

Profile der Wurzellängendichte für Anwendung in meteorologischen SVAT-Modellen und Folgen für den Wasserhaushalt

Klaas Metselaar und Reinder A. Feddes

Wageningen university, Chair group soil physics, ecohydrology and groundwaterquality de Nieuwlanden, 6709 PA Wageningen, Niederlande

Zusammenfassung

Es werden die Resultate zweier Modellstudien präsentiert. In der ersten wird der Effekt der Wurzellängendichtenverteilung auf die Evapotranspiration für zwei mögliche Klassifikationen der Vegetationstypen analysiert. Dieses Experiment zeigt, daß bei einer Änderung der Klassifikation der Vegetationstypen und der dazugehörigen Durchwurzelung eine Änderung in den auftretenden Pufferungswerten der Evapotranspiration zu erwarten ist.

In der zweiten Studie werden für zwei Klimazonen in Europa die Effekte der Variation in Wurzelverteilungen auf die Wasserbilanz verglichen mit dem Effekt anderer Größen. Unter den Bedingungen dieses Experimentes und bei gegebener Diskretisation des Bodenprofils sind Informationen zu Wurzelverteilungen weniger wichtig als Informationen zum Blattflächenindex, zur Steinigkeit, und zur Bodentextur.

Einleitung

Momentan findet eine Verschiebung der wissenschaftlichen Arbeiten im Themenbereich Klimawandel statt. Nachdem in früheren Arbeiten vorwiegend die Themen Überwachung, Vorbeugung und Abmilderung (Mitigation) behandelt wurden, werden z.Z. Fragen zur besten Anpassung an den zu erwartenden Wandel gestellt. So werden z.B. die Folgen möglicher Verschiebungen in Extremwerten (Trockenheit, Überschwemmungen) für die Landwirtschaft analysiert (Langeveld et al., 2003)

Die wissenschaftlichen Fragen ändern sich damit grundlegend - sie werden bezogen auf die Praxis der einzelnen Disziplinen, z.B. auf die Hydrologie. Gleichzeitig stellen diese praktischen Fragen höhere Anforderungen an die verwendeten meteorologischen Modelle. Die heutige Generation der Klima- und meteorologischen Modelle wird kritisch auf diesen neuen Anwendungsbereich getestet, und die weniger zufrieden stellenden Aspekte der Vorhersagen und der verfügbaren Daten werden herausgearbeitet.

Pitman (2003) beschreibt die Entwicklung in der meteorologischen Modellierung und betont insbesondere die Wichtigkeit der Parametrisierung der Landoberfläche. Dabei kann man nicht außer Acht lassen, daß die meteorologischen Modelle eine räumliche Ausdehnung haben, die zu einer großen Variation in den Modellparametern führt. Diese Variationen werden in der heutigen Generation von SVAT-schemata (noch) nicht vollständig erfasst, und die Wichtigkeit dieser Variationen ist noch zu bestimmen.

In diesem Rahmen ist die vorliegende Analyse des Einflusses der Parametrisierung von Wurzellängendichte zu sehen. Zwei Fragen sollen hier beantwortet werden: Welcher Effekt ist von einer vorgeschlagenen Änderung der Vegetationstypen zu erwarten; und wie wichtig ist die Variation der Wurzelparameter im Vergleich zu in Europa zu erwartender Variation in anderen Größen?

Modellbeschreibung

In dem in dieser Studie benutzte Modell SWAP (Kroes und van Dam, 2003) wird die kombinierte Massenbilanz-Transportgleichung nach Richards mit der Wurzelaufnahme $S(h)$ (s^{-1}) benutzt:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial \left[k(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right]}{\partial z} - S(h)$$

mit z die Bodentiefe (cm, positiv aufwärts), t die Zeit (s), h Bodenwasserspannung (tiefe- und zeitabhängig, cm); θ : volumetrischer Bodenwassergehalt ($cm^3 \cdot cm^{-3}$) k : hydraulische Leitfähigkeit ($cm \cdot s^{-1}$), und $C (= d\theta/dh)$ die spezifische Wasserkapazität (cm^{-1}).

