

SCHRIFTENREIHE
FREIBURGER FORSTLICHE FORSCHUNG

BAND 31

Martin Lukes

**Kalibrierung und Sensitivitätsanalyse
eines Wasserhaushaltsmodells
für Waldstandorte**

FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT
BADEN-WÜRTTEMBERG
ABTEILUNG BODEN UND UMWELT

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zitiervorschlag:

Lukes, Martin (2006): Kalibrierung und Sensitivitätsanalyse eines Wasserhaushaltsmodells für Waldstandorte.

Freiburg: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt

Baden-Württemberg

(Schriftenreihe Freiburger Forstliche Forschung, Bd. 31)

Zugl.: Freiburg, Univ., Diss., 2005

ISSN 1436-0586

ISBN 3-933548-32-2

Die Herausgeber:

Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der Universität Freiburg und

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg

Redaktionskomitee

Prof. Dr. J. Huss

Prof. Dr. W. Konold

Dr. H. Volk

Umschlaggestaltung:

Bernhard Kunkler Design, Freiburg

Druck:

Eigenverlag der FVA, Freiburg

Bestellung an:

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt

Baden-Württemberg

Wonnhaldestraße 4

79100 Freiburg

Tel: 0761/4018-0 Fax 0761/4018-333

e-mail: fva-bw@forst.bwl.de

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verarbeitung sowie der Übersetzung vorbehalten.

Gedruckt auf 100% chlorfrei gebleichtem Papier

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	7
2	MATERIAL UND METHODEN	9
2.1	MESSORTE ROTENFELS UND ALTENSTEIG	10
2.2	GELÄNDEMESSUNGEN	12
2.2.1	Bestandes- und Standortsbeschreibung	12
2.2.2	Profilbeschreibung	12
2.2.3	Wurzelverteilung	14
2.2.4	Stechzylinderprobennahme	17
2.3	LABORMESSUNGEN	17
2.3.1	Desorptions-Wasserretentionsfunktion	17
2.3.2	Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit	17
2.3.3	Ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit	18
2.4	FELDMESSREIHEN	21
2.4.1	Niederschlagsmessungen mit Totalisatoren	21
2.4.2	Klimamessungen	21
2.4.3	Tensionsmessungen	22
2.4.4	Wassergehaltsmessungen	22
2.5	PLAUSIBILITÄTSPRÜFUNG UND ERGÄNZUNG FEHLENDER MESSWERTE	22
2.5.1	Niederschlag	23
2.5.1.1	Plausibilitätsprüfung	23
2.5.1.2	Auffüllung von Datenlücken	24
2.5.2	Lufttemperatur	26
2.5.2.1	Plausibilitätsprüfung	26
2.5.2.2	Auffüllung von Datenlücken	26
2.5.3	Luftfeuchtigkeit	28
2.5.3.1	Plausibilitätsprüfung	28
2.5.3.2	Auffüllung von Datenlücken	29
2.5.4	Globalstrahlung	30
2.5.4.1	Plausibilitätsprüfung	30
2.5.4.2	Auffüllung von Datenlücken	32
2.5.4.3	Korrektur der Globalstrahlung für geneigte Flächen	33
2.5.5	Tensionen	34
2.6	AUFBEREITUNG DER BODENPARAMETER	34
2.6.1	Labor- und Feld-Wasserretentionsfunktion	34
2.6.2	Hydraulische Leitfähigkeit	36
2.6.2.1	Ableitung aus der Wasserretentionsfunktion	36

2.6.2.2	Abgleich mit den gemessenen Ku-Werten	37
2.7	WASSERHAUSHALTSMODELL	37
2.7.1	Verdunstungsmodell	38
2.7.1.1	Berechnung der ETp nach HAUDE	39
2.7.1.2	Berechnung der ETp nach TURC-WENDLING	40
2.7.1.3	Berechnung der ETp nach PRIESTLEY & TAYLOR	41
2.7.1.4	Berechnung der ETp nach MAKKINK	43
2.7.1.5	Berechnung der ETp nach der Strahlungsbilanz-Methode	43
2.7.2	Schneespeichermodell	43
2.7.3	Interzeptionsspeichermodell	44
2.7.4	Evaporationsmodell	44
2.7.5	Transpirationsmodell	45
2.7.6	Sickerwassermodell	46
2.8	MODELLKALIBRIERUNG	47
2.8.1	Kalibrierung des Interzeptionsspeichermodells	48
2.8.2	Kalibrierung des Sickerwassermodells	51
2.8.2.1	Berechnung der Tensionen für die Modellkalibrierung	55
2.8.2.1.1	Mittelung und zeitliche Zuordnung der Tensionen	55
2.8.2.1.2	Logarithmierung der Tensionen	59
2.8.2.2	Manuelle Kalibrierung	61
2.8.2.3	Qualitative Beurteilung der Modellierung	62
2.8.2.4	Quantifizierung der Anpassungsgüte	64
2.8.2.5	Autokalibrierung mit der Simplex-Methode	70
2.9	SENSITIVITÄTSANALYSE	75
2.10	MONTE-CARLO-SIMULATION	76
3	ERGEBNISSE	77
3.1	FREILANDNIEDERSCHLAG	77
3.1.1	Berechnung des Freilandniederschlages	77
3.1.2	Sensitivität und Fehlerrahmen des Freilandniederschlages	78
3.2	POTENZIELLE EVAPOTRANSPIRATION	82
3.2.1	Berechnung der ETp	82
3.2.2	Sensitivität der ETp	85
3.2.2.1	Sensitivität der ETp nach HAUDE	86
3.2.2.2	Sensitivität der ETp nach TURC-WENDLING	87
3.2.2.3	Sensitivität der ETp nach PRIESTLEY & TAYLOR	89
3.2.3	Fehlerrahmen der ETp	90
3.2.3.1	Fehlerrahmen der aggregierten Tageswerte	91
3.2.3.2	Fehlerrahmen der ETp nach HAUDE	94
3.2.3.3	Fehlerrahmen der ETp nach TURC-WENDLING	96
3.2.3.4	Fehlerrahmen der ETp nach PRIESTLEY&TAYLOR	97
3.2.3.5	Zusammenfassende Bewertung der ETp-Berechnungsverfahren	98

