

DER WASSERHAUSHALT EINES KIEFERNWALDES  
UND WECHSELWIRKUNGEN MIT DEM ENERGIEHAUSHALT  
Eine klimaökologische Studie aus dem Trockengebiet der südlichen Oberrheinebene\*)

Mit 7 Abbildungen, 5 Tabellen und 1 Photo

ALBRECHT KESSLER, ROLAND MÜLLER UND LUTZ JAEGER

*Summary:* The water balance of a pine forest and reciprocal effects on the energy balance. A climato-ecological study from the dry region of the southern Upper Rhine plain

The investigations here are considered as a contribution to the climatic ecology in the dry region of the southern Rhine valley plain. This is done by means of long-standing observations. The ecosystem there is a rapidly growing pine forest in the former, now dry alluvial valley of the river Rhine. Besides the conventional elements of the climate special regard is paid to the components of the water balance, namely to the water content of the soil, to interception, transpiration, precipitation within the stand, and also to the components of the heat balance equation.

The stem flow amounts to 3.1% of the precipitation above canopy. The long-standing mean falls to 64% to the precipitation within the stand and to 36% to the interception. The interception is a nearly invariant term regarding half-yearly values. The soil-water content shows a simple yearly pattern with a minimum in the main vegetation period. It is governed by the precipitation within the stand and the evapotranspiration. The infiltration rate can be ignored.

The evapotranspiration or the latent heat is linked to the heat balance equation with the other components which are net radiation, sensible heat flux and heat flux into the ground. The mean annual pattern of these terms and their interannual variability are presented here. We can express the big influence of the water regime to the energy balance. We can show further that the high evapotranspiration rates in winter cannot be explained by the net radiation, but primarily by the sensible heat flux, which is directed to the canopy. The yearly means amount to the following values ( $J/cm^2 d$ ): net radiation: 680, latent heat flux: -391, sensible heat flux: -291, heat flux to the ground: 2.

### 1. Einleitung

Die Frage nach den Komponenten des Wasserhaushalts eines Waldes ist nicht nur aus forstwissenschaftlicher, sondern auch aus hydrologischer oder – allgemeiner formuliert – aus klimaökologischer Sicht von Interesse. Der Forstmann braucht beispielsweise Informationen über die Interzeption, da diese für die Prognose der Ertragsleistung von Wäldern wichtig ist. Dabei gilt es, die steuernden Faktoren richtig ab-

zuschätzen, sei es etwa den Bestandsaufbau oder den schwer zu beeinflussenden Charakter des Klimas.

KREUZER (1982) berichtet, daß junge Fichtenzpflanzen auf dem tiefgründigen Lößboden Süddeutschlands oft ausgezeichnete Standortbedingungen vorfinden können. In dem relativ warmen und niederschlagsarmen Klima wird jedoch ihre weitere Entwicklung unverhältnismäßig stark eingeschränkt. Denn im Laufe ihres Wachstums erreichen sie einen Punkt, an dem die Oberfläche so groß geworden ist, daß zu hohe Mengen des Niederschlags in Form von Interzeption unproduktiv verdunsten. In der Folge geraten die Bäume unter Wasserstreß, da ihr steigender Bedarf an Transpirationswasser nicht mehr durch den Bodenwasserhaushalt gedeckt werden kann.

Hydrologen benötigen zur Bilanzierung und zur gezielten Steuerung des Wasserangebots aus bewaldeten Einzugsgebieten Angaben über den Wasserverlust an die Atmosphäre, über die Höhe der Transpirationsleistung und der Interzeptionsmenge. In Zeiten immer knapper werdender Grundwasserreserven ist es notwendig, das Verhältnis von Transpiration/Interzeption zu Grundwasserneubildung durch geschickte Auswahl von Bäumen günstig zu beeinflussen.

Vom heutigen Standpunkt aus wäre eine klimatologische Analyse eines Ökotoptops (vgl. SCHMITHÜSEN 1976, LESER 1984) unzureichend, würde sie sich nur auf die traditionell verfügbaren Klimaelemente – beim Wasserhaushalt auf den fallenden Niederschlag des amtlichen Netzes – beschränken. Meist liegen allerdings über die zusätzlichen, ökologisch relevanten Größen leider keine längeren Meßreihen vor, aus denen man eine klimatologisch abgesicherte Aussage ableiten könnte. Anliegen der Arbeiten an der Hartheimer Meßstation und der vorliegenden Studie ist die langfristige Beobachtung traditioneller und mehr komplexer Klimagrößen wie Strahlungs- und Energieflüsse und von Einzelkomponenten des Wasserhaushalts und die Analyse der Wechselwirkung

\*) Herrn Professor WILHELM LAUER zum 65. Geburtstag gewidmet.

zwischen den einzelnen Komponenten. Nach Meinung der Autoren klafft heute in der Erforschung geökologischer Zusammenhänge eine große Lücke zwischen der Bearbeitung langer Meßreihen der herkömmlichen Klimaelemente und den zahlreichen nur kurzfristig laufenden Spezialmessungen, ohne die andererseits eine modellmäßige Beschreibung der Vorgänge wiederum nicht möglich wäre.

Bisherige Bearbeitungen der Hartheimer Datensätze findet man bei KESSLER et al. (1979), JAEGER u. KESSLER (1980), SCHOTT (1980), KESSLER (1983, 1985b), JAEGER (1984a, 1984b, 1986), GARTHE (1985).

## 2. Die Komponenten des Wasserhaushalts eines Waldes und die Energieströme an seiner Oberfläche

Die Wasser- und Niederschlagsbilanz für den Kronen- und Stammraum läßt sich folgendermaßen beschreiben:

$$FN + IG = DN + AN + SN + IV + SP + AO + AR \quad (1)$$

Es bedeuten hierbei FN = (fallender) Freilandniederschlag; IG = Interzeptionsgewinn: auf der Vegetation abgesetzter und abgefangener Niederschlag, z. B. aus Nebel durch die Baumkronen ausgekämmt Wassertröpfchen; DN = durchfallender Niederschlag: Niederschlag, der ohne Kontakt mit der Vegetation durch den Pflanzenbestand zum Boden gelangt; AN = abtropfender Niederschlag: Niederschlag, der nach Kontakt mit der Vegetation zum Boden gelangt; SN = Stammabfluß; IV = Interzeptionsverlust: Niederschlag, der infolge der Interzeptionsverdunstung nicht die Bodenoberfläche erreicht; SP = vorübergehend auf den Bäumen gespeichertes Wasser; AO = Wasseraufnahme durch die Blatt- und Nadeloberfläche; AR = Wasseraufnahme durch die Rinde.

Die Summe DN + AN = KD wird Kronendurchlaß, die Summe KD + SN = WN wird Waldniederschlag genannt. Da AO und AR Werte annehmen, die im Vergleich zum Freiland- und Waldniederschlag bei Berücksichtigung nicht zu kurzer Zeitintervalle vernachlässigbar sind, vereinfacht sich (1) zu:

$$FN + IG = DN + AN + SN + IV + SP \quad (2)$$

IV, IG und SP lassen sich nicht direkt mit Hilfe von Meßgeräten bestimmen. IG tritt nur bei bestimmten Wetterlagen auf. Die drei Größen müssen daher als

Restglied aus der Bilanzgleichung ermittelt werden. Wenn nennenswerte Gewinne IG ausgeschlossen werden können, entspricht die Summe aus IV und SP dem Gesamtinterzeptionsverlust I des Kronen- und Stammraumes. Integriert man über längere Zeitabschnitte, wird SP sehr klein gegenüber IV und kann dann ohnehin vernachlässigt werden. Unter Beachtung der Aussagen über die Speicherglieder und den Interzeptionsgewinn vereinfacht sich (1) zu:

$$I = FN - WN \quad (3)$$

Die vollständige Wasserhaushaltsgleichung von Boden und Bestand lautet:

$$FN + (IG) = BV + I + TR + S + \Delta BW \quad (4)$$

Hierin ist BV = Bodenverdunstung; TR = Transpiration der Bäume; S = Sickerwasser einschließlich horizontalem Wasseraustausch;  $\Delta BW$  = Wassergehaltsänderung der oberen Bodenschicht, in der die Bäume wurzeln.

