chemisch ähnlich aufgebaut sind. Hier liegt schon der Schlüssel für die vielseitigen Funktionen des Wassers sowohl innerhalb als auch außerhalb aller pflanzlichen und tierischen Organismen, im Wetter und Klimasystem, im Wasserkreislauf und anderen Rollen (s. Kap. 1.2: Gordalla et al.).

Ohne Wasser wäre auf unserem Planeten kein Leben entstanden. Fast jeder biochemische Prozess setzt die Anwesenheit von Wasser voraus. Die meisten chemischen Stoffe können nur in Lösung miteinander reagieren, d.h. ohne Wasser wäre die Bildung der Grundbausteine zur Entstehung der Ur-Organismen nicht möglich gewesen. Das ist der Grund, warum die Suche nach extraterrestrischem Leben mit dem Vorhandensein von flüssigem Wasser gekoppelt ist. Nach Entstehung des Lebens im Meer wurde von dort aus die ganze Erde besiedelt. Auch in trockenen Regionen mit sehr geringer Wasserverfügbarkeit und sogar den Wüsten findet man heute Pflanzen und Tiere. Ein Anzeichen für die Bedeutung des Wassers für die Organismen ist ihr hoher Wassergehalt. Pflanzen und Tiere – auch der Mensch – bestehen zu 50 bis 80% aus Wasser. Einige

Tab. 1: Weltwasservorkommen unter der Voraussetzung, dass das gesamte Wasservolumen etwa konstant ist. Die Zahlen beruhen auf Angaben von KLUGE et al. (1998, S. 339), zum Teil ergänzt.

	<i>Volumen</i> <i>(10³ km³)</i>	<i>Volumen-</i> <i>anteil</i> <i>(%)</i>	<i>Schicht-</i> <i>dicke</i> <i>(m)</i>	<i>Rezirkulation</i> <i>(km³/Jahr)</i>	<i>Erneuerung</i> <i>(Jahre)</i>
Ozeane	1.476.000	94,23	2894	507.000	2.911
Grundwasser	60.000	3,84	118	12.000	5.000
Gletscher u.dauernde Schneebedeck.	30.000	1,92	59	4.000	7.500
Seen und Sümpfe	290	0,0185	0,6	39.000	7,4
Flusswasser	2	0,00013	0,004	44.000	17 Tage
Wasser im Boden / Bodenfeuchte	16	0,001	0,03	15.000	390 Tage
Wasser in Lebewesen	2	0,00013	0,004	52.000	14 Tage
Wasser in der Atmosphäre	14	0,0009	0,03	577.000	9 Tage
Gesamtvorkommen	1.566.324	100			

Wasserpflanzen und -tiere wie Meeresalgen, gallertige Zitteralgen, Medusen und Quallen enthalten sogar 90–99% Wasser (s. Kap. 1.1: Lozán et al.).

Wieviel Wasser gibt es auf Erde? (Tab. 1)

Nach dem heutigen Wissensstand ist die Erde der einzige Planet unseres Sonnensystems, in welchem Wasser in größeren Mengen und in allen drei Aggregatzuständen vorkommt. Die Erdoberfläche wird eindeutig vom Wasser dominiert. 361,2 Mio. km² (70,8%) werden durch die Weltmeere bedeckt. Hinzu kommen die Eis-Flächen mit 16,1 Mio. km² (3,16%). Seen nehmen weltweit ca. 2 Mio. km² (0,39%) ein. Wenn Flüsse (sehr geringer Flächenanteil), Feuchtgebiete und Sümpfe mit ca. 2,7 Mio. km² (0,53%) mit berechnet würden, dann ergäbe sich eine Wasserbedeckung von über 75% (Tab. 1).

Der gesamte Vorrat an Wasser auf unserem Planeten ist riesig. Mit über 94% ist der größte Anteil jedoch in Form von Salzwasser in den Ozeanen und nur

zu einem geringen Anteil von weniger als 6% auf den Kontinenten gespeichert. Fast zwei Drittel davon liegen im tiefen Grundwasser und ein Drittel gebunden in Gletschern und Inlandeismassen. Sie sind für den Menschen daher kaum zugänglich. Die nutzbaren Süßwasservorräte aus den Flüssen und Seen machen nur etwa 0,35% des gesamten Süßwassers aus. Ein winziger Bruchteil von weniger als 0,001% der globalen Wassermenge ist in der Atmosphäre enthalten (Tab. 1).

Verfügbare Menge an Trinkwasser

Die Niederschläge sind die Hauptquelle für die Erneuerung (mittlere Verweilzeit eines Wasserteilchens) der Wasserreserven. Unsere Wasserversorgung beruht in erster Linie auf den Niederschlägen und in geringem Umfang auf der Nutzung von fossilen Grundwasservorkommen. Eine nachhaltige Nutzung dieser Trinkwasservorkommen setzt daher voraus, dass man nur die Mengen aus den Speichern (Flüsse, Seen, Grundwasser) entnimmt, die sich im gleichen Zeitraum durch

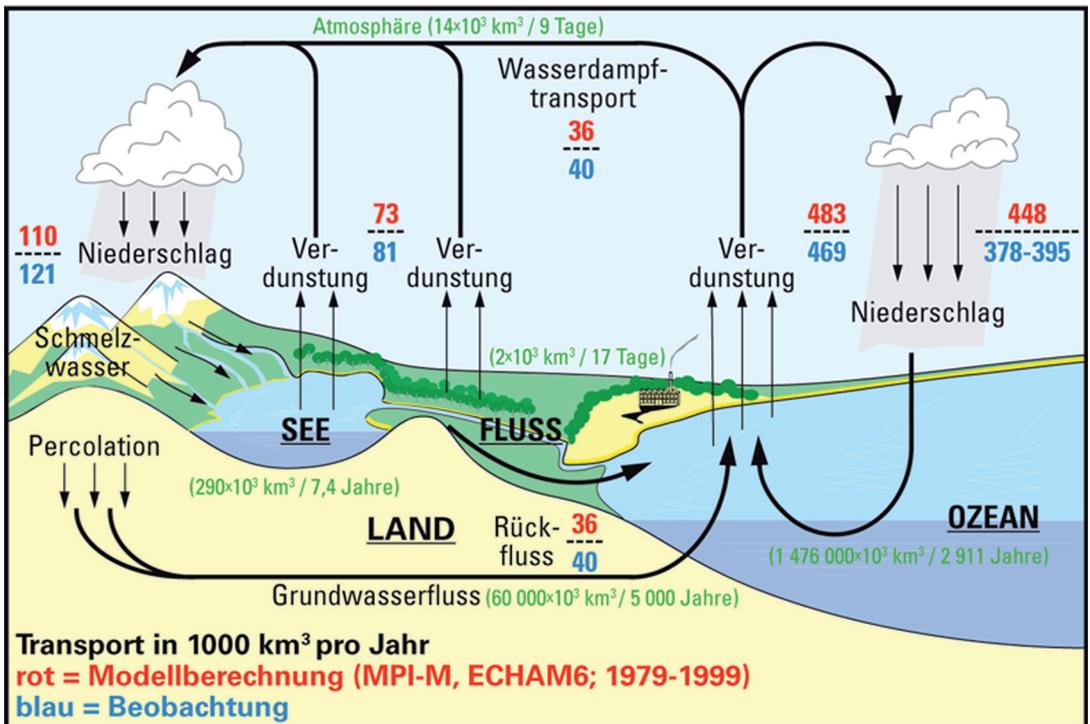


Abb.1: Globaler Wasserkreislauf: Zahlenwerte für jährliche Flüsse in 1.000 km³. Werte (grün) in Klammern geben das Wasservolumen im Kompartiment und dessen mittlere Verweilzeit (s. auch Tab. 1). Es werden die im Wasserkreislauf beteiligten Prozesse gezeigt. Sie werden teilweise durch Forschungsprogramme und in Routinediensten, wie etwa zur Wetter- oder Hochwasservorhersage beobachtet. Schwierig sind die Beobachtungen und Modellierung der aus Wasser und/oder Eis bestehenden Wolken, die u.a. auch den Strahlungshaushalt der Erde stark beeinflussen (Quelle: Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, ergänzt).

