

Simulation des Wasserhaushaltes eines Buchenwaldes mit dem forstlichen Wasserhaushaltsmodell WBS3

Andreas Matzarakis, Helmut Mayer, Dirk Schindler und Jürgen Fritsch

Meteorologisches Institut, Universität Freiburg

Zusammenfassung

Das forstliche Wasserhaushaltsmodell WBS3 ist ein deterministisches hydrologisches Modell, das als meteorologische Eingangsgrößen lediglich den Tagesmittelwert der Lufttemperatur und die tägliche Niederschlagshöhe benötigt. Bisherige Validierungen von WBS3 ergaben für die Verdunstung von Wäldern gute Übereinstimmungen zwischen den Ergebnissen aus Modellrechnungen und Messungen.

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs (SFB) 433 „Buchendominierte Laubwälder unter dem Einfluss von Klima und Bewirtschaftung“ wurde der Wasserhaushalt eines Buchenwaldes am SFB-Standort Möhringen für den Zeitraum von 1982 bis 1999 über den Einsatz von WBS3 simuliert. Die dafür erforderlichen meteorologischen Eingangsgrößen stammen von den Klimastationen Möhringen und Tuttlingen des Deutschen Wetterdienstes. Über die Resultate läßt sich die forsthydrologische Hintergrundsituation für Buchenbestände im regionalen Maßstab charakterisieren.

Simulation of the water balance of a beech stand with the forest water balance model WBS3

Abstract

The forest water balance model WBS3 is a deterministic hydrological model, which requires only daily mean value of air temperature and daily total of precipitation as meteorological input data. Validation of WBS3 for the evapotranspiration of forests showed good agreement between results from model calculations and measurements up till now.

Within the framework of the collaborative research project (SFB) 433 “Beech dominated deciduous forests under the influence of climate and forest management”, the water balance of a beech stand at the SFB-site Möhringen was simulated for the period 1982 to 1999 by use of WBS3. The meteorological input data were obtained from the climate stations Möhringen and Tuttlingen of the German Weather Service. The results enable the characterisation of the forest-hydrological background conditions for beech stands in a regional scale.

1 Einleitung

Die fundamentale Bedeutung der Verdunstung liegt darin, dass sie die Wasser- und Energiebilanz von Oberflächen in verschiedenen räumlichen und zeitlichen Ebenen verbindet (u.a. SCHMUGGE und ANDRÉ, 1991). Die Verdunstung stellt auch eine wichtige Eingangsgröße für die Ermittlung und Simulation von Stofftransportprozessen in der wäßrigen Phase von Ökosystemen dar (ZIMMERMANN, 1995; FRITSCH, 1998).

Die Verdunstung von Wäldern läßt sich über verschiedene experimentelle Verfahren und Modellansätze bestimmen (u.a. FRÜHAUF, 1998). Modelle haben dabei den Vorteil, dass sie Prozessuntersuchungen sowie retrospektive und prognostische Analysen ermöglichen. Allerdings ist ihre Validierung unerlässlich.

Die Zielsetzung dieser Studie ist die retrospektive Simulation des Wasserhaushalts eines Buchenwaldes am Standort der Kernflächen des Sonderforschungsbereichs (SFB) 433 „Buchen-dominierte Laubwälder unter dem Einfluss von Klima und Bewirtschaftung“ bei Möhringen (südwestliche Schwäbische Alb). Dieser SFB wird seit dem Jahr 1999 an der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität Freiburg durchgeführt und beinhaltet neben waldbaulichen und sozialwissenschaftlichen auch ökologische Analysen. Mit dieser Simulation soll die forsthydrologische Hintergrundsituation für Buchenwälder in der Region des SFB-Standes Möhringen charakterisiert werden.

2 Forstliches Wasserhaushaltsmodell WBS3

Von den verfügbaren forstlichen Wasserhaushaltsmodellen, die für diese Untersuchung geeignet sind, wurde das Modell WBS3 von SCHMIDT (1990) verwendet, weil es folgende Vorteile hat:

- ** Als zeitlich abhängige Variablen werden nur der Tagesmittelwert der Lufttemperatur T_a und die Tagessumme des Freilandniederschlags N_F benötigt.
- ** Im Rahmen mehrerer Validierungen ergaben sich für die Verdunstung von Wäldern gute Übereinstimmungen zwischen den Ergebnissen aus Simulationsrechnungen und Messungen (z.B. *Eddy-Correlation-Methode* bei FRITSCH, 1998).

