

Niederschlag und Verdunstung

F. Fiedler, IMK

Einleitung

Die mittleren Breiten der Erde gehören zu den bevorzugtesten Kulturregionen, da sie in erster Linie mit ausreichendem Wasserangebot durch den Niederschlag versorgt werden. Andere Zonen der Erde, insbesondere die Regionen im subtropischen Hochdruckgürtel mit den weit ausgedehnten Wüstenzonen, stellen für den Menschen sehr unwirtliche Gebiete dar. Globale Darstellungen des Wasserdampfes in der Atmosphäre zum Beispiel vom Satelliten Meteosat zeigen, dass im Prinzip überall genügend Wasserdampf vorhanden ist. Die Zirkulation der Luft und besonders die äußerst geringen Vertikalbewegungen, oft im Bereich von einigen Millimetern oder Zentimetern pro Sekunde, die der Horizontalströmung überlagert sind, entscheiden darüber, ob Niederschlag in einem Gebiet fällt oder nicht. Stark vereinfachend kann gesagt werden: Wolken bilden sich, und es kommt zu Niederschlag dort, wo die Luft aufsteigt. Umgekehrt lösen sich die Wolken in den Gebieten rasch auf, wo die Luft in der Atmosphäre absinkt. So einfach sich diese Aussage auch anhören mag, die Bestimmung der Vertikalbewegungen mit physikalischen, d.h. mit den hydrodynamischen und thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten, gehört zu den schwierigsten Aufgaben im Arbeitsgebiet der Meteorologie. Solche Geschwindigkeiten sind direkten Messungen mit heutigen Methoden kaum zugänglich.

Neben der Eigenschaft des Wassers als wichtiger Grundstoff für

das Leben auf der Erde gewinnt es besonders als Energieträger infolge der Phasenumwandlungen im gesamten System seine herausragende Rolle. Um 1 kg Wasser zu verdunsten, werden

$$L = (2.5008 - 0.002372 T) \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$$

(T in °C)

an Energie verbraucht. Wenn der Wasserdampf in der Atmosphäre über 1000 km und mehr transportiert wird, so stellt er in latenter Form einen Energietransport dar. Diese Energie wird in den Regionen, in denen sich aus dem Wasserdampf Wolken und Niederschlag bildet, wieder frei.

Im langjährigen Jahresmittel beträgt der Niederschlag bei einer Gleichverteilung über die Erde 973 mm (nach Angaben von Baumgartner und Reichel, 1975). Zum Vergleich hierzu ergeben sich für Karlsruhe 750 mm und für die Hornisgrunde im nördlichen Schwarzwald etwas mehr als 2000 mm.

In den globalen Mittelwerten ist jedoch ein relativ großer Ungenauigkeitsbereich enthalten, da die Niederschlagsmengen über den Ozeanen nur ziemlich ungenau bekannt sind. Baumgartner und Reichel geben für den Niederschlag über den Kontinenten einen Wert von $111 \cdot 10^3 \text{ km}^3$ und für die Weltmeere $385 \cdot 10^3 \text{ km}^3$ als Niederschlagsmenge pro Jahr an. Eine andere Abschätzung von Dyck und Paeschke (1995) liefert im Vergleich hierzu für den Niederschlag über den Kontinenten $119 \cdot 10^3 \text{ km}^3$ und über den Ozeanen $458 \cdot 10^3 \text{ km}^3$. Da dem Niederschlag von 1 mm d⁻¹ etwa

$28,5 \text{ W m}^{-2}$ an Energieumsatz entsprechen, entspricht dieser Unsicherheit im globalen Niederschlag eine Energieumsetzung von etwas mehr als 6 W m^{-2} .

Da die Auswirkungen der Zunahme der Treibhausgase sich in veränderten Strahlungsflüssen von 2 bis 3 W m^{-2} auswirken, wird hierdurch deutlich, dass die Ungenauigkeit im Energietransport über den Wasserkreislauf etwa doppelt so groß ist wie der Effekt der Treibhausgase. Hieraus ist allein schon ersichtlich, wie dringend notwendig es ist, die Komponenten des Wasserkreislaufs in der Atmosphäre mit höherer Genauigkeit zu erfassen. Denn nur so wird eine verlässliche Abschätzung der Einwirkung des Menschen auf das Klima der Erde erreichbar sein.

