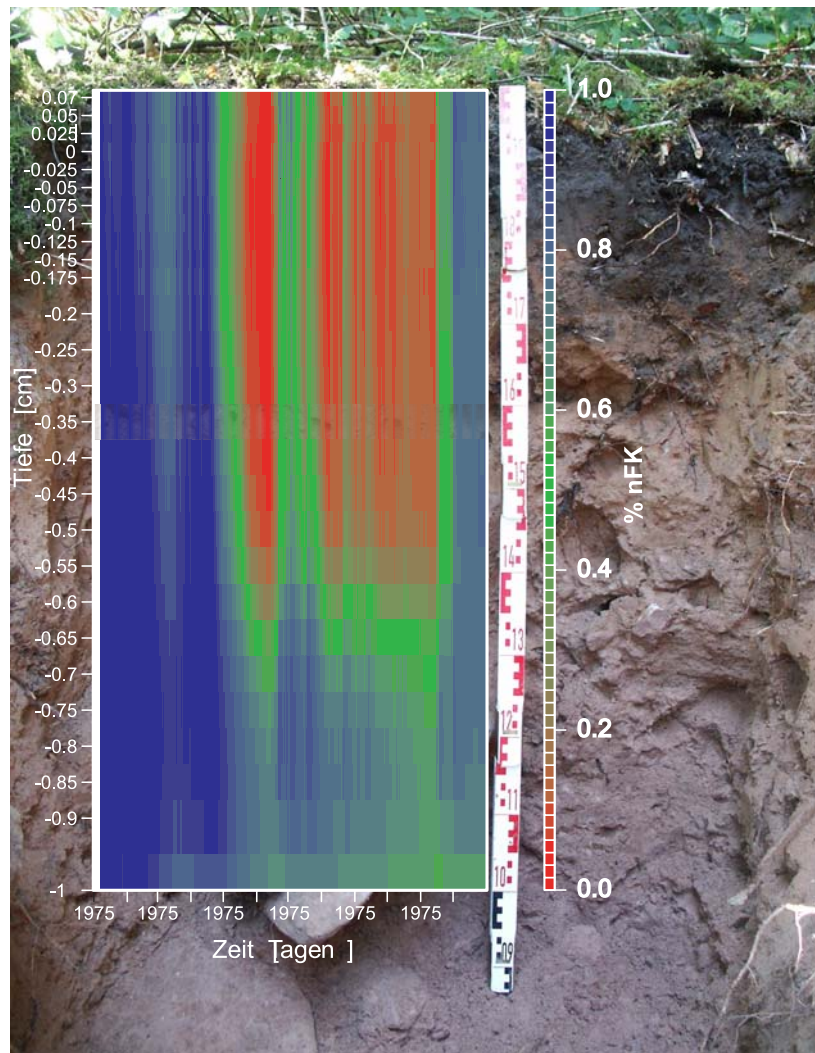


Jannis Groh

Modellierung des Bodenwasserhaushalts und Analyse des Trockenstresses für zwei Waldstandorte im Odenwald



Masterarbeit unter Leitung von Prof. Dr. M. Weiler

Koreferent: PD. Dr. K. von Wilpert

Freiburg i. Br., Dezember 2011

Institut für Hydrologie
der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Jannis Groh

**Modellierung des Bodenwasserhaushalts und
Analyse des Trockenstresses für zwei
Waldstandorte im Odenwald**

Referent: Prof. Dr. M. Weiler
Koreferent: PD. Dr. K. von Wilpert

Masterarbeit unter Leitung von Prof. Dr. M. Weiler
Freiburg i. Br., Dezember 2011

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Verzeichnis der Abbildungen im Text	III
Verzeichnis der Abbildungen im Anhang	VII
Verzeichnis der Tabellen im Text.....	VIII
Verzeichnis der Tabellen im Anhang.....	IX
Danksagung	XI
Zusammenfassung	XIII
Extended summary	XV
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung.....	2
2 Stand der Forschung	4
2.1 Inverse Parameterbestimmung.....	4
2.2 Trockenstressanalyse	5
3 Material und Methoden.....	10
3.1 Vorstellung des Gesamtkonzeptes	10
3.2 Untersuchungsgebiet.....	11
3.2.1 Fichtenfläche.....	12
3.2.2 Buchenfläche	13
3.3 Datengrundlage	14
3.3.1 Meteorologische Messwerte	14
3.3.2 Hydrologische Messwerte.....	16
3.3.3 Bodenkundliche Grundlage	19
3.4 Modell Brook90	21
3.4.1 Modellaufbau	22
3.4.2 Ansätze der Teilmodule	23
3.4.2.1 Verdunstung.....	23
3.4.2.1.1 Strahlung.....	23
3.4.2.1.2 Potenzielle Evapotranspiration	25
3.4.2.1.3 Potenzielle Transpiration	30
3.4.2.1.4 Interzeption	33
3.4.2.2 Abflussbildung und Bodenwassertransport der ungesättigten Zone.....	35
3.4.2.3 Modifikation LWF-Brook90.....	37
3.5 Vorgehensweise Modellkalibrierung.....	40

3.5.1	Modelleinstellungen und Parametrisierung.....	40
3.5.2	Modellstrukturelles Experiment.....	42
3.5.3	Inverse Parameterbestimmung.....	45
3.5.3.1	Modellparameter der Sensitivitätsanalyse.....	45
3.5.3.2	Zielfunktion/Gütekriterium.....	46
3.5.4	Sensitivitätsanalyse.....	47
3.5.4.1	Dotty Plots.....	50
3.5.4.2	Regional Sensitivity Analysis.....	50
3.5.4.3	Parameteroptimierungsverfahren.....	52
3.5.5	Modellanwendung.....	59
3.5.5.1	Kritischer Wassergehalt und Wasserdefizitgrößen.....	60
4	Ergebnisse und Diskussion.....	62
4.1	Modellstrukturelles Experiment.....	62
4.2	Inverse Parameterbestimmung.....	65
4.2.1	Sensitivitätsanalyse.....	65
4.2.2	Parameteroptimierung SCEM-UA.....	71
4.2.2.1	Fichtenplot.....	71
4.2.2.1.1	θ -Ansatz.....	71
4.2.2.1.2	ψ_m -Ansatz.....	75
4.2.2.1.3	Hüllkurven-Ansatz.....	77
4.2.2.2	Buchenplot.....	81
4.2.2.2.1	Hüllkurven-Ansatz.....	81
4.3	Modellevaluierung.....	84
4.3.1	Fichtenstandort.....	84
4.3.2	Buchenstandort.....	86
4.4	Modellanwendung und Trockenstressanalyse.....	87
4.4.1	Retrospektive.....	87
4.4.2	Gruppierte Auswertung.....	96
5	Schlussfolgerung und Ausblick.....	98
	Literaturverzeichnis.....	101
	Anhang.....	108
	Abbildungen im Anhang.....	108
	Tabellen im Anhang.....	115
	Verzeichnis der Abkürzungen im Text.....	122
	Verzeichnis der Symbole im Text.....	124

Verzeichnis der Abbildungen im Text

Abbildung 1: Herleitung des kritischen Schwellenwertes, A) Verhältnis T/PET aus Saftflussmessungen (Eiche) als Funktion der nFK_r mit unterschiedlichen LAI Werten ($\bullet$ LAI=6 m ² /m ² , Δ LAI=4.5m ² /m ²) und gestrichelte Linie S_{krit} der nFK_r . B) Beispiel des saisonalen Verhaltens des relativen Stammumfangwachstums (=Rate des aktuellen Zuwachses zu maximalen jährliche Zuwachs (Δ)) mit nFK_r ($\circ$), die gestrichelte Linie steht für den Punkt, ab dem es zu einem Rückgang des Wachstums kommt und für den S_{krit} (nach GRANIER et al., 1999).....	8
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Vorgehensweise von Modellkalibrierung bis zur Anwendung und Auswertung für diese Untersuchung.....	11
Abbildung 3: Darstellung und Zuordnung in Wuchsgebiete für die Level II-Standorte in Baden-Württemberg.....	12
Abbildung 4: Klimadiagramm nach WALTER und LIETH für den Standort Heidelberg (Zeitraum 1971 bis 1990).....	13
Abbildung 5: Standort je Kronenstrate X (Kronenzentrum), Y (Kronenrand) und Z (Kronenlücke) der pF-Meter Theta-Probe ML2x (Wassergehaltsmessung θ) Messwertgeber auf dem Buchenplot.....	17
Abbildung 6: Standort der Messwertgeber für Matrixpotential ψ_m (T8-Tensiometer) und Wassergehalt θ (Theta-Probe ML2x) der LUBW auf der Fichtenfläche in Heidelberg.....	18
Abbildung 7: Exemplarische Messfehler für die Messung des (A) Matrixpotentials ψ_m (T8-Tensiometer, Fichtenplot), (B) Wassergehalts θ (Theta-Probe ML2x, Fichtenplot) und C) pF-Meter (Buchenplot).....	18
Abbildung 8: Flussdiagramm von Brook90, die Linien zeigen die Zustandsform des Wassers, (blau) oberirdisch gasförmige, (grün) unterirdisch flüssig und oberirdisch flüssig. ET steht für Evapotranspiration, P für Niederschlag, dS Grundwasserspeicher und R für den Abfluss (verändert, aus SEEGER, 1998).....	23
Abbildung 9: Schematische Darstellung des SHUTTELWORTH-WALACE-Modells, mit den verschiedenen Widerständen des Bodens, der Bodenoberfläche und für die Vegetation in der effektiven Quellhöhe und der Referenzhöhe (verändert nach LAFLEUR & ROUSE 1990, aus SEEGER, 1998).....	26
Abbildung 10: Widerstände und Potentiale im flüssigen Transport der Transpiration, exemplarisch für 3 durchwurzelte Bodenschichten i , r_{xi} : Xylemwiderstand, r_{ri} : Wurzelwiderstand, r_{si} : Rhizosphärenwiderstand, ψ_{ti} : Bodenwasserpotential, ψ_{xyl} : Xylempotenzial Bodenoberfläche, ψ_i : Blattpotential (aus FEDERER, 2002).....	31
Abbildung 11: Verlauf der jeweils 100 Zufallszahlen aus der Monte-Carlo-Simulation der Trockenrohdichte über die Tiefe für die drei verschiedenen Fälle des modellstrukturellen Experiments für den Fichtenplot.....	44

Abbildung 12: Regionale Sensitivitätsanalyse, initiale kumulative Verteilung bei einer Gleichverteilung der Parameterwerte (gestrichelte Linie), (A) kumulative Verteilung eines sensitiven Parameters, (B) kumulative Verteilung eines unsensitiven Parameters (verändert, nach BEVEN, 2006).	51
Abbildung 13: Flussdiagramm des SCEM-UA Algorithmus (aus VRUGT et al., 2003).	53
Abbildung 14: Feld-pF-Werte und definierter Hüllbereich für die Ent- und Bewässerungskurve des Hüllkurven-Ansatzes für den Fichtenplot in den Tiefen 15, 30, 75 cm.	56
Abbildung 15: Feld-pF-Werte und definierter Hüllbereich für die Ent- und Bewässerungskurve des Hüllkurven-Ansatzes für den Buchenplot in den Tiefen 30 und 60 cm.	57
Abbildung 16: Schematische Darstellung des Hüllkurven-Ansatzes für eine Tiefe i , wobei a für den inner-, b für den ober- und c für den unterhalb der Hüllkurve liegenden simulierten Wassergehalt steht. Wenn exemplarisch der Punkt oberhalb liegt, so wird der Abstand zwischen der Entwässerungskurve d und b gebildet und geht dann als D_{diff} in die Gütefunktion $R^2_{\text{Hüll}}$ ein.....	58
Abbildung 17: Zeitliche Entwicklung des Bodenwassergehaltes und Definition der Unterschreitungs-merkmale (veränd. PUHLMANN et al., 2008, nach RIDOLFI et al., 2000).	61
Abbildung 18: Verlauf der 100 zufällig gezogenen Trockenrohdichten für die 3 Fälle über die Tiefe als Boxplot für das modellstrukturelle Experiment.	62
Abbildung 19: Boxplot für die Modellierung der Entwässerungsphase der 100 Wassergehalte θ (A) und Matrixpotentiale ψ_m (B) je Tiefe und Fall, für den letzten Tag der Zeitreihe.	63
Abbildung 20: Verlauf der effektiven Sättigung über die Tiefe und Zeit für Fall 1 bis 3 des modellstrukturellen Experiments der Trockenrohdichte aus dem Monte-Carlo Lauf 1 (siehe Abbildung 11) mit LWF-Brook90 für die Entwässerungsphase.....	64
Abbildung 21: Verlauf des Matrixpotenzials ψ_m über die Tiefe und Zeit für Fall 1 bis 3, des modellstrukturellen Experiments der Trockenrohdichte aus dem Monte-Carlo Lauf 1 (siehe Abbildung 11) mit LWF-Brook90 für die Entwässerungsphase.....	64
Abbildung 22: Die 25% schnellsten (SL) und langsamsten (LS) Läufe der LWF-Brook90 Parameter als Boxplot für 250 Monte-Carlo-Simulationen.	66
Abbildung 23: Ergebnisse der „Regional Sensitivity Analysis“, des Kolmogorov-Smirnov-Tests und Sensitivitätsklassifizierung (siehe Kasten) für die Modellierung des Wassergehalts θ in der Tiefe 15 cm des Fichtenplots (Parameter siehe Tabelle 7).....	67
Abbildung 24: Evaluierung des Konvergenzverhaltens der untersuchten Modellparameter mit dem Gelman-Rubin Kriterium für den Fichtenplot mit dem Wassergehalt θ -Ansatzes.....	73
Abbildung 25: Ergebnis der SCEM-UA Parameteroptimierung und –unsicherheit der Wassergehalte θ [cm^3/cm^3] für die Tiefen 15 cm, 30 cm und 75 cm des θ -Ansatzes für den Fichtenplot.....	74

Abbildung 26: Ergebnis der SCEM-UA Parameteroptimierung und –unsicherheit der Matrixpotenziale ψ_m für den θ -Ansatz des Fichtenplots.....	75
Abbildung 27: Ergebnisse der SCEM-UA Parameteroptimierung und –unsicherheit der Matrixpotenziale ψ_m für den ψ_m -Ansatz des Fichtenplots.....	76
Abbildung 28: Ergebnis der SCEM-UA Parameteroptimierung und –unsicherheit der Wassergehalte θ für den ψ_m -Ansatz des Fichtenplots.....	77
Abbildung 29: Evaluierung des Konvergenzverhaltens der untersuchten Modellparameter mit dem Gelman-Rubin Kriterium für den Fichtenplot mit dem Hüllkurven-Ansatz.	78
Abbildung 30: Ergebnisse der SCEM-UA Parameteroptimierung und –unsicherheit der Wassergehalte θ für den Hüllkurven-Ansatz des Fichtenplots.....	79
Abbildung 31: Ergebnisse der SCEM-UA Parameteroptimierung und –unsicherheit der pF-Wert für den Hüllkurven-Ansatz des Fichtenplots.....	79
Abbildung 32: Ergebnisse der SCEM-UA Parameteroptimierung und –unsicherheit der θ (A) und ψ_m (B) für den Hüllkurven-Ansatz des Buchenplots.....	83
Abbildung 33: Vergleich der posteriori Wahrscheinlichkeitsverteilung für die untersuchten Modellparameter aus dem SCEM-UA Optimierungsverfahren für die verschiedenen Ansätze des Fichten- (Fi) und Buchenplot (Bu). Die rote Linie kennzeichnet die Optimierung der Parameter aus dem Wassergehalt θ -Ansatz (Fi), orange Matrixpotential ψ_m -Ansatz (Fi), grün (Fi) und blau (Bu) des Hüllkurven-Ansatzes.	83
Abbildung 34: Ergebnisse der Modellevaluierung für das Wassergehalt θ in 15, 30, und 75 cm Tiefe des Fichtenplots für den Zeitraum 01.01.2008 bis 01.02.2010.	85
Abbildung 35: Ergebnisse der Modellevaluierung für die Matrixpotenziale ψ_m in 15, 30, und 75 cm Tiefe des Fichtenplots für den Zeitraum 01.01.2008 bis 01.02.2010.	85
Abbildung 36: Ergebnis der Modellevaluierung für die Wassergehalte θ und Matrixpotenziale ψ_m in 30 cm und 60 cm Tiefe des Buchenplots für den Zeitraum 01.01.2008 bis 01.02.2009.	86
Abbildung 37: Anzahl der Stressereignisse pro Jahr und Tiefe für A) den Fichten- und B) den Buchenplot bei Heidelberg für den Zeitraum aus der Modellanwendung (1972 bis 1991).	88
Abbildung 38: Dauer der Stressereignisse pro Jahr und Tiefe für A) den Fichten- und B) den Buchenplot bei Heidelberg für den Zeitraum aus der Modellanwendung (1972 bis 1991).	89
Abbildung 39: Wasserdefizit pro Jahr und Tiefe für A) den Fichten- und B) den Buchenplot bei Heidelberg für den Zeitraum aus der Modellanwendung (1972 bis 1991).	90
Abbildung 40: Verlauf der relativen nutzbaren Feldkapazität (nFK_r) über die Tiefe und den Zeitraum von 1972 bis 1991 für den Fichtenplot.....	91
Abbildung 41: Verlauf der relativen nutzbaren Feldkapazität (nFK_r) über die Tiefe und den Zeitraum von 1972 bis 1991 für den Buchenplot.	92

Abbildung 42: Saisonaler Jahresniederschlag A) und Aufteilung der jährlichen kumulierten Gesamtevpapotranspiration (EVAP) B) in ihre einzelnen Komponenten, von Transpiration (TRAN), Evaporation des interzeptierten Regens (IRVP), Evaporation des interzeptierten Schnees (ISVP), Bodenevaporation (SLVP) und Schneeevaporation (SNVP) für den Zeitraum von 1972 bis 1991. Die Trockenjahre 1976 und 1991, sowie das feuchte Jahr 1987 wurden hervorgehoben.....	93
Abbildung 43: Verlauf der relativen nFK des effektiven Wurzelraums (nFK_{rWe}) für Fichte (schwarze Linie) und Buche (grüne Linie) über den Zeitraum von 1972 bis 1991 und die kritische nFK_{rWe} (blau=Buche und rot=Fichte), welche aus der kritischen Saugspannung von -1300 hPa abgeleitet wurde.....	94
Abbildung 44: Gruppierte Auswertung einer jeweils 4 jährigen Periode für die Fichte und Buche, wobei Fall 1 für Jahre mit überdurchschnittlichem und Fall 2 für Jahre mit unterdurchschnittlichen Niederschlagssummen steht.....	97

Verzeichnis der Abbildungen im Anhang

Abbildung A. 1: Boxplot für die Modellierung der Bewässerungsphase der 100 Verläufe des Wassergehalts θ (A) und des Matrixpotenzials ψ_m (B) je Tiefe und Fall.	108
Abbildung A. 2: Verlauf des ψ_m über die Tiefe und Zeit für Fall 1 bis 3, für den Verlauf der TRD aus dem Monte-Carlo Lauf 1 mit LWF-Brook90 für die Bewässerungsphase.	108
Abbildung A. 3: Verlauf der Effektiven Sättigung über die Tiefe und Zeit für Fall 1 bis 3, für den Verlauf der TRD aus dem Monte-Carlo Lauf 1 mit LWF-Brook90 für die Bewässerungsphase.	109
Abbildung A. 4: Ergebnis der „Regional Sensitivity Analysis“ und des Kolmogorov-Smirnov-Tests (siehe Kasten in den einzelnen Abbildungen) für die Modellierung des Wassergehalts θ in 30 cm Tiefe des Fichtenplots.	109
Abbildung A. 5: Ergebnis der „Regional Sensitivity Analysis“ und des Kolmogorov-Smirnov-Tests (siehe Kasten in den einzelnen Abbildungen) für die Modellierung des Wassergehalts θ in 75 cm Tiefe des Fichtenplots.	110
Abbildung A. 6: Ergebnis der „Regional Sensitivity Analysis“ und des Kolmogorov-Smirnov-Tests (siehe Kasten in den einzelnen Abbildungen) für die Modellierung des Matrixpotenzials ψ_m in 15 cm Tiefe des Fichtenplots.	111
Abbildung A. 7 Ergebnis der „Regional Sensitivity Analysis“ und des Kolmogorov-Smirnov-Tests (siehe Kasten in den einzelnen Abbildungen) für die Modellierung des Matrixpotenzials ψ_m in 30 cm Tiefe des Fichtenplots.	112
Abbildung A. 8: Ergebnis der „Regional Sensitivity Analysis“ und des Kolmogorov-Smirnov-Tests (siehe Kasten in den einzelnen Abbildungen) für die Modellierung des Matrixpotenzials ψ_m in 75 cm Tiefe des Fichtenplots.	113
Abbildung A. 9: Evaluierung des Konvergenzverhaltens der untersuchten Modellparameter mit dem Gelman-Rubin Kriterium für den Fichtenplot mit dem ψ_m -Ansatz.	114
Abbildung A. 10: Evaluierung des Konvergenzverhaltens der untersuchten Modellparameter mit dem Gelman-Rubin Kriterium für den Buchenplot mit dem Hüllkurven-Ansatz.	114

Verzeichnis der Tabellen im Text

Tabelle 1: Meteorologische Daten für den Kalibrierungs- Evaluierungszeitraum und Retrospektive der Bodenwasserhaushaltsmodellierung.	15
Tabelle 2: Hintergrund Informationen über die hydrologischen Messungen für beide Untersuchungs-standorte.	16
Tabelle 3: Datengrundlage der Profilansprache nach (BUBERL, 2008) für die Podsol-Braunerde des Fichtenstandorts.	19
Tabelle 4: Abschätzung der wichtigen Bodenwasserhaushaltsgrößen Luftkapazität (LK), nutzbare Feldkapazität (nFK), Feldkapazität (FK) und Totwasser nach AG-BODEN (2005) für den Fichtenstandort, wobei Stufe der pt für Trockenrohdichten Klassen steht.	20
Tabelle 5: Datengrundlage der Profilansprache nach (BUBERL, 2008) für die Pseudogley-Braunerde des Buchenstandorts.	20
Tabelle 6: Abschätzung der wichtigen Bodenwasserhaushaltsgrößen Luftkapazität (LK), nutzbare Feldkapazität (nFK), Feldkapazität (FK) und Totwasser nach AG-BODEN (2005) für den Buchenstandort, wobei Stufe der pt für Trockenrohdichten Klassen steht.	21
Tabelle 7: Modellparameter für die Sensitivitätsanalyse und ihrer Unter- und Obergrenzen für den Fichtenplot, eine Beschreibung der Parameter befindet sich in Tabelle A. 1 des Anhangs.	46
Tabelle 8: Sensitivitätsklassen für $d_{\max}$ aus der kumulativen Verteilung der behavioral und non-behavioral Simulationen (nach HALRIN und KUNG, 1992).	52
Tabelle 9: MVG-Parameter für Entwässerungs- (E_{kurve}) und die Bewässerungskurve (B_{kurve}) des Hüllkurven-Ansatzes für die Tiefen 15, 30, und 75 cm des Fichten- und 30 und 60 cm des Buchenplots.	57
Tabelle 10: <i>Threshold</i> der „Regional Sensitivity Analysis“ für Wassergehalt θ und Matrixpotential ψ_m je Tiefe.	67
Tabelle 11: Ergebnisse der RSA und Klassifizierung über die maximale Distanz ($d_{\max}$) aus dem Kolmogorov-Smirnov-Test für die Modellierung der Wassergehalts θ und des Matrixpotentials ψ_m in den drei Tiefen 15, 30, 75 cm.	69
Tabelle 12: Festgesetzte Bodenparameter für die Modellkalibrierung des θ und des ψ_m mit LWF-Brook90.	70
Tabelle 13: Kalibrierungsparameter des LWF-Brook90 Modells mit der Angabe der Unter- und Obergrenze des Parameterraumes für die Parameteroptimierung mit SCEM-UA der Wassergehalte θ	71
Tabelle 14: Festlegung der algorithmischen Parameter für SCEM-UA und SEM-Algorithmus für die Parameteroptimierung an die gemessenen Wassergehalte θ	72
Tabelle 15: Ergebnisse des Gütemaßes des besten Parametersatzes aus den jeweiligen Parameter-optimierungen mit SCEM-UA für den Fichtenplot.	81

Verzeichnis der Tabellen im Anhang

Tabelle A. 1: Modelleinstellung für LWF-Brook90 und Ergebnisse der Parameteroptimierung mit SCEM-UA des Hüllkurven-Ansatzes für den Fichten- und Buchenplot (siehe opt. Parameter)	115
Tabelle A. 2: Festlegung der algorithmischen Parameter für SCEM-UA und SEM-Algorithmus für die Parameteroptimierung des Matrixpotenzial-Ansatzes (ψ_m)...	120
Tabelle A. 3: Kalibrierungsparameter des LWF-Brook90 Modells mit der Angabe der Unter- und Obergrenze des Parameterraumes für die Parameteroptimierung mit SCEM-UA des ψ_m Ansatz.....	121
Tabelle A. 4: Kalibrierungsparameter des LWF-Brook90 Modells mit der Angabe der unteren und oberen Grenze des Parameterraumes für die Parameteroptimierung mit SCEM-UA für den Buchenplot	121
Tabelle A. 5: Festlegung der Algorithmus Parameter für SCEM-UA des Buchenplots	121

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all denen meinen Dank aussprechen, die mir bei der Anfertigung dieser Arbeit hilfreich zur Seite standen.

Prof. Dr. Markus Weiler danke ich für die Übernahme des Referats dieser Arbeit.

PD. Dr. Klaus von Wilpert danke ich für die Übernahme des Koreferats dieser Arbeit, die Themen Vergabe und die hilfreichen Anregungen.

Ein ganz besonderer Dank gilt Dr. Heike Puhlmann für die exzellente Betreuung meiner Arbeit, den vielen wertvollen Hinweisen, Anregungen, Diskussionen und die Hilfe bei MATLAB Problemen.

Ein herzliches Dankeschön geht auch an Dr. Yvonne Morgenstern und Andrea Hölscher die mir bei der Datenbereitstellung, der Orientierung im Datenraum und dem Korrekturlesen behilflich waren. Bei Dr. Peter Hartmann möchte ich mich für die fachmännische Hilfe bei R Problemen und zahlreichen Tipps, Diskussionen und das Korrekturlesen bedanken.

Mein größter Dank gebührt meinen Eltern, die mir das Studium der Hydrologie erst ermöglicht und mich während meines Studiums und der Masterarbeit immer unterstützt haben.

Meiner Frau danke ich für die moralische Unterstützung und ihr Verständnis

Zusammenfassung

Die Modellierung und Untersuchung des Bodenwasserhaushalts und Analyse von Trockenstress für Waldstandorte bildet ein wichtiges Kriterium für die Planung von Adaptionsmaßnahmen im Forstsektor und gewährleistet damit aus ökologischer und ökonomischer Sicht eine nachhaltige und an die Veränderung des Klimas angepasste Waldwirtschaft.

Trockenstress stellt eine der wichtigsten Formen der Belastung für Waldbestände dar und wird nicht nur durch die klimatischen Bedingungen, sondern auch durch die Baumarten und Bodeneigenschaften beeinflusst. Hauptziel dieser Arbeit ist die Abschätzung von Trockenstressereignissen im Bezug auf die Anzahl, Dauer und Fehlmenge pro Jahr für zwei Waldstandorte mittels Modellierung. Für diese Fragestellung wird eine Modellkalibrierung benötigt, welche die natürlichen Gegebenheiten der Wasserretentionsbeziehung des Messstandortes wiedergeben kann. Sehr oft werden Wasserspannungskurven über Labormessungen erbracht, welche nur bedingt in der Lage sind, die am Standort vorhandenen natürlichen Bedingungen wiederzugeben.

Die Untersuchung wird im Rahmen des Klimafolgenforschungsprojekts der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württembergs auf den Level II-Standorten für die Hauptbaumarten Fichte und Buche bei Heidelberg durchgeführt. Die Datengrundlage umfasste die Messungen der Wassergehalte und Matrixpotenziale in 2 bzw. 3 verschiedenen Tiefen. Für die Modellierung des Bodenwasserhaushalts wird das forsthydrologische Modell LWF-Brook90 (HAMMEL und KENNEL, 2001) verwendet.

Im ersten Schritt wird exemplarisch für den Fichtenstandort ein modellstrukturelles Experiment durchgeführt und die sensitiven Modellparameter für den Wassergehalt und das Matrixpotential je Tiefe über die „*Regional Sensitivity Analysis*“ nach SPEAR und HORNBERGER (1980) separat identifiziert. Über den „*Shuffled Complex Evolution Metropolis*“ Algorithmus (SCEM-UA; VRUGT et al., 2003) wurde eine Parameteroptimierung und –unsicherheitsanalyse für drei verschiedene Ansätze durchgeführt.

Der erste Ansatz versucht die Wassergehalte möglichst gut anzupassen, wohingegen der zweite Ansatz versucht, eine gute Übereinstimmung für die Matrixpotenziale zu erreichen. Der dritte Ansatz nützte das Optimierungsverfahren, um ein Parameterset zu

finden, dass die beobachteten Wassergehalte und Matrixpotentiale wiedergeben kann. Es folgte eine Modellevaluierung von 2008 bis 2010 für die Fichte und von 2008 bis 2009 für die Buche und eine Anwendung auf die Zeit von 1972 bis 1991.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass unterschiedliche Modellparameter für die Anpassung der Wassergehalte und Matrixpotentiale verantwortlich sind. Die Resultate der Parameteroptimierung für die sensitiven Modellparameter des Wassergehalts und Matrixpotential bestätigten die Vermutung, dass ein kombinierter Ansatz der beste Weg ist, um eine Übereinstimmung für beide Outputvariablen zu finden. Mit Einbezug der Feld-pF-Werte und einer modifizierten Gütefunktion (NASH und SUTCLIFFE, 1970) für die Berechnung der *posteriori*-Dichteverteilung der Modellparameter im SCEM-UA-Algorithmus, konnte eine gute Übereinstimmung der gemessenen und simulierten Outputvariablen erreicht werden.

Die Auswertung des 95% Konfidenzintervalls verdeutlichte, dass eine bessere Anpassung der beobachteten Wassergehalte und Matrixpotentiale nicht alleine auf die Unsicherheit der Parameter zurückzuführen ist. Die Modellevaluierung für den Fichtenstandort konnte das Ergebnis der Modellkalibrierung nicht wiedergeben. Für den Buchenstandort konnte aufgrund der Datengrundlage keine plausible Modellevaluierung durchgeführt werden.

Die Trockenstressanalyse ergab für beide Standorte im Vergleich, ein erhöhtes Stressrisiko für die Buche, welches auf das physiologische Transpirationsverhalten und der standörtlichen Bodeneigenschaften zurück geführt werden kann. Der für die Trockenstressanalyse verwendete kritische Schwellenwert des Matrixpotenzial von -1300 hPa (PUHLMANN et al., 2010) deckt sich gut mit dem von GRANIER et al. (1999) vorgeschlagenen Wert der kritischen relativen nutzbaren Feldkapazität von 0.4.

Stichwörter: Trockenstress, Bodenwasserhaushalt, Wassergehalt und Matrixpotential, Sensitivitätsanalyse, SCEM-UA-Algorithmus

Extended summary

Modeling and investigation of soil water balance, along with analysis of the drought stress risk for forestry sites, comprises the important criteria for planning of future forest adaptation strategies. These criteria secure a sustainable forest management strategy that is adapted to potential climate change from an ecological and economical point of view. Drought stress presents one of the greatest burdens for tree stands. It is not only influenced by climate conditions, but also from vegetation and soil properties.

The main goal of this thesis is the estimation of water stress. This will be performed through an analysis of the sites relationships to number, length and water deficit of stress events per year. Analysis will be conducted on Level II-forest plots during a given time period near Heidelberg. The model must be calibrated to return the natural water retention relationship of the experimental area. In practice, water retention curves are determined in the laboratory, however; they can only estimate certain natural conditions. The examination of Level II-forestry sites containing spruce and beech is done in conjunction with the climate impact research project of the Forest Research Institute Baden-Württemberg. Baseline data contains soil moisture content and matrix potential measurements for 2 to 3 different depths. The hydrological model LWF-Brook90 (HAMMEL and KENNEL, 2001) is used to model the soil water balance of the study area. First, a model structure experiment was conducted on a soil compartment found within the spruce tree section of the study area to determine soil compartment parameterization. Secondly, “Regional Sensitivity Analysis” (SPEAR and HORNBERGER, 1980) is conducted to identify the sensitive model parameters for soil water content and matrix potential. A parameter optimization and uncertainty analysis is done using the “Shuffled Complex Evolution Metropolis” algorithm (SCEM-UA; VRUGT et al., 2003).

This process was conducted on three different approaches. The first approach attempted to find the best fit of measured soil moisture, whereas the second approach attempted to determine the best fit for the measured matrix potential. The third approach used the optimization process to determine the best parameter set that agrees with measured soil water content and matrix potential. This was followed by a model evaluation from 2008 to 2010 for Spruce, 2008 to 2009 for beech and applied for the time from 1972 to 1991. The model outputs for the period 1972-1991 were used for the analysis of drought stress.

The results from the sensitivity analysis show that different model parameters are responsible for the conformance of model to measured values for soil moisture content and matrix potential. The resulting optimization of sensitive model parameters for soil moisture content and matrix potential confirm the assumption, that a combined approach is the best way to find agreement for both output variables. Through the implementation of a modified objective function (NASH and SUTCLIFFE, 1970) in the SCEM-UA algorithm, the posterior probability density distribution can be calculated for parameters at different depths. This allows for the best possible fit of model outputs with measured values. Parameter uncertainty shows that a better agreement of measured and simulated values could not only be explained by parameter uncertainty. The model evaluation of both study areas could not recreate the model calibration result.

The dry period stress analysis returned an increase in stress risk for the beech stands due to the relationship of beech transpiration and the soils properties found at the site. The used critical threshold of -1300 hPa (PUHLMANN et al., 2010) for the drought stress analysis showed good agreements with the suggested critical relative extractable water of 0.4 according to GRANIER et al. (1999).

Keywords: Drought stress, soil water balance, soil moisture and matrix potential, SCEM-UA-Algorithm, sensitivity analysis

1 Einleitung

Wasser ist von entscheidender Bedeutung für die Lebensfunktionen von Waldökosystemen (HÖRMANN et al., 2003). Das Wasser dient dabei als Transportmedium für den Stoff- und Energiefluss in Wäldern. Für die Entwicklung von Waldbeständen ist es daher von größter Wichtigkeit Wasserhaushaltsuntersuchungen durchzuführen. Für waldbauliche Entscheidungen bei der Baumartenwahl zählt der Wasserhaushalt von Waldböden zu einem der wichtigsten Standortfaktoren. Der Wasserhaushalt von Wäldern unterliegt dabei den natürlichen Schwankungen des Klimas und muss sich daher an die veränderten regionalen Bedingungen anpassen können. Die seit Mitte des 20. Jahrhunderts deutlich festzustellende Zunahme der globalen Lufttemperatur kann mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die anthropogen bedingte Freisetzung von Treibhausgasen zurückgeführt werden (ARBEITSKREIS-KLIWA, 2006).

