

## QUANTIFIZIERUNG DES ZEITLICHEN VERHALTENS DER WASSERHAUSHALTSKOMPONENTEN EINES BUCHEN- UND EINES FICHTENALTHOLZBESTANDES IM SOLLING MIT HILFE BODENHYDROLOGISCHER METHODEN

P. BENECKE & R.R. VAN DER PLOEG

### *Abstract*

Ecological research programs of the German Research Association (Deutsche Forschungsgemeinschaft) enabled us to investigate the water budget of a beech and a spruce stand in the mountainous part of northern central West-Germany. Both stands are timbersize and site conditions are comparable. All components of the water budget equation were determined quantitatively as functions of time over a continuous period of almost 5 years (1968-1972). Soil moisture measurements were carried out by means of a great number of tensiometers. Mathematical simulation was used as an helpful tool.

The results are presented as balance statements for annual and monthly periods. Spruce turned out to have an average 135 mm/a higher total evaporation (evapotranspiration + interception) than beech and a correspondingly smaller deep seepage. Considerable deviations from the average values were observed for all of the components of the water budget.

The monthly rates of evapotranspiration and seepage exhibit a strongly seasonal course (Fig. 3). There are typical differences between beech and spruce: although spruce transpires in general at a lower rate during the summer months the total evapotranspiration is nevertheless normally higher due to the longer transpiration period. Furthermore, spruce was found to intercept in average about 100 mm/a more of the rainfall water than beech.

From Fig. 4 and 5 it was concluded that the results reported here must not be generalized. The figures indicate that the difference in water consumption between beech and spruce as found in this investigation is likely to become smaller with an increasing level of soil water suction in the root zone.

### 1. Einleitung

In dem Titel zu diesem Bericht über unseren Beitrag zum Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft „Quantifizierung der Sozialfunktionen des Waldes als Element der Infrastruktur“ werden eine Reihe von Begriffen angesprochen, die vorab erläutert werden sollen.

Die Komponenten des Wasserhaushaltes eines forstlichen Standortes in ebener Lage lassen sich aus der folgenden Gleichung ablesen:

$$N - I = N_B = ET + S + R \quad (1)$$

$$N_B = Kr + St \quad (1a)$$

$N$  = Niederschläge außerhalb des Kronendaches = Freiflächenniederschlag

$I$  = Interzeption =  $N - N_B$

$N_B$  = Bestandesniederschläge =  $Kr + St$

$Kr$  = Kronentrauf (einschl. des durch die Lücken des Kronendaches fallenden Niederschlages)

St = Stammablauf (nur bei Buche)

ET = Evapotranspiration

S = Tiefensickerung = Grundwassererneuerung

R = Vorratsänderung des Bodenwassers

Niederschläge abzüglich Interzeption ergeben den Bestandesniederschlag als Einnahmegröße des Bodenwasserhaushaltes, der wiederum für die Evapotranspiration, die Tiefensickerung sowie die Auffüllung des Bodenwasservorrates verwendet wird. Direkt gemessen werden von diesen Komponenten nur der Freiflächenniederschlag und der Bestandesniederschlag, letzterer durch Messung des Kronentraufes und des Stammabflusses (Gl. 1a). Die Interzeption ergibt sich als Differenz zwischen Freiflächen- und Bestandesniederschlag. Die verbleibenden drei Komponenten sind im vorliegenden Fall unter Zuhilfenahme von Modellrechnungen ermittelt worden. Wie hierbei vorgegangen wurde, ist im einzelnen in folgenden Arbeiten beschrieben: Benecke, 1974, van der Ploeg, 1974a und 1974b, van der Ploeg & Benecke, 1974a und 1974b, van der Ploeg u.a., 1976. Von wesentlicher Bedeutung in diesem Zusammenhang ist, daß für die Durchführung der Modellrechnungen Bodenfeuchtemessungen benötigt werden, die hier in Form von Tensiometerwerten zur Verfügung standen. Da es sich um eine neue und wahrscheinlich noch wenig bekannte Methode handelt, sollte der Begriff „bodenhydrologische Methoden“ bereits in der Überschrift herausgestellt werden.

Betont wird weiter, daß es sich um eine Untersuchung des zeitlichen Verhaltens der Wasserhaushaltskomponenten handelt. Dies erfordert zunächst, daß die in der Gleichung aufgeführten Komponenten eigentlich als Integrale über die Zeit aufzufassen sind, deren quantitative Werte sowohl in ihrer absoluten Höhe als auch in ihren gegenseitigen Relationen stark von der Länge des Integrationsintervalles bzw. – mit anderen Worten – des Bilanzierungszeitraumes abhängen. Lange Bilanzierungszeiten (Jahre) haben folgende Eigenschaften:

1. Verebnung von Unterschieden und Amplituden,
2. geringe Aussage für eine Analyse des Ökosystems, jedoch
3. gute Übersichtlichkeit und Vergleichsmöglichkeiten sowie
4. wasserwirtschaftlich interessante Bilanzgrößen.

Mit der Wahl des Bilanzierungszeitraums wird bereits eine Art Weichenstellung für die Interpretation getroffen.

## 2. Bilanzen des Wasserhaushaltes

Die vorliegenden Auswertungen erstrecken sich auf 56 aufeinander folgende Monate, nämlich vom Mai 1968 bis zum Dezember 1972. Es handelt sich um einen Buchen- und einen Fichtenaltholzbestand im Hochsolling (500 m Meereshöhe).\*

Bei der Dateninterpretation sollen zwei Aspekte im Vordergrund stehen:

1. Wasserhaushalt im mehr wasserwirtschaftlichen Sinne anhand von Jahresbilanzen und mehrjährigen Mittelwerten.

\* Näheres s. Benecke und Mayer, 1970 und 1971

2. Wasserumsatz im mehr ökologischen Sinne anhand von Monatsbilanzen. In beiden Fällen sollen die Unterschiede zwischen den beiden Baumarten Buche und Fichte untersucht werden.