Nach langjährigen bodenkundlichen Untersuchungen durch HÄDRICH (1979) und SCHÄFER (1977) tritt Sickerwasser und horizontaler Wasseraustausch im Hartheimer Untersuchungsgebiet praktisch nicht auf, so daß die Gleichung weiter vereinfacht werden kann.

Ist die Bodenwassergehaltsänderung  $\Delta BW$  bekannt, läßt sich die Summe BV + TR als Restglied aus Gleichung (4) bestimmen. Die Bodenverdunstung BV unter dem dichten Kronendach eines Waldes kann, wenn Bodenvegetation wie im vorliegenden Falle weitgehend fehlt, keine großen Werte annehmen. Zum einen ist am Waldboden die aus der Strahlung zur Verfügung stehende Energie gering, zum anderen ist die turbulente Luftbewegung und Durchmischung der bodennahen Luft im Stammraum von untergeordneter Bedeutung. Somit wird es möglich, nicht nur die Gesamtverdunstung des Waldes zu bestimmen, sondern auch Angaben über ihre wichtigsten Komponenten Transpiration und Gesamtinterzeption zu machen. Multipliziert man die Gesamtwasserdampfabgabe des Standorts an die Atmosphäre  $ET = BV + I + TR$  mit der spezifischen Verdampfungswärme k, so erhält man den latenten Wärmestrom

$$V = kET \quad (5)$$

Er steht mit den übrigen Wärmehaushaltsströmen in folgender Beziehung, wenn man die mittlere Bestandshöhe als Referenzfläche ansieht und alle

Ströme als positiv definiert, die ihr Energie zuführen (KESSLER 1985 a):

$$V = -(Q + B + L) \quad (6)$$

In dieser Gleichung bedeuten  $Q$  = Strahlungsbilanz (Nettostrahlung),  $B$  = Boden-Bestandswärmestrom,  $L$  = turbulenter fühlbarer Wärmestrom.

### 3. Das Untersuchungsgebiet

Das Meßgelände Hartheim liegt in der Südlichen Oberrheinebene (vgl. Abb. 1) ca. 20 km südwestlich von Freiburg in der ehemaligen, heute trockengefallenen holozänen Rheinaue (vgl. Abb. 2 und Photo 1). Das Relief ist nahezu eben; die Höhe über NN beträgt ca. 200 m.

Durch die Tullasche Rheinkorrektur wurde der mäandrierende Lauf des Rheins begradigt. Die Folge dieser Laufverkürzung war eine Erhöhung des Gefälles zwischen Basel und Breisach und eine damit einhergehende Verstärkung der Tiefenerosion des Fluß-

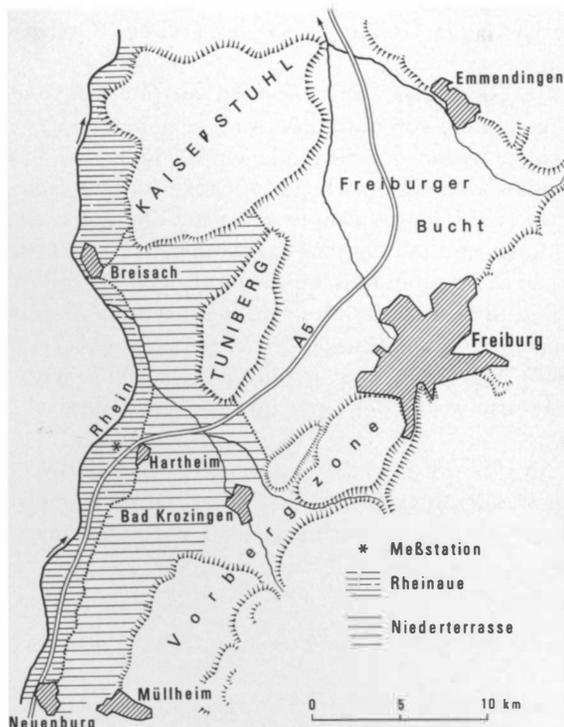


Abb. 1: Gebietsübersicht mit Lage der Versuchsstation (aus HÄDRICH 1979)

Schematic map of the experimental site and its surroundings (from HÄDRICH 1979)

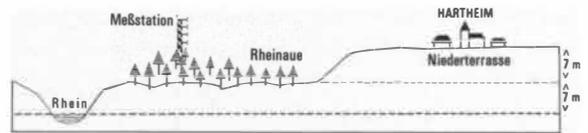


Abb. 2: Querprofil durch die Rheinaue mit Lage des Kiefernwaldes

Cross-section of the alluvial valley with location of the pine forest

bettes. Der Grundwasserspiegel sank entsprechend ab und die alljährlichen Überschwemmungen blieben aus, was durch den Bau des Rheinseitenkanals noch verstärkt wurde. In der Folge verloren die Auwälder den Kontakt zum Grundwasser und die Bestände gingen nach und nach ein. Das Ergebnis war

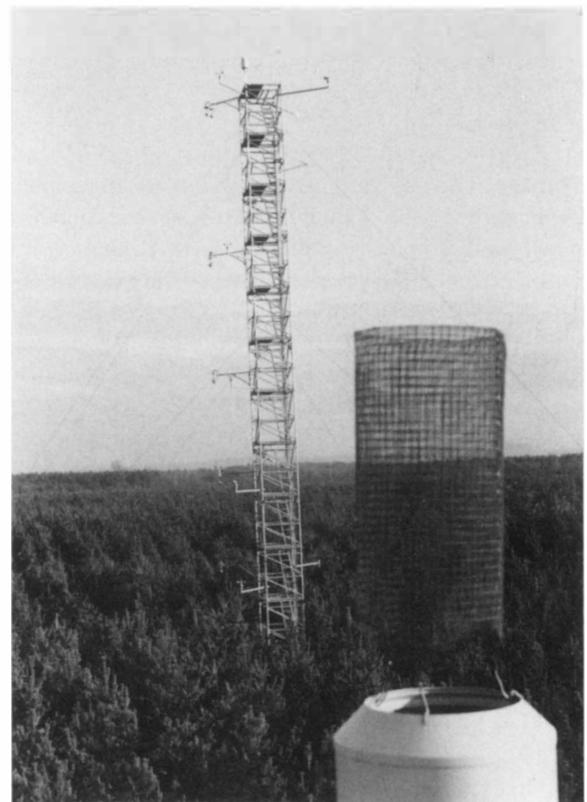


Photo 1: Meßturm zur Erfassung der Strahlungs- und Energieströme über dem Kiefernwald; im Vordergrund Tropfenzähler zur Bestimmung des Nebelniederschlags; Blickrichtung nach Nordosten zum Tuniberg

Tower for monitoring the radiation- and energy fluxes above the pine stand; in the foreground the drop counter to determine the fog precipitation is to be seen; the field of vision is to the northeast towards Tuniberg

eine devastierte Landschaft mit einem Trockenbusch aus Liguster, Weißdorn, Schlehe und einigen Eichen sowie Trockenrasen.