Im Rahmen der Klimafolgenforschungsprojekte der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württembergs, der Abteilung Boden und Umwelt wird unter anderem das Auftreten von Trockenstressereignissen für die Hauptbaumarten Fichte und Buche auf den forstlichen Intensivmonitoringsflächen in Baden-Württemberg nach dem europäischen Level II-Programm untersucht. Die meteorologischen, hydrologischen, bodenkundlichen und forstlichen Messungen auf den Level II-Flächen bieten die Möglichkeit, auf Plotebene mit einem physikalisch basierten Wasserhaushaltsmodell die Wasserverfügbarkeit zu quantifizieren. Für eine Analyse von Trockenstressereignissen ist eine Modellkalibrierung nötig, die sowohl den Wassergehalt (θ) als auch das Matrixpotential (ψ_m) abbilden kann. Die Modellierung des Bodenwasserhaushalts bildet die Grundlage für eine qualitative und quantitative Auswertung der Trockenstressereignisse. Die Auswirkungen des sich ändernden Trockenstress wirken sich direkt je nach Baumart auf ihren Gesundheitszustand aus und stehen in Wechselbeziehung zu anderen wichtigen Einflussgrößen anderer Stressfaktoren (VON WILPERT, 2010). Für die Waldwirtschaft stehen dabei aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht das Baumwachstum und –vitalität im Fokus, welche im starken Maße vom Bodenwasserhaushalt abhängig sind und durch die lokale Witterung, die Bodeneigenschaften und der Baumart bestimmt werden. Der Informationsgewinn aus der Modellierung des Bodenwasserhaushalts für Waldstandorte und der Analyse von

Trockenstressereignissen ist für die Waldbewirtschaftung ein wichtiges Kriterium im Bezug auf die Planung von Adaptionsmaßnahmen, welche eine nachhaltige und an die Veränderung des Klimas angepasste Waldwirtschaft gewährleisten sollen.

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Für die Analyse der Stressereignisse bzw. den Schwellenwert, ab dem Stress auftritt benötigt man tiefendiskrete, räumlich und zeitlich aufgelöste Information aus den Messungen des Matrixpotentials (ψ_m). Die Verwendung des ψ_m hat den Vorteil, dass der Bezug zur Wasseraufnahme über die Wurzeln direkter ist. Das ψ_m kann somit die Wasserverfügbarkeit tiefschärfer wiedergeben als der Wassergehalt (θ), welcher eine logarithmische Beziehung zum ψ_m aufweist.

Problem dabei ist der Messbereich, den die konventionellen Tensiometer nach heutigen Stand der Technik erreichen und daher nur limitiert Informationen bis ca.-850 hPa liefern. Ausnahme dabei bilden Mikrotensiometer (Tx5, UMS), welche einen Messbereich bis -2000 hPa aufweisen, jedoch bis jetzt nur für punktuelle Messungen und Laborversuche geeignet sind. Eine Modellkalibrierung des θ und der ψ_m bietet somit die Möglichkeit, den Informationsverlust aus dem limitierten Messbereich der Tensiometer durch den größeren Messbereich der θ zu kompensieren und gewährleistet darüber hinaus eine Einbindung der standortspezifischen pF-Kurve. Die Modellierung einer Fichten- und einer Buchenvariante wird mit dem forsthydrologischen Bodenwasserhaushaltsmodell LWF-Brook90 (HAMMEL und KENNEL, 2001) durchgeführt. Für eine Modellierung und Analyse des Bodenwasserhaushalts ergeben sich im Rahmen dieser Arbeit folgende Aspekte:

- Identifizierung und Umsetzung verschiedener Modellkalibrierungsstrategien mit LWF-Brook90 für θ und ψ_m
- Identifizierung der sensitiven Modellparameter und inverse Parameterbestimmung
- Der Einfluss der Baumart Fichte und Buche auf Trockenstressereignisse

Primäres Ziel dieser Masterarbeit ist die Entwicklung einer geeigneten Modellkalibrierungsstrategie, welche die Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Modells bzw. eine Trockenstressanalyse für den Fichten- und Buchenstandort in Heidelberg ist. Die Evaluierten Modelle sollen anschließend auf eine retrospektive Klimazeitreihe angewendet werden. Eine statistische Analyse der Simulationsergebnisse des Bodenwasserhaushalts soll Aufschluss über die Häufigkeit, Dauer und Intensität von

Trockenstressereignissen für beide Baumarten ergeben. Diese Studie soll exemplarisch für eine Level II-Fläche in Baden-Württemberg durchgeführt werden und helfen, die für den Standort gewonnene Information, für mögliche waldbauliche Anpassungsstrategien zu verwenden und damit einen wichtigen Beitrag zur zukunftsfähigen Waldbewirtschaftung leisten.

2 Stand der Forschung

2.1 Inverse Parameterbestimmung

Die Modellierung des Bodenwasserhaushalts mit physikalisch basierten Modellen wie z.B. Brook90 (FEDERER, 2002), LWF-Brook90 oder HYDRUS-1D (ŠIMŮNEK et al., 1998) beinhalten eine Vielzahl von Einflussgrößen auf die Modellergebnisse. Modelle sind vereinfachte Abbildungen der natürlichen komplexen Systeme, welche die Prozesse der Energie- und Wasserflüsse in der Atmosphäre, im Boden und der Vegetation wiedergeben. Einerseits liegen für die Standorte nur wenige der Modellparameter als gemessene Werte vor und andererseits gibt es viele Parameter, die einen Bezug auf die im System wirksamen Prozesse von „*soil-vegetation-atmosphere transfer*“ Modellen (SVAT) aufweisen und physikalisch interpretierbar sind, aber mit konventioneller Technik keine direkt messbaren Größen darstellen. Die Abschätzung und Bestimmung (Identifizierung) dieser Parameter kann über einen indirekten Weg, durch den Prozess der iterativen Anpassung erfolgen, so dass die Modellsimulationen so präzise wie möglich mit den gemessenen Systemantworten für den betrachteten Standort und Zeitperiode übereinstimmen (VRUGT et al., 2008a). Dieser Prozess wird in der Literatur auch als inverse Modellierung bezeichnet (POETER und HILL, 1999; FINSTERLE, 2004; MERTENS et al., 2006; BEVEN, 2006; VRUGT et al., 2008a).

Die einfachste Form der Modellkalibrierung stellt die „*trial and error*“ Methode dar. Die fehlenden Objektivität und die zeitaufwendige Natur der „*trial and error*“ Methoden führten zur Entwicklung von automatischen Suchverfahren für die Bestimmung der Modellparameter (YAPO et al., 1998). Die Nutzung von lokalen Suchverfahren ist sehr effizient im Auffinden des lokalen Optimums der Zielfunktionsoberfläche. Nachteil dieser Methode ist, dass die meisten Zielfunktionsoberflächen wie z.B. bei N-A-Modellen (Niederschlag-Abfluss) multiple lokale Optimalbereiche aufweisen und somit die Methode stark abhängig vom Startpunkt der Suche ist (GRUNDMANN, 2010). Diese Problematik führte zum Einsatz von globalen Suchverfahren, die in der Lage sind den gesamten Parameterraum auf ein Optimum zu untersuchen. Die meisten globalen Suchverfahren basieren dabei auf reinen (Monte-Carlo-Simulationen), adaptiven Zufallsverfahren und evolutionären Optimierungsmethoden (GRUNDMANN, 2010). Ein weit verbreitetes evolutionäres Suchverfahren stellt der „*Shuffled-Complex-Evolution-Algorithmus*“ (SCE-UA; DUAN et al., 1992) dar. Zahlreiche Studien konnten die

Effektivität und Effizienz des SCE-UA –Algorithmus im Auffinden des optimalen Parametersets hydrologischer Modelle belegen (DUAN et al., 1992, SOROOSHIAN et al., 1993, FRANCHINI et al., 1998, MUTTIL und LIONG, 2004). Für die inverse Bestimmung der Modellparameter besteht das Problem der „Äquifinalität“. Unter der „Äquifinalität“ versteht man das Vorhandensein von mehreren Parametersets, die alle in der Lage sind die beobachteten Daten (z.B. Bodenwassergehalt θ) mit einer ähnlichen Güte zu beschreiben (BEVEN und BINLEY, 1992; BEVEN, 2006). Eine Betrachtung der Parameterunsicherheit kann mit SCE-UA nicht geleistet werden. Der auf SCE-UA basierende „*Shuffled-Complex-Evolution-Metropolis-Algorithm*“ (SCEM-UA, VRUGT et al., 2003) ermöglicht es dem Modellierer durch das global-evolutionäre Suchverfahren einerseits das Auffinden eines optimalen Parameterset und gewährleistet ebenfalls die bei der inversen Parameterbestimmung entstandene Parameterunsicherheit zu visualisieren. Eine Weiterentwicklung von SCEM-UA, stellt der „*Differential-Evolution-Adaptive-Metropolis-Algorithm*“ (DREAM; VRUGT et al., 2008b) dar, welcher im Gegensatz zu dem SCEM-UA eine detaillierte Bilanz und Ergodizität beinhaltet und somit eine exaktere bayesianische Bestimmung der Unsicherheit ermöglicht (VRUGT et al., 2009).

2.2 Trockenstressanalyse

Eine der wichtigsten Formen der Belastungen für Waldbestände und einzelne Bäume ist der im Boden durch Wassermangel induzierte Trockenstress, welcher in der Lage ist andere Stressfaktoren in ihrer Wirkung zu verstärken (WONISCH et al., 1999). Die Abschätzung des Trockenstressrisikos mit Wasserhaushaltsmodellierungen ist von höchster Wichtigkeit für die Einschätzung von Baumwachstum und –vitalität der Hauptbaumarten in Baden-Württemberg (Buche und Fichte) und deren standortsbedingter Variation.

RIDOLFI et al. (2000) definiert dafür drei wichtige Stressgrößen für die Quantifizierung des Wassermangels am Standort. Dazu gehört (1) die Dauer eines Ereignisses, bei dem der zu betrachtende Stressindikator unter einem kritischen Schwellenwert liegt, (2) die Anzahl der Stressereignisse während eines klimatisch homogenen Zeitintervalls, (3) die Größe des saisonal vorkommenden Wasserdefizits. Für die Analyse von Trockenstressereignissen ist es also primär wichtig, je nach Stressindikator einen kritischen Schwellenwert festzulegen, ab dem die Bäume dazu tendieren ihre Stomata zu

schließen, um einem Wasserverlust vorzubeugen, der bei Trockenbedingungen nicht durch den Boden kompensiert werden kann.

In der Literatur findet sich ein breites Maß an meteorologischen, baumphysiologischen, bodenhydrologischen und -chemischen Indikatoren für die Quantifizierung von Trockenstress. Wobei sich allein die meteorologischen und baumphysiologischen Indikatoren wie z.B. mittlerer monatlicher Niederschlag oder Dendrometer-Messungen nur dazu eignen eine grobe Abschätzung über die Wasserversorgung am Standort zu bekommen. Eine quantitative und qualitative Aussage über den Wassermangel kann nur über eine kombinierte Betrachtung der klimatischen, vegetativen und Boden bezogenen Verhältnisse erreicht werden.

Die Untersuchung der Isotope des Kohlen- (atmosphärische CO_2), Sauer- und Wasserstoffs (aus Atmosphäre und Bodenwasser) im Blatt bzw. in Jahrringen können ebenfalls als Indikator für Trockenstress bzw. Umweltveränderungen an Waldstandorten verwendet werden. Die Isotopenmethode kann für die Untersuchung von Trockenstress genutzt werden, da sie hauptsächlich durch äußere Einflüsse gesteuert wird und sich als Umweltveränderungen im Jahrringmaterial widerspiegelt.

Eine Vielzahl an Studien verwendet daher bodenhydrologische Indikatoren wie z.B. θ (ZIMMERMANN und FEGER, 1995; GRANIER et al., 1999; RIDOLFI et al., 2000; HAMMEL und KENNEL, 2001; BORCHERT und KÖLLING, 2003; GRANIER et al., 2007) oder das ψ_m (PUHLMANN et al., 2008) für die Quantifizierung von Trockenstress. Für die Untersuchung der Auswirkungen von Stressereignissen für Waldbestände oder einzelne Bäume ist einerseits der kritische Schwellenwert (S_{krit}) wichtig, der den Übergang in ein Stressereignis kennzeichnet und der permanente Welkepunkt (PWP; pF 4.2), ab dem das Wasser im Boden zu stark gebunden ist, um von der Pflanze aufgenommen zu werden. Unter S_{krit} versteht man einen Wert, der sich in Abhängigkeit der Boden- und Vegetationseigenschaften ausbildet. GRANIER et al. (1999) weist in seiner Untersuchung darauf hin, dass ab einer Unterschreitung der relativen nutzbaren Feldkapazität (nFK_r) von 0.4 das Bodenwasser die Transpiration der Bäume beschränkt. Die Berechnung der nFK_r kann nach folgender Gleichung errechnet werden (GRANIER et al., 1999):

$$nFK_r = \frac{\theta - \theta_m}{\theta_F - \theta_m} \quad (\text{Gl.2.1})$$

wobei θ für den aktuellen Wassergehalt, θ_m und θ_F für den Wassergehalt bei PWP und FK steht. GRANIER et al. (2007) weist darauf hin, dass bei einer Unterschreitung des nFK_r von 0.4 die Transpiration, Photosynthese und Respiration stark abnehmen. Die Baumtranspiration wird bei ausreichend pflanzenverfügbarem Wasser durch die potenzielle Evapotranspiration (PET) dominiert und weist eine starke Korrelation mit dem Saftfluss auf (CENTRITTO et al., 2011), solange der S_{krit} von 0.4 nicht unterschritten wird. Wenn also die Bodenwasservorräte sich durch Trockenheit verringern, sinkt auch das pflanzenverfügbare Wasser und die Korrelation der potenziellen Evapotranspiration mit Transpiration wird schwächer und zeigt somit, dass der θ die hauptsächliche Determinante für die Transpiration ist (CENTRITTO et al., 2011). Nach Auffüllung der Wasservorräte im Boden übernehmen die meteorologischen Einflussgrößen wieder die dominante Rolle in der Transpiration (LEITGEB et al., 2002).

Dieser Wert zeigte sich als relativ konstant für verschieden Laub- und Nadelbaumarten und kann als physiologischer Schwellenwert aufgefasst werden (GRANIER et al., 1999). In Abbildung 1 (A und B) wird die Herleitung des S_{krit} (kritischen nFK_r) für einen Eichenbestand dargestellt. In Abbildung 1 A wird das Verhältnis der Bestandestranspiration zur potentiellen Evaporation (Saftflussmessungen) und in Abbildung 1 B die Stammumfangsmessungen zur nFK_r dargestellt. Dieser kritische Schwellenwert ist in der aktuellen Literatur für die Abschätzung des Trockenstressrisikos von Waldbeständen weitverbreitet (ANDERS et al., 2002; BERNIER et al., 2002; GRANIER et al., 2007; MASEYK et al., 2008; SCHWÄRZEL et al., 2011).

Der θ und damit auch die nFK im Boden ist stark abhängig von der Bodenart und somit ergeben sich je nach Ton-, Schluff- oder Sandanteilen verschiedene nFK . Besonders tonreiche oder sandige Böden, welche aufgrund ihres Porengrößenbereichs eine geringere nFK aufweisen als schluffreiche Böden, sind stärker anfällig für Trockenstressereignisse. In der Bodenkunde und der Pflanzenphysiologie werden im Bezug auf die Aufnahme von Wasser durch die Vegetation das pflanzenverfügbare Wasser in Potenzialen angegeben. Es ist also nicht die Wassermenge entscheidend, sondern die Kraft (Tension) mit der das Wasser im Boden gebunden ist (PUHLMANN et al., 2008). Die Berechnung eines kritischen Schwellenwertes als ψ_m würde eine Alternative zur Methode nach GRANIER et al. (1999) darstellen. Eine Möglichkeit diesen Wert baumspezifisch zu berechnen, kann durch die Korrelation des gemessenen

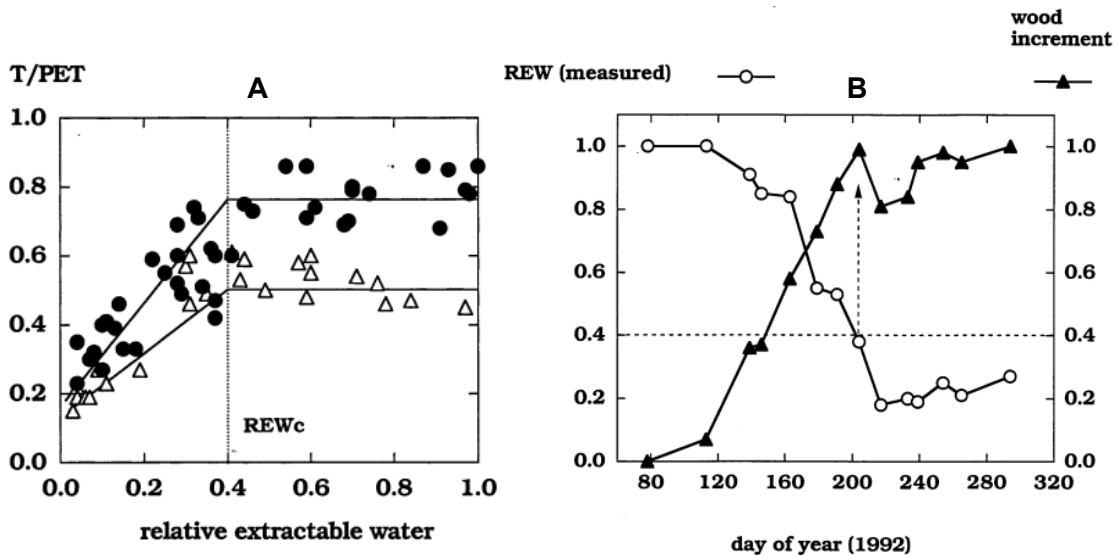


Abbildung 1: Herleitung des kritischen Schwellenwertes, A) Verhältnis T/PET aus Saftflussmessungen (Eiche) als Funktion der nFK_r mit unterschiedlichen LAI Werten ($\bullet$ $LAI=6 \text{ m}^2/\text{m}^2$, Δ $LAI=4.5 \text{ m}^2/\text{m}^2$) und gestrichelte Linie S_{krit} der nFK_r . B) Beispiel des saisonalen Verhaltens des relativen Stammumfangwachstums (=Rate des aktuellen Zuwachses zu maximalen jährliche Zuwachs (Δ)) mit nFK_r ($\circ$), die gestrichelte Linie steht für den Punkt, ab dem es zu einem Rückgang des Wachstums kommt und für den S_{krit} (aus GRANIER et al., 1999).

ψ_m mit Zelldurchmessern aus Jahrringanalysen oder Dendrometer Messungen erbracht werden. Für zwei Fichtenstandorte (Parabraunerde und Pseudogley) bei Riedlingen (Heiligkreuztaler Wald) wurde über eine Korrelation des ψ_m und der Residuen der Zelldurchmesser aus Jahrringanalysen ein kritisches ψ_m von ca. -1000 hPa festgestellt. Aus der Untersuchung geht hervor, dass in Perioden mit guter Wasserversorgung die Schwankungen des Zelldurchmessers eine geringere Beziehung zum Bodenwasserhaushalt aufweist und in Trockenjahren der Wasserhaushalt der limitierende Faktor für das Zelldurchmesserwachstum ist (VON WILPERT, 1990).

Eine weitere Möglichkeit der Einbeziehung von Trockenstressreaktionen der Bäume stellt wie erwähnt die Dendrometer-Messung dar. Mithilfe von Dendrometern kann die Stammumfangsänderung in hoher Auflösung gemessen und damit wichtige Informationen über die täglichen bzw. saisonalen Schwankungen des Baumumfanges wiedergegeben werden. Über die Analyse der Amplitude der täglichen Saugspannungen, welche die Quell- und Schwindbewegungen der Wasseraufnahme des Baumes während des Tages und der Nacht repräsentieren und dem Tagesmittelwerte der Saugspannungen im Boden, konnte ein kritischer Schwellenwert des Matrixpotenzial ψ_m definiert werden (PUHLMANN et al., 2010). Die Tagesamplituden steigen bis zu dem kritischen

Schwellenwert des ψ_m an. Die über den Tag entstandenen hohen Saugspannungen können in der Nacht über den flüssigen und gasförmigen Wasserfluss aus anderen Bodenschichten und dem „*Hydraulic lift*“ (Wurzelausfluss) reduziert werden (WARREN et al., 2011). Nach Überschreitung dieses kritischen ψ_m nehmen die Tagesamplituden bei gleichzeitig höheren Tagesmittelwerten des ψ_m ab. Die über den Tag entstandenen hohen Saugspannungen können somit in der Nacht nicht mehr ausgeglichen werden und zeigen daher eine Abnahme der Tagesamplituden des ψ_m auf. Auf der Level II-Fläche in Heidelberg wurde für die Buche ein kritisches Matrixpotenzial von -1300 hPa festgestellt (PUHLMANN et al., 2010).

3 Material und Methoden

3.1 Vorstellung des Gesamtkonzeptes

Im Rahmen dieser Arbeit soll der Bodenwasserhaushalt von zwei forstlichen Standorten auf Plotebene mit einem physikalisch basierten forsthydrologischen Modell LWF-Brook90 für die Baumarten Fichte (*Picea Abies*) und Buche (Rotbuche, *Fagus Sylatica*) modelliert werden. Im ersten Schritt muss daher nach Sichtung der Datengrundlage eine Modellkalibrierung für beide Standorte auf Plotebene erstellt werden. Das modellstrukturelle Experiment, die Sensitivitätsanalyse und die Parameteroptimierung und –unsicherheit werden exemplarisch für den Fichtenplot durchgeführt. Für die Parameteroptimierung wurden 3 verschiedene Ansätze untersucht. Dabei soll aufgezeigt werden, dass eine Modellkalibrierung für mehrere Outputgrößen (Wassergehalt θ und Matrixpotential ψ_m) nur über einen modifizierten Ansatz (Hüllkurve) des Parameteroptimierungsverfahrens möglich ist.

Anschließend werden die Ergebnisse des modellstrukturellen Experiments, der Sensitivitätsanalyse und die Vorgehensweise des alternativen Parameteroptimierungsansatzes auf den Buchenplot übertragen. Über die Modellevaluierung können die Modelle für eine Vorhersage von Zeiträumen genutzt werden, in denen keine gemessenen Outputdaten vorhanden sind. Eine statistische Analyse der Trockenstressereignisse für die Dauer, Häufigkeit und Fehlmenge pro Jahr erlaubt es dann, einen Einblick in den Wasserhaushalt beider Standorte zu bekommen. In Abbildung 2 ist das methodische Gesamtkonzept für die Vorgehensweise dieser Untersuchung dargestellt. Die verwendeten Materialien und Methoden dieser Arbeit werden im folgenden Kapitel näher beschrieben.

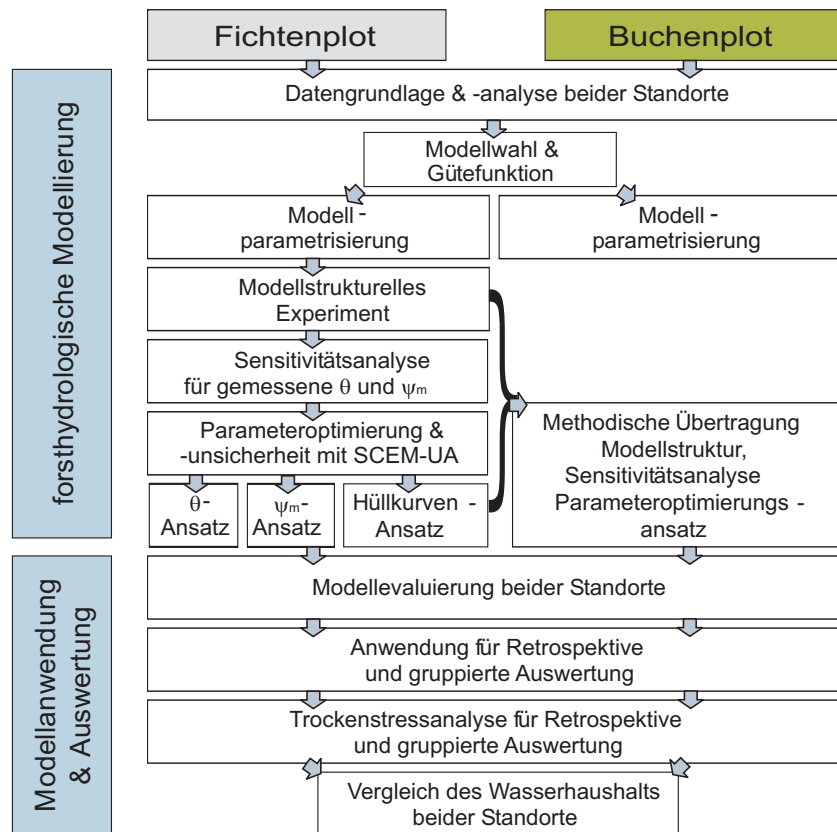


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Vorgehensweise von Modellkalibrierung bis zur Anwendung und Auswertung für diese Untersuchung.

3.2 Untersuchungsgebiet

Die zwei Standorte (je eine Fichten- und Buchenfläche) liegen etwa 6 km nordöstliche von Heidelberg im Odenwald, der zum südwestdeutschen Mittelgebirgs- bzw. Schichtstufenland gehört. Die Standorte können nach den naturräumlichen Haupteinheiten Deutschlands dem Odenwald, Spessart und Südrhön (D55 nach SSYMAN, 1994) gezählt werden, der sich über die Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern und Hessen erstreckt. Die Standorte liegen im sogenannten „Sandstein-Odenwald“, der über dem variskischen Grundgebirge die sedimentäre Bedeckung aus dem unteren/ mittleren Trias dem Buntsandstein bildet.

Die Standorte bei Heidelberg gehören zu den sechs Untersuchungsgebieten aus dem EU-Level II-Messnetz (Abbildung 3), wobei für 4 Standorte (Heidelberg, Conventwald, Ochsenhausen und Esslingen) im Rahmen des Projektes der Klimafolgenforschung von der forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA) betrieben und der Bodenwassertransport physikalisch begründet modelliert werden soll (PUHLMANN et al., 2008). Auf den Intensivmessflächen werden im Rahmen des Level

II Programms und seit 2009 und 2010 durch das Projekt FutMon (Further Development and Implementation of an EU-level Forest Monitoring System), das durch das Life+ Programm der Europäischen Union unterstützt wird, Daten zum Baumzustand und – wachstum, Nährstoffkreislauf, Stoffeintrag, Bodenzustand, Bodenvegetation, Bodenhydrologie und Meteorologie erhoben, welche Aufschluss über die Dynamik der Umweltveränderungen geben soll.

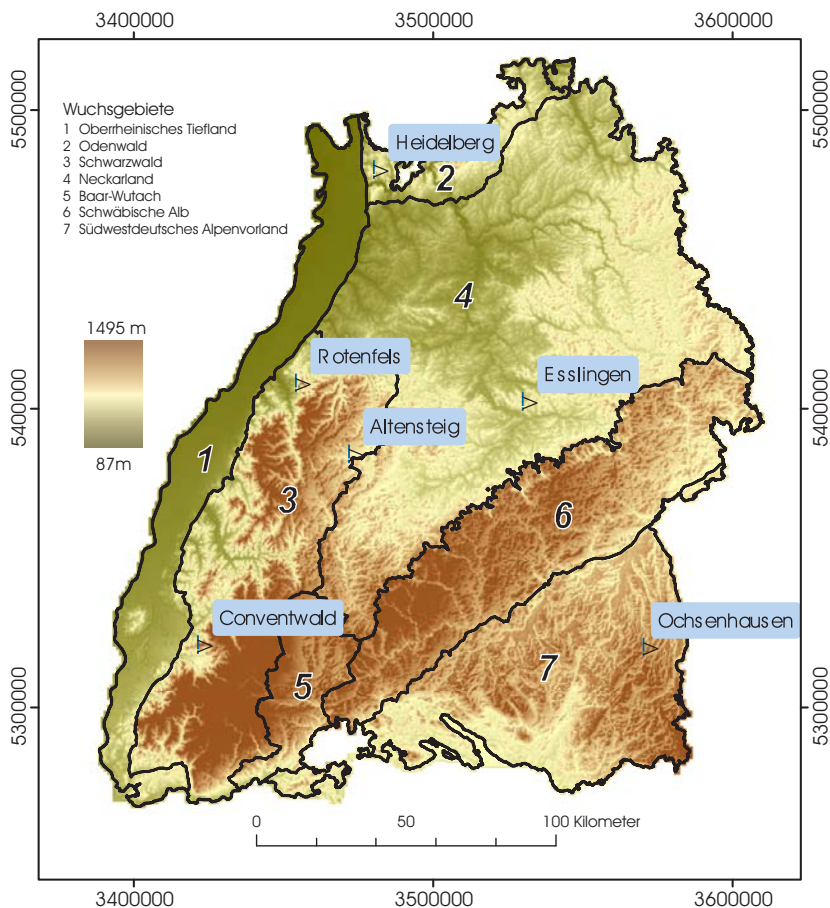


Abbildung 3: Darstellung und Zuordnung in Wuchsgebiete für die Level II-Standorte in Baden-Württemberg.

3.2.1 Fichtenfläche

Die Fichtenfläche (50x50 m²) befindet sich auf einer Höhe von 510 m ü.N.N. auf einem flach in sich gleichmäßig geneigtem (11°) Westhang. Das Ausgangsgestein für den Standort ist Hangschutt aus Sandstein (mittlerer Buntsandstein). Die Vegetationsstufe ist submontan und der Klimahaupttyp ist atlantisch. Nach der forstlichen Standortskartierung für Baden-Württemberg (ALDINGER et al., 1998) kann der Standort aus der regionalen Gliederung dem „Atlantisch-submontanen Buchewald mit Traubeneiche“ zugeordnet werden. Durch forstwirtschaftliche Eingriffe im Staatswald

hat sich ein einschichtiger Fichtenreinbestand (*Picea Abies*) aus Pflanzungen entwickelt, der einen locker bis lichten Schlussgrad ausbildet und im Mittel 97-jährig ist. Die Naturverjüngung auf der Fläche besteht aus Douglasie, Fichte, Tanne, Vogelbeere, Birke und Waldkiefer (Profilsprache WIEBEL und HIRT, FVA, 1994). Die klimatischen Verhältnisse für den Standort können aus dem Klimadiagramm (Abbildung 4) entnommen werden. Für den Zeitraum von 1971 bis 1991 weist der Standort eine mittlere Jahreslufttemperatur von 6.8 °C und einen mittleren jährlichen Niederschlag von 1146 mm auf. Der mittlere Temperaturverlauf erreicht in den Monaten Juli und August seine maximalen Werte. Aus dem Klimadiagramm geht auch hervor, dass die Monate Mai, Juni und Juli besonders hohe und im Februar, April, August und September geringe monatliche Niederschlagssummen aufweisen.

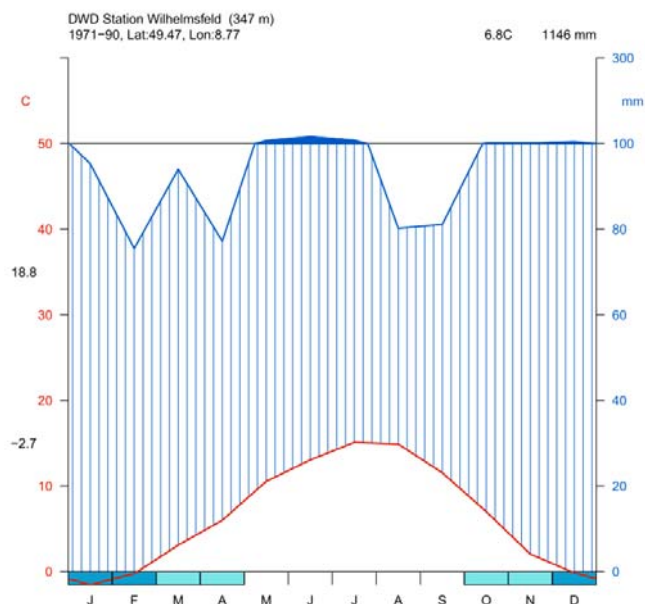


Abbildung 4: Klimadiagramm nach WALTER und LIETH für den Standort Heidelberg (Zeitraum 1971 bis 1991).

3.2.2 Buchenfläche

Die Buchenfläche (50x50 m²) befindet sich auf einer Höhe von 390 m.ü.N.N. auf einem flach in sich uneben geneigten (12°) Südwesthang. Das Ausgangsgestein für den Standort ist Hangschutt aus Sandstein (Oberer Buntsandstein) und weist dieselben klimatischen Bedingungen und standortliche Klassifizierung des Wuchsgebietes auf, wie die Fichtenfläche. Der etwa 60- bis 70-jährige Buchenbestand (Rotbuche, *Fagus Sylatica*) mit einer mittleren Baumhöhe von 20 m (mündl. Mittlg. BUBERL, H., FVA) ist

ebenfalls Staatswald und setzt sich aus 40 % Buche, 30 % Fichte, 15 % Lärche, 10 % Douglasie und 5 % Eiche zusammen.

3.3 Datengrundlage

Für die Modellierung des Bodenwasserhaushalts mit dem Programm LWF-Brook90 werden verschiedene meteorologische, hydrologische und bodenkundliche Daten als Eingangsgrößen benötigt. In den folgenden Abschnitten werden die jeweiligen Eingangsgrößen genauer beschrieben.

3.3.1 Meteorologische Messwerte

LWF-Brook90 benötigt für die Modellierung den Niederschlag als Tages- oder Stundenwert, die Lufttemperatur (mittlere, minimale und maximale), den aktuellen Dampfdruck, die Windgeschwindigkeit und die Globalstrahlung oder Sonnenscheindauer als Tageswert. In den Untersuchungsflächen selbst wird nur der Bestandesniederschlag im 2 wöchentlichen Rhythmus aufgenommen. Eine in der Nähe liegende Freilandfläche der FVA liefert die benötigten meteorologischen Daten für Niederschlag, Lufttemperatur, relative Feuchte, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit für den Zeitraum 1996 bis 2010. Die Messdaten wurden durch das Büro für Umweltmonitoring INTERRA statistisch aufbereitet. Der Lückenersatz erfolgte über ein lineares Regressionsverfahren mit autoregressiver Fehlerkorrektur über die Messstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz (LUBW) für den Standort (ZIRLEWAGEN, 2003). Dabei wurde davon ausgegangen, dass die meteorologischen Daten für den Fichten- und den Buchenstandort repräsentativ sind.

Für die Berechnung des aktuellen Dampfdruckes wurde über die Magnusformel (DYCK und PESCHKE, 1995) zuerst der temperaturabhängige Sättigungsdampfdruck [hPa] über Wasser ($E_w(T_m)$) bzw. Eis ($E_E(T_m)$) ermittelt.

$$E_w(T_m) = 6,11 \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot T_m}{237,3 + T_m}} \quad (\text{Gl.3.1})$$

$$E_E(T_m) = 6,11 \cdot 10^{\frac{9,5 \cdot T_m}{265,5 + T_m}} \quad (\text{Gl.3.2})$$

T_m : Lufttemperatur [°C]

Der maximal mögliche Dampfdruck [hPa] ergibt sich dann aus:

$$EA_{\max} = \begin{cases} E_w \rightarrow T_m \geq 0 \\ E_E \end{cases} \quad (\text{Gl.3.3})$$

Aus der relativen Feuchte F_{rel} und dem bei gegebener Temperatur geltende Sättigungsdampfdruck ($EA_{\max}$) kann der Dampfdruck e [hPa] (Gl.3.4) berechnet werden.

$$e = F_{\text{rel}} \frac{EA_{\max}}{100} \quad (\text{Gl.3.4})$$

Für die anschließende Anwendung der evaluierten Modelle auf die Retrospektive von 1972 bis 1991, welche das Trockenjahr 1976 und die relativ trockenen Jahre Anfang der 1980er umfasst, waren keine Messungen der FVA vorhanden, so dass auf umliegende Stationen der DWD zurückgegriffen werden musste. Für den Niederschlag wurde wie schon für die Kalibrierungs- und Evaluierungsphase die DWD Station Wilhelmsfeld (RR 5574) ausgewählt. Für die Windgeschwindigkeit, relative Feuchte und Lufttemperatur wurde über ein lineares Regressionsmodell mit der nahe gelegenen DWD Station Eberbach/Neckar (KL 1903) und den meteorologischen Werten nach INTERRA (1996 bis 2010) eine Messreihe erstellt.

