

Speichermodell Bodenwasserhaushalt

Georg Hörmann

schorsch@pz-oekosys.uni-kiel.d400.de, <http://www.toppoint.de/~georg>

Projektzentrum Ökosystemforschung

I Grundlagen

Die einfachste Methode zur Berechnung der Gebietswasserbilanz ist die klimatische Wasserbilanz, d.h. die Differenz aus Niederschlags und potentieller Verdunstung. Sie gibt grobe Anhaltswerte, sagt aber wenig aus über die aktuelle Verdunstung.

Die genauesten Wasserbilanzen erhält man durch die Anwendung eines Simulationsmodells, das auf der Darcy bzw. Richards-Gleichung aufbaut. Diese Modelle sind zwar genau, erfordern jedoch einen hohen Aufwand bei Einarbeitung und Datenerhebung.

Eine praktische Zwischenlösung ist die Anwendung von sog. Speichermodellen, wie sie auch in großen Gebietsmodellen eingesetzt werden. Sie berechnen den Bodenwasserhaushalt grundwasserferner Standorte aus einfachen, allgemein verfügbaren Daten und sind mit geringem Aufwand zu erstellen. Wie der Name schon sagt, berechnen Speichermodelle den Wasserhaushalt mit verschiedenen Wasserspeichern. Im einfachsten Fall wird nur der durchwurzelte Porenraum berücksichtigt. Hydrologische Modelle arbeiten normalerweise mit Interzeptionsspeicher (Blatt bzw. Pflanze, Streuschicht in Wäldern), einem oder mehreren Bodenspeichern und einem Grundwasserspeicher. Der Aufbau des Praktikumsmodells ist in Abb. 1 gezeigt. Die einzelnen Speicher sind Blatt, Streu und Boden. Als Eingabedaten werden Niederschlag, potentielle Verdunstung, Blattflächenindex und die bodenphysikalischen Parameter gebraucht, ausgegeben werden die Flüsse zwischen den Speichern, die aktuelle Verdunstung als Summe von Interzeption, Evaporation und Transpiration und die Sickerung in das Grundwasser.

Blatt und Streuspeicher sind im Modell als einfache Überlauf-Speicher implementiert, die nach folgendem Schema berechnet werden: zu dem aktuellen Speicherinhalt wird der Niederschlag addiert, die Verdunstung subtrahiert. Wenn der Inhalt ("Bilanz") größer als die Speicherkapazität wird, fließt der Überschuss in den nächsten Speicher (z.B. aus dem Blattspeicher in den Streuspeicher). Wenn der Verdunstungsanspruch nicht aus dem aktuellen Speicher gedeckt werden kann, wird er ebenfalls an den nächsten Speicher weitergegeben.

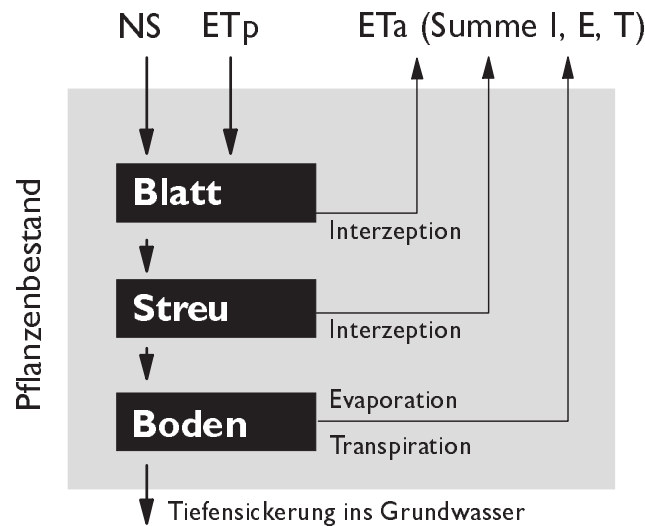


Abb. 1: Aufbau des Speichermodells

Dieser einfache Ansatz hat den Nachteil, daß nur bei Überschreitung der Feldkapazität (FK) ein Fluß nach unten auftritt. So kann (rein rechnerisch) im Sommer über Monate hinweg kein Fluß in das Grundwasser berechnet werden, obwohl der Bodenwassergehalt fast Feldkapazität erreicht. Um dieses Verhalten des Modells etwas realistischer zu gestalten, wird meist eine nicht-lineare Funktion benutzt, um auch bei nicht gesättigtem Boden einen Abfluß aus der durchwurzelten Zone in Abhängigkeit vom Bodenwassergehalt zu generieren. Für den Bodenspeicher in diesem Modell wurde ein Ansatz nach Glugla gewählt.

2 Aufbau der Arbeitsblätter

Das Modell ist mit dem Programm "Excel" (V5) erstellt und in mehrere Arbeitsblätter aufgeteilt. Die Aufteilung der Arbeitsmappe ist in der nächsten Abbildung zu sehen. Wichtig sind die folgenden Module:

Speichermodell	enthält das eigentliche Modell
LAI	LAI-Eingabedaten
Interzeptionskapazität	Submodell zur Berechnung von Tageswerten des LAI
Haude	Submodell zur Berechnung der Verdunstung nach Haude
Streu	Abtrocknungskurve des obersten Kompartiments (Streu oder unbedeckter Boden)