Im Jahre 1961 erfolgte in dem Gebiet des heutigen Meßgeländes Stockrodung und Vollumbruch. Danach wurden die Flächen mit zweijährigen Kiefern-pflanzen (*Pinus silvestris*) kultiviert. Der Reihenabstand betrug 1,2 m und der Pflanzenabstand 0,3 m. 1971 erfolgte die Entfernung jeder dritten Reihe und damit eine drastische Senkung der Stammzahl. Sie betrug danach 8730 Stück/ha und das Schaftholz-volumen 64 Fm/ha (KÜNSTLE et al. 1976). Nach einer Auslesedurchforstung im Jahre 1982 wurde im Bereich der Meßrinnen, wo der Kronendurchlaß gemessen wird, eine Bestandsdichte von 3438 Stück/ha ermittelt. Die mittlere Bestandshöhe, die aus jeweils 8 Bäumen errechnet wird, betrug in den Jahren 1977 5,50 m, 1980 7,68 m, 1983 8,52 m und 1986 9,66 m.

Der Untergrund besteht aus pleistozänem sandigen Kies mit einer 0,5–1 m mächtigen Deckschicht aus sandig-schluffigem Lehm (HÄDRICH 1979). Der Grundwasserspiegel liegt etwa 7 m unter Flur. Die Bäume können mit ihren Wurzeln das Grundwasser nicht erschließen.

Die zwei Komponenten Waldniederschlag und Transpiration bestimmen den Bodenwasserhaushalt. Versickerung und kapillarer Aufstieg aus tieferen Schichten sowie horizontale Zu- oder Abflüsse spielen keine Rolle. Die Bodenwasservorräte der Deckschicht bewegen sich in den Monaten Juni bis September in der Nähe des permanenten Welkepunktes (11,7 Vol. %). Im Winterhalbjahr kann gelegentlich kurzfristig Feldkapazität (31,4 Vol. %) erreicht werden.

Eine detaillierte Beschreibung des Meßgeländes, an dem seit 1973 kontinuierliche Messungen zum Strahlungs-, Energie- und Wasserhaushalt durchgeführt werden, findet man bei JAEGER (1978) und JAEGER et al. (1986). Der Standort ist aus ertragskundlicher (KÜNSTLE u. ULLRICH 1976, KÜNSTLE et al. 1979), bodenkundlicher (SCHÄFER 1977, HÄDRICH 1979, TRÜBY 1983) und dendroklimatologischer Sicht (MERKEL 1987) eingehend untersucht worden.

Das Klima des zentralen Teils des südlichen Oberrheingrabens ist im wesentlichen durch hohe Temperaturen und geringe Niederschläge gekennzeichnet. An dieser speziellen Ausprägung sind unter anderem föhnartige Effekte zwischen den randlichen Gebirgen Vogesen und Schwarzwald und der niedrigen Rheinebene beteiligt. Die Daten der vom Untersuchungsgebiet ca. 4 km entfernten Klimastation Bremgarten für die Periode 1931–1960 (vgl. Tab. 1) betragen für das Jahresmittel der Lufttemperatur 9,7 °C und für die Jahressumme des Niederschlags 644 mm. Der größte Teil der Niederschläge mit etwa 400 mm fällt in den Monaten April bis September, mithin während der Vegetationsperiode (vgl. auch Abb. 3 für die kürzere Periode 1974–1985). Die Zahl der Tage mit Niederschlag von mindestens 0,1 mm Ergiebigkeit beträgt 170,3 (vgl. BIDER et al. 1984).

#### 4. Die Meßanlage und Datenverarbeitung

Die Freilandniederschläge FN werden mit schreibenden Regenmessern nach Hellmann und Ombrometer HP auf 12 m hohen Türmen über dem Bestand gemessen. Durch die Doppelregistrierung konnten Datenlücken weitgehend vermieden werden. Einen Vergleich der Geräte hat JAEGER (1984b) durchgeführt.

Der Kronendurchlaß KD wird mit einer ca. 10 m langen und 0,163 m breiten Auffangrinne aus V2A-Stahl gemessen. Da die Rinne eine Neigung von 8,5 Grad besitzt, ergibt sich eine effektive Auffangfläche von 1,58 m<sup>2</sup>. Das Wasser wird in einer Stahltonne gesammelt und mit einem Pegelschreiber (Firma Ott) registriert. Der durchschnittliche Benetzungsverlust der Rinne wurde zu 0,031 mm/m<sup>2</sup> bestimmt; dies ist somit die Anlaufschwelle des Meßsystems (MÜLLER 1987). Bei der Auswertung der Einzelniederschlagsereignisse wurde der Benetzungsverlust berücksichtigt.

Ab 1986 wird der Stammabfluß SN an 4 Bäumen erfaßt, allerdings nicht wie bei den anderen Komponenten auf Stundenbasis sondern mit Totalisatoren.

Tabella 1: Monats- und Jahresmittel der Temperatur T (°C) und des Niederschlags (mm) der Periode 1931–1960 von Bremgarten (212 m NN)

Monthly and yearly means of temperature T (°C) and precipitation (mm) at Bremgarten site (period 1931–1960)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Jahr
T	0,3	1,3	5,7	9,7	13,6	17,1	18,9	18,2	15,0	9,6	5,0	1,4	9,7
N	42	36	35	42	65	76	75	77	70	42	49	35	644

Um die unteren Teile der Baumstämme liegt spiralförmig eine offene Manschette aus PVC. Die Fuge an der Übergangsstelle PVC/Stamm wurde mit einer dauerelastischen Masse ausgekleidet. Zum Schutze vor Windeinflüssen wurde die Manschette über ihre gesamte Länge mit einem Zylinder aus Plexiglas gekapselt. Am unteren Ende der Manschette wird das aufgefangene Wasser durch einen Schlauch in eine Sammelflasche geleitet. Um den Waldniederschlag WN für den gesamten unten behandelten Zeitraum bestimmen zu können, wurden eine Beziehung zwischen Freilandniederschlag FN und Stammabfluß SN hergeleitet und die fehlenden Daten damit ergänzt.

Der Bodenwassergehalt der homogenen Deckschicht und dessen Änderungen  $\Delta BW$  wurden bis Ende 1980 aus wöchentlichen Messungen mit einer Neutronensonde durch das Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre der Universität Freiburg (HÄDRICH 1979) abgeleitet. Ab 1981 wurden die Messungen zweimal monatlich gravimetrisch durchgeführt.

Die Strahlungsbilanz  $Q$  wird von einem Meßsturm getrennt nach kurzweiliger, solarer und langweiliger terrestrischer Strahlung aus dem oberen und unteren Halbraum gemessen. Die Meßdistanz zwischen Baumspitzen und Meßgerät beträgt ca. 2 m; sie wird dem wachsenden Wald von Zeit zu Zeit angepaßt. Die Strahlungsdaten liegen als Stundensummen vor. Weitere Hinweise findet man bei JAEGER u. KESSLER (1980) und KESSLER (1985b, c).

Der Bodenwärmestrom wird aus Temperaturmessungen mit Pt 100-Widerstandsthermometern in 1, 3, 5, 10, 20 und 40 cm Tiefe unter dem Kiefernbestand bestimmt. Der Wärmestrom in den oberen Bodenschichten bis 20 cm Tiefe wird aus den zeitlichen Änderungen ihres Wärmeinhaltes nach der Tautochronenmethode berechnet. Für die Bestimmung des Wärmestromes unterhalb von 20 cm Tiefe wird die Wärmeleitungsgleichung benützt. Bei der Wärmestrombestimmung wird der Einfluß der Bodenfeuchte berücksichtigt.

Für die Bestimmung des Bestandwärmestromes stehen Messungen der Lufttemperatur direkt über dem Bestand in 9,6 m Höhe, die radiometrisch ermittelte Bestandoberflächentemperatur und die Bodentemperatur in 1 cm Tiefe zur Verfügung (SCHOTT 1980, GARTHE 1985). Der Boden-Bestandwärmestrom  $B$  auf Stundenbasis ergibt sich aus der Summe der beiden erwähnten Ströme. Der Strom latenter Wärme  $V$  wird auf Monatsbasis aus den Gleichungen (4) und (5) abgeleitet. Schließlich kann der turbulente fühlbare Wärmestrom  $L$  wiederum als Monatswert

aus der Wärmehaushaltsgleichung als Restglied bestimmt werden,  $L = -(Q + B + V)$ .