Der Niederschlag

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, ist die Niederschlagsbildung in hohem Maße von den Vertikalbewegungen abhängig. An den Konvergenzzonen von Tiefdruckgebieten bzw. den Aufgleitvorgängen von wärmerer über kälterer Luft an Warmfronten bilden sich weit ausgedehnte Niederschlagsfelder aus. Da jedoch etwa die Hälfte des horizontalen Wassertransports der gesamten Atmosphäre in den untersten 1500 m vonstatten geht, macht sich das Geländere Relief sehr stark auf die Niederschlagsfelder bemerkbar. Die Hebung der Luft im Luv von Bergen und das Absinken im Lee erzeugt im langjährigen Mittel eine starke Variabilität des Niederschlags. So machen sich die Absinkbewegun-

gen im Luv des Hunsrücks in einem relativ niedrigen Niederschlagswert von etwa 450 mm Jahresniederschlag im Gebiet von Alzey bemerkbar, während im Südosten von Karlsruhe ein starker Anstieg zur Hornisgrinde hin mit Werten bis zur 2000 mm auftritt.

Der Niederschlag ist aufgrund des starken Einflusses des Geländereiefs aber auch aufgrund der räumlichen Struktur von Konvektionszellen, Gewittern und extremer Sturmzyklonen das am stärksten räumlich variierende Wetterelement.

Das operationelle Niederschlagsmessnetz des Deutschen Wetterdienstes stellt deshalb auch das dichteste Messnetz dar, um eine möglichst verlässliche „Schätzung“ des Niederschlags zu erreichen. Obwohl mit der Verfügbarkeit des nach Hellmann benannten Niederschlagsmessers, einem speziell konfigurierten Auffanggefäß, ein relativ leicht und von Laien handhabbares Gerät verfügbar ist, zeigen viele Anwendungen, dass die Messdichte nicht ausreicht, um eine für alle Belange befriedigende „Schätzung“ des Gebietsniederschlags zu erreichen.

Die Notwendigkeiten, die solche Messgeräte erfüllen müssen, werden häufig unterschätzt. So müssen solche Geräte wegen der großen benötigten Stückzahl vom Preis her finanzierbar sein, sie müssen den über längere Beobachtungsperioden auftretenden extremen Witterungsbedingungen standhalten und funktionsfähig bleiben. Da gerade bei den extremen Wetterphänomenen

wie den Sturmzyklonen und Orkanen mit die intensivsten Niederschläge beobachtet werden, treten häufig Lücken in den Beobachtungsreihen aufgrund von Gerätebeschädigungen auf.

Während in den hochentwickelten Industriestaaten ein noch relativ gut ausgestattetes Messnetz verfügbar ist, sind die Niederschlagsverhältnisse über weite Teile der Erde nur in einer groben Schätzung verfügbar.

Noch schwieriger ist der Niederschlag über den Weltmeeren bestimmbar. Hier spielt er zwar für die wasserwirtschaftlichen Fra-

gen nur eine untergeordnete Rolle, für Fragen des Klimas stellt er jedoch aufgrund der Energieumsetzungen bei der Phasenumwandlung eine extrem wichtige Rolle. Hier begnügt man sich nach wie vor mit wenigen Beobachtungen auf Inseln oder den oft mit erheblichen Fehlern belasteten Schiffsbeobachtungen oder in letzter Zeit auch mit Schätzungen von Informationen vom Satelliten aus.

