

## ZUM WASSERVERBRAUCH VON VEGETATION UND WIRTSCHAFT

R. Keller

Mit 1 Abbildung

Wie ein großes Zahnrad bewegt sich der Kreislauf des Wassers, angetrieben von der Energiequelle Sonne, vom Luftraum über die Oberfläche der Erde und wieder zum Luftraum zurück. Wie in einem Uhrwerk werden durch diesen großen Kreislauf viele kleine und kleinste Kreisläufe in Bewegung gesetzt. Der große Kreislauf besteht aus ca. 12 300 km<sup>3</sup> Wasser (= Wassergehalt der Atmosphäre) und dieses große Rad dreht sich 41 mal im Jahre oder alle neun Tage einmal rund<sup>1)</sup>. Wenn nun nicht die ganzen 12 300 km<sup>3</sup> an dem Kreislauf teilnehmen, wie es ja in Wirklichkeit der Fall ist, „da ja nicht alle Schichten der Atmosphäre an der Niederschlagsbildung beteiligt sind“, dann läuft das Rad entsprechend schneller.

Das Wasser fügt auf der Erde zusammen und löst wieder, es ordnet und zerstört und ist dadurch das wichtigste Element für die Gestaltung einer Landschaft.

Alles dieses Wasser ist bestrebt, wieder in den Luftraum zurückzugelangen. Ein Teil bietet sich den Pflanzen an, schafft die Baustoffe für den Pflanzenbau heran, ermöglicht chemische Umsetzungen und wird dann von den Pflanzen dem Luftraum zurückgegeben. Nur einem verhältnismäßig geringen Teil gelingt es, ohne diesen langsamen substanzerzeugenden Weg unmittelbar als nutzlose, unproduktive Oberflächenverdunstung die Atmosphäre zu erreichen. Ein großer Teil des Wassers erreicht über den Abfluß als Fluß- oder Grundwasser das offene Meer, dessen große Oberfläche dann erhebliche Mengen Wasser der Luft zurückgeben kann. Aber auch dieses abfließende Wasser hat seine Arbeit zu leisten, stellt es doch in festem oder flüssigem Zustand das einzige Transportmittel dar, welches der Natur zur Verfügung steht. Die mechanische Verwitterung, soweit sie ohne Wasser auskommt, vermag i. A. mit der Schwerkraft den Schutt nicht weit zu transportieren und der Wind befaßt sich nur mit kleinsten Teilchen (unter 0,1 mm). Alles andere muß das abfließende Wasser transportieren und ordnen, es muß die Verbrauchsstoffe lösen, die das Verbrauchswasser der Pflanzen aufnimmt.

Wenn das Wasser als Wasserdampf in die Atmosphäre zurückgekehrt ist, selbst dann wirkt

es noch zum Segen für die Erde. Es schützt vor schädlicher Strahlung, regelt den Wärmehaushalt und schafft die zum Pflanzenwachstum notwendigen Witterungswechsel.

Die Tatsache, daß das Wasser ein entscheidender Gestalter der Landschaft ist und dabei sowohl an der Bildung der Oberflächenformen als auch am Aufbau des Pflanzenkleides beteiligt ist, macht den Kreislauf des Wassers für den Geographen so reizvoll. Einen ersten quantitativen Überblick über den Wasserhaushalt gibt uns die Landschaft selbst: Auf den Höhen des Rheinischen Schiefergebirges sind Wassermangelflächen weit verbreitet, obwohl die Niederschläge auf großen Flächen 1000 mm übersteigen. Der große Abfluß und vor allem die starke im Boden abwärts gerichtete Wasserbewegung schaffen ausgelaugte (z. B. auf mittlerem Buntsandstein) und flachgründige Böden. Die Nährstoffe und die wasserhaltenden feinen kalkigen und tonigen Bestandteile sind ausgewaschen bzw. von den Höhen in die Niederungen abgeschwemmt, wo sie reichlich Wasser festhalten, so daß das Grünland seinen hohen Wasserbedarf hier gut decken kann. In tiefen Lagen nimmt bei kontinentalerem Klima die Niederschlagshöhe erheblich ab, zudem verschiebt sich das Niederschlagsmaximum auf den Sommer, wodurch der relative Anteil der Verdunstung größer wird. Die im Gebirge abwärts gerichtete Wasserbewegung geht im trockenen Tiefland mehr und mehr in aufwärts gerichtete über, wodurch nährstoffreiche und tiefgründige Böden geschaffen werden, die ein gutes Wasserhaltungsvermögen haben und bevorzugt als Ackerland genutzt werden.

Ein Querschnitt durch ein Tal ergibt folgende Gliederung: Wassermangelgebiete auf den Höhen und an den steileren Hängen; eine Zone mit ausgeglichenem Wasserhaushalt, die meist als Ackerland genutzt wird und schließlich ein wasserreicher Grünlandstreifen in der Talau. Dieselbe Gliederung findet man bei einer großzügigen Zonierung der Flußgebiete am Mittel- und Niederrhein: Wassermangel im Schiefergebirge (auch Industrierwassermangel), das daher vorwiegend durch Wald genutzt wird; ausgeglichener Wasserhaushalt in der Lößzone am Gebirgsrand, wo neben dem Klima auch die große wasserhaltende Kraft des Bodens die Wasserbilanz günstig beeinflusst; schließlich Wasserüberschuß am Niederrhein, wo die Nähe

<sup>1)</sup> W. Meinardus, Die Niederschlagsverteilung auf der Erde. Met. Zeitschr.. 1934. S. 345—350.

des Grundwassers durch neue Quellen, ein dichteres Gewässernetz und das Vorherrschen des Grünlandes angezeigt wird.