## 5. Die Ergebnisse

### 5.1 Die Kronenspeicherkapazität

Die Kronenkapazität ist eine wichtige Eingangsgröße zur Beschreibung und Modellierung des Interzeptionsvorganges. Für die Definition und die praktische Bestimmung werden in der Literatur mehrere Varianten diskutiert.

Man kann die Kronenkapazität  $KK$  als diejenige Wassermenge ansehen, die benötigt wird, um die gesamte Kronenoberfläche zu benetzen. Sie hängt von der Art der interzeptierenden Oberfläche ab, wobei u. a. Form, Größe, Exposition und Struktur als bestimmende Faktoren zu nennen wären. Außerdem kann Wind die Wassermenge, die von der Krone gehalten werden kann, bevor es zu einem merklichen Abtropfen kommt, erheblich vermindern. Eine ausführliche Behandlung der Problematik findet man bei MITSCHERLICH (1981).

Trägt man den Freilandniederschlag FN gegen den Waldniederschlag WN von Einzelereignissen auf, kann man aus der Regressionsgeraden

$$WN = a + bFN \quad (7)$$

die mittlere Kronenkapazität  $KK$  dadurch bestimmen, daß man  $WN = 0$  setzt. Dann ist  $FN = -a/b = KK$ .

Zur Bestimmung der Speicherkapazität wurden 34 Niederschlagsereignisse ausgewählt, die keine Trockenstunden aufwiesen und deren Ergiebigkeit über 4 mm lag. Mit  $a = -1,27$  und  $b = 0,83$  ergab sich für die Kronenspeicherkapazität  $KK = 1,53$  mm. Für andere Bestände der gemeinen Kiefer werden folgende Zahlen mitgeteilt: RUTTER (1963) 1,6 mm und GASH (1979) 0,8 mm.

### 5.2 Der Stammabfluß

Der Stammabfluß hängt außer von der Niederschlagscharakteristik unter anderem von der Baumart und von der Geometrie der Zweiganordnung ab. Entscheidenden Einfluß hat dabei der Winkel zwischen Zweig und Stamm. Während von Laubbäumen relativ hohe Stammabflußraten bekannt sind (vgl. Zusammenstellung bei MITSCHERLICH 1981), die bei der Behandlung des Waldwasserhaushalts nicht vernachlässigt werden dürfen, hat sich für die Hartheimer Kiefern ein vergleichbar niedriger Wert

Tabelle 2: Regressionskoeffizienten der Gleichung  $KD = A + B \times FN$ , mit  $KD$  = Kronendurchlaß,  $FN$  = Freilandniederschlag und  $R$  = Korrelationskoeffizient

Coefficients of the regression  $KD = A + B \times FN$ , with  $KD$  = throughfall,  $FN$  = precipitation above canopy, and  $R$  = coefficient of correlation

	Winterhalbjahr (Nov–Apr)				Sommerhalbjahr (Mai–Okt)		
	–A	B	R		–A	B	R
1978/79	0,23	0,55	0,99	1978	0,77	0,69	0,99
1979/80	0,79	0,59	0,94	1979	0,89	0,72	0,99
1980/81	0,32	0,54	0,93	1980	1,46	0,77	0,99
1981/82	0,88	0,64	0,99	1981	0,56	0,64	0,98
1982/83	0,84	0,71	0,97	1982	2,96	0,96	0,99
1983/84	0,85	0,64	0,95	1983	1,07	0,82	0,99
1984/85	0,79	0,79	0,98	1984	1,25	0,85	0,98
				1985	0,55	0,69	0,98

bestätigt. Trotzdem wurde der Stammabfluß bei der Ermittlung des Waldniederschlags  $WN$  berücksichtigt.

Um die an den Stämmen in Millilitern gemessene Wassermenge auf eine Fläche beziehen zu können, wurde die Bestandsdichte direkt um die Meßstelle mit Hilfe eines ausgemessenen Rechtecks und durch Zählung der auf ihm stehenden Bäume ermittelt. Durchschnittlich fließen 3,1% des Freilandniederschlags in Form von Stammabfluß ab. Hierdurch werden die Angaben von GASH (1979) mit 2% und von LUETZKE u. SIMON (1975) mit 2,7% für *Pinus silvestris*-Bestände im wesentlichen bestätigt.

### 5.3 Kronendurchlaß und Waldniederschlag

Getrennt nach Winterhalbjahr (Nov.–Apr.) und Sommerhalbjahr (Mai–Okt.) wurden die Beziehungen zwischen Freilandniederschlag  $FN$  und Kronendurchlaß  $KD$  untersucht. Die Ergebnisse sind in

Tab. 2 dargestellt. An den Steigungen (B) der Regressionsgeraden läßt sich ablesen, daß der Kronendurchlaß in der kalten Jahreshälfte relativ geringer ist. Hierfür können mehrere Gründe genannt werden. Es kann dadurch bedingt sein, daß das Abtropfen des Niederschlags durch die höheren Temperaturen im Sommer begünstigt wird, weil die Zähigkeit von Wasser stark mit der Temperaturzunahme abnimmt. MÜLLER (1987) kann für die Verhältnisse in Hartheim wahrscheinlich machen, daß ein zusätzlicher Grund im unterschiedlichen Verlauf der Einzelniederschlagsereignisse des Sommer- und Winterhalbjahres liegt. Ähnlich kommentieren BALÁZS u. BRECHTEL (1985) ihre Untersuchungen an Kiefern im Raum Frankfurt.

Sehr deutlich macht sich die Durchforstung im Jahre 1982 bemerkbar. Wie man am Verhalten von (B) verfolgen kann, nahm der Kronendurchlaß drastisch zu und schwächte sich aber schon in den folgenden Jahren wieder deutlich ab. In Tab. 3 sind die einzelnen Komponenten des Wasserhaushalts zu-

Tabelle 3: Die Komponenten des Wasserhaushalts (in mm) des Hartheimer Kiefernwaldes

Components of the water balance (mm) of the Hartheim pine forest

	Freilandniederschlag FN	Interzeption I	Waldniederschlag WN	Transpiration TR
Mittelwerte der Jahre 1978 bis 1985	647	236	411	406
Mittelwerte der Winterhalbjahre (Nov–Apr) 1978/79 bis 1984/85 und der Sommerhalbjahre (Mai–Okt) 1978 bis 1985				
WH	248	108	140	116
SH	404	129	275	299

sammengestellt. Die Werte des Freilandniederschlags FN für die Jahre 1978–1985 entsprechen dem langjährigen Mittelwert (vgl. Tab. 1). Mit 411 mm macht der Waldniederschlag WN 64% vom Freilandniederschlag aus. Auf die Interzeption I fallen somit 36%. Die Anteile des Waldniederschlags an FN steigen vom Winter zum Sommer von 56% auf 68% an.

Bei ausgeglichenem Bodenwasserhaushalt  $\Delta BW$  und ohne Versickerung S, wie es für den Standort zutrifft, müssen Waldniederschlag WN und Transpiration TR gleich sein. Für die vollen Kalenderjahre 1978–1985 (vgl. Tab. 3) ist diese Bedingung gut erfüllt: WN = 411 mm, TR = 406 mm. In den Winterhalbjahren war die Transpiration im Mittel um 24 mm kleiner als WN. Es hatte demnach eine entsprechende Auffüllung des Bodenwasserreservoirs gegeben. Im Sommer zeigen die Zahlen genau das Umgekehrte.