3.3	KLIMATISCHE WASSERBILANZEN	99
3.4	INTERZEPTIONSSPEICHERMODELL	100
3.4.1	Parametrisierung und Kalibrierung	100
3.4.2	Bestandesniederschlag	101
3.4.3	Interzeption	104
3.5	SICKERWASSERMODELL	106
3.5.1	Parametrisierung	106
3.5.2	Manuelle Kalibrierung	106
3.5.3	Autokalibrierung	107
3.5.3.1	Gesättigte Leitfähigkeiten	110
3.5.3.2	Wasserretentionsfunktionen	112
3.5.3.3	Gemessene und simulierte Tensionsverläufe	116
3.5.3.4	Kreuzkorrelationskoeffizienten	129
3.5.4	Wasserhaushaltsbilanzen	133
3.5.5	Vergleich mit klimatischen Wasserbilanzen	137
3.5.6	Sensitivität	142
3.5.7	Fehlerrahmen des Sickerwassermodells	146
3.6	SYNOPTISCHE SENSITIVITÄTS- UND FEHLERABSCHÄTZUNG	147
4	DISKUSSION UND METHODENKRITIK	149
4.1	ALLGEMEINE DISKUSSION	149
4.2	SPEZIELLE METHODENKRITIK	151
4.2.1	Freilandniederschlag	151
4.2.2	Bestandesniederschlag	152
4.2.3	Potenzielle Evapotranspiration	152
4.2.4	Interzeptions- und Schneespeichermodell	153
4.2.5	Evaporation und Transpiration	153
4.2.6	Sickerwassermodell	154
5	SCHLUSSFOLGERUNGEN	156
6	ZUSAMMENFASSUNG	158
7	SUMMARY	160
8	LITERATUR	162
9	ANHANG	167
10	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	168
11	TABELLENVERZEICHNIS	175

6 ZUSAMMENFASSUNG

Zur Bestimmung des Wasserhaushaltes von Waldökosystemen werden vielfach numerische Modelle auf Basis der Richardsgleichung eingesetzt. Dabei stellt sich die Frage, welche Aussagen zur Wasserhaushaltscharakteristik getroffen werden können, mit welchem fehlerbedingten Variationsbereich bei den Modellergebnissen zu rechnen ist und welche Genauigkeitsanforderungen an die Eingangsgrößen zu stellen sind.

Zur Beantwortung dieser Fragen wird der Wasserhaushalt am Beispiel von zwei Fichtenwaldbeständen im Nordschwarzwald mit Hilfe des Modells WHNSIM (HUWE 1992) berechnet. Zunächst wird das Modell entsprechend den jeweiligen Bestandes- und Standortverhältnissen parametrisiert. Anschließend erfolgt eine manuelle Kalibrierung, bei der die Parameter gutachtlich so lange variiert werden, bis sich eine möglichst gute, visuelle Übereinstimmung zwischen den vom Modell simulierten Bodenzustandsgrößen und den entsprechenden Messwerten ergibt.

Auf Grund der unsicheren Messung des Wassergehaltes in skelettreichen Böden wird der Kalibrierung mit gemessenen Tensionen der Vorzug gegeben. Es wird herausgearbeitet, dass logarithmierte Tensionen gegenüber unlogarithmierten Tensionen eine deutlich engere Beziehung zur Sickerwasserbewegung im Boden haben und daher besonders gut zur Modellkalibrierung geeignet erscheinen. Mit Hilfe einer Transformation kann die Unstetigkeit der Logarithmusfunktion umgangen werden, so dass der gesamte Bereich der im Boden vorkommenden Tensionen zur Kalibrierung genutzt werden kann.