### 2.1 Jahresbilanzen

Die Säulendarstellungen in Abbildung 1 entsprechen in ihrer Anordnung der Gleichung 1, d.h. oberhalb der Null-Linie stehen Bestandesniederschlag und Vorratsabbau und unterhalb der Null-Linie Evapotranspiration, Tiefensickerung und Vorratsaufbau. Im Jahr 1968 sind nur die Monate Mai bis Dezember erfaßt worden. Die Abbildung soll einen Überblick über die Größenordnungen und die gegenseitigen Relationen der Komponenten geben. Die Bestandesniederschläge weisen beträchtliche jährliche Schwankungen auf und ergeben für die Buche stets höhere Werte als für Fichte. Entsprechend größer fallen bei der Fichte die Interzeptionsanteile aus. Große Jahresschwankungen weisen auch die jährlichen Sickerraten auf, die unter Buche annähernd 1000 mm pro Jahr erreichen können. Zwischen ihnen und der Höhe des Bestandesniederschlags spiegelt sich ein deutlicher Zusammenhang wider. Auch hier übertreffen die Werte unter Buche die dieje-

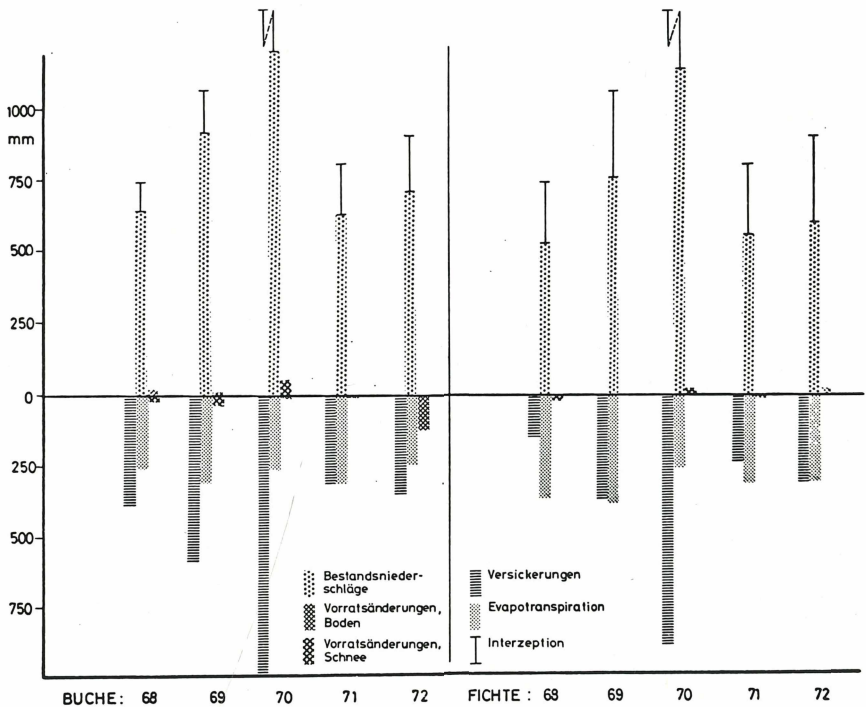


Abb. 1. Jahresraten der Komponenten des Wasserhaushaltes eines Buchen- und eines Fichtenaltholzbestandes im Deutschen Mittelgebirge (Solling) in den Jahren 1968 bis 1972

nigen der Fichte. In der starken Schwankung zeigt sich u.a. auch die geringste Priorität der Versickerung gegenüber allen anderen Komponenten, d.h. ihr kommt nur das anderweitig nicht verwendete Wasser zugute. Bei der Evapotranspiration erkennt man einen sehr viel ausgeglicheneren Verlauf. Sie hat in dem niederschlagsreichsten Jahr den geringsten Betrag. Bei dieser Komponente übertrifft die Fichte die Buche. Daraus resultiert, daß das Verhältnis Versickerung zu Evapotranspiration bei der Buche stets  $> 1$  ist, während dies bei der Fichte nicht der Fall ist.

In diesen langfristigen Bilanzen treten Vorratsänderungen im Bodenwasser oder in der Schneedecke nur sehr untergeordnet in Erscheinung.

Die genauen Zahlenwerte zu den in Abb. 1 gezeigten Säulen sind in Tab. 1 aufgeführt, die außerdem noch Angaben über den Freilächenniederschlag, die Interzeption und die Gesamtverdunstung enthält (die beiden letztgenannten sowohl in absoluten Zahlen als auch in Prozentangaben). Außerdem sind in Tab. 1 die Mittelwerte über 4 Jahre aufgeführt (das Jahr 1968 ist in die Mittelwertbildung nicht einbezogen worden, weil sich die Relationen der Komponenten im Laufe des Jahres zueinander verschieben und dadurch eine Verzerrung des Mittelwertes verursacht worden wäre). Zum besseren Vergleich sind die Werte für Buche und Fichte jeweils unmittelbar übereinander angeordnet. Die Tabelle dient