In Abb. 1 ist eine Erhebung des Niederschlags für den südwestdeutschen Raum anhand klassischer Beobachtungen wiedergegeben. Hier wird besonders deut-

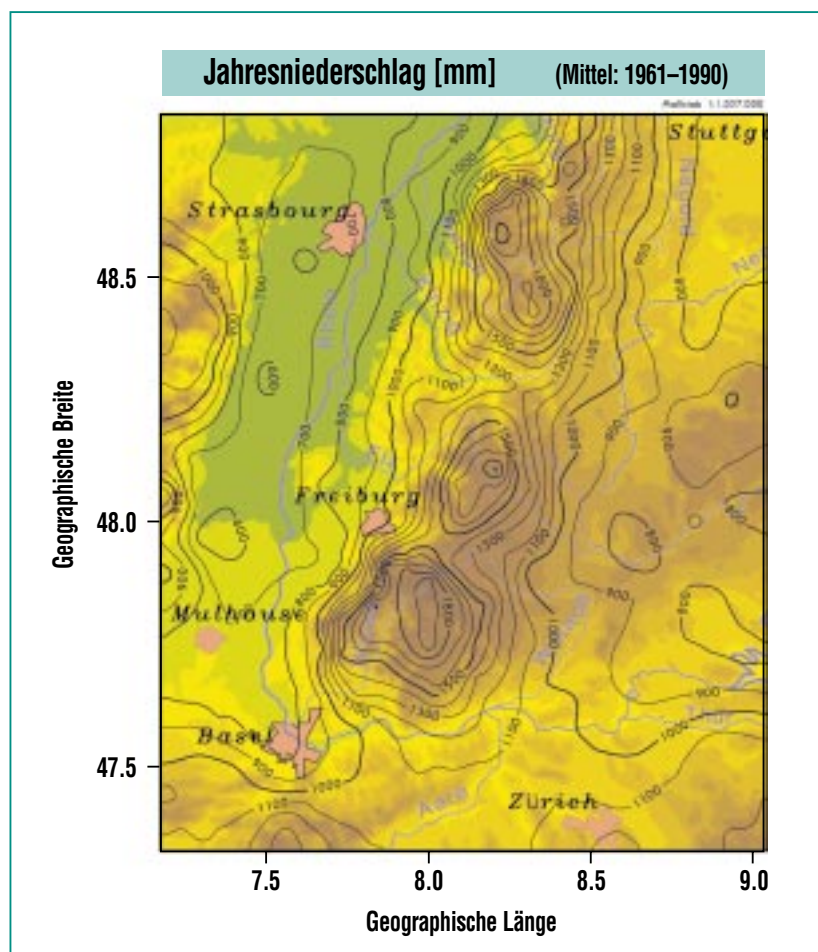


Abb. 1: Mittlere Niederschlagsverteilung in Südwestdeutschland.

lich, welche starken Veränderungen die Mittelgebirgslandschaft am Niederschlagsfeld hervorruft. Insbesondere stellt der Nord-schwarzwald im Gebiet der Horn-schwarzwald im Gebiet der Horn-schwarzwald ein kräftiges Hindernis für die horizontal verlaufenden Luftströmungen dar, das die Luft zum Aufsteigen zwingt, wobei infolge der damit verbundenen Abkühlung der Sättigungsdampfdruck überschritten wird. Daher werden verstärkte Niederschläge ausgelöst. Bei genauer Analyse eines dichten Messnetzes kann man die Wirkung einzelner Bergkuppen und Taleinschnitte erkennen. Um verlässliche Karten des Gebietsniederschlags zu erarbeiten, wurden früher zur Interpolation der an einzelnen Punkten vorliegenden Niederschläge die Höhenlinien des Geländes heran-

gezogen. Inzwischen werden wesentlich aufwendigere Verfahren der Geostatistik verwendet, wobei die Geländeformen und ihre Ausrichtung zu den Hauptströmungsrichtungen als Einflussparameter eingehen. Mit dem sogenannten Kriging-Verfahren wurden beispielsweise wesentliche Verbesserungen in der flächenhaften Darstellung des Niederschlags erreicht.

Verdunstung

Die Verdunstung des Wassers ist in dem Wasserhaushalt der Erde ein wichtiges Glied. Nach der allgemeinen Wasserhaushaltsgleichung gilt:

$$R = V + A + S$$

wobei R der Niederschlag in mm Wassersäule (das entspricht 1 Liter Wasser pro m²), V die Verdunstung, A der Abfluss und S die Speicherung im Boden ist. Die Verdunstung kann direkt aus dem unbewachsenen Boden, von benetzten Vegetationsoberflächen und durch die Pflanzen an den Blattöffnungen (Stomata) erfolgen.