Die beiden meteorologischen Eingangsgrößen für WBS3 sind vergleichsweise leicht verfügbar. So können sie entweder direkt von amtlichen Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) übernommen oder über statistische Verfahren aus Daten von nahen Klimastationen abgeschätzt werden.

WBS3 muss an den jeweiligen Untersuchungsstandort angepasst werden. Dafür werden folgende Angaben benötigt, die als zeitlich unabhängig angenommen werden:

- Bestockungsgrad,
- Mischungsanteil von Laub- und Nadelwald,
- Bodenart,
- nutzbare Wasserspeicherkapazität des Bodens,
- Hangneigung,
- Hangrichtung,
- geographische Breite.

Die forstlichen, bodenkundlichen und geographischen Vorgaben haben nur generellen Einfluss auf das Niveau der simulierten Werte, deren Dynamik fast ausschließlich von den täglich variierenden meteorologischen Eingangsgrößen bestimmt wird. Unter der Akzeptanz von Fehlertoleranzen, die häufig ohnehin im Bereich möglicher, technisch bedingter Messfehler liegen, liefert WBS3 relativ vergleichbare Resultate zu direkten Bestimmungen der Verdunstung von Wäldern. Dabei liegt die Annahme zugrunde, dass der Einfluss der Witterung auf die pflanzliche Vitalität und das pflanzliche Wachstum weiträumig und zeitlos nach vergleichbaren Grundsätzen erfolgt.

WBS3 ist somit kein physikalisch begründetes Modell, das die Thermodynamik des Verdunstungsprozesses aufgreift, sondern ein rein deterministisches, hydrologisches Modell, dessen Grundlage die Bilanzierung der einzelnen, für Waldbestände relevanten Wasserhaushaltsgrößen darstellt. Bei WBS3 wird im Vergleich zu anderen Bodenwasserhaushaltsmodellen (u.a. WHNSIM in der Version von ZIMMERMANN, 1995) in mancher Beziehung auf aktuell mögliche Exaktheit von einzelnen Simulationsgrößen verzichtet. Dafür läßt sich WBS3 auf nahezu beliebige Waldstandorte anwenden.

Bei Simulationsrechnungen mit WBS3 werden zu Beginn ein

- aufgesättigter Bodenspeicher,
- leerer Interzeptionsspeicher,
- leerer Schneespeicher

unterstellt.

Im Vergleich zur Ursprungsversion (SCHMIDT, 1990) sind in der hier verwendeten Version von WBS3 die Funktionen zur Berechnung der potentiellen Interzeption, der Transpiration und der Evaporation von SCHMIDT (1997), basierend auf empirischen Grundlagen, modifiziert worden. Die Simulationsrechnungen mit WBS3 laufen in folgenden Stufen ab (FRITSCH, 1998):

- ** Zunächst wird die potentielle Verdunstung nach dem Ansatz von HAMON (1963) in Abhängigkeit von der Tageslänge und dem Tagesmittelwert der Lufttemperatur T_a berechnet.
- ** Der gemessene Freilandniederschlag (Tagessumme) wird in Interzeption und Bestandesniederschlag aufgeteilt. Die Interzeption wird als Funktion von Freilandniederschlag, Bestockungsgrad sowie Mischungsanteil von Laub- und Nadelwald berechnet. Die aktuelle Interzeption wird aus der potentiellen Interzeption und der aktuellen Interzeptionsspeicherfüllung ermittelt. Da das Interzeptionswasser ungehindert verdunsten kann, wird die Evaporation durch diesen Speicher bestimmt. Übersteigt die aktuelle Interzeption die potentielle Verdunstung, wird der Überschuss auf den nächsten Tag übertragen.
- ** Die Transpiration und die mögliche Bodenevaporation werden dem Bodenwasserspeicher in Abhängigkeit von Bodenart und –speichersättigung entzogen, wobei sie je nach Jahreszeit, Bestockungsgrad und Mischungsanteil gemäß der potentiellen Verdunstung bestimmt und aufgeteilt werden.
- ** Der Abfluss ergibt sich als Restterm der täglichen Wasserbilanz. Interzeptions- und Schneespeicher dienen nur als temporäre Zwischenspeicher und beeinflussen so indirekt den täglichen Eintrag durch den Niederschlag bzw. Austrag durch die Evapotranspiration.