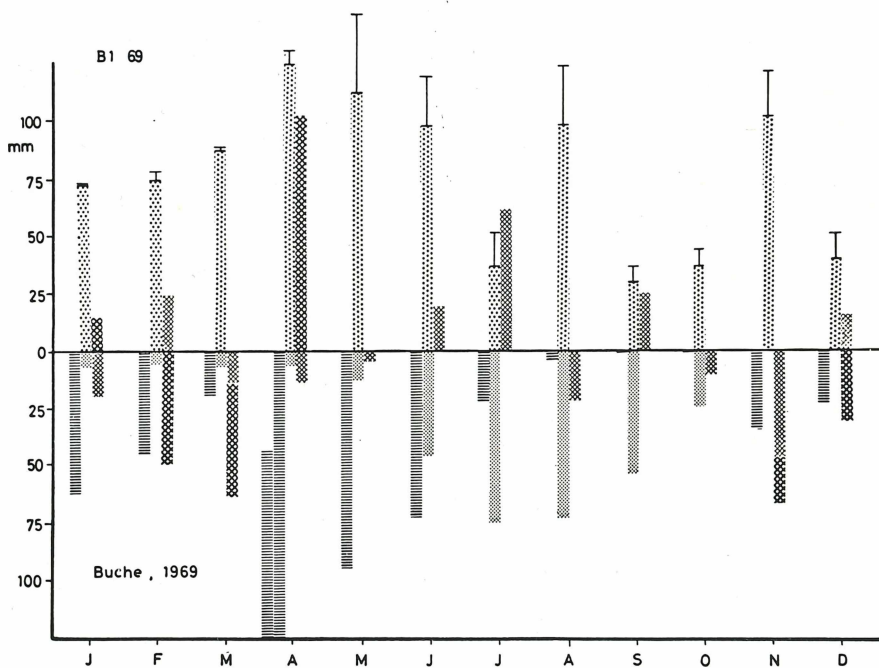


Abb. 2. Monatsraten der Komponenten des Wasserhaushaltes der beiden Waldbestände wie in Abb. 1. Legende: ebenfalls wie in Abb. 1

Table 1. Vergleich der Jahresbilanzen des Wasserhaushaltes eines Buchen- (120jährig) und eines benachbarten Fichtenbestandes (90jährig) im Deutschen Mittelgebirge (Solling).

Jahr	FN mm	BN mm	ET mm	S mm	$\Delta R$ Boden mm	$\Delta R$ Schnee mm	I mm	I %	IET mm	IET %
1968		B 639.1	254.4	382.5	+16.8	+19	107.0	14.3	361.4	48.4
Mai-Dez.	746.1	F 529.9	362.8	145.8	+2.3	+19	216.2	30.0	579	77.6
1969		B 912.0	307.0	582.9	-9.8	+32.0	152.0	14.3	459.0	43.1
	1064.0	F 743.7	383.9	368.9	-10.1	+1.0	320.3	30.1	704.2	66.2
1970		B 1206.3	261.0	972.6	+23.7	-51	272.8	18.4	533.8	36.1
	1479.1	F 1152.6	260.6	890.5	+21.6	-20	326.5	22.1	586.9	39.7
1971		B 622.7	311.0	303.9	+7.8	0.0	187.0	23.1	498.0	61.5
	809.7	F 555.3	310.5	232.2	+12.6	0.0	254.4	31.4	564.9	69.8
1972		B 716.0	245.0	343.0	+128.2	0.0	194.4	21.3	439.4	48.3
	910.4	F 605.0	307.2	308.4	-10.5	0.0	305.5	33.5	612.7	67.3
Mittel (ohne 1968)		B 864.3	281.0	550.6			201.6	18.9	482.6	45.3
	1065.8	F 764.2	315.6	450.0			301.7	28.3	617.2	57.9

FN = Freiflächniederschlag

BN = Bestandesniederschlag (Kronentrauf + Stammablauf)

ET = Evapotranspiration

S = Tiefensickerung

$\Delta R$  (boden) = Vorratsbilanz des Bodens (zwischen 0 und 180 cm Tiefe)

$\Delta R$  (Schnee) = Vorratsbilanz der Schneedecke

I = Interzeption

IET = Gesamtverdunstung (Evapotranspiration + Interzeption)

primär einer Auflistung der Daten; in Tab. 2 wird der Versuch einer zusammenfassenden Charakterisierung unternommen. Nur auf einige kennzeichnende Details soll hingewiesen werden.

Die Evapotranspiration unterscheidet sich bei den beiden Baumarten im Jahre 1970 und 1971 nicht, in den anderen Jahren dagegen beträchtlich. Für die Versickerung ergeben sich unter Buche Maximalwerte von fast 1000 mm pro Jahr, unter Fichte von 900 mm pro Jahr. Diesen Werten stehen Minimalwerte von 300 bzw. 230 mm pro Jahr gegenüber. Die damit zum Ausdruck kommenden Schwankungen in der jährlichen Grundwassererneuerungsrate sind demnach sehr groß; eine sicher in wasserwirtschaftlicher Sicht interessante Information. Die Interzeption ist bei Fichte stets höher als bei Buche und unterscheidet sich im Mittel um 100 mm bei nicht allzu großen Schwankungen. Ihr prozentualer Anteil schwankt bei Buche zwischen 14 und 23 und bei Fichte zwischen 22 und 33.

Tab. 2 soll den Überblick über die mittleren Jahreswerte und ihre Schwankungen erleichtern sowie den Unterschied zwischen Buche und Fichte quantifizieren. Angegeben sind die Mittelwerte über 4 Jahre sowie ihre Standardabweichung als Maß für die Schwankungsamplitude. Die Sickermenge unter Buche beträgt im Durchschnitt über die Hälfte des Freiflächenniederschlags, bei der Fichte weniger als die Hälfte. In beiden Fällen sind die Schwankungen extrem groß, was besonders auffällt, wenn man sie mit den Schwankungen der Gesamtverdunstung vergleicht. Generell läßt sich feststellen, daß die Verdunstungsterme wesentlich geringere Schwankungen als die Niederschlags- und Versickerungsterme aufweisen. Die Gesamtverdunstung liegt bei der Buche unter 50% der Freiflächenniederschläge, bei der Fichte dagegen deutlich über 50%. Bei der Buche entfällt der größere Teil auf die Evapotranspiration, während das Verhältnis Interzeption zu Evapotranspiration bei der Fichte fast ausgeglichen ist.

