



## Modul 6

# Wasserkreislauf und Trinkwasser- schutz

## Begleittext für Lehrkräfte

**Wolfgang Hassenpflug, Ulf Neubert,  
Christiane Queisser und Päivi Taskinen**

Dieser Text steht zusammen mit den Texten der 10 weiteren Module des Projektes „Forschungsdialog: System Erde“ auf der CD-ROM „System Erde“ als Hypertext bzw. die Materialien als pdf-Dateien, Videos, Interaktionen, Animationen usw. über ein komfortables Navigationssystem mit Suchfunktion zur Verfügung.

Mit der CD-ROM können auch eigene Materialien erstellt werden. Außerdem kann aus der CD-ROM eine Schülerversion, die für das selbst organisierte Lernen vorgesehen ist - und keine didaktischen Informationen enthält - erstellt werden.



Das Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN) ist eine interdisziplinär arbeitende Forschungseinrichtung mit überregionaler, gesamtstaatlicher Aufgabenstellung. Auftrag des Instituts ist es, durch seine Forschungen die Pädagogik der Naturwissenschaften weiter zu entwickeln und zu fördern. Das IPN gliedert sich in die vier Fachabteilungen Biologie-, Chemie-, Physikdidaktik und Erziehungswissenschaften (mit Pädagogisch-Psychologischer Methodenlehre). Das IPN ist Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft. Enge Beziehungen bestehen zur Kieler Universität.

Weitere Informationen: <http://www.ipn.uni-kiel.de>

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte IPN-Projekt „Forschungsdialog: System Erde“ dient dem Ziel, das Verständnis des Planeten Erde zu fördern. Auf der Basis soliden Wissens soll die Beschäftigung und Auseinandersetzung mit der nachhaltigen Entwicklung der Erde angeregt werden. Die Materialien zum Thema „System Erde“ wurden vom IPN in enger Kooperation mit Geowissenschaftlerinnen und Geowissenschaftlern sowie Lehrkräften entwickelt und anschließend im Schulunterricht erprobt und evaluiert. Für den Unterricht in der Sekundarstufe II steht eine umfangreiche CD-ROM zur Verfügung, die u. a. Animationen, Simulationen, Informationstexte und Arbeitsblätter zu insgesamt 11 Modulen des Themas System Erde enthält. Der vorliegende Text ist Teil dieser CD-ROM, die beim IPN erhältlich ist.

Für den Unterricht in der Grundschule wurde ein Sachbuch und eine beiliegende CD-ROM mit Computerspielen entwickelt. Unterrichtsmaterialien für die Hand der Lehrkräfte sind im Internet erhältlich (<http://Systemerde.ipn.uni-kiel.de>).

© 2005

Alle Rechte beim

Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN)  
Olshausenstraße 62, D-24098 Kiel.



### Forschungsdialog: System Erde

#### Kontakt:

Ulrike Gessner  
Leibniz-Institut für die Pädagogik der  
Naturwissenschaften an der Universität Kiel  
Olshausenstr. 62  
24098 Kiel

Tel: ++49 (0431) 880-3121  
E-Mail: [gessner@ipn.uni-kiel.de](mailto:gessner@ipn.uni-kiel.de)  
<http://systemerde.ipn.uni-kiel.de>

Auf verschiedenen Seiten befinden sich Verweise (Links) auf Internet-Adressen. Haftungshinweis: Trotz sorgfältiger inhaltlicher Kontrolle wird die Haftung für die Inhalte der externen Seiten ausgeschlossen. Für den Inhalt dieser externen Seiten sind ausschließlich deren Betreiber verantwortlich. Sollten Sie bei dem angegebenen Inhalt des Anbieters dieser Seite auf kostenpflichtige, illegale oder anstößige Inhalte treffen, so bedauern wir dies ausdrücklich und bitten Sie, uns umgehend per E-Mail davon in Kenntnis zu setzen, damit beim Nachdruck der Verweis gelöscht wird.

#### Autoren dieses Moduls:

Prof. Dr. Wolfgang Hassenpflug (Sachanalyse, Bausteine 3 - 4), Päivi Taskinen (didaktische Informationen, Baustein 2), Christiane Queisser (Baustein 1), Ulf Neubert (didaktische Informationen)

#### Geowissenschaftliche Beratung:

Dr. Wilhelm Struckmeier (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, BGR)

#### Multimediaumsetzung, Grafik und Layout:

CD-ROM, Rahmenlayout, Grafiken: MMCD GmbH interactive in science (Düsseldorf)  
Texte: Päivi Taskinen (IPN)

#### Herausgeber:

Prof. Dr. Horst Bayrhuber, Dr. Sylke Hlawatsch



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Allgemeine Zielsetzung und Begründung</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Sachinformation</b>	<b>4</b>
2.1	Das Wasser auf der Erde - ein Überblick	5
2.2	Der Wasserkreislauf - vertiefende Darstellung	8
2.2.1	Eigenschaften des Wassers	8
2.2.2	Ozean	13
2.2.3	Wolken und Niederschlag	15
2.2.4	Der Wasserkreislauf auf dem Land	18
2.2.5	Grundwasser	22
2.2.6	Schnee, Eis und Gletscher	25
2.2.7	Trinkwasserschutz	27
<b>3</b>	<b>Didaktische Information</b>	<b>35</b>
3.1	Lernziele	35
3.2	Hinweise zu den Lernvoraussetzungen	36
3.3	Hinweise zu horizontalen und vertikalen Verknüpfungen	37
3.4	Erläuterungen und Nutzungshinweise zu den Materialien	38
<b>4</b>	<b>Vorschläge für den Unterrichtsverlauf</b>	<b>40</b>
<b>5</b>	<b>Literatur</b>	<b>40</b>
<b>6</b>	<b>Unterrichtsmaterialien</b>	<b>42</b>

## Anhang:

Unterrichtsmaterialien

Baustein 1: Demonstration des Wasserkreislaufs im System Erde durch das Dosenexperiment

Baustein 2: Gruppenpuzzle zum Wasserkreislauf

Baustein 3: Wolkenverteilung über Meer und Landflächen

Baustein 4: Verbindung von Wasser- und Gesteinskreislauf im System Erde



## 1 Allgemeine Zielsetzung und Begründung

Die **grundlegenden Informationen** des Moduls „Wasserkreislauf und Trinkwasserschutz“ umfassen überwiegend Basiswissen auf dem Niveau der Sekundarstufe I (Klassen 9 - 10). Die Schüler/innen sollen ihr Wissen zu den mit dem Wasserkreislauf verbundenen Prozessen auffrischen und vertiefen. Mithilfe eines Versuchs kann der Wasserkreislauf in einfacher Form erarbeitet und diskutiert werden (s. Baustein 1 „Demonstration des Wasserkreislaufs im System Erde durch das Dosenexperiment“, Material 1). Der globale Wasserkreislauf wird mit der Wasserbilanz-Gleichung verdeutlicht.

Die **vertiefenden Informationen** bieten die Möglichkeit, die einzelnen Prozesse des Wasserkreislaufs tiefgründiger zu bearbeiten. Anhand eines Gruppenpuzzles können die Schüler/innen selbst organisiertes Lernen üben (s. Baustein 2 „Gruppenpuzzle zum Wasserkreislauf“, Material 1). Dabei können sie die Methode Systemanalyse anwenden, indem sie ein Stoffflussdiagramm erstellen.

Die Materialien in den Bausteinen 3 „Wolkenverteilung über Meer und Landflächen,“ (Material 1) und 4 „Verbindung von Wasser- und Gesteinskreislauf im System Erde“ (Material 1) bieten den Schüler/innen die Möglichkeit, ihr erworbenes Fachwissen mit der Interpretation von Fernerkundungsbildern zu verbinden.

Durch das Thema Trinkwasserschutz kann der Wasserkreislauf in einem für die Schüler/innen interessanten Kontext vertieft werden.

## 2 Sachinformation

Etwa 71 % der Oberfläche des Planeten Erde sind von Wasser bedeckt (s. Abb. 1). Dies ist in der speziellen Stellung der Erde im Planetensystem begründet: Insbesondere ihre spezifische Ausrichtung und der Abstand zur Sonne bewirken ein Temperaturspektrum, in dem Wasser in allen drei Aggregatzuständen vorkommen kann.

Die Bildung und Anreicherung von Wasser auf der Erde setzte in der geologischen Entwicklung erst vor etwa 4 Milliarden Jahren ein. Als die Temperaturen sanken, kondensierte der Wasserdampf und es fiel erster Regen (s. Module „System Erde - Die Grundlagen“ und „Entstehung und Entwicklung des Lebens“).

Bereits in der Antike wurden Phänomene des globalen Wasserkreislaufs beschrieben und auch in dichterischer Umschreibung von GOETHE findet sich der Gedanke eines Kreislaufs wieder:

„Alles ist aus dem Wasser entsprungen!  
 Alles wird durch das Wasser erhalten!  
 Ozean, gönn' uns dein ewiges Walten!  
 Wenn du nicht Wolken sendetest,  
 nicht reiche Bäche spendetest,



**Abbildung 1:** Die Erde aus dem All. Aus dem Bild wird deutlich, weshalb die Erde auch der blaue Planet genannt wird - Wasserflächen bedecken über zwei Drittel seiner Oberfläche. Weiterhin sind typische Merkmale globaler Bewölkung sichtbar. Deutlich zu erkennen sind die wolkenreichen Tropen, Wolkenarmut über den Subtropen und v. a. über den großen kontinentalen Trockengebieten und die unterschiedliche Drehrichtung der Tiefdruckgebiete auf der Nord- und Südhalbkugel (Corioliskraft). (Bild: NASA 2005)

hin und her nicht Flüsse wendetest,  
 die Ströme nicht vollendetest,  
 was wären Gebirge, was Eb'nen und Welt!  
 Du bist's, der das frischeste Leben erhält!“ (GOETHE, Verse 8455ff.)

Die heutigen wissenschaftlichen Modellvorstellungen sind grundsätzlich die Gleichen geblieben. Aber die Prozesse können detaillierter beschrieben und die Mengen genauer abgeschätzt werden. Z. B. sind die Folgen menschlicher Eingriffe, die mit dem Wachstum der Weltbevölkerung und den gestiegenen technischen Möglichkeiten immer bedeutsamer werden, besser einzuordnen. Im Folgenden wird zunächst ein Überblick über das Wasser auf der Erde gegeben, dann wird auf den Wasserkreislauf im Detail eingegangen.

## 2.1 Das Wasser auf der Erde - ein Überblick

Im Gegensatz zu fossilen Brennstoffen verbraucht sich Wasser nicht. Wenn es genutzt wird, wandelt es nur den Aggregatzustand (fest, flüssig, gasförmig) oder verändert seine Zusammensetzung. Es geht aber nicht verloren.

In einem ständigen Kreislauf verdunstet das Wasser immer wieder. Es kondensiert, bildet Wolken und fällt schließlich erneut als Niederschlag auf die Erdoberfläche. Der Wasserkreislauf wird auch **hydrologischer Kreislauf** genannt. Während der überwiegende Teil des Niederschlags direkt in den Ozean fällt, speist der kleinere, über Land fallende Niederschlagsanteil zunächst die Seen und Flüsse sowie das Grundwasser und gelangt schließlich über die Flüsse ins Meer (s. Abb. 2).

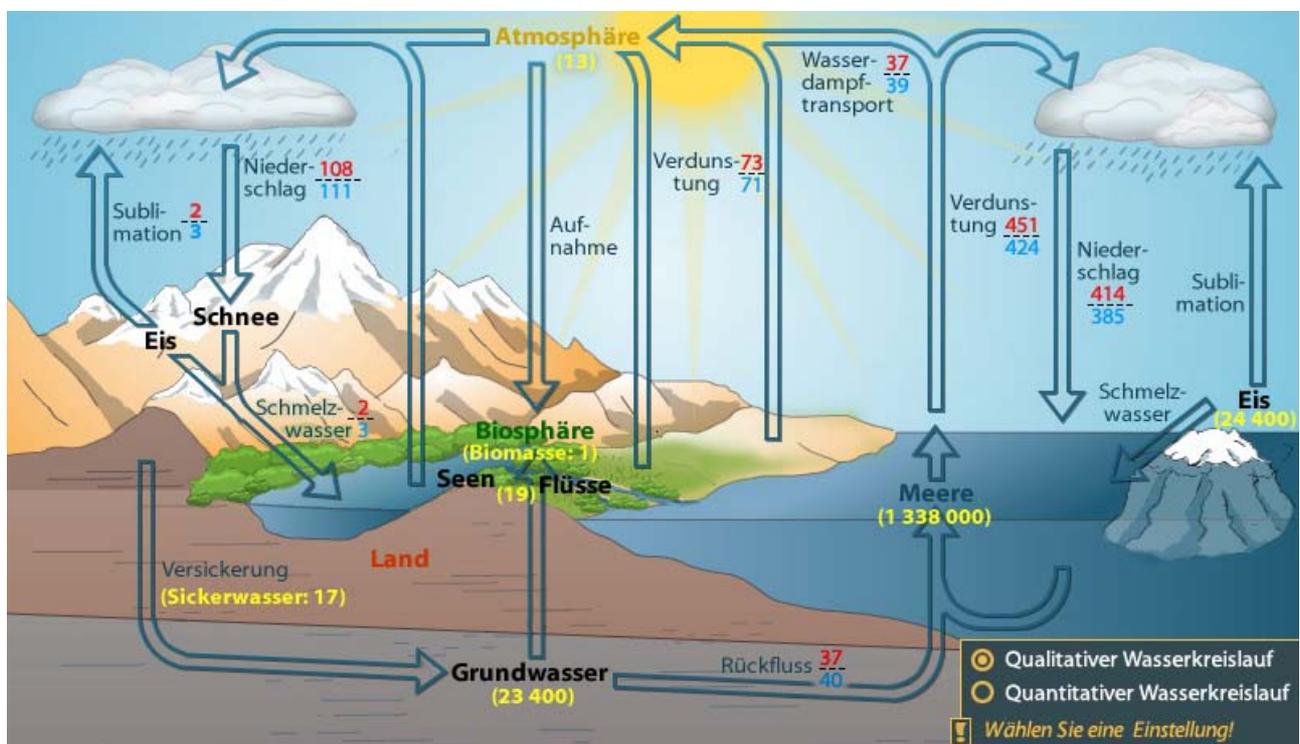


Abbildung 2: Der globale Wasserkreislauf. Dargestellt sind die am Wasserkreislauf beteiligten Prozesse. Die Werte der Modellberechnung entstammen aus der Forschung des Max-Planck-Institutes für Meteorologie, Hamburg (ECHAM4; 1979-1994). Die beobachteten Werte beruhen auf langfristigen Wetter- und Hochwasservorhersagen sowie Forschungsprogrammen (LOZAN et. al. 2005), die Werte der Speichervolumina sind nach MARCINEK und ROSENKRANZ 1996.



Das gesamte Wasser der Erde wird auf knapp 1,4 Milliarden km<sup>3</sup> geschätzt (MARCINEK und ROSENKRANZ 1996). Der überwiegende Teil des Wassers ist das Salzwasser der Ozeane mit fast 97 %.

In der Atmosphäre sind als Wasserdampf und Kondensat nur 0,001 % des gesamten Wassers der Erde enthalten. Das entspricht einer Wasserschicht von lediglich 25 mm, wenn man annähme, dass die gesamte Erde gleichmäßig von Wasser bedeckt wäre. Da der langjährige mittlere globale Jahresniederschlag 1.020 mm entspricht, muss das Wasser in der Atmosphäre mehr als 40-mal pro Jahr vollständig erneuert werden (FLOHN 1973). Weitere Speicher sind in Abbildung 3 angegeben.

Speicher	Anteil	Menge	Schichtdicke bei Verteilung auf die gesamte Erde <sup>1</sup>	Erneuerung (Jahre)
<b>Gesamter Wasservorrat der Erde</b>	<b>100 %</b>	<b>1386 Mio. km<sup>3</sup></b>	<b>2736 m</b>	
<b>Süßwasser zusammen</b>	3,47 %	48,021 Mio. km <sup>3</sup>	94,18 m	
<b>Fließgewässer / Binnenseen</b>	0,014 %	0,19 Mio. km <sup>3</sup>	0,4 m	17 Tage / 7,4
<b>Bodenwasser / Bodenfeuchte</b>	0,001 %	0,017 Mio. km <sup>3</sup>	0,03 m	390 Tage
<b>Grundwasser</b>	1,69 %	23,4 Mio. km <sup>3</sup>	45,88 m	5000
<b>Gletscher, Polareis</b>	1,76 %	24,4 Mio. km <sup>3</sup>	47,85 m	7500
<b>Lebewesen</b>	<0,001 %	0,001 Mio. km <sup>3</sup>	0,002 m	14 Tage
<b>Atmosphäre</b>	0,001 %	0,013 Mio. km <sup>3</sup>	0,025 m	9 Tage
<b>Meere</b>	96,53 %	1338 Mio. km <sup>3</sup>	2642 m	2911

<sup>1</sup> Unter der Voraussetzung gleichmäßiger Verteilung über einem eingeebneten Erdkörper von 510 x 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> Fläche.

Abbildung 3: Wassermengen der Erde (nach MARCINEK und ROSENKRANZ 1996; BAUMANN et al 1974; KORZUN 1977). Die Tabelle zeigt die absoluten Mengen von Wasser und deren prozentuale Verteilung in den verschiedenen globalen Speichern. Aufgrund der enormen Volumina und der damit verbundenen Erfassungsschwierigkeiten differieren die in der Literatur angegebenen Werte zum Teil deutlich.

Die Speicher sind über den globalen Wasserkreislauf miteinander verbunden und stehen in folgenden Beziehungen zueinander:

- Verdunstung von Wasser aus dem Ozean;
- Kondensation des Wasserdampfes in der Atmosphäre, gefolgt von Wolkenbildung und Verfrachtung von Wasserdampf;
- Niederschlag über dem Ozean oder über Land;
- Verdunstung über Land, Abgabe aus dem Boden;
- Aufnahme und Ausscheidung von Wasser durch Lebewesen, die zu hohen Prozentwerten aus Wasser bestehen;



- Abfluss über Land, resultierend aus dem Niederschlag über Land, und damit Auffüllung der Speicher Oberflächenwasser und Grundwasser;
- Bindung von Wasser durch Gefrieren sowie Freisetzung von Wasser aus Eis und Schnee durch Schmelzen und Sublimation;
- Chemische Bindung von Wasser in Gesteinen sowie Freisetzung durch Gesteinsumwandlung und durch Vulkanismus.

Dieser Fluss des Wassers durch die verschiedenen Wasserspeicher kann als System beschrieben werden. Beim Wasserkreislauf handelt sich um ein offenes System, da es durch den Input an Sonnenenergie angetrieben wird und die gesamte Erde umfasst. Die Speicher (Ozean, Atmosphäre über dem Land, Atmosphäre über den Ozeanen, Oberflächenwasser in Flüssen, Seen und Böden, Grundwasser, Schnee und Eis, Lebewesen, Gesteine) stellen die Systemelemente dar. Bei den Beziehungen handelt es sich sowohl um Stoffflüsse als auch um Wirkungsbeziehungen. Der Wasserkreislauf ist ein Teilsystem des Systems Erde und steht z. B. mit dem Gesteinskreislauf und dem Klimasystem in Beziehung (s. Module „Gesteinskreislauf: Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte“ und „Klimasystem und Klimageschichte“).

Die horizontale und vertikale Zirkulation von Wasserdampf, Wasser und Eis im System Erde erfolgt im Wasserkreislauf in Folge von Schmelzen, Verdunstung, Sublimation, Kondensation, Niederschlag und Abfluss. Die notwendige Energie stammt aus der Sonneneinstrahlung. Bei der Verdunstung werden die Wassermoleküle durch Energie der Sonne in große Höhen der Atmosphäre gehoben. Diese Energie wird in den Molekülen gespeichert, in Wärme- und Bewegungsenergie umgewandelt, und treibt alle Prozesse des Wasserkreislaufs, bis hin zur Erosionskraft von Flüssen und Gletschern, an.

Aus dem Ozean verdunsten über  $400\,000\text{ km}^3$  Wasser pro Jahr. Da das Wasser der Ozeane 96,5 % des gesamten Wassers der Erde von  $1,386\text{ Milliarden km}^3$  beträgt, bleibt ein Wassermolekül im Durchschnitt etwa 3300 Jahre im Ozean, bevor es einmal in den Wasserkreislauf einbezogen wird ( $(1,386\text{ Milliarden km}^3 \times 0,965) : (400.000\text{ km}^3 / \text{Jahr}) = 3345\text{ Jahre}$ ). (MARCINEK und ROSENKRANZ 1996; BAUMANN et al 1974; KORZUN 1977)

Die im Wasserkreislauf zirkulierenden Mengen lassen sich im Wasserhaushalt bilanzieren. Zu unterscheiden ist dabei zwischen dem Inhalt der Wasserspeicher und dem Umsatz zwischen ihnen. Die Wassermengen in den einzelnen Speichern sind sehr unterschiedlich (s. Abb. 3). So ist die Wassermenge in den Ozeanen um fünf Größenordnungen größer als in der Atmosphäre. Die Umsätze zwischen den Speichern lassen sich durch die Aufstellung einer Wasserbilanzgleichung beschreiben. Verdunstung und Niederschlag stehen global im Gleichgewicht, sind aber regional sehr unterschiedlich. Dementsprechend bestehen auch Wasserbilanzgleichungen für lokale Gebiete häufig aus vielen weiteren Parametern. Die Berechnungsgrundlage einer globalen Wasserbilanz ist in der Abbildung 4 dargestellt.

Eine quantitative Beschreibung der Wasserbilanz ist aufgrund der teilweise enormen Speichergrößen und der damit verbundenen Schwierigkeiten bezüglich exakter Messungen mit Unsicherheiten behaftet. Dementsprechend finden sich in der Literatur teilweise deutlich voneinander abweichende Zahlenangaben.

Das im Prinzip einfache Wechselspiel von Verdunstung und Kondensation wird dadurch kompliziert, dass es sich auf einer Kugel abspielt, die auch noch rotiert, und dass über diese Kugel in unregelmäßiger Verbreitung Land verteilt ist, wodurch sich ein zweiter Kreislaufzweig mit dem Abfluss über Land bildet.



Im globalen Rahmen kann man von der Erhaltung der Wassermassen ausgehen.

Daher lautet die einer allgemeinen Wasserhaushalts-Gleichung zugrunde liegende Beziehung:

$$(1) N_E = V_E \quad N = \text{Niederschlag, } V = \text{Verdunstung, } E = \text{Erde}$$

Der Gesamtniederschlag auf der Erde entspricht also der Gesamtverdunstung auf der Erde.

Bei Betrachtung der Wasserbilanz für Land- und Meeresflächen muss der Abfluss berücksichtigt werden. Dementsprechend gilt:

$$(2) N_L - V_L = A_L \quad A = \text{Abfluss, } L = \text{Land}$$

Der Niederschlag über dem Festland ist im globalen Mittel größer als die Verdunstung über Land. Der Überschuss fließt als Abfluss zurück ins Meer. Entsprechend muss über den Ozeanen die Verdunstung größer sein als der Niederschlag. Demnach gilt:

$$(3) A_L = V_M - N_M \quad M = \text{Meer}$$

Daraus ergibt sich die Gesamtgleichung

$$(4) N_L - V_L = A_L = V_M - N_M$$

Liegen Messwerte für einen der Speicher vor, lassen sich die anderen Volumina daraus berechnen.

Abbildung 4: Die globale Wasserbilanz-Gleichung (nach HAECKEL 1999). Diese Gleichung gilt als Grundlage zur Berechnung der Umsätze des globalen Wasserkreislaufs. Da Niederschläge und Verdunstung nur global über längere Zeiträume, nicht aber lokal oder über kürzere Zeiträume im Gleichgewicht stehen, müssen für die Bilanzierung lokaler Wasserumsätze komplexere Gleichungen herangezogen werden.

Auf globaler Ebene wird zwischen dem **kleinen Wasserkreislauf**, bei dem der Niederschlag gleich wieder über dem Ozean fällt, und dem **großen Wasserkreislauf** unterschieden, bei dem der Niederschlag über Land fällt und zum Ozean abfließt. Im kleinen Wasserkreislauf wird allerdings viel mehr Wasser umgesetzt als im großen (s. Abb. 2).

## 2.2 Der Wasserkreislauf - vertiefende Darstellung

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die chemischen und die physikalischen Eigenschaften von Wasser und die daraus resultierenden Auswirkungen auf den Wasserkreislauf und die Sphären der Erde beschrieben. Weiterhin werden die verschiedenen Stationen des Wasserkreislaufs umfassender dargestellt.

### 2.2.1 Eigenschaften des Wassers

**Wasser**, chemisch  $H_2O$ , ist ein Oxid des Wasserstoffs. Flüssiges Wasser ist farblos, geruch- und geschmacklos. Bei Abkühlung erstarrt flüssiges Wasser zu Eis. Der Schmelzpunkt des Eises - 273,15 Kelvin - ist der Nullpunkt der Celsius-Temperaturskala.

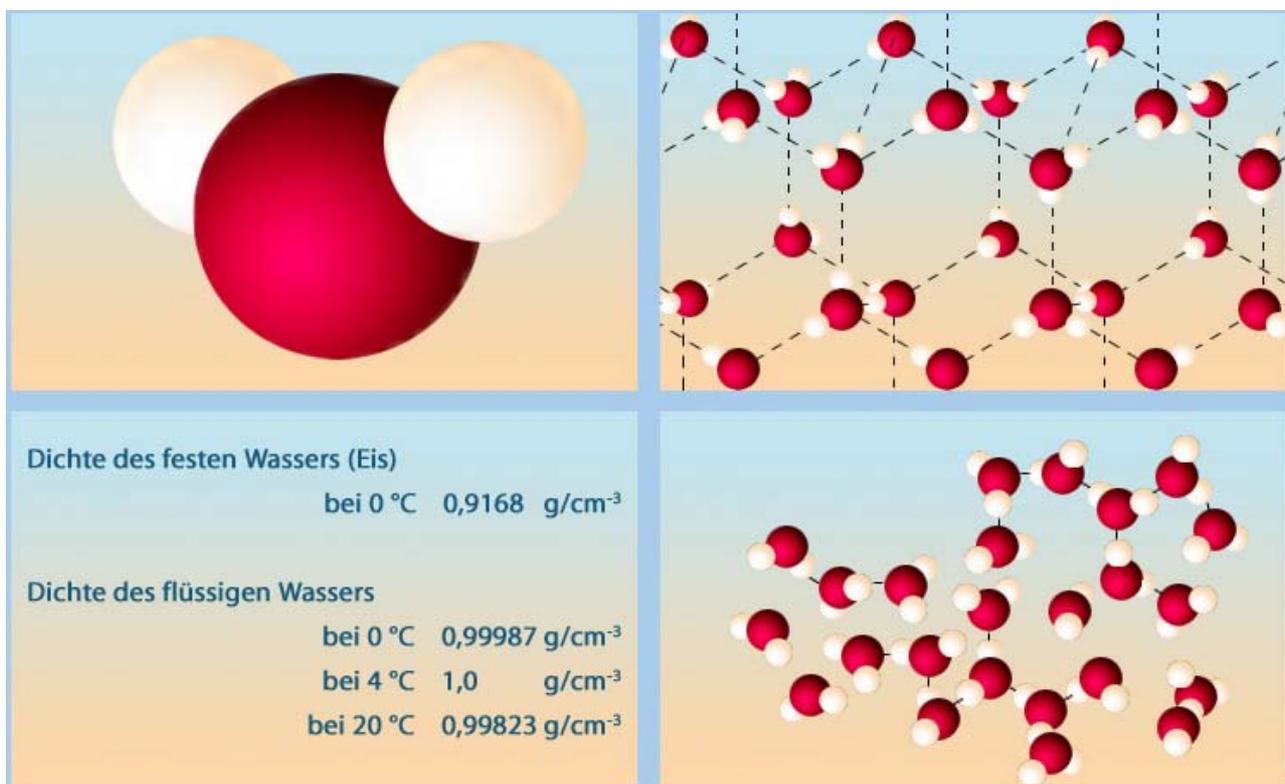
Das **Wassermolekül** besteht aus einem Sauerstoff- und zwei Wasserstoffatomen und ist gewinkelt gebaut (Bindungswinkel H-O-H  $104,5^\circ$ , Atomabstand 96 pm). Die Bindungspolarität (Elektronegativitätsdifferenz zwischen den Elementen  $O\delta^-$  -  $H\delta^+$ ) ermöglicht die Ausbildung stabiler Wasserstoffbrückenbindungen zwischen  $H_2O$ -Molekülen. Diese zwischenmolekularen Wechselwirkungen bestimmen die Struktur des festen und flüssigen Wassers.

Das Grund- und Oberflächenwasser enthalten stets gelöste Salze, deren Zusammensetzung und Konzentration von der Herkunft des Wassers abhängt und welche die Härte des Wassers verursachen. Der Salzgehalt des **Meerwassers** liegt durchschnittlich bei 3,5 %, davon entfallen 2,7 % auf Natriumchlorid.



Wasser mit einem Eindampfdruckstand von weniger als 0,1 % wird als **Süßwasser** bezeichnet. Auch zahlreiche Minerale enthalten Wasser als Kristallwasser.

Im Gegensatz zu anderen Stoffen, hat Wasser seine größte Dichte nicht im festen Zustand sondern im flüssigen. Diese Erscheinung bezeichnet man auch als die Dichteanomalie des Wassers (s. Abb. 5). Bei Normaldruck kristallisiert Wasser in einem Gitter. Am Schmelzpunkt des Eises bricht diese relativ sperrige Struktur weitgehend zusammen und die Packungsdichte der H<sub>2</sub>O-Moleküle erhöht sich. Damit ist ein Dichteanstieg beim Übergang in die flüssige Phase verbunden. Auch oberhalb des Schmelzpunktes sind noch Bruchstücke des Eisgitters erhalten, die allmählich durch die Zunahme der Wärmebewegung der H<sub>2</sub>O-Moleküle abgebaut werden. So entsteht ein Dichtemaximum bei 4 °C. Aber auch im flüssigen Wasser ist eine gewisse Struktur nachweisbar. H<sub>2</sub>O-Moleküle treten durch Wasserstoffbrückenbindungen zu größeren Aggregaten zusammen (s. Abb. 5).



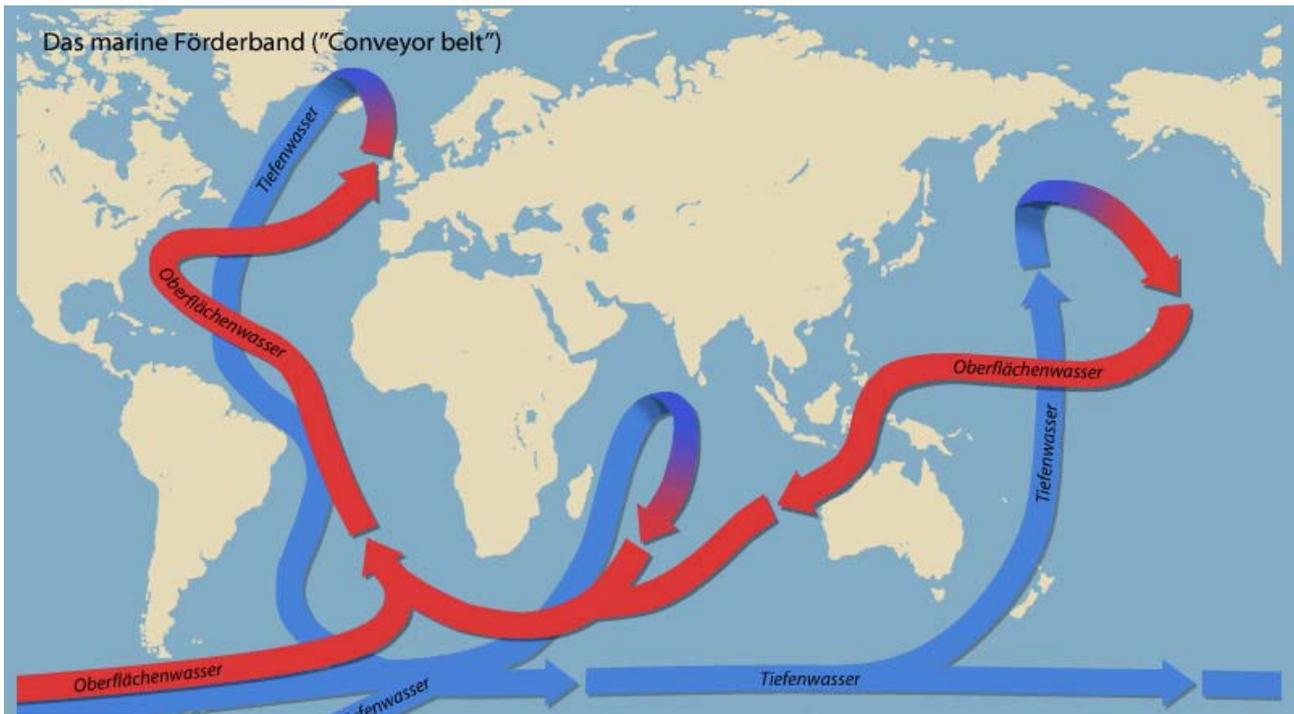
**Abbildung 5: Räumliche Strukturen von Wasser in Abhängigkeit von der Dichte (nach KARCHER 2003).** Oben links ist die räumliche Struktur eines Wassermoleküls dargestellt (Kalottenmodell). Die Darstellung oben rechts zeigt typische hexagonale Gitterstrukturen gefrorenen Wassers. Unten rechts sind Molekülaggregate flüssigen Wassers abgebildet. Beim Übergang von der festen Phase in die flüssige werden die Gitterstrukturen aufgegeben; die Dichte des Wassers erhöht sich aufgrund der größeren Packungsdichte der Moleküle.

Die Dichteanomalie des Wassers hat insbesondere für das biologische Geschehen auf der Erde wesentliche Konsequenzen. Beim Abkühlen natürlicher Gewässer sinkt das kältere und damit dichtere Wasser bis zu einer Temperatur von 4 °C nach unten. Bei weiterer Abkühlung verbleibt das kältere Wasser an der Oberfläche und erstarrt zu Eis, welches infolge der Volumenzunahme bzw. Dichteabnahme auf dem flüssigen Wasser schwimmt. Dieser Umstand und die wärmedämmende Wirkung der Eisschicht verhindern ein Gefrieren tieferer Gewässer bis zum Grund auch bei strengem Frost, was für das Leben in Flüssen und Seen von ausschlaggebender Bedeutung ist. Infolge der Volumenzunahme beim Erstarren des Wassers



können gefrierende Wasserleitungen platzen oder Gesteine mit Wassereinschlüssen gesprengt werden (s. Modul „Gesteinskreislauf: Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte“).

Auch in den Ozeanen hat die temperaturbedingte stabile Schichtung der Wassermassen große Wirkung. Oberflächenströmungen transportieren unablässig enorme Mengen warmen Oberflächenwassers vom Äquator polwärts. Dabei kühlt das Wasser ab und sinkt aufgrund der höheren Dichte schließlich in die Tiefe. Die Oberflächenströmungen sorgen ganzjährig für einen globalen Temperatenausgleich (s. Modul „Klimasystem und Klimageschichte“). Dieses marine Förderband zeigt die Abbildung 6.



**Abbildung 6:** Das marine Förderband durchzieht alle Ozeane. Warmes Oberflächenwasser wird vom Äquator polwärts transportiert. Dabei gibt es seine Wärmeenergie ab, sinkt schließlich aufgrund der höheren Dichte kälteren Wassers wieder ab und strömt am Meeresgrund zurück. (nach NOREIKS, Max-Planck-Institut)

Aufgrund der starken Vernetzung der H<sub>2</sub>O-Moleküle im festen und flüssigen Wasser ist für das Schmelzen von Eis und das Verdampfen von Wasser relativ viel Energie erforderlich. Die hohe Schmelz- und Verdampfungsenergie haben ihrerseits wesentlichen Einfluss auf die Klimaverhältnisse der Erde. Auch die hohe spezifische Wärme des Wassers trägt zum klimatischen Ausgleich bei.