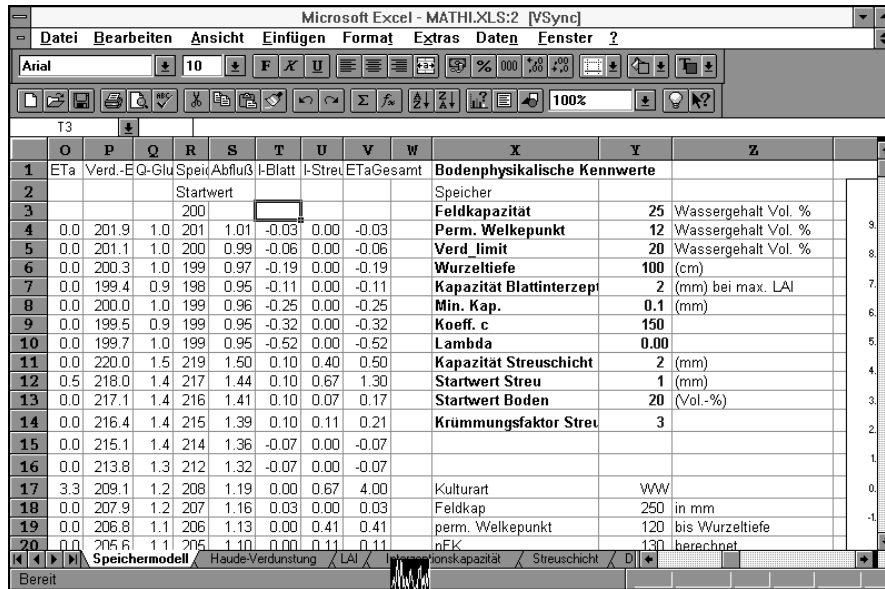


Abb. 2: Aufbau der Arbeitsmappe (Excel 5.0). Die einzelnen Teilmodelle sind unten im Bild sichtbar (Reiter/Tabs)

2.1 Modell der Blatt-Interzeption

Die Interzeption (Verdunstung des durch die Blattoberflächen aufgefangenen Wassers) ist natürlich abhängig vom Vorhandensein der Blätter, d.h. es müssen Daten über die Entwicklung des Vegetationsspeichers (Blattflächenindex, LAI) vorliegen. Im Modell wird dies durch das Sub-Modell "Interzeptionsspeicher" durchgeführt. Es berechnet Tageswerte der Speicherkapazität aus dem Blattflächenindex, der als Zeitreihe eingegeben wird. Es müssen mindestens Daten vorliegen über Vegetationsbeginn, Erreichen des maximalen LAI, Ernte- bzw. Schnittzeitpunkt.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Lindat	LAI	Datum	Index	Max. -Kap.		
2	324	0	20.11.1988	1	4,57		
3	465	0	10.04.1989	2	0,4157549	Steigung	
4	475	1,1	20.04.1989	3			
5	485	3	30.04.1989	4			
6	495	3,7	10.05.1989	5			
7	505	4	20.05.1989	6			
8	516	4,2	31.05.1989	7			

Abb. 3: Aufbau der Eingabedaten für LAI bzw. Interzeptions-Submodell

Die einzelnen Spalten sind wie folgt belegt:

- A linearisiertes Datum (Tage als ganze Zahlen, wird vom Modell nicht benutzt)
- B LAI (Eingabe)
- C Datum im Klartext (Eingabe)
- E Index (Zeilennummer, wird automatisch erzeugt), benötigt zur Interpolation der Tageswerte
- F Berechnete Parameter (maximaler LAI, Verhältnis LAI zu Interzeptionsspeicher, wird automatisch berechnet)

Aus den Stützpunkten des LAI und der maximalen Kapazität wird dann die Zeitreihe der Interzeptionsspeicher berechnet (siehe Abb. 4).

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Datum	Index	startwert	Endwert	Startdatum	Enddatum	Wert	
2	01.11.1990	59	2,8	2	31.10.1990	10.11.1990	2,72	
3	02.11.1990	59	2,8	2	31.10.1990	10.11.1990	2,64	
4	03.11.1990	59	2,8	2	31.10.1990	10.11.1990	2,56	
5	04.11.1990	59	2,8	2	31.10.1990	10.11.1990	2,48	
6	05.11.1990	59	2,8	2	31.10.1990	10.11.1990	2,4	
7	06.11.1990	59	2,8	2	31.10.1990	10.11.1990	2,32	
8	07.11.1990	59	2,8	2	31.10.1990	10.11.1990	2,24	

Abb. 4: Berechnung der Zeitreihe des Interzeptionsspeichers

Die einzelnen, automatisch berechneten Spalten enthalten folgende Daten:

Spalte	Inhalt
A	Datum (wird aus dem Speichermodell übernommen)
B	Index: Zeilennummer, aus der der Startwert stammt
C	Startwert: unterer Stützwert des LAI
D	Endwert: oberer Stützwert des LAI
E	Startdatum: Datum des unteren Stützwertes
F	Enddatum: Datum des oberen Stützwertes
G	Wert: LAI für das aktuelle Datum (Spalte A), berechnet als lineare Interpolation aus den Werten der Spalten C und D.

Die aktuelle Interzeptionskapazität (Spalte D im Bilanzblatt "Speichermodell") ergibt sich jetzt aus dem LAI und der maximalen Speicherkapazität.