Diese stark nichtlineare Gleichung wird bei definierten Ober- und Unterrandbedingungen und den Anfangswert über eine Diskretisation des Bodenprofils (Schichten) numerisch gelöst. In SWAP sind Lösungen für verschiedene Unter- und Oberrandbedingungen definiert. Die Randbedingung am Ober- rand ist die Gesamtverdunstung von Boden- und Pflanzenoberfläche, die potentielle Evapotranspiration ET_p (cm s^{-1} , z.B. Allen et al., 1998). Die Transpiration der Pflanzen T wird in verschiedenen Schritten errechnet. Zuerst wird ET_p in Abhängigkeit des Blattflächenindex (LAI) und einem Auslöschungskoeffizienten κ (cf. Abb. 1) über den Bodenanteil (potentielle Evaporation E_p) und den Pflanzenanteil (potentielle Transpiration T_p) verteilt.

$$T_p = (1 - e^{-\kappa \cdot LAI}) ET_p$$

Die potentielle Transpiration wird proportional zur Wurzellängendichteverteilung L_r ($\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$) über den Wurzelraum z_r verteilt:

$$S_p = \frac{L_r(z)}{\int_{z_r}^0 L_r(z) dz} T_p$$

Bei Wassermangel oder Wassersättigung wird die Transpiration über eine Funktion $\alpha(h)$ für jede Schicht reduziert :

$$S(h) = \alpha(h) \cdot S_p$$

Die Funktion $\alpha(h)$ ist in Abbildung 2 dargestellt.

Integration der Funktion S ergibt die Transpiration T :

$$T = \int_{z_r}^0 S(z) dz$$

Der Maximalwert der Evaporation (E_p) wird als die Differenz $ET_p - T_p$ berechnet und hängt von dem Blattflächenindex ab. Die aktuelle Evaporation E wird über die Transportgleichung als Funktion der Wasserspannung und der hydraulischen Leitfähigkeit berechnet. Sie wird damit von den Bodeneigenschaften mitbestimmt.

Die Evapotranspiration ET und ihre Änderung bei abnehmendem Bodenwassergehalt ist dann eine Funktion des Blattflächenindex, der Wurzeltiefe und der Wurzellängendichteverteilung, der Transpirationsreduktionsfunktion, und den Bodeneigenschaften.

Eine wichtige andere Grösse des Bodenwasserhaushalts ist die Bodenwasservorratsänderung (ΔW). Sie ist definiert als Integral des volumetrischen Bodenwassergehaltes θ über Tiefe z von Profilhöhe D bis zur Oberfläche ($z = 0$) und über Zeit t von 0 bis n (hier in Tage):

$$\Delta W = \int_0^n \int_0^D \theta \cdot dz \cdot dt$$

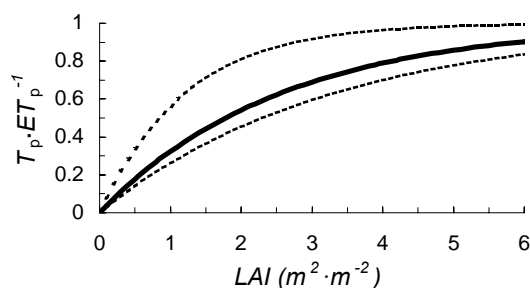


Abbildung 1: Die potentielle Transpiration T_p als Fraktion der potentiellen Evapotranspiration ET_p in Abhängigkeit des Blattflächenindex (LAI). Durchgezogene Linie ist die benutzte Beziehung; gestrichelte Linien zeigen Minimum bzw. Maximum der möglichen Werte.

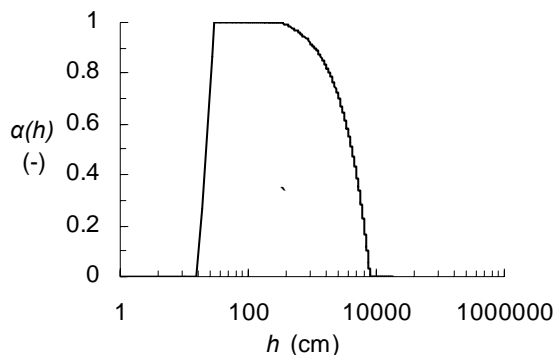


Abbildung 2: Die Reduktion der Wurzelaufnahme (α) als Funktion der Wasserspannung h . Wasserstress ($\alpha < 1$) tritt sowohl in trockenen als in sehr feuchten Bodenschichten auf.