Als Resultat liefert das Bodenwasserhaushaltsmodell WBS3 Tagessummen (in mm) folgender Wasserhaushaltskomponenten

- Bestandesniederschlag,
- Interzeption,
- Interzeptionsverdunstung,
- Evaporation,
- Transpiration,
- Abfluß.

Die tägliche Auflösung dient hauptsächlich einer realitätsnahen Umsetzung dynamischer Prozesse, die über größere Zeiteinheiten (z.B. Monate) nicht oder kaum sinnvoll zu beschreiben sind.

3 Methodik

Da für die Region des SFB-Standortes Möhringen noch keine längeren Zeitreihen zum Wasserhaushalt von Buchenwäldern existieren, wurden sie über den Einsatz von WBS3 simuliert. Dazu wurden Tagesmittelwerte der Lufttemperatur T_a und tägliche Niederschlagshöhen N_F herangezogen, die im Zeitraum 1982 bis 1990 von der DWD-Klimastation Möhringen und im

Zeitraum 1992 bis 1999 von der DWD-Klimastation Tuttlingen (DWD-Klimastation Möhringen war nicht mehr in Betrieb) stammen. Das Jahr 1991 konnte aufgrund des Stationswechsels nicht berücksichtigt werden. In einer ersten Näherung wurde angenommen:

- ** Die Vergleichbarkeit der T_a - und N_F -Zeitreihen der vergleichsweise nahen Standorte der DWD-Klimastationen Möhringen und Tuttlingen ist gegeben.
- ** Der Buchenwald, dessen Wasserhaushalt simuliert wird, befindet sich in ebener Lage; seine Struktur ändert sich über den Mittelungszeitraum nicht.
- ** Die Bodenart (toniger Lehm) ist dem SFB-Standort Möhringen angepasst.
- ** Die maximale Interzeptionsspeicherkapazität des Buchenwaldes beträgt 4.5 mm (MITSCHERLICH, 1971).
- ** Die nutzbare Bodenwasserkapazität beträgt 120 mm.

Die weiteren zeitinvarianten Eingangsparameter für die Modellsimulationen sind in der Tab. 1 zusammengestellt.

Tab. 1: Zeitunabhängige Eingangsvariable der WBS3-Simulationsrechnungen am SFB-Standort Möhringen - BG: Bestockungsgrad, ML: Mischungsanteil von Laubwald, MN: Mischungsanteil von Nadelwald, B: Bodenart, NSK_{max} : maximal nutzbare Speicherkapazität des Bodens, β : Hangneigung, α : Hangrichtung, φ : geographischen Breite

Table 1: Time-independent input variables for the WBS3-simulations at the SFB-site Möhringen - BG: degree of stocking, ML: mixing ratio of deciduous trees, MN: mixing ratio of coniferous trees, B: kind of soil, NSK_{max} : maximum useable storage capacity of the soil, β : slope angle, α : slope direction, φ : geographical latitude

BG	ML	MN	B	NSK_{max} (mm)	β (Grad)	α (Grad)	φ (Grad)
1.0	1.0	0.0	toniger Lehm	100	0	0	48

4 Ergebnisse

Als exemplarische Resultate der WBS3-Simulationsberechnungen enthält die Abb. 1 die kumulativen Tagessummen der Verdunstung eines Buchenwaldes bei Tuttlingen im Jahr 1999. In der Abb. 2 sind die kumulativen Tagessummen der Komponenten der Verdunstung des Buchenwaldes - Transpiration, Interzeption und Evaporation - angegeben. In beiden Abbildungen läßt sich die zeitliche Dynamik der Verdunstung einschließlich ihrer Komponenten erkennen. Als Referenzgrößen sind in den Abb. 1 und 2 zusätzlich die kumulativen Tagesmittelwerte der Lufttemperatur T_a , gemessen in 2 m Höhe über Grund, und die kumulativen Tagessummen des Freilandniederschlages N_F , gemessen in 1 m Höhe über Grund, von der DWD-Klimastation Tuttlingen dargestellt. Aus den Abb. 1 und 2 folgt, dass im Modellierungsjahr 1999 die Verdunstung V des Buchenwaldes 65 % von N_F beträgt. Bezogen auf V belaufen sich die Anteile von Transpiration T auf 67 %, Interzeption I auf 22 % und Evaporation E auf 11 %. Wird als Bezugswert die Jahressumme von N_F verwendet, ergeben sich für T 44 %, für I 14 % und für E 7 %.