#### 5.4 Bodenwasserhaushalt

An einem Standort, ähnlich dem des Hartheimer Kiefernwaldes, wo weder ein seitlicher Abfluß aus der Bodensäule noch eine nennenswerte Versickerung S vorhanden sind, wird der jährliche Gang des Bodenwassergehalts BW von der Differenz aus Niederschlag FN und Evapotranspiration ET gesteuert. Die winterlichen Verhältnisse bringen der Behandlung des Bodenwasserhaushalts in dieser Gegend ebenfalls keine ernststen Probleme, da sich im allgemeinen keine länger anhaltende Schneedecke ausbildet, deren Wassergehalt gesondert ermittelt werden müßte.

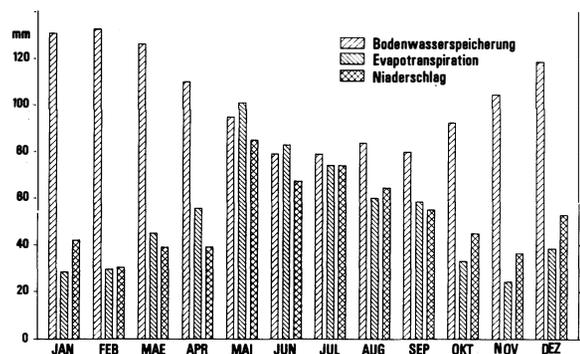


Abb. 3: Mittlerer Jahresgang einiger Wasserhaushaltskomponenten des Hartheimer Kiefernwaldes für die Jahre 1974–1985

Mean yearly pattern of some components of the water balance of the pine forest in Hartheim from the years 1974 to 1985

Im Mittel der Jahre 1974–1985 stellt sich der Bodenwasserhaushalt folgendermaßen dar (vgl. Abb. 3). Durch die energiebedingte Winterpause (vgl. Abb. 6) mit kleinen Raten der Evapotranspiration bzw. des latenten Wärmestromes und Niederschlagssummen um 40 mm steigt der Bodenwasser-gehalt BW von Oktober an stärker an und erreicht im Februar sein Maximum. Ab März dominiert ET über FN mit einem stetigen Schwinden der Bodenwasserreserven bis Juli. Bei nachlassenden Niederschlägen verweilt die Bodenfeuchte auf sehr niedrigem Niveau in der Nähe des permanenten Welkepunktes. Niederschlag und Verdunstung halten sich jetzt ungefähr die Waage. Da die Bäume auf den Wasservorrat der Deckschicht angewiesen sind, geraten sie in diesen „Trockenmonaten“ trotz hoher Niederschläge zeitweise in Wasserstreß, der sich sogar auf die Strahlungsreflexion auswirkt (vgl. KESSLER, 1985 b). Im Oktober beginnt die Phase mit  $FN > ET$  und folgender Auffüllung des Bodenwasserreservoirs.

#### 5.5 Interzeption und Transpiration

Wie Tab. 3 zeigt, steigt die Interzeption vom Winter- zum Sommerhalbjahr um 21 mm an. Möglicherweise sind aber beide Werte etwa gleich groß, wenn für den Nebelniederschlag des Winterhalbjahres größere Beträge veranschlagt werden müßten, was in Zukunft noch zu klären sein wird. Zunächst beruht die Berechnung auf Gleichung (3) ohne Korrektur. Im Winterhalbjahr sind Interzeption I und Transpiration TR etwa gleich groß. Im Sommer übertrifft TR den Wert von I um mehr als das Doppelte.

Die langjährigen Messungen haben ergeben (vgl. Abb. 4 u. 5), daß die Interzeption bei den mitteleuropäischen Witterungsverhältnissen offensichtlich eine quasi invariante Größe ist trotz erheblicher Schwankungen der Niederschlags- und Transpirationsmengen. In den Abb. 4 und 5 wurde die Transpiration TR aus der Gleichung (4) berechnet unter Vernachlässigung von IG, BV und S.

Beim Vergleich von Freilandniederschlag FN und Transpiration TR auf den Abb. 4 und 5 kommt deutlich zum Ausdruck, daß man auch für ein mitteleuropäisches Trockengebiet davon ausgehen kann, daß das Bodenwasserreservoir den Gesamtwasserhaushalt derartig zu steuern vermag, daß Niederschlag und Transpiration nicht allzu eng korreliert sind. Das Sommerhalbjahr 1983 muß als besonders bemerkenswert eingestuft werden. Bei sehr hoher Einstrahlung und maximaler Niederschlagsmenge und bei zu-

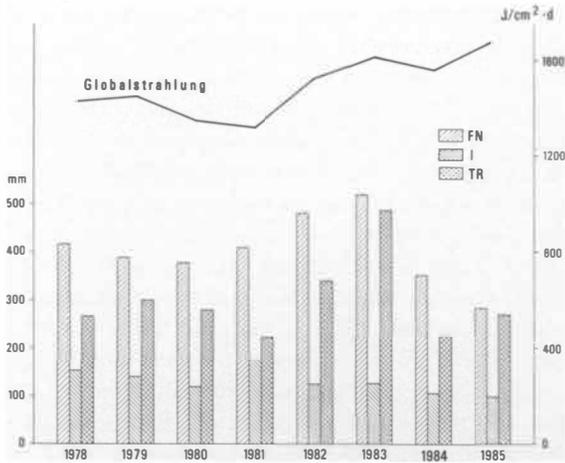


Abb. 4: Die langfristigen Schwankungen von Freilandniederschlag FN, Interzeption I und Transpiration TR des Hartheimer Kiefernwaldes für Sommerhalbjahre (Mai–Okt) in mm und der Halbjahresmittel der Globalstrahlung in  $J/cm^2$  Tag

Long-standing oscillations of the precipitation above canopy FN, interception I and transpiration TR of the pine forest in Hartheim in the summer seasons (May–Oct) in mm and of the half-yearly means of the shortwave incoming radiation in  $J/cm^2$  day

sätzlich noch sehr hohem Bodenwasserverbrauch erreichte die Transpiration ein außergewöhnliches Maximum. Im Folgejahr reduzierte sich TR auf die Hälfte bei gleichbleibend hoher Einstrahlung wegen eines Niederschlagsdefizits. Im Sommerhalbjahr 1981

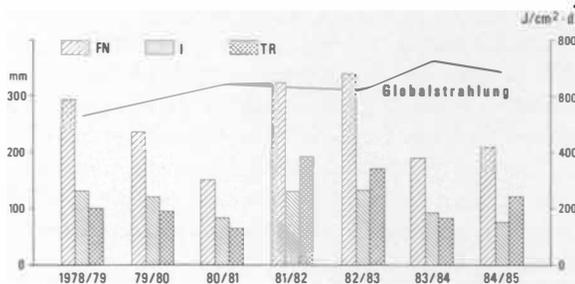


Abb. 5: Die langfristigen Schwankungen von Freilandniederschlag FN, Interzeption I und Transpiration TR des Hartheimer Kiefernwaldes für Winterhalbjahre (Nov–Apr) in mm und der Halbjahresmittel der Globalstrahlung in  $J/cm^2$  Tag

Long-standing oscillations of the precipitation above canopy FN, interception I and transpiration TR of the pine forest in Hartheim in the winter seasons (Nov–Apr) in mm and of the half-yearly means of the shortwave incoming radiation in  $J/cm^2$  day

ist die Transpirationsleistung ähnlich gering trotz ausreichender Niederschlagsmengen aber mit einem Strahlungsminimum. Aus diesen Beispielen wird klar, daß die Witterungsdynamik den Wasserhaushalt so stark variiert, daß es zunächst kaum möglich erscheint, die Frage zu beantworten, ob sich die Transpirationsleistung durch das Waldwachstum bereits merklich verändert hat.