Die Anbaukarte gestattet einen weiteren Einblick in die Wasserbilanz: Die an nährstoffreichen Boden gebundene Gerste meidet Wasserüberschuß ebenso wie Wassermangel, ähnlich der Weizen. In den höheren Lagen, wo Wassermangelflächen häufiger auftreten, kommt von den Getreidearten nur noch Roggen hoch, welcher der Trockenheit am besten widerstehen und die Winterfeuchtigkeit des Bodens am schnellsten ausnützen kann<sup>2)</sup>. Hierhin gehört auch die Kartoffel, welche zwar die Bodentrockenheit aber keine Lufttrockenheit ertragen kann. Wo Hafer wächst, ist kein Wassermangel, vielmehr ist dort der Boden meist entwässerungsbedürftig.

Die Natur sagt dadurch schon sehr viel über den Wasserhaushalt der einzelnen Landschaften aus. Nun ist man bestrebt, über diesen qualitativen Einblick hinaus zu einer quantitativen Analyse des Wasserhaushaltes zu kommen. Der Mensch möchte doch erfahren, ob er mit seiner großen wasserbrauchenden Industrie auch eine Rolle im Wasserhaushalt der Erde spielt, ob er durch einen Eingriff in den Wasserkreislauf der Natur Nutzen oder Schaden bringt.

Zur Erfassung des Wasserhaushaltes der Landschaften sind noch drei quantitative Methoden anzuwenden:

1. Die Wasserhaushaltsgleichung  $V = N - A$  (verbessert für kurze Zeiträume  $V = N - A - (R - B)$ <sup>3)</sup>. N und A sind die meßbaren Größen, Rücklage R und Aufbrauch B gleichen sich in längeren Beobachtungsreihen aus. Im Rheinland schwankt N zwischen 600 und 1200 mm (1934 — 43), A variiert zwischen 100 und 1000 mm<sup>4)</sup>, dagegen ist die Schwankung der Verlusthöhe V (Versickerung, Verdunstung) geringer (270 — 525 mm). Diese Schwankung der Verlusthöhe dürfte teilweise dem geologischen Untergrund (Versickerung), teilweise der Vegetation zuzuschreiben sein (worauf Verfasser an anderer Stelle eingehen wird). Hier zeigt sich bereits ein Mangel dieser Methode. Der Wasserverlust setzt sich doch zusammen erstens aus Sickerwasser, welches zum Grundwasser abfließt und den oberflächlichen Abfluß bis zur Meßstelle an der Oberfläche nicht wieder erreicht, zweitens aus der produktiven

Verdunstung (= Transpiration), bei der das Wasser den Weg durch die Pflanzen nehmen muß, ehe es an den Luftraum abgegeben wird und drittens aus der unproduktiven freien Verdunstung an der Oberfläche. Die obige Gleichung gestattet aber nicht, die Anteile der einzelnen Summanden an der Verlusthöhe zu ermitteln. Einen Fortschritt bringt hier

2. Die Lysimetermethode. Lysimeter sind mit Erdboden gefüllte Kästen, deren Wassergehalt durch Wägung jederzeit bestimmt werden kann. Gleichzeitig kann das Sickerwasser gemessen werden. Dadurch ist das Sickerwasser von der Verdunstung getrennt. Es müßte nun noch die Oberflächenverdunstung von der produktiven Verdunstung getrennt werden, um alle wichtigen Größen des Wasserhaushaltes erfassen zu können. Man könnte daran denken, Lysimetermessungen von grasbewachsenen und nacktem Boden miteinander zu vergleichen. Nach Friedrich<sup>5)</sup> (aus Laatsch, 1938. S. 118) verdunsteten im dreijährigen Durchschnitt (1930—1932) jährlich

von grasbewachsenem Boden 366 mm  
(= Transp. + Oberflächenverdunstung)  
von nacktem Boden 178 mm  
(nur Oberflächenverdunstung)

Die Differenz von 188 mm ist aber viel zu niedrig, um als Transpirationsleistung des Rasens angesehen werden zu können. Die Verdunstung der grasbeschatteten und durch Rasen windgeschützten Bodenoberfläche ist nicht so hoch als die des nackten Bodens und beträgt sicher weniger als 178 mm.

3. Die physiologische Methode liefert im Gegensatz zu den bisher genannten Methoden nur Zahlenwerte für die produktive Verdunstung (Transpiration der Pflanzen) und ist daher eine wertvolle Ergänzung der anderen Messungen.

Man kann durch Wägung den Wasserverlust mehrerer Buchenblätter in zwei Minuten bestimmen, mehrmals zu verschiedenen Tages- und Jahreszeiten, bei Schön- und Schlechtwetterlagen; denn die Transpiration und damit der Wasserverlust wird auch nach dem Abpflücken noch fortgesetzt. Den Gewichtsverlust drückt man dann meist in gr pro Gramm Frischgewicht aus.

Alle genannten Methoden haben natürlich Mängel, so daß es zweifelhaft erscheint, ob man überhaupt den Wasserkreislauf mit genügender Genauigkeit quantitativ erfassen kann. Messungen können in jedem Falle nur an einzelnen Punkten angestellt werden. Selbst bei der gro-

<sup>2)</sup> E. Klapp, Acker- und Pflanzenbau, Bln. 1941.

<sup>3)</sup> vgl. W. Wundt, Das Bild des Wasserkreislaufs auf Grund früherer und neuerer Forschungen. Mitt. d. Reichsverbandes d. deutschen Wasserwirtschaft, Nr. 44. Bln. 1938. G. Troßbach u. W. Wundt, Die natürliche Vorratsbildung in unseren Flußgebieten. Arch. f. Wasserwirtschaft Nr. 52, Berlin 1940.

<sup>4)</sup> R. Timmermann, Die Talsperren am Nordrand des Rheinischen Schiefergebirges. Diss. Bonn. 1947. (Maschinenschrift).

<sup>5)</sup> W. Friedrich in Deutsche Forschung, H. 21. (1933) entnommen aus W. Laatsch, Dynamik der deutschen Acker- und Waldböden. 1. Aufl. Dresden u. Lpz. 1938. 2. Aufl. 1944.