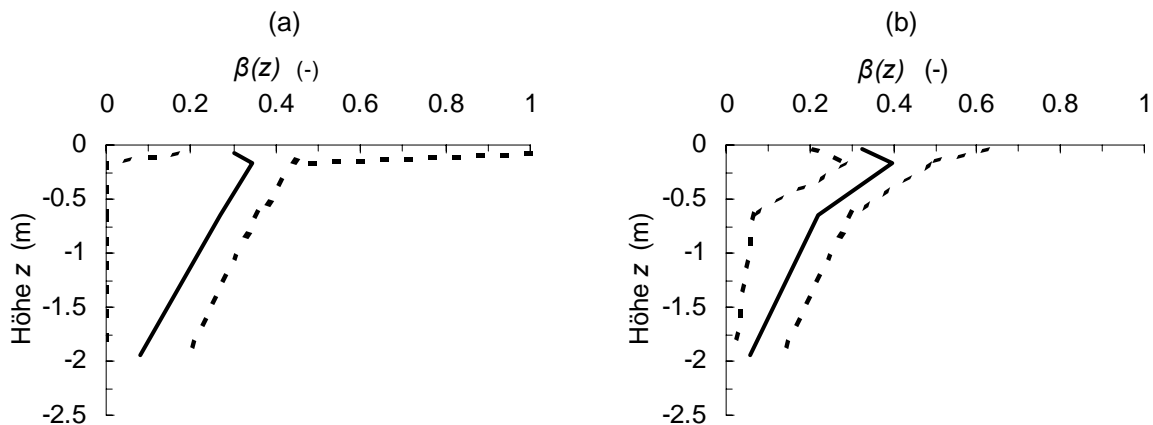


Abbildung 3: Der Unterschied in Profile der relativen Wurzellängendichte $\beta(z)$ zwischen zwei Klassifikationen der globalen Vegetation. Abbildung 3a zeigt die Wurzellängendichte verschiedener Vegetationstypen, wie sie in dem ECMWF-Modell verwendet werden. Abbildung 3b zeigt die Wurzellängendichte verschiedener Vegetationstypen, der die Klassifikation nach Masson et al. (2003) zugrunde liegt. Präsentiert wird der Mittelwert der Profile, mit den Extremwerten.

Modellstudie 1: Austrocknung bei verschiedenen Vegetationsklassifikationen

In der ersten Simulationsstudie, einem Austrocknungsexperiment, wurde für 16 Vegetationstypen nach ECMWF (2004) und für 7 Vegetationstypen nach Masson et al. (2003) die Veränderung des Verhältnisses ET/ET_p in der Zeit analysiert. Bei konstanten Randbedingungen (ET_p mit $6 \text{ mm} \cdot \text{Tag}^{-1}$; $LAI = 3$) und einem Initialwert des Bodenwasserpotentials von -200 cm wurde eine sehr lange Austrocknungsperiode ($n=366$) für einen 2.9 Meter tiefen, sandigen Boden (mit einer gesamten Wasserkapazität von 544 mm) simuliert. Profile der relativen Wurzellängendichte $\beta(z)$ definiert als

$$\beta(z) = \frac{\int_{z-dz}^z L_r(z) dz}{\int_{z_r}^0 L_r(z) dz}$$

werden für die im Experiment benutzten Schichten in Abbildung 3a für die Klassifikation der Vegetation nach ECMWF (2004) und in Abbildung 3b für die Klassifikation nach Masson et al. (2003) präsentiert. Zur Bestimmung der relativen Wurzellängendichteprofile der Klassifikation nach Masson et al. (2003) wurden die Daten von Schenk und Jackson (2002) neu gruppiert und analysiert. Weitere Parameter der Studie werden in Anhang 1 präsentiert.

Die Abnahme der relativen Evapotranspiration mit der Zeit für die beiden Klassifizierungen der Vegetationstypen werden in Abbildungen 4a (Klassifikation nach EMCWF, 2004) und 4b (Klassifikation nach Masson et al., 2003) präsentiert. Die Zeit in der die relative Evapotranspiration ET auf die Hälfte des potentiellen Wertes ET_p reduziert wird, ist in Abbildung 5 für beide Experimente als Funktion der mittleren relativen Wurzellängendichte B dargestellt. B wurde dabei definiert als

$$B = \frac{1}{D} \int_D^0 \beta(z) dz$$

Dabei ist D die Höhe des simulierten Bodenprofils.

In diesem ersten Simulationsexperiment zeigt sich die Pufferung der Evapotranspiration durch das Wurzellängendichteprofil als eine schnellere oder langsamere Abnahme der relativen Evapotranspiration (Abbildung 4a und 4b). Wie Abbildung 5 zeigt, wird bei der Änderung von 16 auf 7 Vegetationstypen die Variation in Pufferungswerten verringert. Bei einer Änderung der Klassifikation der Vegetationstypen und der dazugehörigen Durchwurzelung kann eine Änderung in den auftretenden Pufferungswerten der Evapotranspiration auftreten. Diese wird in Perioden von (langer) Trockenheit zu Unterschieden in Modellvorhersagen führen.