### 5.6 Evapotranspiration oder latenter Wärmestrom und Energiehaushalt des Kiefernwaldes

Zur Bestimmung der turbulenten Ströme latenter ( $V = kET$ ) und fühlbarer ( $L$ ) Wärme für kürzere Zeitspannen benutzt man im allgemeinen die Sverdrup-Albrecht-Methode (vgl. KESSLER 1985 a) unter Verwendung des Bowen-Verhältnisses. Dazu sind Differenz- bzw. Profilmessungen von Lufttemperatur und Luftfeuchte über der zu untersuchenden Oberfläche mit großer Genauigkeit nötig. Diese Methode eignet sich nicht mehr, wenn man die Meßperiode auf Monate oder Jahre ausdehnen möchte. Einer der wichtigsten Gründe für das Versagen liegt in der Unzuverlässigkeit der Feuchtemessung im Dauerbetrieb und während des Winters. Die hier mitgeteilten Ergebnisse auf der Basis von Monatswerten wurden durch eine Kombination der Wasserhaushaltsgleichung (4) und der Energiehaushaltsgleichung (6) erzielt.

Die Jahresmittelwerte der vier Wärmehaushaltskomponenten des Hartheimer Kiefernwaldes für die 12jährige Periode 1974–1985 werden mit einer einjährigen Meßreihe über Rasen in Quickborn bei Hamburg (FRANKENBERGER 1960) verglichen (Tab. 4). Bemerkenswert an diesen Zahlen sind die verhältnismäßig hohen Werte bei der Strahlungsbilanz  $Q$  und dem fühlbaren Wärmestrom  $L$  des Kiefernwaldes. Für  $Q$  liegt der Grund unter anderem an der geringen

Tabelle 4: Jahresmittelwerte der Wärmehaushaltskomponenten des Hartheimer Kiefernwaldes der Jahre 1974–1985 und einer Rasenoberfläche bei Quickborn für 1958 in  $J/cm^2$  Tag

Yearly means of the heat balance components of the pine forest in Hartheim from the years 1974 to 1985 and of a grass surface near Quickborn from the year 1958 in  $J/cm^2$  day

	Kiefernwald	Rasen
Strahlungsbilanz $Q$	680	426
Boden-Bestandwärmestrom $B$	2	-3
Strom latenter Wärme $V = kET$	-391	-337
Strom fühlbarer Wärme $L$	-291	-90

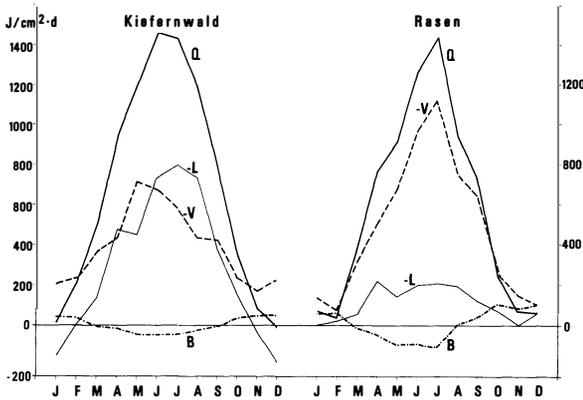


Abb. 6: Mittlerer Jahresgang der Wärmehaushaltskomponenten für den Kiefernwald in Hartheim der Jahre 1974–1985 und für eine Rasenoberfläche in Garching im Jahr 1964/65, in  $J/cm^2$  Tag; Q Strahlungsbilanz, V und L Ströme latenter und fühlbarer Wärme, B Boden-Bestandswärmestrom

Mean yearly pattern of the heat balance components of the pine forest in Hartheim from the years 1974 to 1985 and of a grass surface in Garching from the year 1964/65, in  $J/cm^2$  day. Q represents net radiation, V and L are the fluxes of latent and sensible heat respectively, and B represents heat flux in stand and ground

Albedo des Kiefernwaldes und an den günstigen Einstrahlungsverhältnissen im südlichen Deutschland (vgl. KESSLER 1985 c). Der dreimal so hohe Wert von L des Kiefernwaldes im Vergleich zum Rasen kommt dadurch zustande, daß bei großem Q und wegen der Trockenheit in Hartheim mit nur begrenzter Evapotranspirationsleistung ( $V = kET$ ) die überschüssige Energie in die Erwärmung der Luft von der Waldoberfläche her investiert werden kann. Obwohl der Rasen in Quickborn mehr Niederschlag empfängt, ist V kleiner als in Hartheim, da in Quickborn durch Sickerwasser Grundwasserbildung stattfindet. Da die Strahlungsbilanz dort aber wesentlich geringer ist, bleibt für den Strom fühlbarer Wärme als Restglied wenig übrig. Der Bodenwärmestrom muß bei beiden Standorten im Jahresmittel gegen Null gehen.

In Abb. 6 wird der mittlere Jahresgang der Wärmehaushaltskomponenten des Kiefernwaldes für die Periode 1974–1985 mit demjenigen einer Rasenoberfläche in Garching für ein einzelnes Jahr (1964/65 nach BERZ 1969) verglichen. Bei den Kiefern in Hartheim erreicht die Evapotranspiration bzw. der latente Wärmestrom das Maximum bereits im Frühjahr und vor dem Strahlungsbilanzmaximum.

Ein Verdunstungsmaximum im Frühjahr oder Frühsommer ist ein charakteristisches Merkmal für

die Klimate der Trockengebiete der gemäßigten Breiten mit gleichmäßiger Jahresverteilung des Niederschlags (vgl. KESSLER 1985 a). Durch die energiebedingte Winterpause bzw. Verminderung der Verdunstung wird ein ausreichender Bodenwasservorrat gebildet (vgl. Abb. 3), der dann bei schon stärker anwachsenden Werten von Q im Frühjahr intensiv genutzt werden kann. Zusätzlich ist in dieser Jahreszeit der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre noch gering, wodurch der Verdunstungsvorgang ebenfalls begünstigt wird. Die fortschreitende Austrocknung des Bodens verhindert ein hochsommerliches Maximum der Verdunstung bei sonst hohem Energieangebot aus der Strahlungsbilanz Q, wie es sonst an humideren Standorten der gemäßigten Breiten üblich ist. Es ist besonders darauf hinzuweisen, daß selbst das sommerliche Nebenmaximum des Freilandniederschlags in Hartheim (vgl. Abb. 3 u. 6) nicht mehr zu einem erneuten Anstieg der Evapotranspiration führen kann.

Im feuchteren Garchinger Klima fallen dagegen die ausgeprägten Maxima von Q und V im Hochsommer zusammen. Außerdem ist zu bemerken, daß im Gegensatz zum feuchteren Standort Garching bei den Hartheimer Kiefern die Maxima der Verdunstung V und des fühlbaren Wärmestromes L die gleiche Größenordnung besitzen. Der Hartheimer Standort ist ein Musterbeispiel dafür, daß der Verdunstungsvorgang sowohl vom Energieangebot vornehmlich durch Q als auch von der Wasserverfügbarkeit gesteuert wird.

In den Wintermonaten Dezember und Januar bezieht der Kiefernwald für die Aufrechterhaltung eines verhältnismäßig hohen Evapotranspirationsstroms allerdings große Beträge aus dem fühlbaren Wärmestrom L. Dazu müssen die advectierten Luftmassen wärmer als die Umsatzfläche des Kiefernwaldes sein. Das geschieht in der tiefergelegenen Oberrheinebene im Vergleich zu anderen Gegenden offensichtlich überdurchschnittlich oft hauptsächlich durch föhnartige Effekte.