die Niederschläge erneuern können. Wie in *Abb. 1* und *Tab. 2* gezeigt wird, stehen von den ca. 110.000 km³ jährlicher Niederschläge, die über den Festländern fallen, nur ca. 40.000 km³ für die Nutzung durch die Menschen zur Verfügung, da ca. 70.000 km³ durch Verdunstung vom Boden und die Transpiration der Pflanzen wieder in Wasserdampf überführt werden. Diese Wassermenge ist allerdings fast um das Zehnfache höher als die derzeitige globale Jahresnutzung durch alle menschlichen Aktivitäten (Landwirtschaft, Industrie,

Haushalte, Kraftwerke) von ca. 4.200 km³ (*Tab. 3*). Es gibt daher prinzipiell genug Trinkwasser auf der Erde. Die Hauptursache von Wasserknappheit bzw. -mangel ist, dass die Niederschläge höchst ungleich auf der Erde verteilt sind (s. *Abb. 2-3*). Es gibt viele Gebiete mit geringer Wasserversorgung durch Niederschläge und entsprechenden Konsequenzen für die Umwelt, die Wirtschaft und Gesundheit. Auch die Verteilung der Niederschläge über das Jahr ist in vielen Regionen der Erde sehr unregelmäßig.

Tab. 2: Bilanz des globalen terrestrischen Wasserkreislaufs in km³/Jahr. Von den gesamten Niederschlägen (110.000 km³) über Land werden durch Verdunstung und Transpiration ca. 70.000 km³ in Wasserdampf überführt und 40.000 km³ gehen ins Meer als Abfluss. Diese Wassermenge wird erneut durch die atmosphärische Zirkulation vom Meer herantransportiert.

	<i>Evapotranspiration</i>	<i>Abfluss ins Meer</i>	<i>Summe</i>
<i>Natürliche Evapotranspiration*</i>	50.000		50.000
<i>Evapotranspiration aus Regenfeldbau</i>	18.000		18.000
<i>Unzugänglicher Abfluss</i>		29.000	29.000
<i>Zugänglicher Abfluss</i>			13.000
<i>Abfluss aus Entnahme</i>		2.000	
<i>Evapotranspiration aus Bewässerung</i>	2.000		
<i>Restl. zugängl. Abfluss</i>		9.000	
Gesamt	70.000	40.000	110.000

**Evapotranspiration = Verdunstung vom Boden + Transpiration von Pflanzen*

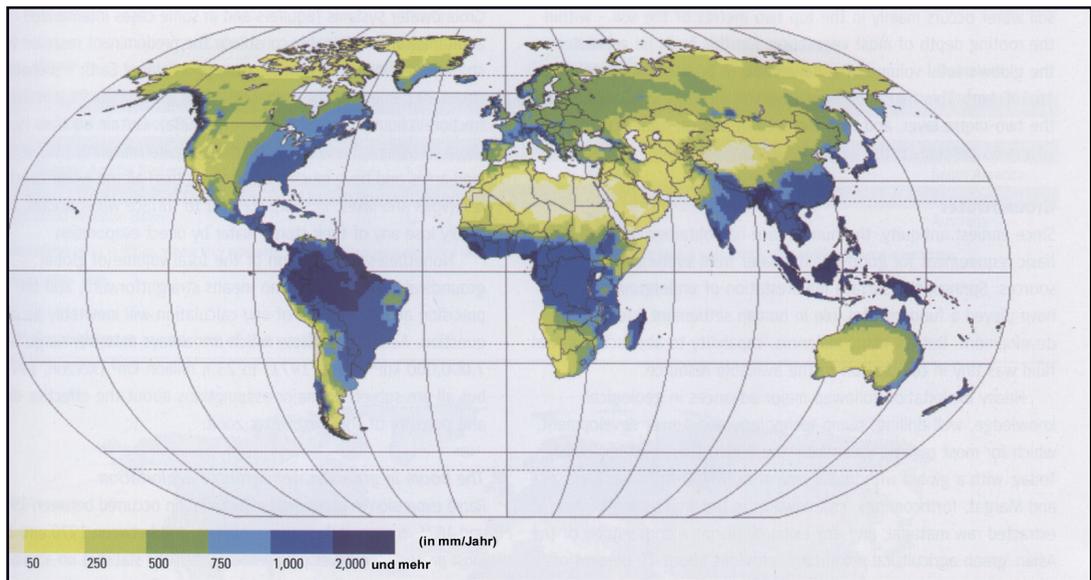


Abb. 2: Die weltweite Verteilung der Niederschläge über Land im Jahresdurchschnitt (mm/Jahr). Die Karte zeigt die extrem ungleiche Verteilung der Niederschläge zwischen den Tropen (teilweise >10.000 mm/Jahr) und den ariden/semi-ariden Regionen wie die Sahara-Wüste (<50 mm/Jahr). Besonders signifikant sind die Unterschiede auf dem afrikanischen Kontinent (Quelle: UNESCO 2003)

Tab. 3: Wassernutzung im Jahr 1995 weltweit und in Deutschland aufgeteilt nach Aktivitäten.

	Global			Deutschland		
	Gesamt <i>km³</i>	Pro Kopf <i>m³</i> %		Gesamt <i>km³</i>	Pro Kopf <i>m³</i> %	
Landwirtschaft	3160	536	75	2 ¹	24	4
Wärme- kraftwerke	400	69	10	28	341	64
Industrie	370	64	9	10	122	23
Haushalt	270	46	6	4	49	9
Gesamt	4200	715	100	44	536	100

Quellen: WBGU (1998), UBA (2001) ¹ Nur Wassermenge zur Bewässerung

Rolle des Wassers im Klimasystem

Auch im Klimasystem der Erde ist das Wasser von großer Bedeutung. Der Wasserdampf stellt das wichtigste Treibhausgas in der Atmosphäre dar. Ohne Treibhausgas würde die mittlere Temperatur an der Erdoberfläche nicht ca. 15 °C, sondern -18 °C betragen. Zu diesem natürlichen Treibhauseffekt von etwa 33 °C trägt der Wasserdampf in der Troposphäre mit ca. 20,6 °C bei. Damit sorgt hauptsächlich der Wasserdampf in der Atmosphäre dafür, dass die Erde kein Eisball wurde. Der zweitwichtigste Anteil mit 7,2 °C stammt von dem Treibhausgas Kohlendioxid (s. LOZÁN et al. 2001). Bei einer fortschreitenden Erwärmung wird mehr Wasserdampf in die Atmosphäre gelangen und der Treibhauseffekt dadurch weiter verstärkt.

Wasserkreislauf

Das Wissen über den globalen Wasserkreislauf, seine Speicherkompartimente und deren Inhalte sowie den ständigen Transporten großer Wassermassen zwischen Land, Meer und Atmosphäre ist von großer Bedeutung.