Tabelle 1: Meteorologische Daten für den Kalibrierungs- Evaluierungszeitraum und Retrospektive der Bodenwasserhaushaltsmodellierung und das Bestimmtheitsmaß r^2 für die lineare Regression (LR).

Eingangsdaten	Einheit	Kalibrierung bzw. Evaluierung	Retrospektive	r^2
Zeitraum		1996-1999	1971-1990	-
Niederschlag	[mm]	DWD Station 5574	DWD Station 5574	-
Globalstrahlung	[MJ m ⁻²]	INTERRA	Verfahren nach BROOK90	-
mittlere Lufttemperatur	[°C]	INTERRA	LR mit Station 1093	0.83
minimale Lufttemperatur	[°C]	INTERRA	LR mit Station 1093	0.95
maximale Lufttemperatur	[°C]	INTERRA	LR mit Station 1093	0.98
relative Feuchte	[%]	INTERRA	LR mit Station 1093	0.67
Windgeschwindigkeit	[m s ⁻¹]	INTERRA	LR mit Station 1093	0.30
aktueller Dampfdruck	[kPa]	Magnusformel	Magnusformel	-

LR= lineares Regression der INTERRA Daten (1996-2010) und der jeweiligen DWD Station 1903

Für den Datensatz der Retrospektive konnte keine nahe gelegene Station ermittelt werden, die die relative Feuchte aufnimmt. Daher wurden die Daten der relativen Feuchte aus der Forschungskooperation mit der Universität Hamburg (BÖHNER, GIS Regionalisierung Klimadaten) übernommen. Ein Vergleich über die simulierten Klimadaten der relativen Feuchte für den Zeitraum der Jahre 1996 bis 2005 und den INTERRA Daten ergab ein Bestimmtheitsmaß (r^2) von 0.87.

Für die Berechnung der standortsspezifischen Globalstrahlung konnte auf ein Brook90 Modell internes Verfahren zurückgegriffen werden. Dabei wird im ersten Schritt die Sonnenscheindauer über die Standortskordinaten und Konstanten und anschließend

daraus die Globalstrahlung berechnet. Das Verfahren wurde in LWF-Brook90 übernommen und die Konstanten an europäische Verhältnisse angepasst (schriftl. Mittlg. SCHULZE, B., UDATA). Weitere Einzelheiten des Verfahrens findet der interessierte Leser in der online Dokumentation von Brook90 (FEDERER, 2002).

3.3.2 Hydrologische Messwerte

Die hydrologischen Messwerte für θ und ψ_m werden durch die FVA bzw. auf der Fichtenfläche durch die LUBW ermittelt. In Tabelle 2 sind die Hintergrundinformationen der Messungen am Standort angegeben.

Tabelle 2: Hintergrund Informationen über die hydrologischen Messungen für beide Untersuchungsstandorte.

	Fichtenfläche				Buchenfläche	
	θ	ψ_m	θ	pF-Meter	θ	pF-Meter
Einheit	[Vol %]	[hPa]	[Vol %]	[-]	[Vol %]	[-]
Messnetz-betreiber	LUBW	LUBW	FVA	FVA	FVA	FVA
Messbeginn	01.01.1996	01.01.1996	18.08.2010	18.08.2010	27.05.2008	27.05.2008
Messgerät	Theta-Probe ML2x	T8 Tensio-meter	Theta-Probe ML2x	pF-Meter	Theta-Probe ML2x	pF-Meter Analog
Firma	Delta T Devices	UMS	Delta T Devices	ecoTec	Delta T Devices	ecoTec
Messtiefe [cm]	15,30,75	15,30,75	15,30,60	15,30,60	30, 60	30, 60
Messbereich	0.05 bis 0.6 $m^3 \cdot m^{-3}$	+1000 bis -850 hPa	0.05 bis 0.6 $m^3 \cdot m^{-3}$	pF 0.5 bis 7, - 40 bis +80 °C	0.05 bis 0.6 $m^3 \cdot m^{-3}$	pF 0.5 bis 7 - 40 bis +80 °C
Position	Transekt	Transekt	X,Y,Z	X,Y,Z	X,Y,Z	X,Y,Z
Messungsintervall	stündlich	stündlich	halbe Stunde	halbe Stunde	halbe Stunde	halbe Stunde

θ Wassergehalt

ψ_m Matrixpotential

Die Messungen der θ und ψ_m werden am Buchenstandort durch die FVA erbracht und werden in zwei Tiefen (30 und 60 cm) für drei verschiedene Kronenstraten gemessen. Die Unterscheidung der Standorte bezieht sich dabei auf die Kronenposition X, Y und Z. Wobei X für einen Messstandort im Zentrum der Baumkrone, Y für den Kronenrand und Z für eine Kronenlücke steht. Die FVA hat bei dem Einbau ihrer Messwertgeber darauf geachtet, dass je Kronenstrate und Tiefe die pF-Meter und FDR-Sonden möglichst nahe beieinander eingebaut werden, um den räumlichen Zusammenhang der Messungen zu gewährleisten. In Abbildung 5 ist der Messstandort der hydrologischen Messungen der Buchenfläche dargestellt. Für die Fichtenfläche lagen von der FVA nur Daten des ψ_m ab 2002 vor. Deshalb wurde für die Untersuchung auf die Messungen der LUBW

zurückgegriffen, die ebenfalls auf der Fläche seit 1996 θ und ψ_m messen. Der Aufbau der Messwertgeber ist als Transekt (Abbildung 6) angelegt und musste daher erst über eine Abschätzung der Kronenposition, sowie unter visueller Einschätzung des räumlichen Zusammenhangs von θ und ψ_m je Tiefe ausgewählt werden.

Über die Kronenposition und Sichtung der LUBW Messwerte, wurde ein Datensatz in annähernd vergleichbarer Position Y gefunden, die es für die folgende Untersuchung erst ermöglichte, die Messdaten für die jeweilige Baumart zu vergleichen. Alle Messungen lagen als Rohdaten vor und mussten im ersten Schritt über eine grafische Prüfroutine (Stunden- bzw. Halbstundenwerte) auf Fehlwerte geprüft, mit dem Niederschlag plausibilisiert und anschließend zu Tagesmittelwerten aggregiert werden. Wenn ein Rohdatensatz pro Tag mehr als 3% Fehlwerte aufwies, wurde für das Tagesmittel angenommen, dass es sich um einen Fehlwert handelt. In Abbildung 7 werden exemplarische Fehlwerte in den Messreihen für den Niederschlag, den θ (B) und dem ψ_m über Thetaprobe (A) und pF-Meter (C) präsentiert. Für die Buchenfläche stellte sich nach intensiver Datenanalyse heraus, dass die analogen pF-Meter, aufgrund einer fehlerhaften Werkskalibrierung (schrift. Mittl. ECOTech, Sigmoidaler Kurvenverlauf von Schluff) ab pF-Werten von ca. 3.2 keine vertrauenswürdigen Daten mehr liefern.



Abbildung 5: Standort je Kronenstrate X (Kronenzentrum), Y (Kronenrand) und Z (Kronenlücke) der pF-Meter Theta-Probe ML2x (Wassergehaltsmessung θ) Messwertgeber auf dem Buchenplot.



Abbildung 6: Standort der Messwertgeber für Matrixpotential ψ_m (T8-Tensiometer) und Wassergehalt θ (Theta-Probe ML2x) der LUBW auf der Fichtenfläche in Heidelberg.

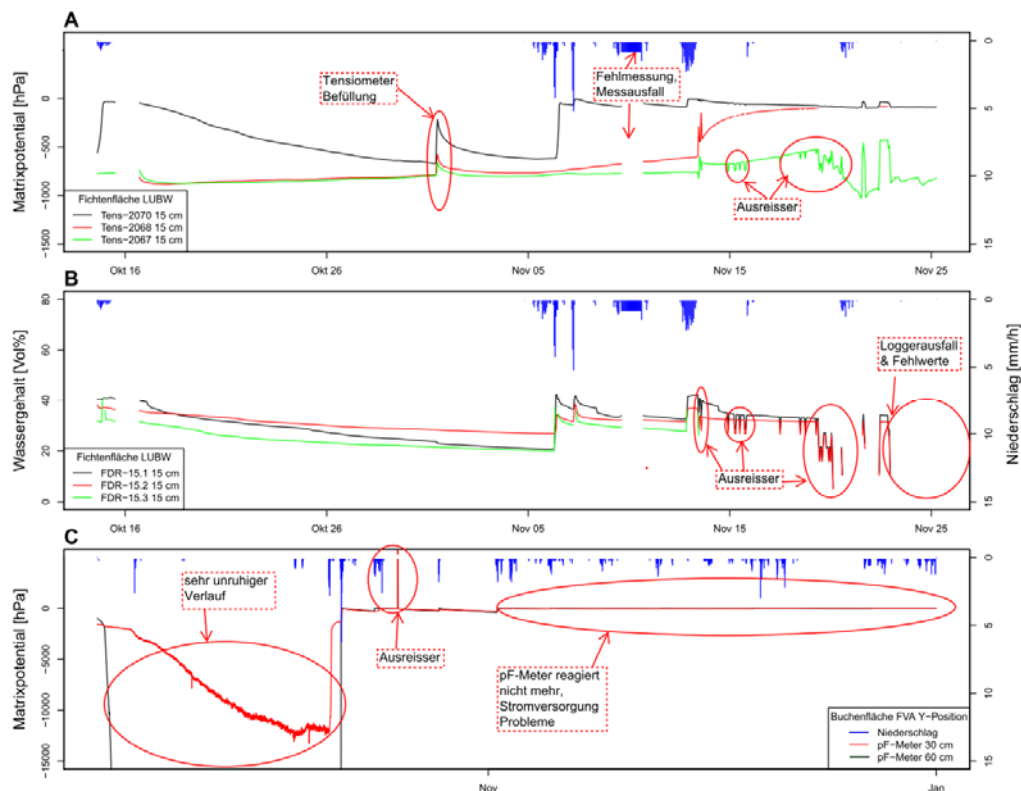


Abbildung 7: Exemplarische Messfehler für die Messung des (A) Matrixpotentials ψ_m (T8-Tensiometer, Fichtenplot), (B) Wassergehalts θ (Theta-Probe ML2x, Fichtenplot) und (C) pF-Meter (Buchenplot).

Dieser Fehler wurde für die digitalen-pF-Meter (ECOTech) durch einen verbesserten Keramiktopf behoben. Für die Untersuchungen wurden daher nur pF-Werte bis 3.2 verwendet.

3.3.3 Bodenkundliche Grundlage

Die benötigten Bodeninformationen für den Standort Fichte wurden über eine Profilansprache durch Herrn BUBERL (FVA, 2008) durchgeführt. Die Profilansprache umfasst dabei die horizontweise Information der Textur, Gefügeform und Trockenrohdichte. Aus der Horizontabfolge geht hervor, dass es sich um eine Podsol-Braunerde handelt (Tabelle 3). Die Humusform wurde als rohhumusartiger Moder klassifiziert. Der maßgebende Prozess der Bodenentwicklung kann durch die Podsolierung beschrieben werden. Durch geringe pH-Werte in der Humusauflage, wo stark saure, niedermolekulare organische Säuren gebildet werden, wird die Gitterstruktur der Silicate zerstört und Sesquioxide aus dem Kristallverband gelöst und in den Unterboden verlagert. Dort werden durch höhere pH-Werte und ansteigenden Al^{3+} -Konzentrationen in der Bodenlösung die Ausfällung der organischen Substanzen bzw. der Sesquioxide induziert. Es bildet sich daher im Oberboden ein typischer Eluviationshorizont (Ae) aus, der durch eine Verarmung an Aluminium, Eisen und Mangan eine graue Färbung annimmt. Im Unterboden entsteht durch die Ausfällung ein dunkel- bis roter Anreicherungshorizont (Bsh). Die für den Wasserhaushalt wichtige Information über die Luftkapazität (LK), nutzbare Feldkapazität (nFK), Feldkapazität (FK) und das Totwasser kann aus den Angaben der Bodenart und Trockenrohdichte über die bodenkundliche Kartieranleitung (KA5, AG-BODEN, 2005) abgeschätzt werden. In Tabelle 4 ist die Abschätzung für die Kenngrößen der Wasserversorgung des Standorts dargestellt. Auf eine Ab- bzw. Zuschlag der einzelnen Größen bezüglich des Anteils an organischer Substanz wurde verzichtet.

Tabelle 3: Datengrundlage der Profilansprache nach (BUBERL, 2008) für die Podsol-Braunerde des Fichtenstandorts.

Horizontabfolge	Tiefe [cm]	Bodenart	Skelett [%]	TRD [g/cm ³]	Wurzeldichte [W/dm ²]
L	+7 bis +5				
Of	+5 bis +2				
Oh	+2 bis 0				
Ahe	0 bis -16	SI3	5	1,07	35,5
Bsh	-16 bis -55	SI2	25	1,15	15,5
CvBv	-55 bis -120	Su2	30	1,3	4

Tabelle 4: Abschätzung der wichtigen Bodenwasserhaushaltsgrößen Luftkapazität (LK), nutzbare Feldkapazität (nFK), Feldkapazität (FK) und Totwasser nach AG-BODEN (2005) für den Fichtenstandort, wobei Stufe der pt für Trockenrohdichten Klassen steht.

Horizont- abfolge	Bodenart	Sand	Schluff [Masse-%]*	Ton	Stufe der pt [-]	LK [Vol-%]	nFK [Vol-%]	FK [Vol-%]	Totwasser [Vol-%]
Ahe	SI3	65	25	10	1	18	20	34	12
Bsh	SI2	76	17.5	6.5	1	23	20	28	8
CvBv	Su2	80	17.5	2.5	2	24	20	26	6

* Mittelwert aus Parameterbereich der Feinbodenart

Alle Horizonte weisen eine hohe LK auf (13 bis <26), eine mittlere nFK (14 bis <22), eine geringe (6-<14) bis mittlere (14-<22) FK und mit Ausnahme des Ahe-Horizonts (mittlere) einen geringen Anteil an Totwasser (4-<10).

Für den Buchenstandort wurde ebenfalls eine Profilansprache durch Herrn BUBERL (2008) durchgeführt. Der Bodentyp wurde aufgrund seiner Horizontabfolge als Pseudogley-Braunerde (SS-BB) eingestuft (Tabelle 5). Bei der Humusform handelt es sich um einen mullartigen Moder. Im Gegensatz zum Fichtenstandort wurde hier eine Wurzelzählung mit Rahmen (5x5 cm) durchgeführt und ein Mittelwert für die entsprechenden Horizonttiefen gebildet. Die wichtigen Prozesse der Bodenentwicklung können hier durch die Verbraunung und Verlehmung (Bv) und der Podsolierung im Oberboden beschrieben werden. Im Btv findet eine Tonanreicherung statt und bei dem S-Cv handelt es sich um einen Stauwasser beeinflussten, zeitweilig nassen oder entwässerten mineralischen Unterbodenhorizont. In Tabelle 6 werden die wichtigsten Informationen für den Bodenwasserhaushalt des Standorts wiedergegeben.

Tabelle 5: Datengrundlage der Profilansprache nach (BUBERL, 2008) für die Pseudogley-Braunerde des Buchenstandorts.

Horizontabfolge	Tiefe [cm]	Bodenart	Skelett [%]	TRD [g/cm³]	Wurzelndichte [W/dm²]
L	+6 bis +2				
Of	+2 bis +0.2				
Oh	+0.2 bis 0				
Ah	0 bis -4	Ls2	1	1,2	58
Ae-Bv	-4 bis -36	Ls2	2	1,1	16
Btv	-36 bis -77	Lts	3	1,3	15
S-Cv	-77 bis -100	Ls3	35	1,5	2

Tabelle 6: Abschätzung der wichtigen Bodenwasserhaushaltsgrößen Luftkapazität (LK), nutzbare Feldkapazität (nFK), Feldkapazität (FK) und Totwasser nach AG-BODEN (2005) für den Buchenstandort, wobei Stufe der pt für Trockenrohdichten Klassen steht.

Horizont- abfolge	Bodenart	Sand [Masse-%]*	Schluff	Ton	Stufe der pt [-]	LK [Vol-%]	nFK [Vol-%]	FK [Vol-%]	Totwasser [Vol-%]
Ah	Ls2	34	45	21	1	13	21	40	19
Ae-Bv	Ls2	34	45	21	1	13	21	40	19
Btv	Lts	42	22	35	2	10	17	44	27
S-Cv	Ls3	44	35	21	3	9	16	33	17

* Mittelwert aus Parameterbereich der Feinbodenart

Daraus wird ersichtlich, dass der Boden für alle Horizonte eine mittelmäßige LK (5 bis 13), nFK (14-22) und Totwasser (10 bis 22) aufweist. Die FK kann nach AG-BODEN(2005) als mittelmäßig bis hoch (30 bis 39, 39 bis 48) eingestuft werden. Der Totwassergehalt kann für den Ah, Ae-Bv und den S-Cv als mittel und für den Btv als hoch eingeschätzt werden.

3.4 Modell Brook90

Modelle sind vereinfachte Abbildungen natürlicher komplexer Systeme. Das Modell LWF-Brook90 ist ein modifiziertes Wasserhaushaltsmodell nach HAMMEL und KENNEL (2001), dass auf Brook90 nach FEDDERER (2002) basiert. LWF Brook90 bzw. Brook90 ist ein deterministisches, eindimensionales, prozessorientiertes forsthydrologisches Modell, das den Wasserhaushalt auf Tagesbasis für kleine homogene Einzugsgebiete oder auf Plotebene modellieren kann (FEDDERER, 2002). Das Hauptaugenmerk von LWF-Brook90 liegt auf der detaillierten Modellierung der Evapotranspirationsprozesse, der vertikalen Bodenwasserflüsse und der lokalen Abflussbildung. So kann man für spezifische Vegetationsformen auf Standorts- bzw. Plotebene die Wasserhaushaltsgrößen, Verdunstung und Abfluss, sowie den θ und die Wasserspannung im Boden berechnen. Die separate Betrachtung der Boden- Pflanzen- und Interzeptionsverdunstung im Modell wird über die nach SHUTTLEWORTH-WALLACE modifizierte PENMAN-MONTEITH-Gleichung ermöglicht.

Die Wasserbewegung im Boden ergibt sich aus der numerischen Lösung der Richards-Gleichung. Nicht beachtet werden in dem Modell, die räumliche Heterogenität und die lateralen Sickerwasserflüsse zwischen benachbarten Bodenkompartimenten. Als weitere Vereinfachung wird die Hysterese der hydraulischen Funktionen, der pF-Kurve und der hydraulischen Leitfähigkeit vernachlässigt und führt daher zu einer Diskrepanz zwischen gemessenen und simulierten Matrixpotenzialen (HAMMEL und KENNEL, 2001). Die

Veränderung der Porengeometrie bei Quellen und Schrumpfen, sowie der Wasserdampftransport im Boden finden im Modell ebenfalls keine Beachtung.

3.4.1 Modellaufbau

Das Modellsystem benötigt für die Modellierung tägliche Daten an Niederschlag (P), minimaler und maximaler Lufttemperatur ($T_{\min}$, $T_{\max}$), aktuellem Dampfdruck (e), Globalstrahlung (R_G) und Windgeschwindigkeit (u) als meteorologische Inputgrößen. Die Transformation von Niederschlag in θ und ψ_m der jeweiligen Tiefenstufe wird über die Speicherterme im Kronenraum, der Schneedecke und dem Boden gewährleistet. In Abbildung 8 wird die Struktur des Wasserhaushaltsmodells verdeutlicht. Daraus wird ersichtlich, dass sich je nach Witterung und Vegetation der Niederschlag (Regen und Schnee) im Kronenraum in flüssiger oder fester Form zwischengespeichert werden kann (Interzeption), als durch den Kronenraum gefallener Regen oder Schnee in die Schneedecke eingeht oder über die Infiltration in den Boden gelangt. Die Evapotranspiration unterliegt der klimatisch bedingten Verfügbarkeit von Energie und Wasser am Standort, sie setzt sich zusammen aus der Interzeptions-, der Schneeverdunstung, der Verdunstung von der Bodenoberfläche und der durch die Vegetation gesteuerten Transpiration, also dem Wasserentzug aus dem Bodenspeicher über die Wurzeln.

Grundlegendes Problem bei der Modellierung von Bodenwasserhaushaltsmodellen ist einerseits die Unschärfe, die durch die Vereinfachung komplexer System entsteht und andererseits benötigen sie eine Vielzahl an Parametern, für die es in den meisten Fällen keine Mess- bzw. Schätzwerte gibt (HAMMEL und KENNEL, 2001). Daher wurde über die Modifikation nach HAMMEL und KENNEL (2001) eine benutzerfreundliche Programmoberfläche erstellt und mit einer dazu gehörigen Datenbank verknüpft, welche dem Benutzer erlaubt, die nicht verfügbaren Parameter über Teilmodelle oder aus anderen bekannten Parametern zu schätzen.

Im Anschluss werden die Modellansätze für die in der Untersuchung wichtigen Module von Brook90 für die Verdunstung und die Wasserbewegung im Boden beschrieben, sowie die von HAMMEL und KENNEL (2001) vorgenommenen Modifikationen für das Modell. Eine detailliertere Beschreibung des Modells kann der interessierte Leser der Programmdokumentation nach FEDERER (2002) und für die Modifikationen aus HAMMEL und KENNEL (2001) entnehmen.

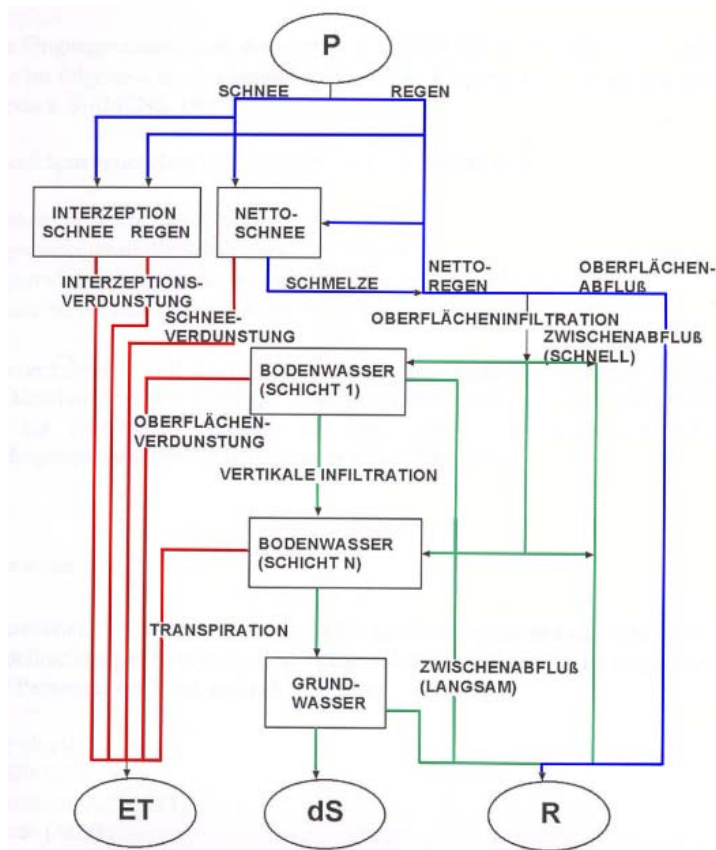


Abbildung 8: Flussdiagramm von Brook90, die Linien zeigen die Zustandsform des Wassers, (blau) oberirdisch gasförmige, (grün) unterirdisch flüssig und oberirdisch flüssig. ET steht für Evapotranspiration, P für Niederschlag, dS Grundwasserspeicher und R für den Abfluss (verändert, aus SEEGER, 1998).

3.4.2 Ansätze der Teilmodule

3.4.2.1 Verdunstung

Die Verdunstung eines Pflanzenbestandes setzt sich aus den drei Komponenten Evaporation, Transpiration und Interzeption zusammen. Die Evaporation beschreibt dabei die Verdunstung von unbelebten und die Interzeption die Verdunstung des Niederschlags von lebenden Oberflächen, wobei beide auf physikalischen Prozessen basieren. Unter Transpiration versteht man die Verdunstung von Wasser aus Pflanzen die durch biologische Prozesse gesteuert wird. Im folgenden Abschnitt wird zuerst auf die Strahlung eingegangen, welche für alle Verdunstungskomponenten von entscheidender Bedeutung ist.

3.4.2.1.1 Strahlung

Die Verdunstung verbindet den Energie- und Wasserhaushalt miteinander. Die Energie, die dabei aufgewendet werden muss um Wasser zu verdampfen, wird über die Strahlungsverhältnisse geliefert. Die an den Klimastationen gemessene Globalstrahlung

bezieht sich auf eine horizontale Ebene ohne Berücksichtigung der Hangneigung, Exposition und der Sonnendeklination und benötigt daher einer Korrektur der Globalstrahlungsmesswerte für geneigte Flächen, die auf dem Ansatz nach SWIFT (1996) beruht. Stark vereinfacht kann diese nach Gl.3.5 dargestellt werden.

$$R_{G_{\text{kor}}\text{r}} = \frac{\frac{I_{ps}}{I_{ph}} * R_{Gh} * dl}{cf} \quad (\text{Gl.3.5})$$

$R_{G_{\text{kor}}\text{r}}$:	potentielle solare Einstrahlung auf eine geneigte Ebene	[W m ⁻²]
I_{ps} :	potentiell mögliche Einstrahlung auf eine geneigte Ebene	[MJ m ⁻²]
I_{ph} :	potentiell mögliche Einstrahlung auf eine horizontale Ebene	[MJ m ⁻²]
R_{Gh} :	potentielle solare Einstrahlung auf eine horizontale Ebene	[W m ⁻²]
dl :	Anteil Zeit zwischen Sonnenaufgang und –untergang an Tageslänge	[d ⁻¹]
cf	Umrechnungsfaktor von [MJ m ⁻² d ⁻¹] in [W m ⁻²] und beträgt 0.0864 [MJ m ⁻² d (W m ⁻²)]	

Die Strahlungsbilanz R_N (Gl.3.6) ergibt sich aus der kurzwelligen solaren Strahlung R_K und der langwelligen terrestrischen Strahlung R_L .

$$R_N = R_K + R_L \quad (\text{Gl.3.6})$$

Die Berechnung der täglichen Verdunstung erfolgt in Brook90 für die Tages- und Nachtverdunstung, daher muss auch die Nettostrahlungsbilanz für den Tag und die Nacht betrachtet werden. Die Tagesbilanz setzt sich aus der Summe der kurz- und langwelligen Strahlung und in der Nacht nur aus der langwelligen Strahlung zusammen. Die kurz- und langwellige Strahlungsbilanz R_k bzw. R_L ergeben sich aus folgenden Gleichungen:

$$R_K = (1 - ALB) * R_{G_{\text{kor}}\text{r}} \quad (\text{Gl.3.7})$$

$$R_L = f * \sigma * (\varepsilon - 1) * (T_m + 237.2)^4 \quad (\text{Gl.3.8})$$

ALB	Albedo bzw. Schneeralbedo $ALBSN$	[-]
f	Korrektur für die Bewölkung	[-]
σ	Stefan-Boltzmann Konstante $5.67 * 10^{-8}$	[W m ⁻² K ⁻⁴]
ε	Emissivität der Atmosphäre	[-]

Die verfügbare Energie über dem Kronenraum ($R_{ÜKR}$) erhält man über Gl.3.9 und die Energie unterhalb des Kronenraums ergibt sich nach dem LAMBERT-BEER'schen Extinktionsgesetz aus Gl.3.10. Der Bodenwärmestrom wird in Brook90 vernachlässigt (FEDERER, 2002).

$$R_{\dot{U}KR} = R_N - G \quad (\text{Gl.3.9})$$

$R_{\dot{U}KR}$:	verfügbare Energie über dem Kronenraum	$[\text{W m}^{-2}]$
G :	Bodenwärmestrom	$[\text{W m}^{-2}]$

$$R_{UKR} = R_N \cdot e^{-k_l \cdot (LAI + SAI)} - G \quad (\text{Gl.3.10})$$

R_{UKR} :	verfügbare Energie unter dem Kronenraum	$[\text{W m}^{-2}]$
k_l :	Extinktionskoeffizient	$[-]$
LAI :	Blattflächenindex	$[\text{m}^2 \text{m}^{-2}]$
SAI :	Stammflächenindex	$[\text{m}^2 \text{m}^{-2}]$

3.4.2.1.2 Potenzielle Evapotranspiration

Die potenzielle Verdunstung wird in Brook90 von einem einschichtigen homogenen Pflanzenbestand (Transpiration) und vom Boden (Evaporation) aus betrachtet. Die Berechnung erfolgt über den Ansatz nach SHUTTLEWORTH-WALLACE (1985), welcher auf einer Modifikation der Ansätze nach PENMAN (1948) für brachen Boden und der PENMAN-MONTEITH (THOM, 1975) für einen dichten Bestand basiert. Dieser Ansatz ermöglicht es die Wärme- und Dampfströme getrennt für die Kronen- und Bodenoberfläche anzuwenden. Diese separate Betrachtung wurde nötig, da der turbulente Transferkoeffizient für den Austausch von Dampf und Wärme der verdunstenden Oberfläche zur Atmosphäre hin reguliert und dieser hauptsächlich durch die Windgeschwindigkeit gesteuert wird. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich das Profil der Windgeschwindigkeit im Bestand selbst exponentiell und über dem Bestand logarithmisch verhält (HAMMEL und KENNEL, 2001).

Potenzielle Evaporation

Im Gegensatz zum PENMAN-MONTEITH-Ansatz, definiert SHUTTLEWORTH-WALLACE für die Berechnung der potenziellen Evaporation, der potenziellen Transpiration und potenziellen Interzeption fünf Widerstände, r_{cs} , r_{ac} , r_{ss} , r_{as} und r_{aa} (Abbildung 9). Der Stomatawiderstand r_{cs} und der aerodynamische Widerstand r_{ac} zwischen Blattoberfläche und der Standardmesshöhe für Temperatur, Dampfdruck und Sättigungsdefizit gehen in die Berechnung der Transpiration ein. Der Widerstand der obersten Bodenoberfläche r_{ss} und der aerodynamische Widerstand der Bodenschicht gegen den Wasserdampftransport von der Bodenoberfläche bis zur effektiven Quellhöhe r_{as} wird für die Bodenevaporation benötigt. Der aerodynamische Widerstand r_{aa} wird für

beide Berechnungen verwendet. Die aerodynamischen Widerstände sind dabei abhängig vom saisonalen Verlauf des Blattflächenindex LAI und dem Stammflächenindex SAI.

- r_{cs} : Stomatawiderstand gegenüber der Transpiration und ist abhängig von der maximalen (GLMAX) und minimalen Blattleitfähigkeit (GLMIN), der Lufttemperatur, dem Dampfdruckdefizit, bei der die Leitfähigkeit halbiert ist (CVPD), der Einstrahlung im Bestand und dem maximalen Blattflächenindex (LAI_{max})
- r_{ac} : aerodynamischer Widerstand zwischen der Blattoberfläche und der Messhöhe für die Messung der Lufttemperatur T , Dampfdruck e und des Sättigungsdefizits D .
- r_{ss} : Widerstand der Bodenschicht gegen Wasserdampftransport von der Hälfte der obersten Bodenoberschicht bis zur Bodenoberfläche, die Reduktion erfolgt über das ψ_m .
- r_{as} : aerodynamischer Widerstand der Bodenschicht gegen den Wasserdampftransport von der Bodenoberfläche bis zur effektiven Quellhöhe.
- r_{aa} : aerodynamischer Widerstand zwischen effektiver Quellhöhe und Referenzhöhe oberhalb des Bestandes

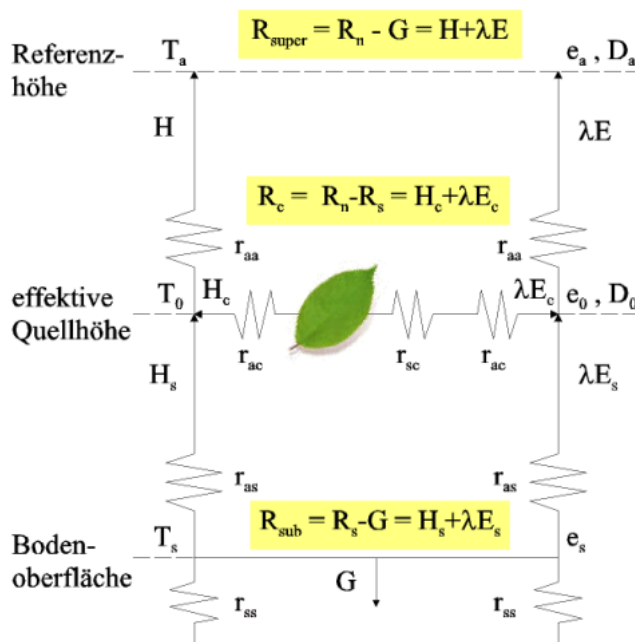


Abbildung 9: Schematische Darstellung des SHUTTLEWORTH-WALACE-Modells, mit den verschiedenen Widerständen des Bodens, der Bodenoberfläche und für die Vegetation in der effektiven Quellhöhe und der Referenzhöhe (verändert nach LAFLEUR & ROUSE 1990, aus SEEGERT, 1998).