ßen Dichte der Niederschlagsbeobachtungen kann man keine Genauigkeit auf 4—5 mm garantieren. Man muß sich auf die große Zahl von Beobachtungen verlassen, welche Fehler ausgleichen soll. Ähnliches gilt für Abflußmessungen, die wegen der wechselnden Fließgeschwindigkeit des Wassers und der fortwährenden Profilveränderungen schwierig durchzuführen sind. Der unterirdische Abfluß kann überhaupt nur schätzungsweise angegeben werden. Lysimetermessungen sind schon bedeutend kostspieliger als Niederschlagsmessungen und können überhaupt nur vereinzelt ausgeführt werden. Dabei müßte aber das Lysimeternetz noch dichter sein als das Netz der Niederschlagsstationen, denn zu den Schwankungen des Niederschlags und des Gesamtklimas kommen nun noch die zahlreichen Abänderungen der Standortbedingungen durch Boden und Vegetation. Das wenige aus Lysimetermessungen vorliegende Material wurde unter ganz bestimmten Boden- und Vegetationsbedingungen gewonnen und läßt sich daher nicht ohne weiteres verallgemeinern. Am besten ist bisher die Verdunstung an freien Wasseroberflächen erforscht, die im Wesentlichen von der Windgeschwindigkeit und dem Sättigungsdefizit der Luft abhängt. J. Schubert<sup>6)</sup> (aus Laatsch 1938. S. 115—116) gibt folgende durchschnittlichen Zahlenwerte an:

	Höhe	Verdunstung =	Sättigungsdefizit	× Windfaktor
Binnenflachland	115 m	350 mm	2,2 mm	16
Norddeutsches Küstengebiet	43 m	340 mm	1,9 mm	18
Mitteldeutsches Bergland	667 m	280 mm	1,2 mm	23

Das Sättigungsdefizit ist hier als der Quecksilberdruck angegeben, der am Sättigungsdruck des Wasserdampfes fehlt. Diese Zahlenwerte können aber nicht mit der Verdunstung der freien oder bewachsenen Landoberfläche verglichen werden. Auf keinen Fall stellen sie eine obere Grenze der Verdunstungsmöglichkeit dar, wie man wohl annehmen könnte, wenn man die Saugkräfte der Pflanzen u. a. übersieht. Die Verdunstungszahlen auf dem Festlande liegen durchweg höher und erreichen z. B. in nassen Wiesen mit Werten über 1000 mm den drei- bis vierfachen Betrag der Verdunstung einer freien Wasserfläche.

Auch die physiologische Methode, die Bestimmung der Transpiration, kann nur Näherungswerte liefern. Bei der Übertragung der an den einzelnen Pflanzen gewonnenen Ergebnisse auf größere Bestände können natürlich Fehler auftreten. Auch sind die Verbrauchszahlen der ein-

zelnen Blattgewichte und Pflanzen sehr unterschiedlich. Aber es hat sich gezeigt, daß zwar die Transpirationzahlen verschiedener Pflanzen große Schwankungen aufweisen, die transpirierte Wassermenge pro Flächeneinheit aber in allen Beständen nahezu gleich ist, wenn nur die erzeugte Pflanzensubstanz auf diesen Flächen gleich groß ist. Es müßte also nur die an verschiedenen Standorten erzeugte Pflanzensubstanz bekannt sein, wenn man zu genaueren Verbrauchszahlen kommen will. Näherungswerte lassen sich unter Zuhilfenahme der Erntestatistik aus der Bodennutzungserhebung errechnen. Leider ist die Zahl der Transpirationmessungen noch sehr gering, aber trotzdem kann diese Methode heute schon wesentlich dazu beitragen, die Größe der produktiven Verdunstung im Wasserhaushalt unserer Landschaften zu bestimmen, zumal ihre Ergebnisse sich gut an die Werte der vorgenannten Methoden anschließen.

#### Der Wasserverbrauch der Vegetation

Der größte Wasserverbraucher in unserem Klima ist die Pflanzenwelt. Zur Erzeugung von 1 Gramm Trockensubstanz müssen 250—1000 Gramm Wasser von der Pflanze dem Boden entzogen und in den Luftraum weitergeleitet werden (Mais 368 g, Weizen 435 g, Kartoffel 636 g, Flachs 1000 g)<sup>7)</sup>. 1 Gramm frisches Buchenlaub würde pro Tag etwa 2,5—2,8 Gramm Wasser abgeben. 1 Gramm Birkenlaub transpiriert täglich sogar 8 Gramm Wasser<sup>8)</sup>. Hieraus könnte man schon schließen, daß die Buche an besseren Boden und damit an nährstoffreicheres Wasser gebunden ist als die Birke, welche sich mit ausgelaugten Böden begnügt. Die Nadelhölzer sind etwas sparsamer als die Laubbölzer. Die Kiefer verbraucht nur etwa 2 Gramm und die Fichte gibt täglich sogar nur 1,5 Gramm Wasser pro Gramm Frischgewicht ab.

Wenn nun alle Wälder gleich viel Substanz erzeugen würden, der Birkenwald also ebensoviel Holz- und Blattgewicht produziert wie der Buchen- und Nadelwald, dann müßte der Birkenwald weitaus das meiste Wasser verbrauchen. Nun erzeugt die Birke aber viel weniger Substanz als Fichte und Buche.

Substanz pro m <sup>2</sup> <sup>9)</sup>	× Transpiration pro g Frischgewicht u. Tag <sup>10)</sup>	= Transpiration pro m <sup>2</sup> in Ltr. =mm)
Fichte	1,5 kg	2,25
Buche	0,67 kg	1,7 — 1,9
Birke	0,48 kg	3,6

<sup>7)</sup> Zahlen entnommen aus *Tabulae biologicae* Bd. V O. Stocker).

<sup>8)</sup> A. Pisek und E. Cartellieri, Zur Kenntnis des Wasserhaushaltes der Pflanzen. *Jb. f. wiss. Botanik*. Bd. 75 (1931/32). 79 (1933). 88 (1939). 90 (1941).