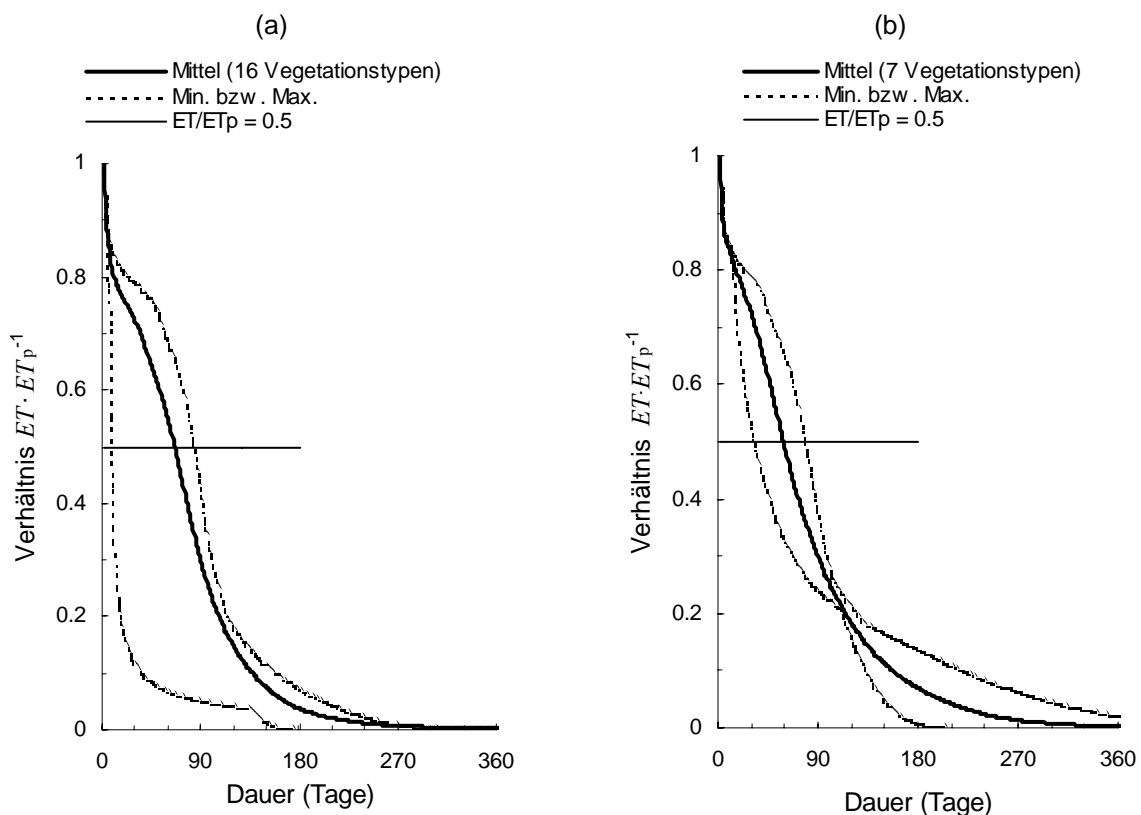


Abbildung 4: **Der zeitliche Verlauf des Verhältnisses $ET \cdot ET_p^{-1}$ in der Simulation einer langen Trockenperiode für zwei Klassifikationen der Vegetation mit 16 (Abbildung 4a) bzw. 7 (Abbildung 4b) Vegetationstypen und den dazugehörigen Wurzellängendichteprofilen. Der Vergleich zwischen 4a und 4b bei $ET \cdot ET_p^{-1} = 0.5$ zeigt, daß schwach gepufferte Systeme (schnelle Reduktion) nicht mehr vertreten sind.**