Es hat sehr lange gedauert, bis es gelang, den sich unablässig vollziehenden Kreislauf des Wassers richtig zu erkennen. Es gab die wundersamsten Vorstellungen, woher das Wasser aus den Quellen und woher das Niederschlagswasser stammt und wo es hingehet. Der große Durchbruch gelang dem österreichischen Geographen Eduard Brückner erst im Jahre 1905, als er die verschiedenen Zweige des globalen Wasserkreislaufes richtig erkannte und erste Abschätzungen der einzel-

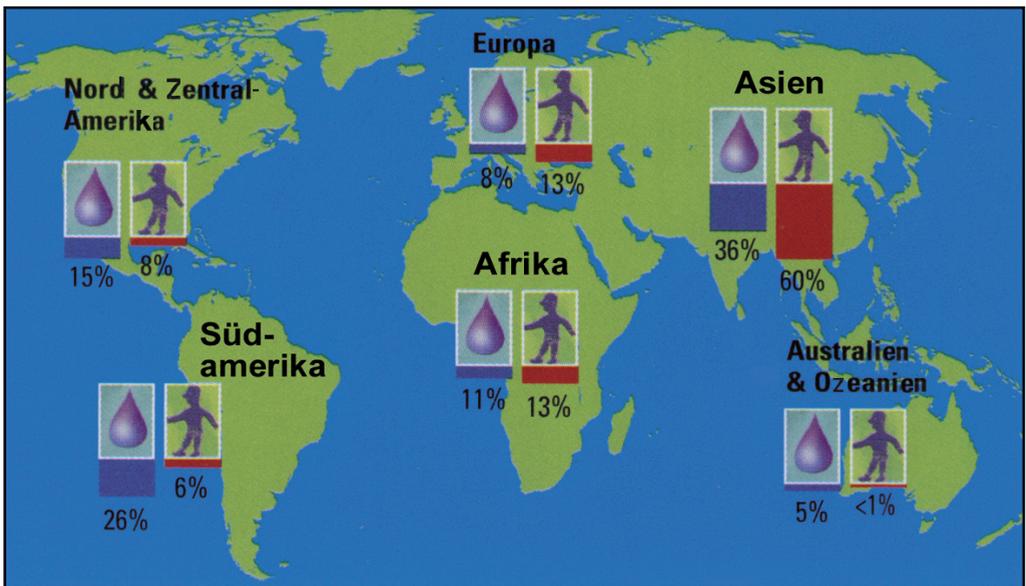


Abb. 3: Gegenüberstellung der Wasserverfügbarkeit und Bevölkerung nach Kontinenten. Sie zeigt die großen Unterschiede zwischen den verschiedenen Regionen. In Asien leben rund 60% der Weltbevölkerung; zur Verfügung stehen nur 36% der Wasserressourcen. Diese Werte stellen regionale Mittelwerte dar. Beispielsweise gibt es danach in Südamerika einen Wasserüberschuss; man findet jedoch dort an der Küste Perus und Nordchiles Wüsten mit sehr geringen Niederschlägen (Quelle: UNESCO 2003).

nen Komponenten vornahm. Seit dieser Zeit wurden umfangreiche Studien zur Bestimmung der globalen sowie eine große Anzahl regionaler Wasserbilanzen durchgeführt, und nach wie vor sind zahlreiche Fragen offen und geben Anlass zu weiteren Untersuchungen (s. Kap. 1.4; Marcinek). Mit hydrologischen Modellen und fortgeschrittenen Klimamodellen ist es heute möglich, unter bestimmten Voraussetzungen und Annahmen den globalen Wasserkreislauf prinzipiell richtig zu simulieren. Alle Rechnungen gehen davon aus, dass die Gesamtmenge des im Kreislauf befindlichen Wassers in der gegenwärtigen Periode der Erdentwicklung konstant ist. Das heißt, dass das Wasser, das in Zusammenhang mit Vulkanismus und Stoffumwandlungen neu in den Kreislauf eintritt, etwa der Wassermenge gerade die Waage hält, die aus dem Kreislauf ausscheidet, vor allem durch chemische Bindung von Wasser (z.B. Kalkablagerung). Es gibt aber weiterhin Unsicherheiten bei der Abschätzung der Wassermengen in den verschiedenen Kompartimenten. Die Angaben in der gängigen Literatur sind daher noch nicht einheitlich. Daher werden auch in diesem Buch verschiedene Zahlen herangezogen, die aber die gleichen Grundaussage wiedergeben. So unterscheiden sich beispielsweise die Abschätzungen über die Grundwasservorkommen je nach den Annahmen über den Umfang tief liegender, für den Menschen bisher nicht nutzbarer Wasservorräte.

Alle Abschätzungen des globalen Wasserkreislaufes zeigen, dass die Verdunstung von Wasser an der Ozeanoberfläche höher ist als die Niederschläge auf die Ozeane. Der Differenzbetrag verstärkt den Niederschlag über den Kontinenten (s. *Abb. 1*). Daher überwiegen dort die Niederschläge gegenüber der Verdunstung. Das Mehr an Niederschlag fließt über die Flüsse und (zum kleineren Teil) über das Grundwasser wieder den Ozeanen zu.

Von höchster Bedeutung für die Wasserversorgung der Kontinente, aber auch für die Prozesse im Klimasystem bis hin zum täglichen Wetter ist die Atmosphäre, in der unser Stoff als Gas (Wasserdampf), flüssiges Wasser und Eis vorkommt. Die atmosphärische Zirkulation transportiert den Wasserdampf, der durch die Verdunstung von der Oberfläche des Meeres oder anderen feuchten Oberflächen in die Luft gelangt, über weite Strecken, die oft schwer verfolgbar sind. Damit ist gleichzeitig ein gewaltiger Energietransport verbunden, denn die Energie, die beim Verdunsten aufgenommen wird, wird bei der Kondensation in der Atmosphäre wieder frei. In den Wolken, die vor allem in der Troposphäre gebildet werden, haben wir sichtbare Zeichen der hydrologischen, thermodynamischen, chemischen und dynamischen Prozesse in der Atmosphäre (s. Kap. 1.6: Quante).

Die Meere sind aus diesen Gründen unser Wasserlieferant Nr. 1. Der globale Wasserkreislauf wird ständig von den großen Verdunstungsgebieten »ernährt«. Die ungleiche Verteilung von Niederschlag und Verdunstung spiegelt sich in den Ozeanen in unterschiedlichem Oberflächensalzgehalt, aber auch in wichtigen Strömungskomponenten wider (s. Kap. 1.5: Hupfer&Helbig).

Menge, Art und Umfang des Eises waren in der Erdgeschichte äußerst variabel. Dies liegt vor allem in den schwankenden Lufttemperaturen in verschiedenen Zeitperioden. Langsam veränderlich sind daher die großen Eisschilde, zurzeit nur in Grönland und der Antarktis. Das Meereis reagiert bei höheren Temperaturen des Meerwassers jedoch relativ rasch auf Klimaänderungen. Ein empfindlicher Indikator für klimatische Änderungen sind auch die Gebirgsgletscher. Die meisten schrumpfen gegenwärtig aufgrund der mittleren Erwärmung der Erdoberfläche stark (s. Kap. 1.7: Escher-Vetter).

Eine hohe praktische Bedeutung haben all die Untersuchungen, die den Komponenten des Wasserhaushaltes konkreter Einzugsgebiete auf den Kontinenten gewidmet sind. Dabei spielen die bewaldeten Einzugsgebiete eine besondere Rolle (s. Kap. 1.10: Goldberg&Bernhofer).

Der anthropogene Klimawandel wird erheblich in den Wasserkreislauf eingreifen. Die Speicherinhalte werden sich ändern und man erwartet, dass Niederschlag und Verdunstung insgesamt zunehmen, d.h. dass der Wasserkreislauf sich beschleunigt. Das ist bisher aber weder durch Beobachtungen noch durch Modellrechnungen eindeutig beantwortet.