<sup>9)</sup> E. Kirwald, Forstliche Wasserhaushaltstechnik. Neudamm, 1944.

<sup>10)</sup> A. Pisek und E. Cartellieri a. a. O.

<sup>6)</sup> J. Schubert in Verhandl. d. klimat. Tagung in Davos 1925. Basel. 1925. entnommen aus W. Laatsch a. a. O.

Die auf die Fläche umgerechneten Verbrauchszahlen sind demnach bei weitem nicht so unterschiedlich wie die einzelnen Blattgewichte. Es kommt weiter hinzu: Der Nadelwald ist frei von Unterwuchs, dagegen muß beim Laubwald, besonders beim Buchenwald noch der Verbrauch des Unterwuchses hinzugerechnet werden. Die Schattenpflanzen des Unterwuchses haben einen sehr geringen Wasserbedarf, worauf schon *A. Schimper* und *O. Stocker* hinwiesen. Nach den neuesten Arbeiten von *Pisek* und *Cartellieri* liegt der Verbrauch des Unterwuchses bei 50—60 mm pro Jahr, d. i. ca. ein Sechstel des Verbrauchs der Laubbäume. (Addiert man in obiger Tabelle zum Wasserverbrauch der Buche 1,7—1,9 ein Sechstel dieses Wertes, so kommt man dem Wasserverbrauch der Fichte sehr nahe). Hiernach werden in jedem Baumbestand jährlich 300—400 mm Niederschlag ausgenutzt und verbraucht. Noch bestehende Unterschiede im Wasserverbrauch der verschiedenen Waldarten werden ausgeglichen durch die freie Verdunstung an Oberflächen. Die Oberflächenverdunstung ist beim Fichtenwald etwas größer als beim Laubwald, da die Oberfläche des Nadelwaldes mehr Wasser auffängt<sup>11)</sup> und die Birke, der Baum mit der höchsten Blatttranspiration, hat die kleinste Oberflächenverdunstung, da sie auch die kleinste Blattfläche hat. Hiernach läßt sich die Feststellung nicht umgehen, daß im Wasserverbrauch von Laub- und Nadelwald kein wesentlicher Unterschied besteht. Allenfalls besteht ein Unterschied in der Art des Verbrauchs, in der Verteilung auf Schattenpflanzen, produktive und unproduktive Verdunstung.

Die Annahme liegt nahe, daß ein geschlossener Wald mehr Wasser als ein gleich großes Wiesengelände verbraucht. Läßt man sich hierbei nicht von dem Erscheinungsbild des Waldes täuschen? Wenn man mit der Faustregel rechnet: Große Produktion von Pflanzensubstanz bedeutet großen Wasserverbrauch, dann sind die höheren Transpirationswerte des Waldes schon in Frage gestellt. Die Erzeugung von Pflanzensubstanz auf einer Wiese während eines Jahres dürfte nicht geringer sein als der Zuwachs an Holz und Blattmasse in einem Jahr im Walde. Tatsächlich erreichen auch die Transpirationszahlen des Grünlandes die gleiche Höhe wie die Verbrauchszahlen des Waldes, im Mittel 310—330 mm (Mittel anteilmäßig aus Fettwiesen, Trockenrasen und Feuchtwiesen<sup>12)</sup>). Der

<sup>11)</sup> Vgl. Fußnote 9.

<sup>12)</sup> Die Verbrauchszahlen der von *Pisek* u. *Cartellieri* (1941) angegebenen ha-Erträge wurden umgerechnet auf die höheren Erträge im Rheinland, wodurch sich die Transpirationszahlen unwesentlich (um ca 10 mm) erhöhten. Ob diese Umrechnung berechtigt ist, müßten Versuche noch erweisen.

dichte Bestand einer Fettwiese läßt keine große freie Verdunstung zu (Windschutz und Beschattung des Bodens durch das Gras), die Transpiration erreicht mit 332 mm die Höhe des Wasserverbrauchs des Waldes. Bei Trockenrasen ist die freie Verdunstung größer und die von dem dürrtigen Bestand transpirierte Wassermenge beträgt nur 200 mm. Diese Werte wurden also nach der physiologischen (Transpirations)-Methode gewonnen, die Oberflächenverdunstung ist also nicht darin erfaßt. Zum Vergleich sollen hier noch einmal die Ergebnisse der Lysimetermessungen in Eberswalde im dreijährigen Durchschnitt (1930—32) herangezogen werden. Der grasbewachsene Sandboden, der wahrscheinlich keine Fettwiese trug, verdunstete hiernach 366 mm (s.o.), worin aber auch die Oberflächenverdunstung enthalten ist. Wir haben oben bereits festgestellt, daß die Transpiration auf dem grasbewachsenen Eberswalder Sandboden auf jeden Fall größer als 188 mm ist. D. h. also: Nach der physiologischen Methode liegt die Transpiration zwischen 200 und 330 mm, nach der Lysimetermethode liegt sie weit unter 366 mm und über 188 mm. M. E. ergänzen sich beide Methoden vorzüglich.

Es wurde bereits erwähnt, daß nur die Verbrauchszahlen größerer Bestände nahezu gleich sind, die für einzelne Pflanzen ermittelten Werte aber sehr variieren. So ist es auch zu verstehen, daß auf dem Ackerland die größten Schwankungen des Wasserverbrauchs beobachtet werden, da man ja aus dem natürlichen Verbände einzelne Pflanzen mit relativ hohem oder relativ geringem Wasserbedarf herausgreift. Diese ausgewählten und dann als Feldfrucht angebauten Pflanzen verdrängen alle übrigen Arten, welche normalerweise den Wasserhaushalt einer Fläche ausgleichen. Der dadurch notwendig werdende Wechsel von wassersparenden und wasserverschwendenden Feldfrüchten soll hier nicht erörtert werden. Eine intensive Landwirtschaft ist bestrebt, die unproduktive Verdunstung auf ein Minimum zu reduzieren. Durch Bearbeitung (Hacken, Pflügen, Eggen u. ä.) wird die Bodenoberfläche vergrößert und damit die Verdunstung gesteigert, dabei werden aber die kapillaren Leitungsbahnen zum Unterboden unterbrochen, was die Gesamtverdunstung hemmt<sup>13)</sup>.