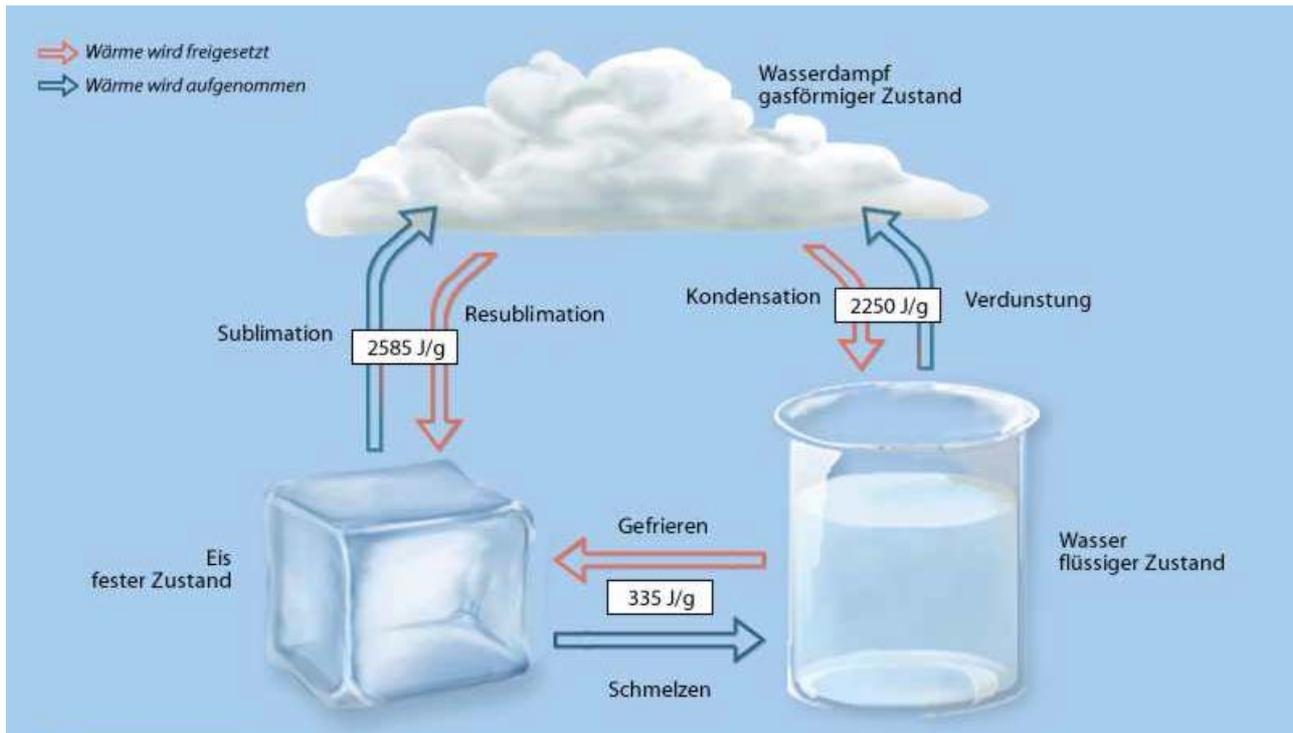
Wasser kommt auf der Erde in allen drei Aggregatzuständen vor:

- in festem Zustand als Festlandeis (Antarktis), Gletschereis (z. B. Alpen) und als Meereis (z. B. Arktis);
- in flüssigem Zustand als Oberflächenwasser, zu dem man u. a. das Wasser der Meere, Flüsse, Seen, Talsperren sowie das Grundwasser zählt;
- in gasförmigem Zustand als Wasserdampf.

Der Wechsel der Aggregatzustände des Wassers ist mit fortgesetzten Energieumsätzen verbunden. Für die Verdunstung wird Energie benötigt, die bei der Kondensation von Wasserdampf wieder freigesetzt wird (s. Abb. 7). Ebenso wird beim Tauen Energie verbraucht, die beim Gefrieren wieder freigesetzt wird. Die



gesamte Wassermenge der Atmosphäre gelangt über die Gasphase also durch Verdunstung dorthin. Dazu werden pro Jahr  $1,21$  bis  $1,36 \times 10^{24}$  J benötigt (nach MARCINEK und ROSENKRANZ 1996; BAUMANN et al 1974; KORZUN 1977). Das sind 22 % bzw. 25 % der Jahreseinnahme der Erde an Sonnenenergie von  $5,51 \times 10^{24}$  Jahre. Anders ausgedrückt, werden von den  $240 \text{ Watt/m}^2$ , welche die Erdoberfläche als mittlere solare Einstrahlung erreichen, etwa  $80 \text{ Watt/m}^2$  „verbraucht“, um das pro Jahr in die Atmosphäre gelangende Wasser zu verdunsten. Diese Energiemenge liegt um drei bis vier Größenordnungen über der gesamten für den menschlichen Bedarf erzeugten Energie.



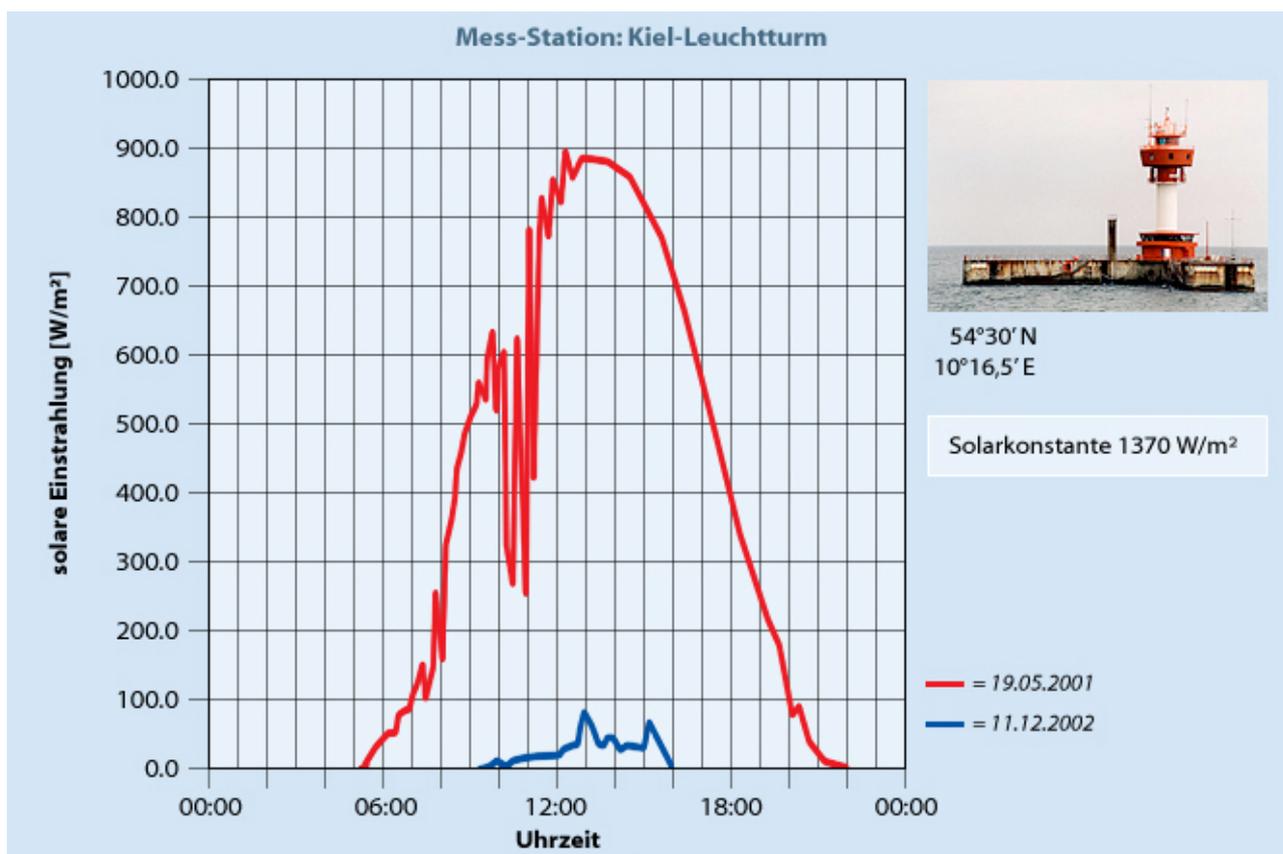
**Abbildung 7: Wechsel der Aggregatzustände von Wasser und die damit verbundenen Energieumsätze (Energieumsätze nach KARCHER 2003).**

Die Besonderheit des Systems Erde liegt darin, dass die energieverbrauchenden bzw. –freisetzenden Vorgänge vielfach räumlich weit voneinander entfernt stattfinden. So kommt es zu umfangreichen Energietransporten. Im verdunsteten Wasser ist die Verdunstungsenergie gespeichert, die im Wasserdampf durch Wind aus den tropischen in höhere Breiten transportiert und dort bei Kondensation wieder freigesetzt wird (s. Modul „Klimasystem und Klimageschichte“). Die Verdunstungsenergie wird benötigt, um die vergrößerten Molekülabstände im Wasserdampf aufrecht zu erhalten. Da man sie mit Messgeräten nicht nachweisen kann, wird sie als latente Wärme bezeichnet. Beim Kondensieren bzw. Gefrieren rücken die Moleküle wieder dichter zusammen. Die dabei wieder frei werdende Energie ist mit einem Thermometer messbar, weshalb sie als fühlbare Wärme bezeichnet wird.

Ein anderer Teil der eingesetzten Strahlungsenergie, etwa ein Zehntel, wird mit der Hebung aus dem Niveau des Meeresspiegels in größere Höhen in potentielle Energie umgewandelt. Aus der Umsetzung dieser Energie in kinetische Energie des abfließenden Wassers und Eises (Gletscher) resultiert ganz entscheidend die Gestaltung der festen Erdoberfläche. Indem Flüsse und Gletscher Gestein erodieren, transportieren und sedimentieren, sind Wasser- und Gesteinskreislauf miteinander verbunden (s. Abb. 16, Abb. 17, Baustein 4 und Modul „Gesteinskreislauf: Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte“).

Physikalisch betrachtet wird Energie beim Wechsel der Aggregatzustände des Wassers weder verbraucht noch gewonnen, sondern nur in eine jeweils andere Form umgewandelt. Die Vorgänge von Verdunsten und Kondensieren, von Tauen und Gefrieren sowie des Sublimierens sind reversibel.

Die Sonne treibt den Wasserkreislauf nicht gleichmäßig an. Die durchschnittliche Menge an Strahlungsenergie, welche auf die Erde gelangt, wird durch die **Solarkonstante** bezeichnet. Sie gibt an, wie viel Energie die Sonne bei mittlerem Sonnenabstand und senkrechtem Sonneneinfall pro Sekunde auf einen Quadratmeter Rezeptorfläche auf der Erde emittiert. Auf Meereshöhe beträgt sie  $1370 \text{ W/m}^2$ . Nur ein Teil dieser Energie gelangt bis auf die Erdoberfläche. Eine Ursache für Verluste ist beispielsweise die Bewölkung. Auch die in der Atmosphäre enthaltenen Gase verändern die Menge der auf die Erde gelangenden Strahlungsenergie durch selektive Absorption und Reflexion („Treibhauseffekt“ s. Module „Klimasystem und Klimageschichte“ und „Physik und Chemie der Atmosphäre“). Ein weiterer Faktor sind die tages- und jahreszeitlichen Schwankungen. Im Sommer gelangt ein größerer Anteil der Strahlungsenergie auf die Erdoberfläche als im Winter, und ebenso mittags ein größerer als abends oder morgens (s. Abb. 8). Wesentlich für diese Veränderung ist die Länge des Strahlungsweges durch die Atmosphäre, die ihrerseits von Winkel und Abstand der Erde zur Sonne abhängt. Dies wird durch einen Vergleich der Solarkonstante mit gemessenen Werten deutlich. Daher verändert sich auch der Wasserkreislauf global und vor allem regional deutlich in Abhängigkeit von den Jahreszeiten.



**Abbildung 8:** Die tages- und jahreszeitlichen Schwankungen der solaren Einstrahlung. Sie haben einen großen Einfluss auf den Wasserkreislauf, da die Verdunstung durch die Sonnenenergie bestimmt wird. (Datenquelle: LEIBNIZ-INSTITUT FÜR MEERESKUNDE, Kiel)

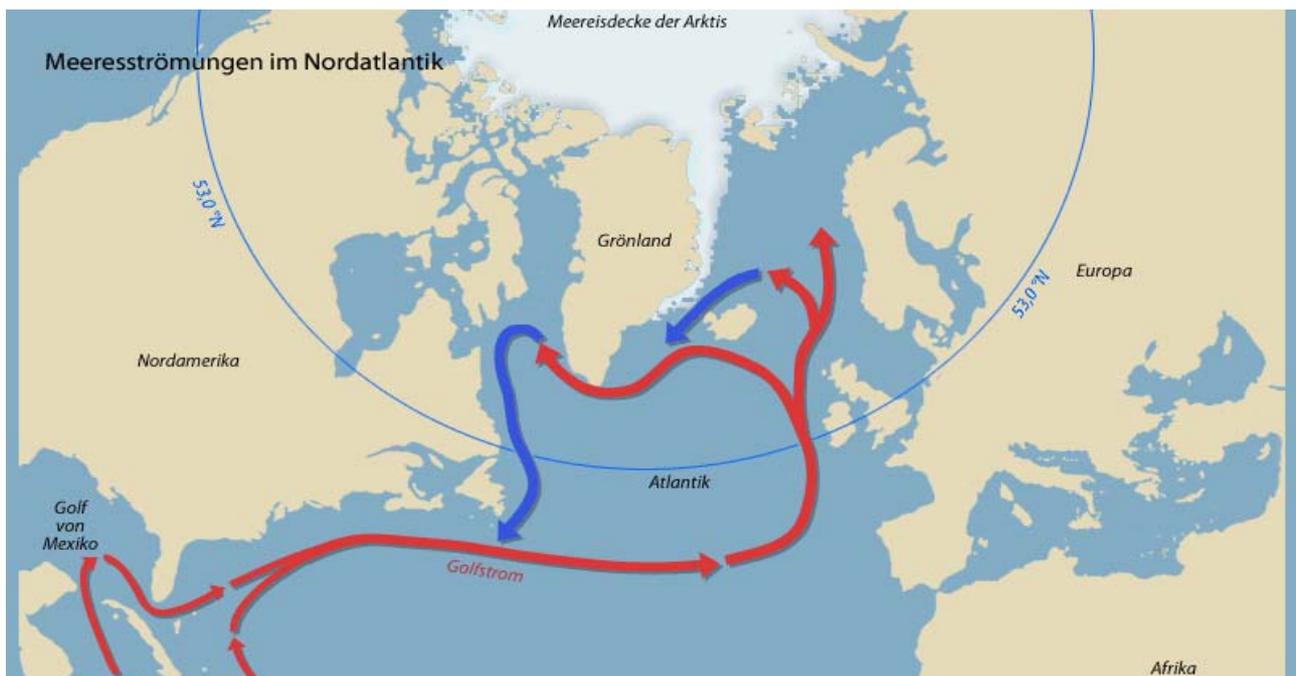
Im Folgenden werden die verschiedenen Elemente des Wasserkreislaufs näher beschrieben.

## 2.2.2 Ozean

Mehr als zwei Drittel der Erdoberfläche sind von Wasser bedeckt. Das Volumen der Weltmeere wird auf 1338 Millionen km<sup>3</sup> geschätzt und entspricht 96,53 % der gesamten Wasserreserven der Erde (s. Abb. 3).

Sowohl für den Wasserkreislauf als auch für das Klima haben die Ozeane eine zentrale Bedeutung: Wasser besitzt eine hohe spezifische Wärme<sup>1</sup>. Dadurch benötigen große Wassermassen längere Zeit um Wärme aufzunehmen und zu speichern als Landflächen. Die gespeicherte Wärmemenge ist allerdings verhältnismäßig groß und wird relativ lange gespeichert, d. h. nur langsam an die Umgebung abgegeben. So werden die Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht, sowie zwischen Sommer und Winter durch die Wassermassen der Ozeane abgemildert. Dies ist eine der Ursachen für das insgesamt mildere ozeanische Klima im Unterschied zu kontinentalem Klima.

Großen Einfluss auf das Klima nehmen die Ozeane darüber hinaus über die globalen Meeresströmungen, welche die gesamten Weltmeere wie ein „Förderband“ durchziehen (s. Abb. 6). So wirkt beispielsweise der Golfstrom als ein Teil dieses Förderbandes wie eine gewaltige Heizung für das nordwestliche Europa, indem er warmes Oberflächenwasser transportiert, das nach Abgabe seiner Wärme gegenläufig zurückfließt (s. Abb. 9 und Modul „Klimasystem und Klimageschichte“).



**Abbildung 9: Golfstrom (nach NOREIKS, Max-Planck-Institut). Der nordatlantische Golfstrom als Teil des marinen Förderbandes transportiert warmes Oberflächenwasser nordwärts und trägt dadurch wesentlich zu dem relativ milden norwesteuropäischen Klima bei. Im Norden sinkt das inzwischen abgekühlte Wasser des Golfstromes in die Tiefe.**

Die Betrachtung des Wasserkreislaufes beginnt üblicherweise bei der Verdunstung über dem Ozean. Für eine Wasseroberfläche gilt: Je höher die Wassertemperatur, desto höher ist die Verdunstung aus dem Wasserkörper. Die Luft über dem Wasser kann jedoch nur eine gewisse Höchstmenge an Wasserdampf

<sup>1</sup> spezifische Wärme gibt an, wie viel Energie notwendig ist, ein Stoff zu erwärmen.



aufnehmen, die um so größer ist, je höher die Lufttemperatur ist. Sie wird als **Sättigungsfeuchte** bezeichnet (s. Abb. 10).

Speziell die ausgedehnten tropischen und subtropischen Ozeane mit ihren hohen Wassertemperaturen an der Oberfläche sind der entscheidende globale Lieferant des atmosphärischen Wasserdampfs; denn in den oberen Wasserschichten wird ein großer Teil der eingestrahnten Sonnenenergie gespeichert. Da die Lufttemperaturen hoch sind und Wasser nahezu unbegrenzt verfügbar ist, werden in den tropischen Ozeanen besonders hohe Werte der Verdunstung erreicht. Zwischen 30° Nord und 30° Süd ist die Temperatur der Meeresoberfläche besonders hoch (s. Abb. 11). Dort beträgt die Verdunstung etwa 68 % der gesamten globalen Verdunstung. Ändert sich die Differenz zwischen Luft- und Wassertemperatur nur um 0,1 °C dann ergibt sich bei sonst gleich bleibenden Bedingungen eine Änderung der Verdunstung um 2,4 % (FLOHN 1973). Insofern wirkt eine globale Temperaturerhöhung direkt auf die Höhe der Verdunstung, was wiederum dramatische Auswirkungen auf das Wettergeschehen haben kann (s. Modul „Klimasystem und Klimageschichte“).

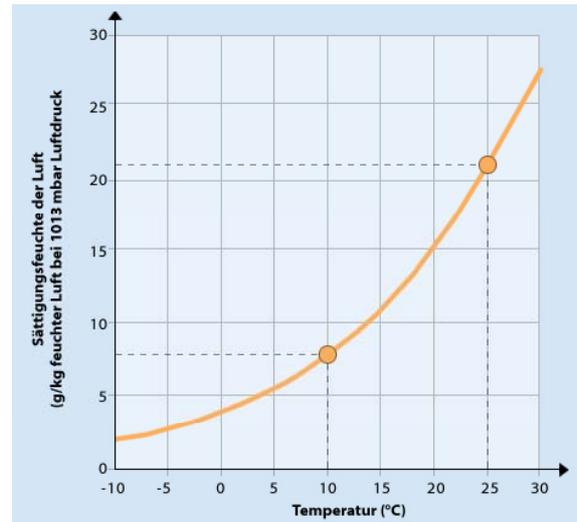


Abbildung 10: Sättigungsfeuchte der Luft in Abhängigkeit von der Temperatur (nach HAECKEL 1999). Luft kann aus physikalischen Gründen stets nur eine bestimmte Höchstmenge an Wasserdampf enthalten. Diese wird als Sättigungsfeuchte bezeichnet und hängt stark mit der Lufttemperatur zusammen. Mit steigender Temperatur nimmt die Aufnahmekapazität schnell zu: 10 °C warme Luft kann maximal 7,6 g Wasserdampf pro kg aufnehmen, die Sättigungsfeuchte bei 25 °C ist fast dreimal so groß (21 g / kg).

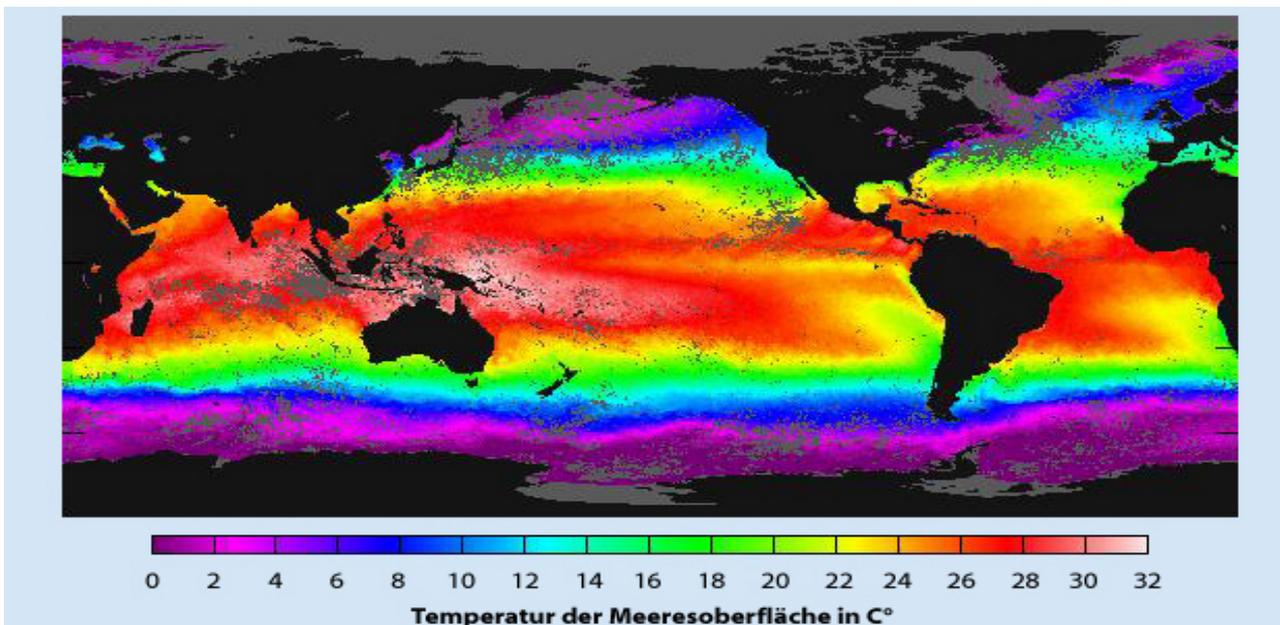


Abbildung 11: Oberflächentemperaturen der Meere in Januar 2001. Die Oberflächentemperaturen der Ozeane (SST) werden mit Satelliten ermittelt. Sie können bei wolkenlosem Himmel aus der Wärmestrahlung der Ozeane flächendeckend berechnet werden. Für globale Darstellungen werden die Daten eines Wochen- oder Monatszeitraums genutzt. Die Verteilung der Wassertemperaturen gibt einen Hinweis darauf, wo die höchsten Verdunstungswerte zu erwarten sind: Je höher die Temperatur, desto höher die Verdunstungsmengen. (Bild: NASA 2005)



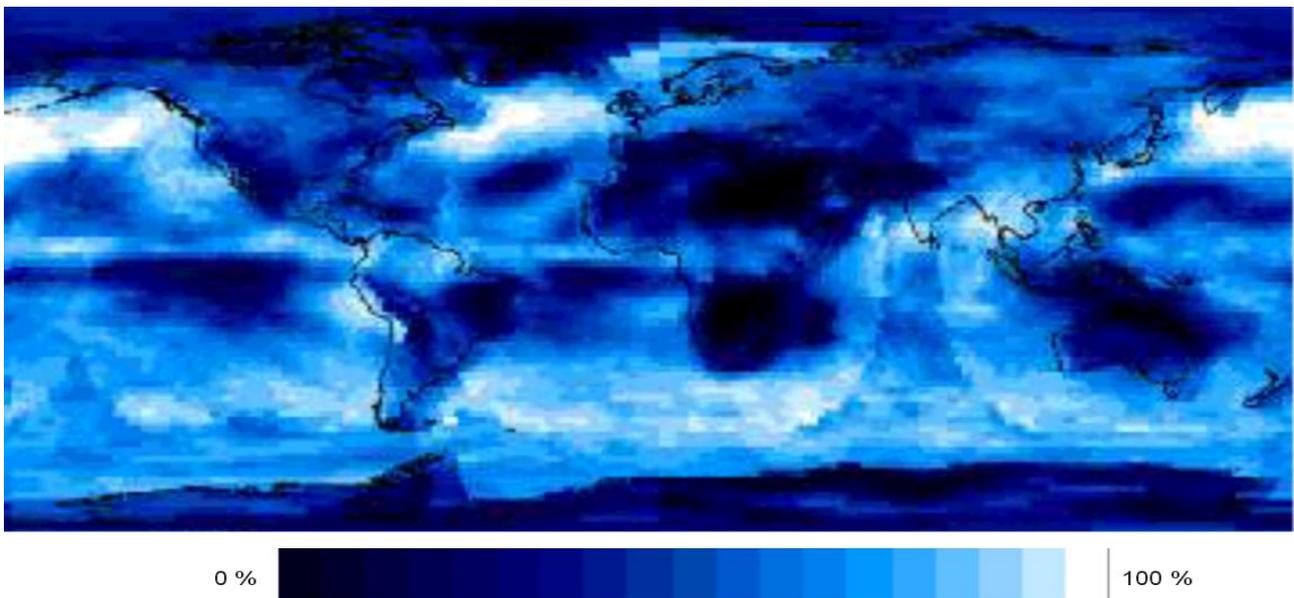
Die verdunsteten Mengen lassen sich durch Messungen an Beispielflächen hochrechnen. Nimmt man an, dass pro Jahr eine 1 m dicke Wasserschicht verdunstet (unter der Voraussetzung gleichmäßiger Verteilung über einem eingeebneten Erdkörper), lässt sich ausrechnen wie lange es dauern würde, bis das gesamte Ozeanvolumen verdunstet wäre. Demnach beträgt die Verweildauer eines Wassermoleküls im Ozean im Durchschnitt etwa 3300 Jahre, in der oberen, ca. 200 m mächtigen Warmwasserschicht, immerhin noch etwa 200 Jahre (FLOHN 1973).

### 2.2.3 Wolken und Niederschlag

Nur etwa 0,001 % des gesamten Wassers auf der Erde sind als Wasserdampf oder Kondensat in der Atmosphäre gespeichert. Der in der Luft enthaltene Wasserdampf ist ein mit dem Auge nicht wahrnehmbares farbloses Gas. Was als sichtbare Wolken erscheint, sind kondensierte Wassertröpfchen.

Der gesamte Wasserdampfgehalt der Atmosphäre entspricht in kondensierter Form einer über die Erdoberfläche verteilten Schichtdicke von ca. 25 mm (s. Abb. 3). Bei einem langjährigen mittleren Jahresniederschlag von 1020 mm muss also ca. 40 mal pro Jahr eine vollständige Erneuerung des atmosphärischen Wasserdampfes stattfinden. Das bedeutet, dass jedes Wasserdampfmolekül im Durchschnitt nur 9 Tage in der Atmosphäre verweilt (FLOHN 1973). Der Umsatz des relativ kleinen Wasserspeichers Atmosphäre ist also enorm hoch, was auch den häufig sehr schnellen Wechsel des Wettergeschehens erklärt.

Die Verteilung des Wasserdampfes in der Atmosphäre ist sehr ungleichmäßig (s. Abb. 12). Sie wird stark von der Zirkulation der Atmosphäre bestimmt. Im Passatkreislauf bewegt sich die oberflächennahe, wasserdampfreiche Luft von den Wendekreisen zum Äquator, wo sie in der innertropischen Konvergenzzone (ITC) konvergiert und aufsteigt, mit Wolkenbildung und Niederschlag in der Folge.



**Abbildung 12:** Aufnahme des Wasserdampfgehalts der Atmosphäre in Juni 1991. Die Messung erfolgt heute über Satelliten. Diese messen diejenige Strahlung des elektromagnetischen Spektrums, die von Wasserdampf reflektiert wird. Der Wasserdampfgehalt wird für die gesamte Luftsäule erfasst und es kann ein flächendeckendes Bild der globalen Wasserdampfverteilung gewonnen werden: je heller der Farbton ist, desto höher ist der Wasserdampfgehalt. (Bild: NASA 2005)



Aufgrund der Temperaturbedingungen spielt sich die gesamte Wolkenbildung in der untersten Schicht der Atmosphäre, der Troposphäre ab (s. Modul „Chemie und Physik der Atmosphäre“). In dieser Schicht kann die Atmosphäre aus bis zu 4 Vol % Wasserdampf bestehen. Die genaue Speicherkapazität ist allerdings abhängig vom **Luftdruck** (der einer Luftmasse aufliegende Druck durch darüber liegende Luftmassen) und vor allem von der Temperatur. Je wärmer die Luft ist, desto mehr Wasserdampf vermag sie aufzunehmen (s. Abb 10). Wird die maximale Aufnahmekapazität der Luft überschritten, wenn die Sättigungsfeuchte z. B. infolge fallender Temperatur sinkt, beginnt Wasserdampf zu flüssigem Wasser zu kondensieren. Es bildet sich Tau oder bei Temperaturen unter 0 °C Reif. Findet der Tau keine feste Oberfläche, an der er kondensieren kann, bilden sich Wolken. Dies ist z. B. der Fall, wenn Luftmassen in der Atmosphäre aufsteigen und dabei abgekühlt werden. Wenn ab einer bestimmten Temperatur die Sättigungsfeuchte der Luft überschritten wird, bilden die auskondensierenden Wassertröpfchen Wolken. Eine **Wolke** ist also eine Ansammlung von winzigen Wassertröpfchen, zum Teil enthalten Wolken auch Eiskristalle. Die Wolkenbildung wird durch kleinste Feststoffteilchen in der Luft (Aerosole) erleichtert, an denen das Wasser kondensiert. Auch die Auflösung von Wolken geschieht auf diese Weise: Erhöht sich die Temperatur der Luft (z. B. durch Absinken von Luftmassen oder Sonneneinstrahlung), steigt das Wasserdampfaufnahmevermögen der Luft und die Tröpfchen verdunsten zu Wasserdampf. Wolken haben eine ausgeprägte Dynamik: Während sie sich auf der einen Seite neu bilden, können sie sich gleichzeitig auf der anderen Seite auflösen. Die Wolkenentstehung wird stark von den sich ständig verändernden Wetterverhältnissen in der Troposphäre beeinflusst. Dementsprechend lassen sich Wolken in den unterschiedlichsten Formen und Höhen beobachten. Verschiedene Wolkentypen sind in Wolkenatlanten und bei HÄCKEL 1999 beschrieben.

Mengen und Verteilung der Bewölkung ändern sich ständig, da sie dem dynamischen Verlauf und Wechsel der Hoch- und Tiefdruckgebiete unterliegen. Darüber hinaus entstehen aber auch bestimmte typische globale wie lokale Wolkenzonen durch besondere geografische Merkmale der Erde. So kann man z. B. an Küsten häufig das Phänomen beobachten, dass über dem Wasser blauer Himmel sichtbar ist, während gleichzeitig über Land reichlich Wolken ziehen (s. Abb. 13). Landflächen bremsen Luftmassen bei aufwindigen Winden aufgrund erhöhter Reibung ab, wodurch diese aufsteigen und sich abkühlen. Die Sättigungsfeuchte sinkt, stärkere Wolkenbildung ist die Folge. Stark unterschiedliche Temperaturen von Land und Wasser können diesen Effekt zusätzlich unterstützen. Abwindige Winde wirken gegenteilig und tragen zur Auflösung der Bewölkung bei. Ähnliche Effekte haben auch Gebirge, welche strömende Luftmassen ebenfalls häufig abbremsen.

Merkmale der globalen Wolkenbildung und –verteilung lassen sich gut aus Satellitenbildern erkennen (s. Abb. 1 und 13):

- zonale Anordnung aus wolkenfreien Subtropen und wolkenreichen Innertropen;
- Wolkenarmut der kontinentalen Trockengebiete und der Küstenwüsten an den Westküsten Südamerikas und Südafrikas infolge kalter Meeresströmungen und geringer Verdunstung;
- Unterschied zwischen tropischer überwiegend konvektiver Bewölkung und außertropischer überwiegend advektiver Bewölkung;
- Unterschiede in der Drehrichtung der Tiefdruckgebiete von Nord- und Südhalbkugel (aufgrund der Corioliskraft).

Nähere Angaben zu den meteorologischen und klimatischen Hintergründen der globalen Wolkenverteilung sind im Modul „Klimasystem und Klimageschichte“ oder z. B. bei HÄCKEL 1999 zu finden.

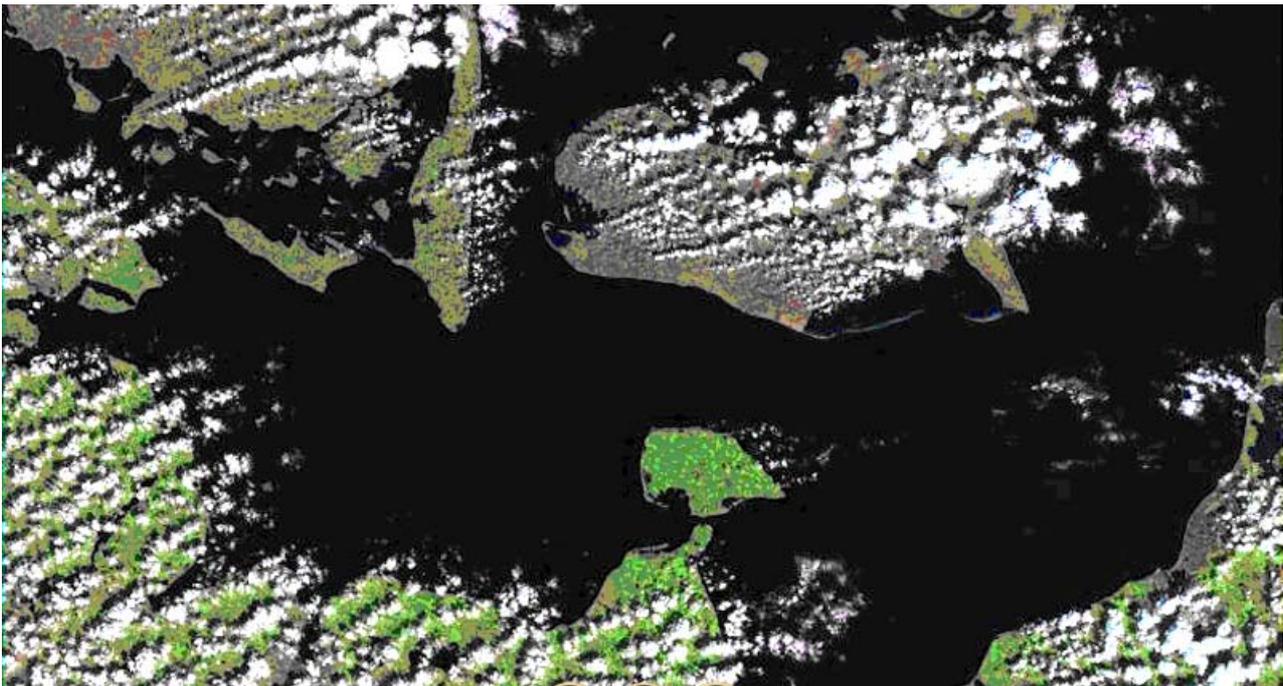


Abbildung 13: Verteilung der Wolken über See und Landflächen. LANDSAT-Aufnahme in der westlichen Ostsee vom 09. April, 09.40 Uhr Ortszeit. Die Wolkenbildung erfolgt nur über Land. Die Windrichtung ergibt sich aus der Längsorientierung der Wolkenbänder. Wolken bilden sich bei auflandigem Wind erst, nachdem die Luft eine gewisse Strecke über Land geweht worden ist. Sie verschwinden bei ablandigem Wind in einiger Entfernung von der Küste. Auch in der Nachbarschaft größerer Binnenseen zeigen sich vergleichbare Phänomene. (Bild: USGS 2001)

Niederschläge sind die nächste Etappe des Wasserkreislaufes. Unter dem Begriff **Niederschlag** wird jede Form von flüssigem oder festem aus Wolken herabfallendem Wasser verstanden. Dabei kann es sich um Nieselregen, Regen, Schnee, Graupel oder Hagel handeln. Wolkentröpfchen haben Radien von lediglich 2 - 10  $\mu\text{m}$ , große Regentropfen besitzen Radien von bis zu 2 mm. So werden bis zu  $10^6$  Wolkentröpfchen benötigt um einen Regentropfen zu bilden (HÄCKEL 1999). Zur Entstehung von Regentropfen gibt es zwei Theorien.

- Nach LANGMUIR geschieht die Bildung der Regentropfen durch spontanes Zusammenfließen von Wolkentröpfchen. Ähnlich wie Fettaggen in einer Suppe haben auch Wassertröpfchen aufgrund ihrer Oberflächenspannung das Bestreben, eine möglichst kleine Oberfläche zu bilden und sich demzufolge mit anderen zusammenzulagern. Wächst der entstehende Tropfen, kann er irgendwann nicht mehr von Aufwinden getragen werden und fällt aufgrund der Schwerkraft zu Boden (HÄCKEL 1999).
- Alfred WEGENER vermutete 1911, dass Eis ein wesentlicher Faktor zur Niederschlagsbildung ist. Kleinste Eiskristalle in den oberen Wolkenschichten ziehen unterkühlte Wolkentröpfchen (flüssiges Wasser unter  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) aufgrund ihres geringeren Dampfdruckes aktiv an, da die Moleküle das Bestreben haben zum Ort geringeren Druckes zu wandern. Die Eiskristalle wachsen dadurch rasch und fallen durch ihr Gewicht zu Boden. Unterschreiten sie die Temperaturgrenze von  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , entstehen Regentropfen. Die Anziehungskraft der Eiskristalle bewirkt ein deutlich schnelleres Wachstum als es aufgrund einer nur zufälligen Zusammenlagerung möglich wäre (HÄCKEL 1999).