Veränderungen des Wasserkreislaufs

Eine allgemeine Aussage über eine mittlere globale Veränderung des Wasserkreislaufs lässt sich aufgrund der natürlichen, räumlichen und zeitlichen Variabilität und nicht zuletzt wegen der noch vorhandenen Schwächen der Modelle (Berechnungsmethoden) nicht ohne weiteres treffen.

Die Betrachtung der regionalen Niederschlagsentwicklung ermöglicht jedoch in einzelnen Fällen, Beschleunigungen und Abschwächungen sowie jahreszeitliche Verschiebungen des Wasserkreislaufs zu erkennen, die als Kennzeichen des Klimawandels bewertet werden können:

- Wie in Kap. 3.1.6: Schönwiese&Trömel gezeigt wird, sind die durchschnittlichen Jahresniederschläge in Deutschland 1901–2000 um rund 66 mm (9%) angestiegen, 1961–1990 zwar nur gering, 1971–2000 aber mit 115 mm (15%) sehr stark und 1981–2010 immerhin um 44 mm. Am deutlichsten ist die Zunahme im Winter für das Intervall 1971–2000 (um rund 64 mm, entsprechend 35%). Die Sommerniederschläge sind dagegen säkular (1901–2000) um rund 7 mm (3%) zurückgegangen, 1961–1990 sogar um rund 22 mm (9%), 1971–2000 und insbesondere 1981–2010 jedoch wieder erheblich angestiegen, und zwar um rund 10 mm (4%) bzw. 29 mm (12%). Aus den Untersuchungen der Starkniederschlagstage mit hundertjähriger Wiederkehrzeit ergibt sich zudem, dass weniger die Intensität der Niederschläge einzelner Starkniederschlagstage zugenommen hat als vielmehr die Anzahl der Starkniederschlagstage. Insgesamt ergibt sich hieraus eine deutliche Steigerung des Anteils von Starkniederschlägen am Gesamtniederschlagsaufkommen (s. Kap. 3.1.7: Malitz et al.).
 - Auch in europäischen Regionen (z.B. Mittelmeerraum und Südostengland) stehen die Wasserressourcen bereits heute unter Stress. Im Jahre 2007 waren in Europa insgesamt 11% der Bevölkerung und rd. 17% des Territoriums von Wasserknappheit betroffen. Die volkswirtschaftlichen Kosten von Dürreperioden sind nicht einfach zu ermitteln, die Europäische Umweltagentur hat die Kosten für die Dürreperioden der letzten drei Jahrzehnte grob auf über 100 Mrd. Euro geschätzt (EEA 2010). Um die Wasserversorgung in der Zukunft zu sichern, spielt die EU-Wasserrahmenrichtlinie seit 2000 eine wichtige Rolle (s. Kap. 4.2: Scheele&Malz).
 - Ein Indikator für Klimaänderungen ist auch die Änderung des Wasserstands im Kaspischen Meer. Seit 1977 ist dort ein Anstieg des Wasserstandes um fast 3 m als Folge von Änderungen in der atmosphärischen Zirkulation zu beobachten. Es ist dabei aber anzumerken, dass vorher (ab 1930) eine starke Abnahme des Wasserstandes stattgefunden hatte (s. Kap. 3.1.12: Panin).
 - Auch wenn die Desertifikationsprozesse sehr komplexe Ursachen haben, kann die beobachtete Zunahme dieser Erscheinung in den ariden und semi-ariden Regionen der Erde zum Teil auch als Folge der Verschiebung der Niederschlagszonen bewertet werden. Dies kann zusammen mit einer zu intensiven Landnutzung die Beschleunigung der Desertifikation bewirkt haben.
 - Der Nordosten Deutschlands stellt ein besonderes Gebiet dar, da seine mittlere klimatische Wasserbilanz (Differenz zwischen Niederschlag und potenzielle Verdunstung) im Gegensatz zu anderen Gebieten Deutschlands negativ ist. Von einem leichten Wassermangel kann dort daher gesprochen werden (s. Kap. 3.1.10: Stock).
 - Simulationen des Wasserkreislaufs in verschiedenen Flusseinzugsgebieten bei vorgegebener starker Erwärmung (3,5 °C im Jahresmittel) zeigen im Vergleich zu den heutigen Bedingungen für den Zeitraum 2070–2100 im Durchschnitt einen jährlichen Anstieg des Niederschlages im Ostsee-einzugsgebiet von etwa 10%, wobei die stärkste Zunahme bis zu 40% für den Winter und eine geringe Niederschlagsabnahme für den Spätsommer berechnet wird. Der Abfluss in die Ostsee Ende des Winters bzw. im Frühling konnte daher um mehr als 20% zunehmen. In den Einzugsgebieten von Rhein, Elbe und Donau ergibt sich mit denselben Klimaszenarien dagegen eine Reduktion des Abflusses von 10 bis 20% im Jahresmittel, hervorgerufen durch eine Zunahme der Verdunstung in diesen Einzugsgebieten bei weitgehend unverändertem Jahres-Niederschlag. Speziell bei der Donau wirkt sich die verstärkte sommerliche Trockenheit stark auf den Abfluss aus.
- Nach der Clausius-Clapeyron-Gleichung erhöht sich die Speicherkapazität der Luft für Wasserdampf bei einem Temperaturanstieg. Das heißt, wenn die Temperatur der untersten Atmosphäre steigt, kann mehr Wasser vor allem über den Meeren verdunsten und es regnet mehr. Eine Analyse von Satellitendaten von 1988–2002 zeigt eine Zunahme der Verdunstung über den Weltmeeren, die im 20. Jahrhundert auch eine Oberflächenerwärmung im Mittel von ca. 0,6 °C erfahren haben. Dagegen wird von mehreren Untersuchungen trotz der Erwärmung eine Abnahme der Verdunstung über Land festgestellt. Dies wird als Folge der erhöhten Lufttrübung diskutiert, die eine Reduktion der Sonnenstrahlung an der Erdoberfläche bewirkt und damit einen konkurrierenden Effekt zur Erwärmung der Atmosphäre durch Treibhausgase haben. Danach können Aerosole zu einer verzögerten oder abgeschwächten Verstärkung des Wasserkreislaufs führen. Man muss jedoch davon ausgehen, dass der Erwärmungseffekt durch Treibhausgase wegen ihrer Langlebigkeit den Aerosoleffekt in Zukunft immer stärker übertreffen wird (s. Kap. Jacob & Hagemann).

Warnsignale: Wasserversorgung in der Gegenwart und in der nahen Zukunft

Wasserstress

Wenn das Verhältnis zwischen der Wassermenge, die für die Versorgung entnommen wird, und dem Abfluss

in einer Region eine bestimmte Schwelle übersteigt, spricht man von Wasserstress. In gut versorgten Gebieten beträgt dieses Verhältnis nicht viel mehr als 10%. Wenn jedoch Werte über 40% auftreten, dann wird die Wasserversorgung in dem betroffenen Gebiet als sehr kritisch eingestuft. Dies ist bereits jetzt in vielen Ländern der Fall; besonders betroffen sind Länder in den Tropen und in den Subtropen. In weiten Teilen Europas und Nordamerikas sowie Nordasiens ist die Wasserversorgung derzeit noch ungefährdet. Lokale Mängel in dichteren Siedlungsgebieten werden bekanntlich durch entsprechend ausgelegte Trinkwassernetze ausgeglichen. In den nächsten Jahrzehnten kann sich die Situation jedoch ändern. Beispielsweise werden in Deutschland zurzeit von den rund 17 Mio. ha landwirtschaftlicher Nutzfläche nur 3% bewässert.