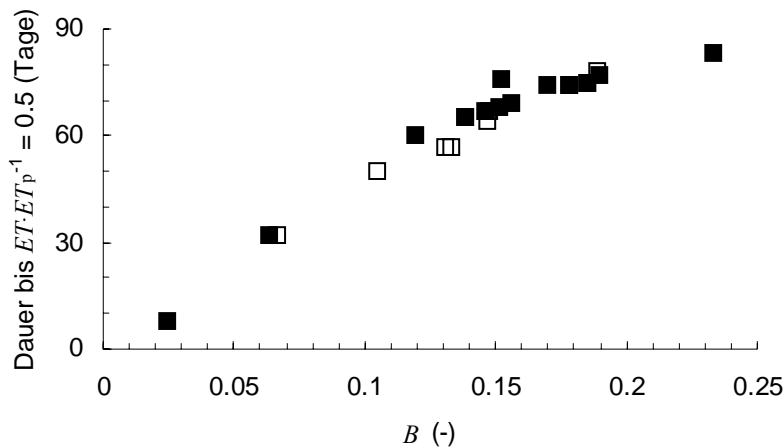


Abbildung 5: **Pufferungswerte -die Zeit in der die Evapotranspiration ET auf die Hälfte der potentiellen Evapotranspiration ET_p reduziert ist- als Funktion der mittleren relativen Wurzellängendichte (B) für zwei Klassifikationen der Vegetation. Die Pufferungswerte der 16 Vegetationstypen werden mit ■ angegeben. Die Verringerung von 16 Vegetationstypen zu 7 (angegeben mit □) führt zu einer Verringerung der Variationsbreite in Pufferungswerten.**

Modellstudie 2: Aspekte des Wasserhaushaltes einer Maiskultur.

In der zweiten Studie wurden die Faktoren Klima und Wetter, Vegetationscharakteristiken, Boden, und Unterrandbedingungen für den Vegetationstyp Mais mit einer konstanten Wachstumsperiode (1 Mai bis 15 Oktober) variiert.

Die Vegetationscharakteristiken Blattflächenindex, Wurzeldichte und Durchwurzelungstiefe wurden als Faktoren im Experiment gewählt. Verglichen wurden jeweils konstante und im Laufe der Zeit variierende Werte. Für dieses Experiment wurden Literaturdaten zur Durchwurzelung des Mais neu ausgewertet. Referenzen sind in Anhang 2 gegeben

Das simulierte Bodenprofil ist sehr tief (5 m) und besteht aus zwei Bodenhorizonten (0-0.40 m, und 0.4-5.0 m). Variiert wurden ferner die Bodentextur der Horizonte und die Steinigkeit. Die mit der Bodentextur zusammenhängenden bodenphysikalischen Parameter (nach van Genuchten, 1982) für die beiden Horizonte wurden den Analysen niederländischer Böden (Wösten et al., 1994) entnommen. Für den Kiesgehalt wurde aus 4 Klassen (0-5, 6-15, 16-40, >40 %, Batjes, 1997) der Wert 40 % gewählt.

Für die Unterrandbedingung wurde entweder freie Drainage, d.h. Fluss (nur) unter Gravitationseinfluss, oder eine konstante Wasserspannung am Unterrand (-30 cm) vorgegeben. Anfangsbedingung war in beiden Fällen ein Bodenfeuchteprofil in Gleichgewicht mit einem Grundwasserspiegel auf -5.3 meter. Zusätzlich wurde die numerische Diskretisation des Profils variiert.

Wetterdaten zweier Klimazonen wurden benutzt. Der Wahl liegt die Analyse von Metzger et al. (2005) zugrunde, die im Europäischen Raum dreizehn Hauptklimazonen unterscheiden. Für beide Klimazonen wurden 44 Jahre simuliert. Die Wetterdaten (1958-2001) entstammen dem ERA-40 Archiv des ECMWF (ECMWF, 2005).

Damit ergab sich für die Berechnungen ein $3 \cdot 2^6$ faktorielles Experiment. Zur Erfassung der Interaktionen wurden alle Kombinationen durchgerechnet. Eine Übersicht der Faktoreinstellungen wird in Anhang 3 gegeben.

Die Resultate der Simulation der Wasserbilanz in diesem Experiment wurden mit einer Varianzanalyse ausgewertet. Dabei waren Haupteffekte bestimmend und die Interaktionen für die analysierten Größen gering. Präsentiert werden deshalb die Haupteffekte der Faktoren auf die Jahressumme der Transpiration T , die Evaporation E , und die Änderung im Bodenwasservorrat ΔW .

Die Ergebnisse wurden zusammengefasst als Varianzverhältnis der Haupteffekte zu den restlichen Effekten (die aller Interaktionen). In der Tabelle 1 wird die Analysen der Varianz für das gesamte Experiment, in der Tabelle 2 für die beiden Klimazonen präsentiert.