2.2 Verdunstungsberechnung nach HAUDE

nach einem Text von Stefan Bayer (AG EDV SS 93)

Das HAUDE-Verdunstungsmodell ist eine einfache Möglichkeit die potentielle Verdunstung einer Fläche abzuschätzen. Es kommt mit allgemein verfügbaren Eingabedaten aus und liefert trotzdem Werte, die für längere Perioden (Monate) den Ergebnisse komplizierterer Modelle (z.B. PENMAN) nahe kommen. Zur Verdunstungsberechnung nach HAUDE werden folgende Daten benötigt:

- relative Luftfeuchte: f in % um 14.00 Uhr
- Temperatur: T in °C um 14.00 Uhr
- Bewuchs/Kulturart der Fläche
- Haude-Koeffizient (abhängig von Kulturart und Monat)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Datum	Mon: Koeff. a	Temp.	Rel. Luftfe	es-Dampf	ETP (mm/	Bewuchs	Haude Koeffizient	a			
2	01.01.1995	1 0.203	0.5	79.8	-0.83	-0.03	Gras	Monat	Bewuchs			
3	02.01.1995	1 0.203	-0.7	87.6	-2.64	-0.07		0	Gras	Mais	WWV	
4	03.01.1995	1 0.203	-0.8	61.2	-2.79	-0.22		1	0.2025	0.135	0.18	
5	04.01.1995	1 0.203	-5.2	93.4	-9.43	-0.13		2	0.205	0.135	0.18	
6	05.01.1995	1 0.203	-8.3	90.1	-14.11	-0.28		3	0.21	0.135	0.1875	
7	06.01.1995	1 0.203	-6.3	84.1	-11.09	-0.36		4	0.2925	0.135	0.2625	
8	07.01.1995	1 0.203	-6	73.1	-10.64	-0.58		5	0.2925	0.18	0.3375	
9	08.01.1995	1 0.203	-4.3	78	-8.07	0.50		6	0.2775	0.255	0.3751	

Abb. 5: Berechnung der Verdunstung nach Haude, Eingabe und Ergebnisteil

Die pot. Evapotranspiration leitet sich aus folgender Formel ab:

$$ETP = a * es * (1 - f/100) \text{ [mm/d]}$$

Nun fehlt zur Berechnung noch der Faktor a und der Sättigungsdampfdruck es der Luft, der sich nach der Magnus-Formel aus der Lufttemperatur errechnen läßt:

$$es = 6.11 \cdot 10^{\frac{7.5 \cdot T}{237.3 + T}}$$

Der Korrektorkoeffizient a nach HAUDE läßt sich aus einer Tabelle ablesen. Die dazu notwendigen Daten sind Monat und Bewuchs. Der hier beschriebene Berechnungsgang wird vollständig vom Modell übernommen, es muß nur noch die Kulturart und die Zeitreihe von Temperatur und rel. Luftfeuchte eingegeben werden.

Spalte 'C' beinhaltet einen Befehl, der sich den Koeffizienten selbst aus einer Tabelle der Koeffizienten (J3-N15) sucht. Deshalb muß Bewuchs (H2) und Monat (B, wird aus dem Datum berechnet) angegeben sein. Die möglichen Werte für Bewuchs sind: "Gras", "WW", "ZR" und "Mais". Sollen neue Kulturarteneingefügt werden, muß sowohl der Befehl als auch die Tabelle in dem Arbeitsblatt erweitert werden.

2.3 Modell der Streuschicht

Das oberste Kompartiment eines Bodens spielt in Ökosystemen eine besondere Rolle, weil es in direktem Kontakt mit der Atmosphäre steht und deshalb anders austrocknet als die darunter liegenden Schichten. Dies betrifft in besonderem Maße die Streuschicht (bzw. die organische Auflage) von Wäldern, die ganz anders aufgebaut ist als der Mineralboden. Verschiedene Untersuchungen haben ergeben, daß die in Abb. 7 dargestellte Abtrocknung dieser Schicht durch einfache Funktionen wiedergegeben werden kann.

Im Modell wird der Verlauf Abtrocknung durch einen "Krümmungsfaktor Streu" (Zelle Y14) bestimmt, der den Anteil des Speichers angibt, der maximal verdunsten kann. Ein Faktor von 2 bedeutet daher, daß bei jedem Rechenschritt maximal die Hälfte des Speicherinhalts verdunsten kann. Die resultierende Abtrocknungskurve ist im Arbeitsblatt "Streu" bzw. in der Abb. 6 dargestellt.

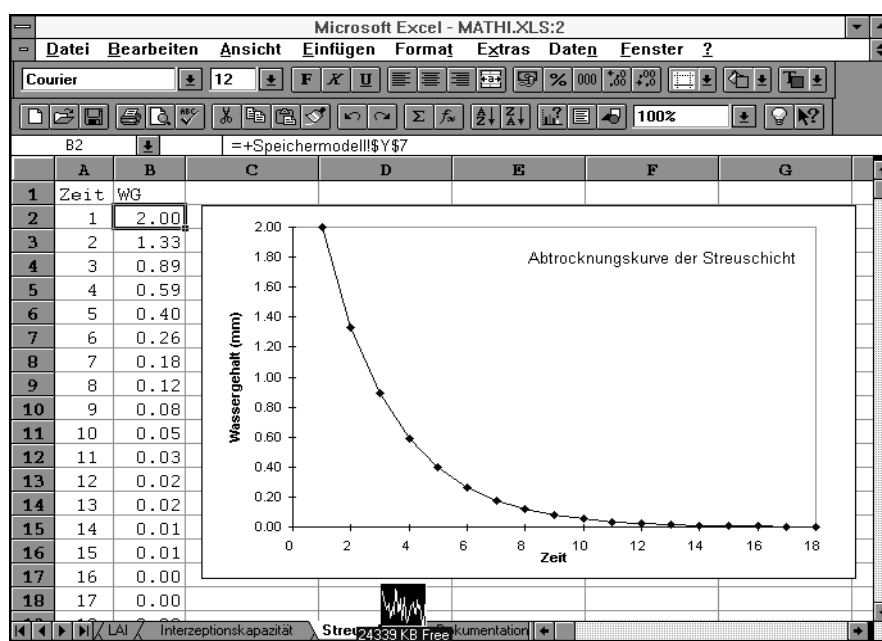


Abb. 6: Abtrocknungskurve des Modells mit dem Krümmungsfaktor "3"