Die Kosten für Beregnungsmaßnahmen belaufen sich in durchschnittlichen Jahren auf ca. 200 bis 400 € pro Hektar. Dies sind für jeden Millimeter Zusatzregen 2,80 Euro. In sehr trockenen Jahren, wie beispielsweise im Jahr 2003, waren Kosten für Bewässerungsmaßnahmen von 500 €/ha und mehr erforderlich. Es musste in vielen Teilen Deutschlands aufgrund der geringen Bodenfeuchte von April bis September ununterbrochen beregnet werden. Die Jahre mit extremen Witterungsbedingungen werden sich im Zuge des fortschreitenden Klimawandels wahrscheinlich häufen (s. Kap. 2.3: Chmielewski).

Tab. 4: Die tägliche Wassernutzung (Liter) pro Kopf im Haushalt nach Ländern

USA	301
Japan	285
Schweiz	263
Deutschland	122
EU (Mittelwert)	150
Indien	25
Sudan	19

Tab. 5: Mindestwasserbedarf (Liter) (»virtuelle Wassermenge«) für die Produktion von:

1 kg Zucker	120
1 kg Papier	750
1 kg Zitrusfrüchte	1,000
1 kg Brot	1,000
1 kg Getreide	1.500
1 kg Palmöl	2,000
1 kg Reis	3.400
1kg Käse	5.000
1 kg Rindfleisch	15.500

Wasserversorgung

Die Situation bei der Trinkwasserversorgung wird jedoch kritischer, wenn man die trotz vieler Rationalisierungs- und Sparmaßnahmen erforderlichen Wassermengen für die Regionen mit Bevölkerungszunahme für die kommenden 20–25 Jahren abschätzt. In einigen Ländern wird sich in diesem kurzen Zeitraum die Bevölkerung sogar verdoppeln. In einer größeren Anzahl von Ländern Afrikas und Südamerikas kann sich daher der Wasserbedarf verdoppeln. Tab. 4 zeigt die bereits heute bestehende unterschiedliche Wassernutzung in Litern pro Kopf in den Haushalten, z.B. im Sudan und in Indien im Vergleich mit den Industrieländern.

Vor ca. 20 Jahren führte der britische Wissenschaftler John Anthony Allen das Konzept des virtuellen Wassers ein (s. Kap. 4.7: Lotze-Campe & Welp). Unter diesen Begriff wird die Menge an sauberem Wasser zusammengefasst, die zur Herstellung oder Produktion eines Produkts benötigt wird. Für unzählige Güter liegen entsprechende Werte vor, so wird für eine Tasse Kaffee rd. 140 l Wasser benötigt, für ein handelsübliches T-Shirt rd. 4.100 l und die verbrauchte Wassermenge für einen Neuwagen wird wegen des hohen Rohstoff- und Materialaufwands - auf bis zu 450.000 l veranschlagt. Eine Weiterentwicklung des Konzepts des virtuellen Wassers ist der »water footprint« (»Wasserfußabdruck«). Er gibt die gesamte Wassernutzung an, wenn sowohl der direkte als auch der indirekte Wasserverbrauch mit berücksichtigt wird (s. Kap.2.2: Malz&Scheele)

Tab. 6: Wassernutzung (m³) aller Aktivitäten verschiedener Länder pro Kopf und Jahr.

USA	1870
Kanada	1600
Portugal	1090
Spanien	1040
Italien	980
Griechenland	830
Japan	720
Frankreich	700
Belgien	690
Norwegen	600
Deutschland	536
Finnland	480
Irland	330
Schweden	310
Niederlande	280
Großbritannien	180
Dänemark	180
Luxemburg	140

Der Tab. 2 kann man entnehmen, dass weitaus der größte Anteil des Wassers für die Produktion von Nahrungsmitteln vor allem in der Landwirtschaft genutzt wird. Beispielsweise werden etwa 1.000 Liter Wasser benötigt, um 1 kg Brot zu erzeugen (Tab. 5). In diesem Sektor steckt weltweit das höchste Sparpotenzial. Der Industrieanteil der Wassernutzung liegt in Ländern mit hohem Einkommen sehr hoch und kann sicher gesenkt werden, wenn sich die heute bereits etablierten, effizienten Methoden zur Aufbereitung von Nutzwasser innerhalb von großen Betrieben weiter durchsetzen. Hier sind in den vergangenen 30 Jahren sehr große Fortschritte erzielt worden. In den Schwellen- und Entwicklungsländern wird der Industriesektor in den nächsten Jahrzehnten stark wachsen und dann mehr als doppelt soviel Wasser wie jetzt verbrauchen. Diese Länder werden aber später die Fortschritte in den Industrieländern ebenfalls umsetzen.

Wasserqualität und Gesundheit

Als Folge der Wasserknappheit verfügt ein erheblicher Teil der Weltbevölkerung kaum über Wasser in einer Qualität, die für den menschlichen Gebrauch geeignet ist. Die Qualität kann chemisch (z.B. durch Pestizide) oder mikrobiologisch (meist durch Fäkalien) beeinträchtigt sein. Infektionskrankheiten, die mit der Nutzung von mikrobiologisch kontaminiertem Wasser zusammenhängen, werden allgemein als wasserbürtige Krankheiten bezeichnet. Hierzu gehören Cholera, Typhus, Ruhr und Hepatitis. Wassermangel führt in seiner extremen Form zum Verdursten der betroffenen Menschen innerhalb weniger Tage. Häufiger wirkt sich jedoch die Verknappung von Wasser indirekt auf die menschliche Gesundheit aus, indem die persönliche

und häusliche Hygiene eingeschränkt wird. Hierzu sind die sogenannten »abwaschbaren« (water-washed) Krankheiten wie Trachom, Rückfallfieber und Typhus zu erwähnen (Abb. 4).

Nach neueren Schätzungen stehen etwa 6% aller Krankheiten in Zusammenhang mit Wasser und Hygiene (Wasser, Abwasser, Nahrungsmittel, persönliche Hygiene), in der Altersgruppe 0–4 Jahre sogar 15–20%. Hinzu kommen die mit Wasser direkt verbundenen und vom Wasser über Zwischenwirte abhängenden Krankheiten wie etwa Malaria. Bis zu 80% aller Krankheitsfälle können mit Wasser in Verbindung gebracht werden. Aus Abb. 4 ist die deutliche Abhängigkeit der Kindersterblichkeit vom sicheren Zugang zum sauberen Trinkwasser ersichtlich.

Wasserverschmutzung

Manche Wässer weisen stellenweise extreme Belastungen mit Schadstoffen auf, die insbesondere beim Grundwasser, oft für menschliche Zeitskalen irreversibel sind. Die Schadstoffe sind vielfältiger Art und reichen von organischen Verbindungen über anorganische Salze, Metalle, Nährstoffe, gelöste Gase, Wärme, Radionuklide, Pestizide, bis hin zu Mikroorganismen. Verschmutzung entsteht über »Punktquellen« genauso wie über »mobile Quellen«. Punktquellen bestehen in Form von industriellen oder kommunalen Abwässern; mobile Quellen sind saurer Regen, deponierte Luftschadstoffe wie z.B. Pestizide und Nitrate (s. Kap. 2.12: Dieter).

Falsche Bewässerungstechniken führen in vielen Ländern zur Versalzung und Versauerung der Böden. Eines der speziellen Probleme ist die Verschmutzung des Grundwassers mit Nitrat, was die menschliche Gesundheit gefährdet, insbesondere für Säuglinge.