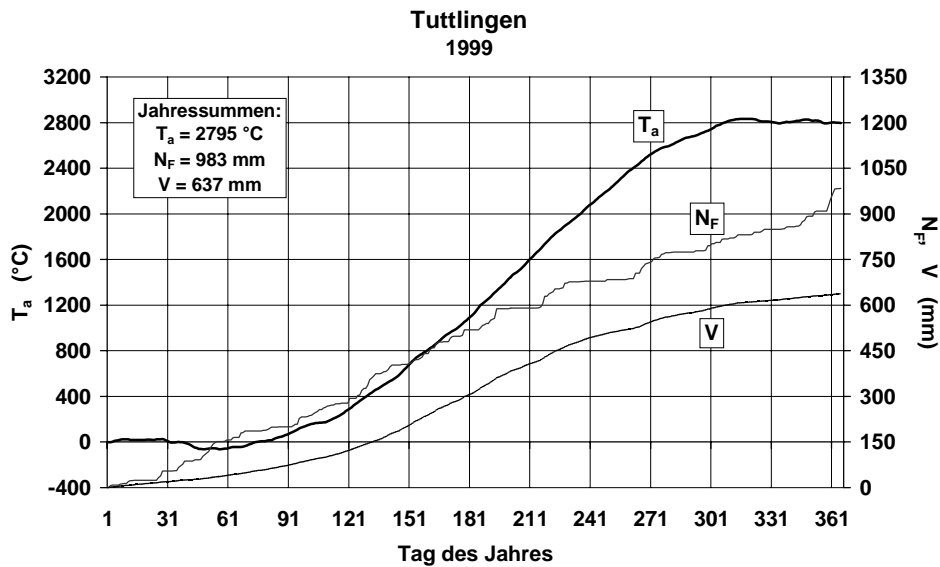


Abb. 1: Kumulative Tagesmittelwerte der Lufttemperatur T_a sowie kumulative Tagessummen von Freilandniederschlag N_F und Verdunstung V eines Buchenwaldes bei Tuttlingen im Jahr 1999

Fig. 1: Cumulative daily averages of air temperature T_a as well as daily totals of precipitation N_F and evaporation V of a beech stand near Tuttlingen for the year 1999

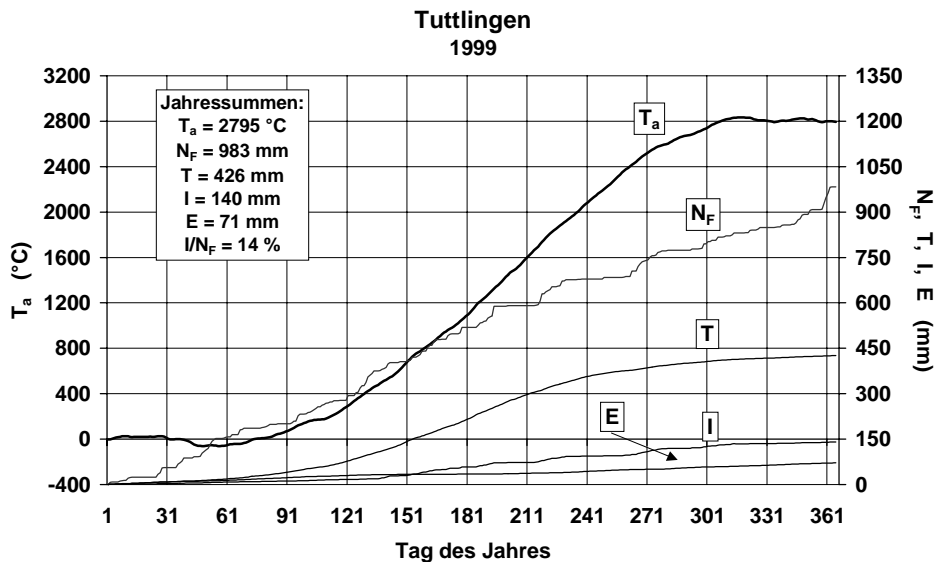


Abb. 2: Kumulative Tagesmittelwerte der Lufttemperatur T_a sowie kumulative Tagessummen von Freilandniederschlag N_F , Transpiration T , Interzeption I und Evaporation E eines Buchenwaldes bei Tuttlingen im Jahr 1999