Der Wasserbedarf unserer Feldfrüchte schwankt zwischen 2 und 10 mm täglich.

Pflanzen mit hohem Wasserverbrauch haben sich auch in den nassen Wäsen zusammengefunden. Die Bodenverhältnisse und das besondere feuchte Lokalklima mit mäßigen Tem-

<sup>13)</sup> *M. Helbig*, Die Verdunstung des Wassers aus dem Boden. In: Handb. d. Bodenl. Bd. VI. Bln. 1930.

peraturen, die die Transpiration kaum einmal einschränken<sup>14)</sup>, ermöglichen in den nassen Wiesen Verbrauchswerte über 1000 mm. Pisek und Cartellieri fanden in nassen Wiesen des Innerts Transpirationswerte von 1165 mm. Hiernach muß erwartet werden, daß durch das weite grundwassernahe Grünland am Niederrhein die Gesamtverdunstung erheblich über den normalen Wert von 400—450 mm hinausgeht. (In vielen Landschaften 650 mm, die Untersuchungen sind noch nicht abgeschlossen.)

Der Wasserverbrauch der Vegetation ist auf die große Wachstumsperiode März bis September beschränkt. In dieser Zeit fallen im niederrheinischen Flußgebiet im Tiefland ca. 400 mm, im Gebirge bis zu 550 mm Niederschlag. Diese sommerlichen Regen müssen aber außer der Pflanzenwelt noch die Flüsse speisen. Zu dieser doppelten Verwendung reichen die Niederschläge im Sommer bei weitem nicht aus, denn der natürliche Wasserbedarf beläuft sich allein schon auf 400—450 mm (stellenweise mehr). Dagegen herrscht im Winter, in der Zeit der Vegetationsruhe ein großer Wasserüberschuß. Im Winter muß sich der Boden einen großen Teil dieses Wassers sichern, um es in Zeiten maximalen Verbrauchs, im Frühjahr, wieder abzugeben. Die häufig auftretende sommerliche Trockenheit auf Sandboden muß zurückgeführt werden auf das geringe Wasserspeichervermögen des Sandes. Nur die Wasserspeicherung eines guten Bodens kann eine üppige Vegetation durch den Sommer bringen.

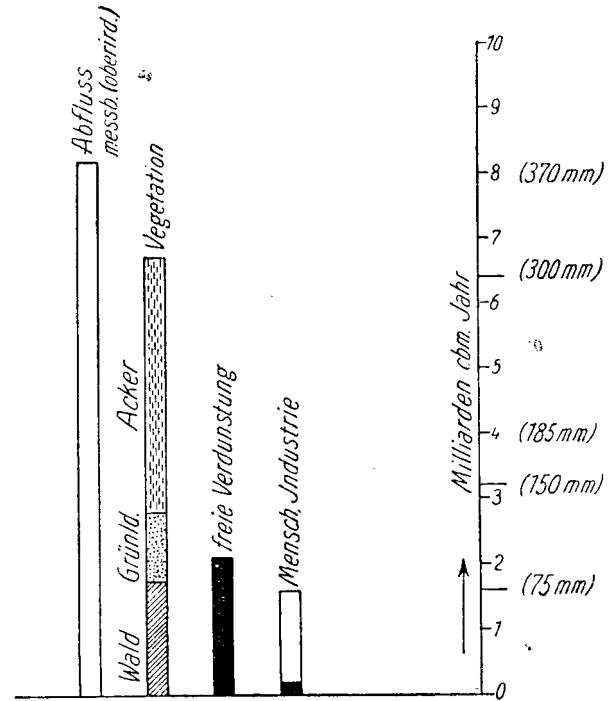
Das Vegetationsbild unserer Landschaften ist aber nicht allein davon abhängig, ob die Verbrauchswassermenge vorrätig ist oder nicht, sondern auch davon, wie dieses Wasser bereitgestellt wird. Hier ist die Art und Intensität der sommerlichen Niederschläge von entscheidender Bedeutung. Wir haben im Sommer Land-, Niesel- und Schauerregen, von denen unsere heutige Landschaft keinen missen kann. Ein sommerlicher Landregen vermag einen großen Betrag zum Transpirationswasser des Acker- und Grünlandes zu liefern. Hingegen wird er in einem Walde zum großen Teil von den Baumkronen oder der obersten Waldbodenschicht abgefangen und als nutzlose Oberflächenverdunstung bald wieder dem Luftraum zurückgegeben. Ein kräftiger Schauer nutzt dem Waldboden viel mehr. Er durchdringt, wenn auch gemäßigt, das Kronendach und durchfeuchtet tief den lockeren Waldboden, der dann verzögernd und ausgleichend wirken kann. Auf freiem Feld wird ein kräftiger Schauer mehr zum oberirdischen Abfluß beitragen.

<sup>14)</sup> R. Keller, Der Wasserverbrauch im Stromgebiet des Niederrheins. In: Waldverwüstung und Wasserhaushalt. S. 48—62. Decheniana Bd. 103. Bonn. 1948.

Nach sommerlichem Niederschlag speist der Waldboden im Gebirge zahllose Quellen, die um so wertvoller sind, je länger sie das meist daran anschließende Grünland mit Wasser versorgen. Was das Wasser für das Grünland bedeutet, zeigen die Erträge der Bewässerungswiesen, die um 50—60 Prozent höher sind als die der Fettwiesen. Im Gebirge kann somit der Wald einen unmittelbaren Einfluß auf die Wasserversorgung, auch auf die Trinkwasserversorgung der Bevölkerung haben.