Der Unterschied zwischen den beiden Baumarten wird aus der untersten Zeile deutlich. Beim Bestandesniederschlag verringert sich die mittlere Differenz von

*Tabelle 2.* In Verbindung mit Tab. 1: Gegenüberstellung der mehrjährigen Mittelwerte der Wasserhaushaltskomponenten und ihrer durchschnittlichen Schwankungen (Standardabweichungen) der beiden in Tab. 1 genannten Bestände. Außerdem wurden die mittleren Differenzen zwischen Buche und Fichte sowie deren Standardabweichung ermittelt (rechte Spalte). Symbole wie in Tab. 1.

Mittel ± Standardabweich. 1969 – 1972				
Wasserhaushaltskomponente	Buche		Fichte	mittl. Differenz Bu. – Fi.
N (mm)		1066 ± 295		
BN (mm)	864 ± 258		764 ± 271	100 ± 51
S (mm)	551 ± 307		450 ± 299	101 ± 78
ET (mm)	281 ± 33		316 ± 51	-35 ± 40
I (mm)	202 ± 51		302 ± 33	-100 ± 51
I (%N)	19		28	
IET (mm)	483 ± 42		617 ± 61	-135 ± 91
IET (%N)	45		58	

100 mm mit zunehmender Niederschlagshöhe. Der Unterschied in der Versickerung beträgt ebenfalls rund 100 mm, unterliegt jedoch stärkeren Schwankungen, die besonders vom Verlauf der Saugspannung des Bodenwassers und damit weitgehend von der Regenverteilung abhängen. Der Unterschied ist um so geringer, je geringer das vorherrschende Saugspannungsniveau im Wurzelbereich ist.

In der Transpirationsleistung unterscheiden sich die beiden Baumarten am wenigsten, in manchen Jahren überhaupt nicht. Für dieses Verhalten, das ebenfalls eng mit dem Saugspannungsverlauf verknüpft ist, wird im Abschnitt 3 eine Erklärung gegeben.

Der große Unterschied in der Interzeption ist besonders signifikant, da die Interzeption die höchste Priorität hat, d.h. in jedem Fall vorab befriedigt wird. Ihre Höhe ist jedoch nicht nur baumartenspezifisch, sondern hängt auch von der Niederschlagsverteilung ab. Einzelniederschläge geringer Ergiebigkeit weisen i.a. eine höhere prozentuale Interzeption auf als solche mit höherer Regenmenge (Lang, 1970, Weihe, 1970). Für den vorliegenden Fall kann dieser Zusammenhang wegen der benachbarten Lage beider Bestände jedoch unberücksichtigt bleiben. Für die Gesamtverdunstung ergab sich ein durchschnittlicher Mehrverbrauch der Fichte von 135 mm pro Jahr, allerdings auch hier wieder mit beträchtlichen Schwankungen. Der Unterschied war im niederschlagsreichsten Jahr am geringsten, was darauf hindeutet, daß der pflanzenspezifische Unterschied mit zunehmender Wasserversorgung sich verringert, wobei die gesamte Verdunstung sich der potentiell möglichen annähert und damit zum meteorologischen Phänomen wird.

## 2.2 Monatsbilanzen

Die bisherige Betrachtung bezog sich auf die summarischen Unterschiede zwischen Buche und Fichte. Einen detaillierten und ökologisch aufschlußreicheren Einblick bieten die Monatsbilanzen. Abbildung 2 dient als Beispiel eines charakteristischen Jahresganges, nämlich des Jahres 1969 unter Buche. Die entsprechenden Zahlenwerte finden sich in Tab. 3, wiederum – wie in Tab. 1 – ergänzt durch Angaben zur Interzeption und Gesamtverdunstung. Tab. 3 enthält auch die Werte für den Fichtenbestand. Abgesehen vom anderen absoluten Niveau und den stärkeren, jahreszeitlich bedingten Schwankungen treten hier die Vorratsänderungen im Boden und in der Schneedecke gegenüber den Jahresbilanzen deutlich in Erscheinung (Zunahmen sind in den Abb. 1 und 2 nach unten, Abnahmen oberhalb der Null-Linie abgetragen). Obwohl die Jahresbilanz selbst mit etwa -10 mm abschließt, d.h. praktisch ausgeglichen ist, änderte sich der Bodenwasservorrat allein im Monat Juli um über 60 mm. Die größte monatliche Vorratsänderung wurde im Juli 1971 mit 125 mm ermittelt. Große Wassermengen können auch in der Schneedecke gespeichert werden (je 49 mm im Februar und März) bzw. aus ihr abschmelzen (102 mm im April). Der Aufbau des Bodenwasservorrates hängt ab von der Anfangssättigung, der Niederschlagsmenge und der Evapotranspiration. Daneben wirkt sich die Bildung oder das Abschmelzen einer Schneedecke aus.

Der Bestandesniederschlag betrug unter den Buchen im Mittel 76 mm und

Tab. 3. Vergleich der Monatsbilanzen des Jahres 1969 des Wasserhaushaltes der beiden Waldbestände wie in Tab. 1. Symbole ebenfalls wie in Tab. 1.