Die Ergebnisse in Tabelle 1 zeigen, dass (bei dem gewählten Diskretisationsunterschied) die Diskretisation für Jahressummen der Transpiration T ein sehr wichtiger Faktor ist. Martinez et al (2001) studierten den Effekt der Diskretisation und zogen den Schluss, daß die Wasserbilanz sehr empfindlich auf die Diskretisation reagiert. Diese Studie bestätigt diese Schlussfolgerung.

Die Wahl der Unterrandbedingung (in diesem Fall freie Drainage und konstante Wasserspannung) hat Folgen für die Wasserbilanz, die, abhängig von der betrachteten Modellausfuhr, stark variieren. Sie ist nicht wichtig für die Evaporation E , weniger wichtig für die Transpiration T , aber ist dominant für die Änderung im Wasservorrat ΔW . In den heutigen SVAT-Modellen wird freie Drainage bevorzugt benutzt. Eine Analyse der Möglichkeiten andere Unterrandbedingungen zu wählen und die Einfuhrdaten dazu bereit zu stellen, könnte einen wichtigen Beitrag zu der meteorologischen Modellierung liefern.

Eine nach Klimazonen getrennte Analyse (Tabelle 2) zeigt, daß die Reihenfolge der Faktoren mit weniger ausgesprochenen Effekten für beide Klimazonen verschieden sein kann. So ist für die Transpiration -in Gegensatz zum Atlantischen Klima- der Faktor Unterrandbedingung im Pannonischen Klima wichtiger als der Faktor Wurzeldichte.

Auf Basis dieser ersten Ergebnisse und unter den Bedingungen des Simulationsexperimentes kommt man zudem zu dem Schluss, daß den Wurzelparametern im Vergleich zur Diskretisation, Steinigkeit und Bodentextur, und zur Parametrisierung des Blattflächenindex, ein relativ geringer Stellenwert zukommt.

In wiefern diese Schlussfolgerung auch zutrifft, wenn man die Analyse für andere Klimazonen, kürzere Zeitskalen (Sommer- und Winterhalbjahr, oder Woche) und andere Faktoreinstellungen (niedrigere Werte der Steinigkeit, höhere Grundwasserspiegel) ausführt, sollte Gegenstand weiterer Untersuchungen sein. So zum Beispiel reichen in SVAT-Modellen -in Gegensatz zum hier präsentierten zweiten Experiment- die Wurzelprofile bis an den Unterrand (Tiefe D) und wird die Aufnahmefunktion $\alpha(h)$ oft als Funktion des volumetrischen Bodenwassergehalts (als $\alpha'(\theta)$) definiert. Weiter liegt es nahe die Unsicherheit in der Verteilung T_p/ET_p (Abbildung 1) als Funktion des Blattflächenindex zum Gegenstand einer Analyse zu machen.

Tabelle 1: Beiträge aller Faktoren zur Variation in den Komponenten des jährlichen Wasserhaushalts (Transpiration T , Evaporation E , und die Änderung im Bodenwasservorrat ΔW). Die Beiträge sind das Varianzverhältnis (Variance ratio) des Haupteffektes zur Restvarianz (in diesem Falle alle Interaktionen). Je höher dieses Verhältnis, desto wichtiger der Faktor. So ist z.B. die Diskretisation in diesem Experiment ein wichtiger bestimmender Faktor für die Transpiration. In Klammern wird der Wert relativ zum Maximum angegeben.

	Transpiration T	Evaporation E	Änderung im Wasservorrat ΔW
Diskretisation	42793 (1.00)	412 (0.13)	6504 (0.58)
Klima	17282 (0.40)	3209 (1.00)	77 (0.01)
Steinigkeit	4408 (0.10)	414 (0.13)	2078 (0.18)
LAI	4242 (0.10)	850 (0.26)	609 (0.05)
Bodentextur	2180 (0.05)	1937 (0.60)	2443 (0.22)
Wurzeldichte	1229 (0.03)	47 (0.01)	369 (0.03)
Unterrandbedingung	980 (0.02)	0 (0.00)	11234 (1.00)
Jahre	106 (0.00)	316 (0.10)	118 (0.01)
Wurzeltiefe	26 (0.00)	7 (0.00)	4 (0.00)

Tabelle 2: **Beiträge der Faktoren (als Varianzverhältnis (Variance ratio)) zur Variation in den Komponenten des jährlichen Wasserhaushalts (Transpiration T , Evaporation E , und die Änderung im Bodenwasservorrat ΔW) in einem Atlantischen und einem Pannonischen Klima. In Vergleich zu Tabelle 1 ergeben sich Änderungen in der Reihenfolge der Faktoren.**