Von forstlicher Seite ist schon immer auf den Umstand hingewiesen worden, daß Nadelbäume im Winter erhebliche Wasserverluste durch Transpiration erleiden können, obwohl – wie Tab. 5 und Abb. 6 zeigen – aus der Strahlung keine oder kaum Energie für diesen Vorgang zur Verfügung steht. Außerdem ist im Winter nach Tab. 3 und Abb. 5 die Interzeption ein Energiekonsument von gleicher Größenordnung. Die Zahlen der Tab. 5 belegen nun zum ersten Mal, daß der Strom fühlbarer Wärme L der entscheidende Energielieferant für die winterliche Evapotranspiration ist und daß der Boden-

Tabelle 5: Monatsmittelwerte und Standardabweichung SD der Wärmehaushaltskomponenten des Hartheimer Kiefernwaldes der Jahre 1974-1985 in  $J/cm^2$  Tag; Q Strahlungsbilanz, V und L Ströme latenter und fühlbarer Wärme, B Boden-Bestandswärmestrom

Monthly means and standard deviation SD of the heat balance components of the pine forest in Hartheim from the years 1974 to 1985 in  $J/cm^2$  day; Q represents net radiation, V and L fluxes of latent and sensible heat respectively, and B represents heat flux in stand and ground

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Q	17	204	502	939	1203	1459	1433	1189	796	345	84	-6
SD	62	69	129	104	207	161	190	116	106	90	53	68
B	43	37	-7	-18	-45	-50	-48	-23	-2	33	48	50
SD	18	22	15	12	13	15	15	10	9	12	8	14
V	-205	-237	-364	-437	-710	-674	-585	-431	-422	-231	-171	-227
SD	129	170	188	206	315	149	209	158	107	148	151	252
L	145	-4	-131	-484	-448	-735	-800	-735	-372	-147	39	183
SD	159	210	275	275	444	188	221	248	142	191	161	243

Bestandswärmestrom B energetisch nur wenig zur Aufrechterhaltung des Feuchtestromes von der Bestandsfläche zur Atmosphäre beitragen kann.

Aus Tab. 5 geht ferner hervor, daß die Standardabweichung der Monatswerte der Wärmeströme bei den turbulenten Größen V und L in allen Monaten am größten ist, diese demnach die labilsten Wärmehaushaltsgrößen sind, ein Umstand, der letztlich auf die für die gemäßigte Zone typische Variabilität des Niederschlags als Inputgröße zurückgeht. So wie bei der Strahlung der Wasserhaushalt über den Umweg der Wolkenbildung das Schwankungsverhalten dominiert, so beeinflußt er an einem mitteleuropäischen Trockenstandort wie in Hartheim vor allem über den variierenden Niederschlag den Strom latenter Wärme V und damit auch die restlichen Wärmehaushaltsglieder. Die Variabilität der Verdunstung V und der übrigen Wärmehaushaltsgrößen im zwölfjährigen Beobachtungszeitraum illustriert Abb. 7.

Der besonders hohe Strahlungsinput Q im Trockenjahr 1976, in dem der Freilandniederschlag nur 536 mm betrug und damit die Verdunstung stark herabgedrückt wurde, wird voll durch einen Anstieg des Stromes fühlbarer Wärme L abgefangen. Das bedeutet, daß die Luft der Oberrheinebene zwischen den randlichen Bergländern sowohl durch die hohen Strahlungsraten als auch von der Erdoberfläche insbesondere von den Nadelwäldern her sehr stark erwärmt wurde. In den Trockenjahren 1984 und 1985 ist dagegen die Strahlungsbilanz Q verhältnismäßig niedrig, so daß kein ähnlich hoher Anstieg von L zu verzeichnen ist. Daraus ist abzuleiten, daß auf der Basis von Jahreswerten aus dem Verhalten einer

Wärmehaushaltsgröße nicht unbedingt auf die Veränderung der anderen geschlossen werden kann.

Während im langjährigen Mittel der latente Wärmestrom V größer als der fühlbare Wärmestrom L ist, treten in den 12 Jahren doch 3 Jahre auf mit  $L > V$ . Da ein ins Gewicht fallender Sickerwasserverlust im allgemeinen auszuschließen ist, korrelieren die interannuellen Schwankungen der Verdunstung

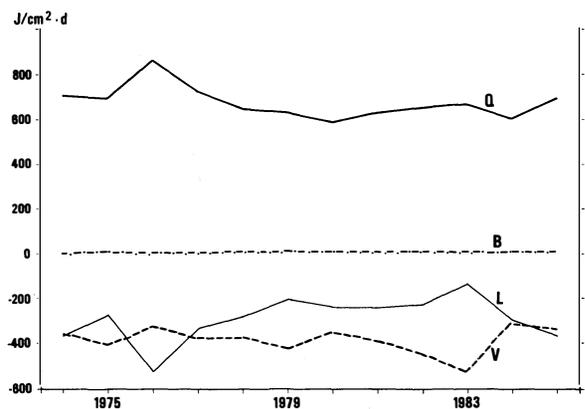


Abb. 7: Interannuelle Veränderungen der Jahresmittel ( $J/cm^2$  Tag) der Wärmehaushaltskomponenten des Hartheimer Kiefernwaldes; Q Strahlungsbilanz, V und L Ströme latenter und fühlbarer Wärme, B Boden-Bestandswärmestrom

Inter-annual changes of the yearly averages ( $J/cm^2$  day) of the heat balance components of the pine forest in Hartheim. Q represents net radiation, V and L are the fluxes of latent and sensible heat respectively and B represents heat flux in stand and ground

sehr hoch mit der Niederschlagssumme. Die beiden niederschlagsreichsten Jahre 1982 und 1983 mit 785 bzw. 767 mm Niederschlagsmenge führen auch zu den beiden höchsten Jahresmengen der Verdunstung bzw. des latenten Wärmestromes  $V$  (ET: 738 bzw. 869 mm oder  $V$ : 453 bzw. 534 Joule/cm<sup>2</sup>Tag). Durch den maximalen latenten Wärmestrom im Jahre 1983 wird bei moderaten  $Q$ -Werten der fühlbare Wärmestrom  $L$  auf ein Minimum herabgedrückt. Die mit der allgemeinen Westdrift herangeführten Luftmassen konnten von den Kiefernwaldoberflächen der Oberrheinebene nur wenig zusätzlich erwärmt werden. Der Boden-Bestandwärmestrom  $B$  muß erwartungsgemäß im Jahresdurchschnitt nahe bei Null liegen, da ja eine allmähliche Erwärmung oder Abkühlung von Bestandsmasse und Boden nicht beobachtet werden kann.

Abschließend wäre die Frage anzuschneiden, ob der Ökotyp „Wachsender Kiefernwald im Trockengebiet der Oberrheinebene“ die Verdunstungsleistung im Beobachtungszeitraum bereits verändert, sprich vergrößert hat, und damit eine merkliche Klimaveränderung, gesteuert von der sich verändernden Erdoberfläche, eingetreten ist. Es ist zwar eine mittlere

Zunahme von  $V$  zu konstatieren (vgl. Abb. 7), da diese aber mit einer – sicherlich überörtlich gesteuerten – Niederschlagszunahme verbunden ist, muß die Frage zunächst offenbleiben. Der entgegengesetzte Trend beim Strom fühlbarer Wärme  $L$  zeigt andererseits sehr deutlich, wie die Stärke der Lufterwärmung von der Erdoberfläche her in einem Trockengebiet eng mit dem Niederschlagsregime und seinen Schwankungen gekoppelt ist. Bei dieser Feststellung muß man allerdings auch den rückläufigen Trend der Strahlungsbilanz  $Q$  im Auge behalten, der die Beurteilung der Interdependenzen zwischen den Wärmeströmen erschwert.

#### Danksagung

Der Beitrag wurde dankenswerterweise durch das Klimaprogramm der Bundesregierung (BMFT) und durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft gefördert. Wir danken ferner den Herren Trick und Fernbach für die langjährige Betreuung der Station und Frau D. Bongers für das bewährte Schreiben des Manuskripts.