Monatsbilanzen 1969 Buchen- und Fichtenfläche												
Monat		FN	Bn	ET	S	R	R	Schnee	I	I	IET	IET
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	%	mm	%
Januar	B	73.2	72.5	6.2	61.3	20.0	-15.0	1.0	1.0	1.0	6.9	9.4
	F	56.3	56.3	6.2	53.9	9.2	-13	16.9	23.1	23.1	23.1	31.5
Februar	B	78.3	75.4	5.6	44.6	-23.8	+49.0	2.9	8.5	8.5	8.5	10.8
	F	62.4	62.4	5.6	28.7	-14.9	43	15.9	20.3	20.3	21.5	27.5
März	B	88.6	87.6	6.2	18.4	14.0	+49.0	1.0	1.1	1.1	7.2	8.1
	F	68.0	68.0	6.4	17.4	14.2	30	20.6	23.3	23.3	27.0	30.4
April	B	130.6	124.2	6.1	205.6	14.5	-102.0	6.4	4.9	4.9	12.5	9.6
	F	119.6	119.6	20.1	168.2	10.3	-79	11	8.4	8.4	31.1	23.8
Mai	B	146.5	112.7	13.0	94.3	5.4		33.8	23.1	23.1	46.8	31.9
	F	96.7	96.7	59	36.5	1.2		49.8	34.0	34.0	108.8	74.3
Juni	B	118.8	98.0	45.4	71.6	-19.0		20.8	17.5	17.5	66.2	55.7
	F	84.1	84.1	60	39.8	-15.7		34.7	29.2	29.2	94.7	79.7
Juli	B	51.6	36.2	74.4	23.0	-61.2		15.4	29.8	29.8	89.8	174.0
	F	28.5	28.5	65.2	13.5	-50.2		23.1	44.8	44.8	88.3	171.1
August	B	123.8	98.4	72.2	4.0	22.2		25.4	20.5	20.5	97.6	78.8
	F	77.1	77.1	66.9	4.4	5.8		46.7	37.7	37.7	113.6	91.8
September	B	36.9	29.7	53.5	1.0	-24.8		7.2	19.5	19.5	60.7	164.5
	F	23.3	23.3	41.8	1.3	-19.8		13.6	36.9	36.9	55.4	150.1
Oktober	B	43.5	36.1	24.4	0.9	10.8		7.4	17.0	17.0	31.8	73.1
	F	29.1	29.1	28.6	1.0	-0.5		14.4	33.1	33.1	43.0	98.8
November	B	121.2	101.6	0.0	34.5	47.2	+20.0	19.6	16.2	16.2	19.6	16.2
	F	71.1	71.1	14.8	0.8	48.5	7	50.1	41.3	41.3	64.9	53.5
Dezember	B	51.0	39.6	0.0	23.7	-15.1	+31.0	11.4	22.3	22.3	11.4	22.3
	F	27.5	27.5	9.3	3.4	1.8	13	23.5	46.0	46.0	32.8	64.3
Summe	B	1064	912	307.0	582.9	-9.8	+32	152.0	14.3	14.3	459.0	43.1
	F	1064	744	744	383.9	-10.1	1.0	320.3	30.1	30.1	704.2	66.2

schwankte zwischen 30 und 125 mm, wobei der Sommer durchweg die niedrigen Monatsraten aufwies.

Charakteristisch ist der Verlauf der Versickerung, der durchschnittlich rund 50 mm pro Monat ergab, jedoch zwischen weniger als 1 und mehr als 200 mm schwankte. Die höchste Rate wurde im April 1970 mit 249 mm festgestellt. Dort ebenso wie in dem vorliegenden Fall kamen hohe Aprilniederschläge und das Abschmelzen einer starken Schneedecke zusammen. Die Bildung dieser Schneedecke hatte vorher die Sickerraten auf relativ geringe Werte (18 mm im März) zurückgehen lassen.

Charakteristisch ist der Rückgang der Sickerraten ab Mai oder Juni auf vernachlässigbar geringe Werte im August oder September und ein Wiederanstieg nach dem Laubfall im Oktober, in dem sich auch der Ausgleich des im Sommer entstandenen Bodenwasserdefizites widerspiegelt.

Die Evapotranspiration schlägt mit durchschnittlich 25 mm pro Monat zu Buche und schwankt zwischen 0 und 75 mm. Während der Monate Juni bis September betrug die durchschnittliche Evapotranspiration 61 mm pro Monat, das sind zusammen rund 80% der jährlichen Evapotranspiration. Evapotranspiration und Versickerung verhalten sich antagonistisch.

Eine Gegenüberstellung der monatlichen Raten der Wasserhaushaltskomponenten des Buchen- und des Fichtenbestandes findet sich in Tab. 3. Besonders Interesse verdienen neben der unterschiedlichen Interzeption die beiden anderen

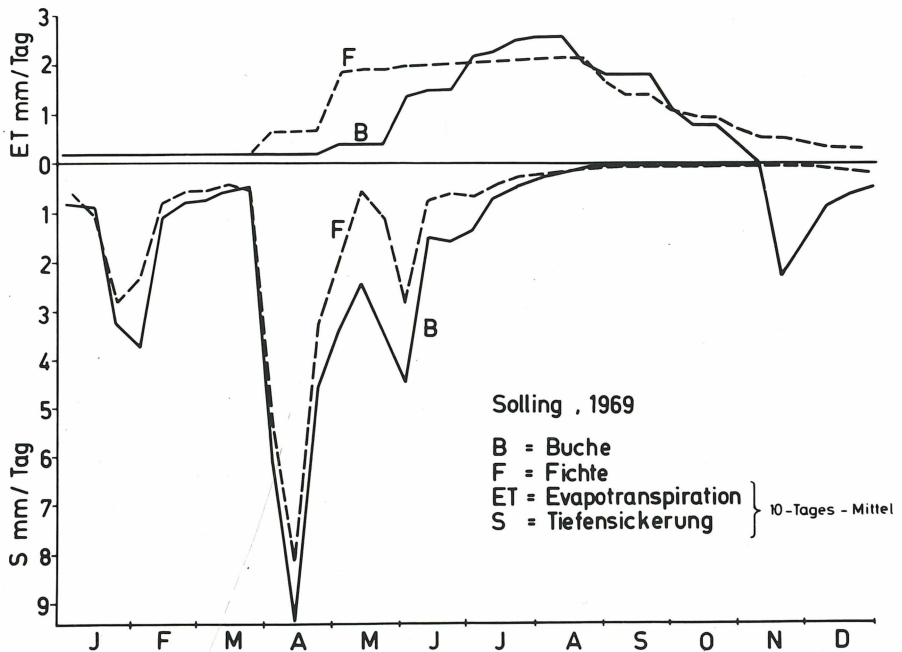


Abb. 3. Ganglinien der Evapotranspiration (ET) und der Versickerung (S) des Buchen- (B) und des Fichtenbestandes (F) im Jahre 1969.