Niederschläge sind keine konstante Größe. Regional, aber auch jahreszeitlich oder im Verlauf mehrerer Jahre können diese sehr unterschiedlich verteilt sein. Die häufigsten Niederschläge fallen in den Innertropen. Eine Übersicht über die Verteilung der tropischen Niederschläge gibt die Abbildung 14.

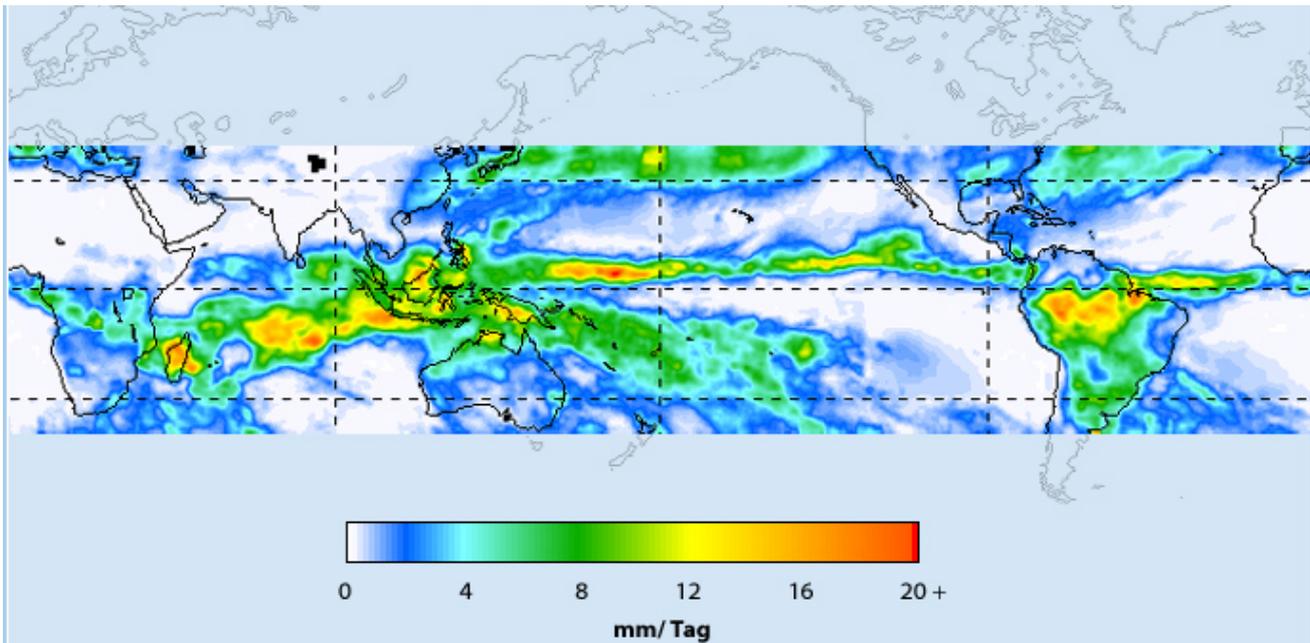


Abbildung 14: Summe der Niederschläge in den Tropen im Januar 2001. Es sind die durchschnittlichen Niederschlagsmengen pro Tag angegeben. Die Daten werden durch den Satelliten der Tropic Rainfall Measurement Mission (TRMM) erfasst. Die Niederschlagsmengen wurden aus täglichen Satellitenmessungen und erdgebundenen Messdaten errechnet. Deutlich heben sich die niederschlagsreichen Innertropen von den niederschlagsarmen Gebieten um die Wendekreise ab. (Bild: NASA 2005, verändert)

Die klassische Bestimmung von Niederschlag erfolgt durch seine punktuelle Erfassung in standardisierten Auffanggefäßen. Dies ist mit Messfehlern behaftet und nur für Land einigermaßen befriedigend. Eine flächenhafte Erfassung des Niederschlags ist erst in den letzten Jahren ansatzweise mit Radar und Satellitenmessungen möglich geworden. Dies ist insbesondere für die Erfassung des Niederschlags auf See wichtig, die bisher räumlich und zeitlich nur sehr eingeschränkt möglich war.

#### 2.2.4 Der Wasserkreislauf auf dem Land

Auf einer Erde ohne Landflächen gäbe es nur einen einfachen Wasserkreislauf aus Verdunstung, Kondensation und Niederschlag. Die großen Landflächen der Kontinente erweitern diesen Wasserkreislauf jedoch. Zwischen dem Niederschlag über Land und dem Einmünden der Flüsse ins Meer liegt der komplexe, dem Menschen am ehesten vertraute Teil des Wasserkreislaufs. Er zeichnet sich durch den Transport von Süßwasser aus. Komplex ist dieser Teil vor allem, weil in ihn viele unterschiedliche Speicher in Gestalt von Flüssen, Seen, Grundwasser, Eis- und Schneefeldern mit raum-zeitlich sehr variablen Zu- und Abflüssen mit einbezogen sind (s. Abb. 2).

Der gesamte **Abfluss** vom Land ergibt sich aus dem Niederschlag über Land abzüglich des Wassers, das dort verdunstet. Auf dem Festland ist im globalen Mittel der Niederschlag größer als die Verdunstung. Der Überschuss fließt als Abfluss zurück ins Meer. Der **globale Abfluss** vom Land ergibt sich als Summe aller Abflüsse, wovon ungefähr die Hälfte über etwa 70 sehr große und große Ströme erfolgt. Auch das Grundwasser fließt ins Meer ab. Was als Niederschlag auf den Landflächen fällt, lässt sich errechnen, indem von der Verdunstung über dem Meer der Niederschlag auf dem Meer abgezogen wird (s. Abb. 4).

Nur knapp 3,5 % der Wasservorräte der Erde sind Süßwasser, wovon jedoch mehr als die Hälfte als Gletscher, Polareis und Meereis gebunden sind. Für den Menschen nutzbar sind lediglich das weiter unten



beschriebene Grundwasser und das **Oberflächenwasser**. Zu letzterem zählen einerseits die fließenden Gewässer, die nach ihrer Größe in Ströme, Flüsse und Bäche unterteilt werden können, und andererseits die stehenden Gewässer, zu denen Seen, Weiher und Tümpel gehören. Mit 0,013 % haben die stehenden Gewässer nur einen sehr geringen Anteil am gesamten Süßwasservorkommen. Flüsse speichern sogar nur 0,0002 % des Frischwassers (KORZUN 1977, nach MARCINEK U. ROSENKRANZ 1996). Fließende Gewässer entstehen dort, wo die Niederschläge höher als die Verdunstung und die Versickerung sind.

Auf den rund 29 % der Erdoberfläche ausmachenden Landflächen erfolgen nur 21 % der globalen Verdunstung (FLOHN 1973). Hinsichtlich der Verdunstung über Land unterscheidet man zwischen drei Typen. Die Verdunstung an Oberflächen ohne Mitwirkung von Lebewesen, etwa an der Oberfläche eines Sees oder an unbewachsenem Boden, wird als **Evaporation** bezeichnet. Wird dagegen Wasser im Rahmen aktiver Lebensvorgänge verdunstet, spricht man von **Transpiration**. Dazu zählen die Wasserdampfabgabe aus den Spaltöffnungen von Pflanzen oder über die Haut und die Atmungsorgane von Tieren und des Menschen. Ist eine Bodenoberfläche bewachsen, laufen beide Vorgänge nebeneinander ab. Man spricht dann von **Evapotranspiration**. Besonders Pflanzen können die Verdunstungsrate erheblich beeinflussen. Bei warmem trockenem Wetter - wenn durch eine hohe Sättigungsfeuchte der Luft und wenig Wasserdampfgehalt eine hohe Verdunstungsrate möglich wäre - schließen sie ihre Spaltöffnungen (Stomata) und vermindern dadurch ihre Transpiration erheblich. Zu unterscheiden ist weiter zwischen der - theoretisch möglichen - potentiellen Verdunstung einer offenen Wasserfläche, die nur durch die verfügbare Energie begrenzt ist und der tatsächlichen bzw. effektiven Verdunstung, die fast immer kleiner als die potentielle Verdunstung ist, weil sie häufig durch das zur Verfügung stehende Wasser begrenzt wird. So sind z. B. in Wüstengebieten die Bedingungen für potentielle Verdunstung (starke Sonneneinstrahlung, trockene und warme Luft) ideal, die effektive Verdunstung tendiert wegen des fehlenden Wassers jedoch gegen Null.

Verdunstung und Niederschlag stehen global im Gleichgewicht (s. Abb. 4), regional sind die Unterschiede aber zum Teil beträchtlich. Regionen, in denen der Niederschlag kleiner als die mögliche Verdunstung ist, werden als **arid** bezeichnet. Regionen, in denen der Niederschlag größer als die Verdunstung und Versickerung ist, werden **humid** genannt. Die Grenze zwischen ariden und humiden Regionen wird als **Trockengrenze** bezeichnet. Als **nival** gilt eine Region, wenn Niederschläge vorwiegend als Schnee niedergehen. Die Grenze zu überwiegend flüssigen Niederschlägen wird als **Schneegrenze** bezeichnet. Im Laufe eines Jahres verändert sich das Niederschlags-Verdunstungs-Verhältnis ebenfalls vielerorts. Es gibt aride und humide Monate. Bleibt der Niederschlag für sechs bis neun Monate im Jahr hinter der potentiellen Verdunstung zurück, liegt ein **semiarides Klima** vor. Übertrifft der Niederschlag während sechs bis neun Monaten des Jahres die Verdunstung, handelt es sich um **semihumides Klima**. Da Niederschläge jährliche Schwankungen aufweisen, sind auch die Niederschläge und Abflüsse von Jahr zu Jahr verschieden. Und auch Klimaschwankungen in längeren Zeiträumen wirken sich entsprechend auf die Niederschläge aus (s. Modul „Klimasystem und Klimageschichte“).

Unter ariden Klimabedingungen endet der Abfluss am tiefsten Punkt von abflusslosen Hohlformen. Vielfach bilden sich Endseen aus, in denen das restliche Wasser verdunstet und über die Atmosphäre wieder Anschluss an den globalen Wasserkreislauf findet, während die gelösten Salze zurückbleiben und Salzseen (wie z. B. das Tote Meer) bilden. Dies ist nur in aridem Klima möglich.

Niederschlagsänderungen in einem ariden Gebiet führen dazu, dass sich auch Größe, Volumen, Umfang und Salzgehalt des Endsees ändern. Für die geologische Vergangenheit lassen sich so anhand von Seeterrassen Klimaänderungen nachweisen. In der Gegenwart schrumpfen die Endseen an vielen Stellen der Erde aufgrund übermäßiger Wasserentnahme im Einzugsgebiet für Bewässerungszwecke. Beispiele

dafür sind der Aralsee, das Tote Meer und der Tschadsee. Unter humiden Klimaverhältnissen würden sich diese Hohlformen solange mit Wasser füllen, bis sie überlaufen und dann an das allgemeine fluviatile System angeschlossen werden, so dass ein Abfluss zum Meer entsteht.

Der Weg vom Niederschlag zum Abfluss wird von einer Vielzahl von Parametern wie Niederschlagsverteilung und -stärke, Bodenrelief und -bedeckung beeinflusst. Darüber hinaus unterliegt der Abfluss natürlichen zeitlichen Schwankungen, die vor allem auf Änderungen der Niederschlagsintensität und der Abgabe aus den Schnee- und Eisspeichern zurückzuführen sind. Auch Hochwasser kommt im Rahmen der natürlichen Schwankungsbreite des Abflusses vor. Dieser eigentlich natürliche Vorgang hat heute oft katastrophale Auswirkungen, da er einerseits durch Eingriffe des Menschen in den Abfluss gefördert wird (Flächenversiegelungen, Gewässerbegradigungen) und andererseits die menschliche Besiedelung im Hochwasserbereich stark zugenommen hat.



**Abbildung 15:** Hochwasser kommt im Rahmen der natürlichen Schwankungsbreite des Abflusses vor. Dieser eigentlich natürliche Vorgang hat heute oft katastrophale Auswirkungen, da er durch Eingriffe des Menschen in den Abfluss, wie Flächenversiegelungen oder Gewässerbegradigungen gefördert wird. Zudem nimmt die menschliche Besiedelung im Hochwasserbereich ständig zu, weshalb die Menschen dort besonders gefährdet sind. (Foto: W. HASSENPFUG, Universität Kiel)

Neben der Entwässerung des Festlandes wirken Flüsse auch bedeutend auf die Formung der Erdoberfläche ein, indem sie Geröll abtragen, es weiter transportieren, verkleinern und schließlich im Meer ablagern. Mit der Verdunstung aus dem Ozean erfolgt zugleich eine gewaltige Anhebung der Wassermoleküle vom Niveau des Meeresspiegels in die Höhen der Atmosphäre. Damit verbunden ist eine Umwandlung der Sonnenstrahlung in potentielle Energie (Lageenergie) des Wassers, die später bei der Erosion wieder freigesetzt wird. Zur Aufrechterhaltung des Abflusses ist nur ein Bruchteil der zur Verfügung stehenden Energie erforderlich. Der Rest wird in Reibung umgesetzt. Das fließende Wasser übt damit eine Kraft auf das Flussbett aus. Sobald diese Kraft größer als die Adhäsionskraft eines an der Flusssohle liegenden Teilchen

ist, wird das Teilchen mitgerissen, es kommt zur Erosion (WILHELM 1992). Je größer das Teilchen, desto größer ist die benötigte Fließgeschwindigkeit, um das Teilchen zu erodieren. Durch Rollen und Schieben an der Sohle des Flussbettes kann auch größeres Geröll transportiert werden. Bei sinkender Fließgeschwindigkeit werden Teilchen wieder am Grund abgelagert (Sedimentation). So entstehen die sich ständig verändernden Verläufe eines Flussbettes. Die Erosions-, Transport- und Ablagerungsvorgänge unterschiedlich großer Teilchen in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit sind in Abbildung 16 dargestellt.

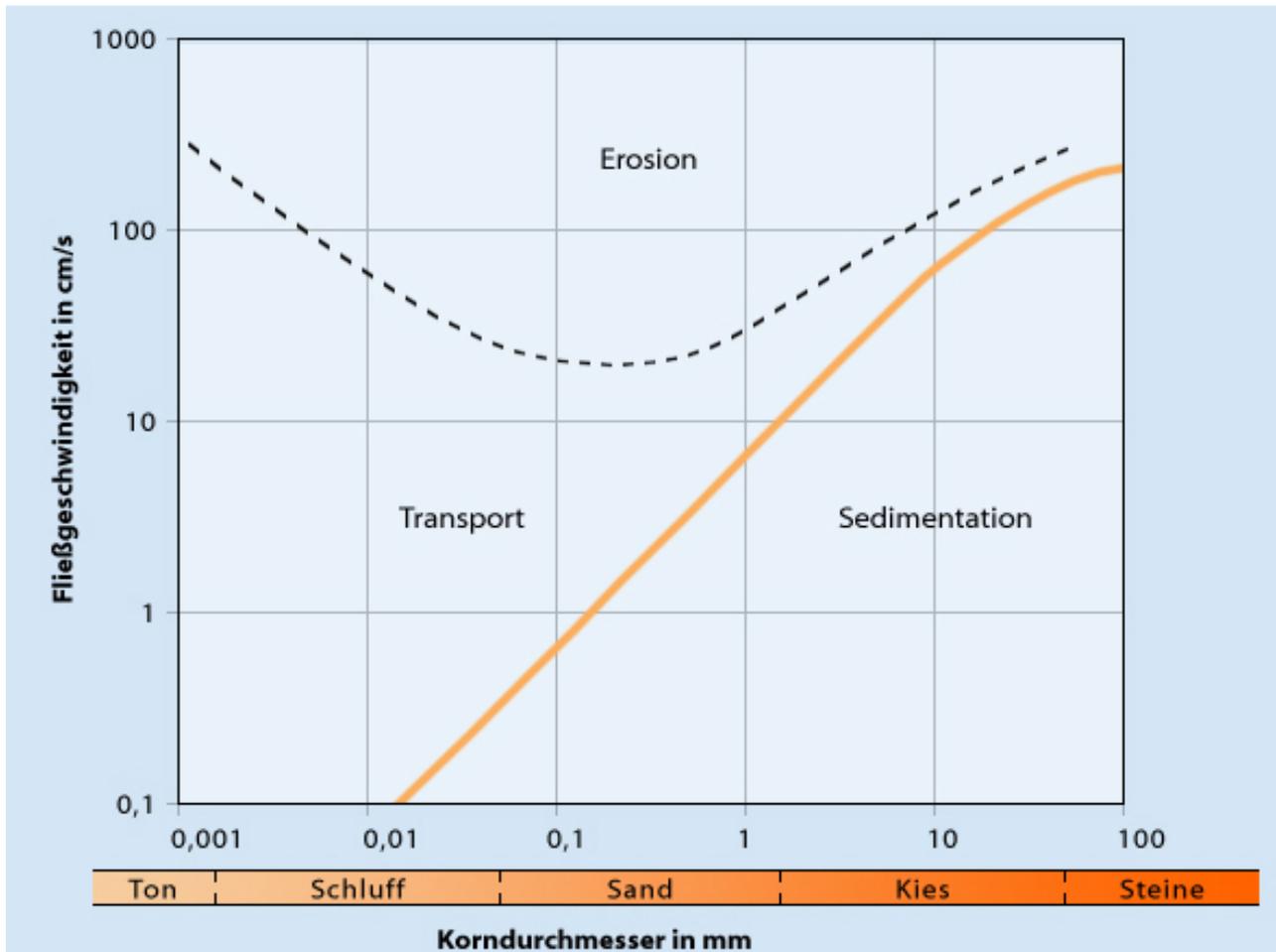


Abbildung 16: Hjulström-Diagramm (nach MARTIN et al 2002). Es veranschaulicht den Einfluss der Teilchengröße und der Fließgeschwindigkeit auf die Erosion, den Transport und die Sedimentation. Auffällig ist die hohe benötigte Fließgeschwindigkeit für die Erosion sehr kleiner Teilchen. Dies hängt mit den hohen Adhäsionskräften kleinster Partikel zusammen. Für sandige und gröbere Materialien liegen die Grenzggeschwindigkeiten für Erosion und Sedimentation relativ nah beieinander. Bereits bei geringen Geschwindigkeitsveränderungen können diese Prozesse rasch wechseln, wodurch vergleichsweise kurze Transportstrecken für größere Partikel zu erklären sind.

Der Abfluss transportiert Lockersedimente aus dem Einzugsgebiet eines Flusses bis ins Meer, wo sie zu Sedimentgesteinen werden können (s. Modul „Gesteinskreislauf: Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte“). In Flüssen werden kontinuierlich große Mengen Lockersedimente transportiert. Eine ungefähre Vorstellung von diesen gewaltigen Mengen vermittelt ein Blick aus der Vogelperspektive (s. Abb. 17).



**Abbildung 17: Der Yangtse an der Mündung in das Ostchinesische Meer. Flüsse wirken auch bedeutend auf die Formung der Erdoberfläche ein, indem sie Geröll abtragen, es weiter transportieren und schließlich im Meer ablagern. Aus der Luft sind die großen Mengen transportiertem Lockersediments (braun) gut zu erkennen. (Bild: NASA 2005)**

Auch Gletscher tragen zur Erosion bei. Durch ihre große Masse und ihre fließende Bewegung können sie größere Geröllmassen transportieren (s. Abb. 20 rechts). Die Gletscherbewegung entsteht durch den hohen Druck im unteren Bereich eines Gletschers. Wegen des Druckes bleibt das Wasser dort trotz der Kälte im flüssigen Aggregatzustand. Das darüber liegende Eis gleitet also auf einem dünnen Wasserfilm. Das gleiche Prinzip gestattet das Eislaufen: Durch das Körpergewicht des Läufers und die schmalen Kufen, wird leichtes Gleiten ermöglicht.

Damit wird deutlich, dass der Weg des Wassers über Land zugleich einen wesentlichen Einfluss auf den Gesteinskreislauf hat. Niederschlag, vor allem Regen, ist von entscheidender Bedeutung für die Verwitterung: Gestein wird zerkleinert und damit transportfähig. Frostsprengung (mechanische Verwitterung) ist in den meisten Gebirgen die vorherrschende Verwitterungsform. Auch chemische Verwitterung ist auf Wasser angewiesen. Sie ist um so intensiver, je höher die Temperaturen sind, dementsprechend gibt es die höchste Verwitterungsintensität in den feuchten Tropen (s. Modul „Gesteinskreislauf: Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte“).

### 2.2.5 Grundwasser

Fast die Hälfte des globalen Süßwasservorrats besteht aus Grundwasser (s. Abb. 3). Es ist damit weltweit eine bedeutende Ressource zur Deckung des menschlichen Wasserbedarfs. Eine globale Übersicht der Grundwasservorkommen wurde von BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (BGR) zusammengestellt (s. Abb. 18).



**Abbildung 18: Eine globale Übersicht der Grundwasservorkommen (BGR 2004).**

**Grundwasser** ist definiert als das Wasser, das die Hohlräume im Gestein zusammenhängend ausfüllt und sich nur unter dem Einfluss der Schwerkraft bewegt (KOFAHL, MASSMANN und PEKDEGER 2005). Grundwasser stellt die unterirdische Komponente des Wasserkreislaufs dar. Es wird vor allem durch Versickerung von Niederschlägen in den Boden gebildet. In ariden Gebieten (jährliche Niederschläge < jährliche Verdunstung) regnet es sehr selten und die natürliche Grundwasserneubildung ist entsprechend gering. Das durch Niederschläge belieferte Wasser verdunstet gleich an der Erdoberfläche oder wird von Pflanzen aufgenommen. In einem gemäßigten humiden Klima (jährliche Niederschläge > jährliche Verdunstung) tragen immerhin etwa 30 – 50 % des Niederschlags zur Grundwassererneuerung bei (KOFAHL, MASSMANN und PEKDEGER 2005).

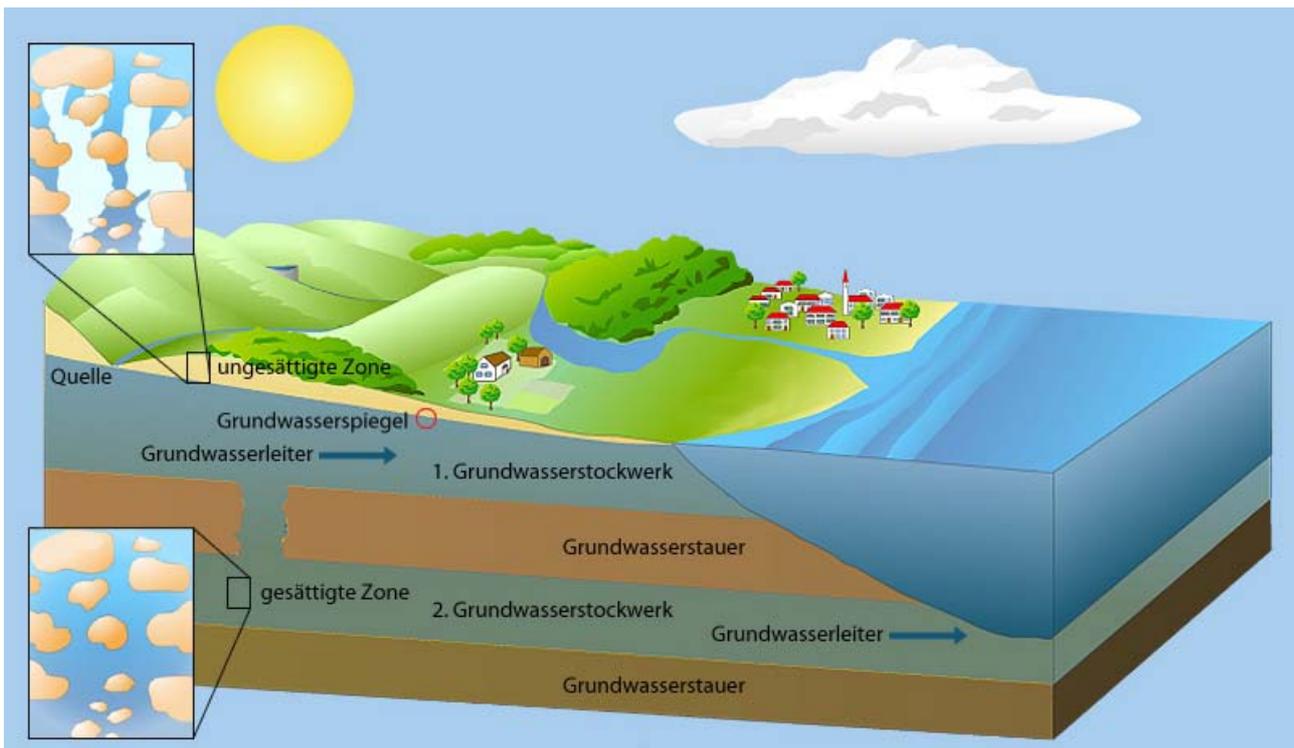
Flächiger Austritt durch Evapotranspiration, die Speisung von Bächen und Flüssen sowie punktueller Austritt über Quellen sind die vorherrschenden Formen bei der Leerung des Grundwasserspeichers. Dieser puffert durch seine Größe die über Monate oder Jahre unregelmäßig fallenden Niederschläge ab, so dass aus den Quellen meist eine kontinuierliche Wasserabgabe erfolgt. Dadurch entsteht in den Flusssystemen der humiden Klimate ein permanenter Abfluss, der für die menschliche Nutzung von großer Bedeutung ist.

Die Abbildung 19 zeigt eine schematische Übersicht des Grundwassers. Der Boden wird in eine ungesättigte und eine gesättigte Zone unterteilt. Grundwasser ist in der **gesättigten Zone** anzutreffen. Dort sind die Bodenporen zusammenhängend mit Wasser angefüllt. Der Schwerkraft folgend fließt das Grundwasser unterirdisch langsam zurück ins Meer (s. Abb. 2). Die Fließgeschwindigkeit beträgt zwischen wenigen

Zentimetern pro Tag in feinkörnigen Sedimentgesteinen und Sanden bis zu einigen hundert Metern am Tag in natürlichen unterirdischen Kanälen.

In der **ungesättigten Zone** sind die Poren des Untergrunds sowohl mit Wasser als auch mit Luft gefüllt. Das Wasser haftet direkt an den Oberflächen der Bodenpartikel und ist aufgrund der wirkenden Adhäsionskräfte nur eingeschränkt beweglich. Nebeneinander treten hier Kapillarwasser, Adsorptionswasser, Sickerwasser und chemisch gebundenes Wasser auf. Diese Zone ist essentiell für die Vegetation, welche die hier gespeicherten Wasserreserven nutzt (s. Abb. 19).

Wasserdurchlässige Gesteinsschichten, deren Poren wie die eines Schwammes zusammenhängend mit Wasser gefüllt sind und durch die das Grundwasser fließen kann, werden **Grundwasserleiter** genannt. Gute Grundwasserleiter sind grobkörnige Lockersedimente wie Kies und Sand oder auch verschiedene Typen von geklüfteten festen Gesteinen. Diese Schichten werden meist von wasserundurchlässigen Schichten begrenzt, die als **Grundwasserstauer** bezeichnet werden. Dazu zählen feinkörnige Lockersedimente wie z. B. Ton oder Schluff. Je nach Bodenbeschaffenheit können mehrere Schichten in unterschiedlicher Tiefe vorkommen. Je tiefer das Grundwasser in der Erde liegt, desto weniger nimmt es am Wasserkreislauf teil. Die Begrenzung zur ungesättigten Zone an der Oberfläche wird durch den **Grundwasserspiegel** gebildet (s. Abb. 19).



**Abbildung 19:** Schematische Übersicht des Grundwassers in verschiedenen Bodenschichten (nach SCHULZ et al 2002). Die ungesättigte Zone des Bodens ist sowohl mit Wasser als auch mit Luft gefüllt. Das Grundwasser befindet sich in der gesättigten Zone des Bodens. Die Grenze zwischen der gesättigten und ungesättigten Zone wird als Grundwasserspiegel bezeichnet. Liegt der Grundwasserspiegel direkt an der Erdoberfläche, entsteht eine Quelle und Grundwasser tritt aus.

Bis das Wasser im Grundwasser angelangt ist, hat es aus Luft und Boden verschiedene Stoffe aufgenommen. Diese beiden Teilsysteme spielen daher für die Zusammensetzung des Grundwassers eine entscheidende Rolle. Ist das Wasser beispielsweise reich an  $\text{CO}_2$  und fließt es durch kalkhaltigen Boden, löst es Kalk (Calciumcarbonat) aus dem Boden. Ein Liter Wasser kann am Ende seiner Bodenpassage



dadurch bis zu einem Gramm Kalk befördern. Wenn es viel  $\text{CaCO}_3$  enthält wird es als „hartes“ Wasser bezeichnet. Sichert Regenwasser dagegen durch einen kalkarmen Sandboden, nimmt es kaum Salze auf - es bleibt „weich“. Die meisten Austauschprozesse finden dabei in der ungesättigten Zone der oberen belebten Bodenschichten statt. Die in ihm gelösten Stoffe transportiert und speichert das Grundwasser über Jahrzehnte, Jahrhunderte oder sogar Jahrtausende. Das gilt nicht nur für natürliche Verbindungen, sondern auch für Schadstoffe, die durch menschlichen Einfluss ins Grundwasser gelangen (s. Abschnitt „Trinkwasserschutz“). Sie können das Grundwasser für lange Zeit belasten.

Die ungesättigte Zone wirkt zugleich auch als Filter. Die Bodenporen halten größere Partikel zurück, und im Boden lebende Mikroorganismen zersetzen biologische Verunreinigungen und organische Einträge (z. B. Fäkalien). Diese Prinzipien werden auch in biologischen Kläranlagen genutzt. In den meisten Fällen ist Grundwasser daher von besserer Qualität als Oberflächenwasser, da es durch seine tiefe Lage zudem vor weiteren Verunreinigungen geschützt ist. In Deutschland kommen mehr als 70 Prozent des Trinkwassers aus dem Grundwasser.

### 2.2.6 Schnee, Eis und Gletscher

Wasser in gefrorenem Aggregatzustand stellt noch vor Grundwasser und Seen den größten Süßwasserspeicher des Wasserkreislaufs dar (s. Abb. 3). Den größten Anteil daran hat der antarktische Eisschild. Eine temporäre Schneedecke bildet sich regelmäßig in der kalten Jahreszeit der mittleren und höheren Breiten sowie in den Höhenlagen der Gebirge. Sie überzieht im Mittel etwa 72 Millionen  $\text{km}^2$ , maximal bis zu 100 Millionen  $\text{km}^2$ . Zusammen mit den 26 Millionen  $\text{km}^2$  Meereis (ebenfalls Süßwasser) sind so bis zu 126 Millionen  $\text{km}^2$  mit einer Schnee- und Eisdecke bedeckt (MARCINEK und ROSENKRANZ 1996). In Form von Schnee und Eis gespeichertes Wasser hat ein Volumen von etwa  $24,4 \text{ km}^3$ , während der Inhalt der Süßwasserseen lediglich auf  $0,19 \text{ Millionen km}^3$  geschätzt wird (MARCINEK und ROSENKRANZ 1996). Ca. 10 % der Landflächen der Erde oder 15 Millionen  $\text{km}^2$  sind heute von Gletschern bedeckt. Von dieser Eisfläche entfallen ca. 90 % auf die Antarktis, 8 % auf Grönland und ca. 2 % auf Hochgebirgsgletscher. Die Dicke des grönländischen Inlandeises beträgt über 3000 m, die Antarktis wird von Eismassen mit bis zu 4000 m Dicke bedeckt (JAKOBSHAGEN 2000). Dieses Wasser nimmt aufgrund seines festen Aggregatzustandes nur zu einem geringen Anteil am Wasserkreislauf teil (s. Abb. 2).

Wo im Jahresablauf mehr Schnee fällt, als abtauen oder sublimieren kann – das ist oberhalb der Schneegrenze –, reichert sich Schnee an. Die von Niederschlag und Temperatur abhängige Schneegrenze liegt in den polaren Gebieten auf Meeressniveau und steigt in Äquaturnähe auf über 5.000 m an. In den Alpen liegt sie zwischen 3.100 und 2.600 m, in Skandinavien bei ca. 1.000 m (JAKOBSHAGEN 2000). Teile des Schnees überdauern dort und werden zu Eis. Überdauert eine dicht gepackte Eismasse eine ganze Sommerperiode, wird sie zu Firn. Wird der Firn durch Auflast tiefer versenkt und weiter kompaktiert, entsteht Gletschereis.

Schneeflocken sind fragile hexagonale Kristalle aus gefrorenem Wasser. Die Umrisse der Kristallform verhindern zunächst eine dichte Packung, sodass der Porenraum zwischen den Schneeflocken ca. 90 % beträgt. Wegen der eingeschlossenen Luft erscheint Schnee weiß. Durch verschiedene Vorgänge wie z. B. Rekristallisation im Porenraum oder Druckschmelzen durch Überlagerung mit neuem Schnee werden die Hohlräume verkleinert und die hexagonalen Schneekristalle zu kompakteren Kristallen umgeformt (s. Abb. 20). Ein **Gletscher** besteht demnach aus verdichtetem und rekristallisiertem Eis, entstanden über Jahrzehnte und Jahrhunderte.

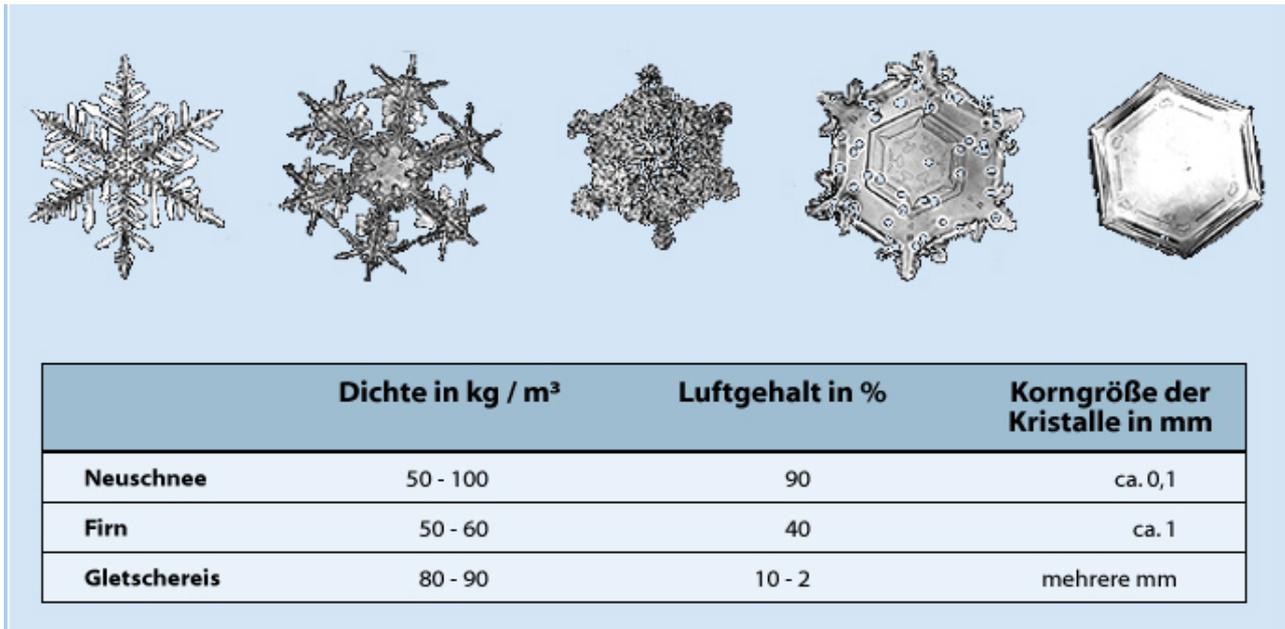
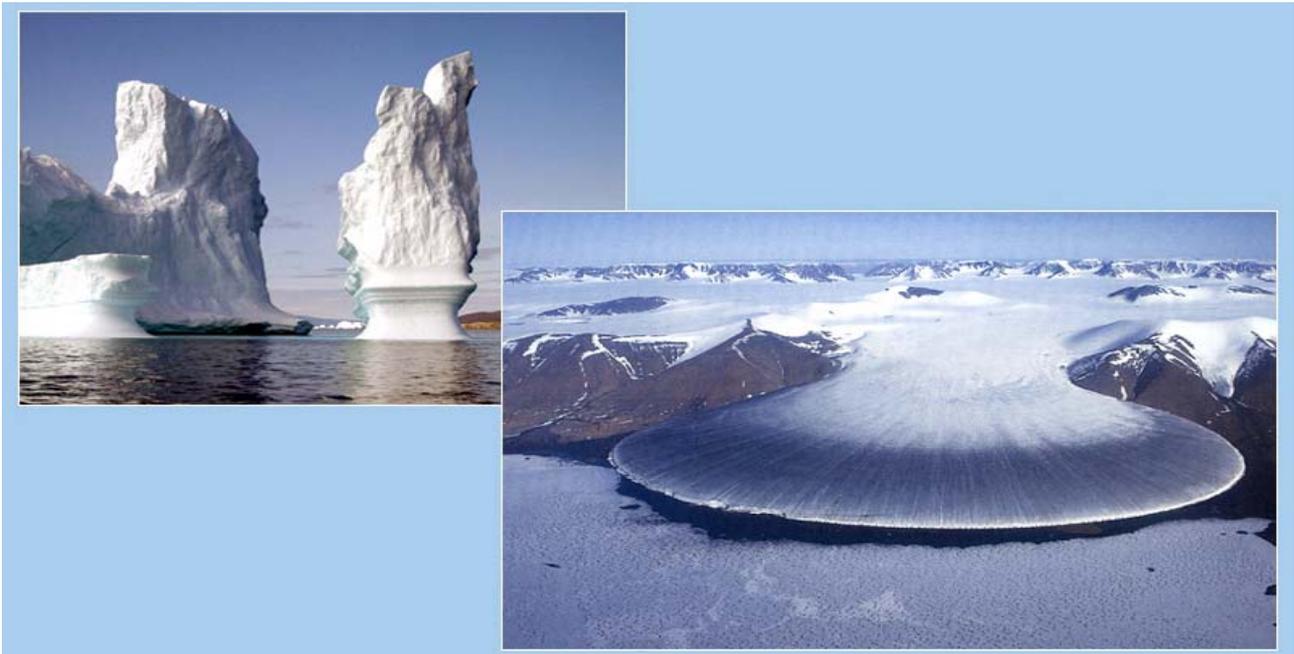


Abbildung 20: Formen von Eiskristallen und Vergleich verschiedener Schnee- und Eisformen. Die Fotos zeigen einige typische Formen von Schneekristallen. Aufgrund der Molekülstruktur von Wasser bilden sich stets sechseckige Formen aus. Der Vergleich von Neuschnee, Firn und Gletschereis bezüglich ihrer Dichte, des Luftgehaltes und der Kristallgröße verdeutlicht die wachsende Kompaktierung der Kristalle mit zunehmendem Alter, z. B. durch Rekristallisation oder Druckschmelze. (Fotos: W. BENTLEY, Daten nach JAKOBSHAGEN 2000)

Die Schneegrenze trennt das Nährgebiet vom Zehrgebiet eines Gletschers ab. Im **Nährgebiet** überwiegt die Akkumulation von Schnee, im **Zehrgebiet** verliert er durch Schmelzen, Sublimation und **Kalben** (Abbrechen von Eismassen) mehr von seiner Masse als er durch Schneefall hinzugewinnt. Wenn der Eisgewinn den Verlust übersteigt, dehnt sich der Gletscher aus. Ist die Bilanz negativ, wird die Schneegrenze nach oben verlagert und der Gletscher zieht sich zurück.