Die Berechnung der Gesamtevapotranspiration erfolgt in Brook90 über folgende Gleichung:

$$L_V \rho_W E = L_V \rho_W E_C + L_V \rho_W E_S \quad (\text{Gl.3.11})$$

L_V :	Latente Verdampfungsenergie	[J kg ⁻¹]
ρ_W :	Wasserdichte	[kg m ⁻³]
E :	Evaporation	[mm m ⁻²]
E_C :	Transpiration	[mm m ⁻²]
E_S :	Bodenverdunstung	[mm m ⁻²]

Die getrennte Berechnung der Bodenverdunstung und der Transpiration wird nach Gleichung 3.12 und 3.13 ermittelt.

$$L_V \rho_W E_C = \frac{\Delta(A - A_s) + \frac{c_p \cdot \rho \cdot D_0}{r_{ca}}}{\Delta + \gamma + \gamma \cdot \left(\frac{r_{cs}}{r_{ca}} \right)} \quad (\text{Gl.3.12})$$

Δ :	Änderung des Dampfdrucks mit der Temperatur	[kPa K ⁻¹]
A :	Verfügbare Energie über der Krone	[W m ⁻²]
A_s :	Verfügbare Energie am Boden	[W m ⁻²]
c_p :	spezifische Wärme der Luft	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
D_0 :	Sättigungsdefizit im Bestand	[kPa]
γ :	Psychrometerkonstante 0.067	[kPa K ⁻¹]
ρ :	Dichte der Luft, 1.234	[kg m ⁻³]

$$L_V \rho_W E_S = \frac{\Delta(A - A_s) + \frac{c_p \cdot \rho \cdot D_0}{r_{as}}}{\Delta + \gamma + \gamma \cdot \left(\frac{r_{ss}}{r_{as}} \right)} \quad (\text{Gl.3.13})$$

Das Sättigungsdefizit im Bestand (effektiven Quelhöhe) D_0 stellt die Verbindung zwischen der Bodenevaporation und der Transpiration im Bestand dar.

$$D_0 = D_a + \frac{r_{aa} [\Delta(R_n - R_s) - (\Delta - \gamma) L_V \rho_W E]}{c_p \rho} \quad (\text{Gl.3.14})$$

D_a :	Sättigungsdefizit in der Referenzhöhe	[kPa]
---------	---------------------------------------	-------

Die Berechnung der drei aerodynamischen Widerstände r_{aa} , r_{as} und r_{ac} erfolgt nach einer von SHUTTLEWORTH und GURNEY (1990) entwickelten Methoden und geht davon aus, dass sich im Bestand das Windprofil über ein exponentielles und darüber durch ein logarithmisches Windprofil beschrieben werden kann. Der aerodynamische Widerstand r_{as} (Gl.3.19) gilt von der Bodenoberfläche bis zur effektiven Quelhöhe. Von dort aus bis

zur Referenzhöhe in der Atmosphäre gilt dann der aerodynamische Widerstand r_{aa} (siehe Gl.3.18). Der Widerstand der Blattgrenzschicht r_{ac} ergibt sich aus Gleichung 3.20. Für die Berechnung der aerodynamischen Widerstände r_{aa} und r_{as} wird die Reibungsgeschwindigkeit benötigt. Basierend auf einem logarithmischen Windprofil kann sie folgender Maßen ermittelt werden.

$$u^* = \frac{k \cdot u}{\ln\left(\frac{z_a - d}{z_0}\right)} \quad (\text{Gl.3.15})$$

Ebenfalls wird die Eddy-Diffusivität in der Bestandeshöhe K_h (Gl.3.16) und die eingehende Windgeschwindigkeit an der Oberkante des Bestandes u_h (Gl.3.17) benötigt:

$$K_h = k \cdot u^* (h - d) \quad (\text{Gl.3.16})$$

$$u_h = \left(\frac{u^*}{k}\right) \ln\left[\frac{h - d}{z_0}\right] \quad (\text{Gl.3.17})$$

$$r_{aa} = \frac{\ln\left[\frac{z_a - d}{h - d}\right]}{k \cdot u^*} + \left(\frac{h}{n_{ed} \cdot K_h}\right) \left\{ -1 + \exp\left[\frac{n_{ed} \cdot (h - D_c)}{h}\right] \right\} \quad (\text{Gl.3.18})$$

$$r_{as} = \left[\frac{h \cdot \exp(n_{ed})}{n_{ed} \cdot K_h} \right] \left[\exp\left(\frac{-n_{ed} \cdot z_0}{h}\right) - \exp\left(\frac{-n_{ed} \cdot D_c}{h}\right) \right] \quad (\text{Gl.3.19})$$

$$r_{ac} = \frac{\left(\frac{n_{ed}}{a_b}\right) \left(\frac{w}{u_h}\right)^{\frac{1}{2}}}{\rho t_p \cdot LAI \left[1 - \exp\left(\frac{-n_{ed}}{2}\right) \right]} \quad (\text{Gl.3.20})$$

z_a :	Referenzhöhe	[m]
d :	Nullpunktverschiebung	[m]
h :	Bestandeshöhe	[m]
k :	KARMAN-Konstante 0.4	[-]
u^* :	Reibungsgeschwindigkeit	[m s ⁻¹]
n_{ed} :	Extinktionskoeffizient der Eddy-Diffusivität 2.5	[-]
K_h :	Eddy-Diffusivität in Bestandeshöhe	[mm d ⁻¹]
D_c :	Sättigungsdefizit $D_c = z_{0c} + d_c$, d_c Nullpunktverschiebung für einen geschlossenen Bestand der Bestandeshöhe h	[kPa]
z_0 :	Rauigkeitshöhe am Boden	[m]
a_b :	Konstante 0.01	[m s ^{-1/2}]
w :	Blattbreite	[m]
u_h :	Windgeschwindigkeit an der Bestandesoberkante	[m s ⁻¹]

ρ_p : Verhältnis projizierter zu Gesamtblattfläche [-]

Für den Widerstand r_{sc} der Bestandesoberfläche, welcher dem klassischen Bestandeswiderstand aus der PENMAN-MONTEITH Gleichung entspricht, kann der Ansatz nach JARVIS (1976) verwendet werden. Dieser enthält die Faktoren, welche den individuellen Blattwiderstand, dessen Reziprokwert und die Blattleitfähigkeit g_l kontrollieren. Die Öffnung und Schließung der Stomata steht dabei in Verbindung mit mehreren externen und internen Variablen (Gl.3.21).

$$g_l = GLMIN + f_T \cdot f_D \cdot f_R \cdot f_W \cdot f_C \cdot (GLMAX - GLMIN) \quad (Gl.3.21)$$

g_l : Blattleitfähigkeit [m s⁻¹]
 GLMIN: Minimale Blattleitfähigkeit (Stomata geschlossen) [m s⁻¹]
 GLMAX: Maximale Blattleitfähigkeit [m s⁻¹]
 f : Reduktionsfaktoren die Einfluss auf die Blattleitfähigkeit ausüben und zwischen 0 und 1 variieren können. Temperatur (T), Dampfdruckdefizit (D), Strahlung (R), Blattwasserstress (W, Brook90 $f_W=1$) und die CO₂ Konzentration (C, Brook90 $f_C=1$)

Da die Reduktion der Blattleitfähigkeit durch Blattwasserstress als Konstant bei 1 angenommen wird, ist es nicht möglich die aktuelle Transpiration daraus zu berechnen. Vielmehr wird die aktuelle Transpiration in Brook90 über eine Reduktion der potentiellen Verdunstung in Abhängigkeit von der Wasserversorgung hergeleitet. Für die Änderung der Reduktionsfaktoren Temperatur, Dampfdruckdefizit und der Strahlung werden empirische Funktionen nach JARVIS (1976) für f_T , LOHAMMER et al. (1980) für f_D und für die Strahlung f_R nach STEWART (1988) verwendet.

Die Bestandesleitfähigkeit g_{sc} , welche dem Reziprokwert des Bestandeswiderstandes r_{sc} entspricht, ist das Integral der Blattleitfähigkeit g_l über jeden Zuwachs der gesamten Blattfläche im Bestand dL :

$$\frac{1}{r_{sc}} = g_{sc} = LAI \cdot GLMIN + f_T \cdot f_D (GLMAX - GLMIN) \int_0^{LAI} f_R dL \quad (Gl.3.22)$$

g_{sc} Bestandesleitfähigkeit [m s⁻¹]

Für die Reduktion der zu berechnenden Evaporation, bei austrocknendem Boden, wird in Brook90 ein Bodenwiderstand r_{ss} verwendet. Dabei wird angenommen, dass das Wasser an einer Grenzschicht im Boden in die Gasphase übergeht und zur Bodenoberfläche hin diffundiert. In Brook90 entspricht der Diffusionsweg konstant der halben Höhe der obersten Bodenschicht. Mit zunehmender Austrocknung sollte eigentlich diese

Grenzschicht mit der Tiefe verlagert werden und r_{ss} mit dem Diffusionsweg ansteigen. Dies ist in Brook90 nicht möglich, da der Wassertransport nach der obersten Schicht über die die Richards-Gleichung beschrieben wird. Die Reduktion von r_{ss} erfolgt über das Produkt des Bodenwiderstands bei Feldkapazität und dem Verhältnis von aktuellem ψ zum ψ_m bei Feldkapazität (Gl.3.23).

$$r_{ss} = r_{ssa} \cdot \left(\frac{\psi_{akt}}{\psi_{FK}} \right)^{r_{ssb}} \quad (Gl.3.23)$$

r_{ssa} :	Bodenwiderstand bei Feldkapazität	[s m ⁻¹]
ψ_{akt} :	aktuelles Matrixpotential	[kPa]
ψ_{FK} :	Matrixpotential bei Feldkapazität	[kPa]
r_{ssb} :	Exponent konstant 1, Beziehung zwischen r_{ssa} und ψ	[-]

Wenn die oberste Schicht relativ dünn ist, kann sie schnell austrocknen und somit wird für die Evaporation dann der Bodenwassertransport zur obersten Schicht hin limitiert (HAMMEL und KENNEL, 2001). Darüber hinaus wird in Brook90 angenommen, dass der gespeicherte Regen den Bodenwiderstand r_{ss} nicht beeinflusst, was bedeutet, dass während und nach Niederschlagsereignissen die Bodenoberfläche als ungesättigt angesehen wird. HAMMEL und KENNEL (2001) weisen darauf hin, dass dieser Teil strenggenommen nicht mehr zur potenziellen Evaporation zählt, da er durch die Bodeneigenschaften und nicht durch das Klima bestimmt wird und die Reduktion der Evaporation alternativ auch über eine atmosphärische Randbedingung erreicht werden könnte.

3.4.2.1.3 Potenzielle Transpiration

Die Berechnung der aktuellen Verdunstung beruht in Brook90 auf einer Reduktion der potentiellen Verdunstung in Abhängigkeit von der Wasserversorgung. Für die Berechnung der Transpiration muss zunächst einmal die Pflanze das Wasser aus dem Boden über ihre Wurzeln aufnehmen und innerhalb der Pflanze weiterleiten. Der Transport beinhaltet nicht nur Wasser, sondern gewährleistet auch den Transport der benötigten Pflanzennährstoffe, die essentiell für den Wachstumsprozess der Vegetation sind. Das Wasser kann anschließend über die Blattoffnungen wieder verdunstet werden (Transpiration). Damit ist der Prozess der Aufnahme von Bodenwasser durch Pflanzenwurzeln wichtig, um beurteilen zu können wie gut ein Standort mit Wasser versorgt ist und inwiefern sich dies auf sein Wachstum auswirkt. Jede Baumart ist dabei unterschiedlich effektiv bei der Nutzung der Bodenwasservorräte. Der Wasserfluss zu

den transpirierenden Blättern wird über die Widerstände und Potentiale (Abbildung 10) gesteuert. Brook90 berücksichtigt dabei die Widerstände der Rhizosphäre r_s , der Wurzeln r_r , dem Xylem r_x , die Potentiale des Bodenwassers ψ_t , des Xylems an der Bodenoberfläche ψ_{xyl} und des Blattes ψ_l .

Der Gesamtpflanzenwiderstand kann unter Annahme eines konstanten Bodenwasserpotenzials der Bodenschichten, des Durchwurzeltenraums und der Vernachlässigung von r_x nach folgender Gleichung definiert werden.

$$r_p = \frac{\psi_t - \psi_l - \rho_w g d}{T} \quad (\text{Gl.3.24})$$

ψ_t	gewichtetes mittleres Bodenwasserpotenzial	[MPa]
ψ_l	Blattwasserpotenzial	[MPa]
$\rho_w g d$	Gravitationspotenzialdifferenz, wobei d für die Nullpunktverschiebung steht	[MPa]
T	Verdunstungsrate	[mm d ⁻¹]

Im Modell wird der Gesamtpflanzenwiderstand r_p [MPa d mm⁻¹] über die maximale Pflanzenleitfähigkeit M_{XKPL} [mm d⁻¹ MPa⁻¹], die relative Bestandeshöhe R_{ELHT} und der Bestandesdichte D_{ENSEF} ermittelt.

$$r_p = \frac{1}{M_{XKPL} \cdot R_{ELHT} \cdot D_{ENSEF}} \quad (\text{Gl.3.25})$$

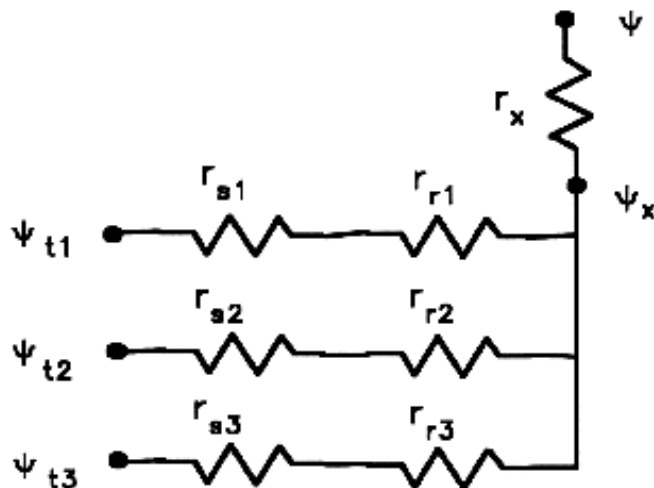


Abbildung 10: Widerstände und Potentiale im flüssigen Transport der Transpiration, exemplarisch für 3 durchwurzelte Bodenschichten i , r_{xi} : Xylemwiderstand, r_{ri} : Wurzelwiderstand, r_{si} : Rhizosphärenwiderstand, ψ_{ti} : Bodenwasserpotential, ψ_{xyl} : Xylempotenzial Bodenoberfläche, ψ_l : Blattpotential (aus FEDERER, 2002)

Der Xylemwiderstand r_x kann dann über die Reduktion über den Pflanzenwiderstand im Xylem f_x und dem r_p berechnet werden. Der Gesamtwurzelwiderstand r_r [MPa d mm⁻¹]

setzt sich aus den einzelnen Schichtwiderständen r_{ri} zusammen und der Wurzelwiderstand jeder Schicht ist dabei umgekehrt proportional zum Anteil der Gesamtwurzellänge dieser Schicht f_i :

$$r_{ri} = \frac{(r_p - r_x)}{f_i} \quad (\text{Gl.3.26})$$

Der Wasserfluss im Boden zu den einzelnen Wurzeln wird in Brook90 mit dem Single Root Modell (COWAN, 1965; HILLEL, 1998) beschrieben, welches davon ausgeht, dass die Wurzeln im Wurzelraum gleich verteilt sind. Dieser in der Realität 3-dimensionale Prozess muss für Brook90 in einer simpleren 1-dimensionalen Weise wiedergegeben werden. HAMMEL und KENNEL (2001) beschreiben dies folgendermaßen: “für eine bestimmte Wurzellängendichte (Länge der Wurzeln pro Volumen Boden) ergibt sich damit der Radius des Einzugsgebietes einer einzelnen Wurzel und über eine weitere Annahme eines konstanten Wasserflusses zur Wurzel hin kann man die mikroskopische Verteilung der Matrixpotenziale um die Wurzel berechnen“. Über die Verteilung der Wurzellängendichte und die hydraulische Leitfähigkeit der Rhizosphäre K_i kann der Rhizosphärenwiderstand r_{si} [MPa d mm⁻¹] folgendermaßen berechnet werden:

$$r_{si} = \frac{\alpha_i}{K_i} \quad (\text{Gl.3.27})$$

Dabei ist α_i [MPa] ein modifizierter Faktor und von der Schichtdicke, dem Skelettanteil, Gesamtlänge und dem Radius der Feinwurzel abhängig. Aus der Gl.3.27 wird ersichtlich, dass der Rhizosphärenwiderstand mit abnehmender hydraulischer Leitfähigkeit (geringen Fluss) und abnehmender Wurzellängendichte (längere Transportweg) anwächst. Die maximale Wassernachlieferungsrate aus dem Boden wird über den Tag als konstant angenommen und kann aus Gl.3.28 ermittelt werden.

$$S_{Ver} = \frac{(\psi_t - \psi_c - \rho_w g d)}{(r_t + r_x)} \quad (\text{Gl.3.28})$$

ψ_t	gewichtetes mittleres Bodenwasserpotenzial	[MPa]
ψ_c	minimales Blattwasserpotenzial (kritischer Wert)	[MPa]
r_t :	Gesamter Widerstand gegen die Wasseraufnahme aller Schichten	[s m ⁻¹]

In Brook90 wird anschließend S_{Ver} [mm] mit der potentiellen Transpirationsrate E_c (siehe Gl.3.11) verglichen und definiert anschließend die aktuelle Transpiration T aus

dem kleineren Wert der beiden. Im nächsten Schritt erfolgt die Verteilung der aktuellen Transpiration auf die einzelnen Bodenschichten. Das minimale Blattpotenzial legt dabei das minimale Bodenwasserpotenzial fest und entscheidet, bis zu welchem Punkt es der Vegetation möglich ist, Wasser aus dem Boden aufzunehmen. Die Verteilung der Transpiration aus den einzelnen Bodenschichten T_i [mm d⁻¹] wird über folgende Gleichung vollbracht:

$$T_i = \frac{(\psi_{ti} - \psi_t - r_t - T)}{r_i} \quad (\text{Gl.3.29})$$

r_i : Widerstand der Pflanze gegen die Wasseraufnahme jeder Schicht i [s m⁻¹]
 ψ_{ti} : Saugspannung in der Bodenschicht i [MPa]

Es wird deutlich, dass die Wasserentnahme für die Transpiration hauptsächlich durch den Widerstand aus den einzelnen Schichten r_i und dem unterirdischen Gesamtwiderstand r_t bestimmt wird. Der gesamte durchwurzelte Boden wird also bei der Transpiration berücksichtigt und so kann es auch vorkommen, dass einzelne Bereiche kein pflanzenverfügbares Wasser mehr enthalten. In diesem Fall greift Brook90 für die Berechnung der Transpiration nur noch auf Bodenschichten zurück, welche pflanzenverfügbares Wasser aufweisen. Brook90 ermöglicht es in diesem Fall, den Transport von Wasser aus feuchteren in trockenere Layer über die Wurzel zu simulieren. Dieser Wurzelausfluss, welcher in der Literatur auch als „*hydraulic lift*“ (LI et al., 2001) bezeichnet wird kann über den Parameter NOOUTF unterbunden werden. WARREN et al. (2011) weist darauf hin, dass die über Nacht zunehmende ψ_m und θ im Oberboden teilweise durch Wurzelausfluss erwirkt wird und somit unabhängig vom ungesättigten flüssigen und gasförmigen Wassertransport zu einer Verteilung des Wassers im durchwurzelten Bereich führt.

3.4.2.1.4 Interzeption

Die Interzeption kann je nach Bestandestyp oder Baumart eine beträchtliche Menge des Niederschlags auf den Blättern, Ästen und dem Stamm zwischenspeichern und von dort aus verdunsten. Ohne überhaupt den Boden erreicht zu haben, verringert dies den θ im Boden, die Tiefenversickerung und den Transpirationsbedarf der Vegetation. Die Interzeption wird über eine vereinfachte Version des Modells nach RUTTER et al. (1972) berechnet und umfasst dabei das Konzept der Auffangrate C , der Verdunstungsrate I und des Speichervermögens S . Der Massenerhaltungssatz lautet sowohl für flüssigen und festen Niederschlags folgendermaßen:

$$\frac{dS_{\text{int}}}{dt} = C - I \quad (\text{Gl.3.30})$$

S_{int} :	Interzeptionsspeicher	[mm]
C :	Nettoauffangrate	[mm]
I :	Verdunstungsrate	[mm]

Brook90 nimmt für die Berechnung der Nettoauffangrate an, dass er sich bis zum Erreichen der Speicherkapazität, durch einen konstanten Anteil des Niederschlags zusammensetzt und linear vom Blattflächen- (LAI) und Stammflächenindex (SAI) abhängig.

$$C = (I_{LAI} \cdot LAI + I_{SAI} \cdot SAI)P_{\text{rate}} \quad (\text{Gl.3.31})$$

I_{LAI} :	Interzeptionsfraktion pro Einheit LAI	[-]
I_{SAI} :	Interzeptionsfraktion pro Einheit SAI	[-]
P_{rate} :	Auffangrate des Niederschlags	[mm d ⁻¹]

Das maximale Interzeptionsspeichervermögen S_{max} [mm] im Bestand wird über Gl.3.32 berechnet und ist ebenfalls linear abhängig vom LAI und SAI.

$$S_{\text{max}} = S_{LAI} \cdot LAI + S_{SAI} \cdot SAI \quad (\text{Gl.3.32})$$

S_{LAI} :	Speicherkapazität pro Einheit LAI	[mm]
S_{SAI} :	Speicherkapazität pro Einheit SAI	[mm]

Die Entnahme von Wasser aus dem Interzeptionsspeicher wird über die Interzeptionsevaporation (nach SHUTTLEWORTH-WALLACE-Ansatz) geleistet und entspricht dabei der potenziellen Transpiration des Bestandes, wobei der Bestandeswiderstand r_{sc} gleich Null und der aktuelle Bodenwiderstand r_{ss} dem Bodenwiderstand bei Feldkapazität r_{ssa} gesetzt wird. HAMMEL und KENNEL (2001) weisen daraufhin, dass der Parameter (DURATN), welcher die mittlere Dauer eines Niederschlagsereignisses in Stunden definiert, einen starken Einfluss auf die Interzeption hat. Dieser Parameter wird benötigt, da in den meisten Fällen nur Tagesniederschlagssummen für die Modellierung vorliegen. So ergeben sich je nach Festlegung von DURATN gravierende Unterschiede für die Interzeption. HAMMEL und KENNEL (2001) gehen in ihrer Studie beispielhaft von einer Interzeptionsevaporation von 5 [mm d⁻¹], einem Interzeptionsspeicher von 1 [mm], einem aufgefangenen Anteil von 0.5 der Niederschlagsrate und einem Tagesniederschlag von 10 mm aus. Fällt nun der Tagesniederschlag (10 mm) innerhalb einer halben Stunde, so können 8.8 mm in den Boden infiltrieren und ca.1.2 mm sind Interzeptionsverlust. Bei einer eher gleichmäßigen

Verteilung des Tagesniederschlags können etwa 5mm infiltrieren und der Rest geht über die Interzeption verloren.

3.4.2.2 Abflussbildung und Bodenwassertransport der ungesättigten Zone

Die komplexen Abflussbildungsprozesse in bewaldeten Gebieten können in Brook90 nur eingeschränkt wiedergegeben werden. Wie aus der Abbildung 8 (Flussdiagramm) hervorgeht, verfügt Brook90 über die Möglichkeiten neben dem klassischen vertikalen Fluss über die Bodenmatrix (VRFL) folgende Hauptfließwege mit in das Modell zu integrieren (FEDERER, 2002):

1. Oberflächenabfluss aus Sättigungsquellflächen (SRFL) des neuen Wassers.
2. Makroporenfluss (INFL), bei dem es zu einem schnelleren Wasserfluss in tiefere Bodenschichten über vertikale Wurzelröhren, Regenwurmgänge oder Schrumpfrisse kommt.
3. hangabwärtsgerichteter schneller hypodermischer Abfluss (BYFL) des neuen Wassers über Röhren.
4. hangabwärtsgerichteter verzögerter hypodermischer Abfluss (DSFL) des alten Wassers über die Bodenmatrix.
5. vertikaler Matrixfluss des alten Wasser in das Grundwasser durch Grundwasserbewegungen, welche über den Basisabfluss (GWFL) und die Tiefenversickerung (SEEP) entstehen.

Der Boden wirkt als Speicher, Regler und Verteiler des ankommenden Niederschlags. Das Wasser kann anschließend in den Boden infiltrieren und unterliegt dabei Gesetzmäßigkeiten, die hauptsächlich durch die Eigenschaft und Struktur des Bodens bestimmt wird (BAUMGARTNER und LIEBSCHER, 1990). Für die quantitative Beschreibung der Sickertrate wird die Darcy-Buckingham-Gleichung verwendet:

$$Q = -K(\theta) \cdot \left(\frac{\partial \psi_m}{\partial z} + 1 \right) \quad (\text{Gl.3.33})$$

Q:	Wassermenge, die einen Fließquerschnitt je Zeit durchströmt	[m ³ s ⁻¹]
K(θ):	Wasserleitfähigkeit	[mm d ⁻¹]
ψ _m :	hydraulisches Potential	[hPa]
z:	vertikale Fließstrecke	[m]

Diese Gesetzmäßigkeit ist strenggenommen nur für stationäre und gesättigte Verhältnisse anwendbar. Daher wird über die Kombination der Darcy-Buckingham-Gleichung und der Kontinuitätsgleichung, welche die Instationarität, die Ungleichförmigkeit der Fließprozesse sowie Quellen und Senken berücksichtigt, die Richards-Gleichung aufgestellt. Dabei hängt die hydraulische Leitfähigkeit K vom ψ_m ab und nicht mehr vom volumetrischen θ .

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial z} \quad (\text{Gl.3.34})$$

Über die numerische Lösung der 1-dimensionalen (nur z) Richards-Gleichung (MAIDMENT, 1993) wird in Brook90 der Wassertransport für die ungesättigten Zone vollbracht.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left[K \left(\frac{\partial \psi_m}{\partial z} + 1 \right) \right] + r_w = 0 \quad (\text{Gl.3.35})$$

In der Gl.3.35 bezeichnet θ den volumetrischen θ , t die Zeit, r_w die Quellen und Senken (Wurzelwasseraufnahme). Die funktionale Beziehung zwischen θ , ψ_m und der hydraulischen Leitfähigkeit wird in der Brook90 original Version über einen modifizierten CLAPP-HORNBERGER Ansatz hergestellt (FEDERER, 2002).

Über die Einstellung der Abflussparameter in Brook90 können die verschiedenen Hauptfließwege in die Modellierung mit einbezogen werden. Mit der Einstellung des dimensionslosen Infiltrationsexponent (INFEXP) wird die Verteilung der Infiltration über die Tiefe geregelt. Für INFEXP gleich Null (alle anderen Abflussparameter ebenfalls Null, außer QFPAR = 1) kann die Infiltration als klassische „wetting front“ (Feuchtefront) in homogenen Bodenschichten simuliert werden. Diese Einstellung bewirkt eine scharfe Feuchtefront, welche unter natürlichen Bedingungen für Waldböden nicht repräsentativ ist, da durch Makroporen ein schnellerer Wassertransport in tiefere Horizonte bewirkt wird (FEDERER, 2002). Mit der Einstellung INFEXP >0 und <1 kommt es zu einer gleichmäßigen Verteilung des infiltrierenden Wassers über die Tiefe. Für INFEXP >1 werden tiefere Schichten stärker befeuchtet. Über den Parameter ILAYER wird in Brook90 festgelegt bis zu welcher Tiefe im Boden Makroporen vorhanden sind. Zusätzlich dazu entscheidet der Abflussparameter BYPAR darüber was mit dem ankommenden Wasser aus Niederschlagsereignissen passiert. Dieser Abflussparameter kann entweder das Wasser über den „bypass flow“ (BYPAR=1) als

vertikale Wasserbewegung im Boden über Röhren/Gänge/Makroporen oder über einen Oberflächensättigungsabfluss (BYPAR=0) simulieren.

Des Weiteren berücksichtigt Brook90 für die Simulation der Bodenwasserbewegung in der gesättigten und ungesättigten Zone die Hanglänge vom Kamm zum Vorfluter (LENGTH), die Hangneigung (DSLOPE), die hydraulische Leitfähigkeit, die Vorfeuchte und den Skelettgehalt je Tiefenstufe im Boden.

3.4.2.3 Modifikation LWF-Brook90

Für die Untersuchungen des Bodenwasserhaushaltes auf bewaldeten Standorten in Bayern hat HAMMEL und KENNEL (2001) einige hilfreiche Modifikationen an Brook90 vorgenommen. Sie haben einerseits für die Parametrisierung der hydraulischen Funktionen neue Schätzverfahren für die hydraulischen Parameter integriert und andererseits Verfahren implementiert, die es ermöglichen, die zeitliche Dynamik wichtiger Vegetationskenngrößen wie Durchwurzelung, Blattflächenindex und Bestandeshöhe in die Modellierung mit einzubinden. In den folgenden Abschnitten werden die für die Untersuchung wichtigen Modifikationen vorgestellt und beziehen sich auf HAMMEL und KENNEL (2001).

a) Parametrisierung der hydraulischen Funktionen

Für alle Simulationen der Wasserbewegungen mit der Richards-Gleichung wird ein funktionaler Zusammenhang zwischen θ und ψ_m (pF-Kurve) sowie der hydraulischen Leitfähigkeit und θ oder ψ_m benötigt (HAMMEL und KENNEL, 2001). Die Parametrisierung der hydraulischen Funktionen werden in LWF-Brook90 über das weit verbreitete Modell nach Mualem-van Genuchten (VAN GENUCHTEN, 1980) beschrieben:

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (\text{Gl.3.36})$$

$$\psi_m(\Theta) = -\frac{1}{\alpha} \left[\Theta^{\frac{n}{1-n}} - 1 \right]^{\frac{1}{n}} \quad (\text{Gl.3.37})$$

$$K(\Theta) = K_s \cdot \Theta^\tau \left[1 - \left(1 - \Theta^{\frac{n}{1-n}} \right)^{1-\frac{1}{n}} \right]^2 \quad (\text{Gl.3.38})$$

In Gl.3.36 ist θ_r der residuale Wassergehalt, θ_s der gesättigte Wassergehalt, Θ [-] der effektive Wassergehalt, K_s die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [mm d^{-1}], τ [-] der Tortuositäts- bzw. Poreninteraktionsfaktor, α [m^{-1}] (Lufteintrittspunkt) und n [-] sind Formfaktoren der hydraulischen Funktion. Die Parametrisierung weist einige Vorteile gegenüber anderen verwendeten Verfahren, wie z.B. dem nach BROOKS und COREY (1966) auf und kommt praktisch in allen gebräuchlichen Modellen, die auf der Richards-Gleichung beruhen, zum Einsatz. Bei den Schätzverfahren handelt es sich meist um Regressionsmodelle, die auch als Pedotransferfunktionen (PTF) bezeichnet werden. Über die PTF's kann man aus den meist standardmäßig erfassten Bodeneigenschaften, wie Feinbodenart, Skelettanteil, organischem Kohlenstoff und Trockenrohdichte die Parameter der hydraulischen Funktionen abschätzen.

b) Blattflächenindex

Der Blattflächenindex LAI ist im Bestand sehr variabel und wird aufgrund von aufwendigen Messverfahren oft nur über Literaturwerte abgeschätzt. Je nach Autor und Land/Region können diese Literaturwerte stark schwanken. FEDERER et al. (1996) schlägt für Nadelwälder einen LAI von 6, LARCHER (1994) einen LAI von 5 -12 und ELLENBERG (1996) einen LAI von 5-15 vor. Das Modell LWF-Brook90 macht sich dazu die allometrische Beziehungen zunutze und ist damit in der Lage, den LAI aus leicht verfügbaren Bestandesparametern abzuschätzen. Dafür wurden die Beziehung zwischen dem Brusthöhendurchmesser BHD und der Blattfläche S_l aus umfangreichen Untersuchungen nach BURGER (1929-1953, aus HAMMEL und KENNEL, 2001) modifiziert. Die Berechnung des LAI kann dann anhand von weiteren Daten (aus Ertragstafeln), wie Stammzahl pro Fläche n_s und einem Projektionsfaktor f_p , der für Nadelbaumarten = 0.4 und für Laubbamuarten=0.5 ist, nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$LAI = S_l \cdot (BHD) \cdot n_s \cdot f_p \quad (\text{Gl.3.39})$$

Der hier berechnete LAI entspricht dem maximalen LAI der Vegetationsperiode und wird bei der Bodenwasserhaushaltsmodellierung insbesondere für die Berechnung der Interzeption und der potenziellen Transpiration benötigt. Für die Berechnung der Bestandestranspiration muss aber auch der jahreszeitliche Verlauf bekannt sein. Dabei wird das Jahr in vier verschiedene Phasen unterteilt: Winterphase, Austriebsphase, Sommerphase und Blattabfallphase. Bei den Austriebs- und Blattfallphasen handelt es

sich um Übergangsstadien zwischen Winter- und Sommerphasen, die mit minimalem bzw. maximalem LAI beschrieben werden können. Wenn keine phänologischen Beobachtungen der Vegetation vorliegen, kann man die Vegetationsperioden auch mit sogenannten phänologischen Modellen abschätzen. Dazu muss man aber beachten, dass die Algorithmen für die Austriebsphase recht sicher in der Literatur belegt sind, jedoch für die Blattabfallphase nicht der Fall ist (HAMMEL und KENNEL, 2001). Der Beginn des Austriebs wird in LWF-Brook90 über den Ansatz von MENZEL und FABIAN (1999) beschrieben. Entscheidende Steuergrößen für das Modell sind die Anzahl an Kältetagen (Gl.3.40) und Wärmesummen (Gl.3.41):

$$CD_n = \sum_{i=0}^n \begin{cases} 1 & T(t_0 + i\Delta t) \leq T_0 \\ 0 & T(t_0 + i\Delta t) \geq T_0 \end{cases} \quad (\text{Gl.3.40})$$

$$TS_n = \sum_{i=0}^n \begin{cases} T(t_1 + i\Delta t) - T_1 & T(t_1 + i\Delta t) \geq T_1 \\ 0 & T(t_1 + i\Delta t) \leq T_1 \end{cases} \quad (\text{Gl.3.41})$$

CD_n :	Kältetage	
T	Tagesmitteltemperatur	[°C]
t_0 :	Zeit in Tagen seit dem 1. November	
Δt :	ein Tag	
T_0 :	Temperaturschwelle für Kältetage für Fichte= 9, Buche= 9 nach MENZEL & FABIAN (1999)	
TS_n :	Wärmesumme	
t_1 :	Zeit in Tagen seit dem 1. Februar	
T_1 :	Temperaturschwelle für Wärmetage für Fichte= 4, Buche= 6 nach MENZEL & FABIAN (1999)	

Der Austrieb erfolgt, wenn eine kritische Wärmesumme TS_{crit} erreicht wird.

$$TS_{crit} = a + b \ln(CD_n) \quad (\text{Gl.3.42})$$

a	Faktor, für Fichte= 1848, Buche= 1922 nach MENZEL und FABIAN (1999)
b	Faktor, für Fichte= -317, Buche= -348 nach MENZEL und FABIAN (1999)

Für das Erreichen des maximalen LAI, nach Beginn des Austriebs werden 4 Wochen angenommen und die Verläufe zwischen Austrieb und maximalem LAI sowie Blattabfall werden als linear angenommen. Für den Beginn der Laubfallphase wird in LWF-Brook90 ein Ansatz nach VON WILPERT (1990) verwendet. Entwickelt wurde dieser für die Zielgröße Xylemwachstum und endet spätestens am 5. Oktober oder wenn an 5 aufeinanderfolgenden Tagen die Temperatur, als gleitendes Mittel über 7 Tage, unter 10 °C liegt (HAMMEL und KENNEL, 2001).

Die Phase von der Laubverfärbung bis hin zum Laubabfall wurde auf 2 Monate festgelegt. HAMMEL und KENNEL (2001) weisen darauf hin, dass die Transpiration wahrscheinlich viel schneller zum Erliegen kommt, da die verfärbten Blätter nicht mehr aktiv die Transpiration beeinflussen und ein längerer Verbleib der verfärbten Blätter am Baum nur noch wirksam für die Berechnung der Interzeption ist. Der minimale relative LAI wird für Laubbäume als 0 und für Fichten als 0.8 des maximalen LAI angenommen. Die Bestandeshöhe kann entweder aus Messungen oder aus den forstlichen Ertragstafeln als Funktion des Alters bei gegebener Bonität entnommen werden. Wobei die neue Eingabenoberfläche von LWF-Brook90 es dem Modellierer erlaubt, auch den Wachstumsverlauf (Jung-, Adultphase) beliebig zu definieren (HAMMEL und KENNEL, 2001). Die Abschätzung der relativen Wurzelverteilung wird in dieser Untersuchung über den empirischen Ansatz nach HEINZE et al. (1997) realisiert. Sie kann über die Gl.3.43 berechnet werden und beinhaltet Parameter der nFK [%], der LK [%], die mittlere Tiefe der Schicht Z [cm] und einen baumartenspezifischen Wurzelkoeffizient $wurzelc$ [-].

$$R_{dens} = 0.0303 \cdot Z + 0.288 \cdot wurzelc + 0.0494 \cdot nFK + 0.0361 \cdot LK + 1.7 \quad (Gl.3.43)$$

Der Wurzelkoeffizient beträgt für die Fichte 2 und für die Baumarten Buche, Douglasie, Eiche und Tanne 3 (HEINZE et al., 1997).