Fig. 2: Cumulative daily averages of air temperature T_a as well as daily totals of precipitation N_F , transpiration T , interception I and water/soil-evaporation E of a beech stand near Tuttlingen for the year 1999

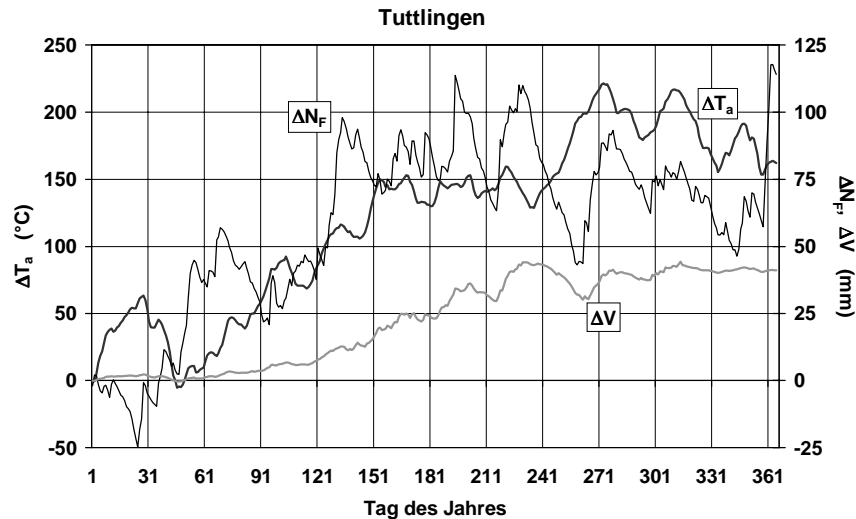


Abb. 3: Kumulative Abweichungen der Tagesmittelwerte der Lufttemperatur ΔT_a sowie der Tagessummen von Freilandniederschlag ΔN_F und Verdunstung ΔV eines Buchenwaldes bei Tuttlingen im Jahr 1999 von den entsprechenden Mittelwerten für den Zeitraum 1982 bis 1999

Fig. 3: Cumulative deviations of daily averages of the air temperature ΔT_a as well as daily totals of precipitation ΔN_F and evaporation ΔV of a beech stand near Tuttlingen in 1999 from the corresponding mean values in the period 1982 to 1999

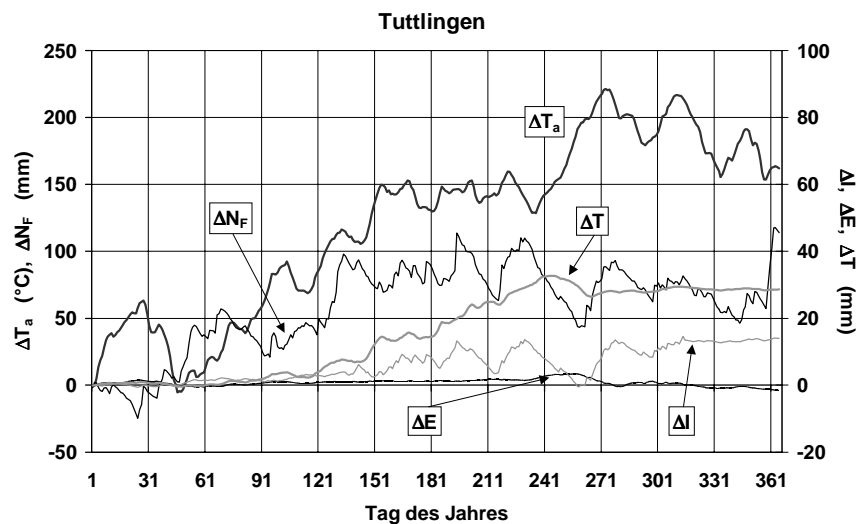


Abb. 4: Kumulative Abweichungen der Tagesmittelwerte der Lufttemperatur ΔT_a sowie der Tagessummen von Freilandniederschlag ΔN_F , Transpiration ΔT , Interzeption ΔI und Evaporation ΔE eines Buchenwaldes bei Tuttlingen im Jahr 1999 von den entsprechenden Mittelwerten für den Zeitraum 1982 bis 1999