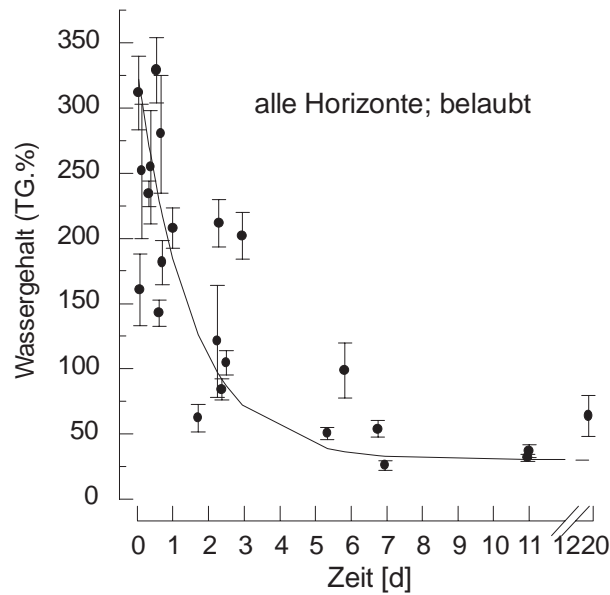


Abb. 7: Abtrocknung der Streuschicht des Buchenwalds in Bornhöved (aus THAMM 1996, mdl. Mitteilung)

2.4 Speichermodell

Die einzelnen Schritte sind in der folgenden Tabelle dokumentiert:

Spalteninhalt des Speichermodells

Spalte	Inhalt
Eingabedaten	
A	Datum
B	Niederschlag
C	Verdunstung (aus dem Haude-Arbeitsblatt)
Blattinterzeption	
D	Kapazität des Interzeptionspeichers $= +\$Y\$8 + [SPGLUGLA.XLW] \text{Interzeptionskapazität!G2} * [SPGLUGLA.XLW] \text{LAI!} \$E\$3$
E	Maximal mögliche Interzeptionsverdunstung. Begrenzt die maximale Verdunstung aus dem Interzeptionspeicher auf die Größe des Speichers oder die ETp) $= \text{MIN}(C4; \$D4)$

Spalteninhalt des Speichermodells

Spalte	Inhalt
F	Zwischenbilanz: Niederschlag - Interzeptionsverdunstung aus dem Speicher $=+B4-E4$
G	Rest-Niederschlag, löscht negative Niederschlagswerte aus Spalte F $=MAX(0;F4)$
H	Rest-ETA: wird an die Streuschicht weitergegeben $=-MIN(0;F4)+C4-E4$
Streuinterzeption	
I	Maximal mögliche Interzeptionsverdunstung, analog zu Spalte E, mit Abtrocknungsfunktion. Die maximal mögliche Streuverdunstung ist der kleinere Wert von Restverdunstung und (Streu-Speicherinhalt+Niederschlag)/Abtrocknungsfaktor $=MIN(H4;MIN($Y$11;(K3+G4))/$Y$14)$
J	Wasserbilanz: Speicherinhalt vom Tag vorher + Niederschlag - Interzeptionsverdunstung aus dem Speicher $=+K3+G4-I4$
K	Inhalt des Streuspeichers $=WENN(J4>$Y$11;$Y$11;MAX(0;J4))$
L	Rest-NS, wird an den Boden weitergegeben $=MAX(0;J4-K4)$
M	Rest-ETA, wird an den Boden weitergegeben, negative Werte werden abfangen $=-MIN(0;J4)+H4-I4$
Bodenwasserbilanz	
N	Bilanz: Speicher vom Tag vorher + NS $=R3+L4$
O	Berechnung der aktuellen Verdunstung in Abh. vom Bodenspeicher $=WENN(N4>$Y$19;M4;M4*(N4-$Y$17)/($Y$19-$Y$17))$
P	Bilanz $=+N4-O4$

Spalteninhalt des Speichermodells

Spalte	Inhalt
Q	nach Glugla berechneter Abfluß =WENN(P4<=\$Y\$16;+\$Y\$10*(P4-\$Y\$17)^2;)
R	Neuer Speicherinhalt=WENN(P4>\$Y\$16;\$Y\$16;P4-Q4)
S	Abfluß aus dem Boden in das Grundwasser =WENN(P4>\$Y\$16;P4-\$Y\$16;Q4)
Zusammenfassung	
T	Blattinterzeption =C4-H4
U	Streuinterzeption =H4-M4
V	ETA-Gesamt (Verdunstung) =U4+T4+O4

Anmerkungen:

Syntax der Funktionen

=Min(a;b): gibt den kleineren der beiden Wert zurück

=Max(a;b): gibt den größeren der beiden Werte zurück

=Wenn(Bedingung;wahr;falsch): Wenn die Bedingung wahr ist, dann gilt "Wahr" sonst "Falsch", Beispiel: =wenn(x>1;b4;v4). Wenn x>1 dann nimmt die Zelle den Wert von "b4" an, wenn nicht dann "v4".