3.5 Vorgehensweise Modellkalibrierung

3.5.1 Modelleinstellungen und Parametrisierung

Für die Modellkalibrierung des Fichtenstandorts wurde eine dreieinhalb jährige (01.01.1996 bis 31.05.1999) und für den Buchenstandort eine zweijährige Phase (01.01.2009 bis 31.12.2010) ausgewählt. Als Anfangsbedingung wurden die ψ_m für die betrachteten Bodenhorizonte als mäßig feucht (1.9 pF im Ober und 2.2 pF im Unterboden) festgelegt. Für beide Flächen wurde von einer einjährigen Aufwärmphase ausgegangen, so dass die Vegetationsparameter einmal die verschiedenen Phasen durchlaufen konnten. Damit wurde sichergestellt, dass die Initialbedingungen keinen Einfluss auf die Modellergebnisse aufweisen. Die obere Randbedingung ist eine Flussrandbedingung, die maßgeblich von den meteorologischen Größen abhängig ist. Der Wasserfluss, der diesen oberen Rand des Bodens passieren kann, ist der abwärtsgerichtete Wasserfluss über die Infiltration und der aufwärtsgerichtete Wasserfluss über die Bodenverdunstung (HAMMEL und KENNEL, 2001). Für die

untere Randbedingung wurde eine freie Drainage aus dem sandigen Boden angenommen. Damit wurde gewährleistet, dass die untere Randbedingung keinen Einfluss auf die θ der letzten modellierten Bodenschicht aufwies. Für die Evaluierung der Modelle wurde für den Fichtenstandort ein 2 jähriger Zeitraum von 01.01.2009 bis 31.12.2010 und für die Buchenfläche ein Zeitraum von 01.06.2008 bis 31.12.2008 ausgewählt. Für den Buchenplot wurde die Evaluierung der θ bis Anfang Februar 2009 erweitert, da die Messwerte aufgrund einer fehlerhaften Loggerprogrammierung (θ Messung ohne Kommastellen) in der Modellkalibrierung nicht integriert wurden. Auch hier wurde für beide Standorte eine einjährige Aufwärmphase vorgeschaltet. Eine bessere Einteilung und eine längere Kalibrierungszeit bzw. Evaluierungszeit für beide Flächen konnte aufgrund von folgenden Tatsachen nicht realisiert werden. Auf der Fichtenfläche konnte zwischen Mitte 1999 und Ende 2007 kein passender Datensatz erstellt werden, da die Daten extrem viele Messlücken aufwiesen und parallel darauf geachtet werden musste, dass für diesen Zeitraum für alle 3 Tiefen ausreichend Daten für den θ und das ψ_m vorhanden waren, um eine Modellkalibrierung bzw. -evaluierung realisieren zu können. Die Buchenfläche wurde erst Mitte 2008 errichtet und weist daher nur einen sehr kurzen Zeitraum an Datenmesswerten auf, die darüber hinaus aufgrund der Fehlkalibrierung in Messbereichen ab pF 3.2 einige Messlücken aufwiesen (siehe 3.3.2).

Diese Untersuchung basiert auf Standortebene und modelliert somit den Bodenwasserhaushalt für eine Profilfläche auf Plotebene. Die jeweiligen Messungen für den Standort repräsentieren den Kronenrand (Position Y) auf beiden Flächen. Die Parametrisierung der Modelle erfolgte in den meisten Fällen über die Standardparameter nach FEDERER (2002). Für die wichtigen Vegetationsparameter wurden baumartenspezifische Werte aus der Literatur für Nadelwald/Fichte und Laubwald/Buche übernommen. Aus der Modellbeschreibung der Abflussparameter geht hervor, dass verschiedenste Hauptfließwege im Modell integriert werden können. Für beide Standorte wurde in der Modellparametereinstellung grundsätzlich davon ausgegangen,

- dass auf beiden Waldstandorten kein Oberflächensättigungsabfluss zugelassen wird (BYPAR=1),
- der Infiltrationsexponent so gewählt wurde, dass die Infiltration gleichmäßig über die Tiefe verteilt wird und
- eine schnelle Infiltration über Pipes/Gänge/Makroporen möglich ist.

Die LWF-Brook90 Modellparametereinstellung für den Fichten- und Buchenstandort befinden sich im Anhang (siehe Tabelle A. 1).

3.5.2 Modellstrukturelles Experiment

Bei vielen Modellierungen wird angenommen, dass die vom Modell vorgegebene Struktur in der Lage ist, je nach Zielsetzung, die beobachteten Prozesse zu simulieren. Im folgenden Experiment soll exemplarisch für den Fichtenplot anhand der Trockenrohdichte (TRD) die Diskretisierung und damit die Modellstruktur des Bodenmoduls für die im Modell verwendeten hydraulischen Funktionen nach Mualem-van Genuchten (MVG) getestet werden. Aus einer Voruntersuchung (Sensitivitätsanalyse für PTF's) für den Fichtenstandort durch die Diplomarbeit von POOL (2011) geht hervor, dass die Veränderung der TRD mit der Tiefe, starken Einfluss auf die Retentions- und Leitfähigkeitsfunktion bzw. auf die MVG-Parameter hat. Somit kann unter Anwendung von PTF's und den Werten die einerseits aus der Profilansprache für die TRD, Bodenart, C_{org} direkt und andererseits über die Einteilung der Feinbodenfraktionen nach AG-BODEN (2005) indirekt abgeschätzt wurden, die benötigten MVG Parameter berechnet werden. Die TRD, Bodenart, C_{org} wird bei der Profilansprache jeweils für den Horizont abgeschätzt und geht daher in die Diskretisierung der MVG-Parameter als Stufenfunktion ein. Daher soll im ersten Schritt der Modellkalibrierung untersucht werden, welchen Einfluss die Diskretisierung der MVG-Parameter für drei ausgewählte Fälle hat.

Die Podsol-Braunerde (Fichtenplot) weist für die Bodenhorizonte eine abgeschätzte TRD [g/cm^3] von 1.07 (Ahe), und 1.15 (Bsh) und 1,3 (CvBv) auf. Für alle drei Fälle wurde angenommen, dass sich im Ahe die TRD von 0.9 bis 1.15 [g/cm^3], im Bsh von 1.15 bis 1.3 [g/cm^3] und im CvBv von 1.3 bis 1.6 [g/cm^3] variieren kann. In einer Voruntersuchung stellte sich heraus, dass die maximal mögliche Anzahl an Materialnummern (individuelle MVG-Parameter für Profil) des Modells LWF-Brook90 bei 20 liegt. Für das Experiment wurde daher die maximal mögliche Anzahl an Berechnungsknoten (BK) für individuelle MVG-Parameter verwendet und folgendermaßen festgelegt:

- Humusaufgabe (2 BK)
- Ahe (7 BK)
- Bsh (5 BK)
- CvBv (4 BK)
- „Dummy-Boden“ (2 BK)

Der „Dummy-Boden“ gewährleistet eine freie Drainage und verhindert somit eine mögliche Beeinflussung der unteren Randbedingung auf die Modellierung. Für die TRD in der Humusaufgabe wurde davon ausgegangen, dass sie sehr klein ist und der „Dummy-Boden“ dieselben Werte aufweist, wie der letzte BK im Mineralboden des CvBv.

Im Fall 1 werden über eine Monte-Carlo-Simulation für jeden BK 100 Zufallszahlen aus einer Gleichverteilung gezogen. Die TRD konnte dabei aus der definierten Spannweite (siehe oben) je Bodenhorizont variieren. Im Fall 2 werden Mittelwerte aus den jeweiligen 100 Verläufen pro Horizont aus Fall 1 erstellt, der somit dem stufenförmigen Verlauf aus der Profilsprache entspricht. Im Fall 3 wird davon ausgegangen, dass der Verlauf der TRD mit der Tiefe über eine lineare Abnahme aus Fall 2 beschrieben werden kann. Dafür wird je Verlauf (100) pro Bodenhorizont eine zufällige (MCS) Steigung der Geraden für die Mittelwerte aus Fall 2 gezogen. Die Steigungen der Geraden wurden durch die minimale und maximale mögliche Steigung aus den Parametergrenzen pro Bodenhorizont begrenzt. In Abbildung 11 wird der Verlauf der 100 Zufallszahlen für die TRD mit der Tiefe pro Bodenhorizont für alle drei Fälle dargestellt.

Für alle drei Fälle werden im Anschluss die MVG-Parameter (θ_s , α , n , K_s , λ) über die nach PUHLMANN et al. (2011) entwickelte PTF-PUH2 (GL.3.44 bis 3.48) berechnet.

$$\theta_s = 0.015362 \cdot C_{org}^{0,5} - 0.2513 \cdot TRD - 0.026836 \cdot \ln(T_{on} + 1) - 0.0055404 \cdot S_{and}^{0,5} + 0.8648 \quad (Gl.3.44)$$

$$\ln(\alpha) = -1.187 \cdot TRD^2 - 0.031899 \cdot S_{and} - 0.58805 \cdot \ln(C_{org} + 0,1) - 0.00032963 \cdot U_{sch}^2 - 0.016267 \cdot U_{sch} \cdot TRD + 2.021 \quad (Gl.3.45)$$

$$\ln(n-1) = 0.0003758 \cdot S_{and}^2 + 0.004751 \cdot U_{sch} + 0,017826 \frac{U_{sch}}{TRD} - 2.9804 \quad (Gl.3.4)$$

$$\log_{10}(K_s) = -1.2491 \cdot TRD^2 - 0.00087388 \cdot T_{on}^2 - 1.10316 \quad (Gl.3.47)$$

$$\tau = -0,98063 \cdot \ln(S_{and} + 0,1) - 0,004075 \cdot T_{on}^2 + 0,030022T \cdot C_{org} - 0,00457 \frac{S_{and}}{C_{org}} + 4.4304 \quad (Gl.3.48)$$

Für die Anwendung der PTF werden einerseits je Fall der berechnete Verlauf der TRD [g/cm³] und andererseits die aus der Profilsprache abgeschätzten Werte verwendet. Über die AG-Boden (2005) konnte je Horizont aus der Bodenart der mittlere Ton- (T_{on}) [%], Schluff- (U_{sch}) [%] und Sandgehalt (S_{and}) [%], sowie der Gehalt an organischem Kohlenstoff (C_{org}) [Masse%] für den Fichtenplot abgeschätzt werden. Da es sich bei dem Boden um eine Podsol-Braunerde handelt, welcher deutlich ausgeprägte Horizontgrenzen

aufweist, wird davon ausgegangen, dass die abgeschätzten Werte und TRD Grenzen aus der KA5 pro Horizont ausreichend plausibel für dieses Experiment sind. Einen Anstieg der TRD in den ersten Zentimetern des Bsh, welche durch die Ausfällung der organischen Substanzen bzw. der Sesquioxide aus dem Ahe tendenziell entstehen, können im Rahmen dieses Experiments nicht beachtet werden.

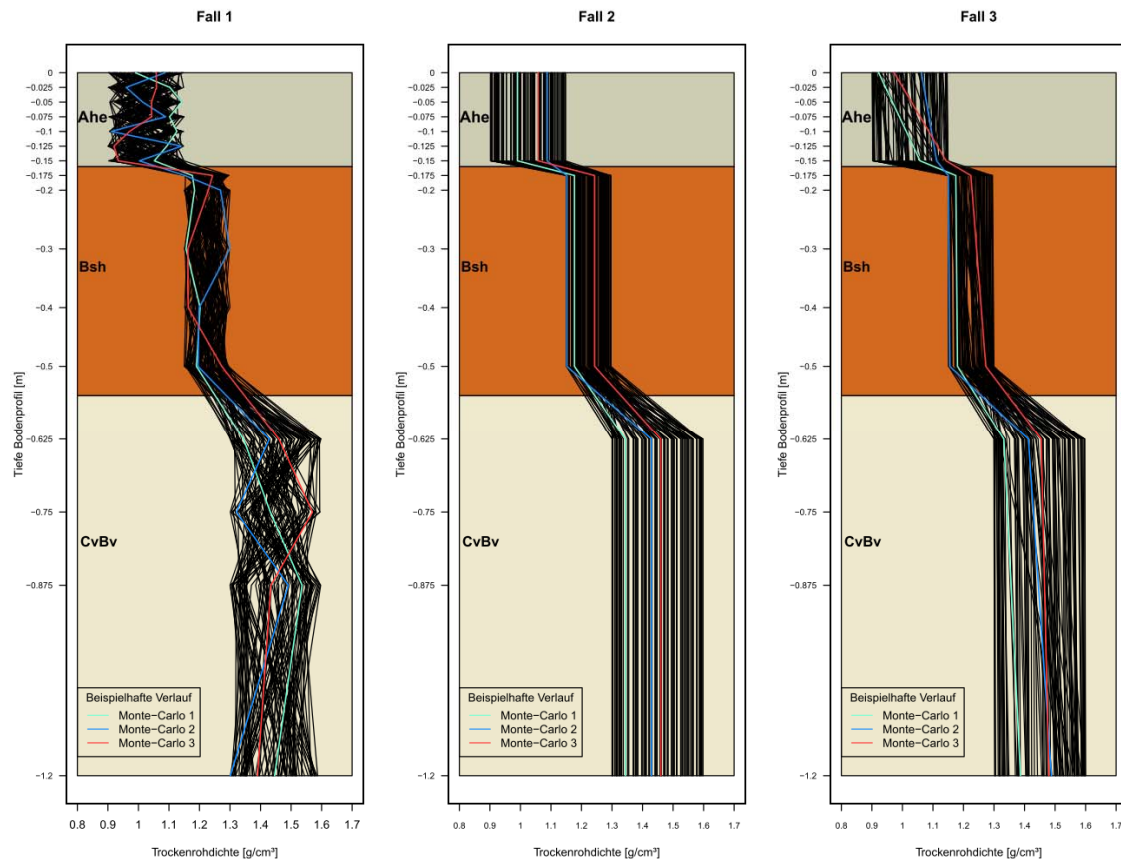


Abbildung 11: Verlauf der jeweils 100 Zufallszahlen aus der Monte-Carlo-Simulation der Trockenrohdichte über die Tiefe für die drei verschiedenen Fälle des modellstrukturellen Experiments für den Fichtenplot.

Die Abschätzung der MVG-Parameter über PTF für Humusauflagen ist nur eingeschränkt nutzbar, daher wurden die statistisch aufbereiteten Messwerte der MVG-Parameter aus HAMMEL und KENNEL (2001) für dieses Experiment übernommen. Für den „dummy-Boden“ wurden die MVG-Parameter n , K_S und τ aus der darüber liegenden Schicht übernommen und θ_S und α so gewählt, dass es zu keiner schnellen Entwässerung des Layers kommen konnte.

Die Auswertung des Experiments (siehe Kapitel 4.1) erfolgt primär anhand des Tiefenverlaufs der θ über Boxplots und soll Aufschluss darüber geben, welcher Ansatz für die Diskretisierung der MVG-Parameter im Bodenmodul für die Modellkalibrierung

des θ und ψ_m geeignet ist. Mögliche Auswirkungen der Verläufe je Fall, sollen anschließend über die Modellierung mit LWF-Brook90 jeweils für eine kurze Entwässerungs- (23.05. bis 07.06.1997) und eine Bewässerungsphase (13.06. bis 27.06.1997) Aufschluss über den Bodenwassertransport geben.

3.5.3 Inverse Parameterbestimmung

Die inverse Parameterbestimmung oder automatische Modellkalibrierung kann als Prozess der Abschätzung von Modellparametern definiert werden, bei der die Anpassung eines mathematischen Modells an die gemessenen Daten die Systemantwort für einen diskreten Punkt über Zeit und Raum repräsentiert (FINSTERLE, 2004). Ziel dieses Prozesses ist eine Anpassung der Modellparameter, welche gewährleisten soll, dass die Simulationsergebnisse möglichst genau das beobachtete Systemverhalten wiedergeben kann. Für die Erreichung des Zieles sind je nach Untersuchungsvorhaben folgende Schritte wichtige (GRUNDMANN, 2010)

- Auswahl der zu kalibrierenden Modellparameter
- Auswahl der Gütemaße („*objective functions*“)
- Auswahl der Optimierungsstrategie und des Parametersuchverfahrens

Die für den Untersuchungszweck dominanten Modellparameter können über eine Sensitivitätsanalyse bestimmt werden. Die Festlegung der Gütekriterien und die Auswahl des Parameteroptimierungsverfahrens sollte im Hinblick auf das Untersuchungsziel gewählt werden. Die methodische Vorgehensweise der einzelnen Aspekte für die inverse Parameterbestimmung wird in den folgenden Abschnitten erläutert.

3.5.3.1 Modellparameter der Sensitivitätsanalyse

Im ersten Schritt musste eine Auswahl der Modellparameter für die Sensitivitätsanalyse getroffen werden. In Tabelle 7 befinden sich die in der Sensitivitätsanalyse untersuchten Modellparameter mit ihren jeweiligen Ober- und Untergrenzen des Parameterraums sowie dem empfohlenen Standardwerte nach FEDERER (2002). Für die MVG-Parameter wurde jedem Bodenhorizont eine Nummerierung zugewiesen, wobei die Nummer 1 für die Humusaufgabe (Of, Oh), 2 für den Ahe, 3 für den Bsh, 4 für den CvBv und 5 für den „dummy-Boden“ steht. Für die Sensitivitätsanalyse wurden die wichtigsten Parameter aus den Bereichen der Meteorologie (gelb), Hydrologie (blau), Bodenkunde (gelbbraun) und Biologie (Vegetations- bzw. Blattparameter, grün) ausgewählt.

Der Parameterraum für den meteorologischen, die hydrologischen und biologischen Parameter wurde ausreichend groß definiert. Die Festlegung des Parameterraums der MVG-Parameter erfolgt über die Abschätzungen aus Untersuchungen nach PUHLMANN et al. (2009) für die Feinbodenarten in Baden-Württemberg oder nach NEMES et al. (2001). Die Grenzen von θ_s wurde aus den Messwerten ermittelt (max. = Sättigung im Winter/Frühling, min= mittlere Sättigung Sommer).

Tabelle 7: Modellparameter für die Sensitivitätsanalyse und ihrer Unter- und Obergrenzen für den Fichtenplot, eine Beschreibung der Parameter befindet sich in Tabelle A. 1 des Anhangs.

Parameter	Einheit	Standard*	min.	max.	Parameter	Einheit	Standard*	min.	max.
ALB	[-]	0.14	0.04	0,18	θ_{s4}	[cm ³ cm ⁻³]	-	0,28	0,45
MXKPL	[mm d ⁻¹ Mpa ⁻¹]	8	5	30	θ_{r1}	[cm ³ cm ⁻³]	-	0	0,1
MXRTLN	[m m ⁻²]	3000	100	6000	θ_{r2}	[cm ³ cm ⁻³]	-	0	0,1
FXYLEM	[-]	0.5	0.01	0,9	θ_{r3}	[cm ³ cm ⁻³]	-	0	0,1
PSICR	[MPa]	-2	-1	-3	θ_{r4}	[cm ³ cm ⁻³]	-	0	0,1
GLMAX	[m s ⁻¹]	0.0053	0.001	0,01	exp(K _{s1})	[cm s ⁻¹]	-	-3,5	-1
LAlmax	[m ² m ⁻²]	6	2	10	exp(K _{s2})	[cm s ⁻¹]	-	-3,5	-1
ILAYER	[-]	-	12	26	exp(K _{s3})	[cm s ⁻¹]	-	-3,5	-1,5
wurzelc	[-]	2	1	5	exp(K _{s4})	[cm s ⁻¹]	-	-3,5	-2
exp(α_1)	[m ⁻¹]	-	0	4,605	τ_1	[-]	-	-4	4
exp(α_2)	[m ⁻¹]	-	0	4,605	τ_2	[-]	-	-4	4
exp(α_3)	[m ⁻¹]	-	0,693	4	τ_3	[-]	-	-4	4
exp(α_4)	[m ⁻¹]	-	0,693	4	τ_4	[-]	-	-4	4
exp(n_1)	[-]	-	-3	0,09	sK ₂	[%]	-	0	50
exp(n_2)	[-]	-	-3	0,09	sK ₃	[%]	-	0	50
exp(n_3)	[-]	-	-3	0,09	sK ₄	[%]	-	0	50
exp(n_4)	[-]	-	-3	0,09	INFEXP	[-]	0,5	0	2
θ_{s1}	[cm ³ cm ⁻³]	-	0,28	0,45	QFPAR	[-]	0,5	0,01	1
θ_{s2}	[cm ³ cm ⁻³]	-	0,28	0,45	QFFC	[-]	0,2	0,1	0,9
θ_{s3}	[cm ³ cm ⁻³]	-	0,28	0,45	DRAIN	[-]	1	0	1

* Standardparameter nach FEDERER (2002)

3.5.3.2 Zielfunktion/Gütekriterium

Für die quantitative Einschätzung der Modellierung werden Zielfunktionen (Gütekriterien) benötigt, die es ermöglichen den Modelloutput mit den gemessenen Daten zu vergleichen und die Modellgenauigkeit anzugeben. In der Modellkalibrierungsphase helfen Gütekriterien die jeweiligen Parametereinstellungen zu bewerten und in der Modellevaluierung wird quantifiziert, ob das erstellte Modell zufriedenstellend arbeitet oder nicht (KIRKBY et al. 1993). Die Auswahl eines geeigneten Gütekriteriums muss je nach Fragestellung der Untersuchung ausgewählt werden. Für den Vergleich von simulierten und beobachteten θ und ψ_m werden zwei Gütekriterien verwendet. Am häufigsten werden Gütekriterien gewählt, die auf der

Minimierung der Summe der kleinsten quadratischen Abweichung zwischen simulierten und beobachteten Werten beruhen. Das Gütekriterium „*root mean square error*“ (RMSE) und das von NASH und SUTCLIFFE (1970) vorgeschlagene Bestimmtheitsmaß R^2 werden in dieser Untersuchung verwendet.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - p_i')^2} \quad (\text{Gl.3.50})$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (p_i - p_i')}{\sum_i p_i'^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_i p_i' \right)^2} \quad (\text{Gl.3.51})$$

p_i :	simulierter Wert (θ, ψ_m) zum Zeitpunkt i	$[\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}]$
p_i' :	gemessener Wert (θ, ψ_m) zum Zeitpunkt i	$[\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}]$
N :	Anzahl Zeitschritte der Analyse	

3.5.4 Sensitivitätsanalyse

Physikalisch basierte SVAT-Modelle, benutzen für die komplexe Beschreibung der physikalischen Mechanismen, welche die Evapotranspiration steuern, sowie den Bodenwasserhaushalt beeinflussen, eine Vielzahl an Parametern, die diese vertikalen Flüsse kontrollieren (FRANKS et al., 1997). Den Einfluss, den die einzelnen Parameter dabei auf das Ergebnis der Modellsimulation haben, ist besonders bei parameterreichen SVAT-Modellen nicht immer offensichtlich. Mit einer Sensitivitätsanalyse (SA) kann die Reaktion des Modells auf eine Veränderung der Modellparameter abgeschätzt werden (DYCK & PESCHKE, 1995). Sie ermöglicht dem Anwender eine bessere Vorstellung über die modelldominanten Parameter zu bekommen, die Modellkalibrierung zu verbessern und zeigt, welche der Modellparameter für die Parameteroptimierung infrage kommen (KIRKBY et al., 1993).

Für die Modellierung des Bodenwasserhaushalts von Waldstandorten auf Plotebene mit Brook90 bzw. LWF-Brook90 wurde in vielen Fällen auf eine Sensitivitätsanalyse verzichtet (z.B. HAMMEL und KENNEL, 2001). In anderen Fällen wurde über eindimensionale Sensitivitätsanalyse bzw. Parameterstudien jeweils ein Parameter innerhalb eines Intervalls variiert und die restlichen Modellparameter konstant gelassen (EISOLD, 2002; SCHÖNE, 2004; KOLB, 2011). Über die Veränderung des Gütekriteriums für die Modellierung des jeweiligen Parameterwertes kann abgeschätzt

werden, welchen Einfluss der untersuchte Modellparameter auf die Modellantwort hat (DYCK & PESCHKE, 1995). Nachteil dieser Methode ist, dass die Wechselwirkung zwischen den Modellparametern nicht mit in die Parameterschätzung einbezogen wird. Für die Sensitivitätsanalyse mehrerer Modellparameter besteht das Problem der „Äquifinalität“, d.h., dass viele verschiedene Parameterkombinationen in der Lage sind, ein ähnlich gutes Ergebnis für die beobachteten Daten zu liefern (BEVEN, 2006, SCHULZE et al., 2001). Einen Überblick verschiedener Methoden für die Sensitivitätsanalysen finden sich in MELCHING (1995) und BEVEN (2006).

Das für diese Untersuchung verwendete Verfahren der Sensitivitätsanalyse basiert auf Monte-Carlo-Simulationen (MCS). Im folgenden Abschnitt wird die Vorhergehensweise bei der MCS und dem verwendeten Verfahren nach HORNBERGER, SPEAR und YOUNG benannten „*Regional Sensitivity Analysis*“ (RSA, SPEAR und HORNBERGER, 1980; HORNBERGER und SPEAR, 1981) vorgestellt. Generell versteht man unter dem Begriff MCS die Erzeugung von reinen Zufallszahlen und kann den globalen Suchverfahren zugeordnet werden, wobei für eine Vielzahl von Modellsimulationen zufällig Modellparametern gezogen werden (BEVEN, 2006). Es wird davon ausgegangen, dass die Variation des Modellinputs durch eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion beschrieben werden kann, aus der für die jeweiligen Parameter und eines definierten Wertebereiches nach einer bestimmten Methode eine Anzahl von Stichproben entnommen und im nächsten Schritt als Ausgangsparameter für eine Modellsimulation verwendet wird.

Die Modellergebnisse bzw. die gewählten Gütemaße liefern dann Informationen über die Sensitivität der Parameter des Modells. MELCHING (1995) weist darauf hin, dass die Genauigkeit stark abhängig von der Anzahl der durchgeführten Modellsimulationen ist. Eine Faustregel für die Abschätzung des benötigten Stichprobenumfangs besagt, dass etwa 10^N Simulationen benötigt werden, um N Zufallsvariablen zu verarbeiten (GRUNDMANN, 2010). Diese Anzahl des Stichprobenumfangs wird in den wenigsten Fällen erreicht, da die dafür benötigte Rechenzeit zu groß ist. In dieser Untersuchung wurden exemplarisch für den Fichtenplot ca. 5000 Parametersätze über MCS erzeugt und diente im Weiteren als Basis für Sensitivitätsanalyse der Zielgrößen θ und ψ_m .

Für diese Untersuchung setzt sich die MCS aus folgend Teilschritten zusammen (in SIEBER, 2003 nach RATTO und SALTELLI 2001; HELTON und DAVIS 2000,102).

- Definition der Wertebereiche für die jeweiligen Modellparameter
- Definition der Verteilungsfunktionen der jeweiligen Modellparameter
- Erzeugung der Parameterkombinationen (Parametersampling)
- Analyse der Modellergebnisse, die über die jeweiligen Parameterkombination erzielt wurden
- Sensitivitätsanalyse

Bei der Definition des Wertebereiches (siehe 3.5.3.1) der jeweiligen Modellparameter muss darauf geachtet werden, dass der Parameterbereich groß genug ist, um gute Modellanpassungen zulassen zu können. Gleichzeitig muss jedoch beachtet werden, dass durch einen zu großen Parameterraum zu viele unplausible Parameterwerte erzeugt werden. Dadurch kann die Rechenzeit unnötig erhöht und zuviel schlechte Modellsimulationen ermittelt werden, welche dazu führt, dass der Parameterraum nicht mehr repräsentativ beprobt werden kann. BEVEN (2006) weist daraufhin, dass subjektive Aufgabe der Festlegung eines optimalen Parameterraums selbst für erfahrene Modellierer nicht einfach ist und schlägt daher vor am Anfang den Wertebereich relativ groß auszuwählen und diesen nach einer Abtastung des Parameterraumes durch Streudiagramme (siehe 3.5.4.1) schrittweise einzuengen. Die Definition der Verteilungsfunktion für die jeweiligen Parameter stellt dabei sicher, dass die Zufallsziehung aus dem wahrscheinlichen Wertebereich generiert werden können. Information über die Verteilungen könne aus Messungen vorliegen oder über die Generierung der Werte wie z.B. bei Bodenparametern über PTF's (GRUNDMANN, 2010) erreicht werden. Für die Untersuchung lag außer für α , n und K_s , die über eine log-Transformation (mündl. Mittl. PUHLMANN, 2011) in die Normalverteilung gebracht wurden, keine Information über Verteilung vor. Daher erfolgte für diese Parameter in der MCS eine univariate Ziehung aus dem Parameterraum. Unter dem Begriff Parametersampling versteht man die Entnahme von Stichproben aus einer Grundgesamtheit in einem festgelegten Parameterbereich. In der Literatur finden sich zahlreiche verschiedene effiziente Methoden für das Parametersampling, wie beispielsweise das „random Sampling“, „MC-Markov-Chain“ (BEVEN, 2006), „Latin Hybercube Sampling“ (McKAEY, et al., 1979). Je nach Verfahren können sie den

benötigten Stichprobenumfang stark reduzieren und eine bessere bzw. intelligentere Abdeckung des Parameterwertebereichs gewährleisten.

3.5.4.1 Dotty Plots

Die „Dotty Plots“ sind Streudiagramme, bei denen der Parameterwert gegen das Gütemaß der jeweiligen Simulation aufgetragen wird und jeder Punkt ein Modelldurchlauf eines MCS repräsentiert (BEVEN, 2006). Der Parameterraum wird für jeden individuellen Parameter auf eine Dimension projiziert, wobei je nach Form der Punktwolke, eine Aussage über die Identifizierbarkeit und Sensitivität eines Modellparameters getroffen werden kann. Die oberen Werte der Punktwolke stehen dabei für die beste Modellanpassung je Parameterset. Gut definierte Modellparameter weisen einen Optimalwert auf, für den sich durch eine Zu- oder Abnahme des Parameterwertes die Modellgüte verschlechtert. Undefinierte Parameter weisen im Umkehrschluss eine gleich verteilte Punktwolke auf, wobei daraus nicht die Schlussfolgerung gezogen werden kann, dass es sich um einen unsensitiven Parameter handelt. BEVEN (2006) stellt klar, dass die erreichte Güte in einer Modellsimulation nicht durch einen einzigen Parameter hervorgerufen wird, sondern durch einen ganzen Parameterset, wobei einzelne undefinierte Parameter durchaus sensitiv sein können, wenn sie durch den Einfluss anderer Parameter im Set maskiert werden.

3.5.4.2 Regional Sensitivity Analysis

Bei der „*Regional Sensitivity Analysis*“ (SPEAR und HORNBERGER 1980; HORNBERGER und SPEAR 1981), die auch als „*Generalized Sensitivity Analysis*“ (GSA) oder Hornberger-Spear-Young Methode (HYS) bekannt ist, handelt es sich um eine globale, qualitative, visuelle Form der Sensitivitätsanalyse und basiert auf MCS. Für diese Untersuchung wurde für die MCS festgelegt, dass die jeweiligen Werte zufällig aus einer Gleichverteilung über den Parameterraum gezogen werden. Die Parametersätze der Modellergebnisse können in zwei Klassen aufgeteilt werden (*behavioral* und *non-behavioral*). Wobei gute Parametersätze („*behavioral*“) in dem Sinne zu verstehen sind, dass sie das zu untersuchende Systemverhalten richtig wiedergeben und mit schlechten („*non-behavioral*“), die Simulationsergebnisse nur unzureichend beschreiben können. Das Trennungsmaß wird über einen vom Modellierer subjektiv gewählten Grenzwert (*Threshold*) des Gütekriteriums festgelegt. Für die Sensitivitätsanalyse wurde ein Schwellenwert je Tiefenstufe auf die 10% besten Modellanpassungen festgelegt. Darüber

hinaus wurde für die weitere Modellkalibrierung das Gütekriterium R^2 nach NASH und SUTCLIFFE verwendet. Diese Entscheidung basiert darauf, dass das R^2 im Gegensatz zum RMSE die Variabilität der Messungen je Tiefe besser wiedergeben kann. Bei R^2 wird der Zähler durch die Reststreuung der gemessenen Daten normiert, wobei im Vergleich dazu das RMSE als Normierung nur den Stichprobenumfang verwendet und damit die Variabilität der Messungen je Tiefen nicht mit einbeziehen kann. Außerdem stellte sich heraus, dass eine sinnvolle Interpretation der RMSE Ergebnisse für pF-Werte kaum möglich ist.

Das Ergebnis wird als kumulative Verteilung der Parameterwerte für beide Klassen und jeden Parameter dargestellt. Eine große Differenz zwischen den Verteilungen weist daraufhin, dass die Modellergebnisse sensitiv auf Veränderung des jeweiligen Modellparameters reagieren (Abbildung 12 A). Wenn hingegen die kumulativen Verteilung nur geringe Unterschiede aufweisen (Abbildung 12 B), so handelt es sich um einen unsensitiven Parameter.

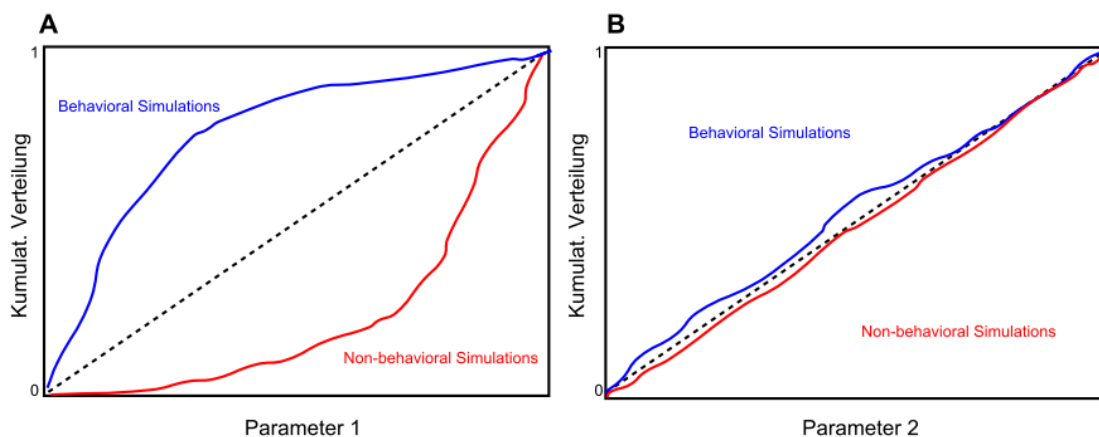


Abbildung 12: Regionale Sensitivitätsanalyse, initiale kumulative Verteilung bei einer Gleichverteilung der Parameterwerte (gestrichelte Linie), (A) kumulative Verteilung eines sensitiven Parameters, (B) kumulative Verteilung eines unsensitiven Parameters (verändert, aus BEVEN, 2006).

Ein detaillierter Eindruck der Sensitivität für jeden Parameter kann durch eine Einführung von mehr als einer Klasse für gute und schlechte Parametersätze erreicht werden. Zusätzlich kann man ein quantitatives Maß der Beurteilung für die Differenz der Verteilung über einen Kolmogorov-Smirnov Test berechnen (MERTENS et al., 2006). Der Test stellt die Hypothese auf, dass die kumulativen Verteilungsfunktionen der guten und schlechten Modelldurchläufe übereinstimmen (SPEAR und HORNBERGER 1980). Die maximale mögliche Distanz $d_{\max}$ zwischen den kumulierten guten $G(x)$ und schlechten $S(x)$ Verteilungsfunktionen kann nach folgender Gleichung berechnet werden.

$$d_{\max} = \max |G(x_i) - S(x_i)| \quad (\text{Gl.3.52})$$

Die maximale vertikale Distanz wird als Index für die relativen Unterschiede verwendet, hat aber den Nachteil, dass sie für viele Simulationen nicht robust genug ist und suggeriert, dass schon kleine Unterschiede signifikant sind (BEVEN, 2006). Für diese Untersuchung mit einem Stichprobenumfang von ca. 5000 MCS wurde angenommen, dass der Kolmogorov-Smirnov Test (KS-Test) auf einem Signifikanzniveau von 0.05% testen kann, ob beide kumulativen Verteilungen aus derselben Verteilung stammen. Über eine Einteilung der $d_{\max}$ Werte in Klassen (Tabelle 8) kann anschließend die Sensitivität der Parameter für die Modellierung dargestellt werden. Die Identifizierung der sensitiven Parameter beruht somit nicht nur auf einer rein visuellen Form.