	Transpiration T		Evaporation E		Änderung im Wasservorrat ΔW	
	Atlantisch	Pannonisch	Atlantisch	Pannonisch	Atlantisch	Pannonisch
Diskretisation	36046	35525	574	900	4740	4925
Steinigkeits	4063	3410	558	841	1806	1446
LAI	4252	3098	435	2900	576	380
Bodentextur	2225	1580	2654	4118	2035	1744
Wurzeldichte	1369	825	73	91	312	252
Unterrandbedingung	331	1261	3	0	9429	7792
Jahr	185	153	1273	823	192	172
Wurzeltiefe	13	29	15	10	2	4

Literatur

- Batjes, N. H.**, 1997. A world dataset of derived soil properties by FAO-UNESCO soil unit for global modeling, *Soil Use Manage.*, 13:9-16.
- ECMWF**, 2004. Surface parameterization. Chapter 7 in IFS documentation Cycle 28r1. <http://www.ecmwf.int/research/ifsdocs/>
- ECMWF**, 2005. ECMWF 40 Years Re-Analysis, daily fields. http://data.ecmwf.int/data/d/era40_daily/
- Kroes, J.G. and J.C. van Dam (eds)**, 2003. Reference Manual SWAP version 3.0.3. Wageningen, Alterra, Green World Research.. Alterra-report 773. 211 pp.
- Langeveld, J.W.A., A. Verhagen, M. van Asseldonk, K. Metselaar**, 2003. Coping with increasing extremes in agriculture: an exploration for the Netherlands. *World resource review* 15:4 446-461.
- Masson, V, J-L Champeaux, F. Chauvin, C. Meriguet, R. Lacaze**, 2003. A global database of land surface parameters at 1-km resolution in meteorological and climate models. *Journal of Climate* 16(9) 1261-1282.
- Martinez, J.E., C.E. Duchon, W.L. Crosson**, 2001. Effect of the number of soil layers on a modeled surface water budget. *Water resources research* 37(2) 367-377.
- Metzger, M.J. R.G.H. Bunce, R.H.G. Jongman, C.A. Múcher, J.W. Watkins**, 2005. A climatic stratification of the environment of Europe. *Global Ecology and Biogeography* 14: 549-563.
- Pitman, A.J., 2003. The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models. *International journal of climatology* 23:479-510.
- Schenk, H.J. & R.B. Jackson**, 2002. The global biogeography of roots. *Ecological monographs* 72(3) 311-328.
- van Genuchten, M. Th.**, 1982. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am J.* 44: 892-898.
- Wösten, J.H.M, G.J. Veerman, J. Stolte**, 1994. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 1994. Technisch document 18, Staring Centrum, Instituut voor onderzoek van het landelijk gebied, Wageningen, 66 pp.

Anhang 1: **Parameter der ersten Modellstudie**

ET_p	6 mm.Tag ⁻¹
Blattflächenindex LAI (-) und Höhe der Pflanzen CH (cm)	LAI : 3 (konstant) CH : 124 (konstant)
Normierte Wurzellängendichte NL_r (= $L_r/\text{maximum}(L_r)$) als Funktion der normierten Wurzeltiefe Nz_r (= $z_r/\text{maximum}(z_r)$)	1 (konstant)
Wurzeltiefe (z_r , cm)	290 (konstant)
Steinigkeits (Volumenfraktion)	0
Unterrandbedingung	Freie Drainage
Diskretisierung des Bodenprofils von 0 bis 290 cm als An- zahl*(Schichtmächtigkeit in cm)	7*(1) + 7*(3) + 9*(8) + 19*(10)
Bodentextur	Schluffiger Sand
Bezeichnung nach Wösten et al. (1994)	B2
volumetrischer Restwassergehalt θ_r	0.01
volumetrischer Sättigungswasser- gehalt θ_s	0.43
van Genuchten Parameter α (cm ⁻¹)	0.0227
van Genuchten Parameter n	1.548
gesättigte hydraulische Leitfähigkeit k_s (cm.Tag ⁻¹)	9.65
van Genuchten Parameter l	-0.983