Berechnung der aktuellen Verdunstung aus dem Bodenspeicher (Spalte O):

wenn Bilanz>Verd_grenzwert dann ETA=ETP, sonst

ETA=EPp*Reduktionsfaktor oder

$$ETa = ETP \cdot \frac{\text{Bilanz} - \text{WG}_{p\text{Welkepunkt}}}{\text{WG}_{\text{VerdGrenzwert}} - \text{WG}_{p\text{Welkepunkt}}} = ETP \cdot \frac{\text{Bilanz}}{\text{WG}_{\text{VerdGrenzwert}}} - 1$$

Bilanz = Bilanz (Spalte N)

WG_{VerdGrenzwert} = Wassergehalt an der Verdunstungsgrenze (Zelle Y6)

WG_{pWelkepunkt} = Wassergehalt am permanenten Welkepunkt

alle Angaben in mm bezogen auf den Wurzelraum

Microsoft Excel - [SPGLU5.XLW]Speichermodell mit Glugla-Meth.

Datei Bearbeiten Formel Format Daten Optionen Makro Fenster ?

Standard

P12 =+N12-O12

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
1	Datum	Niedr	ETp	KAgt	Int.	Bilan	Rest-M	Rest-EI	Bilan	Inhalt	Rest-	Rest-I	Bilanz	ETa	Verd.-B	Q-Glu	Speic	Abfluf	I-Blat	I-Str	ETaGesamt	Bodenphysikalische K				
2	Rohdaten	Blatt				Blattinterzeption				Streuinterzeption				Boden				Startwert				Speicher				
3	Datum	NS	ETP-	I-Kap	ETi	I-Bila	I-RestI	I-RES'	ETi	Bilan:	1.0	S-RE	S-Rest					200				Feldkapazität				
4	01.01.95	7.5	0.1	0.1	0.1	7.4	7.4	0.0	0.0	8.4	2.0	6.4	0.0	206.4	0.0	206.4	1.1	205	1.12	0.10	0.00	0.10	Perm. Welkepunl			
5	02.01.95	1.1	0.1	0.1	0.1	1.0	1.0	0.0	0.0	3.0	2.0	1.0	0.0	206.3	0.0	206.3	1.1	205	1.12	0.10	0.00	0.10	Verd_limit			
6	03.01.95	3.8	0.2	0.1	0.1	3.7	3.7	0.1	0.1	5.6	2.0	3.6	0.0	208.8	0.0	208.8	1.2	208	1.18	0.10	0.10	0.20	Wurzeltiefe			
7	04.01.95	5.0	0.0	0.1	0.0	5.0	5.0	0.0	0.0	7.0	2.0	5.0	0.0	212.6	0.0	212.6	1.3	211	1.29	0.00	0.00	0.00	Kapazität Blattn			
8	05.01.95	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	2.0	0.0	0.0	211.3	0.0	211.3	1.3	210	1.25	0.00	0.00	0.00	Min. Kap.			
9	06.01.95	0.0	0.1	0.1	0.1	-0.1	0.0	0.1	0.1	1.9	1.9	0.0	0.0	210.0	0.0	210.0	1.2	209	1.22	0.00	0.10	0.10	Koeff. c			
10	07.01.95	0.0	0.1	0.1	0.1	-0.1	0.0	0.1	0.1	1.8	1.8	0.0	0.0	208.8	0.0	208.8	1.2	208	1.18	0.00	0.10	0.10	Lambda			
11	08.01.95	0.0	0.1	0.1	0.1	-0.1	0.0	0.1	0.1	1.7	1.7	0.0	0.0	207.6	0.0	207.6	1.2	206	1.15	0.00	0.10	0.10	Kapazität Streus			
12	09.01.95	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	1.7	0.0	0.0	206.5	0.0	206.5	1.1	205	1.12	0.00	0.00	0.00	Startwert Streu			