Teilziel dieser Arbeit ist es, eine Modellkalibrierung zu erstellen, die eine möglichst gute Anpassung der simulierten an die gemessenen θ und ψ_m gewährleistet. Daher musste im ersten Schritt die Information über die Parametersensitivität je gemessener Outputgröße θ und ψ_m separat über eine Sensitivitätsanalyse gewonnen werden. Im weiteren Verlauf der Untersuchung wird deshalb die Rede von θ -Ansatz und ψ_m -Ansatz sein.

Tabelle 8: Sensitivitätsklassen für $d_{\max}$ aus der kumulativen Verteilung der behavioral und non-behavioral Simulationen (nach HALRIN und KUNG, 1992).

dmax	Sensitivitätsklassen
< 0.1	unsensitiv
$0.1 \leq d_{\max} < 0.2$	wenig sensitiv
≥ 0.2	sensitiv

3.5.4.3 Parameteroptimierungsverfahren

Der SCEM-UA- Algorithmus ist ein universelles globales Optimierungsverfahren, das dem Modellier erlaubt, in nur einem Optimierungslauf effizient die wahrscheinlichsten Parametersätze und deren Wahrscheinlichkeitsverteilung zu bestimmen (VRUGT et al. 2003). Der SCEM-UA Algorithmus basiert auf dem nach DUAN et al. (1992) entwickelten SCE-UA globale Optimierungsalgorithmus, wobei dieser für die Entwicklung der Population in den Komplexen die Downhill-Simplex Methode und nicht wie in SCEM-UA das Metropolis-Hasting Suchverfahren (VRUGT, 2003) verwendet. Der Algorithmus (SCEM-UA) nutzt für das Parametersampling das Markov-Chain-Monte-Carlo Verfahren und ermöglicht es, mehrere Sequenzen von Parametersets parallel zu generieren, welche für eine ausreichend große Anzahl an Modellsimulationen

gegen eine stationäre *Posteriori*-Verteilung konvergiert (GRUDNMANN, 2010). In Abbildung 13 wird die vorgehensweise des SCEM-UA Algorithmus dargestellt. Startpunkt für den SCEM-UA-Algorithmus ist die Festlegung einer Startpopulation s von zufällig verteilten Parametersets in einem n -dimensionalen Parameterraum (GRUDNMANN, 2010). Anschließend wird eine Auswahl von s Punkten aus einer vordefinierten *a priori* Verteilung erstellt und die *posteriori* Dichte für jeden Punkt berechnet. Wenn keine *a priori* Informationen über die Wahrscheinlichkeitsverteilung der zu optimierenden Modellparameter vorliegt, wird angenommen, dass die Modellparameter einer Gleichverteilung folgen. Nach der Ausführung des Modelldurchlaufs mit LWF-Brook90 für ein Parameterset wird die Dichte der *posteriori* Verteilung aus dem Simulationsergebnis ermittelt. Durch die Festlegung der Anzahl an Komplexen q wird im nächsten Schritt s aufgeteilt und die Anzahl der Punkte innerhalb eines Komplexes m festgelegt ($m=s/q$). Diese dienen im nächsten Schritt als Basis für die parallele Entwicklung der MC-Markov Chain. Startwert sind dabei die Parametersets, welche die höchste *posteriori* Dichte aufweisen.

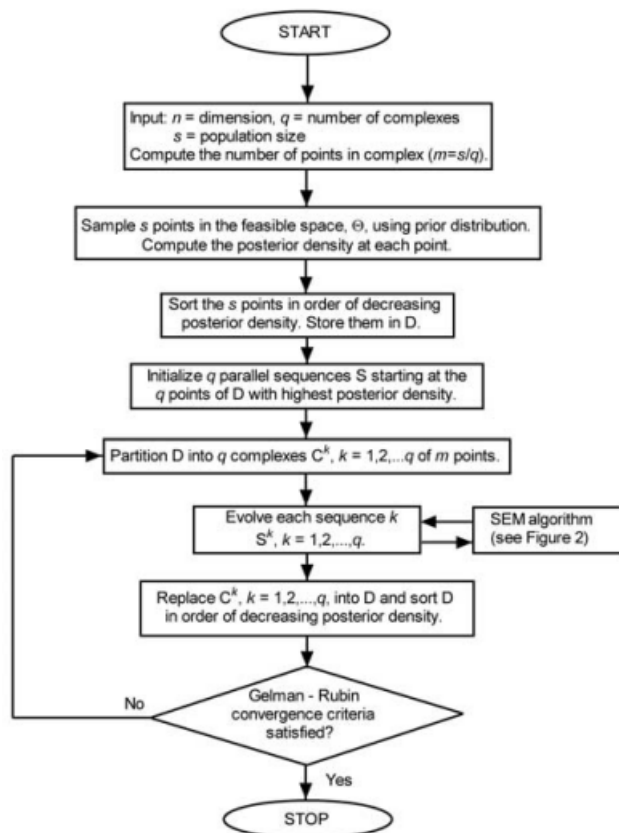


Abbildung 13: Flussdiagramm des SCEM-UA Algorithmus (aus VRUGT et al., 2003).

In jedem Komplex wird ein neuer möglicher Parametersatz (Kandidat) durch Hilfe einer multivariaten Normalverteilung berechnet, die entweder über dem letzten Parametersatz der Markov-Chain oder dem Mittelwert der Parametersätze im Komplex zentriert und um die Kovarianzstruktur der Parametersätze im Komplex erhöht wird (GRUNDMANN, 2010). Danach wird über den *posteriori* Wert des Kandidaten mit dem Metropolis-Annealing-Kriterium entschieden, ob der Kandidat der Sequenz angefügt oder verworfen wird. Nach einer bestimmten Anzahl an Wiederholungen der Parameterschätzung werden die Komplexe neu gemischt („*shuffling*“). Der Parameter L, welcher die Anzahl der Evolutionsschritte im SEM-Algorithmus definiert, muss im Voraus festgelegt werden, wobei VRUGT et al. (2003) ein L von $m/10$ vorschlägt.

Dieser Evolutions- und Mischungsprozess wird so lange wiederholt, bis ein spezifisches Gelman-Rubin-Konvergenzkriterium (GR; GELMAN und RUBIN, 1992) gegen eine stationäre *Posteriori*-Verteilung der Parameter konvergiert (VRUGT et al., 2003).

GELMAN und RUBIN (1992) schlagen einen Wert, der ≤ 1 ist, als Kriterium für die Deklaration der Konvergenz gegen eine stationäre Verteilung vor. Aus der Literatur für die Effektivität bzw. Effizienz des Algorithmus (VRUGT et al., 2003) und Studien über die Anwendung von SCEM-UA hat sich ein GR-Kriterium von < 1.2 entwickelt (VRUGT et al., 2003; LEE et al. 2007; AJAMI et al., 2007; FEYEN et al., 2008). Nach Erreichen des GR-Kriteriums können die Parametersets aus dem SCEM-UA als empirischer Stichprobenumfang für die Parameterunsicherheitsanalyse verwendet werden. Über eine Vorwärtsrechnung mit den Parametersets in LWF-Brook90 werden dann für jeden Tag und jedes Parameterset über den 95% Konfidenzbereich die Unsicherheit der Parameter bestimmt. Voraussetzung dafür ist, dass der beste Parameterset, im Bezug auf das Gütekriterium, im Stichprobenumfang enthalten ist.

Eine detaillierte Beschreibung des SCEM-UA Algorithmus findet der interessierte Leser in VRUGT et al. (2003) und verschiedenste Arten der Anwendungen unter anderem in VRUGT et al. (2005), SCHOUPS et al. (2005), LEE et al. (2007) und FEYEN et al. (2008).

Für diese Untersuchung ergaben sich aufgrund der Zielsetzung drei verschiedene Ansätze für die Erstellung der Dichteverteilung der Parameter im SCEM-UA Algorithmus. VRUGT et al. (2003) schlägt für den Fall vor, dass keinerlei Informationen über die Verteilung der Parameter bekannt ist, ein modifiziertes Gütemaß der Summe der quadrierten Residuen zu verwenden. In dieser Arbeit wurden zwei modifizierte Formen

des R^2 benutzt, die im Folgenden für die Ansätze θ und ψ_m , sowie für einen alternativen Ansatz (Hüllkurve) beschrieben werden.

θ - und ψ_m -Ansatz

Im ersten Schritt der Parameteroptimierung mit SCEM-UA wird das Modell jeweils auf die gemessenen Wassergehalte (θ -Ansatz) oder Matrixpotentiale (ψ_m -Ansatz) kalibriert und überprüft, ob damit beide Outputgrößen je Tiefenstufe möglichst gut wiedergegeben werden können. Da SCEM-UA für den Vergleich der simulierten und gemessenen Größen nur eine Gütefunktion verwendet, wurden für alle drei Tiefen die R^2 errechnet und anschließend der Mittelwert daraus gebildet (Gl.3.53). Um die vorhandene Varianz in den Messwerten je Tiefenstufe mit einzubeziehen, wurde eine Normierung der gemessenen und simulierten Outputgrößen über die Spannweite der Messwerte vorgenommen. Außerdem stellte sich heraus, dass SCEM-UA nur in der Lage ist eine Gütefunktion für die Optimierung zu verwenden, wenn der Wert maximiert werden kann. Für die Erfüllung dieser Bedingung wurde daher die Gütefunktion als Verhältnis der normierten Reststreuung zur normierten Streuung der Messdaten definiert, die somit Werte zwischen $-\infty$ und 0 annehmen kann (siehe Gl.3.54).

$$R_{Mod}^2 = -\frac{\sum M_i}{ABH} \quad (Gl.3.53)$$

$$M_i = \frac{\sum_i^N \left(\frac{p_i - p_i'}{R_{ange}} \right)^2}{\sum_i^N \left(\frac{p_i'}{R_{ange}} \right)^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_i^N \frac{p_i'}{R_{ange}} \right)^2} \quad (Gl.3.54)$$

R_{ange} :	Spannweite des gemessenen θ der Tiefe i
i:	für die Tiefe 15, 30 und 75 cm
M:	in Abhängigkeit der Tiefe (i) berechnetes Verhältnis der normierten Reststreuung zur normierten Streuung der Messdaten
ABH:	Anzahl der betrachteten Tiefen i

Hüllkurven-Ansatz

Für den Fall, dass eine Anpassung beider Messgrößen nicht über die Kalibrierung einer einzelnen Outputmessgröße (θ und ψ_m) über alle drei Tiefen möglich war, wurde eine alternative modifizierte R^2 -Gütefunktion erstellt. Grundsätzlich musste also eine Lösung gefunden werden, welche in der Lage ist, die gemessenen ψ_m des Standorts in die Gütefunktion des Optimierungsalgorithmus zu integrieren. Ein gemeinsamer direkter Vergleich der simulierten und gemessenen θ und ψ_m konnte in der Optimierung aufgrund

der Verschiedenheit der Messwertskaleten nicht realisiert werden. Jedoch kann aus der Feld-pF-Kurve, ein Hysteresebereich definiert werden, in der sich die simulierte pF-Kurve mit hoher Wahrscheinlichkeit befindet. Dazu wurden über die MVG-Gleichung eine Entwässerungs- (E_{kurve}) und Bewässerungskurve (B_{kurve}) erstellt, die wie in Abbildung 14 für den Fichtenplot und in Abbildung 15 für den Buchenplot die gemessenen Feld- θ und ψ_m -Werte wie eine „Hülle“ umgibt. Die MVG-Parameter für die E_{kurve} und B_{kurve} je Tiefe und Standort, wurden so ausgewählt, dass sie die gemessenen Feld- θ und ψ_m -Werte möglichst eng umschließen. In Tabelle 9 werden die Parameter für die MVG-Gleichungen der E_{kurve} und B_{kurve} des Fichten- und Buchenplots je Tiefe in Tabelle 9 wiedergegeben.

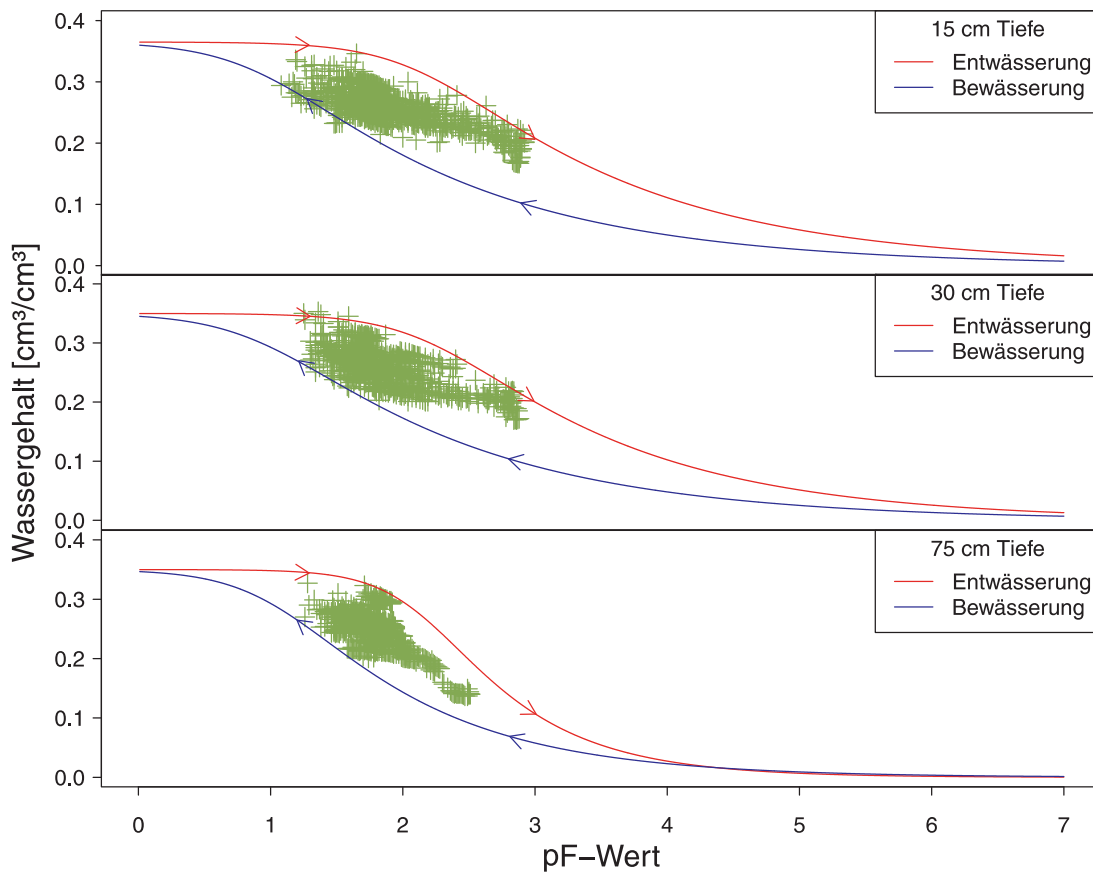


Abbildung 14: Feld-pF-Werte und definierter Hüllbereich für die Ent- und Bewässerungskurve des Hüllkurven-Ansatzes für den Fichtenplot in den Tiefen 15, 30, 75 cm.

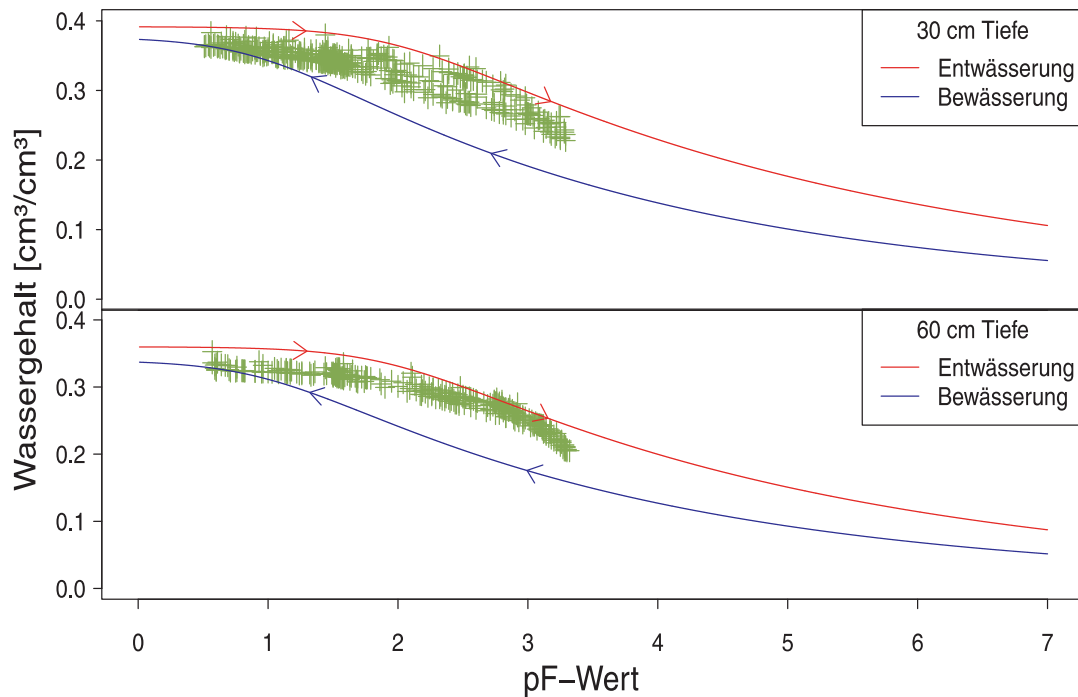


Abbildung 15: Feld-pF-Werte und definierter Hüllbereich für die Ent- und Bewässerungskurve des Hüllkurven-Ansatzes für den Buchenplot in den Tiefen 30 und 60 cm.

Tabelle 9: MVG-Parameter für Entwässerungs- (E_{kurve}) und die Bewässerungskurve (B_{kurve}) des Hüllkurven-Ansatzes für die Tiefen 15, 30, und 75 cm des Fichten- und 30 und 60 cm des Buchenplots.

Fichtenplot	α	n	θ_s^*	θ_r	Buchenplot	α	n	θ_s^*	θ_r
Hüllkurve	[1/cm]	[-]	[cm³/cm³]	[cm³/cm³]	Hüllkurve	[1/cm]	[-]	[cm³/cm³]	
$E_{kurve15}$	0,007	1,28	0,365	0	$E_{kurve30}$	0,01	1,12	0,3916	0,01
$B_{kurve15}$	0,12	1,28	0,365	0	$B_{kurve30}$	0,11	1,15	0,377	0,01
$E_{kurve30}$	0,006	1,3	0,35	0	$E_{kurve60}$	0,011	1,13	0,36	0,01
$B_{kurve30}$	0,12	1,28	0,35	0	$B_{kurve60}$	0,1	1,15	0,34	0,01
$E_{kurve75}$	0,007	1,6	0,35	0					
$B_{kurve75}$	0,09	1,4	0,35	0					

θ_s^* = abgeschätzt aus den Messwerten der jeweiligen Tiefe

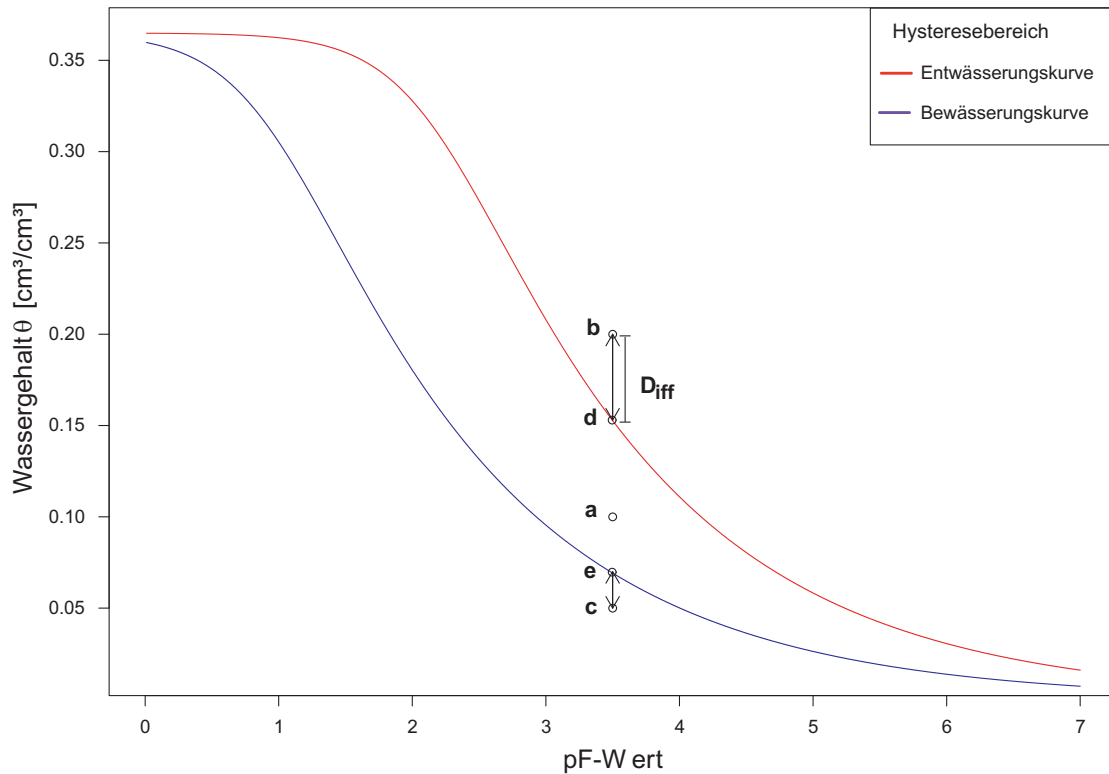


Abbildung 16: Schematische Darstellung des Hüllkurven-Ansatzes für eine Tiefe i , wobei a für den inner-, b für den ober- und c für den unterhalb der Hüllkurve liegenden simulierten Wassergehalt steht. Wenn exemplarisch der Punkt oberhalb liegt, so wird der Abstand zwischen der Entwässerungskurve d und b gebildet und geht dann als D_{diff} in die Gütefunktion $R^2_{\text{Hüll}}$ ein.

Durch Einsetzen des simulierten ψ_m in die MVG-Gleichung der E_{kurve} oder der B_{kurve} kann anschließend überprüft werden, ob der über die MVG-Gleichung simulierte θ außerhalb oder innerhalb der „Hülle“ liegt. In Abbildung 16 wird exemplarisch für eine Tiefe die schematische Vorgehensweise erläutert. Im ersten Schritt überprüft die modifizierte Gütefunktion (R^2_i), ob der normierte simulierte mit dem normierten gemessenen θ übereinstimmt. Im zweiten Schritt wird über den simulierten θ und ψ_m ein Punkt in der pF-Kurve erstellt und geprüft, ob der Punkt inner- (a), ober- (b) oder unterhalb der Hüllkurve liegt (siehe Abbildung 16).

Befindet sich der Punkt ober- oder unterhalb der Hüllkurve, so wird über einsetzen des simulierten ψ_m in die MVG-Gleichung der E_{kurve} (d) oder B_{kurve} (e) ein θ_{Test} berechnet, der auf der jeweiligen pF-Kurve für die Entwässerung oder Bewässerung liegt. Anschließend wird die Differenz (D_{diff}) zwischen dem simulierten θ und dem θ_{Test} gebildet. Liegt der Punkt jedoch innerhalb der Hüllkurve wie es z.B. für Punkt a in Abbildung 16 der Fall ist, so wird D_{diff} gleich Null gesetzt. Für die Berechnung wird der simulierte θ und θ_{Test} durch θ_s der Tiefe normiert, so dass Werte zwischen 0 und 1 entstehen. Der damit entstandene Datensatz aus den normierten D_{diff} zwischen dem θ_{Test} auf der Hüllgrenze und dem simulierten θ wird für alle Tiefen i berechnet. Über die Minimierung von D_{diff} kann

eine parallele Anpassung der ψ_m in der Parameteroptimierung erreicht werden. Sowohl die Restreuung (M_i (siehe Gl.3.54) und D_{diff}) also auch die Streuung der gemessenen θ werden anschließend durch die Spannweite der gemessenen θ je Tiefe normiert. Für jede Tiefe wird R_i^2 (Gl.3.55) errechnet und anschließend in das modifizierte Gütemaß $R_{\text{Hüll}}^2$ (3.56) eingesetzt und der Mittelwert gebildet. Da für jede Tiefe in R_i^2 2 Terme eingehen, wird für die Mittelwertbildung über alle Tiefen in $R_{\text{Hüll}}^2$ die doppelte Anzahl der Tiefen benötigt.

$$R_i^2 = \left(M_i + \frac{\sum_i^N \left(\frac{D_{\text{diff}}}{R_{\text{ange}(i)}} \right)^2}{\sum_i^N \left(\frac{p_i'}{R_{\text{ange}(i)}} \right)^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_i^N \frac{p_i'}{R_{\text{ange}(i)}} \right)^2} \right) \quad (\text{Gl.3.55})$$

$$R_{\text{Hüll}}^2 = - \frac{\sum_i (M_i + R_i^2)}{2 * ABH} \quad (\text{Gl.3.56})$$

3.5.5 Modellanwendung

Nach der Modellkalibrierung und –evaluierung für beide Plots wird im Anschluss das evaluierte Modell auf eine zwanzigjährige retrospektive Klimazeitreihe angewendet. Der Retrospektivedatensatz reicht von 01.01.1972 bis 31.12.1991 und beinhaltet das Trockenjahr 1976 und die relativen Trockenjahre der Mitte 80er und Anfang 90er. Der Klimadatensatz ist für beide Plots identisch und kann somit für beide Standorte über das evaluierte Modell des jeweiligen Plots mit unterschiedlicher Vegetation (Fichte/Buche) und Bodentypen auf Trockenstress analysiert werden. Für eine Anwendung des Modells auf mögliche Klimaszenarien standen keine adäquat nutzbaren Daten zur Verfügung. Aus der Studie nach ARBEITSKREIS-KLIWA (2006) für die Auswirkungen regionaler Klimaszenarien für Süddeutschland geht hervor, dass generell mit mehr Niederschlägen im Herbst/Winter (Nov.-April) und weniger Niederschlägen im Frühling/Sommer (Mai-Okt.) gerechnet werden kann. Aus einer regionalisierten Karte der prozentualen Änderungen der mittleren Niederschlagssummen wird prognostiziert, dass es im Herbst/Winter tendenziell zu einer Zunahme der mittleren Niederschlagssummen von 5% bis 10% und für den Frühling/Sommer zu einer Abnahme von -5% bis -10% kommt. Der retrospektive Klimadatensatz wurde auf die Bedingung hin untersucht, dass die Tendenz von feuchterem Herbst/Winter und gleichzeitig trockenerem Frühling/Sommer

vorhanden ist. Für die Beachtung von möglichen Szenarien wurde im ersten Schritt der mediane (extreme Trockenjahre) Jahresniederschlag (1170 mm/a) errechnet und dann zwei Jahr herausgesucht, für die folgende Bedingungen der gruppierte Auswirkungen (GA) erfüllt wurden:

- A 1) Überdurchschnittlicher Jahresniederschlag, mit der Tendenz von feuchterem Herbst/Winter und trockenerem Frühling/Sommer.
- B 1) Unterdurchschnittlicher Jahresniederschlag, mit der Tendenz feuchterem Winter und trockenerem Frühling/Sommer.

Für jeden Fall wurden 2 Jahre aus dem retrospektiven Datensatz entnommen, dupliziert und anschließend mit den Modellen simuliert und auf Trockenstress analysiert. Diese Art der GA soll ermöglichen, die prognostizierte Veränderung der Niederschläge für eine Zeitreihe mit über- und unterdurchschnittlichen Jahresniederschlägen miteinander zu vergleichen und mögliche Veränderung für den Bodenwasserhaushalt beider Standorte zu erkennen.

3.5.5.1 Kritischer Wassergehalt und Wasserdefizitgrößen

Nach der Modellanwendung werden für den betrachteten Zeitraum die Trockenstressgrößen quantifiziert. Zu den Stressgrößen gehören, wie in Kapitel 2.2 angesprochen, die relevanten Stressgrößen, welche eine Aussagemöglichkeit über die Häufigkeit, Dauer und Intensität von Trockenstressereignissen zulassen. RIDOLFI et al. (2000) definiert dafür folgende Größen: (1) die Dauer T_{krit} eines Ereignisses, bei dem der θ unter einen kritischen Schwellenwert (θ_{krit}) liegt, (2) die Anzahl A_{krit} der Stressereignisse während eines klimatisch homogenen Zeitintervalls und (3) die Größe der Fehlmenge (Wasserdefizit) d_{krit} . In Abbildung 17 werden die relevanten Größen für Trockenstress über einen wählbaren θ_{krit} dargestellt. Ein Wassermangel tritt auf, wenn die Bodensaugspannung einen baumartspezifischen kritischen ψ_m überschreitet (PUHLMANN et al., 2008). Generell sind Pflanzen in der Lage bis zu einem pF-Wert von 4.2 (PWP) dem Boden Wasser zu entziehen. Bäume schränken jedoch schon ab einer Saugspannung von etwa -1000 hPa ihre Transpiration ein und begrenzen damit ihren Stoffwechsel, welcher sich auf das Baumwachstum und –vitalität auswirkt. Die Herleitung der baumspezifischen kritischen Saugspannungen kann über die Beziehung zwischen Pflanzenwuchs (Dendrometer-Messung & Jahrringanalyse) und Bodensaugspannungen erbracht werden. Aus einer Studie nach PUHLMANN et al. (2010) für den Level II-Standort Heidelberg wurde für die Buche eine kritische Saugspannung von -

1300 hPa ermittelt. Im Vergleich mit anderen Level II-Standorten stellte sich heraus, dass dieser kritische Wert ziemlich konstant ist, obwohl die Feinbodenart des jeweiligen Bodentyps sich z.T. stark unterschiede. Im Rahmen dieser Arbeit wird dieser Wert für die Ermittlung der Häufigkeit, Dauer und Intensität von Trockenstressereignissen verwendet.

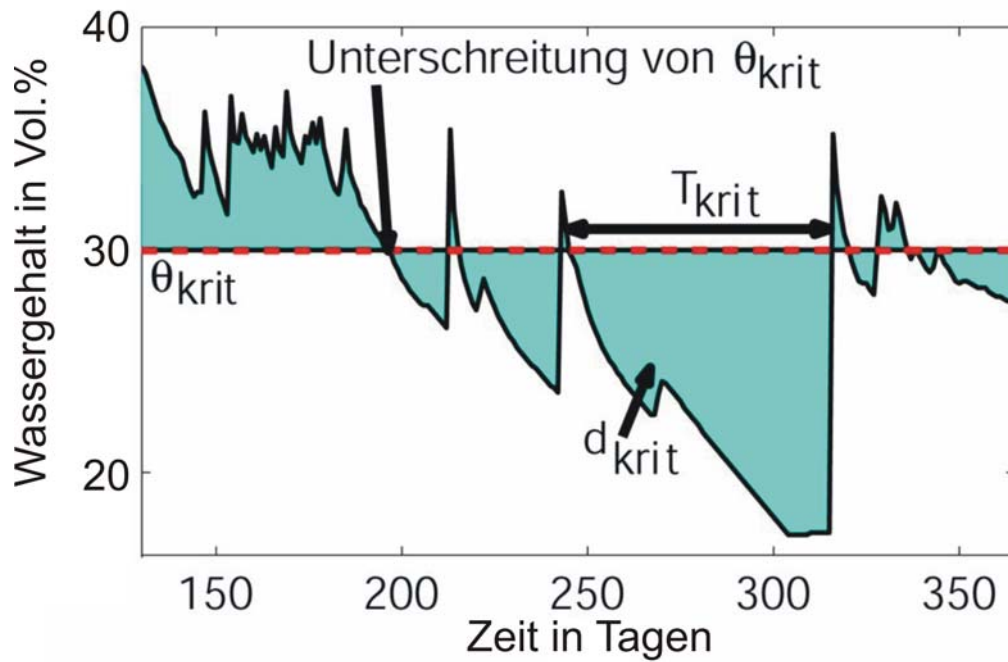


Abbildung 17: Zeitliche Entwicklung des Bodenwassergehaltes und Definition der Unterschreitungsmerkmale (veränd. PUHLMANN et al., 2008, nach RIDOLFI et al., 2000).

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Modellstrukturelles Experiment

Die Ergebnisse des modellstrukturellen Experiments sind für alle 3 Fälle in Abbildung 18 als Boxplots der 100 möglichen TRD-Werte über die Tiefe (BK) des Bodens dargestellt. Für die Darstellung des modellstrukturellen Einflusses (je Fall) auf die Modellierung der θ und ψ_m in der Entwässerungsphase, wird die Varianz des letzten Tages der Simulation betrachtet. In Abbildung 19 sind je Berechnungsknoten die Varianz der 100 möglichen θ (A) und ψ_m (B) aus den MCS je Fall abgebildet. Die Betrachtung des letzten Tages gewährleistet, dass die Simulation keinen Einfluss der gewählten Anfangsbedingung mehr aufweist. Tendenziell zeigen sich für den θ in Fall 1, dass in den meisten Tiefen durch die Wahl der Struktur, eine höhere Varianz der simulierten θ hervorruft wird. Fall 2 und Fall 3 unterscheiden sich nur geringfügig. Für das ψ_m ist nur im Ae Bodenhorizont (grau) ein Unterschied zwischen den betrachteten Modellstrukturen zu erkennen.

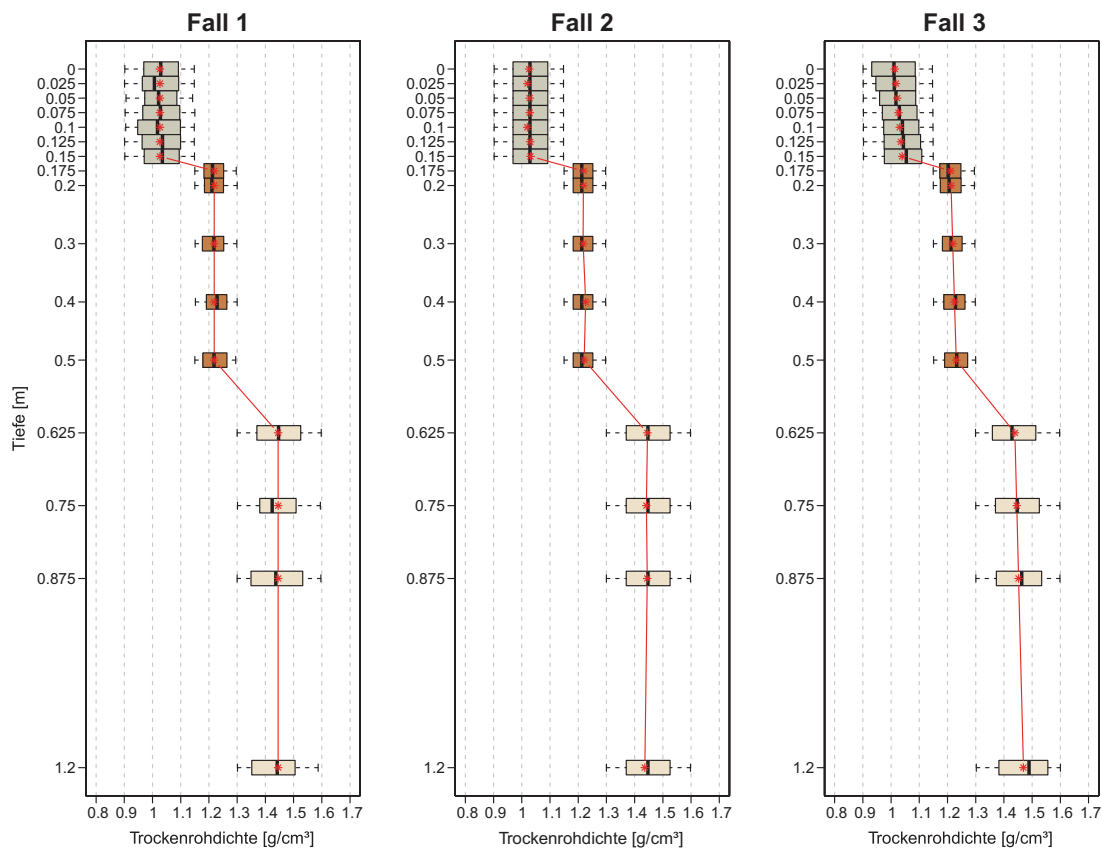


Abbildung 18: Verlauf der 100 zufällig gezogenen Trockenrohdichten für die 3 Fälle über die Tiefe als Boxplot für das modellstrukturelle Experiment.