Die beste Übereinstimmung zwischen den vom Modell in Tagesschritten berechneten Tensionen und den stündlichen Messwerten ergibt sich, wenn der Mittelwert aus den 24 gemessenen Tensionen zwischen 12 Uhr und 12 Uhr des folgenden Tages berechnet wird. Als quantitativer Maßstab zur gleichwertigen Beurteilung der Anpassungsgüte des Modells in mehreren Bodentiefen wird die mittlere quadratische Abweichungssumme der logarithmierten Tensionen berechnet. Mit Hilfe eines auf der Simplex-Methode beruhenden Optimierungsverfahren wird eine automatisierte Kalibrierung durchgeführt. Dabei werden die Modellparameter innerhalb vorgegebener Bereiche variiert bis sich ein Maximum der Anpassungsgüte des Modells ergibt.

Durch die manuelle Kalibrierung kann die Übereinstimmung zwischen den vom Modell simulierten Tensionen und den gemessenen Tensionen stark verbessert werden. Die automatisierte Kalibrierung steigert nochmals die Anpassungsgüte im Vergleich mit der manuellen Kalibrierung.

Der Wasserhaushalt der untersuchten Standorte unterscheidet sich deutlich: Am Standort Rotenfels herrschen trotz geringer Bodenwasserspeicherkapazität ganzjährig ausgeglichene Feuchtigkeitsverhältnisse. Auf Grund einer geringen Verdunstung gelangen zwei Drittel des Freilandniederschlages in die Tiefensickerung. Hingegen treten am Standort Altensteig bei einer größeren Bodenwasserspeicherkapazität längere Trockenperioden mit eingeschränkter Verdunstung und ohne Tiefensickerung auf. Neben den Bodeneigenschaften ist

vor allem das Lokalklima sowie die stark abweichende Exposition und Neigung der Standorte für diese Unterschiede verantwortlich.

Eine besonders große Sensitivität der vom Modell berechneten Tiefensickerung ergibt sich gegenüber den Eingangsvariablen Bestandesniederschlag und potenzielle Evapotranspiration. Variationen der Standortparameter finden sich hingegen nur abgeschwächt im Modellergebnis wieder.

Als Fazit bleibt festzuhalten, dass sich nicht alle bei der Autokalibrierung erzeugten Parameter bodenphysikalisch sinnvoll interpretieren lassen, obwohl sämtliche Parameter nur innerhalb vorgegebener, zulässiger Bereiche variiert werden. Daraus ergeben sich Möglichkeiten und Grenzen der prozessorientierten Modellierung von Ökosystemverhalten.

7 SUMMARY

Numerical models based on the Richards equation are often used to calculate the water balance of forest ecosystems. In doing this, it is necessary to ask what can be said about the water budget characteristics, how much variation in the model results is caused by errors, and how accurate the input data have to be.

To answer these questions, I calculated the water balance of two Norway spruce forest stands in northern Black Forest (Southwest Germany) with the WHNSIM model (HUWE 1992). At first, the model was parametrized tuned to the conditions of the individual stands and sites. Subsequently, the model was calibrated manually: the parameters were varied until the visual correspondence between the soil water status generated by the model and the measured values was best.

I favored measured tensions for model calibration because measuring water content is uncertain in stony soils. It was found that logarithmic tensions have a stronger relation to water leakage than linear tensions. Taking this into account, logarithmic tensions were particularly suitable for model calibration. I was able to prevent discontinuity in the logarithmic function with a special transformation which allowed the whole range of soil water tensions to be used for calibration. The tensions simulated by the model corresponded best with the hourly measurements when the average of hourly measured tensions was calculated between 12 p.m. and 12 p.m. on the following day.

The averaged quadratic difference sum of the logarithmic tensions in several soil depths was used as the quantitative scale for model fit. With the help of an optimizing procedure based on the simplex-method, an automatic calibration was applied: parameter variation in between given ranges was executed automatically until the fit of the model was best.

After the manual calibration, the correspondence between the tensions simulated by the model and the measured tensions was much better. With the help of the automatic calibration, I was able to improve the fit of the model again compared with manual calibration.

The model results show significant differences between the forest stands included in the study: In spite of only little water storing capacity, the soil in Rotenfels had consistent moisture conditions over the whole year. Due to minor evapotranspiration, about two-thirds of the open field precipitation became deeper seeping water. In contrast, on the other forest stand, Altensteig, relatively long dry periods with inhibited evapotranspiration and no deeper seeping water occurred, although the water storing capacity on this stand was greater. Besides the soil properties, the local climate and the contrast between exposition and inclination were responsible for these differences.

The deeper seeping water calculated by the model was most sensitive against variations in the variables below canopy precipitation and potential evapotranspiration. On the other hand, only little variation in the stand parameters were found in the model results.

As a conclusion, I was not able to find interpretations with relevance for soil physics for all of the parameters generated through auto-calibration, although the range of each parameter was restricted to permitted values. This shows the possibilities and limitations of process-oriented modeling of ecosystem behavior.