*Der Trink- und Brauchwasserverbrauch in den niederrheinischen Flußgebieten*

Wieviel Wasser bleibt noch übrig für den Bedarf des Menschen und seiner Industrie? Hierzu eine kleine Bilanz aus dem Stromgebiet des Niederrheins zwischen Honnef und der Reichsgrenze, einschließlich der zum Flußgebiet der Maas gehörenden Flüsse Roer und Niers (vergl. Abb.):



	Mia cbm/Jahr	Niederschlag
Gesamtniederschlag	ca 19,4—19,8	= 880—900 mm
davon gehen ab		
meßbarer oberird. Abfluß	ca 8,2	= 375 mm
Verbrauch des Waldes	ca 1,75	} 300—400 mm
Verbrauch des Grünlandes	ca 1,1	
Verbrauch des Ackerlandes	?	
Oberflächenverdunstung	1,8—2,2	= 80—100 mm geschätzt

Diese Überschlagszahlen, welche noch durch genauere ersetzt werden müssen, zeigen schon, daß für den Menschen und seine im Untersuchungsgebiet hoch entwickelte Industrie, nicht

sehr viel übrig bleibt. Ist der Bedarf des Menschen so gering, daß er im Wasserhaushalt der Natur keine Rolle spielt? Wie kann dann von einer Gefährdung der Wasserversorgung gesprochen werden?

Wir haben oben das niederschlagsreiche Gebirge als Wassermangelgebiet der Vegetation gekennzeichnet, es ist aber auch ein Wassermangelgebiet für Industrie und Bevölkerung. Einen natürlichen Grundwasserspeicher mit großen Vorräten findet man im Gebirge nur selten, da ober- und unterirdische Wasserscheiden das Gelände in kleinste Fluß- und Grundwassergebiete aufteilen, und größere Wassermengen nicht zusammenkommen können. Industriewerke mit großem Wasserbedarf oder große Städte können daher im Gebirge ihre Wasserversorgung auf die Dauer kaum sicherstellen. Als Beispiel sei Wuppertal genannt, das als Großstadt im Rheinischen Schiefergebirge liegt und nicht einmal mit Hilfe von Talsperren genügend Wasser für etwa 400 000 Menschen und die dazugehörige Industrie aus dem natürlichen Einzugsgebiet der Wupper erhalten kann. Von Benrath bei Düsseldorf werden jährlich 20 Millionen cbm Rheinwasser und durch das Pumpwerk Volmarstein 4 Millionen cbm Ruhrwasser über die Wasserscheiden nach Wuppertal geleitet, um die Gesamtwasserbedarfsmenge von 41 Millionen cbm (1945/46) zu sichern. Neben der Wasserbeschaffung stellt sich im Gebirge auch noch die Schwierigkeit der Abwasserbeseitigung ein. Als natürlicher Vorfluter bleibt ja i. A. nur ein größerer Flußlauf, wodurch aber eine weitere Trinkwasserentnahme aus diesem Fluß flußabwärts unmöglich gemacht wird.

Wo im Gebirge Industrie einen erhöhten Wasserbedarf mit sich bringt, mußten zur Wasserversorgung Talsperren angelegt werden. Man entnimmt das Brauchwasser als Oberflächenwasser den Talsperren oder man regelt durch die Talsperren die Wasserführung der Flüsse so, daß diese durch eine gleichmäßige Infiltration in den das Tal begleitenden Grundwasserstrom die Förderung sicherstellen. Auf diese Weise wird der größte Teil des rheinisch-westfälischen Industriegebietes mit Wasser versorgt. Im übrigen bezieht man im Gebirge vorwiegend Quellwasser. Die Quellwasserversorgung dringt noch etwa 20 km ins Tiefland vor. Die alten römischen Wasserleitungen führten das Quellwasser der Eifel sogar bis nach Köln. Heute geht man besonders im Tiefland und in den größeren Gebirgstälern mehr und mehr zur Grundwasserversorgung über.

Durch die Wasserwerke bezieht die Landbevölkerung im Gebirge oft nicht einmal

40 Liter pro Kopf und Tag gegenüber einem Tagesbedarf der Stadtbewohner von 100—200 Liter (je nach Industriestärke). Das heißt aber nicht, daß der Wasserbedarf der Landbevölkerung um so viel geringer ist als der Bedarf der Stadt. Auf dem Lande und besonders im Gebirge werden überall die Bäche und Quellen zur Versorgung der Landwirtschaft und Bevölkerung herangezogen. In Bonn und seiner näheren Umgebung können mehr als 370 gefaßte Quellen und Brunnen angegeben werden<sup>15)</sup>, die außer den Wasserwerken der Versorgung der Bevölkerung dienen.

Das Tiefland wird ausschließlich durch Grundwasser versorgt, abgesehen von einer schmalen an das Gebirge grenzenden Zone. Während im Gebirge viele hundert kleine Wasserwerke zu finden sind, gibt es im nieder-rheinischen Tiefland nur wenige Werke, von denen aber jedes große Wassermengen fördert und diese auf ein weit ausgedehntes Leitungsnetz verteilt.

Eine Karte der Wasserentnahme hat Verf. an anderer Stelle veröffentlicht<sup>16)</sup>. Die Entnahmemengen sind dort am größten, wo Industrie stationiert ist. Kraftwerke, Papier- und Stahlindustrie haben einen hohen Wasserbedarf, Holzverarbeitende, keramische Industrie und dergleichen sind weniger auf Wasser angewiesen. Aus der Ruhr wurden 1941/42 insgesamt 1,001 Mia. cbm Wasser entnommen. Diese Entnahmemenge übertrifft aber den Wasserbedarf im Flußgebiet der Ruhr bei weitem. Etwa ein Drittel dieses Wassers wird über die Wasserscheiden ins Emscher-, Lippe- und Wupper-Gebiet gepumpt, um die dortige Bevölkerung und Industrie zu versorgen.