Erreichen Gletscher eine kritische Dicke von ca. 40 m, können durch den Druck an der Basis Deformationen erfolgen, ein Schmelzwasserfilm entsteht und setzt den Reibungswiderstand zwischen Gletschereis und Gesteinsoberfläche herab. Das Eis kann über den Untergrund rutschen und fließt bedingt durch sein Eigengewicht hangabwärts. Dieser Eisfluss variiert je nach Gletschertyp zwischen wenigen Zentimetern bis Dutzenden von Metern pro Tag. Dabei werden gewaltige Gesteinsvolumina mit transportiert. In Norddeutschland und im Alpenvorland war dieser Erosionsprozess in den Eiszeiten von landschaftsprägender Bedeutung, in den Alpen ist er es heute noch.

Gletscher hoher Breiten gelangen teilweise direkt (durch Kalben) ins Meer und schmelzen darin. In niedrigeren Breiten existieren Gletscher nur in größeren Höhen. Sie fließen in niedrigere Höhenlagen und schmelzen dort. Die Schmelzwasser gelangen durch die Flüsse teilweise ins Meer (s. Abb. 21). Gletschereis kann aber auch durch Sublimation an Masse verlieren. Gegenwärtig schrumpfen die meisten Gletscher aufgrund der mittleren Erwärmung der Erdoberfläche stark durch Verlagerung der Schneegrenze nach oben (s. Modul „Klimasystem und Klimageschichte“).



**Abbildung 21: Gletscher im Zehrgebiet.** Gletscher der hohen Breiten liegen direkt auf Höhe des Meeresspiegels und verlieren Masse durch Kalben (links). Gebirgsgletscher (rechts) fließen durch ihr Eigengewicht talwärts, wo Teile schmelzen. Das Schmelzwasser gelangt in Flüsse und Meer, nimmt also wieder am Wasserkreislauf teil. (Fotos: I. WOLFF 2003)

Je größer das in Form von Eis gebundene Wasservolumen ist, desto niedriger liegt der Meeresspiegel. Auf dem Höhepunkt der Weichseleiszeit lag er 115 m unter dem heutigen Niveau (s. Abb. 22). Das Abschmelzen allen derzeit vorhandenen Eises würde einen Anstieg des Meeresspiegels um über 60 m bewirken. Bei Ländern wie Bangladesch, die Niederlande oder Dänemark, die sich nur wenig über NN erheben, hätte bereits ein wenig markanter Meeresspiegelanstieg katastrophale Folgen (s. Modul „Klimasystem und Klimageschichte“).

Dauerfrostboden ist eine weitere Erscheinungsform gefrorenen Wassers. Er umfasst etwa 21 Millionen km<sup>2</sup> in den subpolaren Regionen. Aufgrund des dort bis in über 100 m Tiefe gefrorenen Bodens kann hier fallender Niederschlag nicht versickern. Im Sommer bildet sich eine durchnässte Auftauschicht, die nur wenige Dezimeter mächtig ist.



**Abbildung 22: Küstenverläufe heute (links), während der letzten Eiszeit (mitte) und im Falle eines Meeresspiegelanstiegs von 80 m (rechts).**



## 2.2.7 Trinkwasserschutz

### Die globale Situation

Wasser ist unabdingbare Voraussetzung für alles Leben auf der Erde, welches ohne Wasser überhaupt nicht hätte entstehen können (s. Modul „Entstehung und Entwicklung des Lebens“): Der menschliche Körper besteht zu 60 bis 70 % aus Wasser, Pflanzen enthalten bis zu 95 %. Es ist Lösungs- und Transportmittel für Mineral- und Nährstoffe in allen Lebewesen wie auch im Boden und dient der Regelung der Körpertemperatur z. B. des Menschen. Wasser ist darüber hinaus ein essentielles Nahrungsmittel, ohne das fast alle Organismen innerhalb kurzer Zeit zugrunde gingen.

Wassernutzung 1995 auf der gesamten Erde und in Deutschland nach Sektoren						
	Deutschland			Global		
	Gesamtmenge in km <sup>3</sup>	pro Kopf in m <sup>3</sup>	Anteil in %	Gesamtmenge in km <sup>3</sup>	pro Kopf in m <sup>3</sup>	Anteil in %
<b>Landwirtschaft</b>	2 <sup>1</sup>	24	4	3160	536	75
<b>Wärme­kraftwerke</b>	28	341	64	400	69	10
<b>Industrie</b>	10	122	23	370	64	9
<b>Haushalt</b>	4	49	9	270	46	6
<b>Gesamt</b>	44	536	100	4200	715	100

<sup>1</sup>Nur für Bewässerung

Mindestwassermengen in l für die Produktion ausgewählter landwirtschaftlicher Erzeugnisse	
<b>1 kg Butter</b>	8
<b>1 kg Baumwolle</b>	60
<b>1 kg Zucker</b>	120
<b>1 kg Brot</b>	1 000
<b>1 kg Reis</b>	5 000
<b>1 kg Rindfleisch</b>	13 000

Abbildung 23: Wassernutzung auf der gesamten Erde und in Deutschland und Mindestwassermengen für die Erzeugung verschiedener landwirtschaftlicher Produkte (nach WGBU 1998, UBA 2001, LOZÀN et al 2004). Im globalen Mittel erfolgen rund 75 % des Wasserverbrauchs durch die Landwirtschaft. In niederschlagsreichen und industrialisierten Ländern wie Deutschland wird dagegen der größte Wasseranteil für Energieerzeugung in Wärmekraftwerken und industrielle Produktion verwandt. Die Mindestwassermengen zur Produktion landwirtschaftlicher Erzeugnisse verdeutlichen den enormen Wasseraufwand für vorwiegend fleischbasierte Ernährung.

Die Verwendung des Wassers durch den Menschen ist außerordentlich vielfältig<sup>2</sup>. Trinkwasser, dessen Qualität vor allem hygienischen Ansprüchen genügen muss, wird in den Haushalten insbesondere als Nahrungsmittel, zum Waschen und für Sanitärzwecke verwendet (in Europa ca. 130 - 150 l pro Person und

<sup>2</sup> Es wird zwischen der Verwendung und dem Verbrauch von Wasser unterschieden. Landwirtschaft ist z. B. ein großer Wasserverbraucher, da Wasser in Biomasse gespeichert wird oder verdunstet, also den Tieren bzw. Pflanzen nicht mehr zur Verfügung steht. Andere Nutzungen (Kühlwasser, Trinkwasser etc.) bewirken nur eine Degradation der Wasserqualität, -temperatur oder andere Eigenschaften.



Tag, in den USA sogar 301 l, südlich der Sahara 20 l) (LOZÁN et al 2005). In der Industrie kommt Wasser als Kühl-, Lösungs- und Verdünnungsmittel sowie als Grund- und Hilfsstoff zur Herstellung zahlreicher Produkte zur Anwendung. In der Energiewirtschaft wird es zur Gewinnung elektrischer Energie genutzt (z. B. Antrieb von Turbinen der Wasserkraftwerke, Kühlung von Reaktoren der Atomkraftwerke). Die größten Mengen werden jedoch in der Landwirtschaft eingesetzt - im globalen Mittel gehen rund 75 % des Wasserverbrauchs in die Landwirtschaft, zum großen Teil für Bewässerungsmaßnahmen (LOZÁN et al 2005) (s. Abb. 23).

Vor allem in den ariden und semi-ariden Regionen der Erde ist eine intensive Landwirtschaft nur mit Hilfe von Bewässerung möglich. Fast 40 % der Nahrungsmittel werden heute durch Bewässerungslandwirtschaft produziert. Für die Herstellung von einem Kilogramm Brot sind mindestens 1.000 l Wasser notwendig. Die Erzeugung von einem Kilogramm Fleisch erfordert - einschließlich der Produktion der dafür nötigen Nahrungspflanzen - mehr als die zehnfache Wassermenge. Dabei ist zudem zu bedenken, dass Nutztiere nur etwa 10 % der pflanzlichen Nahrung in Fleisch umsetzen (CHMIELEWSKI 2005). Allein in den niederschlagsreichen und hochentwickelten Ländern übersteigt der Wasserbedarf der Industrie den der Landwirtschaft (s. Abb. 23). Für die Produktion eines Autos werden beispielsweise 10.000 - 20.000 Liter Wasser aufgewendet (SCHEELE und MALZ 2005). Nicht zuletzt dem reichlichen Wasserangebot verdanken die Industrienationen also ihren Wohlstand.

Die nutzbaren Wasserressourcen speisen sich vor allem aus den Niederschlägen. Berücksichtigt man die Verluste aus Verdunstung, stehen der Menschheit jährlich ca. 40.000 km<sup>3</sup> Wasser aus Niederschlägen und erneuerbaren Grundwasserressourcen zur Verfügung (LOZÁN et al 2005). Da der gegenwärtige Wasserbedarf lediglich rund 5000 km<sup>3</sup> pro Jahr beträgt (MARCINEK und ROSENKRANZ 1996), gibt es im globalen Durchschnitt genügend Süßwasser. Die Niederschläge fallen jedoch in ungleichmäßiger globaler Verteilung. Dies bewirkt in vielen Regionen der Erde Wasserknappheit oder sogar Wassermangel (s. Abb. 24). Glücklicherweise existieren auch in Wassermangelgebieten Grundwasserreserven, die zum Ausgleich der Wasserdefizite eingesetzt und aufgezehrt werden (s. Abb. 18).

Laut dem Weltwasserentwicklungsbericht der Vereinten Nationen haben derzeit etwa 1,2 Milliarden Menschen (20 % der Weltbevölkerung) keinen gesicherten Zugang zu sauberem Trinkwasser und im Umfeld von rund 2,4 Milliarden Menschen besteht keine Abwasserentsorgung (UNITED NATIONS 2003). Doch ohne Wasser in ausreichender Menge und Qualität ist eine nachhaltige Entwicklung nicht gesichert. Die Zunahme der Weltbevölkerung wird das Problem voraussichtlich noch weiter verschärfen. Schon heute steht hinter vielen politischen Konflikten der Kampf um die Nutzung knapper Wasserressourcen. Besonders konfliktträchtig sind aktuell die Beziehungen zwischen den extrem wasserarmen Anrainerstaaten des Indus-, Euphrat-Tigris-, Nil- und Jordan-Beckens. Das Konfliktpotential wird sich voraussichtlich noch vergrößern; denn während sich in den letzten 50 Jahren die Weltbevölkerung verdoppelte, vervierfachte sich der Wasserverbrauch (LOZÁN et al. 2005). Diese Tendenz wird sich künftig auch in den Schwellen- und Entwicklungsländern zeigen, die erst allmählich in der industriellen Entwicklung aufholen und deshalb auch einen höheren Wasserbedarf haben (s. Abb. 25) (SCHEELE und MALZ 2005).

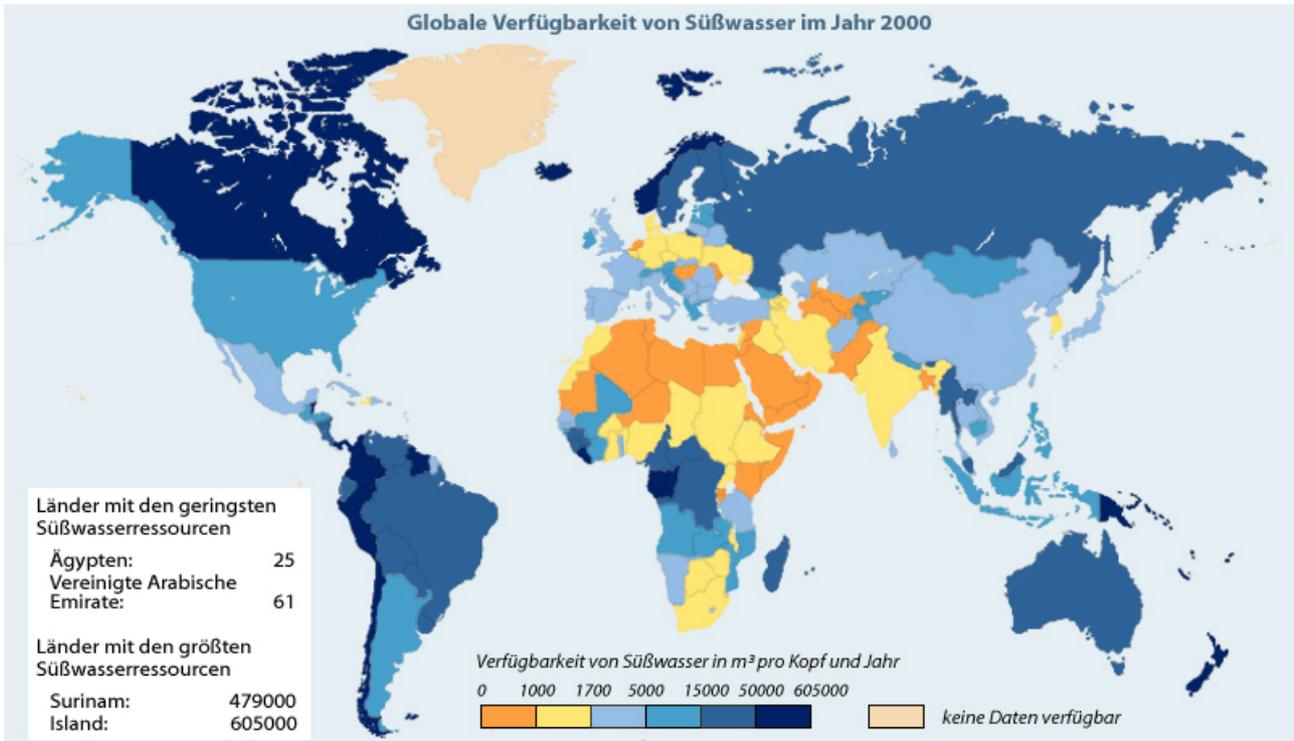


Abbildung 24: Globale Verfügbarkeit von Süßwasser im Jahr 2000 (nach UNEP 2005). Die ungleichmäßige globale Verteilung der Niederschläge und damit der verfügbaren Wasserressourcen führt in vielen Regionen zu Wasserknappheit und zu Wassermangel, obwohl im globalen Mittel theoretisch genügend Wasser vorhanden wäre.

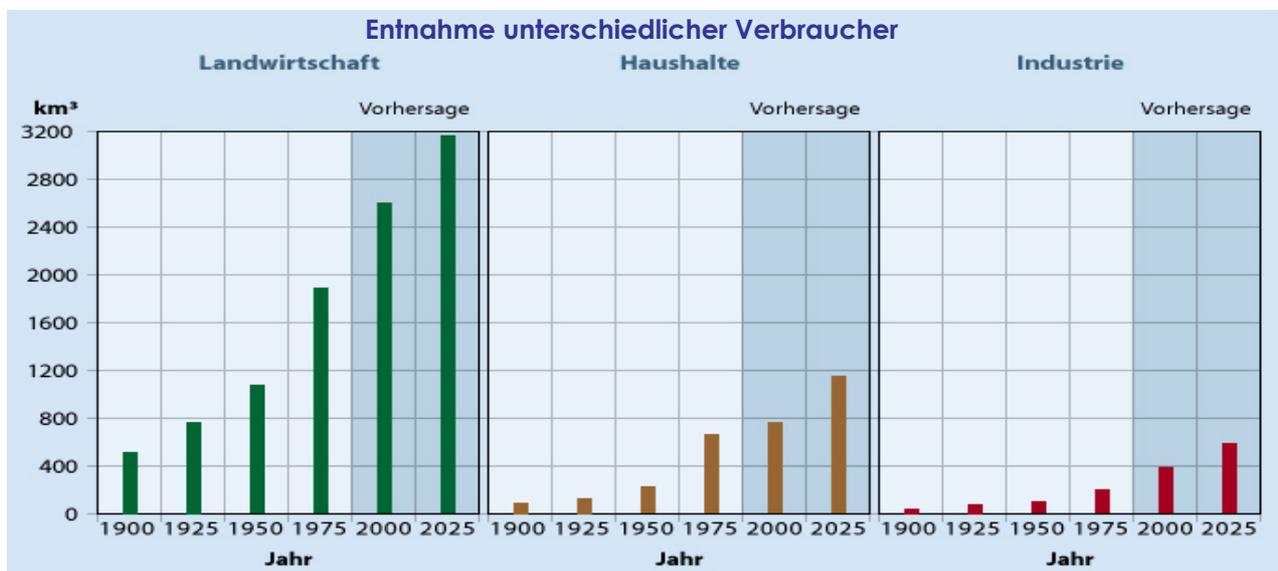


Abbildung 25: Entwicklung der globalen Wasserentnahme im 20. Jahrhundert und Prognose der Entwicklung bis 2025 (nach UNEP 2005). Die Landwirtschaft ist weltweit der größte Wasserverbraucher. Erkennbar ist zudem die starke Zunahme des globalen Wasserverbrauchs seit 1900. Im ersten Viertel des 21. Jahrhunderts wird der Wasserverbrauch weiter zunehmen.

Der Wasserkreislauf auf dem Festland wird zu einem immer größeren Anteil durch direkte und indirekte Eingriffe des Menschen modifiziert. Verschiedene Arten von Belastungen und ihre Auswirkungen zeigt die Abbildung 26.



Art der Belastung	Störgröße	Verursacher A = anthropogen N = natürliche Ursache	Ursachen (Auswahl)	Wirkung im Gewässer	Folgen im Gewässer
physikalisch	Temperatur	A N	Kühlwassereinleitung Klimaänderung durch CO <sub>2</sub> -Anstieg Schönwetterperioden	Erwärmung	Beschleunigung von Abbauprozessen Sauerstoffdefizite
	Radioaktivität	N A	Kernwaffenexplosionen radioaktiver Abfall	Strahlenbelastung	mutagene Effekte Diversitätsverlust
	Wasserführung	A	Errichtung von Stauanlagen Begradigung und Ausbau von Fließgewässern	verschiedene Wirkungen	Veränderung der Aufenthaltszeit, Zerstörung natürlicher Habitate Zunahme von Erosion und Sedimentation, Diversitätsverlust
chemisch	Nährstoffe	A	Einträge aus der Landwirtschaft, Abwassereinleitung	Eutrophierung	Massenentwicklung von Pflanzen (v. a. Algen) Sauerstoffdefizite, toxische Blaualgen, hoher pH-Wert
	organisches Material	A N	Abwassereinleitung (Industrie und Haushalte) Laub	Eutrophierung, Entstehung von Faulschlamm	Sauerstoffzehrung Fischsterben
	Salze	A N	Kalibergbau, Bewässerung, Versalzung durch Eindringen von Meerwasser	Versalzung	Hoher Salzgehalt, Änderung der Artenzusammensetzung, Diversitätsverlust
	Säuren	A N	NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> aus Kraftwerken Pyritoxidation in Bergbaugebieten Vulkanismus	Versauerung	niedriger pH-Wert, Mobilität toxischer Metalle steigt, Fischsterben, Diversitätsverlust
	Schwebstoffe	A	Bodenerosion (Entwaldung, Landwirtschaft), Hochwasser,	Trübung	Versandung und Verschlammung der Gewässersohle, Sauerstoffdefizite im Sediment, Schädigung von Fischen (Kleinen) und der Bodenfauna
	Schadstoffe <sup>1</sup>	A	organische und anorganische Zwischenprodukte und Reststoffe der Industrie, Pestizide, hormonaktive Substanzen/ Medikamente	Kontamination	Vergiftungen, mutagene Effekte, Störungen der Reproduktion, Diversitätsverlust
biologisch	Parasiten	N	Temperaturerhöhung		Stress, Verminderung der Populationsfitness
	Einwanderer	A	Schiffahrtswege und Ballasttanks	vielfältig	Verdrängung einheimischer Arten, Änderung der Artenzusammensetzung
	pathogene Bakterien	A	Abwasser	Krankheitsreger	Stress, Krankheiten, Verminderung der Populationsfitness

<sup>1</sup> Zu den durch den Menschen eingebrachten naturfremden Stoffen werden ca. 50000 Verbindungen gezählt, von denen ca. 5000 - 10000 als toxisch relevant einzustufen sind (GUDERIAN und GUNDEL 2000)

**Abbildung 26: Belastungen von Gewässern nach anthropogenen und natürlichen Ursachen und ihre Folgen (nach HUPFER und KLEBERG 2005).**

### Direkte Eingriffe

Neben der Wasserentnahme aus dem Grundwasserspeicher sowie aus Oberflächengewässern sind in diesem Zusammenhang insbesondere Eingriffe aufgrund von Veränderungen der Landschaft zu nennen: Staumauern dienen der Bereitstellung von Bewässerungswasser und von Wasser zur Erzeugung von Energie. Flüsse werden begradigt, um die Nutzung als Wasserstraßen zu verbessern. An Flussufern und Küsten entstehen hohe Dämme zum Hochwasserschutz. Im Interesse der Wirtschaft werden Feuchtgebiete trockengelegt und Waldgebiete gerodet.

Benutztes Wasser wird oft ohne ausreichende Reinigung wieder in den Kreislauf zurückgeführt. Stellenweise weisen Gewässer daher starke Schadstoffbelastungen auf, die insbesondere im Grundwasser über lange Zeiträume hin andauern. Unter anderem werden organische Verbindungen, anorganische Salze, Schwermetalle, Nährstoffe, gelöste Gase, Radionuklide, Pestizide, Rückstände von Arzneimitteln und Mikroorganismen eingetragen. Intensive Massentierhaltung mit entsprechendem Gülleaufkommen ist für eine hohe Nitratbelastung des Grundwassers verantwortlich. Verschmutzungen entstehen sowohl aus „Punktquellen“ z. B. dem Einleiten von industriellen oder kommunalen Abwässern als auch aus „mobilen Quellen“ zu denen saurer Regen oder Luftschadstoffe gehören (LOZAN et al 2005).

Falsche Bewässerungstechniken in Trockenregionen führen häufig zu einer Versalzung der sonst sehr fruchtbaren Böden<sup>3</sup>. Wenn nämlich die Bewässerung zu gering ist, trocknen die Böden regelmäßig aus und

<sup>3</sup> Böden müssen drainierbar sein, um Versalzung zu vermeiden. Hohe Grundwasserstände können ebenfalls Versalzung hervorrufen.



die Anbauflächen versalzen: Die stets im Boden vorhandenen Salze werden durch die Bewässerung gelöst. Unter ariden Klimabedingungen steigt das Wasser beim Trocknen des Bodens kapillar an die Bodenoberfläche. Dort fällt das im Wasser gelöste Salz bei der Verdunstung aus. Verhindert werden kann dies nur durch angepasste Bewässerungstechniken, wie z. B. Tröpfchenbewässerung.

Eine Übernutzung des Grundwassers kann dazu führen, dass der Grundwasserspiegel sinkt. Letztendlich ist davon auch die natürliche Vegetation betroffen. Die letzten Bäume und Sträucher sterben ab und das Land verödet (CHMIELEWSKI 2005). Die negativen Auswirkungen eines Großprojektes Bewässerung zeigen sich z. B. in den Regionen um den Aralsee: Im ariden Klima Kasachstans wurden zur Steigerung des Baumwollanbaus „riesige Wassermengen aus den Zuflüssen des Aralsees entnommen. Dies ließ die Oberfläche des Sees von 67.900 km<sup>2</sup> im Jahre 1960 auf 3.900 km<sup>2</sup> im Jahr 2000 schrumpfen. Der Salzgehalt des Aralsees entspricht heute zum Teil dem des Toten Meeres, sodass Lebewesen des Süßwassers dort nicht leben können. Der früher reiche Fischfang wurde daher eingestellt. Als Folge einer dennoch zu geringen Bewässerung trockneten die Böden regelmäßig aus, daher versalzten diese Anbauflächen. Insgesamt 40 bis 50 % dieser Flächen waren um die Jahrtausendwende deshalb nicht mehr nutzbar“ (BAYRHUBER und KULL 2005).

Im Allgemeinen kann zusammengefasst werden, dass die ungeplante, verschwenderische Nutzung des Wassers sowie die Verschmutzung der Wasserressourcen durch missbräuchliche Nutzung für die Umweltschäden und die abnehmende Verfügbarkeit von Wasserressourcen verantwortlich sind. Dieser Raubbau an den natürlichen Ressourcen macht nachhaltige Entwicklung unmöglich.

### **Indirekte Eingriffe**

Zur Zeit wird vermehrt nach Alternativen zur Wasserentnahme in ariden Gebieten gesucht. Größere Mengen Trinkwasser kann z. B. die Entsalzung von Meerwasser verfügbar machen. Die weltweite Tagesproduktion lag 2001 bereits bei 19 Millionen m<sup>3</sup>, sie nimmt weiter zu (WANGNICK 2003). Doch alle Verfahren zur Meerwasserentsalzung sind sehr energie- und damit kostenintensiv. Die Produktion von 1 m<sup>3</sup> Trinkwasser erfordert abhängig vom technischen Verfahren und der Anlagengröße zwischen 2,5 und 15 kWh (LATTEMANN und HÖPNER 2005). Daher wird Meerwasserentsalzung in größerem Umfang nur in wenigen wohlhabenden Ländern wie beispielsweise in den Arabischen Emiraten angewendet. Zudem erzeugen alle Entsalzungsverfahren neben dem Produkt große Mengen sehr salzigen Restwassers, das betriebsbedingt auch Chemikalienrückstände und Schwermetalle enthält (LATTEMANN und HÖPNER 2005). Zukünftig könnten auch marine Süßwasserquellen angezapft werden. Viele Quellgebiete liegen in Küstennähe von Gebieten, die besonders von Süßwassermangel betroffen sind. Dies gilt etwa für die Nordküste Mallorcas. Gegenwärtig wird an Techniken zur besseren Ortung und Nutzung dieser Quellen auf dem Meeresboden geforscht (NEUBERT 2005).

Einer effizienteren und schonenderen Nutzung der vorhandenen Wasserressourcen wird in absehbarer Zeit größte Bedeutung zukommen. Einsparmöglichkeiten gibt es in privaten Haushalten. Die größten Einsparmöglichkeiten liegen jedoch in der Industrie und in der Landwirtschaft. Ressourcensparende Bewässerungstechniken wie etwa die Tröpfchenbewässerung sind verfügbar, aber noch nicht weit verbreitet.

### **Trinkwasserschutz in Deutschland**

In Deutschland bildet das Grundwasser mit einem Anteil von mehr als 73 % die wichtigste Ressource für die öffentliche Trinkwasserversorgung (BMU 2003). Jährlich werden ca. 3,8 km<sup>3</sup> Trinkwasser verbraucht, gleichzeitig werden mehr als 36 km<sup>3</sup> Grundwasser durch Versickerung von Niederschlägen neu gebildet. In Deutschland werden also nur rund 10 % der sich erneuernden Grundwasserreserven genutzt (SCHULZ et al



2002). Neben ausreichender Verfügbarkeit ist jedoch auch die Qualität des Grundwassers von entscheidender Bedeutung für die Nutzung als Trinkwasser. Stoffe, die an der Erdoberfläche freigesetzt werden, gelangen oft auch in das Grundwasser. Die darin gelösten Stoffe speichert und transportiert es über Jahrzehnte, Jahrhunderte oder sogar Jahrtausende.

Das gilt auch für Schadstoffe, die durch menschlichen Einfluss ins Grundwasser gelangen, wie z. B. Stoffe im Abwasser, Pflanzenschutzmittel und Mineralstoffe im Dünger, Industrieschadstoffe oder Schwermetalle aus undichten Deponien. So verschieden die Schadstoffe sind, so unterschiedlich verhalten sie sich im Grundwasser. Einige wandern mit dem Grundwasserstrom und breiten sich schnell aus, andere lagern sich im Boden ab. Einige werden schnell abgebaut, andere bleiben über Jahre hinweg unverändert. Manche Stoffe sind deshalb schädlich, weil die bei ihrem Abbau entstehenden Zwischenprodukte als Schadstoffe wirken. So gelangt Nitrat über Düngemittel sowie Gülle und Niederschlag ins Grundwasser. Es kann sich unter bestimmten Bedingungen in Nitrit und im Körper auch in krebserregende Nitrosamine umwandeln und ist im Trinkwasser daher potentiell gesundheitsschädlich. Alle diese Stickstoffverbindungen sind wasserlöslich, daher können sie ungehindert mit dem Grundwasser zum Trinkwasserentnahmebrunnen strömen. Daher ist die landwirtschaftliche Nutzung in der Umgebung von Trinkwasserquellen eingeschränkt.

Bakterien werden vor allem über Fäkalien oder Gülle in den Boden eingetragen. Der Boden wirkt hier wie ein natürlicher Filter, der den größten Anteil bereits vor ihrem Eintritt ins Grundwasser zurückhält. Halogenierte Kohlenwasserstoffe machen mehr als die Hälfte aller Schadstoffe im Grundwasser aus. Diese meist als Lösungsmittel eingesetzten Verbindungen werden vom Boden kaum zurückgehalten und breiten sich daher im Grundwasser schnell aus. Einige sind leichter als Wasser und schwimmen deshalb auf dem Grundwasserspiegel. Schwermetalle (z. B. Kupfer, Blei, Zink, Cadmium) werden aus durchlässigen Deponien, durch den Bergbau und vom Straßenverkehr freigesetzt. Sie lagern sich bevorzugt an den Bodenpartikeln an und wandern nur langsam mit dem Grundwasser. **Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs)** entstehen bei der unvollständigen Verbrennung organischer Stoffe, vorwiegend bei der Destillation von Erdöl oder Kohle. Sie kommen in allen Mineralölprodukten, z. B. in Treibstoffen, als Naphtalin in Mottenkugeln, in Teer und in Zigarettenrauch vor. Es sind mehrere hundert PAKs bekannt, von denen die meisten krebserregend wirken. Verschiedene PAKs verhalten sich sehr unterschiedlich beim Abbau und beim Transport im Grundwasser. Alle PAKs sind schwer wasserlösliche Feststoffe, die sich im Boden anreichern und ihn kontaminieren. Sie können aber auch im Wasser mittransportiert werden oder sich im Grundwasser anreichern. Pflanzenschutzmittel (Pflanzenbehandlungsmittel) aus der Landwirtschaft können ebenfalls ins Grundwasser gelangen. Bei ihrer Zersetzung durch chemische Reaktionen mit dem Untergrund oder dem Wasser bilden sich oft neue, schädliche Verbindungen. Viele für die Natur und den Menschen schädliche Chemikalien wurden verboten, damit sie nicht ins Grundwasser gelangen. Für andere potentiell gesundheitsgefährdende Stoffe gelten strenge Grenzwerte in der amtlichen Trinkwasserverordnung.

In Einzugsbereichen für Trinkwasser hat der Schutz des Grundwassers oberste Priorität. Dort werden Wasserschutzgebiete ausgewiesen. Es gibt mehr als 15.000 **Wasserschutzgebiete** in Deutschland. Sie umfassen mit zusammen rund 38.000 km<sup>2</sup> Fläche gut 10 % des Landes (SCHULZ et al 2002). In der Umgebung eines Trinkwasserbrunnens folgt das Grundwasser dem durch die Wasserentnahme entstandenen Gefälle, es strömt auf den Brunnen zu. Je nach Beschaffenheit von Untergrund und Gelände kann dieses Einzugsgebiet unterschiedlich groß sein. Alle Schadstoffe und Verunreinigungen, die innerhalb des Einzugsgebietes in den Untergrund gelangen, landen früher oder später auch im Trinkwasser. Da die Anfälligkeit des Grundwassers mit der Nähe zum Trinkwasserbrunnen zunimmt, ist ein Wasserschutzgebiet



in verschiedene Zonen mit unterschiedlich strengen Schutzregelungen gestaffelt. Die Schutzzone 1 liegt in der direkten Umgebung der Entnahmestelle und ist stets eingezäunt. Die Schutzzone 2 wird durch eine 50-Tage-Linie begrenzt. Diese Grenze bedeutet, dass eine in diesem Bereich eingetragene Verunreinigung eine Fließzeit von 50 Tagen benötigt, bevor sie den Brunnen erreicht. Die Schutzzone 3 umfasst den gesamten Einzugsbereich des Trinkwasserbrunnens.

In den Schutzzonen sind viele wassergefährdende Aktivitäten und Einrichtungen verboten, andere sind stark eingeschränkt. Anlagen, die wassergefährdende Chemikalien produzieren oder verwenden, dürfen in Wasserschutzgebieten nicht errichtet oder betrieben werden (z. B. Heizöltanklager, Kraftwerke, Kernbrennstofflager Tankstellen, Raffinerien). In der äußersten Schutzzone kann es jedoch Ausnahmen geben. Die Anlage von Baggerseen oder anderen tiefen Gruben ist ebenfalls verboten, weil dadurch das Grundwasser seiner schützenden und filternden Deckschicht beraubt wird. In Zone 1 ist jegliche Aktivität verboten. In der Schutzzone 2 dürfen keine Sport-, Zelt-, Bade- oder Parkplätze errichtet werden. In den Zonen 2 und 3 ist die Ausbringung von Kunstdünger und Pestiziden untersagt oder streng reglementiert. Wassergefährdende Stoffe (z. B. Müll, Klärschlamm, Öle, Treibstoffe, Chemikalien oder Pestizide) dürfen nicht gelagert werden. Siloanlagen, Tiermast- oder Gemüsebaubetriebe dürfen in Zone 2 gar nicht, in Zone 3 nur unter strengen Auflagen errichtet werden. In der Schutzzone 2 dürfen Straßen weder neu gebaut noch durch größere Baumaßnahmen verändert werden. Die Nutzung von Teer ist hier auch für Ausbesserungsarbeiten untersagt. Darüber hinaus bestehen Baubeschränkungen. In Zone 3 sind Straßenbauarbeiten erlaubt, dabei ist aber die Nutzung bestimmter Materialien untersagt. Hier sind Mülldeponien nur unter Erfüllung besonderer Sicherheitsauflagen gestattet.

In Wasserschutzgebieten ist das Grundwasser vor Verunreinigungen geschützt und kann sich neu bilden oder regenerieren. Wasserschutzgebiete tragen so entscheidend dazu bei, unsere Trinkwasserressourcen zu erhalten und zu ergänzen. Dennoch ist es notwendig, das Grundwasser möglichst flächendeckend schonend zu behandeln, denn Schadstoffe halten sich nicht an die Grenzen der Wasserschutzgebiete.