13	10.01.95	0.1	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	0.2	1.5	1.5	0.0	0.0	205.4	0.0	205.4	1.1	204	1.09	0.10	0.20	0.30	Startwert Boden			
14	11.01.95	2.2	0.3	0.1	0.1	2.1	2.1	0.2	0.2	3.4	2.0	1.4	0.0	205.7	0.0	205.7	1.1	205	1.10	0.10	0.20	0.30				
15	12.01.95	0.7	0.2	0.1	0.1	0.6	0.6	0.1	0.1	2.5	2.0	0.5	0.0	205.1	0.0	205.1	1.1	204	1.09	0.10	0.10	0.20				
16	13.01.95	2.6	0.2	0.1	0.1	2.5	2.5	0.1	0.1	4.4	2.0	2.4	0.0	206.4	0.0	206.4	1.1	205	1.12	0.10	0.10	0.20	Feldkap			
17	14.01.95	3.2	0.0	0.1	0.0	3.2	3.2	0.0	0.0	5.2	2.0	3.2	0.0	208.5	0.0	208.5	1.2	207	1.17	0.00	0.00	0.00	perm. Welkepunkt			
18	15.01.95	1.8	0.0	0.1	0.0	1.8	1.8	0.0	0.0	3.8	2.0	1.8	0.0	209.1	0.0	209.1	1.2	208	1.19	0.00	0.00	0.00	nFK			
19	16.01.95	28.2	0.3	0.1	0.1	28.1	28.1	0.2	0.2	29.9	2.0	27.9	0.0	235.8	0.0	235.8	2.0	234	2.01	0.10	0.20	0.30	Verd_limit			
20	17.01.95	11.6	0.2	0.1	0.1	11.5	11.5	0.1	0.1	13.4	2.0	11.4	0.0	245.2	0.0	245.2	2.4	243	2.35	0.10	0.10	0.20	Startwert Boden			
21	18.01.95	8.3	0.2	0.1	0.1	8.2	8.2	0.1	0.1	10.1	2.0	8.1	0.0	250.9	0.0	250.9	0.0	250	0.94	0.10	0.10	0.20	Länge der Bodensät			
22	19.01.95	12.3	0.0	0.1	0.0	12.3	12.3	0.0	0.0	14.3	2.0	12.3	0.0	262.3	0.0	262.3	0.0	250	12.30	0.00	0.00	0.00	Summen			
23	20.01.95	12.1	0.1	0.1	0.1	12.0	12.0	0.0	0.0	14.0	2.0	12.0	0.0	262.0	0.0	262.0	0.0	250	12.00	0.10	0.00	0.10	NS			
24	21.01.95	2.6	0.1	0.1	0.1	2.5	2.5	0.0	0.0	4.5	2.0	2.5	0.0	252.5	0.0	252.5	0.0	250	2.50	0.10	0.00	0.10	ETP			
25	22.01.95	0.0	0.1	0.1	0.1	-0.1	0.0	0.1	0.1	1.9	1.9	0.0	0.0	250.0	0.0	250.0	2.5	247	2.54	0.00	0.10	0.10	ETA			
26	23.01.95	5.0	0.2	0.1	0.1	4.9	4.9	0.1	0.1	6.7	2.0	4.7	0.0	252.2	0.0	252.2	0.0	250	2.16	0.10	0.10	0.20	ETA-Blatt (Interz.)			
27	24.01.95	0.0	0.2	0.1	0.1	-0.1	0.0	0.2	0.2	1.8	1.8	0.0	0.0	250.0	0.0	250.0	2.5	247	2.54	0.00	0.20	0.20	ETA-Streu (Interz.)			
28	25.01.95	0.0	0.1	0.1	0.1	-0.1	0.0	0.1	0.1	1.7	1.7	0.0	0.0	247.5	0.0	247.5	2.4	245	2.44	0.00	0.10	0.10	Gesamt			
29	26.01.95	17.2	0.1	0.1	0.1	17.1	17.1	0.0	0.0	18.8	2.0	16.8	0.0	261.8	0.0	261.8	0.0	250	11.83	0.10	0.00	0.10	Abfluss			
30	27.01.95	2.0	0.2	0.1	0.1	1.9	1.9	0.1	0.1	3.8	2.0	1.8	0.0	251.8	0.0	251.8	0.0	250	1.80	0.10	0.10	0.20	Mittl. Speicher			
31	28.01.95	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	2.0	0.0	0.0	250.0	0.0	250.0	2.5	247	2.54	0.00	0.00	0.00				