Fig. 4: Cumulative deviations of daily averages of the air temperature ΔT_a as well as daily totals of precipitation ΔN_F , transpiration ΔT , interception ΔI and water/soil-evaporation ΔE of a beech stand near Tuttlingen in 1999 from the corresponding mean values in the period 1982 to 1999

Um die Ergebnisse für das Jahr 1999 beurteilen zu können, enthalten die Abb. 3 und 4 die kumulativen Abweichungen der Tagesmittelwerte von T_a sowie der Tagessummen von N_F , V , T , I und E im Jahr 1999 von den entsprechenden Mittelwerten für den Zeitraum 1982 bis 1999. Daraus läßt sich entnehmen, dass das Jahr 1999 insgesamt wärmer und niederschlagsreicher als der Mittelungszeitraum war. Da bei den Modellrechnungen angenommen wurde, dass sich die Struktur des Buchenwaldes im Modellierungszeitraum nicht verändert, ist es nicht verwunderlich, dass im Jahr 1999 auch V , T und I größer als im Mittelungszeitraum waren. Lediglich bei E deutet sich keine signifikante Änderung an.

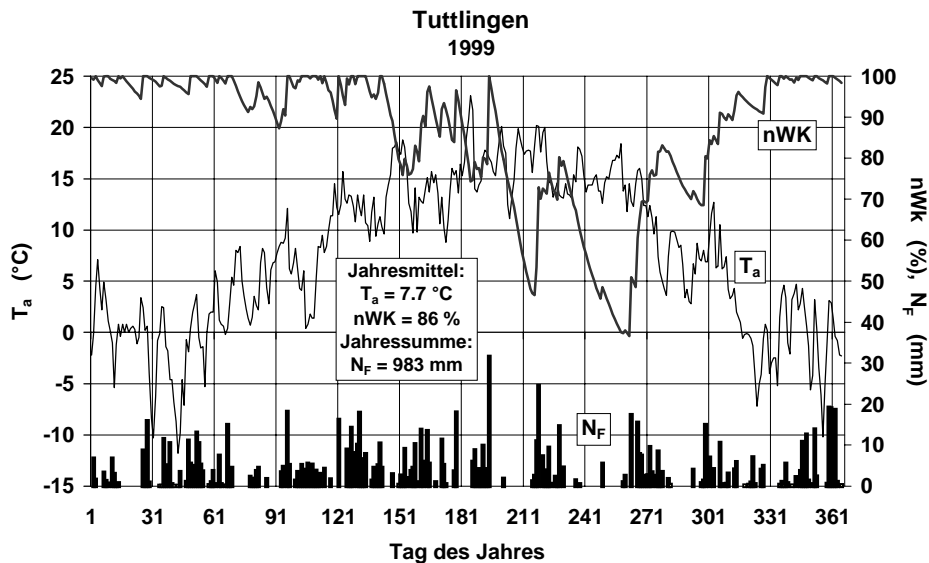


Abb. 5: Tagesmittelwerte von Lufttemperatur T_a , tägliche Freilandniederschlagshöhe N_F und tägliche relative nutzbare Wasserkapazität nWK des Bodens unter einem Buchenwald bei Tuttlingen im Jahr 1999

Fig. 5: Daily averages of air temperature T_a , daily totals of precipitation N_F and daily relative useable soil water capacity nWK for a beech stand near Tuttlingen for the year 1999

In der Abb. 5 ist – als Beispiel für die weitere Einsatzmöglichkeit des Modells WBS3 - der modellierte Verlauf der relativen nutzbaren Wasserkapazität nWK des Bodens unter einem Buchenwald bei Tuttlingen dargestellt. Zusätzlich enthält diese Abbildung die zeitlich variablen meteorologischen Eingangsgrößen des Modells WBS3, die Tagesmittelwerte von T_a und die täglichen Höhen von N_F , denen eine steuernde Funktion für nWK zukommt. Die Abb. 5 zeigt Anfang Juli 1999 und Mitte September 1999 zwei kürzere Perioden, in denen nWK unter 50 % liegt, weil niederschlagsfreie Zeiten vorausgehen.