Trotz aller Bemühungen zum Schutz des Grundwassers kommt es doch immer wieder zu Verunreinigungen. Unfälle, Lecks, Bedienungsfehler oder unentdeckte Altlasten führen zum Einsickern von Schadstoffen und gefährden daher das Grundwasser. Ist es zu einer Kontamination gekommen, muss versucht werden das Grundwasser vor weiterem Schaden zu bewahren und zu sanieren. Zunächst muss die Schadstoffquelle identifiziert und möglichst entfernt werden. Mit Hilfe verschiedener Verfahren wird anschließend versucht, die Ausbreitung der Verunreinigung zu begrenzen und die Schadstoffe wieder aus Boden und Wasser zu entfernen. In begrenztem Maße kann sich das Grundwasser auch ohne äußere Eingriffe regenerieren. Bei der **natürlichen Selbstreinigung** werden Schadstoffe durch Bodenpartikel gebunden oder über chemische Reaktionen abgebaut. Dies kann allerdings Jahrzehnte oder Jahrhunderte dauern und funktioniert nur bei einigen Stoffen. Bei massiven Kontaminationen ist das Grundwasser ohne weitere Sanierungsmaßnahmen gefährdet. Bei Verunreinigungen, die sich nur langsam im Boden ausbreiten, ist ein Bodenaustausch als erste Hilfe möglich. Der Schadstoffherd wird dabei mit Baggern ausgehoben und durch neue, saubere Erde ersetzt. Dieses Verfahren funktioniert allerdings nur bei begrenzter Verunreinigung und bevor die Kontamination das Grundwasser erreicht hat. Die **Abdeckung** einer kontaminierten Stelle kann angewendet werden, wenn die Verunreinigung auf Bodenschichten oberhalb des Grundwasserspiegels begrenzt ist. Dabei wird die Oberfläche des Bodens mit einer Schicht aus wasserundurchlässigem Material überzogen. Sie soll verhindern, dass durch Niederschläge weitere Schadstoffe aus den oberen Bodenschichten ins Grundwasser ausgewaschen werden. Auch mit Hilfe einer **Einkapselung** kann die Ausbreitung von Schadstoffen im Grundwasser verhindert werden. Dabei wird eine senkrechte, wasserundurchlässige



Barriere aus Spundwänden in den Grundwasserstrom abgesenkt und das belastete Wasser dadurch aufgehalten oder umgelenkt. Diese Methode beeinträchtigt allerdings den gesamten Grundwasserfluss im betroffenen Gebiet und funktioniert nur, solange die Schadstoffe lediglich lokal verbreitet sind. Eine weitere Methode ist die **Grundwasserreinigung ex situ**. Um das Grundwasser von Schadstoffen zu reinigen, werden dabei oberirdische Reinigungsanlagen eingesetzt. Über Sanierungsbrunnen wird belastetes Wasser an die Oberfläche gepumpt und dort chemisch, mikrobiologisch oder physikalisch gereinigt. Das so behandelte Wasser kann dann entweder direkt wieder ins Grundwasser oder in ein Oberflächengewässer eingeleitet werden. Diese Methode wird häufig angewandt, ist aber sehr langwierig und mit hohen Kosten verbunden. Eine aktive Reinigung kann auch im Grundwasser selbst stattfinden (**Grundwasserreinigung in situ**). Dazu wird ein spezieller Sanierungsbrunnen gebaut, der das verschmutzte Grundwasser über verschiedene Filterschichten ansaugt. Im Inneren des Rohres wird das Wasser mit Luft vermischt, wobei flüchtige Schadstoffe herausgelöst werden. Über einen Bioreaktor kann das Wasser zusätzlich mikrobiell gereinigt werden. Über eine oberhalb der Ansaugöffnung liegende zweite Filterschicht wird das gereinigte Wasser wieder in die Grundwasserschicht zurückgeleitet. Eine relativ neue Methode der Grundwasserreinigung in situ ist die **reaktive Wand**. Sie wird senkrecht in den Boden eingelassen und wirkt wie ein Filter: Die poröse Wand quer zum Grundwasserstrom lässt Wasser ungehindert durch, hält aber die gelösten Schadstoffe zurück. Die speziellen Füllstoffe in der Wand absorbieren oder fällen die Schadstoffe oder bauen sie zu neutralen Verbindungen ab. Neben chemischen Komponenten werden dabei auch Mikroorganismen zur Reinigung eingesetzt.

Einige Verunreinigungen des Grundwassers können mit diesen Methoden bereits begrenzt oder behoben werden. Oft kann jedoch nur ein Teil der Schadstoffe entfernt werden. Der Rest macht das Grundwasser auf Jahrzehnte oder Jahrhunderte hinaus zur Trinkwassergewinnung untauglich. Auch wenn immer neue und bessere Verfahren zur Grundwassersanierung entwickelt werden stellen sie keine echte Alternative zum vorbeugenden Grundwasserschutz dar.

### 3 Didaktische Information

#### 3.1 Lernziele

In diesem Modul wird der Wasserkreislauf mit den damit verbundenen Prozessen bearbeitet. Durch das Thema Trinkwasserschutz kann an die persönliche Erfahrungswelt der Schüler/innen angeknüpft werden. Dabei sollen die Schüler/innen

- den Wasserkreislauf als System verstehen und beschreiben können;
- Phänomene des Wasserkreislaufs durch Rückgriff auf grundlegende physikalische Gesetzmäßigkeiten erklären können;
- die Aggregatzustände des Wassers mit ihrer Bedeutung für das System Erde kennen;
- die besondere Bedeutung der Kontinente für den Wasserkreislauf erläutern können;
- Auswirkungen menschlicher Eingriffe in den Wasserhaushalt einordnen und mit Beispielen belegen können,
- Ursachen für die Verschmutzung des Trinkwassers benennen und Maßnahmen zum Schutz formulieren können.



Außerdem sollen die Schüler/innen erkennen, dass

- der ständige Wechsel der Aggregatzustände auf der gesamten Erde stattfindet und ständig zu einer Neuverteilung von Wasser und Energie führt;
- der Energieinput für den Antrieb des Wasserkreislaufes aus der Sonneneinstrahlung stammt, und dass Wasserkreislauf und Energiehaushalt der Erde miteinander verbunden sind;
- der Wasserkreislauf auf den globalen Energiehaushalt bewirkt und alle Änderungen im Energiehaushalt der Erde sich auch auf den Wasserhaushalt auswirken;
- der Wasserkreislauf mit weiteren Elementen und Kreisläufen des Systems Erde wie dem Gesteinskreislauf und der Biosphäre verzahnt ist;
- Wasser eine zentrale und immer knapper werdende Ressource der Menschheit ist, die zudem durch Verschmutzung weiter verknappt wird;
- der menschliche Einfluss auf Teilbereiche des Wasserkreislaufs heute so groß geworden ist, dass er im Rahmen des globalen Wasserhaushalts nicht mehr vernachlässigt werden kann.

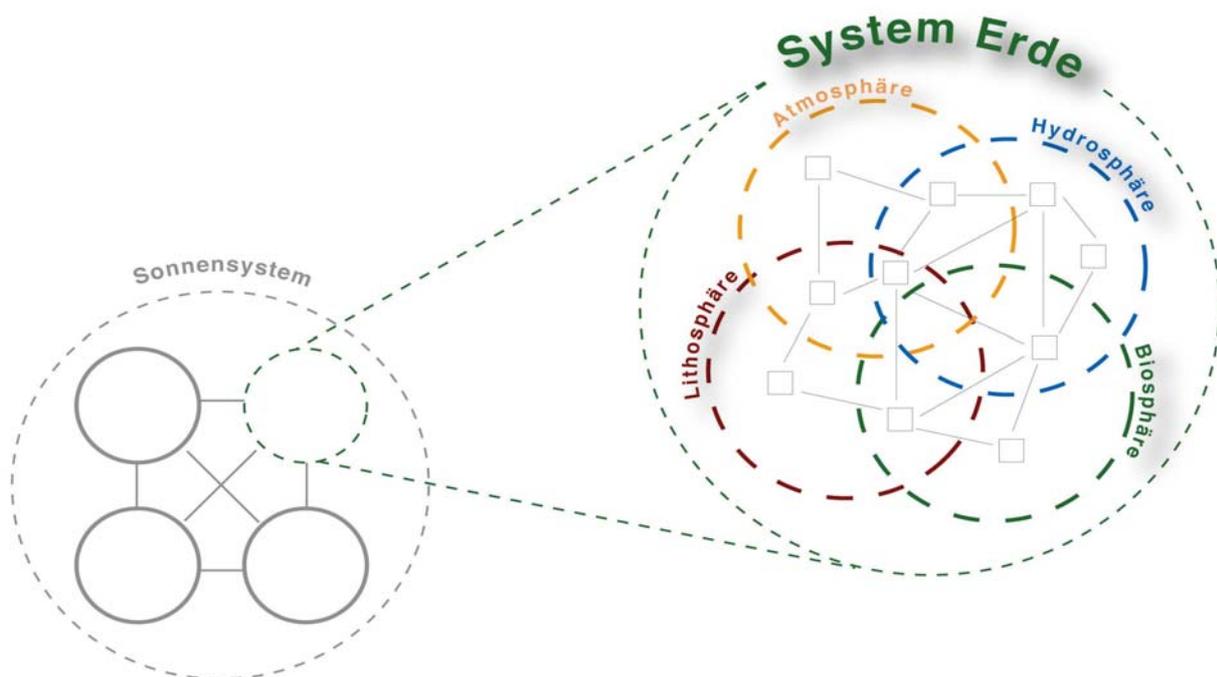


Abbildung 27: Das Modul „Wasserkreislauf und Trinkwasserschutz“ im Kontext System Erde. In diesem Modul wird die Hydrosphäre schwerpunktmäßig behandelt.

### 3.2 Hinweise zu den Lernvoraussetzungen

Das Modul „System Erde – Die Grundlagen“ sollte vor der Unterrichtseinheit „Wasserkreislauf und Trinkwasserschutz“ eingesetzt werden um Basiswissen zu erarbeiten. Das Modul „System Erde – Die Grundlagen“ führt umfassend in die Meilensteine der Erdgeschichte ein und erläutert, aus welchen Elementen das System Erde besteht. Dadurch nimmt es die Erde als Gesamtsystem in den Blick. Darüber hinaus wird dort in die Systemanalyse eingeführt.

Geowissenschaftliche Vorkenntnisse werden nicht vorausgesetzt. Ein physikalisches Wissen über Energieumwandlung ist für das Verständnis des Kreislaufs von Vorteil, allerdings kann dieses Wissen auch im Baustein 1 „Demonstration des Wasserkreislaufs im System Erde durch das Dosenexperiment“ (s. Material 1) erworben werden.

### 3.3 Hinweise zu horizontalen und vertikalen Verknüpfungen

Im vorliegenden Modul werden chemische, physikalische und geographische Inhalte vernetzt betrachtet (s. Abb. 28).

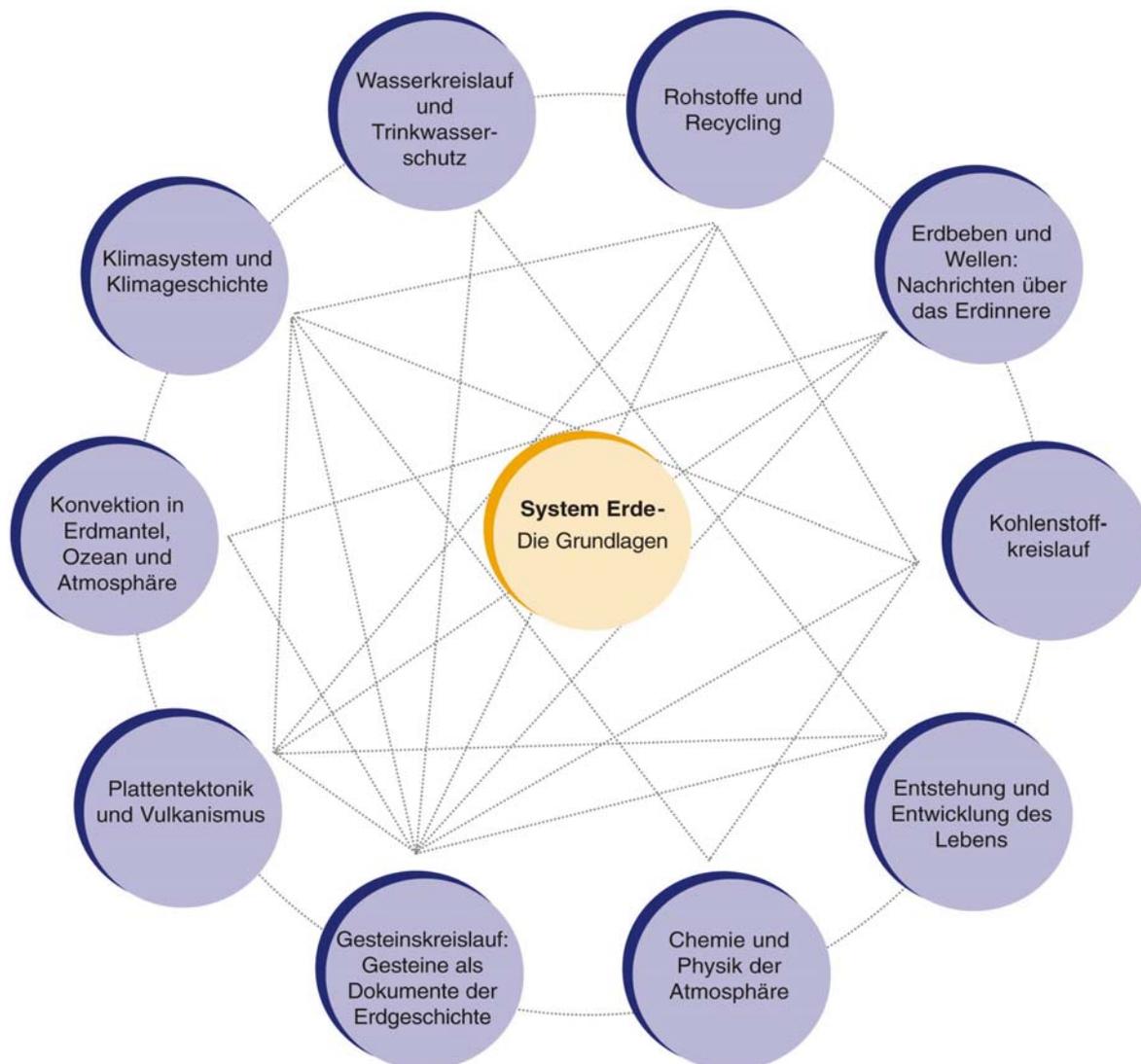


Abbildung 28: Die Verknüpfungen des Moduls „Wasserkreislauf und Trinkwasserschutz“ mit den anderen Modulen des Projektes „Forschungsdialog: System Erde“. Realisiert werden diese Verknüpfungen insbesondere durch eine Verlinkung der Hypertexte. Dies soll den fächerverbindenden Charakter geowissenschaftlicher Themen aufzeigen und die Planung eines fächerverbindenden Unterrichts erleichtern. Eine Sonderstellung nimmt das Modul 1 „System Erde – Die Grundlagen“ ein. Es legt die Basis für die Methode der Systemanalyse, die in fast allen weiteren Modulen vertieft wird. Einen Vorschlag für einen fächerverbindenden Kurs nach dem Konzept „Forschungsdialog: System Erde“ enthält Modul 10, Baustein 9. In diesem Kurs trainieren die Schüler/innen selbst organisiertes Lernen und führen schließlich ein Projekt durch, das sich mit der nachhaltigen Entwicklung des Planeten Erde mit dem Schwerpunkt Klimasystem befasst.



Das notwendige Basiswissen für die Betrachtung der Erde als System mit den Sphären Lithosphäre, Atmosphäre, Biosphäre und Hydrosphäre liefert das Modul „System Erde – Die Grundlagen“. Wasserkreislauf und Gesteinskreislauf sind über die Prozesse der Erosion und Sedimentation eng miteinander verzahnt. Daher ergeben sich gute Möglichkeiten zur inhaltlichen Erweiterung mit dem Modul „Gesteinskreislauf: Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte“.

Zum Modul „Klimasystem und Klimageschichte“ bestehen ebenfalls starke inhaltliche Verbindungen, da der Wasserkreislauf gleichzeitig das Wettergeschehen und das Klima der Erde wesentlich beeinflusst. Besonders die tropischen Ozeane haben sowohl für den Wasserkreislauf als auch für das Klima eine zentrale Bedeutung. Spezielle Aspekte wie El Niño oder global warming können nur dann sinnvoll bearbeitet werden, wenn vorher Grundstrukturen des Wasserkreislaufs vermittelt worden sind (s. Modul „Klimasystem und Klimageschichte“). Auch durch die Fähigkeit des Wassers zur Speicherung von CO<sub>2</sub> sind der Wasserkreislauf, der Kohlenstoffkreislauf und das Klimasystem miteinander vernetzt (s. Modul „Kohlenstoffkreislauf“). Die Bedeutung der Wolken für den natürlichen Treibhauseffekt kann anhand des Moduls „Chemie und Physik der Atmosphäre“ vertiefend behandelt werden. Der im Aspekt Trinkwasserschutz angelegte Gedanke der Nachhaltigkeit kann in den Modulen „Rohstoffe und Recycling“ und „Klimasystem und Klimageschichte“ (Baustein 9, Material 1) aufgegriffen werden.

Das Gruppenpuzzle dieses Moduls (Baustein 2, Material 1) eignet sich als guter Einstieg in die Methode des Gruppenpuzzles, da die Schüler/innen in der Regel über ausreichendes Vorwissen zum Thema Wasser verfügen, um besser auf die komplexe Unterrichtsmethode eingehen können. Das Gruppenpuzzle bietet die Möglichkeit, in dem Modul „System Erde – Die Grundlagen“ erworbene Kenntnisse anzuwenden, indem ein Stoffflussdiagramm angefertigt wird. Weitere Stoffflussdiagramme können in den Modulen „Gesteinskreislauf: Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte“, „Klimasystem und Klimageschichte“ und „Kohlenstoffkreislauf“ entwickelt werden.

### 3.4 Erläuterungen und Nutzungshinweise zu den Materialien

Das Modul beinhaltet insgesamt vier Bausteine. Für die Lehrkraft steht jeweils das Material 1 der Bausteine zur Verfügung, das weiterführende Informationen liefert. Der Wasserkreislauf wird in stark vereinfachter Form bereits im Sachkundeunterricht der Grundschule behandelt und ist auch Gegenstand des Geographieunterrichts der Sekundarstufe I. Die ersten zwei Bausteine sind grundlegenden Materialien zuzuordnen und dienen als Einführung in der gymnasialen Oberstufe oder als umfassende Erarbeitung in der Sekundarstufe I. Die Bausteine 3 und 4 bieten eine Vertiefung zu einzelnen Teilaspekten des Wasserkreislaufs.

Durch den **Baustein 1 „Demonstration des Wasserkreislaufs im System Erde durch das Dosenexperiment“** (Material 1) gelingt der Einstieg in das Thema Wasserkreislauf. Durch ein Experiment wird den Schüler/innen bewusst, dass die Sonne der Motor des Wasserkreislaufs ist. Die Lernenden sollen ihr Grundlagenwissen zur Energieumwandlung auffrischen und erweitern.

**Baustein 2 „Gruppenpuzzle zum Wasserkreislauf“** (Material 1) dient zur Vermittlung von Fachwissen zum Thema Wasserkreislauf. Dabei können die Schüler/innen ihr Wissen festigen, selbst überprüfen und in einen größeren Zusammenhang stellen, indem sie ein Stoffflussdiagramm zum Wasserkreislauf entwickeln. Das Lernen in diesem Baustein erfolgt in Form eines Gruppenpuzzles. Das Material eignet sich in besonderem Maße für **Projektwochen** oder andere Formen des fächerverbindenden Unterrichts.



Bei einem **Gruppenpuzzle** werden die Schüler/innen in Gruppen (**Stammgruppen**) eingeteilt. Sie wählen einen Teilaspekt des Wasserkreislaufs, mit dem sie sich im Selbststudium näher befassen. Hierfür steht jedem Gruppenmitglied ein Text zur Verfügung (Material 2). Die Schüler/innen der einzelnen Stammgruppen, die den gleichen Text ausgewählt haben, bilden jeweils gemeinsam eine Expertengruppe. Die Experten bearbeiten ihren Text nach einem vorgegebenen Schema. Zurück in den Stammgruppen unterrichten sie ihre Mitschüler/innen. Danach lösen die Stammgruppen gemeinsam Aufgaben, für die das Wissen aller Teilaspekte notwendig ist: Sie sollen ein Poster mit einem Stoffflussdiagramm zum Wasserkreislauf erstellen.

In den Bausteinen 3 und 4 steht die Interpretation von Fernerkundungsbildern im Vordergrund. Aus Satellitendaten abgeleitete Bilder können die fächerübergreifende Behandlung des Wasserkreislaufs im Geographieunterricht wirksam unterstützen. Aus diesen Bildern sind Aussagen zu einer Vielzahl von Aspekten zu entnehmen, insbesondere, wenn man sie in Verbindung mit klassischen Atlaskarten auswertet. Zum Beispiel ermöglichen Bilder von Wolkenverteilungen grundlegende Einsichten zum Wasser in der Atmosphäre.

**Der Baustein 3 „Wolkenverteilung über Meer und Landflächen“** (Material 1) befasst sich mit dem Teilbereich Wolken des Wasserkreislaufs. Das vorhandene Material kann durch die Interpretation von Bildern des Bausteins 2 erweitert werden. Alle vorhandenen Bilder sind im Foliensatz (Baustein 3, Material 2) enthalten.

**Der Baustein 4 „Verbindung von Wasser- und Gesteinskreislauf im System Erde“** (Material 1) greift die Verbindung zwischen dem Wasserkreislauf und dem Gesteinskreislauf auf. Mithilfe von Satellitenbildern soll den Schüler/innen der Zusammenhang von Wasser- und Gesteinskreislauf verdeutlicht werden.

Eine Übersicht der Arbeitsformen in den Bausteinen des Moduls „Wasserkreislauf und Trinkwasserschutz“ gibt Tabelle 1 wieder.

**Tabelle 1: Arbeitsformen des Moduls „Wasserkreislauf und Trinkwasserschutz“.**

Arbeitsformen	Baustein			
	1	2	3	4
Mind Mapping				
Concept Mapping				
Systemanalyse durchführen				
Stoffflussdiagramm entwickeln		•		
Wirkungsdiagramm entwickeln				
beschreibendes Beobachten	•			
kriterienbezogenes Vergleichen			•	
Demonstrationsexperiment	•			
Schülerexperiment				
Recherche/ Informationsbeschaffung				
Texte erfassen und bearbeiten		•		
Interviews mit Expert/innen				
an Exkursionen teilnehmen				
Gruppenarbeit		•		
Stationsarbeit				
Gruppenpuzzle (Expertensystem)		•		
Projektarbeit				
Filme/ Animationen ansehen		•		
Computerinteraktionen bearbeiten				
Modellsimulationen bearbeiten				
Internet nutzen				•
Texte verfassen				
Referate halten		•		
Poster erstellen		•		
Tabelle, Diagramm, Grafik etc. aus Daten erstellen bzw. interpretieren		•	•	•
bewerten				



## 4 Vorschläge für den Unterrichtsverlauf

**Tabelle 2: Überblick über den Unterrichtsverlauf im Modul „Wasserkreislauf und Trinkwasserschutz“. Für jeden Baustein stehen Sachinformationen als Hypertexte zur Verfügung.**

<b>Einstieg</b>	Baustein 1: Demonstration des Wasserkreislaufs im System Erde durch das Dosenexperiment	
<b>Erarbeitung</b>	Baustein 2: Gruppenpuzzle zum Wasserkreislauf	
<b>Vertiefung</b>	Baustein 3: Wolkenverteilung über Meer und Landflächen	Baustein 4: Verbindung von Wasser- und Gesteinskreislauf im System Erde

## 5 Literatur

BAUER, P. (1994): Wasserkreislauf in der Atmosphäre aus Satellitendaten. In: Geogr. Rundschau, H.11, S. 654-660

BAUMANN, H., SCHENDEL, U. und MANN, G. (1974): Wasserwirtschaft in Stichworten: Wasserhaushalt und seine Regelung. Kiel, Hirt

BAYRHUBER, H. und KULL, U. (Hrsg.) (2005): Linder Biologie, 22. Aufl. Braunschweig, Schroedel, S. 111

BMU (BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT) (Hrsg.) (2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland. Berlin

BÖHN, D. und SCHÜTT, B. (2002): Von der Beobachtung zur Modellbildung – das Beispiel des Wasserhaushalts. In: Geographie und ihre Didaktik, S. 57-71.

CHMIELEWSKI, F.-M. (2005): Wasserbedarf in der Landwirtschaft. In: LOZÀN, J. L. et al (Hrsg.) (2005): Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle? Wissenschaftliche Fakten. Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg

FLOHN, H. (1973): Der Wasserhaushalt der Erde – Schwankungen und Eingriffe. Naturwissenschaften 60, S. 340-348

FREY, K. und FREY-EILING, A. (2005): Das Gruppenpuzzle. In: System Erde, CD-ROM für die Sekundarstufe II. Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN), Kiel

GOETHE, J. W. von (1997): Faust II. Dtv

HAECKEL, H. (1999): Meteorologie. 4. Aufl. UTB 1338, Stuttgart

HASSENPLUG, W. (1983): Saurer Regen – neue Experimente zu einem neuen Thema (Sek.I). Praxis Geographie, Heft1, S.28-34

HAUBRICH, H. (1994): Test 28: Wasserkreislauf. In: Geographie heute, Heft 125, S. 42

HERRMANN, R. (1977): Einführung in die Hydrologie. Teubner Studienbücher der Geographie, Stuttgart

HUH et al (2004): Ganges-Brahmaputra River Delta. In: <http://www.geol.lsu.edu/WDD/ASIAN/Ganges-Brahmaputra/ganga.htm> (letzter Abruf 18.07. 2005)

HUPFER, M. und KLEEBERG, A. (2005): Zustand und Belastung limnischer Ökosysteme - Warnsignal einer sich verändernden Umwelt. In: LOZÀN, J. L. et al (Hrsg.) (2005): Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle? Wissenschaftliche Fakten. Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg



- INTERNATIONAL GROUNDWATER RESOURCES ASSESSMENT CENTRE (IGRAC) (2005): Global Groundwater Information System. In: [http://igrac.nitg.tno.nl/ggis\\_map/start.html](http://igrac.nitg.tno.nl/ggis_map/start.html) (letzter Abruf 09.08. 2005)
- JAKOBSHAGEN (Hrsg.) (2000): Einführung in die geologischen Wissenschaften. UTB 2106. Stuttgart
- KARCHER, R. (Red.)(20003): Lexikon der Chemie: A bis Z. Spektrum akad. Verlag, Heidelberg, Berlin
- KOHFAHL, C., MASSMANN, G. und PEKDEGER, A. (2005): Fossiles und neues Grundwasser als Teil des Gesamtwassers. In: LOZÀN, J. L., GRAßL, H., HUPFER, P., MENZEL, L. und SCHÖNWIESE, C.-D. (Hrsg.) (2005): Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle? Wissenschaftliche Fakten. Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg
- KORZUN, V. I. (1977): Atlas of world water balance. Leningrad, Hydrometeorolog. Publ. House
- LATTEMANN, S. und HÖPNER, T. (2005): Meerwasserentsalzung. In: LOZÀN, J. L. et. al. (Hrsg.) (2005): Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle? Wissenschaftliche Fakten. Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg
- LOZÀN, J. L., GRAßL, H., HUPFER, P., MENZEL, L. und SCHÖNWIESE, C.-D. (Hrsg.) (2005): Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle? Wissenschaftliche Fakten. Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg
- MARCINEK, J. und ROSENKRANZ, E. (1996): Das Wasser der Erde. Eine geographische Meeres- und Gewässerkunde. Klett-Perthes, Stuttgart
- MÜLLER, M. (1996): Handburch ausgewählter Klimastationen der Erde (5. Auflage). Selbstverlag der Universität Trier, Forschungsstelle Bodenerosion
- NEUBERT, H.-J. (2005): Anmerkungen zu den marinen Süßwasserquellen. In: LOZÀN, J. L., GRAßL, H., HUPFER, P., MENZEL, L. und SCHÖNWIESE, C.-D. (Hrsg.) (2005): Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle? Wissenschaftliche Fakten. Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg
- NASA (2005): Earth Observatory. In: <http://earthobservatory.nasa.gov/> (letzter Abruf 01.07. 2005)
- NOLZEN, H. (1983): Hydrologische Experimente. In: Praxis Geographie Heft 7, S. 10-11
- SCHEELE, U. und MALZ, S. (2005): Wasserbedarf und Wasserverbrauch privater Haushalte und der Industrie nach Ländern. In: LOZÀN, J. L. et al (Hrsg.) (2005): Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle? Wissenschaftliche Fakten. Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg
- SCHÖNWIESE, C.-D. (2005): Klimatologie. UTB für Wissenschaft, Stuttgart
- SCHULZ, H. D., HAMER, K., SCHRÖTER, J. und ZABEL, M. (2002): Grundwasser - kostbares Nass im Verborgenen. Universität Bremen, Fachbereich Geochemie und Hydrogeologie. CD-ROM
- STRAHLER, A.H. und STRAHLER A.N. (1999): Physische Geographie. Aus dem Englischen übersetzt von F. Ahnert. Ulmer UTB, Stuttgart
- United Nations Environmental Programme (UNEP)(2005): Vital Water Graphics. In: [www.unep.org/vitalwater](http://www.unep.org/vitalwater) (letzter Abruf am 31.03. 2005)
- UNITED NATIONS (UNESCO) (2003): Water for people - Water for life. The United Nations world water development report. Barcelona
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS) (2001): Earth Explorer. In: <http://edcsns17.cr.usgs.gov/EarthExplorer> (letzter Abruf 08.08. 2005)



WANGNICK, K. (2003): 2002 IDA Worldwide Desalting Plants, Report NO. 17. Topsfield Mass, USA

WEISCHET, W. (1977): Einführung in die allgemeine Klimatologie – Physikalische und meteorologische Grundlagen. Teubner Studienbücher, Stuttgart

WILHELM, F. (1989): Die Hydrogeographie und ihre Arbeitsweisen. In: Geogr. Rundschau Heft 9, S. 462-468

WILHELM, F. (1992): Stellung der Flüsse im Wasserkreislauf. In: Geographie und Schule, Heft 75, S. 2-13

## 6 Unterrichtsmaterialien

### Baustein 1: Demonstration des Wasserkreislaufs im System Erde durch das Dosenexperiment



Material 1: Demonstration des Wasserkreislaufs im System Erde durch das Dosenexperiment (Information)



Material 2: Energieumsätze (Folie)



Material 3: Demonstration des Wasserkreislaufs im System Erde durch das Dosenexperiment (Arbeitsbogen)



Material 4: Wasserkreislauf (Animation, s. CD-ROM „System Erde“)

### Baustein 2: Gruppenpuzzle zum Wasserkreislauf



Material 1: Gruppenpuzzle zum Wasserkreislauf (Information)



Material 2: Gruppenpuzzle zum Wasserkreislauf (Arbeitsbogen)

### Baustein 3: Wolkenverteilung über Meer und Landflächen



Material 1: Wolkenverteilung über Meer und Landflächen (Information)



Material 2: Erde aus dem All (Folie)



Material 3: Wolkenverteilung über Meer und Landflächen (Arbeitsbogen)

### Baustein 4: Verbindung von Wasser- und Gesteinskreislauf im System Erde



Material 1: Verbindung von Wasser- und Gesteinskreislauf im System Erde (Information)



Material 2: Beispiel Turfansenke (Arbeitsbogen)



Material 3: Beispiel Bangladesh (Arbeitsbogen)



## Weitere Materialien

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Commodity Top News No. 21, Dezember 2003: Grundwasser. Der Artikel zur nachhaltigen Nutzung des Grundwassers steht zum Download als pdf-File zur Verfügung.

Bezugsquelle: [http://www.bgr.de/b1hydro/downloads/ctn2103\\_gw.pdf](http://www.bgr.de/b1hydro/downloads/ctn2103_gw.pdf) (letzter Abruf 14.07.05)

Umweltbundesamt (UBA): Mediendatenbank H<sub>2</sub>O-Wissen: Volltextmediensuche und kommentierte Linkliste zum Thema Gewässerschutz.

Bezugsquelle: <http://www.umweltbundesamt.de/uba-datenbanken/htdocs/index.php> (letzter Abruf 04.04.05)

Umweltbundesamt (UBA): Die Wasserrahmenrichtlinie - Neues Fundament für den Gewässerschutz in Europa (2004) und viele weitere Publikationen zum Thema Wasser, kostenlos bestellbar.

Bezugsquelle: Postfach 330022, 14191 Berlin, [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de) (letzter Abruf 04.04.05)

United Nations Environment Programme (UNEP): Grafiken zu globalen Wasserressourcen und deren Nutzung (in englisch)

Bezugsquelle: [www.unep.org/vitalwater](http://www.unep.org/vitalwater) (letzter Abruf 18.07. 2005)

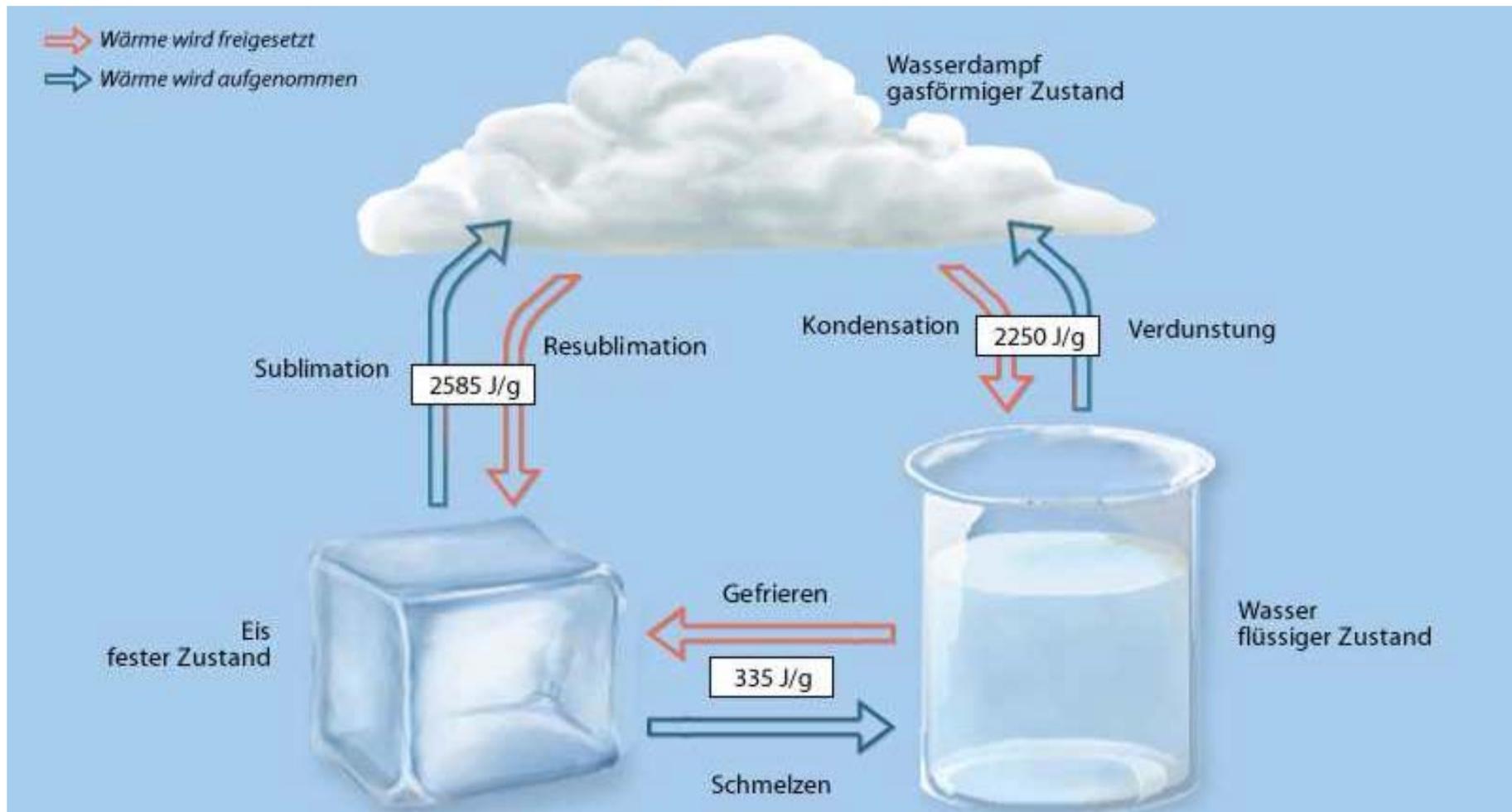
Eine anschauliche Website zur Wasserkraft findet man bei e.on:

Bezugsquelle: [http://www.eon-energie.com/wasserkraft\\_special/start.htm](http://www.eon-energie.com/wasserkraft_special/start.htm) (letzter Abruf 14.07. 2005)

Bilddatenbank, Lexikon und Informationen zum Thema Wasser und Wasserversorgung

Bezugsquelle: [www.wasser.de](http://www.wasser.de) (letzter Abruf 18.07. 2005)

# Energieumsätze



(Energieumsätze nach KARCHER 2003)



## Baustein 1: Demonstration des Wasserkreislaufs im System Erde durch das Dosenexperiment

### ❶ Materialien:

- sechs gleichgroße transparente Gefäße mit transparenten Deckeln (z. B. Kristallisierschalen, Kunststoffdosen)
- ca. 1 Liter destilliertes Wasser (Ionenaustauscherwasser)
- Lebensmittelfarbstoff oder Tinte
- Salz

### ❷ Durchführung:

- I. Füllen Sie das erste Gefäß gut bodenbedeckend mit destilliertem Wasser (Ionenaustauscherwasser)
- II. Füllen Sie das zweite Gefäß gut bodenbedeckend mit destilliertem Wasser, dem der Farbstoff zugesetzt wurde.
- III. Füllen Sie das dritte Gefäß gut bodenbedeckend mit destilliertem Wasser, dem Salz zugesetzt wurde.
- IV. Alle Gefäße werden mit einem transparenten Deckel verschlossen und auf eine Fensterbank an eine sonnige Stelle oder auf einen Heizkörper gestellt. Zur Überprüfung dienen Vergleichsgefäße (Blindproben) an einem kühlen Platz.