Im wasserreichen Bergischen Land baut eine große Zahl kleinindustrieller Unternehmen auf die Wasserkraft auf. Diese Werke benötigen vielfach nur die Antriebskraft des Wassers, wobei ein und dasselbe Wasser von Turbinen, Wasserrädern und dergleichen mehrmals gebraucht werden kann. Hierbei tritt ein Wasserverlust, ein Wasserverbrauch aber nicht auf, weshalb die für die Triebwerke benötigten Mengen auch nicht in der folgenden Aufstellung enthalten sind. Aber trotzdem erreicht der Bedarf in diesen Tälern (Lenne, Wupper, Agger) noch verhältnismäßig hohe Werte. Im Aggertal (ohne das Flußgebiet der Sülz) wird mit 37 Millionen cbm jährlich (= 67 mm Niederschlag) die Höhe des Wasserbedarfs im Aachener Kohlenrevier (30 Mill. cbm) überschritten.

<sup>15)</sup> E. Haine, Die Fauna des Grundwassers von Bonn mit besonderer Berücksichtigung der Crustaceen. Diss. Bonn, 1945.

<sup>16)</sup> R. Keller, a. a. O.

## Wasserentnahme durch die Wasserwerke in den nordrheinischen Flußgebieten

(Jahresförderung aus der Zeit 1938—1943)

Flußgebiet	km <sup>2</sup>	Jahresförderung in		Bemerkungen Hauptentnehmer
		Mill. cbm	= mm Niederschlag	
1. Inde—Wurm	} 2066,0	30	} 42	Bergbau
2. Übriges Roergeb.		57		Papierindustrie
3. Niers	—	mehr als 11 <sup>1)</sup>	—	nur Bevölkerung erfaßt
4. Erft	1478,0	60	40	Kraftwerke, Braunkohle
5. Agger ohne Sülz	554,4	37	67	Kleinind., Eisen, Papier
6. Siegmündungsgebiet	—	17	—	
7. Wupper	620,5	40	65	Stadtwerke Wuppertal u. ä.
8. Lenne	1322,0	80	61	
9. Ruhr bis Lenne ausschließlich	2090,0	188	90	
10. Ruhr von Lennemündung bis Mündung	1042,0	714	690	
11. Emscher	784,0	—	—	Abwasserfluß
12. Lippe	4891,0	110	23	40% Trinkwassertalsperre d. Stever
13. Rheintal ab Bad Godesberg	—	222	—	

1 567 Mill. cbm = 75 mm

<sup>1)</sup> Im Niersgebiet nur Förderung der kommunalen Wasserwerke erfaßt. Das von der Industrie in eigenen Anlagen geförderte Wasser konnte am linken Niederrhein bisher noch nicht ermittelt werden.

In dieser Tabelle sind große Teile des Rheinischen Schiefergebirges, die ihre Wasserversorgung durch zahlreiche kleine Wasserwerke sicherstellen, nicht zahlenmäßig erfaßt. Die Gesamtentnahme im Flußgebiet des Rheins von Bad Godesberg bis zur niederländischen Grenze und im deutschen Anteil am Flußgebiet der Maas dürfte sich auf 1,58 Milliarden cbm (= 75 mm Niederschlagshöhe) jährlich belaufen. Diese Wassermenge wird aber nicht vollständig durch den Menschen vom Kreislauf des Wassers abgezweigt, d. h. der Mensch verbraucht diese Menge nicht restlos. Fast 90 Prozent des entnommenen Wassers werden dem Abfluß wieder als Abwasser zugeführt, nur 10 Prozent (= 7,5 mm Niederschlagshöhe) werden verbraucht (= verdunstet). Abb. 1 zeigt die Verteilung des Niederschlags auf Abfluß, Verbrauch der Vegetation und Oberflächenverdunstung (freie Verdunstung). Sie zeigt außerdem die geringe Entnahme durch den Menschen. Der Verbrauch des Menschen ist, verglichen mit der Vegetation, sehr minimal, der Bedarf (= Entnahme) mit 75 mm jedoch recht beachtlich. In einzelnen Flußgebieten fällt die Entnahme noch stärker ins Gewicht. Z. B. werden fast 50 Prozent des gesamten Wasserbedarfs in Nordrhein-Westfalen, soweit es zum Flußgebiet von Rhein und Maas gehört, der Ruhr unterhalb Hagen entnommen. Diese starke Entnahme ist nur möglich durch eine geregelte Wasserführung der Ruhr, welche durch die Talsperren erreicht wird. Das meist den Terrassenschottern entzogene Wasser muß dabei durch Infiltration stets er-

gänzt werden. Wenn nicht durch eine geregelte Wasserführung der Flüsse für Ersatz gesorgt wird, dann sind meist nicht immer gefahrlose Grundwasserabsenkungen die Folge, denn die normalen Niederschläge, wenn sie überhaupt die in Frage kommenden Tiefen von 30, 50, bisweilen über 150 m Tiefe erreichen, können das Grundwasser nicht ersetzen.

Die Wasserversorgung des Menschen kann vor allem durch zwei Faktoren gefährdet werden: erstens durch die Art der Entnahme und zweitens durch die chemische Beschaffenheit. Die Gesamtwasserentnahme durch den Menschen und seine Industrie konzentriert sich auf wenige Punkte, während der Verbrauch der Vegetation flächenhaft ausgeglichen ist. Außerdem benötigt der Mensch in jedem Monat des Jahres fast gleichgroße Mengen, im Sommer etwas mehr, im Winter etwas weniger, ohne Rücksicht auf den Gang des Niederschlags. Treten längere Trockenheit und Wassermangel auf, dann erhöht sich der Bedarf des Menschen sogar. Ganz anders der Wasserverbrauch der Vegetation. Die Pflanzenwelt schaltet alljährlich eine Ruhepause ein, in der sich der Wasservorrat im Boden ergänzen kann. Wenn in heißen Sommern Wassermangel auftritt, dann schränken die meisten Pflanzen ihre Transpiration ein, sie sparen Wasser. In Landschaften, wo ganzjährig Wassermangel auftritt, stellt sich die Vegetation vollständig darauf ein.