Da für die Verdunstung Energie verbraucht wird, spielt sie auch in der Energiebilanz für die Erdoberfläche eine extrem wichtige Rolle. Vereinfachend kann sogar gesagt werden, dass die mittlere Oberflächentemperatur der Erde nicht direkt durch die Strahlung festgelegt wird, sondern durch die Verfügbarkeit von Bodenfeuchte über die Verdunstung.

Nach der Energiebilanzgleichung der Erdoberfläche gilt:

$$Q + B - H - LV = 0.$$

Hierin ist Q die Strahlungsbilanz des Erdbodens. Sie setzt sich zusammen aus der direkten Sonnenstrahlung, der diffusen Himmelsstrahlung, der thermischen Ausstrahlung des Bodens und der atmosphärischen Gegenstrahlung. B stellt den Wärmestrom in den Boden hinein oder aus dem Boden heraus dar, H ist der fühlbarere Wärmestrom, der durch die turbulenten Strömungsbedingungen hervorgerufen wird und LV stellt den mit der Verdunstung verbundenen Energieverbrauch dar.

In Abb. 2 ist der Tagesgang der Energiebilanz des Bodens für einen typischen Strahlungstag wiedergegeben. Hierin ist die Global-

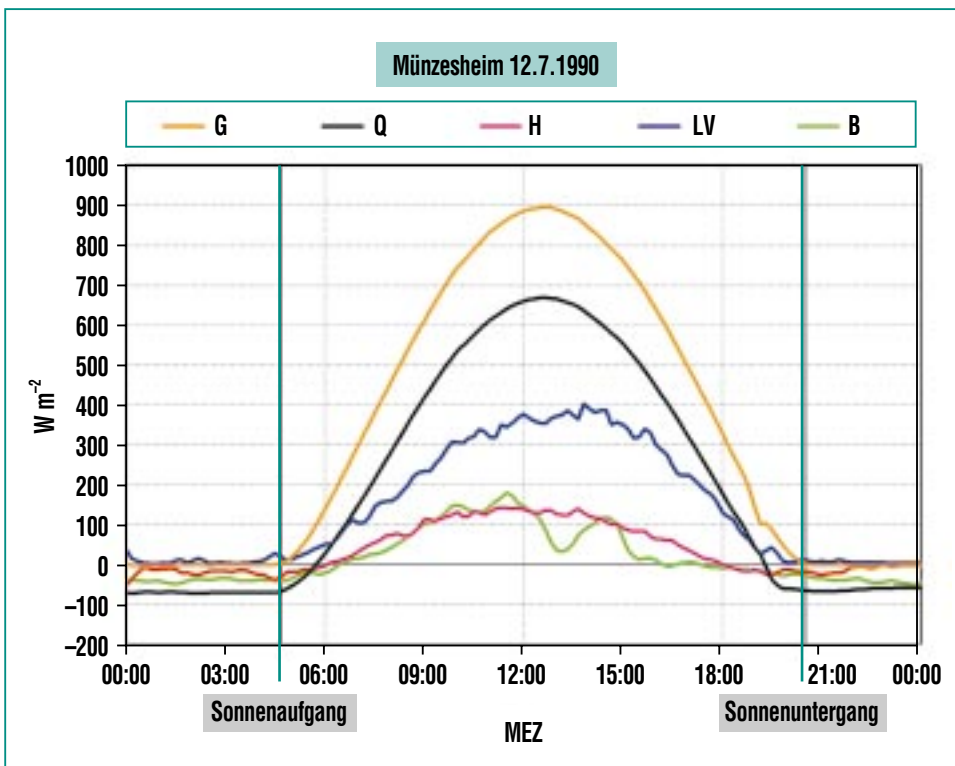


Abb. 2: Gemessener Tagesgang der Energiebilanz des Bodens für einen typischen Strahlungstag.