### ❸ Aufgaben:

- 1) Beschreiben Sie Ihre Beobachtungen. Erläutern Sie die verschiedenen Prozesse und damit verbundenen Energieumsätze.
- 2) Worin bestehen die Unterschiede zwischen dem „Dosenexperiment“ und dem globalen Wasserkreislauf?
- 3) Erstellen Sie ein Schema zum Wasserkreislauf.

## Baustein 2: Gruppenpuzzle zum Wasserkreislauf

### ❶ Materialien:

- Für jede/n Schüler/in jeweils einmal
  - unliniertes Papier etwa DIN - A5, Bleistift und Radiergummi
  - Arbeitsbogen „Beurteilungsbogen für Gruppenarbeit“ (Modul 3, Baustein 6, Material 4)
  - optional: Information „Gruppenpuzzle“ (Modul 3, Baustein 6, Material 5)
- Für jede Arbeitsgruppe maximal 5 Schüler/innen, jeweils einmal
  - Arbeitsbogen „Gruppenpuzzle zum Wasserkreislauf“ (Modul 6, Baustein 2, Material 2)
  - für die Posterstellung dicke Faserstifte in verschiedenen Farben und ein Papier etwa in der Größe DIN A 0
  - Arbeitsbogen „Arbeitsbericht für Gruppen“ (Modul 3, Baustein 6, Material 3)

### ❷ Allgemeine Informationen:

Wasser ist unverzichtbar. Pflanzen wachsen nur dort, wo es auch Wasser gibt und auch Tiere können ohne Wasser nur wenige Stunden bis Tage überleben. Das gesamte Wasser der Erde steht über einen globalen Kreislauf in Verbindung. Dabei wechselt das Wasser mehrmals seinen Aggregatzustand und durchläuft die einzelnen Sphären der Erde. Wasser verdunstet besonders aus den Meeren. Dadurch bilden sich Wolken, die vom Wind auch über Land getragen werden. Regen und Schnee speisen die Flüsse und Gletscher. Ein Teil der Niederschläge versickert im Boden, wo er das Grundwasser speist. Da die Wassermenge der Erde gleich bleibt, geht im Wasserkreislauf kein Wasser verloren.

Übersicht der Themen der **Expertengruppen** für das Gruppenpuzzle zum Wasserkreislauf:

- Gruppe 1: Ozeane und Verdunstung
- Gruppe 2: Wolken als Wasserspeicher der Atmosphäre
- Gruppe 3: Sonne und Niederschlag
- Gruppe 4: Der Wasserkreislauf auf dem Festland
- Gruppe 5: Die wichtigsten Süßwasserspeicher der Erde: Grundwasser und Gletscher

### ❸ Aufgaben:

- 1) Bestimmen Sie eine/n Moderator/in, der/die die Erfüllung des Arbeitsauftrages in der vorgegebenen Zeit überwachen soll. Nutzen Sie dafür das Material „Arbeitsbericht für Gruppen“ (Modul 3, Baustein 6, Material 3).
- 2) Erarbeiten Sie sich Wissen zum Thema Wasserkreislauf in **Expertengruppen**. Verteilen Sie hierfür die diesem Material beigefügten Texte in Ihrer Gruppe.
- 3) Erstellen Sie anschließend mit Ihrer **Stammgruppe** ein Poster mit einem Stoffflussdiagramm zum Wasserkreislauf und beschriften Sie die einzelnen Prozesse sowie Wasserspeicher auf Ihrem Poster. Die Poster sollen anschließend im Klassenverband vorgestellt und diskutiert werden.
- 4) Abschließend soll die Gruppenarbeit reflektiert werden. Hierfür sollen Sie das Material „Beurteilungsbogen für die Gruppenarbeit“ (Modul 3, Baustein 6, Material 4) verwenden.

## Expertengruppe 1: Ozeane und Verdunstung

### Ozeane als Wasserspeicher

Wasser ist ein wichtiger Bestandteil des Systems Erde, und besonders für die Lebewesen ist Wasser überlebenswichtig. Die Erdoberfläche wird zu ca. zwei Drittel von Wasser bedeckt. Das gesamte Wasser der Erde steht über einen globalen Kreislauf in Verbindung. Die Ozeane spielen dabei eine wichtige Rolle: Das Volumen der Weltmeere entspricht 96,53 % der gesamten Wasserreserven der Erde (s. Tab. 1). Somit bilden die Ozeane den größten Wasserspeicher der Erde.

Die Verweildauer des Wassers im Ozean lässt sich durch die Messung der Verdunstung an Beispielflächen ermitteln und global hochrechnen. Im Durchschnitt verdunsten jedes Jahr über 400.000 km<sup>3</sup> Wasser aus den Ozeanen. Mit Hilfe dieses Wertes lässt sich ausrechnen, dass es etwa 3.300 Jahre dauern würde, bis das gesamte Wasser des Ozeans verdunstet wäre, falls es keinen Wasserkreislauf gäbe (1338 Millionen km<sup>3</sup> : 0,4 Millionen km<sup>3</sup> / Jahr = 3345 Jahre). Aus dieser Rechnung ergibt sich weiterhin, dass die durchschnittliche Verweildauer eines Wassermoleküls im Ozean durchschnittlich mehr als 3.000 Jahre beträgt (s. Tab. 1). In der oberen, ca. 200 m mächtigen Warmwasserschicht, beträgt die Verweildauer immerhin durchschnittlich noch etwa 200 Jahre (FLOHN 1973).

**Tabelle 1: Merkmale der Wasserspeicher der Erde (nach MARCINEK und ROSENKRANZ 1996; BAUMANN et al 1974; KORZUN 1977). Fast der gesamte Wasservorrat ist in den Ozeanen gespeichert (s. graue Unterlegung).**

Speicher	Anteil	Menge	Schichtdicke bei gleichmäßiger Verteilung über einen eingeebneten Erdkörper	Erneuerung (Durchschnittswerte)
Gesamter Wasservorrat der Erde	100 %	1386 Mio. km <sup>3</sup>	2736 m	
gesamtes Salzwasser	96,53 %	1338 Mio. km <sup>3</sup>	2641,82 m	
gesamtes Süßwasser	3,47 %	48,021 Mio. km <sup>3</sup>	94,18 m	
Fließgewässer / Binnenseen	0,014 %	0,19 Mio. km <sup>3</sup>	0,4 m	7,4 / 17 Tage
Bodenwasser / Bodenfeuchte	0,001 %	0,017 Mio. km <sup>3</sup>	0,03 m	390 Tage
Grundwasser	1,69 %	23,4 Mio. km <sup>3</sup>	45,88 m	5000 Jahre
Gletscher, Polareis	1,76 %	24,4 Mio. km <sup>3</sup>	47,85 m	7500 Jahre
Lebewesen	< 0,001 %	0,001 Mio. km <sup>3</sup>	0,002 m	14 Tage
Atmosphäre	0,001 %	0,013 Mio. km <sup>3</sup>	0,025 m	9 Tage
Ozeane	96,53 %	1338 Mio. km <sup>3</sup>	2641,82 m	3345 Jahre

### Verdunstung und Wasserkreislauf

Die Beschreibung des Wasserkreislaufs beginnt man üblicherweise mit der Verdunstung über den Ozeanen. Dort ist die Verdunstung allgemein höher als die Niederschlagsmengen. Da der Wasserhaushalt ständig im Gleichgewicht steht, wandert das verdunstete Wasser durch Wind und Wolken auch auf das Festland.

Die Verdunstung wird durch verschiedene physikalische Faktoren beeinflusst: Je höher die Wassertemperatur, desto höher ist die Verdunstung aus dem Wasserkörper. Die Luft über dem Wasser kann jedoch nur eine gewisse Höchstmenge an Wasserdampf aufnehmen. Diese Menge wird als Sättigungsfeuchte bezeichnet. Sie ist um so größer, je höher die Lufttemperatur ist (s. Abb. 1). Wenn eine Luftmasse die Höchstmenge an Feuchtigkeit aufgenommen hat, also die Sättigungsfeuchte erreicht hat, kommt es bei einer weiteren Verdunstung zur Kondensation.

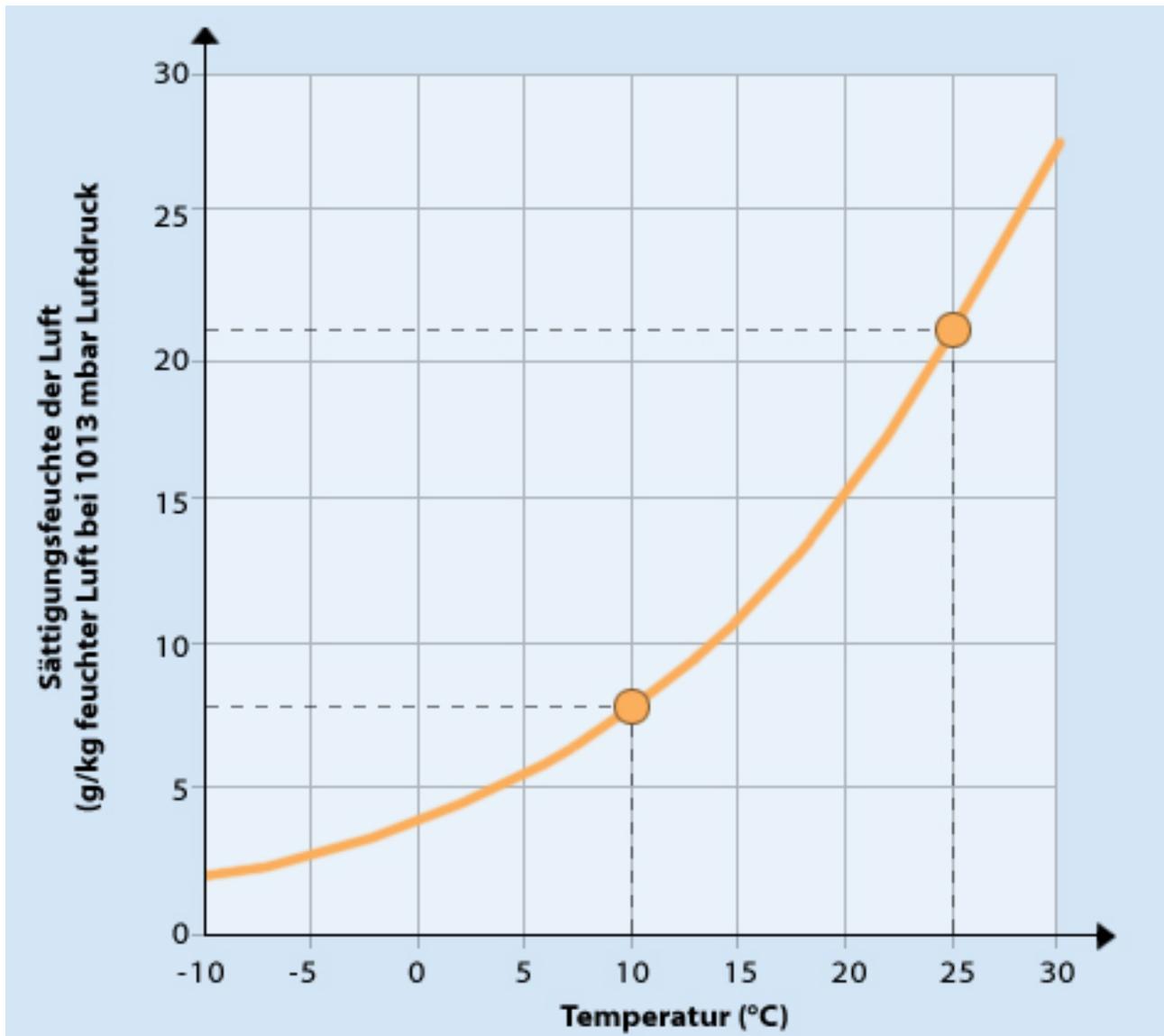
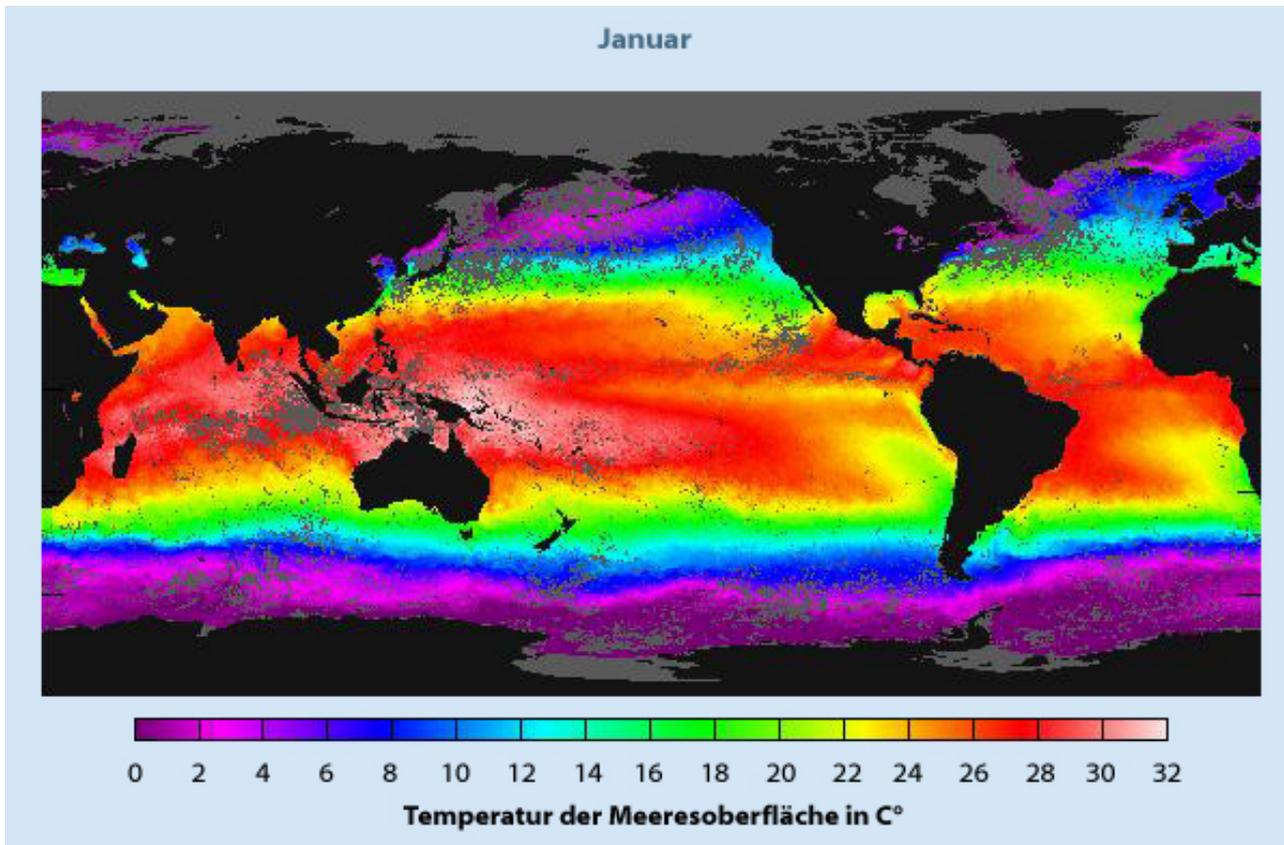


Abbildung 1: Sättigungsfeuchte der Luft in Abhängigkeit von der Temperatur (nach HAECKEL 1999). Luft kann aus physikalischen Gründen stets nur eine bestimmte Höchstmenge an Wasserdampf enthalten. Diese wird als Sättigungsfeuchte bezeichnet und hängt stark mit der Temperatur der Luft zusammen. Mit steigender Temperatur nimmt die Aufnahmekapazität schnell zu: 10 °C warme Luft kann maximal 7,6 g Wasserdampf pro kg aufnehmen, die Sättigungsfeuchte bei 25 °C ist fast dreimal so groß (21 g/kg).

### Unterschiede der Verdunstung in Abhängigkeit von der geographischen Lage

Besonders hohe Werte der Verdunstung werden in den tropischen Ozeanen erreicht. Dort wird ein großer Teil der auf die Erde einstrahlenden Sonnenenergie in den oberen Wasserschichten gespeichert. Daher sind dort die Wassertemperaturen (und die Lufttemperaturen) relativ hoch, was die Verdunstung fördert. Weil die Sättigungsfeuchte mit der Temperatur steigt, kann die Luft im warmen Klima der Tropen viel Wasserdampf aufnehmen. Dazu kommt, dass die tropischen und subtropischen Ozeane weit ausgedehnt sind und das Wasser somit auf großen Flächen verdunsten kann. Daher sind die tropischen und subtropischen Ozeane die entscheidenden globalen Lieferanten des atmosphärischen Wasserdampfs: Zwischen 30° Nord und 30° Süd erfolgt fast 70 % der gesamten globalen Verdunstung (s. Abb. 2).

Da die gesamte Wassermenge des Systems Erde gleich bleibt, sind die Größen Niederschlag und Verdunstung des Wasserkreislaufs miteinander verknüpft. Wenn die Verdunstung über dem Meer bekannt ist und zusätzlich die Niederschlagsmenge über dem Meer gemessen wird, kann berechnet werden, wie hoch die Niederschlagsmengen auf dem Festland sind.



**Abbildung 2:** Oberflächentemperaturen der Meere in Januar 2001. Die Oberflächentemperaturen der Ozeane (SST) werden mit Satelliten ermittelt. Sie können bei wolkenlosem Himmel aus der Wärmestrahlung der Ozeane flächendeckend berechnet werden. Die Verteilung der Wassertemperaturen gibt einen Hinweis darauf, wo die höchsten Verdunstungswerte zu erwarten sind: Je höher die Temperatur, desto höher die Verdunstungsmengen. (Bild: NASA 2005)

### Aufgaben:

- 1) Erläutern Sie die Bedeutung der Ozeane als Wasserspeicher. Erfolgt der Wasseraustausch in den Ozeanen langfristig oder kurzfristig?
- 2) Von welchen Faktoren ist die Verdunstung aus dem Ozean abhängig?
- 3) Wie könnte die globale Verdunstung gemessen werden? Beschreiben Sie die geographischen Unterschiede der globalen Verdunstung.
- 4) Vergleichen Sie die Verdunstung über dem Nordatlantik und über der Sahara. Unterscheiden Sie dabei die tatsächliche und die theoretische mögliche Verdunstungsmenge.



## Expertengruppe 2: Wolken als Wasserspeicher der Atmosphäre

### Atmosphäre als Wasserspeicher und Verweildauer des Wassers in der Atmosphäre

Nur etwa 0,001 % des gesamten Wassers auf der Erde sind in der Atmosphäre gespeichert (s. Tab. 1). Wasser verdunstet besonders aus den Meeren. Dadurch bilden sich Wolken, die sich auch über Land bewegen und somit Wasser weiträumig transportieren. Im globalen Wasserkreislauf sind Wolken das Bindeglied zwischen der Wasseraufnahme in der Atmosphäre über die Verdunstung und der Wasserabgabe durch Niederschläge.

Wenn der gesamte Wasserdampfgehalt der Atmosphäre kondensiert wäre, könnte damit die gesamte Erdoberfläche mit einer 25 mm hohen Wasserschicht bedeckt werden (s. Tab. 1). Auf der Erde fällt ein mittlerer Jahresniederschlag von 1020 mm. Demzufolge muss der atmosphärische Wasserdampf ca. 40 mal pro Jahr vollständig erneuert werden. Das bedeutet, dass jedes Wasserdampfmolekül der Luft im Durchschnitt nur 9 Tage in der Atmosphäre verweilt (FLOHN 1973). Der Umsatz des relativ kleinen Wasserspeichers Atmosphäre ist also enorm hoch, was auch den häufig sehr schnellen Wechsel des Wettergeschehens erklärt.

**Tabelle 1: Merkmale der Wasserspeicher der Erde (nach MARCINEK und ROSENKRANZ 1996; BAUMANN et al 1974; KORZUN 1977). Nur ein sehr kleiner Teil des Wassers befindet sich in der Atmosphäre (s. graue Unterlegung).**

Speicher	Anteil	Menge	Schichtdicke bei gleichmäßiger Verteilung auf einen eingeebneten Erdkörper	Erneuerung
Gesamter Wasservorrat der Erde	100 %	1386 Mio. km <sup>3</sup>	2736 m	
gesamtes Salzwasser	96,53 %	1338 Mio. km <sup>3</sup>	2641,82 m	
gesamtes Süßwasser	3,47 %	48,021 Mio. km <sup>3</sup>	94,18 m	
Fließgewässer / Binnenseen	0,014 %	0,19 Mio. km <sup>3</sup>	0,4 m	7,4 / 17 Tage
Bodenwasser / Bodenfeuchte	0,001 %	0,017 Mio. km <sup>3</sup>	0,03 m	390 Tage
Grundwasser	1,69 %	23,4 Mio. km <sup>3</sup>	45,88 m	5000 Jahre
Gletscher, Polareis	1,76 %	24,4 Mio. km <sup>3</sup>	47,85 m	7500 Jahre
Lebewesen	< 0,001 %	0,001 Mio. km <sup>3</sup>	0,002 m	14 Tage
Atmosphäre	0,001 %	0,013 Mio. km <sup>3</sup>	0,025 m	9 Tage
Ozeane	96,53 %	1338 Mio. km <sup>3</sup>	2641,82 m	3345 Jahre

### Wolkenbildung

Wolken sind Ansammlungen von winzigen Wassertröpfchen, oder bei Temperaturen unter 0 °C, von Eiskristallen. Sie entstehen aus dem in der Luft enthaltenen Wasserdampf.

Die gesamte Wolkenbildung spielt sich in der untersten Schicht der Atmosphäre, der Troposphäre, ab. In dieser Schicht kann die Atmosphäre bis zu 4 Vol % aus Wasserdampf bestehen. Aufgrund von physikalischen Voraussetzungen kann Luft nur eine bestimmte Menge Wasserdampf enthalten; kalte Luft nimmt weniger Wasserdampf auf als warme Luft (s. Abb. 1). Wird die maximale Aufnahmekapazität der Luft („Sättigungsfeuchte“) überschritten, beginnt Wasserdampf zu flüssigem Wasser zu kondensieren. Dies ist z. B. der Fall, wenn feuchtwarme Luft aufsteigt und sich dabei in höheren Schichten der Atmosphäre abkühlt. Es bildet sich Tau oder bei Temperaturen unter 0 °C Reif. Findet der Tau keine feste Oberfläche, an der er kondensieren kann, bilden sich Wolken. In den Wolken schlagen sich die Wassermoleküle an Kondensationskernen (Feststoffteilchen wie Ruß, Staub etc.) nieder und bilden Wassertröpfchen.

Die Auflösung von Wolken geschieht auf umgekehrte Weise: Erhöht sich die Lufttemperatur (z. B. durch Absinken von Luftmassen oder Sonneneinstrahlung), steigt das Wasseraufnahmevermögen der Luft und die Wassertröpfchen verdunsten zu Wasserdampf. Im Allgemeinen haben Wolken eine ausgeprägte Dynamik: Während sie sich auf der einen Seite neu bilden, können sie sich gleichzeitig auf der anderen Seite auflösen.

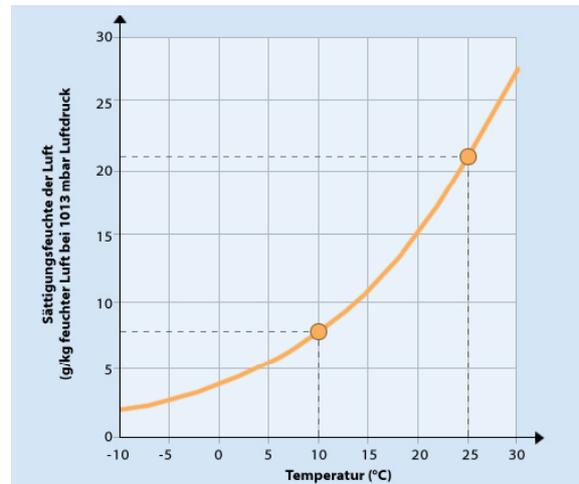
Eine besondere Form von kondensiertem Wasser in der Atmosphäre stellt Nebel dar. Nebel kann als eine Wolke in Bodennähe definiert werden. Die Nebelbildung kann durch verschiedene Prozesse erfolgen. Kühlt eine feuchte Luftmasse zum Beispiel über einem Sumpf in einer kalten Nacht aus, entsteht am Erdboden Nebel. An den Küsten bildet sich Nebel, wenn ein vom Wasser her wehender feuchter Wind mit der Luft über einer kühleren Landfläche zusammentrifft.

Die Ursache der Kondensation des Wasserdampfs ist sowohl bei der Wolken- als auch bei der Nebelbildung das Überschreiten der Wasserdampfaufnahmekapazität der sich abkühlenden Luft. Der wichtigste Faktor für die Kondensation von Wasserdampf ist somit die Abnahme der Lufttemperatur. Jedoch sind auch andere Faktoren wie das Vorkommen von Kondensationskernen von Bedeutung für die Wolkenentstehung. Wasserdampf kondensiert an kleinen, in der Luft schwebenden Feststoffteilchen, die als Aerosole bezeichnet werden. Eine hohe Konzentration der Schwebestoffe in der Luft fördert die Wolkenbildung.

### Faktoren für Wolkenvariationen

Der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre ist in verschiedenen Regionen der Erde unterschiedlich. Der Wasserdampfgehalt der Luft wird vor allem durch die Verdunstung bestimmt. Die Verdunstung wiederum hängt entscheidend von der Temperatur und dem Vorhandensein des Wasser zusammen.

Merkmale der globalen Wolkenbildung und -verteilung lassen sich gut auf Satellitenbildern erkennen. Abbildung 2 zeigt, dass es sich bei den stabilsten globalen Wolkenzonen um die wolkenarmen Wüsten und die wolkenreichen Regenwälder sowie um Teile der Ozeane handelt. Dabei wird der Zusammenhang zwischen der Verdunstung und der Wolkenbildung deutlich: Wo viel Wasser verdunstet, bilden sich auch relativ viele



**Abbildung 1: Sättigungsfeuchte der Luft in Abhängigkeit von der Temperatur (nach HAECKEL 1999).** Luft kann aus physikalischen Gründen stets nur eine bestimmte Höchstmenge an Wasserdampf enthalten. Diese wird als Sättigungsfeuchte bezeichnet und hängt stark mit der Temperatur der Luft zusammen. Mit steigender Temperatur nimmt die Aufnahmekapazität schnell zu: 10 °C warme Luft kann maximal 7,6 g Wasserdampf pro kg aufnehmen, die Sättigungsfeuchte bei 25 °C ist fast dreimal so groß (21 g/kg).

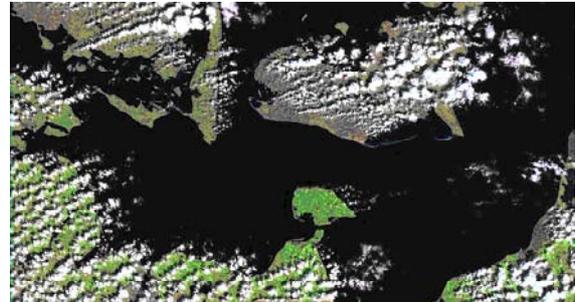


**Abbildung 2: Die Erde aus dem All (Satellitenbild, Meteosat).** Es sind typische Merkmale globaler Bewölkung sichtbar. Deutlich zu erkennen sind die wolkenreichen Tropen, Wolkenarmut über den Subtropen und vor allem über den großen kontinentalen Trockengebieten.



Wolken. Jedoch ist dieser Zusammenhang nicht überall zwingend, da der Wasserdampf durch Wind über längere Strecken in der Atmosphäre transportiert werden kann, ohne dass es zu Kondensation kommt.

Lokal kann beispielsweise an Küsten häufig das Phänomen beobachtet werden, dass über dem Wasser blauer Himmel sichtbar ist, während gleichzeitig über Land reichlich Wolken ziehen (s. Abb. 3). Landflächen bremsen Luftmassen bei auflandigen Winden aufgrund erhöhter Reibung ab, wodurch diese aufsteigen und sich abkühlen. Die Folge ist eine stärkere Tröpfchenbildung in der vom Meer mit Feuchtigkeit gesättigten Luft. Stark unterschiedliche Temperaturen von Land und Wasser können diesen Effekt zusätzlich unterstützen. Ablandige Winde wirken gegenteilig und tragen zur Auflösung der Bewölkung bei. Ähnliche Effekte haben auch Gebirge, welche strömende Luftmassen ebenfalls durch Reibung abbremsen. Die Mächtigkeit sowie die Konsistenz und Verteilung der Bewölkung ändern sich ständig, da Bildung und Auflösung von Wolken dem dynamischen Verlauf und dem Wechsel der Hoch- und Tiefdruckgebiete unterliegen. Aus den Abbildungen 2 und 3 geht hervor, dass typische globale und lokale Wolkenzonen durch besondere geografische Merkmale der Erde entstehen.



**Abbildung 3: Verteilung der Wolken über See und Landflächen. LANDSAT-Aufnahme in der westlichen Ostsee vom 09. April, 09.40 Uhr Ortszeit. Die Wolkenbildung erfolgt nur über Land. Die Windrichtung ergibt sich aus der Längsorientierung der Wolkenbänder. Wolken bilden sich bei auflandigem Wind erst, nachdem die Luft eine gewisse Strecke über Land geweht worden ist. Sie verschwinden bei ablandigem Wind in einiger Entfernung von der Küste. Auch in der Nachbarschaft größerer Binnenseen zeigen sich vergleichbare Phänomene. (Bild: USGS 2001)**

### Aufgaben:

- 1) Beschreiben Sie die Rolle der Atmosphäre im Wasserkreislauf. Erfolgt der Wasseraustausch in der Atmosphäre eher langfristig oder kurzfristig?
- 2) Was sind Wolken? Wie und unter welchen Voraussetzungen entstehen sie?
- 3) Aus welchem Grund verändert sich Bewölkung ständig? Welche globalen und lokalen Variationen kennen Sie? Erläutern Sie die Gründe dafür.
- 4) Beschreiben Sie die Merkmale des maritimen und des kontinentalen Klimas bezüglich der Niederschlagsmengen. Hinweis: Ein maritimes Klima wird überwiegend durch auflandigen Wind vom Meer bestimmt. Dabei ist in den mittleren Breiten das Meer im Sommer kühler und im Winter wärmer als das Festland.



### **Expertengruppe 3: Sonne und Niederschlag**

#### **Die Sonne als Energiequelle für den Wasserkreislauf**

Die Energie der Sonne treibt den Wasserkreislauf der Erde an. Ihre Strahlung bewirkt die Verdunstung von Wasser und zugleich das Aufsteigen des Wasserdampfes in große Höhen. Beim Aufsteigen wird kinetische Energie in Lageenergie (potentielle Energie) umgewandelt. Wenn das Wasser als Regen oder Schnee zu Boden fällt, ein Gletscher sich langsam talwärts schiebt, Schmelzwasser einen Berg hinabstürzt oder das Wasser in einem Fluss zum Meer fließt, wird diese potentielle Energie erneut in kinetische Energie umgewandelt. Die gesamte kinetische Energie der Fließgewässer und der Gletscher stammt letztlich von der Sonne, durch die Wasserdampf in große Höhen transportiert wird. Diese kinetische Energie von Wasser und Eis formt beständig die Erdoberfläche, z. B. durch Erosion. Auch die Energie für Erosion stammt also letztlich aus der Sonne. Das Gleiche gilt für die Energie der Luftbewegungen.

Die Sonneneinstrahlung variiert auf der Erdoberfläche in verschiedenen Breiten und im Lauf eines Jahres sehr stark. Der Wasserdampf, der in großen Mengen besonders über den tropischen Meeren in Äquatornähe entsteht, wird durch den Wind auch in Richtung der Pole transportiert. Der atmosphärische Wasserkreislauf trägt somit dazu bei, Energieunterschiede großräumig auszugleichen.

#### **Niederschlag als Bindeglied zwischen den Wasserspeichern**

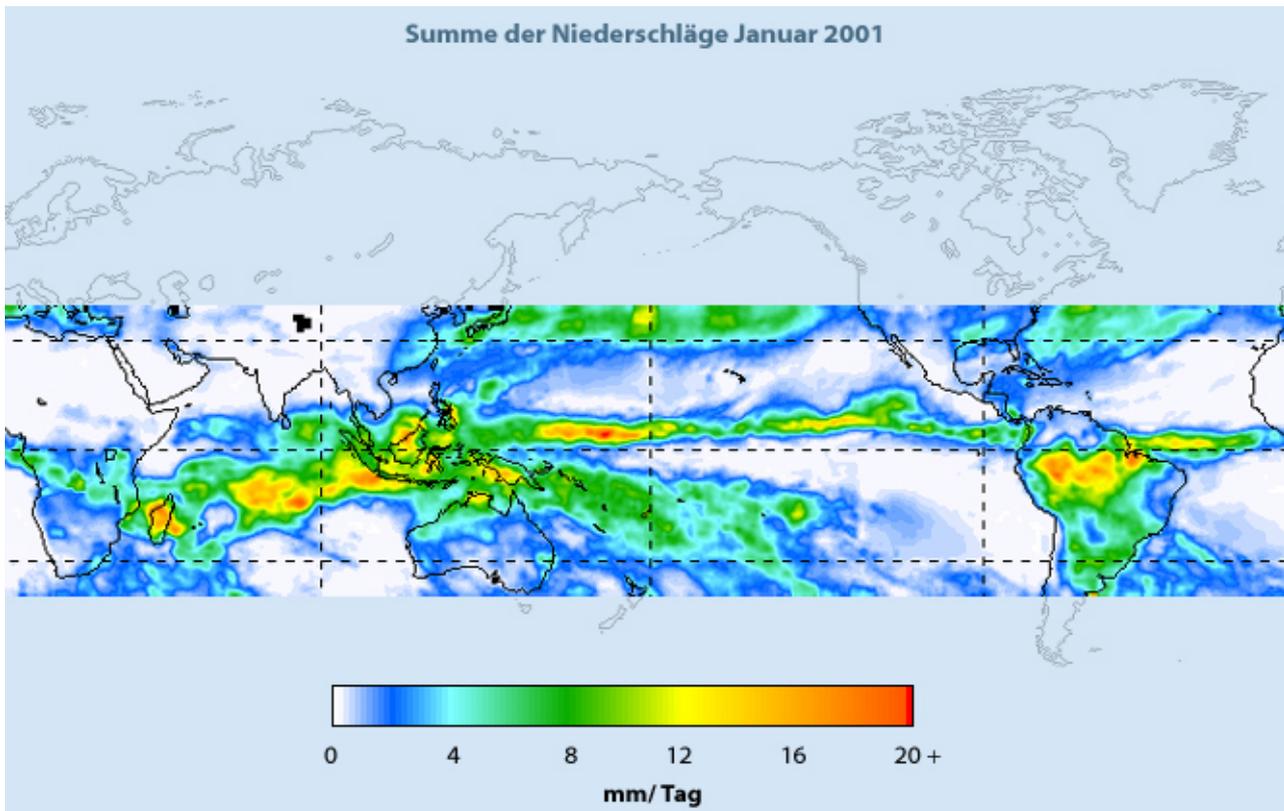
Durch Niederschlag gelangt Wasser aus den Wolken zurück in die anderen Wasserspeicher der Erde. Aus diesem Grund kann der Niederschlag (zusammen mit den Wolken) als Bindeglied zwischen den Wasserspeichern der Erde betrachtet werden. Unter dem Begriff Niederschlag wird jede Form von flüssigem oder festem aus Wolken herabfallenden Wasser verstanden. Dabei kann es sich um Nieselregen, Regen, Schnee, Graupel oder Hagel handeln.

Wolkentröpfchen haben Radien von lediglich 2 - 10  $\mu\text{m}$ , große Regentropfen besitzen Radien von bis zu 2 mm. So werden bis zu  $10^6$  Wolkentröpfchen benötigt um einen Regentropfen zu bilden (HÄCKEL 1999). Zur Entstehung von Regentropfen gibt es zwei Theorien. Nach LANGMUIR entstehen Regentropfen ähnlich wie die Fettaggen in einer Suppe. Auch Wassertröpfchen haben aufgrund ihrer Oberflächenspannung das Bestreben, eine möglichst kleine Oberfläche zu bilden und sich demzufolge mit anderen zusammenzulagern. Wächst der entstehende Tropfen, kann er irgendwann nicht mehr von Aufwinden getragen werden und fällt aufgrund der Schwerkraft zu Boden.

Alfred WEGENER vermutete 1911, dass Eis ein wesentlicher Faktor zur Niederschlagsbildung ist. Kleinste Eiskristalle in den oberen Wolkenschichten ziehen unterkühlte Wolkentröpfchen (flüssiges Wasser unter  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) aufgrund ihres geringeren Dampfdruckes aktiv an, da die Moleküle das Bestreben haben, zum Ort geringeren Druckes zu wandern. Die Eiskristalle wachsen dadurch rasch und fallen durch ihr Gewicht zu Boden. Überschreiten sie die Temperaturgrenze von  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , entstehen Regentropfen. Die Anziehungskraft der Eiskristalle bewirkt ein deutlich schnelleres Wachstum als es aufgrund einer nur zufälligen Zusammenlagerung möglich wäre (HÄCKEL 1999).