In den Tab. 2 und 3 sind Jahresmittelwerte bzw. Jahressummen aus Modellierungen des Wasserhaushalts eines Buchenwaldes in ebener Lage beim SFB-Standort Möhringen zusammengestellt, die auf T_a - und N_F -Daten von den DWD-Klimastationen Möhringen (1982 bis 1990) und Tuttlingen (1992 bis 1999; allerdings ohne 1997) beruhen. Dabei wurden folgende Größen berücksichtigt:

** $T_{a,mit}$: Jahresmittelwert von T_a ,

Tab. 2: Kenngrößen des Wasserhaushalts eines Buchenwaldes beim SFB-Standort Möhringen, Erläuterungen der Symbole im Text

Table 2: Characteristic values of the water balance of a beech stand near the SFB-site Möhringen (see explanations of symbols in the text)

Jahr	$T_{a,mit}$ (°C)	$\Sigma T_{a,mit}$ (°C)	WS (°C)	N_F (mm)	$N_{F,VP}$ (mm)	d_{NF}	$d_{NF,VP}$	V_p (mm)	V (mm)
1982	7.1	2596	2784	998	544	149	69	555	642
1983	7.2	2628	2897	829	476	165	90	569	500
1984	6.2	2266	2481	762	434	159	81	514	534
1985	6.0	2193	2670	712	447	133	67	535	524
1986	6.6	2421	2748	1052	619	168	83	547	583
1987	6.4	2320	2688	893	582	168	87	533	627
1988	7.4	2703	2820	965	424	184	78	553	606
1989	7.3	2675	2854	655	402	134	69	555	541
1990	7.5	2744	2907	846	454	139	69	562	596
1992	7.9	2901	3054	914	486	174	84	589	624
1993	7.5	2755	2976	767	460	188	98	571	644
1994	8.9	3246	3341	971	667	192	102	614	685
1995	7.6	2783	2985	1004	527	195	96	573	636
1996	6.5	2361	2662	736	437	162	83	539	601
1998	7.5	2715	2930	822	416	164	89	569	560
1999	7.7	2795	2997	983	555	186	92	576	637
Mittel	7.2	2620	2853	862	492	165	83	559	596

** $\Sigma T_{a,mit}$: jährliche Lufttemperatursumme ($= \sum_{i=1}^n \overline{T_{a,i}}$, mit Tagesmittelwert der Lufttemperatur $\overline{T_{a,i}}$ und Anzahl n der Tage pro Jahr),

** WS: Wärmesumme ($= \sum_{i=1}^n \overline{T_{a,i}}$, mit Tagesmittelwert der Lufttemperatur $\overline{T_{a,i}} > 0$ °C und Anzahl n der Tage pro Jahr),

** N_F : Freilandniederschlag,

** $N_{F,VP}$: Freilandniederschlag im Zeitraum April bis Oktober,

** d_{NF} : Anzahl der Tage mit Freilandniederschlag,

** $d_{NF,VP}$: Anzahl der Tage mit Freilandniederschlag im Zeitraum April bis Oktober,

** V_p : potentielle Verdunstung nach dem Ansatz von HAMON (1963),

** V: Verdunstung nach WBS3,

** T: Transpiration nach WBS3,

- ** I: Interzeption nach WBS3,
- ** E: Evaporation nach WBS3,
- ** I_{VP} : Interzeption nach WBS3 im Zeitraum April bis Oktober,
- ** nWK : relative nutzbare Wasserkapazität des Bodens nach WBS3,
- ** $d_{nWK < 50 \%}$: Anzahl der Tage mit einer relativen nutzbaren Wasserkapazität des Bodens nach WBS3 unter 50 %

Tab. 3: Kenngrößen des Wasserhaushalts eines Buchenwaldes beim SFB-Standort Möhringen, Erläuterungen der Symbole im Text

Table 3: Characteristic values of the water balance of a beech stand near the SFB-site Möhringen (see explanations of symbols in the text)

Jahr	T (mm)	I (mm)	E (mm)	I/N_F (%)	I_{VP} (mm)	I_{VP}/N_{F,VP} (%)	nWK_{mit} (%)	d_{nWK < 50 %}
1982	432	133	77	13	94	17	91	2
1983	336	98	66	12	73	15	74	94
1984	342	125	67	16	96	22	82	41
1985	365	97	62	14	71	16	78	73
1986	386	130	67	12	97	16	84	37
1987	413	139	75	16	105	18	92	7
1988	394	139	73	14	94	22	83	11
1989	368	102	71	16	70	18	73	52
1990	398	120	78	14	86	19	85	26
1992	417	131	76	14	92	19	83	30
1993	430	138	76	18	100	22	85	0
1994	456	141	88	15	109	16	89	13
1995	423	136	77	14	104	20	86	10
1996	408	121	72	16	87	20	86	4
1998	362	129	69	16	90	22	80	47
1999	426	140	71	14	102	18	86	23
Mittel	395	125	73	15	91	19	83	30