strahlung G (Summe aus direkter und diffuser Himmelsstrahlung) mit einem Maximum von 900 W m^{-2} um die Mittagszeit festzustellen. Die Strahlungsbilanz erreicht dabei 675 W m^{-2} . Hiervon werden im Maximum 400 W m^{-2} für die Verdunstung verbraucht. Je höher die Verdunstung ist, desto weniger Energie steht zur Verfügung, um den Boden über den Bodenwärmestrom B zu erwärmen. In dem hier angegebenen Beispiel liegen die Werte für den fühlbaren Wärmestrom, der in die Atmosphäre geht und für den Bodenwärmestrom im Maximum zwischen 100 und 200 W m^{-2} .

Zumindest in den mittleren Breiten der Erde und auch überall dort, wo genügend Niederschlag fällt, werden über die Verdunstung etwa 60 Prozent der Strahlungsbilanz verbraucht. Diese Energie wird der Atmosphäre nach einem oft weiträumigen Transport des Wasserdampfes dort zugeführt, wo es zu Kondensation und Wolkenbildung kommt.

Über dem eurasischen Kontinent beobachtet man, dass der Niederschlag etwa siebenmal so groß ist wie der Abfluss. Das bedeutet, der Wasserdampf, der an

der Westseite des Kontinents herantransportiert wird, regnet siebenmal aus und verdunstet wieder, bevor er schließlich durch den Abfluss wieder dem Meer zugeführt wird. Über die gesamte Erde gemittelt, verdunstet das Wasser dreimal, bevor die Wassermenge über dem Abfluss zurück in die Weltmeere gelangt.

Hierin liegt die große Bedeutung des Wasserkreislaufs für das Weltklima. Da bereits mit relativ kleinen Wasserdampfmengen, die nahezu unter der heute vorliegenden Genauigkeit ihrer Erfassung liegen, große Energiemengen transportiert werden, die größer sind als die Veränderungen der durch die Verdoppelung von Kohlendioxid verursachten, liegen hierin die größten Unsicherheiten in der Bewertung der Reaktion der Atmosphäre auf den menschlichen Einfluss.

Schlussfolgerungen

Der Wasserkreislauf und insbesondere der Niederschlag und die Verdunstung stellt für das Leben auf der Erde eine elementare Beziehung dar. Trotz intensiver Forschung in den einzelnen Teildisziplinen wie Meteorologie, Hydrologie, Pflanzenphysiologie,

Geologie, Geographie und Bodenphysik, um nur einige zu nennen, sind nach wie vor enorme Defizite vorhanden, was die Erfassung seiner einzelnen Komponenten betrifft. Hier fehlen immer noch verlässliche Verfahren, um unter allen Bedingungen in allen Regionen der Erde hinreichend genaue Erhebungen vornehmen zu können. Für eine geeignete Vorsorgeforschung müssen jedoch auch Möglichkeiten vorhanden sein, die Prozesse, die für die Niederschlagsbildung und für die Verdunstung verantwortlich sind, physikalisch beschreiben zu können. Trotz der großen Fortschritte, die in den letzten Jahrzehnten hier erreicht worden sind, bedarf es noch großer Anstrengungen, um die z.B. in Wettervorhersage- und besonders in den Klimamodellen erkennbaren Defizite zu beseitigen. In Anbetracht der Zunahme der Weltbevölkerung und der Belastung der Gewässer mit Schadstoffen, die die Verfügbarkeit von Trinkwasser sehr einschränken, liegt hierin eine große Aufgabe interdisziplinären Charakters der Forschung für die Zukunft.

Literatur

A. Baumgartner, E. Reichel, *Die Weltwasserbilanz: Niederschlag, Verdunstung und Abfluss über Land und Meer sowie auf der Erde im Jahresdurchschnitt*, 179 S., München, ISBN 3-486-34751-9, (1975).

S. Dyck, G. Peschke. *Grundlagen der Hydrologie*, 536 S., Verlag für Bauwesen, Berlin, ISBN 3-345-00586-7, (1995).