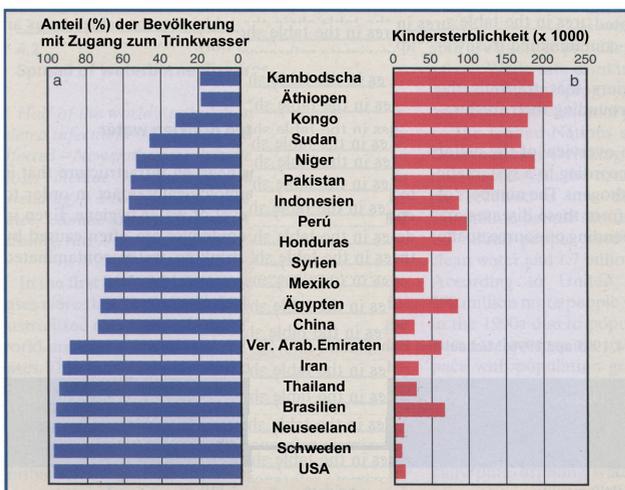


Abb. 4: Anteil (%) der Bevölkerung mit Wasseranschluss (links) und Kindersterblichkeit (rechts) aufgeteilt nach Ländern. Daraus erkennt man die hohe Kindersterblichkeit, wenn sauberes Wasser fehlt (Quelle: WBGU).

Ursache ist vor allem Massentierhaltung mit entsprechend umfangreichem Gülle-Aufkommen, was die Pufferfunktion der Böden überfordert. Große Flächen Europas, der USA und der früheren Sowjetunion sind dadurch belastet. In den Schwellen- und Entwicklungsländern führt zusätzlich der unsachgemäße Umgang mit Düngemitteln und die übermäßige Verwendung von Pestiziden zur unmittelbaren Gefährdung der Menschen.

Neben unsachgemäßer landwirtschaftlicher Praxis als Wasserverschmutzer sind die ungelösten, mit der Verstärkung einhergehenden Probleme bei Abfällen und Abwässern zu erwähnen. Trotz Verbesserungen der verschiedenen Kläranlagensysteme unterliegen Flüsse und Seen oft weiterhin zunehmender Eutrophierung. Die dritte Reinigungsstufe bei Kläranlagen ist teuer und daher nicht Standard und aus diesem Grund wenig verbreitet. Die Kapazität der Kläranlagen zahlreicher Städte in den Entwicklungsländern – wenn sie überhaupt existieren – ist zum Teil völlig unzureichend. Eine Verseuchung der Oberflächengewässer ist dann die unvermeidbare Folge.

Klimatisch bedingte ökologische Änderungen

Eine Reihe von ökologischen Veränderungen in Gewässern wird der Klimawandel auslösen. Die höhere Lufttemperatur vor allem in den Wintermonaten führt zu kürzerer Eisbedeckung und höheren Wassertemperaturen in Flüssen und Seen. Beispielsweise bricht in Skandinavien das Eis der Seen bis um einen Monat früher auf als noch vor 30 Jahren. Besonders die Wasserorganismen arktischer und alpiner Seen reagieren empfindlich auf die kürzere Eisperiode. In den Sommermonaten führt die höhere Wassertemperatur an der Seeoberfläche aufgrund der größeren Temperaturdifferenz zum tiefen Wasser zu stabilerer Wasserschichtung. Dadurch wird der Austausch zwischen den oberen und unteren Wasserschichten erschwert und die Gefahr von Sauerstoffmangel vergrößert. Die allgemeine Abnahme der Sommerniederschläge in Mitteleuropa und damit der geringe Nährstofftransport in die Gewässer hat oft Nitratmangel zur Folge. Das kann die Ursache für die in den letzten Jahren oft beobachtete, massive Entwicklung von Blaualgen sein, da diese in der Lage sind, atmosphärischen Stickstoff zu verwerten. Dies sind nur einige wenige Beispiele für die Beeinflussung der Gewässer durch klimatische Veränderungen (s. Kap. 2.8 Hupfer&Kleeberg und Kap. 3.2.4: Blenkner).

Wetterextreme

Nach den »Jahrhunderthochwässern« am Rhein 1993 und 1995 und an der Oder 1997, hat die »Jahrtausend-

flut« an Zuflüssen der Donau, der Moldau und der Elbe im Jahre 2002 mit 37 Todesopfern und ca. 15 Mrd. Euro wirtschaftlichen Schäden ein neues Bewusstsein für die Gefahr von Hochwasserkatastrophen geschaffen. Weltweit gab es in den vergangenen Jahren allerdings noch viel verheerendere Überschwemmungen, wie etwa 1998 am Yangtse in China mit über 3.000 Toten, 14 Mio. Obdachlosen und Sachschäden von 36 Mrd. US\$, die katastrophalen Monsunfluten im selben Jahr in Bangladesch und Indien mit ebenfalls ca. 3.000 Todesopfern oder das Jahrhunderthochwasser am Mississippi von 1993 mit 18 Mrd. US\$ Sachschäden und über 60.000 zerstörten Häusern sowie das Hochwasser in Pakistan 2010 infolge langer und starker Monsunfluten mit rund 1.600 Todesopfern (s. Kap. 1.12: Börngen und 3.1.13: Kasang). Eine Analyse in 29 großen Flusseinzugsgebieten ergibt für das 20. Jahrhundert eine Zunahme der sogenannten Jahrhundertfluten, d.h. extremer hydrologischer Ereignisse, die statistisch nur einmal in 100 Jahren zu erwarten sind. Von insgesamt 21 solcher Ereignisse ereigneten sich 16, also fast 4/5, nach 1953. Mit hoher Wahrscheinlichkeit ist zu erwarten, dass im Gefolge einer weiteren Erderwärmung auch eine Häufung extremer Bedingungen auftritt. Eine Reihe von Studien geht davon aus, dass sich die bereits beobachtete Zunahme der Winterniederschläge in den mittleren Breiten der Nordhemisphäre auch in Zukunft fortsetzt (s. Kap. 3.2.8).

Natur und Mensch leiden oft auch an zu wenig Wasser. Dürren gehören wegen ihrer Dauer und ihrer räumlichen Ausdehnung zu den schlimmsten Katastrophen. Als Beispiel sind die Dürren in der Sahel-Zone am Südrand der Sahara in den 1970er und 1980er Jahren zu erwähnen. 2003 litt ein großer Teil Europas unter einer extremen Hitzewelle mit weit verbreiteter Trockenheit, Waldbränden und weit über 10.000 frühzeitigen Todesfällen meist unter alten Menschen, vor allem in Frankreich. Die dominierenden klimatischen Größen im Zusammenhang mit Waldbränden sind die Lufttemperatur und die jahreszeitliche Niederschlagsverteilung. Trockene und warme Phasen mit hoher Verdunstung führen zu reduzierten Bodenfeuchten, einer Austrocknung der Streuschicht und teilweise der Vegetation und somit erhöhter Waldbrandgefahr. Steigen die Temperaturen weiter an, wächst also auch das klimatische Waldbrandrisiko, das allerdings auch stark vom Verhalten des Menschen abhängt (vgl. Kap. 3.2.8).

Eindeutig zugenommen haben in den letzten Jahrzehnten die ökonomischen Kosten von wetterbedingten Naturkatastrophen. Sie erhöhten sich weltweit von 13 Mrd. US\$ in den 1950er Jahren auf mehr als das Zehnfache im vergangenen Jahrzehnt. Für die zunehmenden Hochwasserschäden sind vor allem die verstärkte An-

Ungleichgewichtigkeit bei der Herkunft und der Nutzung des Nilwassers

Der Nil unterliegt am Unterlauf extremer Nutzung, am Oberlauf ist er dagegen eines der weltweit am wenigsten entwickelten Flußgebiete.