#### **Räumliche Variationen der Niederschlagsmengen**

Niederschläge sind keine konstante Größe. Regional, aber auch jahreszeitlich oder im Verlauf mehrerer Jahre können diese mitunter sehr unterschiedlich verteilt sein. Hohe Niederschlagsmengen sind an hohe vorangegangene Verdunstungsraten gebunden. Die ergiebigsten Niederschläge fallen in den inneren Tropen und jahreszeitlich auch noch bis zu den Wendekreisen. Dort ermöglichen hohe Temperaturen eine hohe Verdunstung. Um hohe Verdunstungsraten zu erreichen, muss Oberflächenwasser vorhanden sein. Somit kann über den Ozeanen besonders hohe Verdunstung festgestellt werden (s. Abb. 1).



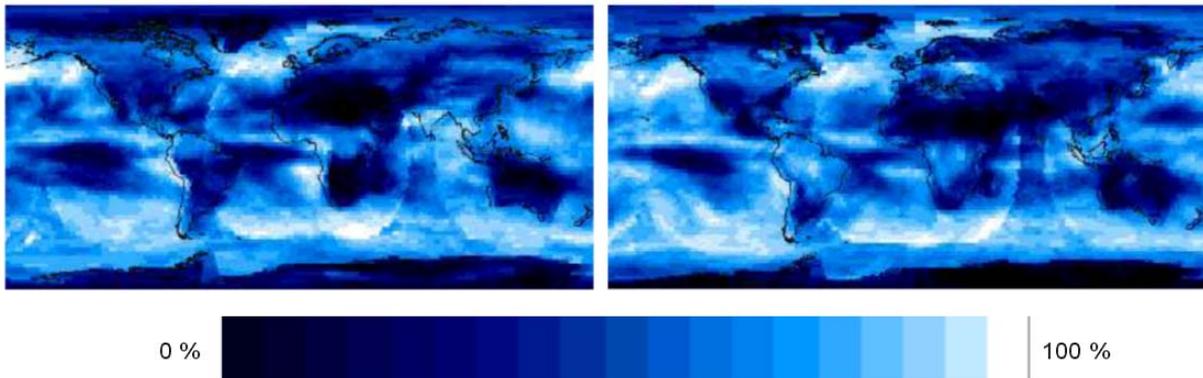
**Abbildung 1: Monatliche Niederschläge in den Tropen im Januar 2001.** Es sind die durchschnittlichen Niederschlagsmengen pro Tag angegeben. Die Daten werden durch den Satelliten der Tropic Rainfall Measurement Mission (TRMM) erfasst. Die Niederschlagsmengen wurden aus täglichen Satellitenmessungen und erdgebundenen Messdaten errechnet. Deutlich heben sich die niederschlagsreichen Innentropen von den niederschlagsarmen Gebieten um die Wendekreise ab. (Bild: NASA 2005, verändert)

Gebiete, in denen im Jahresmittel mehr Niederschlag fällt als Wasser verdunstet, werden als humid bezeichnet. Dort versickert ein großer Teil der Niederschläge ins Grundwasser. Gebiete, in denen die Verdunstung im Jahresmittel höher ist als der Niederschlag, werden als arid bezeichnet. Dort herrscht häufig Wassermangel. Die Grenze zwischen ariden und humiden Regionen wird als Trockengrenze bezeichnet. Als nival gilt eine Region, wenn Niederschläge vorwiegend als Schnee niedergehen. Im Laufe eines Jahres verändert sich das Niederschlags-Verdunstungs-Verhältnis vielerorts. Typisches wechselfeuchtes Klima gibt es zum Beispiel in der Mittelmeerregion.

Durch die Niederschlagsmenge pro Jahr und durch die jahreszeitliche Verteilung der Niederschläge kann das Klima eines Ortes gekennzeichnet werden. Die Aufteilung in aride und humide Gebiete ist dafür ein Beispiel. Auch die Klassifikation der Wetterverhältnisse in ein kontinentales und maritimes Klima bezieht sich u. a. auf die Niederschlagsmengen. In einem maritimen Klima werden hohe Niederschlagsmengen gemessen. Besonders Küstenlandstriche, an denen der Wind landeinwärts weht, sind durch hohen Grad von Maritimität gekennzeichnet. Landflächen bremsen die Geschwindigkeit der Luftmassen bei auflandigen Winden aufgrund erhöhter Reibung ab, wodurch diese aufsteigen und sich abkühlen. Da kältere Luft weniger Wasserdampf aufnehmen kann als wärmere, bilden sich Wolken, in denen sich die kondensierten Wassertröpfchen ansammeln. Der Effekt wird im Winter noch verstärkt, wenn das Meerwasser im Allgemeinen wärmer als das Festland ist. Deshalb sind in einem maritimen Klima Niederschläge in den Wintermonaten häufiger. Die Temperaturunterschiede zwischen Winter und Sommer sind in einem

maritimen Klima eher gering: Das Meer kann viel Wärme speichern und gibt sie langsam an die Umgebungsluft ab.

In einem kontinentalen Klima sind die Winter trocken und sehr kalt, wogegen im Sommer an wenigen Tagen sehr viel Regen fällt. Die heftigen Schauerregen werden durch die starke Erhitzung der Erdoberfläche verursacht. Dann verdunstet viel Wasser und es entsteht eine starke Luftströmung nach oben. Es bilden sich Wolken, die sich sehr weit in die Höhe erstrecken.



**Abbildung 2: Wasserdampfgehalt der Atmosphäre in zwei verschiedenen Monaten 1990. Je heller der Farbton, desto höher der Wasserdampfgehalt. (Bild: NASA 2005)**

### Aufgaben:

- 1) Erläutern Sie die Bedeutung der Sonne und der Niederschläge für den Wasserkreislauf.
- 2) Welche Formen von Niederschlag kennen Sie? Unter welchen Voraussetzungen entsteht Niederschlag?
- 3) Wie können Gebiete nach Niederschlagsmengen klassifiziert werden? Nennen Sie Gründe für globale und lokale Unterschiede der Niederschlagsmengen.
- 4) Betrachten Sie die Abbildung 2. Zwischen der Verdunstung und dem Niederschlag besteht ein Zusammenhang. Um große Wassermengen verdunsten zu können, werden hohe Temperaturen und genügend Wasser benötigt. Diskutieren Sie, ob es auch dort am meisten regnet, wo das meiste Wasser verdunstet. Welches Satellitenbild wurde im August und welches im November aufgenommen?



## Expertengruppe 4: Der Wasserkreislauf auf dem Festland

### Das Festland als Wasserspeicher und die Verweildauer des Wassers auf dem Festland

Auf einer Erde ohne Landflächen gäbe es nur einen einfachen Wasserkreislauf aus Verdunstung, Kondensation und Niederschlag. Das Festland stellt ein zusätzliches Bindeglied im Wasserkreislauf dar und erweitert ihn mit verschiedenen Speichern.

Die Verweildauer des Wassers auf dem Festland ist in Abhängigkeit vom Speicher sehr unterschiedlich (s. Tab. 1). Zudem ist die Verweildauer des Oberflächenwassers erheblichen zeitlichen und räumlichen Variationen unterworfen. Das Festland hat eine wichtige Funktion im Wasserkreislauf als Süßwasserspeicher. Die Tabelle 1 verdeutlicht die unterschiedlichen Größen der einzelnen Speicher. Läge das gesamte in den Lebewesen gespeicherte Wasser als Deckschicht auf der Erdoberfläche, wäre die Schicht nur 2 mm dick. Gletscher und Grundwasser würden dagegen jeweils eine Schichtdecke von über 45 m erreichen.

**Tabelle 1: Merkmale der Wasserspeicher der Erde (nach MARCINEK und ROSENKRANZ 1996; BAUMANN et al 1974; KORZUN 1977). Die Kennzeichen der Speicher des Festlandes sind grau hinterlegt.**

Speicher	Anteil	Menge	Schichtdicke bei gleichmäßiger Verteilung auf einen eingeebneten Erdkörper	Erneuerung
Gesamter Wasservorrat der Erde	100 %	1386 Mio. km <sup>3</sup>	2736 m	
gesamtes Salzwasser	96,53 %	1338 Mio. km <sup>3</sup>	2641,82 m	
gesamtes Süßwasser	3,47 %	48,021 Mio. km <sup>3</sup>	94,18 m	
Fließgewässer / Binnenseen	0,014 %	0,19 Mio. km <sup>3</sup>	0,4 m	7,4 / 17 Tage
Bodenwasser / Bodenfeuchte	0,001 %	0,017 Mio. km <sup>3</sup>	0,03 m	390 Tage
Grundwasser	1,69 %	23,4 Mio. km <sup>3</sup>	45,88 m	5000 Jahre
Gletscher, Polareis	1,76 %	24,4 Mio. km <sup>3</sup>	47,85 m	7500 Jahre
Lebewesen	< 0,001 %	0,001 Mio. km <sup>3</sup>	0,002 m	14 Tage
Atmosphäre	0,001 %	0,013 Mio. km <sup>3</sup>	0,025 m	9 Tage
Ozeane	96,53 %	1338 Mio. km <sup>3</sup>	2641,82 m	3345 Jahre

### Prozesse des Wasserkreislaufs auf dem Festland

- **Verdunstung**

Auf den Landflächen (29 % der Erdoberfläche) erfolgen nur 21 % der globalen Verdunstung (FLOHN 1973). Bei der Verdunstung über Land unterscheidet man zwischen drei Vorgängen. Die Verdunstung an Oberflächen ohne Mitwirkung von Lebewesen, etwa an der Oberfläche eines Sees oder an unbewachsenem Boden, wird als **Evaporation** bezeichnet. Wird Wasser dagegen im Rahmen aktiver Lebensvorgänge verdunstet, spricht man von **Transpiration**. Dazu zählen die Wasserdampfabgabe aus den Spaltöffnungen von Pflanzen oder über die Haut und die Atmungsorgane von Tieren und Menschen. Ist eine Bodenoberfläche bewachsen, laufen beide Vorgänge nebeneinander ab. Man spricht dann von **Evapotranspiration**.

Die Bedingungen für die Verdunstung sind auf dem Festland in Wüsten ideal (starke Sonneneinstrahlung, trockene und warme Luft). Jedoch tendiert dort die tatsächliche Verdunstung wegen des fehlenden Wassers gegen Null. Die Intensität der Verdunstung aus einem Boden hängt von der Bodenart und der Bodenbedeckung ab. Durch die Versiegelung der Flächen wird die natürliche Verdunstung aus dem Boden verhindert. Auch die Abholzung von Wäldern beeinflusst Verdunstungsraten. Gewässer verdunsten



unterschiedlich, je nach dem, wie hoch die Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit sind. Das Wasser aus dem Grundwasser verdunstet nicht und Gletscher verlieren ihre Masse nur minimal durch Verdunsten. Besonders Pflanzen können ihre Verdunstungsrate erheblich beeinflussen. Beim warmen trockenen Wetter schließen sie ihre Spaltöffnungen (Stomata) und vermindern dadurch ihre Transpiration erheblich. Besonders unter solchen Bedingungen wäre aufgrund einer relativ geringen Luftfeuchtigkeit und einer hohen Temperatur eine hohe Verdunstungsrate möglich.

- **Niederschlag**

Die Niederschlagsmengen auf dem Festland sind je nach Region sehr unterschiedlich. Im Laufe eines Jahres verändert sich das Niederschlags-Verdunstungs-Verhältnis ebenfalls vielerorts. Die Niederschlagsmengen werden hauptsächlich durch natürliche Faktoren wie Verdunstung oder Land-See-Verteilung bedingt. Jedoch beeinflusst auch der Mensch die Niederschlagsmengen. Beispielsweise entsteht in den Städten durch Bebauung ein spezielles Stadtklima, das im Sommer starke kurze Niederschläge oder Gewitter begünstigt. Die Stadt wirkt dabei als eine Wärmeinsel im Vergleich zum Umland und bewirkt eine aufsteigende Luftströmung über der Stadt, durch die Wolken gebildet werden. Die Bildung von Regentropfen kann durch die Luftverschmutzung noch gefördert werden, denn die Schmutzpartikel können als Kondensationskerne für Wasserdampf wirken und somit zum vermehrten Niederschlag (oder Nebel) in der Stadt führen.



**Abbildung 1: Der Yangtze an der Mündung in das Ostchinesische Meer. Flüsse wirken auch bedeutend auf die Formung der Erdoberfläche ein, indem sie festes und lockeres Gestein abtragen, es weiter transportieren und schließlich im Meer ablagern. (Bild: NASA 2005)**

- **Abfluss von Oberflächenwasser**

Verdunstung und Niederschlag stehen global im Gleichgewicht, lokal gibt es aber große Unterschiede. Oberflächengewässer entstehen dort, wo die Niederschläge höher als die Verdunstung und die Versickerung sind, oder wo Grundwasser an die Oberfläche tritt (Quellen, Grundwasserseen). Jeglicher Überschuss an Wasser auf dem Land (auch das Grundwasser) fließt letztendlich als Abfluss zurück ins Meer.

Zu einem Überschuss kommt es jedoch nur in den Gebieten, in denen der Niederschlag größer als die Verdunstung und Versickerung ist. Global betrachtet fördern etwa 70 große Ströme ungefähr die Hälfte des Abflusswassers zurück in die Ozeane (s. Abb. 1). In Trockengebieten bilden sich vielfach Endseen ohne Abfluss ins Meer (z. B. das Tote Meer), aus denen das Wasser verdunstet und so über die Atmosphäre wieder Anschluss an den globalen Wasserkreislauf findet.

Die Abflüsse weisen, so wie auch die Niederschläge, jährliche Schwankungen auf. Hochwasser kommt im Rahmen der natürlichen Schwankungsbreite des Abflusses vor. Dieser eigentlich natürliche Vorgang hat heute oft katastrophale Auswirkungen, da er durch Eingriffe des Menschen in den Abfluss, wie Flächenversiegelungen oder Gewässerbegradigungen gefördert wird. Zudem nimmt die menschliche Besiedlung im Hochwasserbereich ständig zu. Die Menschen dort sind besonders gefährdet. Auch kann das Handeln von Menschen zu Niedrigwasser führen. So entsteht in vielen Regionen vor allem durch Bewässerung ein Wassermangel.



Der Abfluss von Oberflächenwasser ist mit der Abtragung, dem Transport sowie der Ablagerung von Fest- und Lockergesteinen verbunden. Die maßgeblichen Faktoren sind dabei Gefälle und Abflussmenge. Die meisten Landschaftsformen vom zerschnittenen Gebirge bis zur aufgeschütteten Marsch sind Resultate dieser Prozesse. So ist der festländische Teil des Wasserkreislaufs ganz wesentlich am Gesteinskreislauf beteiligt.

- **Speicherung des Wassers in Gletschern, Polareis und im Grundwasser**

Im Eis der Pole und in Gletschern ist viel Süßwasser gespeichert. Etwa die Hälfte des gesamten Süßwassers der Erde lagert dort. Allerdings ist dieser Teil dem aktiven Wasserkreislauf weitgehend entzogen. Jedoch kann die durch den Menschen verursachte Erhöhung der mittleren Temperatur der Erde zum Abschmelzen der Gletscher führen, sodass aus den Gletschern wieder viel Wasser freigegeben wird.

Knapp die andere Hälfte des globalen Süßwasservorrates besteht aus Grundwasser. Das Grundwasser füllt die Hohlräume des Gesteins in tieferen Erdschichten zusammenhängend aus. Es speist sich aus versickernden Niederschlägen und Oberflächenwasser und fließt unterirdisch über Jahrzehnte und Jahrhunderte langsam wieder zurück ins Meer. Da das Grundwasser durch den Boden gespeist wird, gelangen viele Stoffe, die an der Erdoberfläche freigesetzt werden, über kurz oder lang auch in das Grundwasser. Die aus dem Boden oder aus der Luft gelösten Stoffe werden über Jahrzehnte, Jahrhunderte oder sogar Jahrtausende transportiert und gespeichert. Das gilt nicht nur für natürlich vorkommende Stoffe, sondern auch für Schadstoffe, die durch menschlichen Einfluss ins Grundwasser gelangen.

### **Aufgaben:**

- 1) Erläutern Sie die Bedeutung des Festlandes als Wasserspeicher. Erfolgt der Wasseraustausch auf dem Festland langfristig oder kurzfristig?
- 2) Nennen und definieren Sie die drei Typen von Verdunstung.
- 3) Was ist typisch für die Verdunstung über dem Festland? Wie unterscheidet sich die Verdunstung über dem Festland von der Verdunstung über Meeresoberfläche?
- 4) Wie ist der Abfluss vom Land ins Meer in den globalen Wasserkreislauf eingeordnet?
- 5) Erläutern Sie, wie der Mensch Prozesse des Wasserkreislaufs beeinflusst.

## Expertengruppe 5: Die wichtigsten Süßwasserspeicher der Erde: Grundwasser und Gletscher

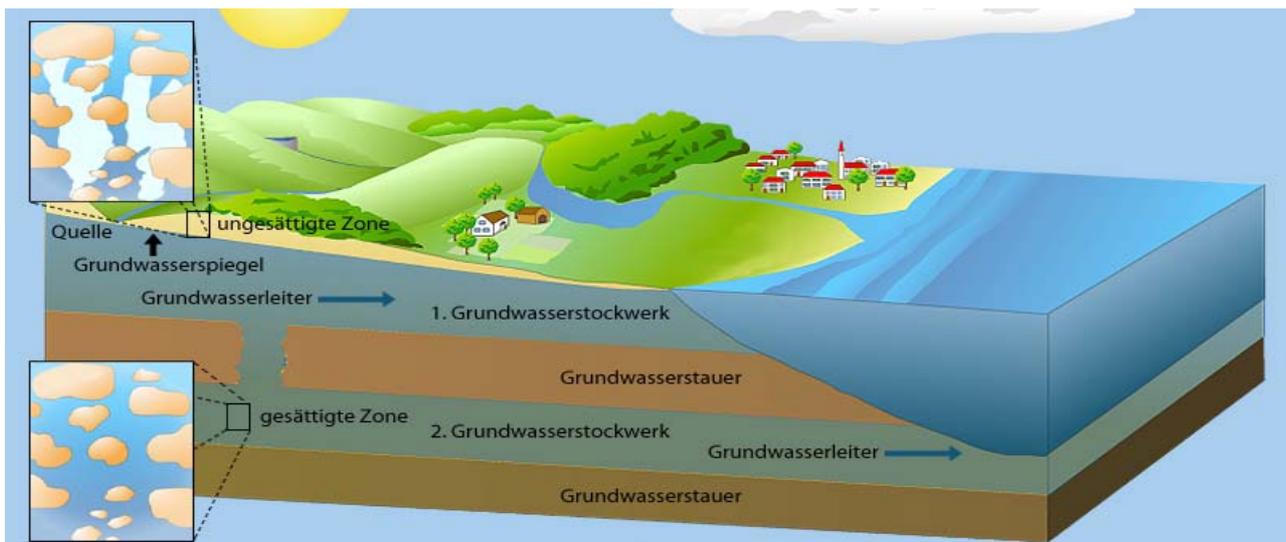
Die Erdoberfläche ist zu zwei Dritteln mit Wasser bedeckt. Mehr als 90 Prozent des Wassers finden sich als Salzwasser in den Weltmeeren. Als Süßwasser bleibt daher nur das Grundwasser, das Wasser der Seen und Flüsse sowie das gefrorene Wasser in Gletschern und Schnee. Dabei sind in Gletschern und Polareis sowie im Grundwasser mehr als 99 % des gesamten Süßwasservorrats der Erde gespeichert, und zwar zu beiden Speichern etwa die gleiche Menge (s. Tab. 1).

**Tabelle 1: Merkmale der Wasserspeicher der Erde (nach MARCINEK und ROSENKRANZ 1996; BAUMANN et al 1974; KORZUN 1977). Mehr als 99 % des Süßwassers der Erde befinden sich im Grundwasser und Polareis (s. graue Unterlegung).**

Speicher	Anteil	Menge	Schichtdicke bei gleichmäßiger Verteilung auf einen eingeebneten Erdkörper	Erneuerung
Gesamter Wasservorrat der Erde	100 %	1386 Mio. km <sup>3</sup>	2736 m	
gesamtes Salzwasser	96,53 %	1338 Mio. km <sup>3</sup>	2641,82 m	
gesamtes Süßwasser	3,47 %	48,021 Mio. km <sup>3</sup>	94,18 m	
Fließgewässer / Binnenseen	0,014 %	0,19 Mio. km <sup>3</sup>	0,4 m	7,4 / 17 Tage
Bodenwasser / Bodenfeuchte	0,001 %	0,017 Mio. km <sup>3</sup>	0,03 m	390 Tage
Grundwasser	1,69 %	23,4 Mio. km <sup>3</sup>	45,88 m	5000 Jahre
Gletscher, Polareis	1,76 %	24,4 Mio. km <sup>3</sup>	47,85 m	7500 Jahre
Lebewesen	< 0,001 %	0,001 Mio. km <sup>3</sup>	0,002 m	14 Tage
Atmosphäre	0,001 %	0,013 Mio. km <sup>3</sup>	0,025 m	9 Tage
Ozeane	96,53 %	1338 Mio. km <sup>3</sup>	2641,82 m	3345 Jahre

## Entstehung und Abfluss des Grundwassers

Grundwasser ist eine besonders wichtige Ressource zur Deckung des menschlichen Wasserbedarfs. Es entsteht durch die Versickerung von Niederschlägen und Oberflächenwasser in den Boden. Es ist definiert als das Wasser, das die Hohlräume im Gestein zusammenhängend ausfüllt und sich nur unter dem Einfluss der Schwerkraft bewegt (KOHFAHL, MASSMANN und PEKDEGER 2005).



**Abbildung 1: Schematische Übersicht des Grundwassers in verschiedenen Bodenschichten (nach SCHULZ et al 2002). Die ungesättigte Zone des Bodens ist sowohl mit Wasser als auch mit Luft gefüllt. Das Grundwasser befindet sich in der gesättigten Zone des Bodens. Die Grenze zwischen der gesättigten und ungesättigten Zone wird als Grundwasserspiegel bezeichnet. Liegt der Grundwasserspiegel direkt an der Erdoberfläche, entsteht eine Quelle und Grundwasser tritt aus.**



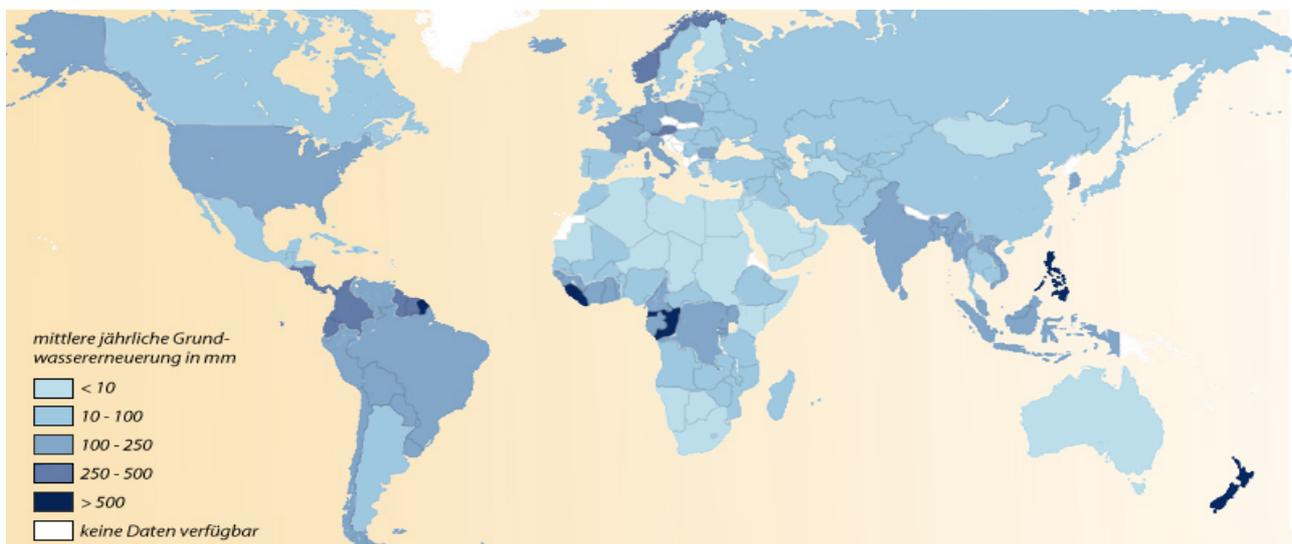
Grundwasser ist nur dort anzutreffen, wo die Bodenporen vollständig mit Wasser gefüllt sind. Je tiefer das Grundwasser in der Erde liegt, desto weniger nimmt es am Wasserkreislauf teil. Auf den Grundwasserabfluss haben verschiedene Gesteinsarten großen Einfluss. **Grundwasserleiter** sind wasserdurchlässige Gesteinsschichten, deren Poren wie die eines Schwammes zusammenhängend mit Wasser gefüllt sind und durch die das Grundwasser hindurchfließen kann (s. Abb. 1). Gute Grundwasserleiter sind grobkörnige Lockersedimente wie Kies und Sand oder auch verschiedene Typen von porösen festen Gesteinen. Diese Schichten werden meist von wasserundurchlässigen Schichten begrenzt, den **Grundwasserstauern** (s. Abb. 1). Dazu zählen feinkörnige Sedimente wie z. B. Ton oder Schluff.

Der Schwerkraft folgend fließt das Grundwasser unterirdisch über Jahrzehnte und Jahrhunderte langsam zurück ins Meer. Die Fließgeschwindigkeit beträgt zwischen wenigen Zentimetern pro Tag in feinkörnigen Sedimentgesteinen und Sanden bis zu einigen hundert Metern am Tag in natürlichen unterirdischen Kanälen. An manchen Stellen tritt das Wasser an Quellen an die Oberfläche.

### Vorkommen des Grundwassers

Grundwasser ist allerorts vorhanden. Jedoch kommt es nicht überall flächenhaft oder oberflächennah vor. Der Mensch kann durch massive Wasserentnahme das Grundwasservorkommen in einem Gebiet längerfristig beeinflussen. Dies kann ein Problem für menschliche Siedlungen vor allem in ariden Gebieten darstellen, wo jährliche Verdunstung höher als die jährliche Niederschlagsmenge ist.

Versickerung von Niederschlägen ist der wesentliche Prozess der Grundwasserbildung. Eine Übersicht der Grundwassererneuerung gibt die Abbildung 2. In ariden Gebieten regnet es sehr selten, und nur 0 – 2 % des ohnehin seltenen Niederschlags tragen zur natürlichen Grundwasserneubildung bei (BOUWER 2002). Das durch Niederschläge gelieferte Wasser verdunstet gleich an der Erdoberfläche oder wird von Pflanzen aufgenommen. In einem gemäßigten humiden Klima (jährliche Niederschläge > jährliche Verdunstung) tragen immerhin etwa 30 – 50 % des Niederschlags zur Grundwassererneuerung bei (BOUWER 2002).



**Abbildung 2: Durchschnittliche jährliche Grundwassererneuerung (nach IGRAC 2005).**

Für die menschliche Nutzung ist auch die Qualität des Grundwassers von Bedeutung. Bereits in der Atmosphäre nimmt Wasser in Form von Regentropfen verschiedene Stoffe auf. Wenn das Wasser durch die oberen Bodenschichten geleitet wird, gelangen weitere Stoffe in das Wasser. Schadstoffe, die durch menschlichen Einfluss in den Boden gelangen, sind besonders gefährlich: Sie werden vom Wasser



aufgenommen und belasten somit das Grundwasser. Solche Schadstoffe sind beispielsweise Pflanzenschutzmittel und Dünger aus der Landwirtschaft, Lösungsmittel aus Industrieanlagen oder Schwermetalle aus undichten Deponien. Bakterien und Viren der Abwässer werden größtenteils vom Boden gefiltert.

### Entstehung und Schmelzen von Gletschern

Die Gletscher sind neben dem Grundwasser der zweite große globale Süßwasserspeicher. Sie sind dem aktiven Wasserkreislauf weitgehend entzogen, da das Wasser als Eis vorliegt. Ca. 10 % der Landflächen der Erde (ca. 15 Mio. km<sup>2</sup>) sind heute von Polareis und Gletschern bedeckt. Von dieser Eisfläche entfallen ca. 90 % auf die Antarktis, 8 % auf Grönland und ca. 2 % auf Hochgebirgsgletscher. Das Gletschereis wird aus Schnee gebildet. Durch die Verdichtung der wachsenden Schneedecke entsteht Firn. Wird der Firn durch Auflast tiefer versenkt und weiter kompaktiert, entsteht Gletschereis. Diese Metamorphose ist nur dort möglich, wo in einem Jahr mehr Schnee fällt als abtaut (nivales Klima). Aus diesem Grund befinden sich Gletscher nur oberhalb der Schneegrenze, also in Polargebieten und in Hochgebirgen.

Die Grenze zwischen Gletscherbildung und Gletscherschrumpfung wird als **Schneegrenze** bzw. **Firmlinie** bezeichnet. Im **Nährgebiet** überwiegt die Ansammlung von Schnee. Dort dehnt sich der Gletscher aus und weiteres Wasser wird gebunden. In einem **Zehrgebiet** verliert der Gletscher durch Schmelzen, Sublimation (Verdunsten von Eis) und Kalben (Abbrechen von Eismassen) mehr von seiner Masse als er durch Schneefall hinzugewinnt (s. Abb.3). Der Gletscher zieht sich zurück und das gebundene Wasser wird freigegeben.

Das Abschmelzen des gesamten globalen Eisspeichers würde den Meeresspiegel um etwa 65 m ansteigen lassen. Die verstärkte Bindung von Wasser als Eis und Schnee in der Saale-Kaltzeit der letzten Eiszeit hat den Meeresspiegel gegenüber dem heutigen Stand um etwa 145 m absinken lassen (MARZINEK 1996, S. 179f).

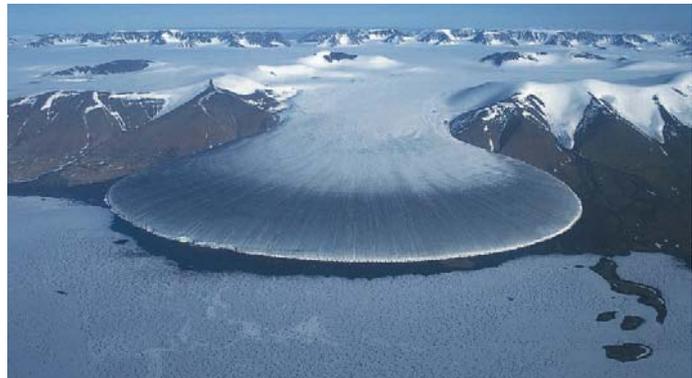
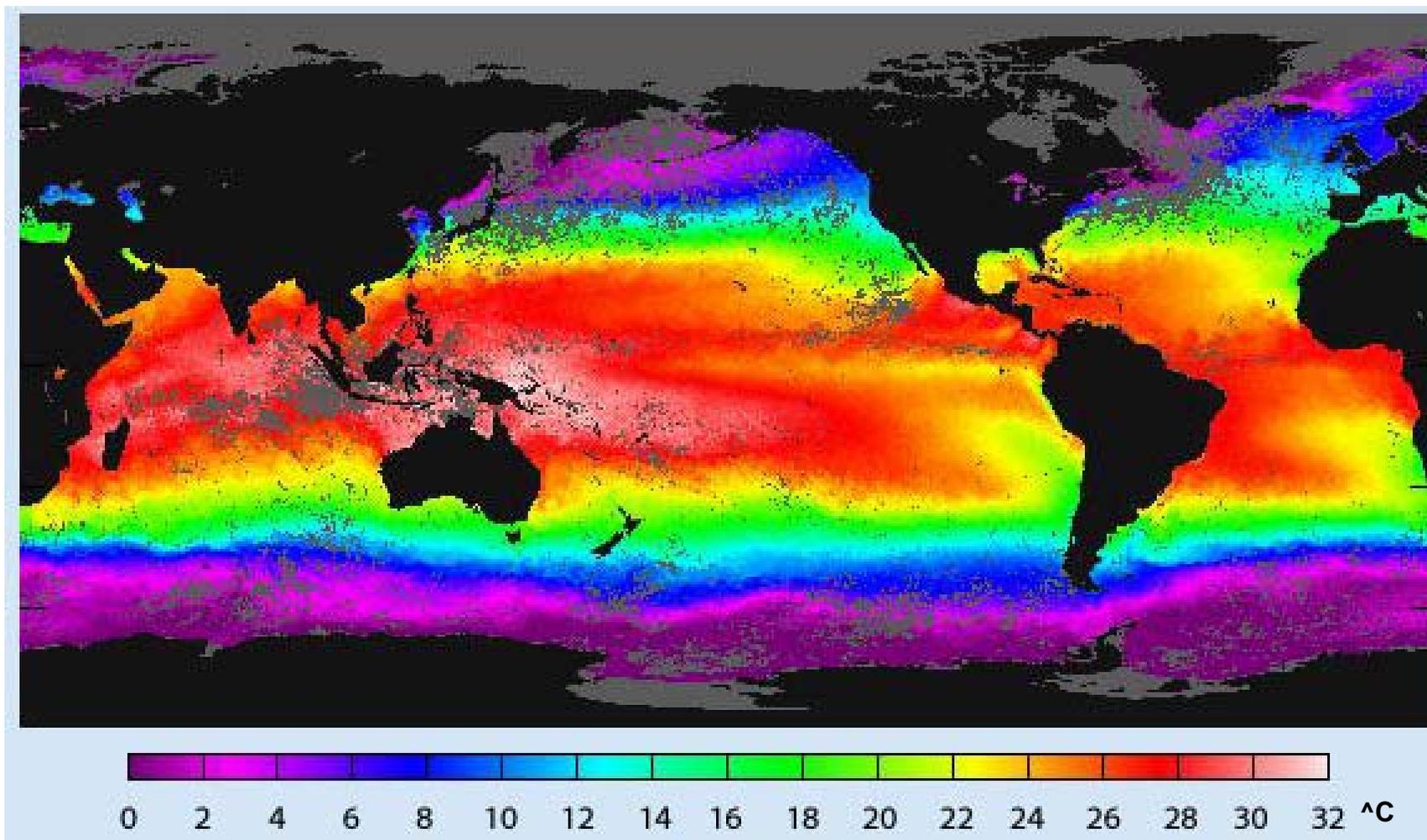


Abbildung 3: Gletscher im Zehrgebiet. Gletscher der hohen Breiten liegen direkt auf Höhe des Meeresspiegels und verlieren Masse durch Kalben (links). Gebirgsgletscher (rechts) fließen durch ihr Eigengewicht langsam talwärts, wo Teile schmelzen. Das Schmelzwasser gelangt in Flüsse und Meer und nimmt damit wieder am Wasserkreislauf teil. (Fotos: I. WOLFF 2003)

### Aufgaben:

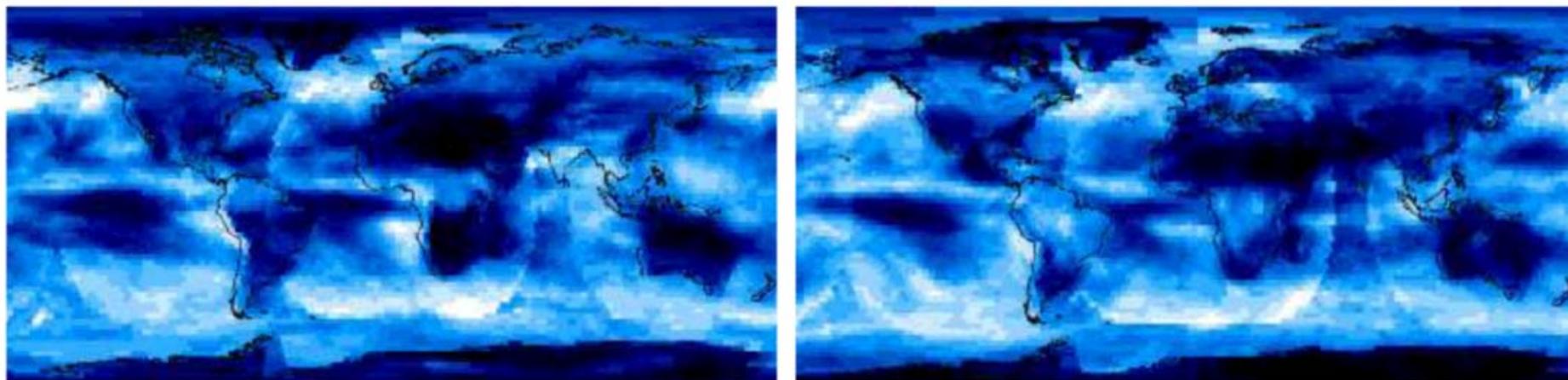
- 1) Erläutern Sie die Bedeutung von Grundwasser und Gletscher als Wasserspeicher. Erfolgt der Wasseraustausch im Grundwasser und im Gletschereis langfristig oder kurzfristig?
- 2) Wie entsteht Grundwasser und was sind die Voraussetzungen dafür?
- 3) Erläutern Sie, wie Gletscher entstehen und unter welchen Umständen sie wieder an Masse verlieren.
- 4) Begründen Sie, warum Trinkwasser ein knappes Gut sein kann.