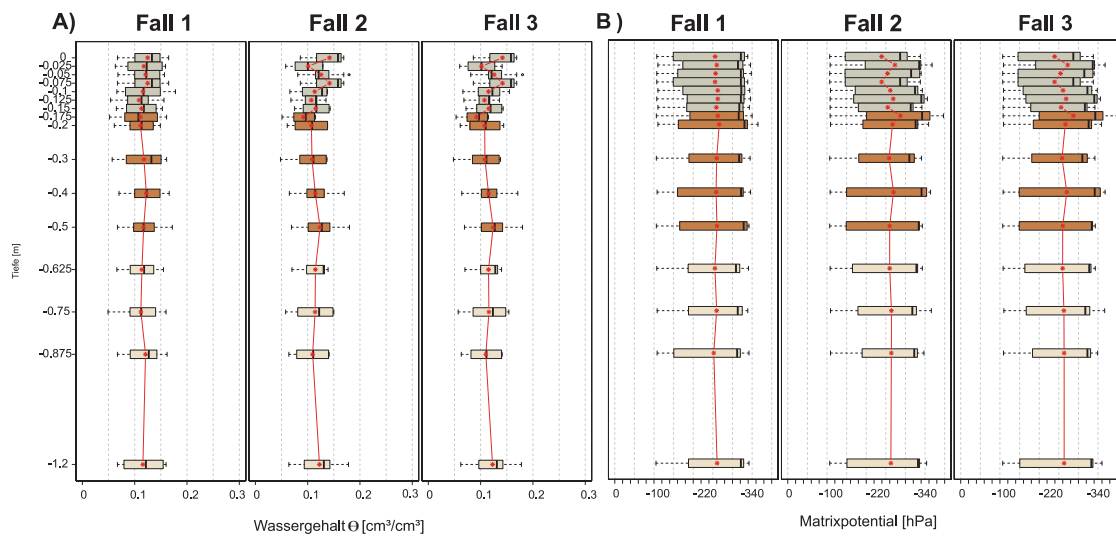


Abbildung 19: Boxplot für die Modellierung der Entwässerungsphase der 100 Wassergehalte θ (A) und Matrixpotentiale ψ_m (B) je Tiefe und Fall, für den letzten Tag der Zeitreihe.

In Abbildung 20 wird exemplarisch die Auswirkung des Monte-Carlo-Laufs 1 (siehe Abbildung 11) je Fall für die Modellierung des θ aus der Entwässerungsphase (23.05.1997 – 07.06.1997) wiedergegeben. Der simulierte θ wird als effektive Sättigung (S_{eff}) [-] dargestellt. Dies soll die individuelle Entwicklung des Wassertransports über die Tiefe und Zeit je Fall verdeutlichen.

Für die Modellierung der Entwässerungsphase wurde auf eine Aufwärmphase verzichtet. Aus den einzelnen Teilabbildungen wird deutlich, dass die gewählte Modellstruktur und damit die TRD einen großen Einfluss auf den θ und die ungesättigte Leitfähigkeit haben und damit in der Lage sind den Wassertransport zu verändern. So ist die S_{eff} in Fall 1 stark variabel über die Tiefe, für Fall 2 zeigt sich nur eine Veränderung je Bodenhorizont und bewirkt damit eine konstante Abnahme der S_{eff} für die Entwässerungsphase. Ausnahmen und scharfe Grenzen sind auf die grobe Diskretisierung der Farbe zurückzuführen. Für Fall 3 zeigt sich eine eher treppenförmige Abnahme der S_{eff} über die Tiefe und Zeit. In Abbildung 21 wird der Verlauf des ψ_m je Fall abgebildet. Für alle Fälle zeigt sich ein ähnlicher Verlauf für die Zunahme des ψ_m und erst gegen Ende des Zeitraums weisen sie Differenzen auf. Die Abbildungen für die Bewässerungsphase (13.06.1997 – 27.06.1997) befinden sich im Anhang (siehe Abbildung A. 1 bis Abbildung A. 3).

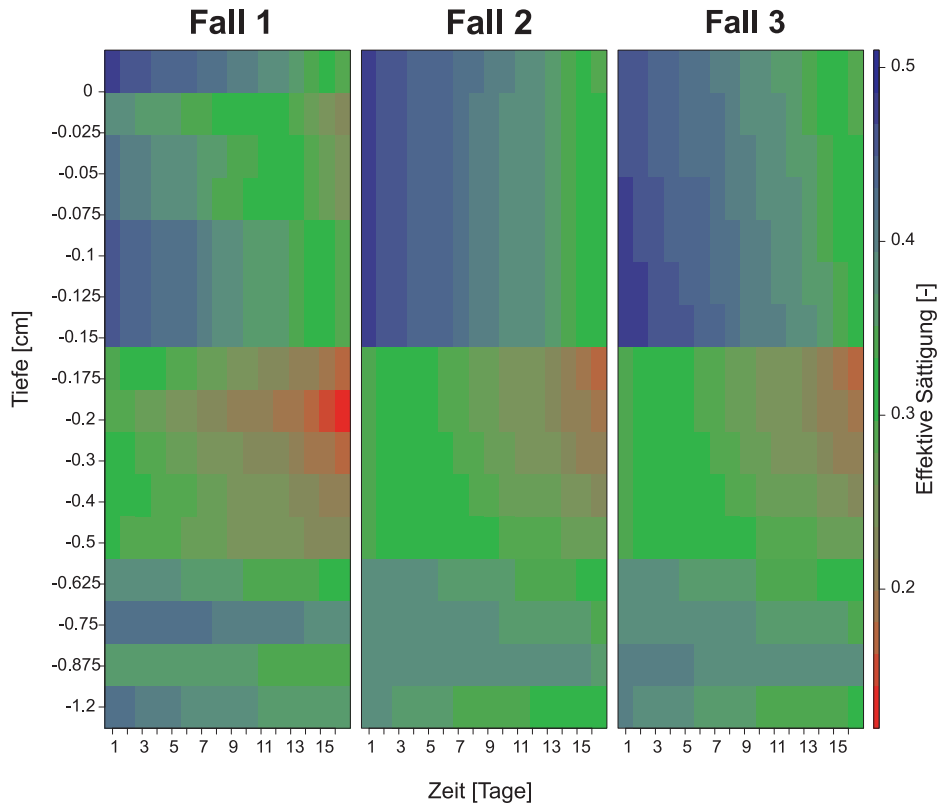


Abbildung 20: Verlauf der effektiven Sättigung über die Tiefe und Zeit für Fall 1 bis 3 des modellstrukturellen Experiments der Trockenrohdichte aus dem Monte-Carlo Lauf 1 (siehe **Abbildung 11**) mit LWF-Brook90 für die Entwässerungsphase.

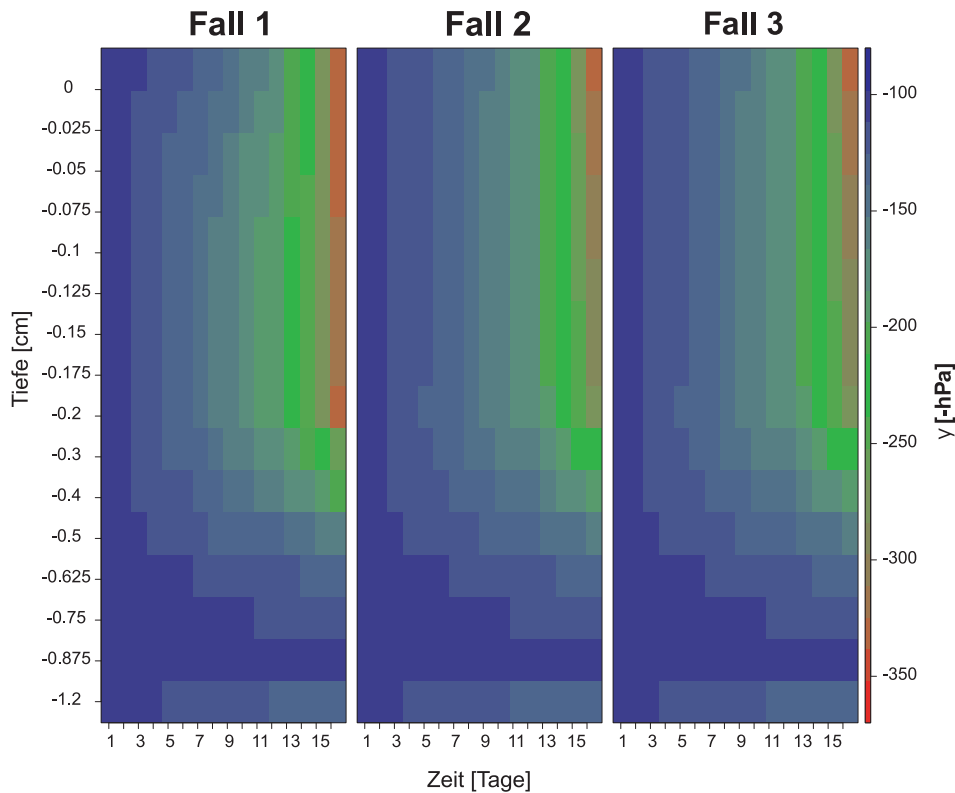


Abbildung 21: Verlauf des Matrixpotenzials ψ_m über die Tiefe und Zeit für Fall 1 bis 3, des modellstrukturellen Experiments der Trockenrohdichte aus dem Monte-Carlo Lauf 1 (siehe **Abbildung 11**) mit LWF-Brook90 für die Entwässerungsphase.

Fazit modellstrukturelles Experiment

Durch das modellstrukturelle Experiment hat sich gezeigt, dass beispielhaft für den Parameter TRD, welcher maßgeblich über die PTF die MVG-Parameter bestimmt, je Fall eine Veränderung des Wassertransports herbeigeführt. Fall 1 führt durch die „feine“ Diskretisierung der Bodenparameter zu starken Gradienten, welche zu erhöhten Rechenzeiten und größerer Modellinstabilität führen können. Der Fall 3 unterscheidet sich nur geringfügig von Fall 1 und steht damit im Bezug auf die höhere Anzahl an Parametern in keinem Verhältnis zu dem Resultat des Experiments. Für die weitere Modellierung wurde daher die Modellstruktur aus Fall 2 übernommen. Sie gewährleistet einerseits eine rechenextensive Modellkalibrierung und verhindert darüber hinaus eine Überparametrisierung des Bodenmoduls.

4.2 Inverse Parameterbestimmung

4.2.1 Sensitivitätsanalyse

Für die Sensitivitätsanalyse wurden sowohl meteorologische, bodenkundliche, hydrologische und vegetations- (Blatt oder Pflanzen) bezogene Modellparameter ausgewählt. Die Rechenzeit des Modells LWF-Brook90 ist stark abhängig von den gewählten Parametereinstellungen. Daher wurde im ersten Schritt der Sensitivitätsanalyse der Parameterraum auf Konvergenzproblem bzw. LWF-Brook90 Modelldurchläufe, die mit hohen Rechenzeiten verbunden sind, untersucht. Eine Aussage über die Rechenzeit kann mit einer Analyse des Parameterraums in Abhängigkeit der dazu benötigten Durchlaufszeit mit LWF- Brook90 ersichtlich gemacht werden. Mit 250 zufällig gezogenen Parametersätzen und Modelldurchläufen für 40 Parameter kann im Anschluss über eine grafische Analyse der 25% schnellsten (SL) und langsamsten (LS) Durchläufe die benötigte Rechenzeit minimiert werden. In Abbildung 22 sind pro Parameter die 25 % SL und LS Modelldurchläufe als Boxplot nebeneinander dargestellt. Dies wurde nötig, da z.T. ein Modelldurchlauf bis zu 4 Stunden Rechenzeit benötigte. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass Modelldurchläufe mit geringen α ($\alpha .1$ und $\alpha .2$) und hohen K_s ($K_{s.2}$ und $K_{s.3}$) Werten besonders rechenintensiv sind. Daher wurden die obere Parametergrenze für $K_{s.2}$ auf 27322 [mm/d] und $K_{s.3}$ auf 8640 [mm/d] beschränkt. Für α und $\alpha .1$ wurde die untere Grenze auf 1 [1/m] und für $\alpha .2$ und $\alpha .3$ auf 0.5 [1/m] erhöht. Für die weitere Untersuchung wurde darüber hinaus davon ausgegangen, dass der Skelettgehalt in der organische Auflage Null ist.

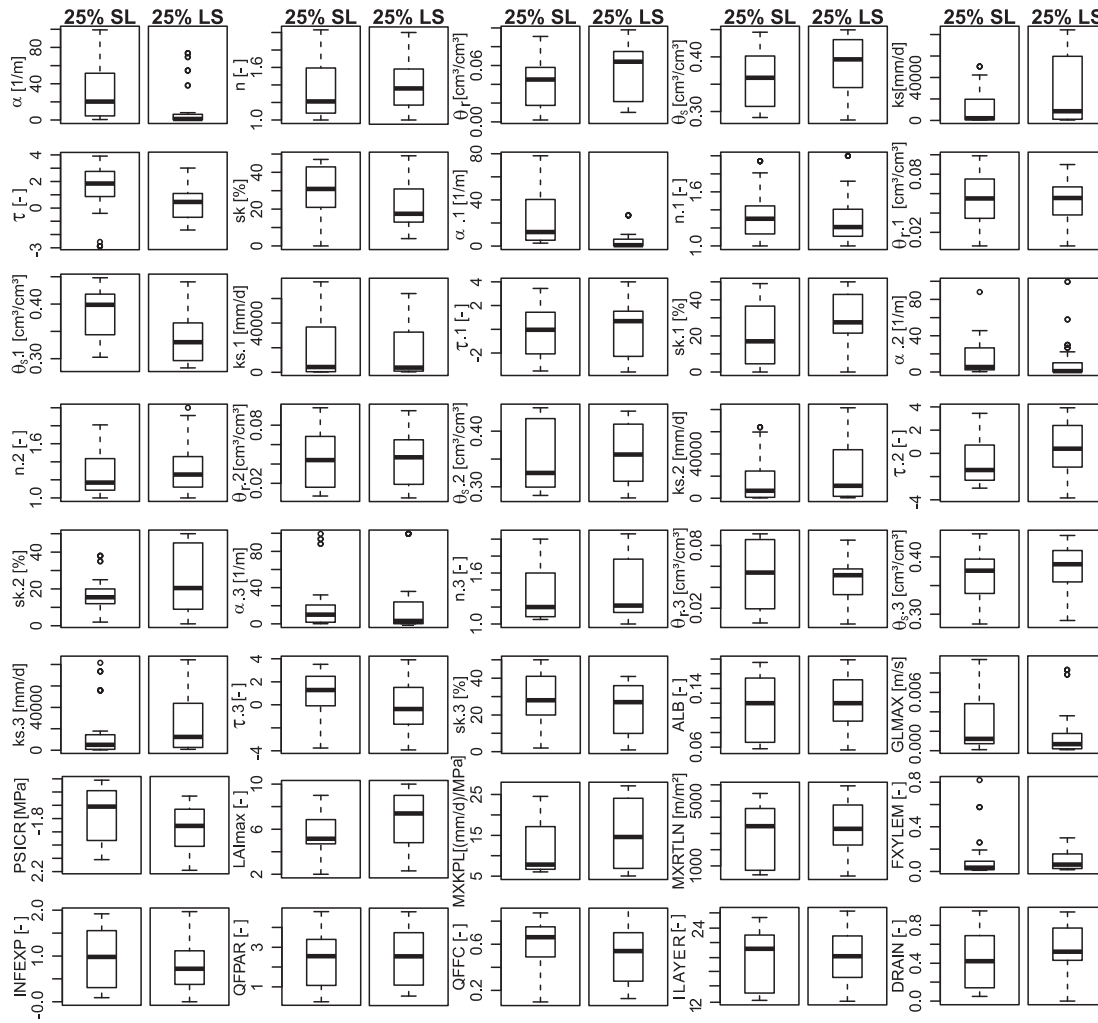


Abbildung 22: Die 25% schnellsten (SL) und langsamsten (LS) Läufe der LWF-Brook90 Parameter als Boxplot für 250 Monte-Carlo-Simulationen.

Nach einer Eingrenzung des Parameterraums wurde die „Regional Sensitivity Analysis“ (RSA) sowohl für den θ als auch für das ψ_m je Tiefe (15, 30, 75) durchgeführt. Die Ergebnisse der RSA des θ werden exemplarisch für die Tiefe 15 cm in Abbildung 23 dargestellt. Die anderen grafischen Ergebnisse der RSA befinden sich im Anhang (Abbildung A. 4 bis Abbildung A. 8). Die Darstellung erfolgt wie schon in Abschnitt 3.5.4.2 beschrieben als Gegenüberstellung der kumulierte Verteilung der *behavioral* (blau)- und *non-behavioral*-Simulationen (rot). Als *Threshold* wurde der Wert der 10% besten Anpassungen für das NASH und SUTCLIFFE Gütekriterium der jeweiligen MCS (5000) für θ und ψ_m festgelegt (Tabelle 10).

Tabelle 10: Threshold der „Regional Sensitivity Analysis“ für Wassergehalt θ und Matrixpotential ψ_m je Tiefe.

Tiefe [cm]	R ² Gütekriterium	
	Wassergehalt	Matrixpotential
15	0,07	0,42
30	0,29	0,26
75	0,03	-1,56

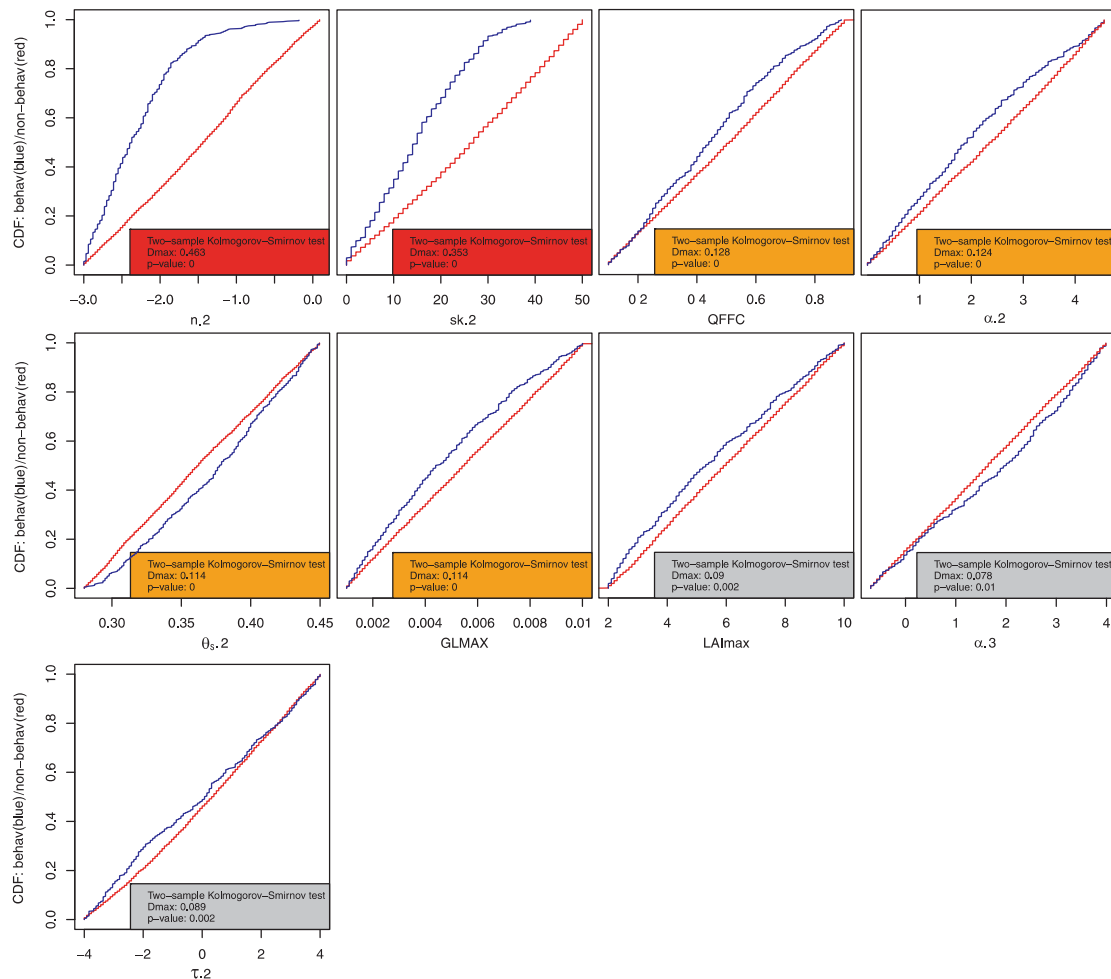


Abbildung 23: Ergebnisse der „Regional Sensitivity Analysis“, des Kolmogorov-Smirnov-Tests und Sensitivitätsklassifizierung (siehe Kasten) für die Modellierung des Wassergehalts θ in der Tiefe 15 cm des Fichtenplots (Parameter siehe Tabelle 7).

Neben der rein visuellen Form der Sensitivitätsanalyse wurde ein KS-Test durchgeführt und die $d_{\max}$ -Werte in Anlehnung an HARLIN und KUNG (1992) in Sensitivitätsklassen eingeteilt. Die Ergebnisse des KS-Tests für die RSA der θ und ψ_m befindet sich in Tabelle 11. Die Farbgebung in der Tabelle stellt dabei die Sensitivitätsklassen sensitiv (rot), gering sensitiv (orange) und unsensitiv (grau) dar.

Aus der Tabelle geht hervor, dass für die Anpassung an die ψ_m generell mehr sensitive Parameter gefunden werden als für die Anpassung der θ je Tiefe. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass eine Modellanpassung an die gemessenen θ über weniger freie

Parameter erzielt werden kann bzw. weniger Parameter mehr Erklärung im Bezug auf die Modellierung liefern. Ökologisch gesehen besitzt der θ jedoch weniger Informationsgehalt. Aus der Sensitivitätsanalyse für die Modellierung der θ wird ersichtlich, dass hauptsächlich n und der Skelettgehalt (sk) der jeweiligen Tiefenstufen sensitiv sind und bis auf die Ausnahme der Tiefe 75 cm α und θ_s der jeweiligen Tiefenstufen eine geringe Sensitivität aufweisen. Der Abflussparameter QFFC und der Blattparameter GLMAX weisen nur für die Tiefenstufe 15 cm eine geringe Sensitivität auf. Der Modellparameter GLMAX ist die maximale Blattleitfähigkeit bei voll geöffneter Stomata und beeinflusst die Transpiration. Bei Abnahme des GLMAX sinkt die Transpiration und es findet eine geringere Zehrung des Bodenwasserspeichers statt, solange der Bodenspeicher die Verdunstung nicht limitiert (EISOLD, 2002). QFFC ist der schnelle Sickerwasseranteil bei Feldkapazität und bewirkt bei Zunahme eine Erhöhung der schnellen Abflusskomponente (BYFL). Dies führt dazu, dass weniger Wasser im Boden vorhanden ist und bewirkt damit eine Reduktion der Transpiration und der Bodenverdunstung (EISOLD, 2002).

Im Gegensatz dazu zeigt sich aus den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse für die Modellierung der ψ_m , dass mehr Modellparameter als gering sensitiv klassifiziert werden und die Ergebnisse je Tiefe nicht so einheitlich sind wie für den θ . Für das ψ_m ist besonders GLMAX, n_3 und in 75 cm Tiefe α_4 und τ_4 sensitiv. Für die Tiefen 15 cm und 30 cm kann festgehalten werden, dass LAImax, QFFC und die MVG-Parameter α , n , τ , θ_s und sk als gering sensitiv klassifiziert werden können. In 75 cm Tiefe ergibt sich ein etwas anderes Bild. Dort weisen Parameter wie Wurzelc, ILAYER, INFEXP sowie GLMAX, n und LAImax eine geringe Sensitivität auf. Einerseits kann dieses Ergebnis dahingegen interpretiert werden, dass Modellparameter wie ILAYER, Wurzelc und INFEXP großen Einfluss auf das Bodenwasser in tieferen Bereichen haben. So legt der Parameter ILAYER fest, bis in welche Tiefe Makroporen zugelassen werden. Wurzelc ist der Wurzelkoeffizient und geht in die Berechnung der Wurzelverteilung ein und beeinflusst damit Wurzeldichte und Wurzeltiefe im Bodenprofil, welche insbesondere für die Pflanzenwasseraufnahme und damit auch für die Transpiration entscheidend ist. INFEXP ist der Infiltrationsexponent, der die Verteilung des infiltrierenden Wassers im Bodenprofil steuert. Bei einer Zunahme des INFEXP >1 wird das Wasser nicht mehr klassisch als Feuchtefront abgebildet, sondern sorgt dafür dass das Infiltrationswasser vermehrt in tiefere Horizonte verlagert wird.

Tabelle 11: Ergebnisse der RSA und Klassifizierung über die maximale Distanz ($d_{\max}$) aus dem Kolmogorov-Smirnov-Test für die Modellierung der Wassergehalts θ und des Matrixpotentials ψ_m in den drei Tiefen 15, 30, 75 cm.

Wassergehalt						Matrixpotential					
15cm	dmax	30cm	dmax	75cm	dmax	15cm	dmax	30cm	dmax	75cm	dmax
n_2	0.463	n_3	0.37	n_4	0.405	GLMAX	0.344	GLMAX	0.42	α_4	0.335
sk_2	0.353	sk_3	0.261	sk_4	0.278	τ_2	0.189	n_3	0.205	τ_4	0.267
QFFC	0.128	α_3	0.119	θ_{S4}	0.111	LAlmax	0.187	LAlmax	0.175	Wurzelc	0.195
α_2	0.124	θ_{S3}	0.115	K_{S4}	0.083	α_4	0.164	QFFC	0.149	GLMAX	0.194
θ_{S2}	0.114	GLMAX	0.099	K_{S2}	0.077	n_2	0.16	τ_3	0.147	n_4	0.171
GLMAX	0.114	K_{S4}	0.09	Wurzelc	0.077	QFFC	0.108	α_3	0.141	ILAYER	0.152
LAlmax	0.09	K_{S3}	0.081	QFFC	0.076	α_3	0.098	sk_3	0.137	LAlmax	0.137
τ_2	0.089	sk_2	0.069	n_1	0.071	α_2	0.093	θ_{S3}	0.112	INFEXP	0.103
		QFFC	0.068	α_4	0.069	K_{S4}	0.088	α_4	0.108	MXKPL	0.083
		LAlmax	0.068	θ_{r4}	0.068	θ_{S3}	0.086	K_{S4}	0.092	QFFC	0.08
						K_{S2}	0.085	ALB	0.076	n_2	0.078
						τ_4	0.08	INFEXP	0.076	sk_3	0.077
						sk_2	0.074	PSICR	0.07	sk_4	0.067
						MXRTLN	0.073	τ_4	0.066		
						PSICR	0.072				
						Wurzelc	0.071				

Andererseits muss beachtet werden, dass der gewählte *Threshold* für die Sensitivitätsanalyse der ψ_m in 75 cm im Gegensatz zu den anderen Tiefen sehr schlecht war. Für die weitere vorgehensweise der Modellkalibrierung werden sowohl die sensitiven, als auch die gering sensitiven Modellparameter für die Parameteroptimierung verwendet. Die unsensitiven Parameter werden auf Standardparameter nach FEDERER (2002) und MELLERT et al. (2009) festgelegt (siehe Tabelle A. 1). Die MVG-Parameter für den Auflagehorizont waren für keine Tiefe sensitiv und wurden daher über Literaturwerte (WÖSTEN et al., 1999) und Voruntersuchungen an der FVA abgeschätzt. Die unsensitiven MVG-Parameter der einzelnen Bodentiefen für ψ_m und θ wurden über die PTF PUH2 berechnet (Tabelle 12). Für den θ wurden die Werte für τ in allen Tiefen auf den in der Literatur (HAMMEL und KENNEL, 2002) geläufigen Wert von 0.5 festgelegt. Für die Modellierung der ψ_m wurde der minimale Wert für τ auf 0 gesetzt. Da sich aus der Sensitivitätsanalyse für θ und ψ_m herausstellte, dass LWF-Brook90 mit negativen τ -Werten aus bis jetzt noch unerklärlichen Gründen zu häufigeren Modellabbrüchen führt und somit in diesem Wertebereich als nicht kompatibel für das SCEM-UA Optimierungsverfahren erwies.

Des Weiteren ergaben erste Optimierungsläufe mit SCEM-UA, dass die Parameter θ_s und sk der jeweiligen Tiefen stark autokorreliert sind. Für die weitere Modellkalibrierung wurde deshalb der sk für alle Tiefen auf die Werte der Profilsprache festgesetzt. Aus der visuellen Auswertung der Sensitivitätsanalyse (Abbildung A. 4 bis Abbildung A. 8)

und der *Dottyplots* (siehe beigelegte CD) konnte keine Einschränkung des Parameterraums für die Modellparameter vorgenommen werden. Für θ_s konnte aus der Messreihe des θ der jeweiligen Tiefe und Plots (Fichte oder Buche) die Obergrenze aus dem maximal möglichen θ im Winter (max. Sättigung) und für die Untergrenze aus dem mittleren θ im Sommer abgeleitet werden. Da das Modell LWF-Brook90 automatisch die θ_s über den Skelettgehalt reduziert, mussten die Ober- und Untergrenze des Parameterraums für θ_s angepasst werden.

Tabelle 12: Festgesetzte Bodenparameter für die Modellkalibrierung des θ und des ψ_m mit LWF-Brook90

Wassergehalt & Matrixpotential		Wassergehalt		Matrixpotential	
Parameter	Wert	Parameter	Wert	Parameter	Wert
α_1	1.288	τ	0.5	θ_{s2}	0.3842
n_1	1.205	Ks_2	791	α_2	1.8641
θ_{s1}	0.766	sk_2	5	Ks_2	791
Ks_1	80	Ks_3	1538	sk_2	5
sk_1	0	sk_3	25	Ks_3	1538
τ_1	0.4	α_4	1.8946	sk_3	25
		Ks_4	426	θ_{s4}	0.5
		sk_4	30	Ks_4	426
				sk_4	30

Fazit Sensitivitätsanalyse

Die RSA wurde auf Basis von MCS mit der Software MATLAB und LWF-Brook90 für den Modellkalibrierungszeitraum des Fichtenplots durchgeführt. Es erfolgten 2 RSA für 40 Modellparameter für die gemessenen θ (θ -Ansatz) und ψ_m (ψ_m -Ansatz). Das modellierte Bodenprofil bestand aus 4 Horizonten, dem Oh/Of-Horizont von +7 bis 0 cm, dem Ahe von 0 bis -15 cm, Bsh von -15 bis -50 cm, dem CvBv von -50 bis -110 cm und einem „dummy-Layer“ von -110 bis -180 cm. Aus der Sensitivitätsanalyse der drei Tiefen Ahe, Bsh, CvBv ergaben sich für den θ -Ansatz 8 sensitive bodenhydraulische Parameter und jeweils 1 Vegetations- und Abflussparameter. Für den ψ_m -Ansatz wurden für dieselben Bodenhorizonte 9 bodenhydraulische Modellparameter und jeweils 2 Boden-, Vegetations- und Abflussparameter aus der RSA und dem KS-Test als sensitiv bzw. gering sensitiv klassifiziert. Es stellte sich heraus, dass die verwendete Samplingmethode (random) der MCS ziemlich zeitaufwendig war und daher im Rahmen dieser Arbeit nur für eine limitierte Anzahl an MCS für RSA realisiert werden konnte. Eine intelligentere und effizientere Samplingmethode wie z.B. „latin-hypercube“ hätte für eine validere Basis der Sensitivitätsanalyse sorgen können.

4.2.2 Parameteroptimierung SCEM-UA

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Parameteroptimierung bzw. inversen Parameterbestimmung anhand des SCEM-UA Algorithmus beschrieben. Im ersten Abschnitt werden für den Fichtenplot exemplarisch die Ergebnisse der Parameteroptimierung für die Modellierung des θ -, ψ_m - und anschließend als Alternative der Hüllkurven-Ansatz vorgestellt. Diese Vorgehensweise soll verdeutlichen, dass eine gemeinsame Anpassung über eine Parameteroptimierung der jeweiligen gemessenen Outputgrößen nicht möglich war. Deswegen wurde als Alternative der Hüllkurven-Ansatz verwendet, der es ermöglicht die Parameteroptimierung für beide Outputgrößen in einem Lauf zu realisieren. Im darauffolgenden Abschnitt werden die Ergebnisse des Hüllkurven-Ansatzes für den Buchenplot dargestellt.

4.2.2.1 Fichtenplot

4.2.2.1.1 θ -Ansatz

Aus dem Ergebnis der Sensitivitätsanalyse für die Modellierung der θ ist zu entnehmen, dass 10 Modellparameter sensitiv bzw. gering sensitiv sind. Diese Modellparameter wurden im nächsten Schritt über den SCEM-UA Algorithmus optimiert. Die Modellparameter und ihre Ober- und Untergrenzen sind der Tabelle 13 zu entnehmen.

Tabelle 13: Kalibrierungsparameter des LWF-Brook90 Modells mit der Angabe der Unter- und Obergrenze des Parameterraumes für die Parameteroptimierung mit SCEM-UA der Wassergehalte θ .

Parameter (LWF-BROOK90)	Einheit	Untere Grenze	Obere Grenze
GLMAX	[m/s]	0.001	0.01
θs_2	[cm ³ /cm ³]	0.2947	0.3842
$\exp(\alpha_2)$	[1/m]	0	4.605
$\exp(n_2)$	[-]	-3	0.09
θs_3	[cm ³ /cm ³]	0.3733	0.4666
$\exp(\alpha_3)$	[1/m]	-0.693	4
$\exp(n_3)$	[-]	-3	0.09
θs_4	[cm ³ /cm ³]	0.4	0.5
$\exp(n_4)$	[-]	-3	0.09
QFFC	[-]	0.1	0.9

Der SCEM-UA Algorithmus beinhaltet 2 algorithmische Parameter die durch den Benutzer festgelegt werden müssen. Diese sind 1) die Anzahl der Komplexe/Sequenzen q und 2) die Anzahl der Populationsgröße s , welche gleichzeitig die Anzahl der Punkte in einem Komplex ($m=s/q$) festlegen. VRUGT et al. (2003) empfiehlt die Nutzung eines relativ großen s und q , um in der Lage zu sein die komplexe Form der Kovarianz präzise

zu erfassen. Darüber hinaus beinhaltet der SEM-Algorithmus drei weitere algorithmische Parameter, die vom Nutzer festgelegt werden müssen. In Tabelle 14 sind die algorithmischen Parameter dargestellt. Für die Festlegung des Parameters q wurde darauf geachtet, dass er der Anzahl der zu optimierenden Parameter entspricht (Schriftl. Mittl. GRUNDMANN). Der Parameter s , welcher die Anzahl der random samples pro Komplex beschreibt wurde auf 100 gesetzt (Schriftl. Mittl. GRUNDMANN). Die Anzahl der Evolutionsschritte musste aus zeitlichen Gründen auf 1 gesetzt werden, da ansonsten die Anzahl der benötigten Funktionsevaluierungen deutlich größer als 60000 geworden wäre.