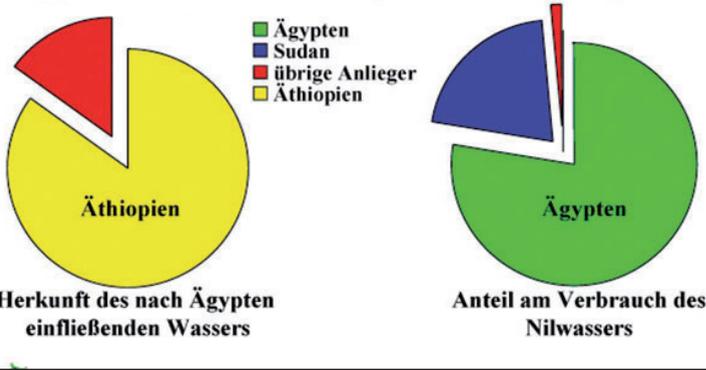


Abb. 5: Zwei Drittel des Nil-Wassers stammen aus der äthiopischen Region; die meisten Wassermenge wird aber von den Ägypten genutzt. Aufgrund des Bevölkerungswachstums ist ein Konflikt vorprogrammiert (Bild: J. Barandat mit seiner freundlicher Genehmigung).

siedlung und die Zunahme von Sachwerten in hochwassergefährdeten Gebieten verantwortlich (s. Kap. 3.2.11).

Konflikte um Wasser

Es gibt weltweit 261 Flussläufe und -einzugsgebiete, die innerhalb von zwei oder mehreren Ländern liegen. Besonders konfliktträchtig ist die Situation zwischen den Anrainerstaaten im Nil-, Jordan-, Indus- und Euphrat-Tigris-Becken. Zu den Anrainern des Nilbeckens zählen zehn Staaten mit 140 Mio. Menschen, unter denen Uganda und Äthiopien am Oberlauf sowie Sudan und Ägypten am Unterlauf die bedeutendsten sind. Aufgrund der politischen und wirtschaftlichen Überlegenheit stellt der Unterrainer Ägypten die einflussreichste Konfliktpartei in der gesamten Region dar (vgl. Kap. 3.2.5: Fröhlich und Kap. 3.2.6: Luhmann) (s. Abb. 5). Das Jordanbecken liegt im Nahen Osten, einer sehr wasserarmen Region und seine Anrainer sind Libanon, Syrien, Jordanien, Israel und Palästina. Israel hat im Sechstagekrieg 1967 auch strategisch wichtige Wassergebiete besetzt. Türkei, Syrien und Irak sind die Anrainer im Euphrat-Tigris-Becken. Als Oberanlieger beider Flüsse nimmt sich die Türkei das Recht, große Teile des Wassers für eigene Projekte zu verwenden. Das Indusbecken liegt zum großen Teil in Pakistan. Wichtige Zuflüsse entspringen in Indien. Beide Staaten können sich nicht einigen wie das Wasser aufgeteilt werden soll. Für die meisten genannten und anderen Wasserkonflikte wurden mittlerweile ständige Kommissionen eingerichtet, die durch Konsultation, Inspektionen, Datenaustausch und gegenseitige Besuche eine Konfliktlösung suchen.

Was soll getan werden?

Nach den von den Vereinten Nationen vereinbarten Millenniumszielen soll bis zum Jahr 2015 die Zahl von derzeit 2,4 Mrd. Menschen ohne gesicherten Zugang zu sauberem Trinkwasser und die Zahl von 2,6 Mrd. Menschen ohne Anschluss an eine Abwasserentsorgung jeweils halbiert werden. Abb. 6 und 7 zeigen die diesbezüglich in Afrika erzielten Verbesserungen zwischen 1990 und 2008. Um die Ziele bis zum Jahr 2015 zu erreichen werden folgende Maßnahmen und Fortentwicklungen empfohlen:

- Klimaschutzpolitik (z.B. Umsetzung und Weiterentwicklung des Kioto-Protokolls), um die Wahrscheinlichkeit für extreme hydrologische Ereignisse wie Dürren und Überschwemmungen zu reduzieren. Dazu müssten die globalen Emissionen von CO₂ bis 2050 um 45–60% gegenüber 1990 stufenweise gesenkt werden. Von 1900 bis 2005 wurde bereits eine mittlere globale Erwärmung von 0,7 °C festgestellt. Dem Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) zufolge sind bei einer Erwärmung von mehr als 2 °C bis zum Jahr 2100 gefährliche Klimaänderungen sehr wahrscheinlich.
- Nach dem Weltgipfel in Johannesburg 2002 und dem Weltwasser-Forum in Kioto im März 2003 geht es jetzt um die Umsetzung der vereinbarten Ziele: Um das Trinkwasserziel zu erreichen, müssten in den nächsten 12 Jahren erheblich mehr als 600 Mio. Menschen zusätzlich mit sauberem Trinkwasser versorgt werden, da die Bevölkerung in den betroffenen Ländern stark zunehmen wird. 180 Mrd. US \$ sind dazu jährlich erforderlich, verkündete die Weltbank,

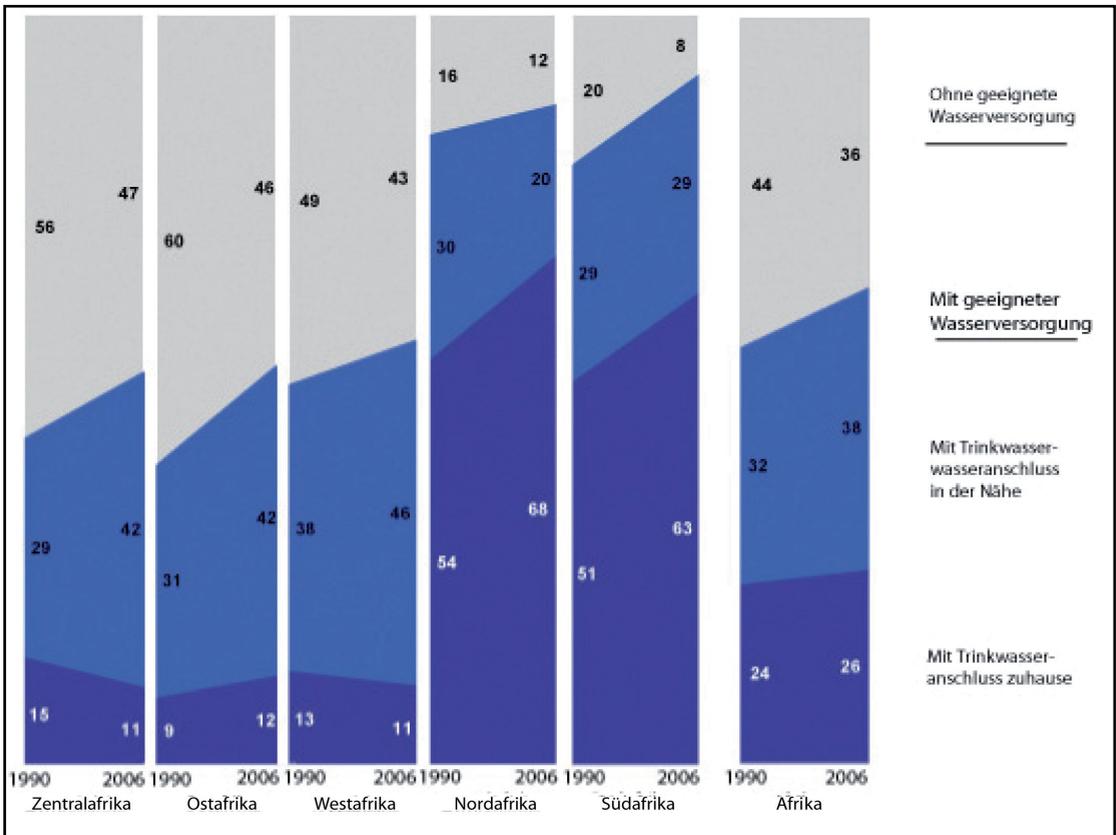


Abb. 6: Zugang zum Trinkwasser in Afrika. Der Anteil der Bevölkerung ohne Zugang zu einer geeigneten Trinkwasserquelle ging von 44% in 1990 auf 36% in 2006 zurück. 26% der Bevölkerung (244 Mio.) besitzen einen eigenen Trinkwasseranschluss. Die meisten Menschen davon (166 Mio.) leben in Nord- und Südafrika. Mit rund 60% der Bevölkerung in West-, Zentral- und Ostafrika ohne geeigneten Trinkwasseranschluss ist die Wasserversorgung dort noch sehr schlecht (Quelle: UNICEF and World Health Organization, 2008).