Außerdem stellt der Mensch noch große Anforderungen an die chemische Beschaffenheit des Wassers. Die Dürener Papierindustrie muß

beispielsweise darauf bedacht sein, daß kein Eisen und kein Mangan im Wasser enthalten ist, da solches im Papier Gelbfärbung und Rostflecken hervorruft. Da auch das Grundwasser in der Umgebung ungeeignet ist durch die dort lagernden braunkohlenführenden Schichten, ist das Dürener Industriegebiet ganz auf das weiche eisenfreie Wasser der Roer angewiesen. Aus diesem Grunde sind die Talsperren an Urft und Roer in der Eifel für die Dürener Industrie von entscheidender Bedeutung. Die Industrie bevorzugt allgemein weiches Wasser. (Unter Härte des Wassers versteht man den Salzgehalt.) Hartes Wasser besitzt kaum Schaumfähigkeit, stört chemische Prozesse und gefährdet die Leitungen durch Kesselsteinbildungen.

Die Härte des Wassers ist für den Geographen aufschlußreich. Ein Streifen mit hartem Grundwasser begleitet den Rhein von Bonn bis gegen Neuß, durchweg mit 20 und mehr deutschen Härtegraden. Vielfach muß dieses Wasser erst enthärtet werden, wenn es für industrielle Zwecke verwandt werden soll. Weicher ist das Grundwasser der älteren Hauptterrassenschotter. Es besitzt im Süden noch eine Härte von 10—15° d. H. und bei München-Gladbach liefert die Hauptterrasse bereits weiches Wasser mit weniger als 5° d. H. Die Zone 10—15° d. H. zieht sich über die aus den Devonkalken der Eifel kommende Erft herüber bis zur Wasserscheide gegen die Roer. Die Bäche des Rheinischen Schiefergebirges, sofern sie nicht aus den Kalkmulden kommen, führen im allgemeinen sehr weiches Wasser.

Verfasser hat an anderer Stelle eine erste Karte der Härte des Wassers veröffentlicht, wobei es sich aber nur um eine grobe Übersicht handeln kann, da nur die Analysen für etwa 50 Orte in diesem großen Raum verwandt wurden. Die veröffentlichten Werte können aber nur als Mittelwerte aufgefaßt werden, da die chemische Beschaffenheit einen den Witterungsverhältnissen entsprechenden Jahresgang hat: abnehmende Konzentration in der Zeit des Wasserüberschusses und der Wasserspeicherung, zunehmende Konzentration vom Frühjahr bis Spätsommer. Die chemischen Analysen weisen in Trockenzeiten (bei niederen Rheinwasserständen) Eisen und Mangan nach, wo es bei hohem Grundwasserstand nicht gefunden wird.

Mehr als Härte und Eisengehalt des Wassers beeinträchtigen die Abwasser (ca. 68 mm) die Wasserversorgung. Meisterhaft wurde die Wasserversorgung im Rheinisch-Westfälischen Industriegebiet durch Ruhrverband und Ruhrtalsperrenverein geregelt. Die Ruhr ist dort der Trinkwasserfluß, aus dem das Rheinisch-Westfälische Industriegebiet bis über die Lippe hinaus

versorgt wird. Alle Abwasser werden möglichst der Emscher zugeleitet. Auch die untere Wupper ist ein Abwasserfluß. Daher sind Emscher und untere Wupper zur Trinkwasserversorgung unbrauchbar. Das Wasser der Lippe ist wegen der zu großen Härte (20 Grad und mehr), wegen des großen Salzgehaltes zur Trinkwasserversorgung ungeeignet. Der Salzgehalt des Lippewassers stammt aus dem Zechstein der Quellgebiete und von dem aus der Tiefe geförderten salzigen Grubenwasser. Daher ist die Lippe nur Wasserlieferant für die Kanäle.

Diese kurzen Bemerkungen erhellen, daß eine geregelte Wasserwirtschaft in einzelnen Flußgebieten notwendig ist. Gewiß ist der Wasserverbrauch des Menschen verschwindend klein im großen Kreislauf des Wassers, selbst dann, wenn die Intensivierung der Landwirtschaft einen erhöhten Wasserbedarf mit sich bringen wird. Es gibt im Rheinland noch weite Gebiete, deren Ertrag durch Zuführung von Wasser erheblich gesteigert werden könnte. Auch für Bevölkerung und Industrie muß mit einer Erhöhung des Wasserbedarfs gerechnet werden. Der augenblickliche Abbau vieler Industrien wird keinen entsprechenden Rückgang des Wasserbedarfs zur Folge haben. Die Förderungszahlen der großen Wasserwerke im Rheinisch-Westfälischen Industriegebiet für das Jahr 1945/46 liegen zum Teil über den Zahlen von 1938.

Obwohl der Wasserverbrauch des Menschen relativ gering ist, kann die Wasserbeschaffung große Schwierigkeiten machen, infolge der großen Anforderungen an die chemische und bakteriologische Beschaffenheit. Und wenn es genug brauchbares Wasser gibt, dann ist die natürliche Verteilung über das ganze Jahr so ungleichmäßig, daß der Mensch in manchen Jahreszeiten seinen Bedarf aus der natürlichen Abflußkurve nicht decken kann. Es muß daher versucht werden, die reichen winterlichen Niederschläge durch Bodenbearbeitung, Talsperren u. a. aufzuspeichern, damit sie im Frühjahr und Sommer zur Verfügung stehen. Es muß auch immer eine kleine Reserve vorhanden sein, um Klimaschwankungen überbrücken zu können.

Wo der Mensch die Vorzüge des Wassers erkannt hat und das Wasser ausnützen konnte, baute er seine Industrie auf. Wo er den Kreislauf des Wassers auf einem winzigen Stück (seinem Acker) beherrscht, blüht die Landwirtschaft und überall bleibt ihm die Vegetation, die längst schon die feinsten Abweichungen im Wassergehalt der Natur erkannt hat, ein sicherer Wegweiser.