Ausgabegrößen Evapotranspiration und Versickerung, deren charakteristischen, unterschiedlichen Verlauf Abb. 3 widerspiegelt. Der hier dargestellte Verlauf mit zweimaliger Umkehr der Relation Evapotranspiration bei Buche zur Fichte wurde in allen 5 Jahren gefunden. Die größten Unterschiede ergeben sich stets im April bis Mai. Die Fichte erreicht häufig im Mai schon etwa das Evapotranspirationsniveau, das sie den ganzen Sommer über beibehält, bevor sie ab Oktober langsam abfallende Raten zeigt, während die Buche meist erst gegen Ende Mai nennenswert mit der Transpiration beginnt, aber in der Regel im Juni schon höhere Werte als die Fichte aufweist und diese höhere Transpiration häufig bis in den Oktober beibehält. Dann allerdings fällt sie meist bald auf nicht mehr nachweisbare Werte zurück.

Dieses Verhalten spiegelt sich umgekehrt im Versickerungsgang wider. Die höhere Versickerung unter Buche erreicht ihren größten Abstand von der der Fichte ebenfalls im April bis Mai. Der Unterschied verringert sich im Laufe des Sommers immer weiter und kehrt sich schließlich um. Dies geschieht allerdings bei niedrigem generellen Versickerungsniveau, so daß es bilanzmäßig kaum zu Buche schlägt. Im Oktober erfolgt dann regelmäßig eine erneute Umkehr, so daß im meist niederschlagsreichen November schon wieder annähernd durchschnittliche Sickerraten unter Buche auftreten, während die Wiederauffüllung des Bodenwasserdefizites unter Fichte meist erst in den ersten Monaten des darauf folgenden Jahres erfolgt.

### **3. Evapotranspiration in Relation zur Saugspannung des Bodenwassers in der Wurzelzone**

Das unterschiedliche zeitliche Verhalten der Wasserhaushaltskomponenten unter Buche und Fichte fordert die Suche nach erklärenden Gesetzmäßigkeiten heraus. Eine vergleichende Durchsicht der Tensiometerdaten ließ erkennen, daß das im Wurzelbereich herrschende Saugspannungsniveau des Bodenwassers ein differenzierender Faktor sein könne. Eine entsprechende Auswertung ergab die Abb. 4 u. 5, die nicht nur als ein Schritt in Richtung einer Analyse des unterschiedlichen Entzugsverhaltens von Buche und Fichte angesehen werden können, sondern aus denen sich auch die Grenzen der Übertragbarkeit der hier mitgeteilten Ergebnisse abzeichnen.

Vorausgesetzt wird, daß a) die Evaporation maßgeblich vom Energieangebot der Atmosphäre und von der Saugspannung (Verfügbarkeit) des Bodenwassers abhängt und b) daß das Energieangebot zum gleichen Zeitraum bei Buche und Fichte gleich groß ist. Die Bodenwasserspannung würde dann zum differenzierenden Faktor. Beide Abbildungen zeigen, daß im niedrigen Saugspannungsbereich die ET-Raten sich nur wenig unterscheiden und zunächst mit zunehmender Saugspannung etwa gleich stark ansteigen. Da die Fichte eine höhere Interzeption besitzt, bedeutet dies einen höheren Gesamtverbrauch. Ganz offensichtlich ist das Energieangebot der maßgebliche ET-begrenzende Faktor, da Sauerstoffmangel im Wurzelraum wegen der Luftgehalte  $> 10\%$  als begrenzender Faktor nicht in Betracht kommt. Die Fichte ist demnach in der Lage, bei relativ geringem Energieangebot und niedrigen Saugspannungen im Wurzelbereich dem