die dies auch als Argument für ihre Politik der Privatisierung der Wasserversorgung benutzte. Das wurde von vielen bestritten, denn bei Verzicht auf »high-tech« und »high-cost« Projekte könnten mit 10 Mrd. US \$ pro Jahr Wasser und sanitäre Einrichtungen für alle bereitgestellt werden. Diese Summe könnte beschafft werden, wenn die Industrieländer 20% ihrer Entwicklungshilfe für die sozialen Grundbedürfnisse bereitstellten. Im Gegenzug hätten die Entwicklungsländer 20% ihres Haushaltes in diesen Bereich zu investieren (s. Kap. 4.18: Bär & Kürschner-Pelkmann).

- Erschließung neuer Wasserressourcen: Zum Beispiel Gewinnung von Trinkwasser durch Entsalzung von Meerwasser mittels Sonnenenergie und Nutzung von marinen Süßwasserquellen.
- Seen und Flüsse sowie das Grundwasser sind vor Verschmutzung und Kontamination zu schützen. Zerstörte Feuchtgebiete und verschmutzte Gewässer müssen saniert werden.

- Die Nutzung von Wasserressourcen soll nachhaltig sein. Es ist nicht mehr Wasser zu entnehmen als sich erneuern kann.
- Neue Möglichkeiten sind zu erschließen, mit denen Wasser gespart bzw. es effizienter in allen Aktivitäten (Haushalt, Industrie und Landwirtschaft) genutzt werden kann. Beispielsweise gilt in der Landwirtschaft die Devise, mehr Nahrungsmittel mit der gleichen Wassermenge zu erzeugen. Wasserverluste durch defekte Leitungen sollen vermieden werden. Effiziente Verfahren wie die Tröpfchenbewässerung sollen kostengünstiger werden. In Tab. 7 wird die geschätzte Entwicklung in der Effizienz der Wasserversorgung bis 2030 gezeigt.
- Es soll intensiver nach trockenresistenten Pflanzen bzw. Sorten mit höheren Erträgen geforscht werden.
- In wasserarmen Regionen soll die Landwirtschaft an die regionalen Wasserhältnisse angepasst werden.

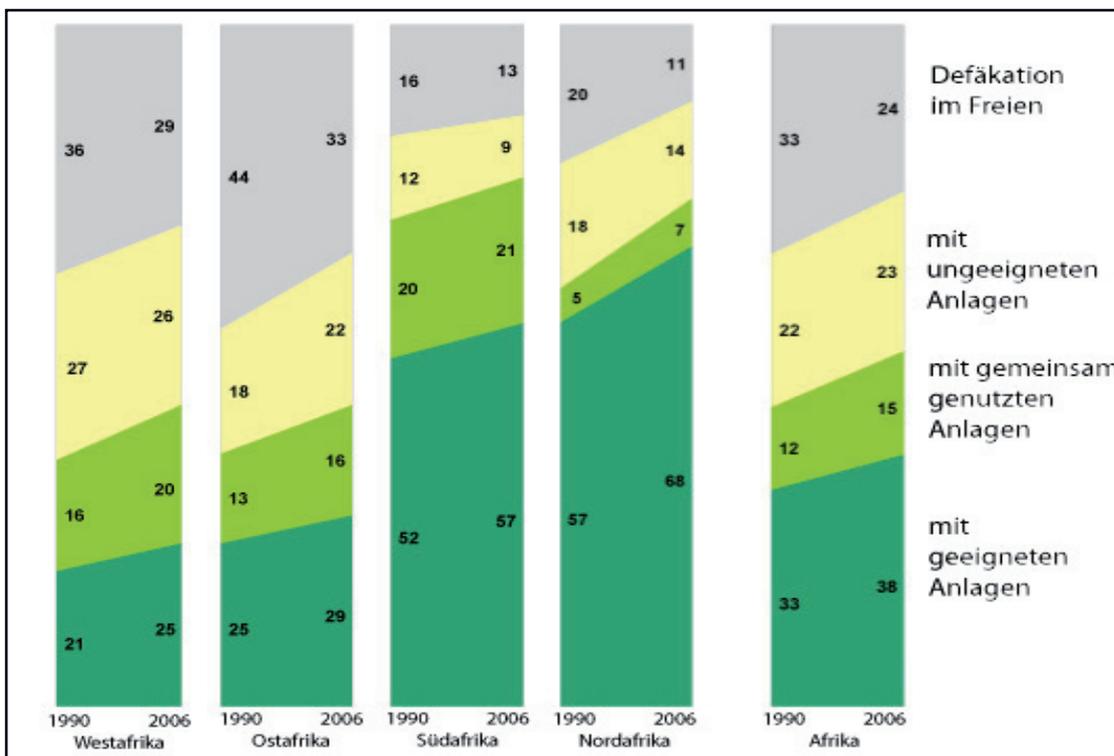


Abb. 7: Zugang zu Sanitäranlagen in Afrika. Der Anteil der Bevölkerung ohne Sanitäranlage ging von 33% in 1990 auf 24% in 2006 zurück. 23% der Bevölkerung (212 Mio.) teilen sich die Benutzung einer Sanitäranlage. Eine große Anzahl von Bewohnern in Nord- (68%) und Südafrika (57%) verfügt über eine eigene Sanitäranlage zuhause. In West-, und Ostafrika ist die Ausstattung mit einer Sanitäranlage noch sehr niedrig (Quelle: UNICEF and World Health Organization, 2008).

Tab. 7: Geschätzte Entwicklung in der Effizienz der Wassernutzung 1998-2030 in 93 Ländern (Unesco 2003).

	Afrika südlich der Sahara	Lateinamerika	Naher Osten/ Nordafrika	Sudasien	Ostasien	Alle Länder
Bewässerte Landwirtschaft						
1998	33	25	40	44	33	38
2030	37	25	53	49	34	42
Relative Entnahme (%) für die bewässerte Landwirtschaft aus erneuerbaren Wasserressourcen						
1998	2	1	53	36	8	8
2030	3	2	58	41	8	9

- In ariden und semi-ariden Regionen, in denen Flüsse und Seen von mehreren Anrainerstaaten genutzt werden, sollte die Nutzung des Wassers in Partnerschaft und Kooperation erfolgen.
 - Mit der Resolution vom Juli 2010 erkennt die UN-Vollversammlung das Menschenrecht auf Wasser und Sanitärversorgung an. Die Resolutionen der Vollversammlung sind rechtlich nicht bindend, sondern haben empfehlenden Charakter. Dennoch erhöht sich der Druck auf nationale Regierungen und die internationale Staatengemeinschaft, mehr zu tun, um die Millenniumsziele der Vereinten Nationen zu verwirklichen.
 - Die Privatisierung der Wasserversorgung muss weiterhin überall verhindert werden; die Privatisierung verschärft eher das Wasserproblem als dass sie es löst.
- Alle Maßnahmen müssen schließlich darauf abzielen, dass das grundlegende Menschenrecht, jederzeit über genügend und sauberes Wasser verfügen zu können für alle Völker und Regionen gewährleistet wird.