19:26 23.10.95 C:147.2mb D:17.0mb F:1.6mb I:153.7mb 24,087k / 16,320k 39% / 32%

Abb. 8: Bildschirmausdruck des Speichermodells

Verd_grenzwert ist der Wassergehalt, ab dem die Pflanze die Verdunstung aufgrund der anbehaltenen Bodenwasservorräte reduziert ($ETa < ETp$). Die Reduktionsfunktion nimmt Werte zwischen 1 (zwischen Verd_grenzwert und Feldkapazität) und 0 (beim permanenten Welkepunkt) an, der Verlauf ist in Abb. 9 dargestellt. Abb. 10 zeigt den Eingabebereich (Spalte Y).

3 Eingabedaten

Zur Berechnung der Verdunstung:

- Lufttemperatur um 14h
- Rel. Luftfeuchte um 14h (oder Sättigungsdefizit)

Für das Speichermodell:

- Niederschlag (Zeitreihe, Spalte B)
- Blattflächenindex (Zeitreihe, Arbeitsblatt LAI Spalte B und C)
- Startwerte für Bodenwasserspeicher (Zelle Y12) und Streuwassergehalt (Zelle 13)

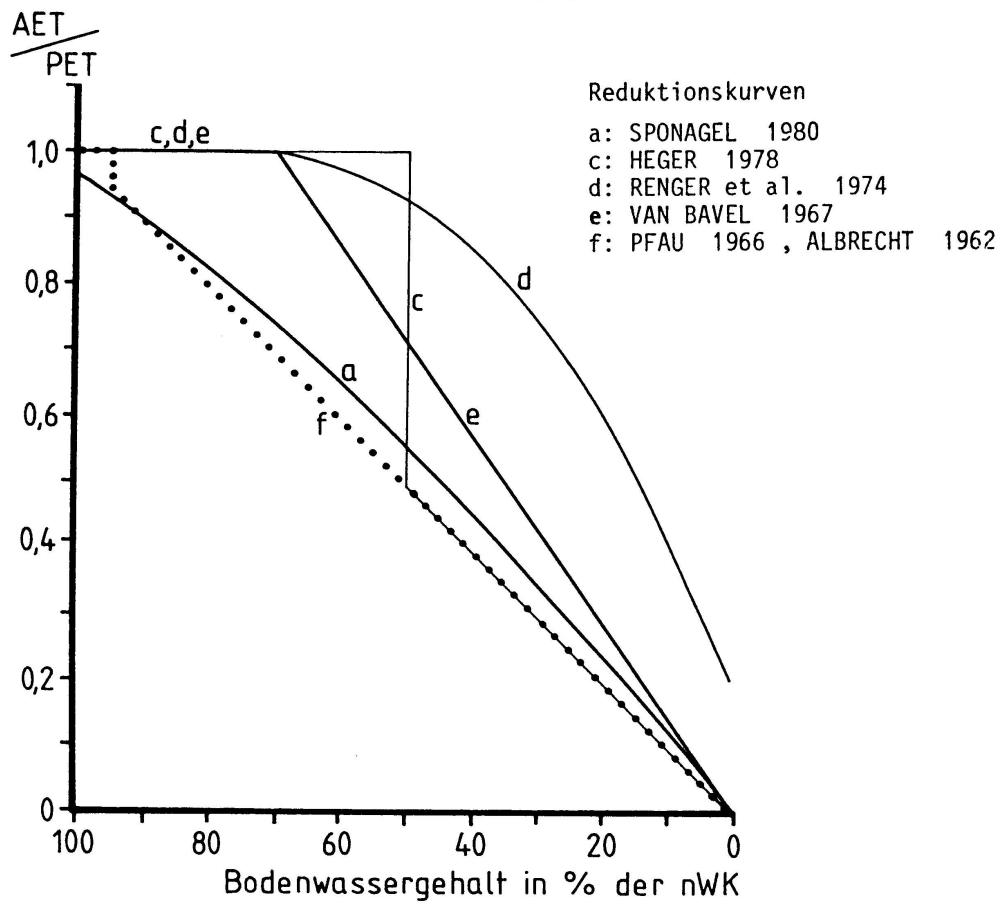


Abb. 9: Verhältnis der aktuellen zur potentiellen Evapotranspiration (Aet/PET) in Abhängigkeit vom pflanzennutzbaren Bodenwassergehalt in % der nutzbaren Wasserkapazität (nWK), nach verschiedenen Autoren, aus ERNSTBERGER 1987. (Der Algorithmus des Speichermodells entspricht Linie "e", der Pfeil zeigt auf den Wert, ab dem die Verdunstung reduziert wird (verd_grenzwert))

Tabelle der Bodenkennwerte und Modellparameter

Parameter	Wert	Bemerkung
Feldkapazität	25 in Vol.-%	
permanenter Welkepunkt	10 in Vol.-%	
Verd_limit	75 in Vol.-%, Beginn Reduktion von ET _p zu ET _a	
Wurzeltiefe	100 in cm	
Kapazität Blattinterzeption	2	Max. Kapazität der Pflanzen bei voll ausgebildeten Blättern (max. LAI)
Min. Kap.	0,1	Minimale Kapazität (Stamm und Äste im Winter) bei LAI=0 (in mm)
Länge der Bodensäule (mm)	1400	
Koeff. c	150	empirisch ermittelt nach Glugla

Tabelle der Bodenkennwerte und Modellparameter

Lambda	0,00	empirisch ermittelt nach Glugla
Kapazität Streuschicht	1	Interzeptionskapazität der Streuschicht in Wäldern
Startwert Streuschicht	0	in mm
Startwert Bodenspeicher	20	in Vol-%
Krümmungsfaktor Streu	2	

	V	W	X	Y	Z
2			Speicher		
3			Feldkapazität	25	Wassergehalt Vol. %
4	-0.03		Perm. Welkepunkt	12	Wassergehalt Vol. %
5	-0.06		Verd limit	20	Wassergehalt Vol. %
6	-0.19		Wurzeltiefe	100	(cm)
7	-0.11		Kapazität Blattinterzept	2	(mm) bei max. LAI
8	-0.25		Min. Kap.	0.1	(mm)
9	-0.32		Koeff. c	150	
10	-0.52		Lambda	0.00	
11	0.50		Kapazität Streuschicht	2	(mm)
12	1.30		Startwert Streu	1	(mm)
13	0.17		Startwert Boden	20	(Vol.-%)
14	0.21		Krümmungsfaktor Streu	3	
15	-0.07				
16	-0.07				
17	4.00		Kulturart	WW	
18	0.03		Feldkap	250	in mm
19	0.41		perm. Welkepunkt	120	bis Wurzeltiefe
20	0.11		nFK	130	berechnet
21	0.01		Verd limit	200	Beginn Reduktion

Abb. 10: Eingabebereich des Modells

4 Ausgabe

Das Modell gibt Zeitreihen, Bilanzen, Kontrollwerte und eine Grafik aus, in der die einzelnen Elemente im zeitlichen Verlauf dargestellt sind.

Zeitreihen:

aktuelle Verdunstung, Interzeption, Tiefensickerung, Speicherinhalt für jeden Speicher

Kontrollwerte und Bilanzen (mit Beispielwerten, siehe Abb. 2)

Summen	Wert	Anmerkung
NS	922	Summe Niederschlag
ETP	484	Summe potentielle Verdunstung
ETA	259	Summe Transpiration und Evaporation
ETA-Blatt	97	Summe Blattinterzeption

Kontrollwerte und Bilanzen (mit Beispielwerten, siehe Abb. 2)