## Oberflächentemperaturen der Meere in Januar 2001



(Bild: NASA )2005

## Wasserdampfgehalt der Atmosphäre in August (links) und November (rechts) im Jahr 1990



(Bild: NASA 2005)

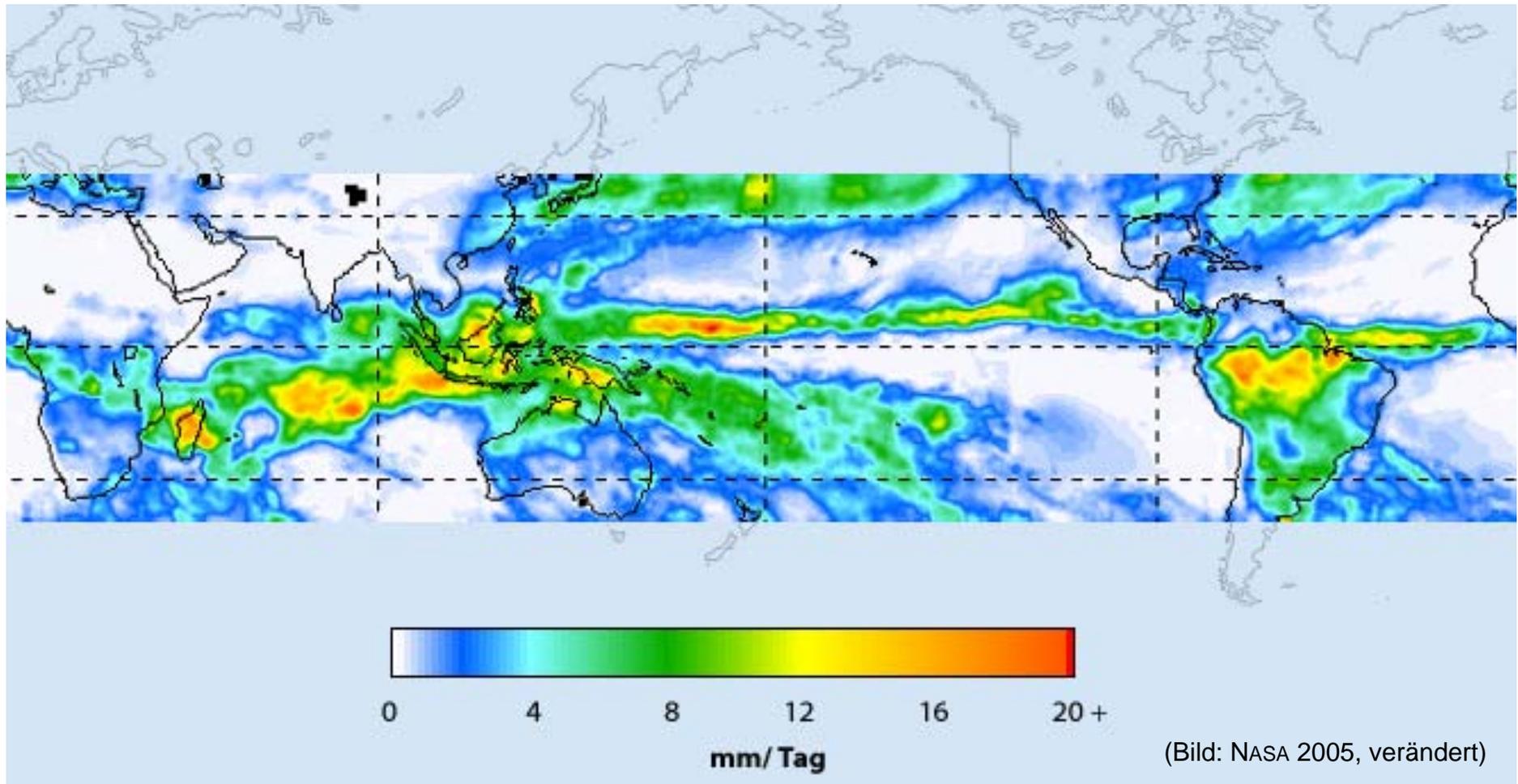


# Die Erde aus dem All



(Bild: NASA 2005)

## Monatliche Niederschläge in den Tropen im Januar 2001

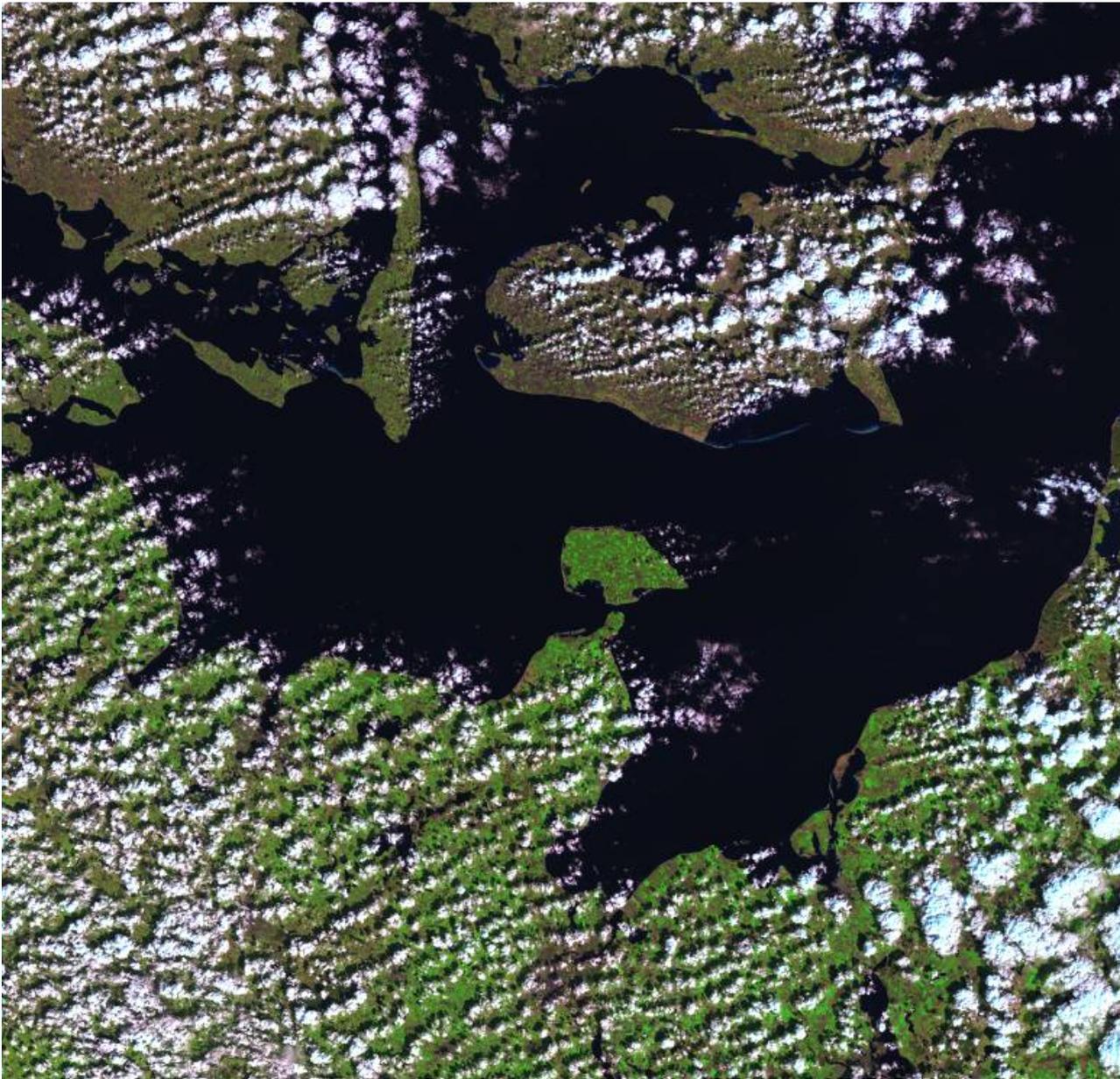


# Der Yangtse an der Mündung in das Ostchinesische Meer



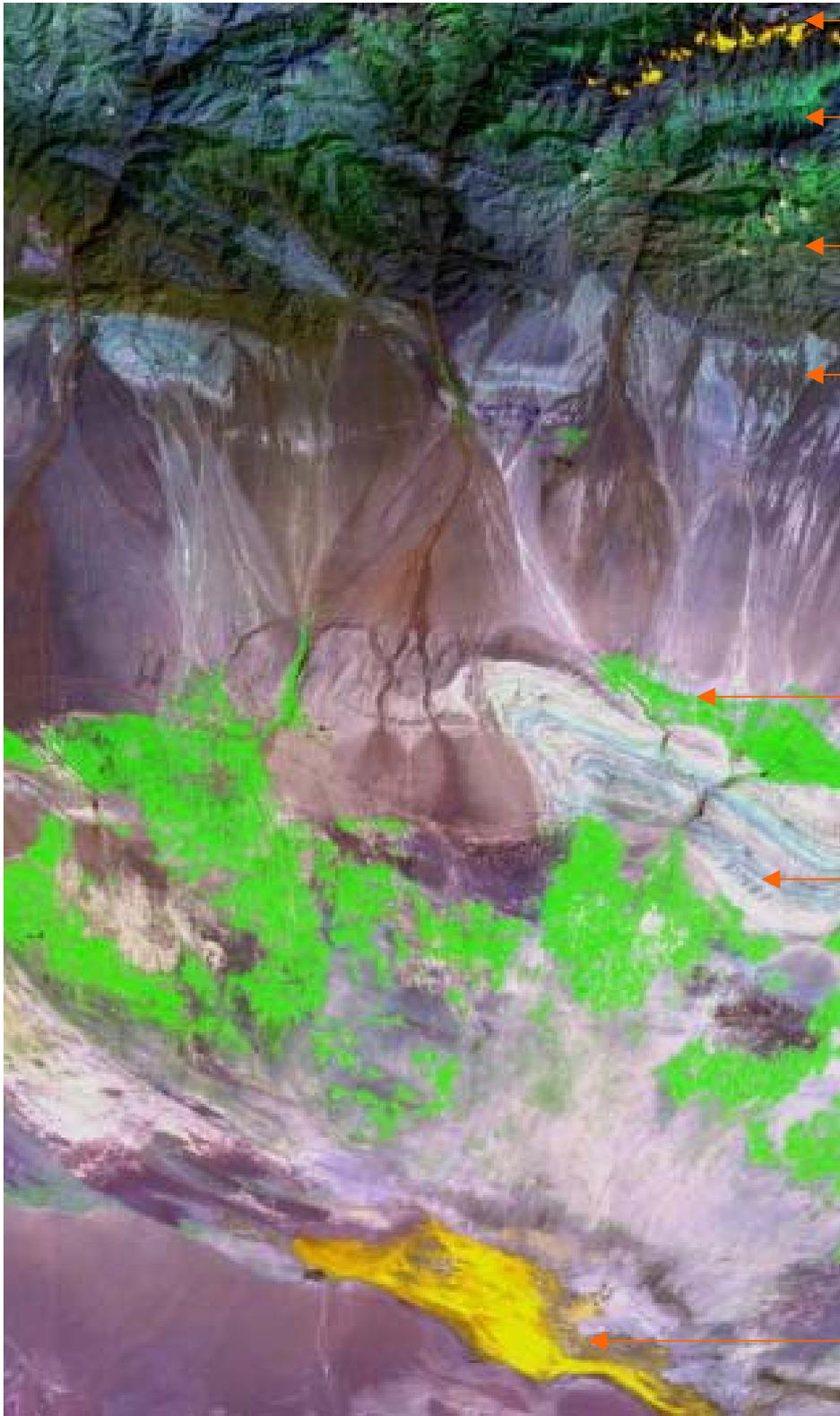
(Bild: NASA 2005)

# LANDSAT-Aufnahme in der westlichen Ostsee vom 09. April 2004, 09.40 Uhr Ortszeit



(Bild: USGS 2001)

# Satellitenbild der Turfansenke



Gletscher  
(gelb)

Wald,  
Grasland  
(grün)

kahles  
Gebirge  
(braun)

Pedimente  
Schotter und  
Geröll mit  
Abflussbahnen  
des Wassers  
unterirdisch:  
Khanate

Oase mit  
Bewässerungs-  
land (grün)

aufgewölbt  
Gestein  
(Antiklinale)

tiefster Punkt,  
Salzflächen,  
bei viel Zufluss  
auch flaches  
Wasser (gelb)

(Bild: NASA 2005)

# Satellitenbild von Bengalen vom 11. November 2001



(Bild: NASA 2005)

### Baustein 3: Wolkenverteilung über Meer und Landflächen

#### ❶ Materialien:

- Atlas (z. B. Diercke Weltatlas, 5. Auflage 2002, Westermann Verlag)

#### ❷ Allgemeine Informationen:

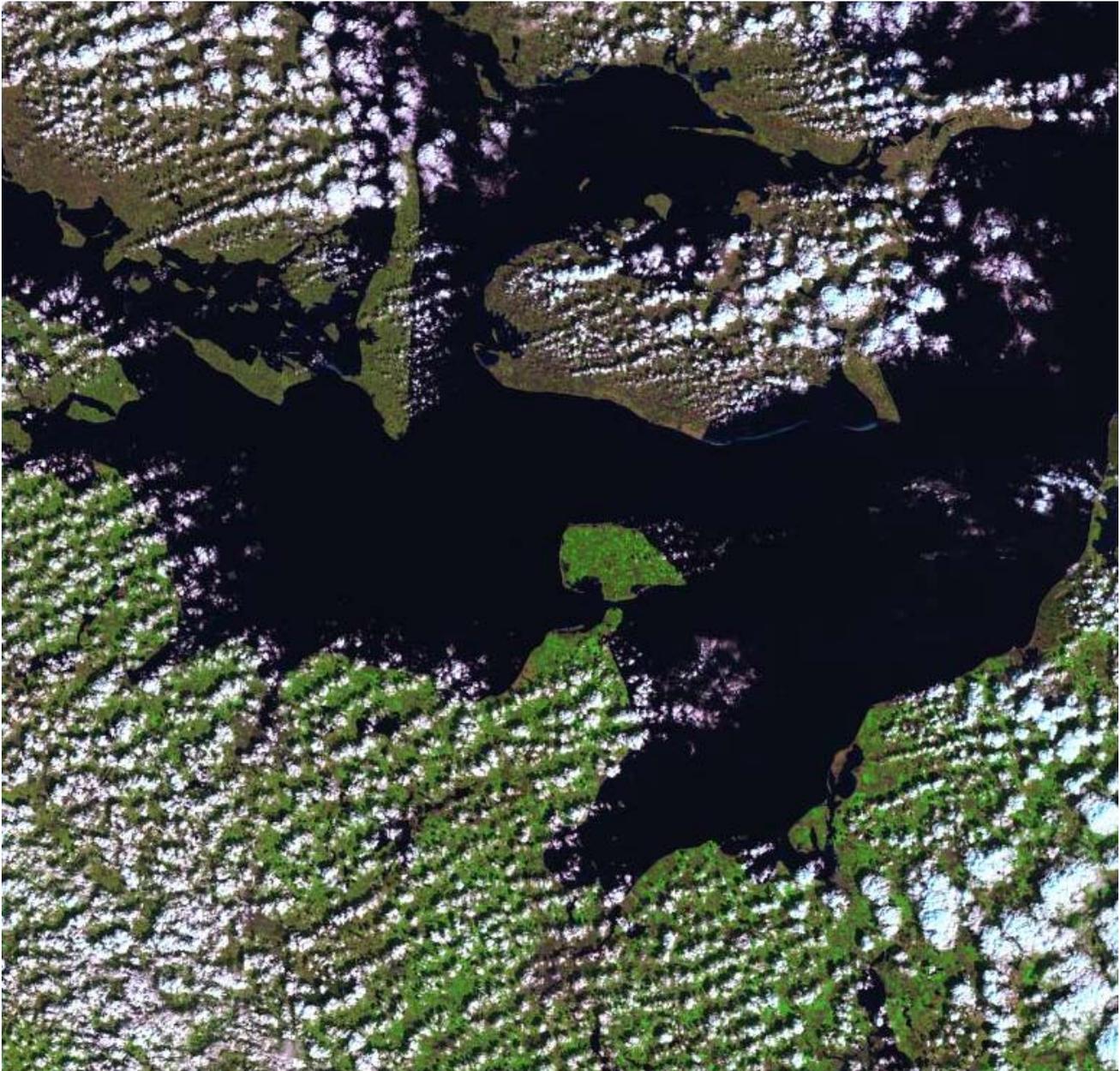


Abbildung 1: LANDSAT-Aufnahme in der westlichen Ostsee vom 09. April 2004, 09.40 Uhr Ortszeit.

Das Bild hat in west-östlicher Richtung einen Streifen von 180 km und zeigt das östliche Schleswig-Holstein und die westliche Ostsee an einem Apriltag.



Die Bewölkung besteht aus einzelnen Cumuluswolken, die in sogenannten Wolkenstraßen angeordnet sind. Diese sind bänderförmig, nahezu parallel zur Windrichtung angeordnet. Sie sind gleichsam Signaturen von Wirbeln mit horizontaler Achse. Wo es dabei zu aufsteigender Luftbewegung kommt, bilden sich die Cumuluswolken, wo es zum komplementären Absinken kühlerer Luft kommt, bleibt ein Streifen wolkenfrei. Die Wolkenstreifen verlaufen in Windrichtung. Die Wolkengröße nimmt dabei seewärts zu, sodass es sich bei der Zirkulation im Querschnitt gesehen gleichsam um Walzen mit wachsenden Durchmesser handelt.

Aus der Breite des Schattenwurfs lässt sich bei bekanntem Elevationswinkel der Sonne auch die Höhe der Wolken abschätzen. Der Elevationswinkel beträgt  $40,94^\circ$ , das Azimuth  $155,76^\circ$ . Wenn man im Bild nun eine im Atlas oder anderen Karten nachmessbare Strecke findet (z. B. Fehmarn), kann man die Schattenbreite an den Wolkenstreifen mittels des Tangens dazu in Beziehung setzen.

Die generelle Frage ist: Warum sind die Wolken so ungleichmäßig über diesen Ausschnitt der Erdoberfläche verteilt und welche Aussagen lassen sich daraus für den Wasserkreislauf ableiten?

### ③ Aufgaben:

- 1) Bestimmen Sie den Durchmesser einzelner Wolken.
- 2) Gibt es eine Regelmäßigkeit bei der Verteilung kleiner und größerer Wolken?
- 3) Was fällt bei der Verteilung der Wolken über den Bildausschnitt auf?
- 4) Suchen Sie dafür eine Erklärung!
- 5) Wie lassen sich die Wolkenstraßen erklären?
- 6) Wie lässt sich die regelmäßige Zunahme der Wolkengröße erklären, die besonders über den dänischen Inseln zu beobachten ist?
- 7) Fehmarn wird als Sonneninsel bezeichnet und wirbt damit im Fremdenverkehr. Gibt das Bild dafür einen Erklärungsansatz?

## Baustein 4: Verbindung von Wasser- und Gesteinskreislauf System Erde

### Beispiel Turfansenke

#### ❶ Materialien:

- Atlas

#### ❷ Tienshan - Turfansenke:

Die Turfansenke, im Westen Chinas bei etwa N 43° E 89° gelegen, stellt mit 150 m die zweittiefste Depression<sup>1</sup> der Erde dar. Depressionen können zum Beispiel durch Absenkung der Erdoberfläche aufgrund von Hohlraumbildung im Untergrund erfolgen. In solche Gebiete kann von höhergelegenen Randgebirgen durchaus Wasser hineinfließen. Es gibt aber keinen Abfluss zum Meer, sodass abflusslose Senken entstehen, die auch als endorheische Gebiete bezeichnet werden.

In der Landsataufnahme der Abbildung 1 ist diese Situation genauer zu erkennen. Im Norden liegt der Tienshan (chinesisch: Himmelsgebirge). Bei seinen Höhen von über 5000 m ist das Gebirge vergletschert. Die Gletscher sind in dieser Aufnahme in gelber Farbe wiedergegeben; das Gelb im Süden des Bildausschnittes stellt dagegen die trockene Salzfläche im Zentrum der Depression dar.

Gletscherschmelzwasser sorgt für einen über das Jahr hin relativ ausgeglichenen Abfluss. Teils durch Gletscher-Erosion, teils durch Erosion des abfließenden Wassers sind tief eingeschnittene Täler entstanden. Das dort abgetragene Material ist vom Wasser in das südliche Vorland des Gebirges transportiert und dort in riesigen Schwemmfächern (Pedimenten) abgelagert worden. Im Untergrund dieser Schwemmfächer zieht ein breiter Grundwasserstrom südwärts. Er wird traditionell in langen Stollen, die im Gefälle gegraben wurden, eingefangen und zur Bewässerung der Oasen genutzt. Es sind dies die Khanate bzw. im westlichen Orient die Foggaras.

Da vom Gebirge zur Senke hin das Gefälle abnimmt und da immer mehr Wasser auch versickert, nimmt die Schleppekraft des Wassers im Gebirgsvorland immer weiter ab. Dies äußert sich darin, dass große Blöcke des erodierten Materials schon am Gebirgsrand abgelagert worden sind und werden, und dass das Material nach Süden hin immer feinkörniger wird. Dort, wo das Grün des Bildes den Oasengürtel anzeigt, ist die Körnung so fein geworden, dass landwirtschaftliche Nutzung – mit Khanat-Bewässerung - möglich ist.

Noch weiter zur Senke hin wird das Material noch feiner, bis schließlich das abfließende Wasser fast nur noch die im Gebirge gelösten Salze transportiert. Diese bleiben dann auf der gelegentlich überfluteten Salztonebene am tiefsten Punkt zurück, wenn das Wasser wieder verdunstet.

So bleibt für die menschliche Nutzung des Raumes nur ein mittlerer Streifen, weit genug vom Gebirge, um hinreichend feines Bodenmaterial zu haben und weit genug von der Senke entfernt, um nicht durch zu hohe Salzkonzentrationen beeinträchtigt zu werden. Auf diese Weise ist entlang des Tienshan eine Kette von Oasen entstanden, die gleichsam Trittsteine für den Verkehr auf der Seidenstrasse in diesem wüstenhaften Abschnitt darstellen.

---

<sup>1</sup> Hohlform, deren Oberfläche unter dem Meeresspiegel liegt.



Gletscher (gelb)

Wald, Grasland  
(grün)

kahles Gebirge  
(braun)

Pedimente  
Schotter und  
Geröll mit  
Abflussbahnen  
des Wassers

unterirdisch:  
Khanate

Oase mit  
Bewässerungsland  
(grün)

aufgewölbtes  
Gestein  
(Antiklinale)

tiefster Punkt,  
Salzflächen, bei  
viel Zufluss auch  
flaches Wasser  
(gelb)

Abbildung 1: Satellitenbild der Turfansenke. Quelle: NASA, Landsat USGS, bearbeitet



### ③ Aufgaben:

- 1) Suchen Sie den Bildausschnitt im Atlas und bestimmen Sie die Entfernung von den Gipfeln des Tienshan bis zum tiefsten Punkt der Senke.
- 2) Versuchen Sie, die Prozesse zu beschreiben, die südlich des Gebirges diese „zertifaserten“ Strukturen (Schwemmfächer) geschaffen haben.
- 3) Überlegen Sie, ob es beim vom Wasser mitgeführten und dann abgelagerten Material eine regelhafte Änderung vom Gebirgsrand zum Zentrum der Senke geben kann und versuchen Sie, diese zu erklären.
- 4) Prüfen Sie, ob die Salzanreicherung im Zentrum abflussloser Hohlformen ein typisches Phänomen ist, erklären Sie es und vergleichen Sie es mit einem salzigen Weltmeer.

## Baustein 4: Verbindung von Wasser- und Gesteinskreislauf System Erde

### Beispiel Bangladesh

#### ❶ Materialien:

- Atlas
- optional: Internetzugang

#### ❷ Bangladesh:

Die Abbildung 1 zeigt einen Ausschnitt aus einer MODIS-Aufnahme<sup>1</sup> vom 15. November 2001. Zu dieser Zeit sind Bewölkung und Niederschlag des Sommermonsuns deutlich zurückgegangen, während noch genug Wasser für ein üppiges Vegetationswachstum vorhanden ist, und zwar nur bis zum vergletscherten Hauptkamm des Himalaya, während nördlich davon, wo wesentlich weniger Niederschlag fällt, die tibetische Hochfläche deutlich vegetationsärmer, ja vegetationsfrei ist und deshalb im Bild bräunlich erscheint.

Am Beispiel des großräumigen Landschaftsausschnitts Himalaya – Bangladesh - Golf von Bengalen lässt sich das Zusammenspiel bzw. der Überschneidungsbereich von Wasser- und Gesteinskreislauf besonders gut verdeutlichen. Der Abschnitt des Wasserkreislaufs über Land, vom Niederschlag über Land bis zum Abfluss ins Meer bildet zugleich einen wesentlichen Abschnitt des Gesteinskreislaufes:

- Der Südwestmonsun trifft auf Land/Gebirge und steigt auf,
- ergiebige und anhaltende Steigungsregen (Monsunregen),
- Abfluss vom Gebirge, Erosion, Materialtransport und Sedimentation, Überschwemmungen im Unterlauf,
- Deltabildung, endgültige Sedimentablagerung im Meer,
- Verdunstung und Wiederholung des Wasserkreislaufs,
- Umwandlung des Sediments im geologischen Gesteinskreislauf.

Das Klima des Gebietes ist ein typisches Monsunklima mit einer trockenen, relativ kühlen Zeit von November bis Februar, einer warmen und trockenen Zeit von März bis Mai und einer regenreichen Zeit von Juni bis Oktober (Sommermonsun). An der Klimastation Cherrapunji/Indien (N 25° 15' E 91° 44' in 1300 m über NN im dem Himalaya südlich vorgelagerten Kashi-Gebirge) fallen ca. 10 800 mm Niederschlag pro Jahr (MÜLLER 1980).

Der Indische Monsun transportiert feuchte Luft aus dem Indischen Ozean nach Norden, wo sie beim Anstieg zum Himalaya, also am Südrand des tibetischen Hochlandes, als Steigungsregen abregnet bzw. in größerer Höhe auch abschnit. So entstehen dort gewaltige Gletscher. Deren Schmelzwasser sowie der Abfluss des Regens strömen aus dem Gebirge nach Süden zum Indischen Ozean.

Die Verbindung von Wasser- und Gesteinskreislauf beginnt damit, dass genügend Wasser für eine intensive chemische Verwitterung des Gesteins vorhanden ist und so die Gesteinszerkleinerung und der nachfolgende Transport vorbereitet werden. Sodann besitzt das Wasser durch die große Meereshöhe, in der es auf die Landoberfläche trifft, eine sehr große potentielle Energie, die dem abfließenden Eis und Wasser seine große Erosionskraft verleiht. (Die gesamte Energie stammt von der Sonnenenergie, die die Verdunstung des

---

<sup>1</sup> MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) ist ein Sensor auf dem Terra-Satelliten, der alle ein bis zwei Tage von jedem Bereich der Erde Aufnahmen in moderater Auflösung (250 m Seitenlänge pro Pixel) machen kann.



Wassers auf der Oberfläche bewirkt hat.) Denn nur ein Bruchteil der kinetischen Energie wird bei den großen Höhenunterschieden und dem hohen Gefälle für die Aufrechterhaltung des Abflusses benötigt. Der ganze Rest wird durch Reibung verbraucht und in Erosion umgesetzt. Das fließende Wasser (und auch Eis) übt eine Kraft auf die Gerinnewandungen, insbesondere die Sohle, aus. Sie wird Schleppkraft genannt. Ihre Größe ist von der Wassermenge und dem Gefälle abhängig.

Durch die Erosion wird ein Gebirge zerschnitten – schon während es sich hebt. Wenn die Hebung größer ist als die Erniedrigung durch Erosion, hebt sich das Gebirge. Das ist beim Himalaya und dem ganzen Hochland von Tibet der Fall gewesen (Kollision zweier kontinentaler Platten!), sodass hier das höchste Gebirge der Welt entstanden ist. Die hohen Gebirgsketten des Himalaya bewirken, dass nur wenig von den feuchten Luftmassen des Indischen Monsuns weiter nach Norden ins Hochland von Tibet gelangt. So ist es dort relativ trocken und die Erosion ist geringer, weil zudem auch das Gefälle nicht so hoch wie in den südlichen Randbereichen ist.

Entwässert wird das Hochland im Bereich des Bildausschnitts durch den Bramaputra (tibetsch Tsangpo), der hier parallel zur Himalaya-Kette von West nach Ost in 3-4000 m Höhe fließt. Beim Austritt aus dem Gebirge hat der Fluss dann nur noch weniger als 200 m Höhe. Sowohl im Hochland von Tibet wie auch anfänglich im Tiefland hat der Fluss lange Abschnitte, in denen er „verwildert“ ist und inmitten zahlreicher Schotterbänke fließt. In solchen Abschnitten wird das vom Fluss an seiner Sohle als Gerinnefracht transportierte Material immer dann abgelagert, wenn die Wasserführung stark nachlässt, was im indischen Monsunklima im jährlichen Rhythmus der Niederschlagsverteilung der Fall ist. Letztendlich gelangt aber alles im Gebirge erodierte Material an der Mündung ins Meer und wird dort in einem riesigen Delta sedimentiert. Man unterscheidet Gerinnefracht und Sedimentfracht. Die Gerinnefracht umfasst alles am Boden des Gerinnes vom Wasser transportierte Material – große Steine, Schotter, Kies, Sand usw.. Im Delta besteht diese Gerinnefracht noch aus mittel- und feinkörnigem Sand. Sie ist offensichtlich hoch, aber nie gemessen worden. Die Sedimentfracht umfasst das in Suspension transportierte Material. Sie ist extrem hoch und erreicht während der sommerlichen Hochwasserzeit Werte von 13 Millionen Tonnen pro Tag (HUH et al 2004)

Die Sedimente werden in Zukunft im Rahmen plattentektonischer Prozesse weiter bewegt und verändert werden (Diagenese und Metamorphose, s. Modul Gesteinskreislauf). Man kann annehmen, dass die Sedimente dann irgendwann als südliches Vorgebirge des Himalaya aufgefaltet werden, möglicherweise so, wie es im nördlichen Alpenvorland mit der Molasse<sup>2</sup> geschehen ist.

Gegenüber den geologischen Dimensionen unbedeutend, aber doch erwähnenswert ist, dass durch Rodung von Wäldern und Zerstörung der Vegetationsdecke im Himalaya in den letzten Jahrzehnten die Erosion und damit auch der Materialtransport deutlich zugenommen haben.

Global gibt es Schätzungen, dass aus den Flüssen unter natürlichen Bedingungen etwa 9.300 Millionen Tonnen pro Jahr ins Meer gelangen, unter Berücksichtigung der menschlichen Einflüsse (Beseitigung der Vegetationsdecke) dagegen etwa 25.000 Millionen Tonnen pro Jahr (MARCINEK und ROSENKRANZ 1980, S.191).

„Erdölbohrungen in den Ebenen des Ganges und des Indus haben gezeigt, dass sich entlang des Himalaya-Südfusses ein bis zu 5 km tiefer und 200 bis 300 km breiter Trog erstreckt, der mit Abtragungsmaterial aus dem Himalaya gefüllt ist. Ein noch viel größerer Anteil des erodierten Materials wurde jedoch im Ganges-Delta, das sich bis nach Sri Lanka ausdehnt, deponiert. Das Gesamtvolumen des während der letzten 40

---

<sup>2</sup> Abtragungsmaterial eines Gebirges.

Millionen Jahre abgelagerten Materials in der Ebene und im Ganges-Delta beträgt ca. 8,5 Millionen Kubikkilometer“. (<http://www.geologie.uni-freiburg.de/root/projekte/bhutan/text/erosion.html>)

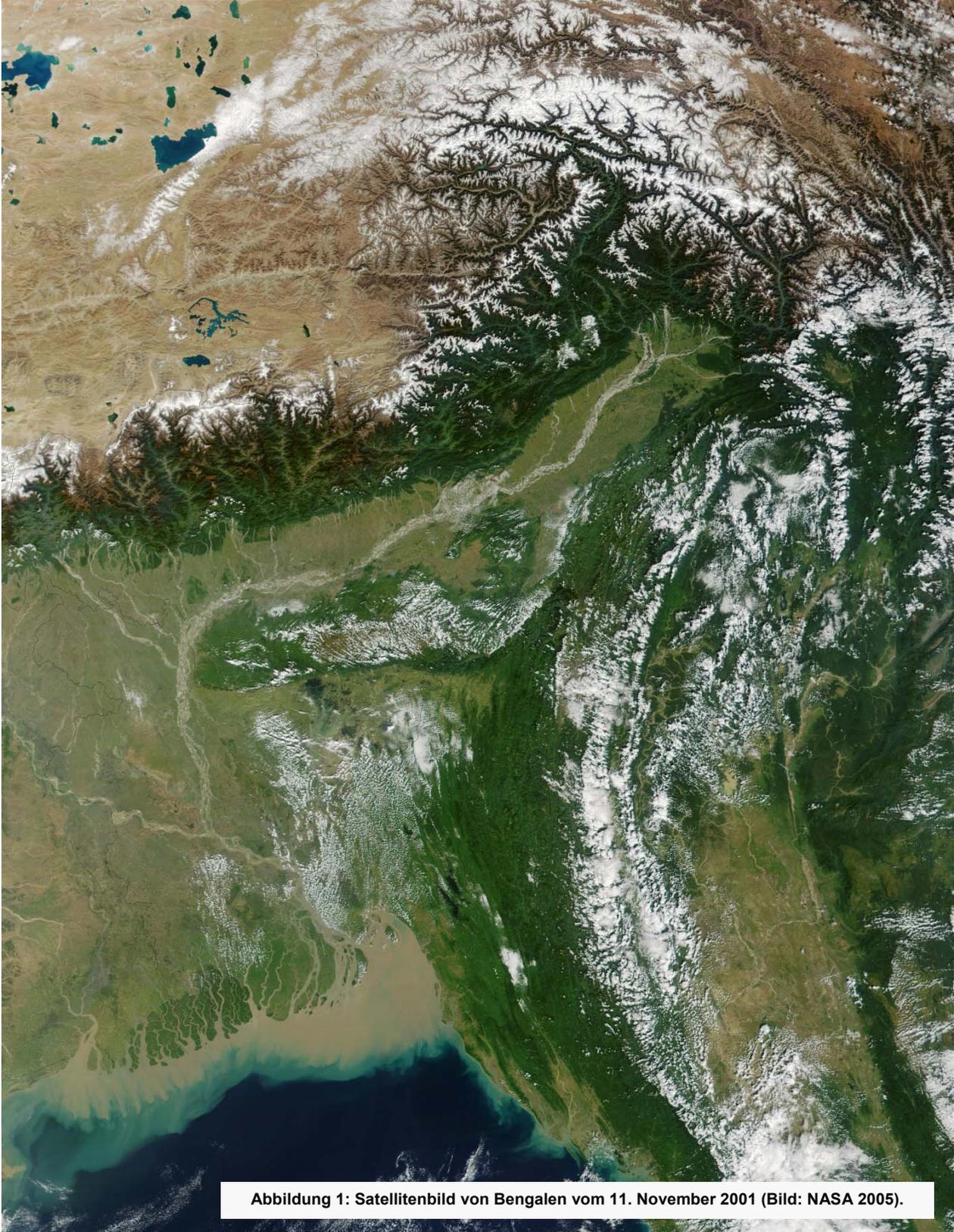


Abbildung 1: Satellitenbild von Bengalen vom 11. November 2001 (Bild: NASA 2005).



## ③ Aufgaben:

- 1) Betrachten Sie das Satellitenbild in der Abbildung 1 und orientieren Sie sich mithilfe einer Atlaskarte darauf. Schätzen Sie durch einen Vergleich mit bekannten Strecken (etwa vom Himalaya-Südrand bis zur Küste) wie breit das Schotterbett des Brahmaputra zwischen Himalaya und Kashi-Gebirge ist.
- 2) Schildern Sie den Teil des Wasserkreislaufes, der hier deutlich wird und als Sommermonsun bekannt ist, und zwar bis zur Flussmündung.
- 3) Schildern Sie den Teil des Gesteinskreislaufes, der hier zu erkennen ist; nehmen Sie dabei gegebenenfalls das Modul „Gesteinskreislauf: Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte“ zu Hilfe.
- 4) Auch in den Himalaya-Staaten hat die Bevölkerung in den letzten Jahrzehnten stark zugenommen. Überlegen Sie, wie sich das auf Erosion und Sedimenttransport auswirken könnte.
- 5) Erläutern Sie den Zusammenhang zwischen der Fließgeschwindigkeit des Wassers und der Ablagerung von mitgeführtem Material im Mündungsbereich des Flusses.
- 6) Wie wird sich die Küstenlinie bei anhaltender Sedimentation entwickeln?
- 7) Wo wird die Küstenlinie in geologischer Vergangenheit gelegen haben?

**Zusatzaufgabe:** Suchen Sie im Internet, insbesondere unter der Adresse <http://visibleearth.nasa.gov/> und der Landesbezeichnung Bangladesh nach weiteren Bildern, die hydrologische Besonderheiten, etwa Überschwemmungen, erkennen lassen.