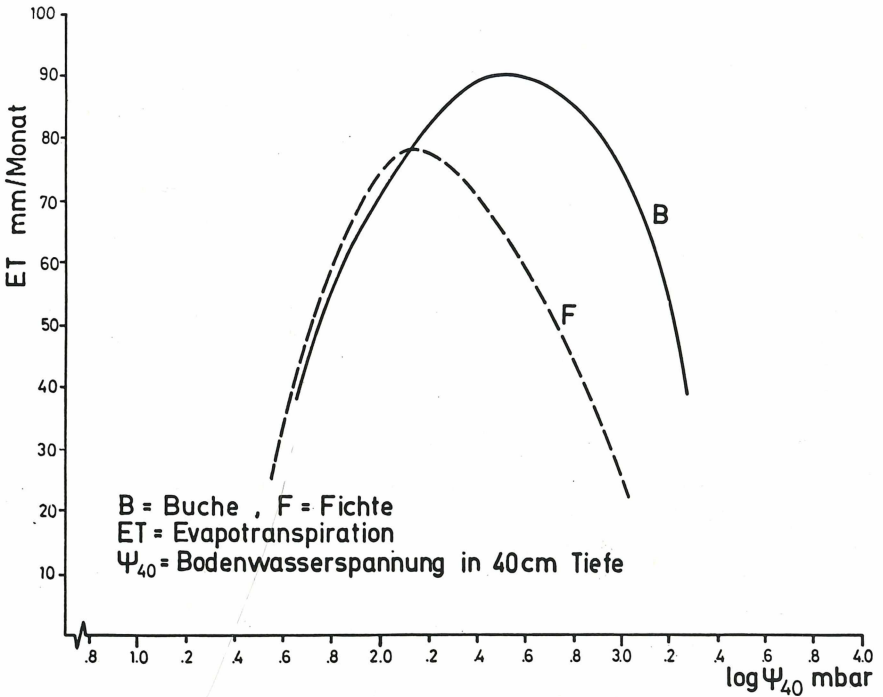
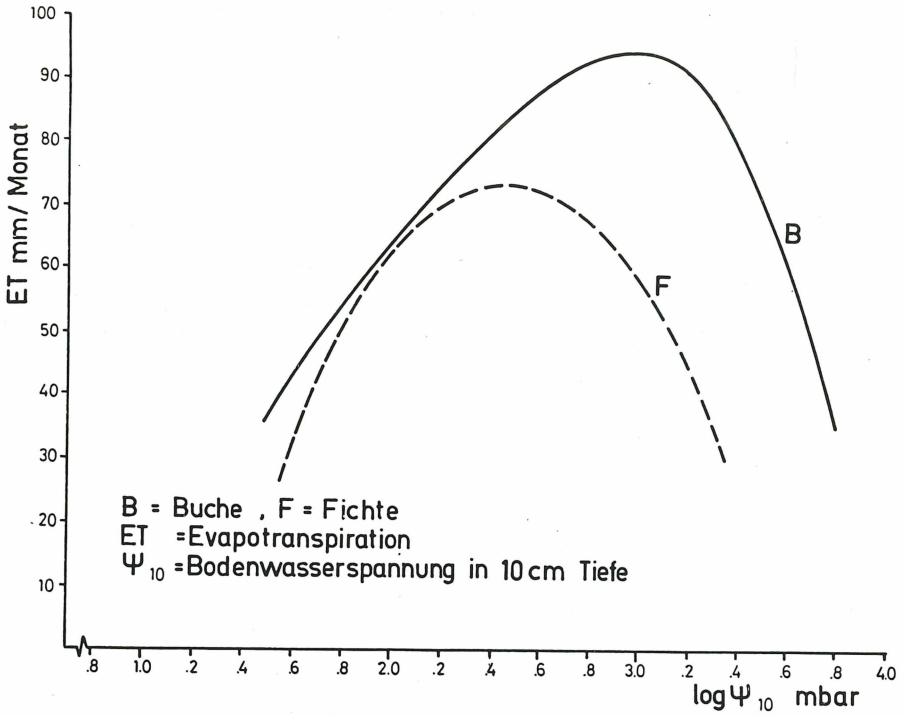


Abb. 4 und 5. Raten der monatlichen Evapotranspiration als Funktion der in 10 bzw. 40 cm Tiefe herrschenden Saugspannung der Buchen- (B) und des Fichtenbestandes (F)

Boden trotz höherer Interzeption etwa ebenso viel Wasser zu entziehen wie die Buche.\*

Zunehmender „Wasserstress“ führt zu einem früheren Abfall der Entzugsraten bei den Fichten im Vergleich zu den Buchen. Bei allgemein niedrigerer Interzeption übertrifft die Evapotranspirationsrate der Buche die der Fichte und kann zu einem höheren Gesamtverbrauch der Buche führen.

Die Abb. 4 zeigt schließlich, daß der Umkehrpunkt, d.h. der Punkt maximalen Entzuges, bezogen auf Saugspannungswerte des Bodenwassers in 10 cm Tiefe, für die Buchen bei rd. 1000 und für die Fichten bei rd. 300 mbar liegt. Verschiebt man die Bezugsbodentiefe nach unten, so verschieben sich auch die Werte für die Umkehrpunkte nach unten. Für 40 cm Tiefe (Abb. 5) gilt: Buche 350 und Fichte 120 mbar. Die Relation Buche: Fichte bleibt hierbei erhalten, nämlich etwa 3 : 1.

#### 4. Schlußfolgerungen

Im Solling herrschen auf den Versuchsflächen bei Niederschlägen  $> 1000$  mm, niedrigen Temperaturen und Böden mit sehr günstigen Speicher- und Durchlässigkeitseigenschaften für Wasser Saugspannungen im niedrigen Bereich auch in der Wurzelzone vor. Dies erlaubt den Fichten, dem Boden trotz höherer Interzeption (Energieverbrauch!) etwa gleich viel Wasser zu entziehen wie die Buchen. Hinzu kommt die längere transpirationsaktive Zeit der Fichten. Beides zusammen führt zu einer durchschnittlich höheren Evapotranspiration der Fichten gegenüber den Buchen, für die sich auf grund der vorliegenden Untersuchungen ein Wert von 35 mm/Jahr ergab. Die höhere Evapotranspiration der Buchen während der Sommermonate ist demnach unter den standörtlichen Bedingungen des Sollings geringer als die der Fichten während der Frühjahrs- und Spätherbstperiode. Zusammen mit einer um 100 mm/Jahr höheren Interzeption weist die Fichte nach den bisherigen Daten einen jährlichen Mehrverbrauch von 135 mm oder 1.350.000 l/ha auf.

Demgegenüber steht eine entsprechend höhere Versickerung und Vorratsaufstockung unter den Buchen (durchschnittlich rd. 100 mm Versickerung und etwa 35 mm Vorratsvergrößerung). Insofern ist der Jahreswechsel als Bilanzierungszeitpunkt ungünstig, weil der Ausgleich des im Sommer entstandenen Bodenwasserdefizites unter Buchen i.a. weitgehend erfolgt ist, während er unter Fichten gerade erst beginnt. Deutlich höhere Sickerraten (Abb. 3) unter den Buchen während der Winter- und Frühjahrsmonate sind die Folge.