Summen	Wert	Anmerkung
ETA Streu	59	Summe Streuinterzeption
Gesamt	415	Summe aktuelle Verdunstung (berechnet)
Abfluss	484	Summe Tiefensickerung (berechnet)
Mittl. Speicher	128	Mittlerer Speicherinhalt (berechnet)
Klim. Bilanz (Ns-etp)	439	Klimatische Wasserbilanz (NS-pot. Verdunstung)
Speichermodell		
(NS-ETa)		Wasserbilanz des Speichermodells
Kontrolle der Bilanz:		
(NS-ETa)	0	Kontrolle der Bilanz auf Rechenfehler: NS-ETa-Tiefensickerung+Speicherdifferenz, muß nahe Null sein
Endadresse Angleichen !		wenn Zeilen eingefügt oder gelöscht werden, muß die Endadresse abgepaßt werden (Speicherinhalt des letzten Tages)

5 Rechtliches

Das Modell ist frei verfügbar, es unterliegt jedoch dem sog. 'GNU-Copyright', d.h. die Weitergabe und Modifikation sind nur unter den folgenden Bedingungen erlaubt:

- Weitergabe erfolgt kostenlos und vollständig, d.h. mit dieser Dokumentation
- Weitergabe nur mit Quelltext (d.h. keine kompilierten Arbeitsblätter)
- alle Änderungen müssen ebenfalls im Quelltext vorliegen und weitergegeben werden

Nähere Information über das GNU-Projekt gibt es in jeder besseren Mailbox oder bei mir. Die GNU-Bestimmungen sollen im wesentlichen eine kostenlose Verbreitung der Software sichern und verhindern, daß jemand mit dem Code anderer Leute seine Geschäfte macht. Kommerzielle Nutzung ist sowieso erlaubt, eventuelle Änderungen müssen auch wieder der Öffentlichkeit kostenlos zur Verfügung gestellt werden.

Verbesserungsvorschläge, Kritik etc. bitte an georg@toppoint.de. In näherer Zukunft sind folgende Erweiterungen geplant: Penman/Monteith Verdunstung, variable Wurzeltiefe für landw. Kulturpflanzen, Modul zur Berechnung von Frachten, kapillarer Aufstieg.

6 Literatur

- Baumgartner, A., Liebscher, H.J., 1989: Lehrbuch der Hydrologie - Allgemeine Hydrologie - Quantitative Hydrologie. Verlag Gebr. Bornträger, Berlin.
Langweilig aber ausführlich
- Campbell, G.S., 1986: An introduction to environmental biophysics. Springer Verlag. Berlin New York, ISBN 3-540-90228-7.
Grundlegende Literatur für Leute, die auf die physikalischen Grundlagen zurückgreifen wollen, gespickt mit Formeln. Kein Buch, das man vor dem Einschlafen mal eben lesen kann.
- Dingman, S.L., 1994: Physical Hydrology. Prentice-Hall, ISBN 0-02-329745-X, 575 S., inkl. Diskette, ca. 50 DM
Empfehlenswertes, sehr praktisch orientiertes Buch mit Lotus/Excel-Worksheets, die meisten Beispiel stammen aus Nordamerika
- DVWK (1995): Ermittlung der Verdunstung Land- und Wasserflächen. DVWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft, ISSN 0722-7167
Als praktische Anleitung gut geeignet, drückt sich aber um die wirklichen Probleme herum: die Verdunstung von Wäldern wird nicht behandelt.
- Dyck, S., Peschke, G., 1995: Grundlagen der Hydrologie, Verlag Ernst und Sohn 1995, 3. Auflage
Das beste deutsche Buch zum Thema (DM 98)
- Bretschneider, H., Lecher, K. & M. Schmidt (Hrsg.)(1993): Taschenbuch der Wasserwirtschaft. 7. Aufl. Paul Parey, Hamburg.
ständig neu aufgelegtes Handbuch zum Nachschlagen, eher technisch orientiert und für Ingenieure geeignet
- Hershey, R.W., 1978: Hydrometry - Principles and Practices. John Wiley and Sons. ISBN 0-471-99649-1
Alt, aber immer noch solide: Grundlagen der Meßtechnik, gibts nur noch in Bibliotheken
- Jones, H.G., 1992: Plants and microclimate. 2. Auflage. Cambridge University Press. ISBN 0-521-45524-7
Das beste Buch für Leute, die wissen wollen was Pflanzen mit Klima zu tun haben.
- Maidment, D.R. (Hrsg.) 1993: Handbook of Hydrology. MacGraw Hill Ed., ISBN 0-07-039732-5 (250 DM)
Die Referenz schlechthin. Leider kann man sich das Buch erst leisten, wenn man sein Diplom in der Tasche und einen gutbezahlten Job hat.
- Monteith, J.L., Unsworth, M.H., 1990: Principles of environmental physics. Edward Arnold, 2. Auflage, ISBN 0-7131-2931-x
Grundlagen des Wärme- und Wassertransports in der bodennahen Luftschicht
- Shaw, E.M., 1994. Hydrology in Practice. 3. Auflage 1994. Chapman & Hall. ISBN 0-412-48290-8
Gute Übersicht über alle praktischen Probleme (Meßtechnik, Statistik etc.), ca. DM 50
- Ward, R.C., Robinson, M., 1989: Principles of Hydrology. McGraw Hill Ed., ISBN 0-07-707 204-9
Gute Übersicht über die Grundlagen (ca. DM 50). Nicht sehr ausführlich, dafür aber umfassend. Zusammen mit dem Buch von SHAW 1994 die optimale Referenz, wenn man sich das "Handbook of Hydrology" noch nicht leisten kann/will.
- Wohlrab, B., Ernstberger, H., Sokollek, V., 1992: Landschaftswasserhaushalt. Paul Parey 1992, Hamburg. ISBN 3-490-19116-1
Gute Zusammenfassung, ökologischer als Dyck & Peschke