#### Literatur

- BALÁZS, A. u. BRECHTEL, H. M.: Einflüsse des Standortes und der Bestockung auf die örtliche Niederschlagsbilanz. Tagungsber. Nationalpark Bayer. Wald 5, 1985.
- BENECKE, P.: Bildung und Bilanzierung der Wasserhaushaltskomponenten forstlicher Ökosysteme. Tagungsber. Nationalpark Bayer. Wald 5, 1985.
- BERZ, G.: Untersuchungen zum Wärmehaushalt der Erdoberfläche und zum bodennahen atmosphärischen Transport. Univ. München, Meteorol. Inst. Wiss. Mitt. 16, 1969.
- BIDER, M., HERRENSCHNEIDER, A. u. RUDLOFF, H. VON: Die klimatischen Verhältnisse in der weiteren Basler Region. In: Regio Basiliensis 25, 1984, 53–83.
- FRANKENBERGER, E.: Meßergebnisse und Berechnungen zum Wärmehaushalt der Erdoberfläche. Ber. Deutscher Wetterd. 73, 1960.
- GARTHE, H.-J.: Über das langjährige Verhalten der Energiehaushaltskomponenten eines mitteleuropäischen Kiefernwaldes. Diss. Geowiss. Fak. Freiburg, 1985.
- GASH, J. H.: An analytical model of rainfall interception by forests. In: Quart. Journ. Royal Meteorol. Soc. 105, 1979, 43–55.
- HÄDRICH, F.: Der Wasserhaushalt einer Zweischicht-Pararendzina unter Kiefernjungbeständen im Trockengebiet am südlichen Oberrhein. In: Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges. 29, 1979, 149–158.
- HOFFMANN, D. et al.: Ermittlung des Interzeptionsverlustes in Waldbeständen bei Regen. DVWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft 211, 1986.
- JAEGER, L.: Die klimatologische Meßstation Hartheim des Meteorologischen Instituts der Universität Freiburg i. Br. In: Ber. Naturf. Ges. Freiburg 68, 1978, 47–73.
- : Climatology of wind profile parameter estimates above a growing pine forest. In: Arch. Met. Geoph. Biocl. Ser. B, 34, 1984a, 161–179.
- : Zehn Jahre Niederschlagsmessungen über einem Kiefernbestand im angehenden Stangenholzalder. In: Wetter und Leben 36, 1984b, 149–158.
- : Klimatologie von Niederschlagsmessungen zur Bestimmung des Freilandniederschlags über einem Kiefernwald. In: Ber. Naturf. Ges. Freiburg i. Br. 76, 1986, 87–100.
- JAEGER, L., GARTHE, H.-J. u. KESSLER, A.: The climatological site Hartheim, its philosophy, design and special measuring results. In: Freiburger Geographische Abhandl. 26, 1986, 189–199.
- JAEGER, L. u. KESSLER, A.: Langzeitmessungen der Strahlungsbilanz und ihrer Komponenten über einem Kiefernbestand der südlichen Oberrheinebene. In: Allg. Forst- u. Jagdztg. 151, 1980, 210–218.
- KESSLER, A.: Über die spezifischen Strahlungsumsätze verschiedener Oberflächentypen in Mitteleuropa, klima-

- tologisch betrachtet. *Wiss. Ber. Meteorol. Inst. Univ. Karlsruhe* 4, 1983.
- : Heat balance climatology. *World survey of climatology Vol. 1 A.* Amsterdam, London, New York, Tokyo 1985 a.
- : Über die kurzweilige Albedo eines Kiefernwaldes. Eine klimatologische Langzeitstudie. In: *Meteorol. Rdsch.* 38, 1985b, 82-91.
- : Anthropogene Änderungen des Strahlungshaushalts der Erdoberfläche. Zur Problematik der Rekonstruktion vorzeitlicher Strahlungsklimate in Mitteleuropa. In: *Erdkunde* 39, 1985c, 175-179.
- KESSLER, A., JAEGER, L. u. SCHOTT, R.: Die Auswirkungen der Sonnenfinsternis vom 29. April 1976 auf die Energieströme an der Erdoberfläche. In: *Meteorol. Rdsch.* 32, 1979, 109-115.
- KREUZER, K.: Aufgaben, Methoden und Arbeitsfeld der forsthydrologischen Forschung. *Beiträge zur Hydrologie, Sonderheft 4*, 1982.
- KÜNSTLE, E., MITSCHERLICH, G. u. HÄDRICH, F.: Gaswechseluntersuchungen in Kiefernbeständen im Trockengebiet der Oberrheinebene. In: *Allg. Forst- u. Jagdztg.* 150, 1979, 205-228.
- KÜNSTLE, E. u. ULLRICH, C. H.: Vergleichende Gaswechsellmessungen an Gemeiner Kiefer und Schwarzkiefer unter den Extrembedingungen des Sommers 1975 im oberrheinischen Trockengebiet. In: *Allg. Forst- u. Jagdztg.* 147, 1976, 65-68.
- LESER, H.: Zum Ökologie-, Ökosystem- und Ökotypbegriff. In: *Natur und Landschaft* 59, 1984, 351-357.
- LÜTZKE, R. u. SIMON, K. H.: Zur Bilanzierung des Wasserhaushalts von Waldbeständen auf Sandstandorten der Deutschen Demokratischen Republik. *Beiträge für die Forstwirtschaft* 1, 1975.
- MERKEL, H.: Der Jahrring der Kiefer als klimatologische Datenquelle. *Ber. Deutscher Wetterd.* 172, 1987.
- MITSCHERLICH, G.: *Wald, Wachstum und Umwelt, Bd. 2: Waldklima und Wasserhaushalt*, 2. Aufl., Frankfurt a. M. 1981.
- MÜLLER, R.: Interzeption in einem Kiefernforst der Oberrheinebene. *Dipl. Arb. Geowiss. Fak. Univ. Freiburg*, 1987.
- RUTTER, A. J.: Studies in the water relations of *Pinus sylvestris* in plantation conditions. In: *Journ. Ecology* 51, 1963, 191-203.
- SCHÄFER, G.: *Nährelementhaushalt von Kiefernjungbeständen in der südlichen Oberrheinebene. Freiburger Bodenkundliche Abhandl.* 7, 1977.
- SCHMITHÜSEN, J.: *Allgemeine Geosynergetik.* Berlin, New York 1976.
- SCHOTT, R.: Untersuchungen über die Energiehaushaltskomponenten in der atmosphärischen Grenzschicht am Beispiel eines Kiefernbestandes in der Oberrheinebene (Hartheim/Rh.). *Ber. Deutscher Wetterd.* 153, 1980.
- TRÜBY, P.: Elementumsatz in einer bewässerten Pararendzina der südlichen Oberrheinebene unter besonderer Berücksichtigung der Schwermetalle. *Freiburger Bodenkundliche Abhandl.* 12, 1983.

## KULTURLANDSCHAFTSWANDEL UND GESELLSCHAFTLICHER UMBRUCH IN DER SÜDFRANZÖSISCHEN PERIPHERIE: DREI FALLSTUDIEN AUS DER HOCHPROVENCE

Mit 8 Abbildungen und 4 Tabellen

HANS-GEORG BOHLE

*Summary:* Spatial change and social transformation in the periphery of Southern France: three case studies from the High Provence

The paper deals with processes of profound structural change in rural areas of Southern France. It focusses on the peripheral mountain tracts of the Department of Var which, contrary to the booming coastal strip, may be classified as depressed areas. Demographically, these regions are characterized by massive outmigration of the

local rural population, on the one hand, and heavy immigration of urban-based outsiders, on the other. These countercurrent movements, which are accompanied by rapidly increasing numbers of secondary residences, are bound to have far-reaching economic, social, and spatial implications.

It is the objective of the paper to analyse the internal effects of such processes by means of three village studies. The samples have been selected to represent a wide