Diese Ergebnisse gelten für die Standortsbedingungen des Hochsolling. Abb. 4 und 5 lassen die Grenzen der Übertragbarkeit erkennen: Alle Bedingungen, die zu einem höheren Saugspannungsniveau des Bodenwassers in der Wurzelzone führen (höhere Energiezufuhr, geringere Niederschläge, geringere Speicherfähigkeit des Bodens für leicht pflanzenverfügbares Wasser und/oder höhere Leitfä-

\* Diesem Ergebnis entspricht die höhere Ausnutzung der Starhlungsenergie durch die Fichte (95% : 80%) – Vortrag Dr. Willmers vor der Gesellsch. f. Ökologie, Göttingen, 23.9.76.

higkeit im schwach wasserungesättigten Bereich – um die vermutlich wichtigsten zu nennen), dürften die Relation des Wasserverbrauchs von Buchen und Fichten – vergleichbare Bestände ohnehin vorausgesetzt – in Richtung eines geringer werdenden Mehrverbrauchs der Fichten verändern.

## 5. Zusammenfassung

Im Rahmen des „Solling-Projektes“ und des Schwerpunktes „Quantifizierung der Sozialfunktionen des Waldes als Element der Infrastruktur“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft wurden Wasserhaushaltsuntersuchungen an einem Buchen- und einem Fichtenaltholzbestand mit vergleichbaren Bestandes- und Standorteigenschaften durchgeführt. Alle Komponenten des Wasserhaushaltes konnten in ihrem zeitlichen Verhalten über einen lückenlosen Zeitraum von annähernd 5 Jahren quantitativ bestimmt werden. Hierbei wurden Ergebnisse von Tensiometermessungen benutzt und Modellrechnungen zuhelfe genommen. Die Ergebnisse werden als Jahres- und als Monatsbilanzen mitgeteilt. Für die Fichten ergab sich ein durchschnittlicher Mehrverbrauch (Gesamtverdunstung) von 135 mm/Jahr und eine entsprechend geringere jährliche Versickerung. Von Jahr zu Jahr traten beträchtliche, bei den verschiedenen Komponenten unterschiedliche Schwankungen auf. Die monatlichen Raten der Evapotranspiration und der Versickerung folgen einem ausgeprägten jahreszeitlichen Gang (Abb. 3), wobei die Amplitude bei den Fichten geringer ist als bei den Buchen. Durch die längere transpirationsaktive Zeit ergeben sich für die Fichte gleichwohl höhere Gesamtwerte der Evapotranspiration. Hinzu kommt eine durchschnittlich um rd. 100 mm höhere Interzeption der Fichten.

Aus Abb. 4 und 5 wird abgeleitet, daß die hier gefundenen Relationen des Wasserumsatzes von Buchen und Fichten nicht ohne weiteres übertragbar sind und daß der Mehrverbrauch der Fichten sich mit steigendem Saugspannungsniveau des Bodenwassers in der Wurzelzone verringern dürfte.

## LITERATUR

- Benecke, P. (1974): Arbeitsmodelle für Strömungsprobleme in Böden und ihre mathematische Formulierung. *Mitteilgn. d. Dt. Bodenkundl. Gesellsch.* 19: 114–132.
- Benecke, P. & Mayer, R. (1970): Wasserhaushaltsuntersuchungen im Solling. Mitt. Arb. Kreis „Wald und Wasser“, Nr. 5, 71–78. Selbstverlag, 43 Essen-Bredene, Wallneyer Str. 6.
- Benecke, P. & Mayer, R. (1971): Aspects of Soil Water Behaviour as Related to Beech and Spruce Stands – Some Results of the Water Balance Investigations. *Ecological Studies*, Vol. 2 „Integrated Experimental Ecology“ (H. Ellenberg ed.) p. 153–163. Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York.
- Lang, W. (1970): Ökologische und hydrologische Untersuchungen in verschieden stark durchforsteten Fichten und Lärchenbeständen des Schwarzwaldes. Diss., Freiburg i. Breisgau.
- Van der Ploeg, R.R. (1974a): Simulation of Moisture transfer in soils: One-dimensional infiltration. *Soil Science* 188 (6): 349–357.
- Van der Ploeg, R.R. (1974b): Use of soil physical principles in hydrological models. *Mitt. Deutsche Bodenk. Gesellsch.* 19: 133–161.

- Van der Ploeg, R.R. & P. Benecke. (1974a): Simulation of one-dimensional moisture transfer in unsaturated, layered, field soils. In: Data analysis and data synthesis of forest ecosystems. B. Ulrich et al. eds. Göttinger Bodenkundliche Berichte, 30, 150–169.
- Van der Ploeg, R.R. & Benecke, P. (1974b): Unsteady, unsaturated n-dimensional moisture flow in soil: a computer simulation program. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 38 (6): 881–885.
- Van der Ploeg, R.R., F. Beese & P. Benecke. (1976): Simulationsmodelle von Wald-Ökosystemen: Wasser. Verhdlgn. Ges. f. Ökologie, in dieser Ausgabe, S. 29–41.
- Weihe, J. (1970): Warum noch immer Interzeptionsuntersuchungen im Wald? Mitt. Arb. Kreis „Wald und Wasser“ Nr. 5: Untersuchungen in Nordwestdeutschland über die Beziehungen zwischen Wald und Wasser, Selbstverlag, 43 Essen-Bredeney, Wallneyer Str. 6, S. 10–22.

Energiehaushalt der Pflanzenbestände im Solling.  
Wilmers, Hannover (erscheint an anderer Stelle).

Anschrift der Verfasser;

Dr. P. Benecke & Dr. R.R. van der Ploeg, Institut für Bodenkunde und Waldernährung, Büsgenweg 2, 30 Göttingen-Weende