Anhang 2: **Literatur der Wurzeldichteprofile für Mais.**

- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, M. Smith**, 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300 pp.
- Amato, M. and J. T. Ritchie (2002)**. "Spatial distribution of roots and water uptake of maize (*Zea mays* L.) as affected by soil structure." *Crop Science* 42(3): 773-780.
- Coelho, E. F. and D. Or (1998)**. "Root distribution and water uptake patterns of corn under surface and subsurface drip irrigation." *Plant and Soil*; 206(2): 123-136.
- Fukai, S. and P. Inthapan (1988)**. "Growth and yield of rice cultivars under sprinkler irrigation in south-eastern Queensland. 3. Water extraction and plant water relations - comparison with maize and grain sorghum." *Australian Journal of Experimental Agriculture* 28(2): 249-252.
- Graveel, J.G, D.D. Tyler, J.R. Jones, W.W. McFee (2002)** Crop Yield and rooting as affected by fragipan depth in loess soils in the southeast USA. *Soil & Tillage Research* 68: 153–161.
- Grimes, D. W., R. J. Miller, et al. (1975)**. "Cotton and corn root development in two field soils of different strength characteristics." *Agronomy Journal* 67(4): 519-523.
- Kirkham, M. B., S. J. Greco, et al. (1998)**. "Comparison of minirhizotrons and the soil-water-depletion method to determine maize and soybean root length and depth." *European Journal of Agronomy*. 8(1/2): 117-125.
- Martinez Hernandez, J. J., B. Bar Yosef, et al. (1991)**. "Effect of surface and subsurface drip fertigation on sweet corn rooting, uptake, dry matter production and yield." *Irrigation Science*. 1991; 12(3): 153-159.
- Phene, C. J., K. R. Davis, et al. (1991)**. "Effect of high frequency surface and subsurface drip irrigation on root distribution of sweet corn." *Irrigation Science*. 12(3): 135-140.
- Upchurch, D. R. and J. T. Ritchie (1985)**. "Battery-operated color video cameras for root observations in minirhizotrons." *Agronomy Journal* 77(3): 1015-1017.

Anhang 3: **Faktoreinstellungen der zweiten Modellstudie**

Faktor	0	1		
Klimaklassifikation Land, Ort, Jahre	Zentral Atlantisch England, 52.14 N; 0 O 1958-2001	Pannonisch Grosse Ungarische Tiefebene, 44.29 N; 21.09 O 1958-2001		
Blattflächenindex LAI (-) und Höhe der Pflanzen CH (cm) als Funktion des Ent- wicklungsstadiums DVS (-)	LAI : 3.7 (konstant) CH : 124 (konstant)	DVS 0.00 0.30 0.50 0.70 1.00 1.40 2.00	LAI 0.05 0.14 0.61 4.1 5.0 5.8 5.2	CH 1.0 15.0 40.0 140.0 170.0 180.0 175.0
Normierte Wurzellängendichte NL_r ($= L_r/\text{maximum}(L_r)$) als Funktion der normierten Wur- zeltiefe Nz_r ($= z_r/\text{maximum}(z_r)$)	1 (konstant)	NZ_r 0.00 0.05 0.15 0.30 0.60 1.00	NL_r 0.00 1.00 0.47 0.122 0.0224 0.00	
Wurzeltiefe (z_r , cm)	74 (konstant)	DVS 0.00 0.30 0.50 0.70 1.00 2.00	Z_r 5.0 20.0 50.0 80.0 90.0 100.0	
Steinigheit (Volumenfraktion)	0	0.40		
Unterrandbedingung	Freie Drainage	Wasserspannung am Unterrand konstant auf -30 cm		
Diskretisierung der Ober- schicht (0-40 cm) Unter- schicht (40-500 cm) als An- zahl* (Schichtmächtigkeit in cm)	$10*(1)+6*(5)$ $4*(5)+44*(10)$	$1*(7)+1*(33)$ $1*(127)+1*(333)$		

Faktor	0		1		2	
Bodentextur	Schluffiger Sand		Lehmiger Sand		Toniger Lehm	
Bodenprofil mit zwei Hori- zonten: eine von 0-40 cm und eine von 40-500 cm	1	2	1	2	1	2
Bezeichnung nach Wösten et al. (1994)	B2	O2	B8	O9	B11	O12
volumetrischer Restwas- sergehalt θ_r	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
volumetrischer Sättigungs- wassergehalt θ_s	0.43	0.38	0.43	0.46	0.60	0.56
van Genuchten Parameter α (cm^{-1})	0.0227	0.0214	0.0096	0.0094	0.0243	0.0095
van Genuchten Parameter n	1.548	2.075	1.284	1.400	1.111	1.159
gesättigte hydraulische Leitfähigkeit k_s (cm.Tag^{-1})	9.65	15.56	2.25	2.23	5.26	1.14
van Genuchten Parameter l	-0.983	0.039	-2.733	-1.382	-5.395	-4.171