Die Ergebnisse in den Tab. 2 und 3 lassen sich für den Untersuchungszeitraum wie folgt zusammenfassen:

- ** Die mittlere jährliche Lufttemperatursumme beträgt 92 % der mittleren jährlichen Wärmesumme.
- ** Der mittlere Freilandniederschlag von April bis Oktober beläuft sich auf 57 % der mittleren jährlichen Niederschlagssumme.

- ** Die mittlere Anzahl der Tage mit Freilandniederschlag im Zeitraum von April bis Oktober (7 Monate) beträgt 50 % der mittleren jährlichen Anzahl der Tage mit Niederschlag.
- ** Die mittlere jährliche Verdunstung nach dem Ansatz von HAMON (1963) beläuft sich auf 94 % der mittleren jährlichen Verdunstung des Buchenwaldes nach WBS3.
- ** Die mittlere jährliche Verdunstung nach WBS3 besteht zu 67 % aus der Transpiration, zu 21 % aus der Interzeption und zu 12 % aus der Evaporation.
- ** Im Jahresmittel beträgt der Anteil der Interzeption am Freilandniederschlag 15 %; im Zeitraum April bis Oktober erhöht sich dieser Anteil auf 19 %.
- ** Die relative nutzbare Wasserkapazität des Bodens liegt im Mittel an 30 Tagen – im Sommerhalbjahr – unter 50 %.

5 Schlußfolgerungen

Die Simulationsrechnungen zum Wasserhaushalt eines Buchenwaldes beim SFB-Standort Möhringen über das forstliche Wasserhaushaltsmodell WBS3 zeigen die Größe und jährliche Variabilität der Wasserhaushaltskomponenten auf. Damit kann die forsthydrologische Hintergrundsituation für Buchenbestände im regionalen Maßstab charakterisiert werden. Diese Ergebnisse lassen sich für die Buchenbestände an den beiden SFB-Versuchshängen konkretisieren, wenn davon aktuelle meteorologische Daten und genaue Angaben zum Boden sowie zu den einzelnen Buchenbeständen verwendet werden können.

Literatur

- FRITSCH, J., 1998: Energiebilanz und Verdunstung eines bewaldeten Hanges im Hochschwarzwald. - Ber. Meteor. Inst. Univ. Freiburg Nr. 1.
- FRÜHAUF, C., 1998: Verdunstungsbestimmungen von Wäldern am Beispiel eines Fichtenbestandes im Tharandter Wald. – Tharandter Klimaprotokolle, Band 1.
- HAMON, W.R., 1963: Computation of direct runoff amounts from storm rainfall. - Int. Ass. Sci. Hydrol. Pub. 63.
- MITSCHERLICH, G., 1971: Wald, Wachstum und Umwelt. Band 2: Waldklima und Wasserhaushalt. - Frankfurt a. M, Sauerländer's Verlag.
- SCHMIDT, J., 1990: Überlegungen zur Erfassung und Beschreibung von Wachstumsgängen am Beispiel der Durchmesserzuwachsentwicklung der letzten Jahrzehnte von Fichtenbeständen in Bayern unter besonderer Berücksichtigung witterungsbedingter Zuwachsreaktionen. - Forstl. Forschungsber. München Nr. 104.
- SCHMIDT, J., 1997: Modifizierte Version des Bodenwasserhaushaltsmodelles WBS3. – Pers. Mitteilung.
- SCHMUGGE, T.J.; ANDRÉ, J.-C., 1991: Land surface evaporation. – Berlin, Springer-Verlag.
- ZIMMERMANN, L., 1995: Der Bodenwasserhaushalt an einem Hochlagenstandort im Südschwarzwald. - Freiburger Bodenkundl. Abhandlungen Nr. 35.

Anschrift der Autoren: Dr. Andreas Matzarakis, Prof. Dr. Helmut Mayer, Dirk Schindler, Meteorologisches Institut der Universität Freiburg, Werderring 10, D-79085 Freiburg, e-mail: matzarak@uni-freiburg.de; Dr. Jürgen Fritsch, Hofenstr. 28, D-79238 Ehrenkirchen