Abbildung 24 zeigt den Verlauf des GR-Kriteriums über die Anzahl der Iterationen der MC-Markov-Chain. Nach etwa 40000 Iteration wird der Wert für alle untersuchten Modellparameter unterschritten. Aus den Parametersets nach Erreichen des GR-Kriteriums wurde der optimale Parameterset ermittelt und diente als Stichprobenumfang für die statistische Analyse der Parameterunsicherheit. Im nächsten Schritt wurde über eine Vorwärtsrechnung der Parametersets mit LWF-Brook90 die Parameterunsicherheit bestimmt (95%-Quantilbereich).

Tabelle 14: Festlegung der algorithmischen Parameter für SCEM-UA und SEM- Algorithmus für die Parameteroptimierung an die gemessenen Wassergehalte θ .

Parameter	Beschreibung	Einstellung
n_{scem}	Anzahl der zu optimierenden Parameter	10
q	Anzahl der Komplexe	10
s	Populationsgröße	100
L	Anzahl der Evolutionsschritte	1
T_{like}	likelihood Verhältnis	10^6
C_n	Sprungrate	0,76

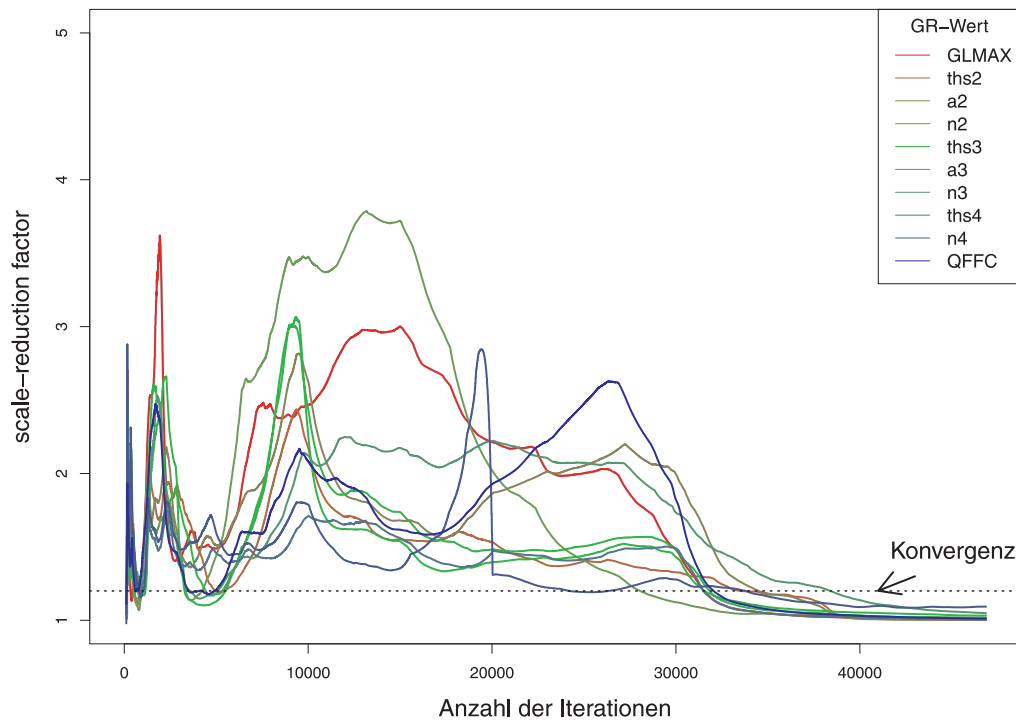


Abbildung 24: Evaluierung des Konvergenzverhaltens der untersuchten Modellparameter mit dem Gelman-Rubin Kriterium für den Fichtenplot mit dem Wassergehalt θ -Ansatzes.

In Abbildung 25 sind die Ergebnisse der Parameterunsicherheit (95%Quantilbereich) und die Simulation des θ für das optimale Parameterset des θ -Ansatzes dargestellt. Für alle drei Messtiefen konnte eine zufriedenstellendes Gütemaß R^2 und RMSE über das Parameteroptimierungsverfahren SCEM-UA der simulierten an den gemessenen θ gefunden werden.

Die jahreszeitliche Dynamik der gemessenen θ kann durch die Modellkalibrierung des θ -Ansatzes für alle drei Bezugstiefen wiedergegeben werden. Der Absolutwert des gemessenen θ wird für die Austrocknungsphasen im Sommer 1997 für die Simulationen in der Tiefe 15 cm und 30 cm sowie für den Sommer 1998 in allen drei Tiefen überschätzt. Jedoch kann man gut erkennen, dass der Rückgang der θ , mit Ausnahme des Sommers 1998 in 75 cm, für alle Tiefen gut getroffen wird. In der Widerbefeuchtungsphase (Herbst) von 1996 werden für alle drei Tiefen der θ unterschätzt, was sich in der Tiefe 30 cm bis in den Sommer 1997 hinein fortsetzt. Ebenfalls wird ersichtlich, dass der extrem hohe θ im Herbst 1997 in 15 cm Tiefe durch die Simulation nicht wiedergegeben werden kann.

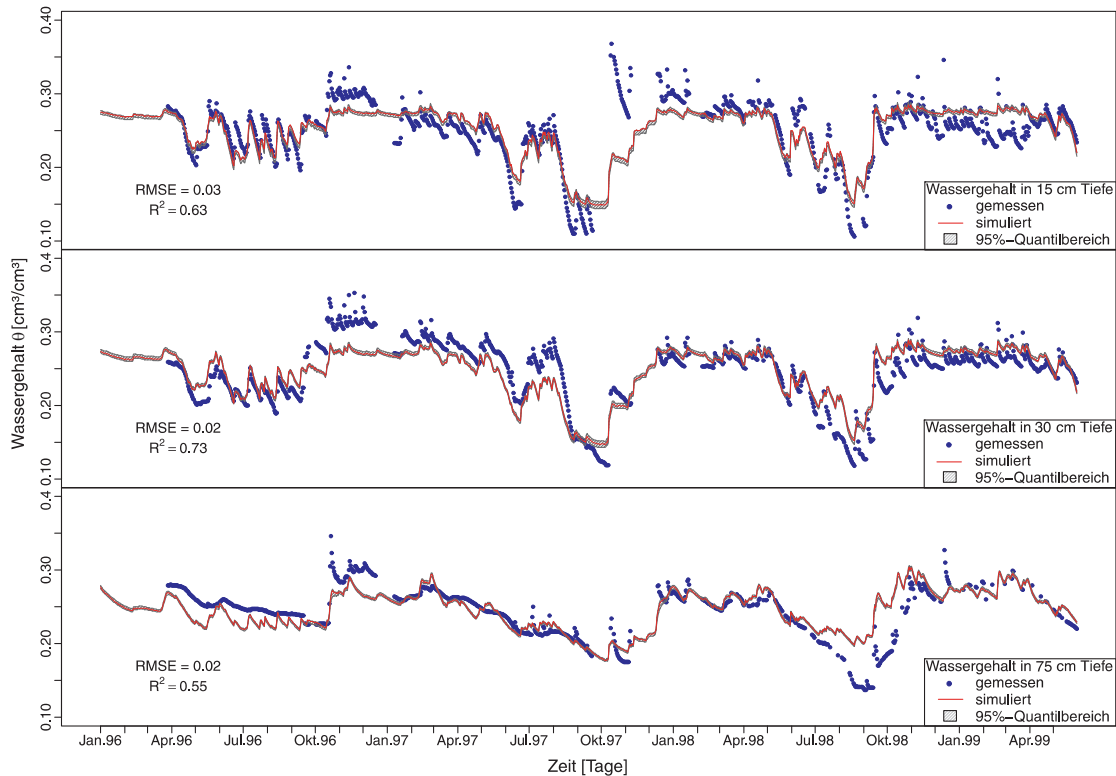


Abbildung 25: Ergebnis der SCEM-UA Parameteroptimierung und –unsicherheit der Wassergehalte θ [cm^3/cm^3] für die Tiefen 15 cm, 30 cm und 75 cm des θ -Ansatzes für den Fichtenplot.

Die simulierten ψ_m werden in den folgenden Abschnitten aus Gründen der besseren Darstellungsmöglichkeit als pF-Wert bezeichnet und im Text als simulierte pF-Werte angegeben. Die Ergebnisse der simulierten pF-Werte aller drei Messtiefen des optimalen Parametersets und die Parameterunsicherheit aus dem θ -Ansatz können der Abbildung 26 entnommen werden. Die simulierten pF-Werte für die Tiefen 15 cm und 30 cm der Modellkalibrierung werden fast für den gesamten Modellkalibrierungszeitraum überschätzt, folgen jedoch der jahreszeitlichen Dynamik der beobachteten Werte. Lediglich für die Messtiefe 75 cm kann die Modellkalibrierung eine Anpassung der ψ_m an die gemessenen Werte mit einem R^2 von 0.42 erfolgen. Ebenfalls wird ersichtlich, wie schon aus den θ in 75 cm, dass die jahreszeitliche Dynamik in 75 cm im Gegensatz zu den Tiefen 15 cm und 30 cm viel geringer ausfällt. Für die beiden anderen Vergleichstiefen werden R^2 von 0.22 (15 cm) und 0.02 (30 cm) erreicht. Die Interpretation der RMSE Gütekriterien ist problematisch, da je nach Höhe des pF-Wertes eine Abweichung von beispielsweise 0.35 pF einen deutlichen Unterschied ausmacht. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass anhand des θ -Ansatzes eine gleichzeitige Anpassung der θ und pF-Werte nicht möglich ist. Für den Parameterunsicherheitsbereich ergab sich für beide Outputgrößen ein sehr kleiner Bereich, der kaum die gemessenen Daten beinhaltet. Somit kann vermutet werden, dass

eine genauere Modellvorhersage für θ durch eine Verbesserung der Modellstruktur und oder der Messwerte erreicht werden könnte.

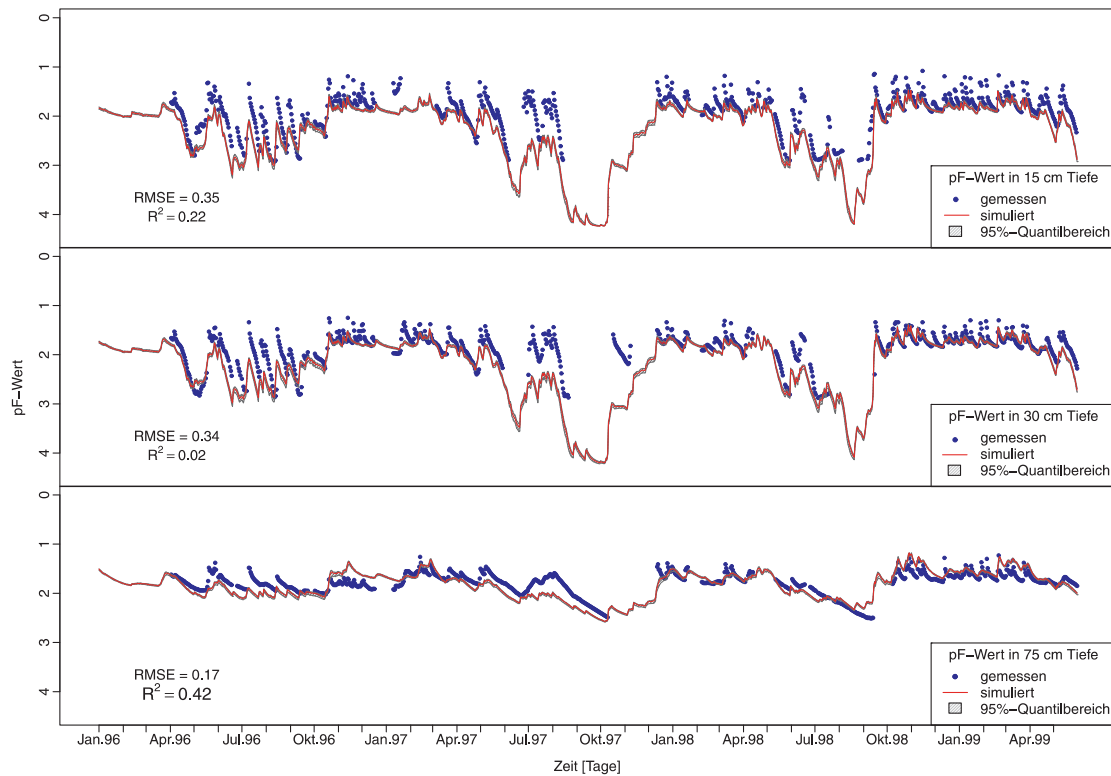


Abbildung 26: Ergebnis der SCEM-UA Parameteroptimierung und –unsicherheit der Matrixpotenziale ψ_m für den θ -Ansatz des Fichtenplots.

4.2.2.1.2 ψ_m -Ansatz

Für den ψ_m -Ansatz wurden die 15 sensitiven Modellparameter aus der RSA für die Modellkalibrierung an den gemessenen ψ_m über den SCEM-UA optimiert. Die Tabellen der algorithmischen Parameter, sowie die Ober- und Untergrenze des Parameterraums für den ψ_m -Ansatz befinden sich im Anhang (siehe

Tabelle A. 2 und Tabelle A. 3). Aus dem Verlauf des GR-Kriteriums über die Anzahl der Iteration (siehe Abbildung A. 9) geht hervor, dass nach ca. 43000 Iterationen der Grenzwert von 1.2 für alle Parameter unterschritten wurde. In Abbildung 27 und Abbildung 28 ist die Simulation des optimalen Parametersets und die Parameterunsicherheit für den ψ_m -Ansatz im Bezug auf die gemessenen Outputgrößen ψ_m und θ abgebildet. Aus der Abbildung 27 wird deutlich, dass die unterschiedliche Dynamik in allen drei Tiefenstufen durch das Ergebnis der Modellkalibrierung wiedergegeben werden kann. Die Übereinstimmungen der simulierten und gemessenen ψ_m für den Kalibrierungszeitraum sind gut und erreichen einen Wert für R^2 von 0.74 in

15 cm, 0.66 in 30 cm und 0.81 in 75 cm. Bis auf einige Ausnahme in 15 cm und 30 cm Tiefe zeigt sich auch, dass generell die Zunahme der pF-Werte im Sommer und die Abnahme im Herbst/Winter durch die Modellkalibrierung des ψ_m -Ansatzes gut getroffen werden. Der Bereich der Parameterunsicherheit ist für alle drei betrachteten Tiefen allgemein sehr gering und nimmt mit steigendem pF zu. Für die Übereinstimmung der simulierten und gemessenen θ (Abbildung 28) kann festgehalten werden, dass in allen Tiefen die simulierten θ für die gesamte Kalibrierungszeit deutlich unterschätzt werden. Die Güte R^2 der Modellkalibrierung liegt für alle 3 Tiefen unter 0, was darauf hinweist, dass die Reststreuung größer ist als die Streuung der gemessenen Werte. Die schlechten Ergebnisse können auch nicht durch die Parameterunsicherheit erklärt werden. Es kann festgehalten werden, dass auch die Modellkalibrierung des ψ_m -Ansatzes nicht in der Lage ist beide gemessenen Outputgrößen durch die Simulation der entsprechenden ψ_m und θ wiederzugeben.

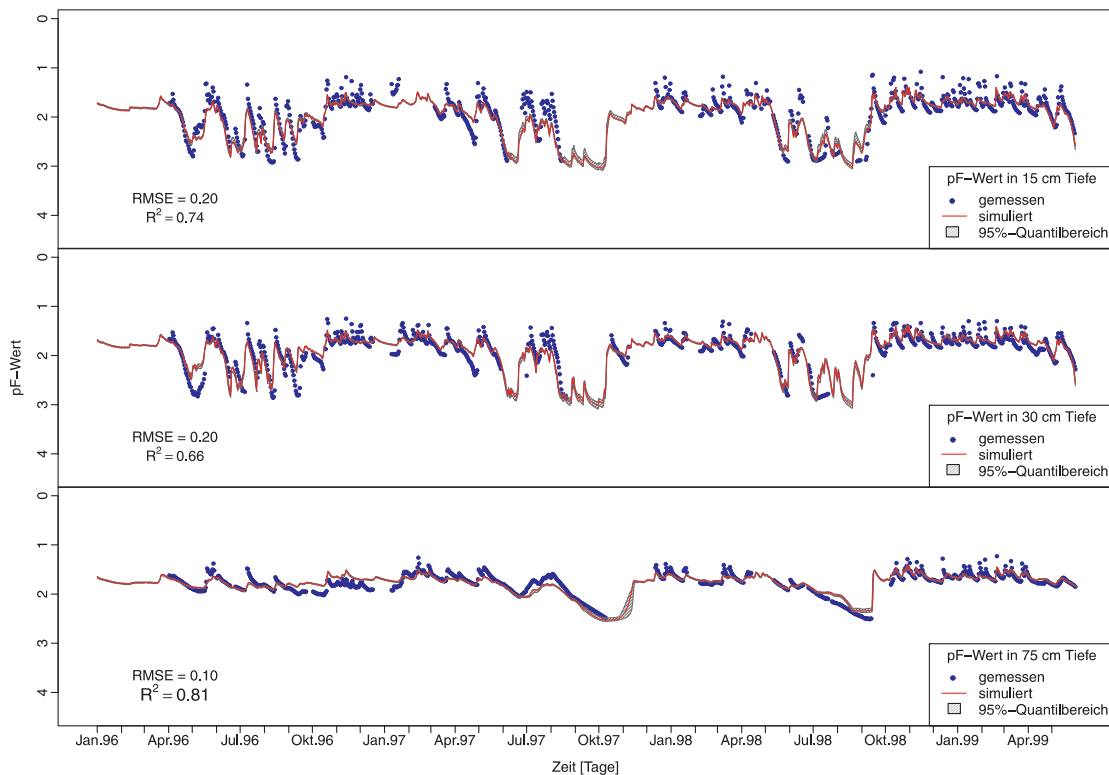


Abbildung 27: Ergebnisse der SCEM-UA Parameteroptimierung und -unsicherheit der Matrixpotenziale ψ_m für den ψ_m -Ansatz des Fichtenplots.

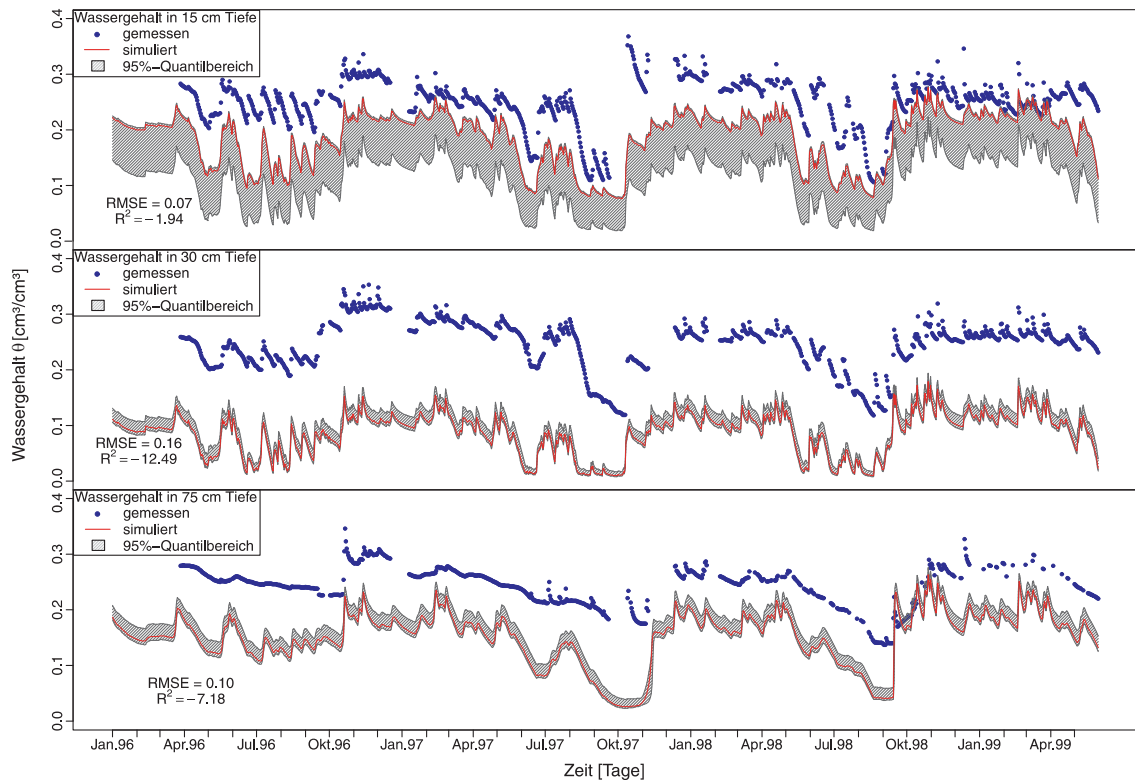


Abbildung 28: Ergebnis der SCEM-UA Parameteroptimierung und –unsicherheit der Wassergehalte θ für den ψ_m -Ansatz des Fichtenplots.

4.2.2.1.3 Hüllkurven-Ansatz

Für den Hüllkurven-Ansatz wurden die 10 sensitiven Modellparameter aus der RSA für den θ durch den SCEM-UA-Algorithmus optimiert. Eine Unterscheidung der beiden Ansätze ist nur auf die modifizierte Gütefunktion R^2 (Gl.3.55 & 3.56) zurückzuführen. Daher können die Ober- und Untergrenze des Parameterraums, sowie die Festlegung der algorithmischen Parameter für die Parameteroptimierung und –unsicherheit mit dem SCEM-UA-Algorithmus aus der Tabelle 13 und der Tabelle 14 (siehe 4.2.2.1.2) entnommen werden. In Abbildung 29 ist die Evaluierung des GR-Konvergenzkriteriums dargestellt. Nach einer Aufwärmphase von etwa 40000 Iterationen erreichen die GR-Werte der einzelnen Modellparameter eine stationäre *Posteriori*-Verteilung. Ebenfalls wird ersichtlich, dass im Verlauf der letzten 20000 Iterationen die GR-Werte der Modellparameter GLMAX, n3 und n4 den Grenzwert teilweise kurz überschreiten, sich aber insgesamt stationär verhalten.

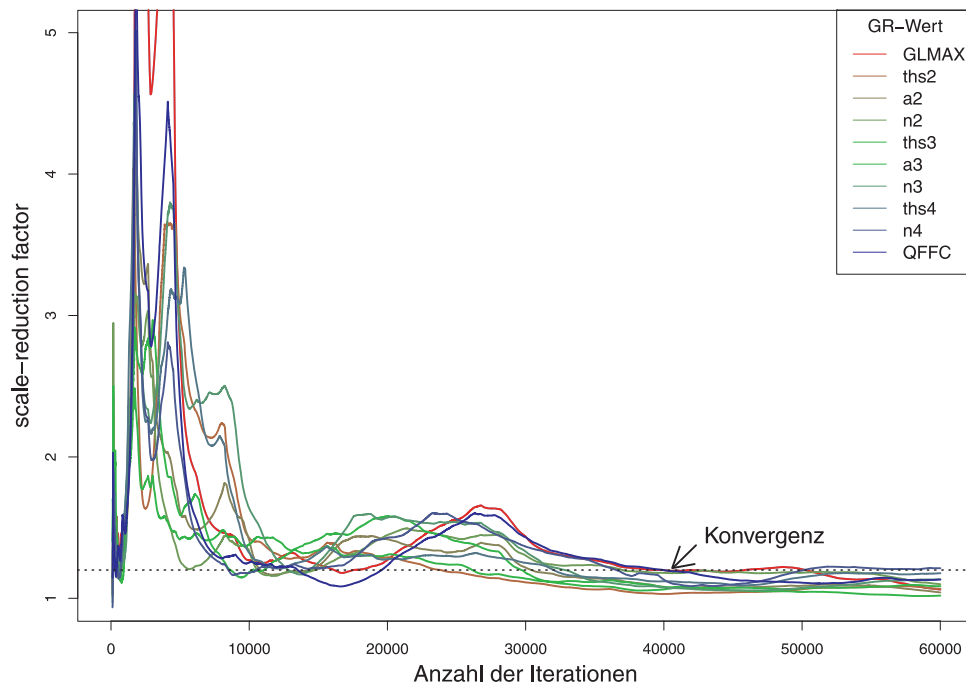


Abbildung 29: Evaluierung des Konvergenzverhaltens der untersuchten Modellparameter mit dem Gelman-Rubin Kriterium für den Fichtenplot mit dem Hüllkurven-Ansatz.

Die Ergebnisse der Parameteroptimierung und -unsicherheit anhand des SCEM-UA Algorithmus für den Hüllkurven-Ansatz werden in Abbildung 30 für den θ und Abbildung 31 für das ψ_m wiedergegeben. Für die Ergebnisse der Wassergehaltssimulationen ergeben sich im Vergleich zum θ -Ansatz kaum Unterschiede im Bezug auf die Modelleffizienz und den Verlauf der simulierten θ . Bei Betrachtung der Ergebnisse der simulierten ψ_m je Tiefstufe wird jedoch ersichtlich, dass sich die Modelleffizienz R^2 über alle drei Tiefen verbessert hat, was besonders für die Tiefe 15 cm und 30 cm der Fall ist. Die Güte der Anpassung beträgt in 15 cm einem R^2 von 0.54, in 30 cm 0.34 und in 75 cm 0.44. Im Vergleich zu den Ergebnissen des θ -Ansatzes zeigt sich, dass die pF-Werte nun insgesamt etwas kleiner ausfallen und damit im Vergleich zu den gemessenen Werten durch die Modellkalibrierung nicht so stark überschätzt werden. Die Zeit von Anfang Juli bis Ende September 1997 bildet eine Ausnahme, dort werden die pF-Werte durch die Modellkalibrierung in allen Tiefen stark überschätzt.

Generell lässt sich aber zusammenfassen, dass durch die Modifikation der NASH und SUTCLIFFE Gütefunktion für die Berechnung der posteriori Verteilung der Parameter im SCEM-UA Algorithmus eine Parameteroptimierung der Modellkalibrierung für beide gemessenen Outputgrößen erreicht werden kann. Für die Parameterunsicherheit des Hüllkurven-Ansatzes ergab sich für beide Simulationsgrößen aus dem 95%-

Quartilbereich ein enges Band, welches nur teilweise die gemessenen Outputgrößen mit einschloss.

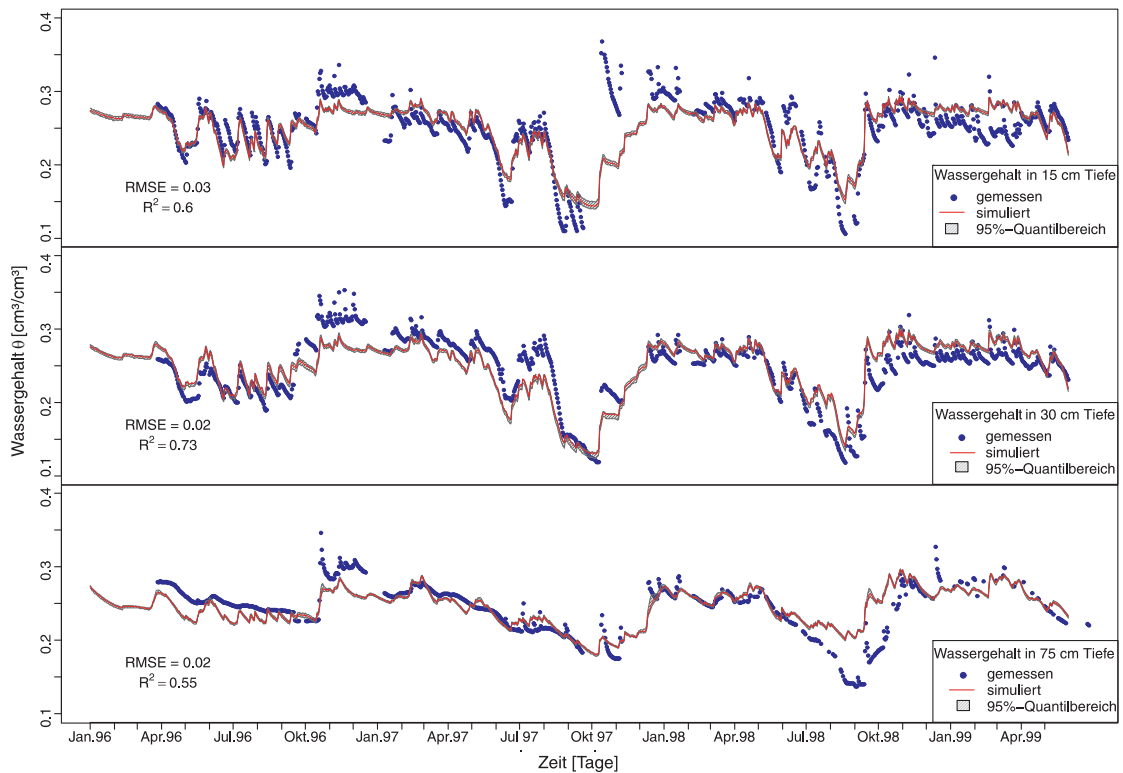


Abbildung 30: Ergebnisse der SCEM-UA Parameteroptimierung und –unsicherheit der Wassergehalte θ für den Hüllkurven-Ansatz des Fichtenplots.

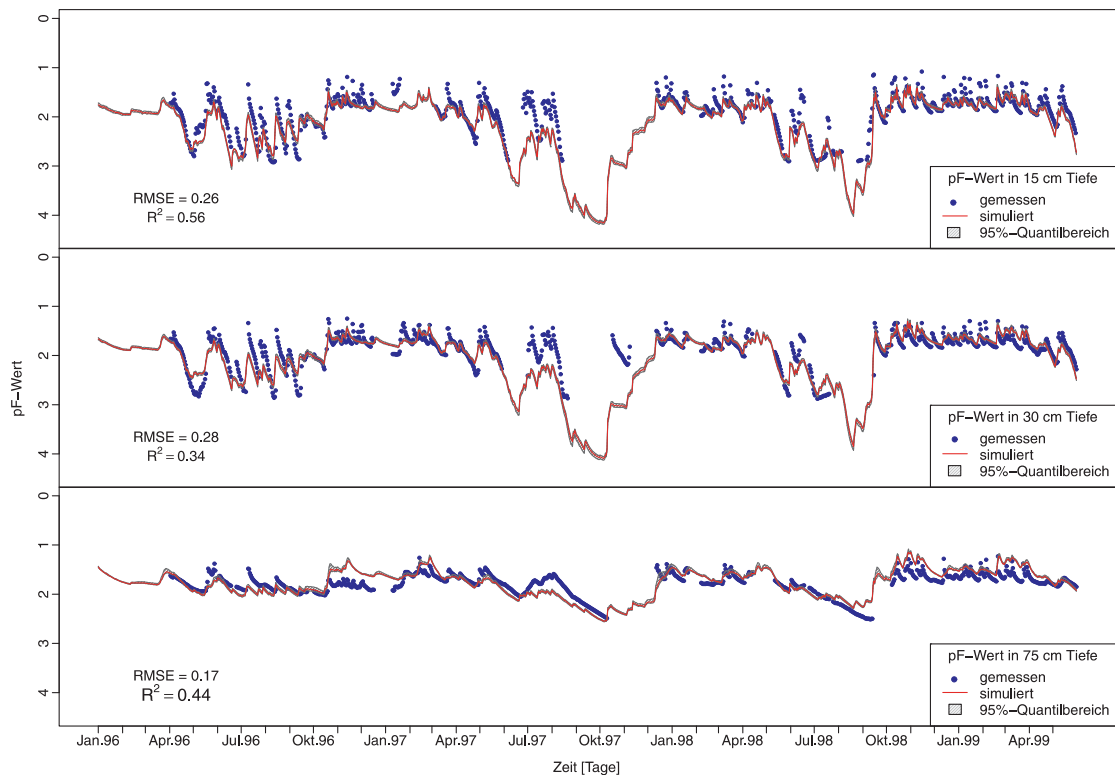


Abbildung 31: Ergebnisse der SCEM-UA Parameteroptimierung und –unsicherheit der pF-Wert für den Hüllkurven-Ansatz des Fichtenplots.

Fazit inverse Parameterbestimmung und Parameterunsicherheit

Die Ergebnisse der erreichten Modellgüte für alle drei Ansätze werden in Tabelle 15 zusammengefasst. Im Bezug auf das Teilziel dieser Untersuchung, eine Modellkalibrierung für beide Outputgrößen θ und ψ_m in allen drei Tiefen zu erstellen, hat sich folgendes für die 3 Ansätze herausgestellt:

- Die Ergebnisse der Modellkalibrierung des θ -Ansatzes zeigen, dass eine gute Anpassung an die gemessenen θ für alle 3 Tiefen realisiert werden konnte. Eine gleichzeitige Wiedergabe der gemessenen ψ_m konnte durch den Ansatz nur für die Tiefe 75 cm gefunden werden.
- Die Ergebnisse der Modellkalibrierung des ψ_m -Ansatzes belegen, dass eine gute Übereinstimmung der gemessenen und simulierten pF-Werte erreicht werden konnte. Bei der Betrachtung der gleichzeitig simulierten θ wird deutlich, dass die gemessenen θ nur unzureichend durch die Modellkalibrierung nachgebildet werden können.
- Die Ergebnisse des Hüllkurven-Ansatzes liefern sowohl für die simulierten θ , als auch für die ψ_m für alle Tiefen eine akzeptable Übereinstimmung mit den gemessenen Outputgrößen.

Das Band der errechneten Parameterunsicherheit aller drei Ansätze deckte sich nicht mit den gemessenen Werten, was darauf hinweist, dass eine Verbesserung der Modellstruktur oder Messung/Messdaten zu einer präziseren Vorhersage führen könnte. Für den Hüllkurven-Ansatz konnte über die Optimierung der 10 sensitiven Modellparameter des θ und der Vorgabe eines aus den Messdaten abgeleiteten „Hüllbereich“ für die simulierte pF-Kurve je Tiefe eine deutliche Verbesserung der Modellgüte für die pF-Werte festgestellt werden. Generell wird aber deutlich, dass die Messdaten wesentlich unruhiger verlaufen, als die simulierten Outputgrößen. Die gemessenen Outputgrößen weisen darüber hinaus besonders nach einer Befeuchtung viel höhere Maximalwerte des θ bzw. Minimalwerte des ψ_m auf. Ein möglicher Grund für dieses Verhalten kann durch die starke Bodenheterogenität und das Vorhandensein von Makroporen hervorgerufen werden, welche durch das Modell nur unzureichend abgebildet werden können. Auch ist nicht auszuschließen, dass durch Makroporen um den Messwertgeber herum der Rückgang bzw. der Anstieg für Austrocknungs- und Wiederbefeuchtungsphasen deutlich stärker ausgeprägt sind als in der eigentlichen Bodenmatrix. Dieses ist insbesondere für die Messtiefen 15 cm und 30 cm der Fall.

Tabelle 15: Ergebnisse des Gütemaßes des besten Parametersatzes aus den jeweiligen Parameteroptimierungen mit SCEM-UA für den Fichtenplot.

Output	Gütekriterium	NSE	NSE	NSE	NSE _{Gesamt} *
	Tiefe	15 [cm]	30 [cm]	75 [cm]	
Wassergehalt	WC	0.63	0.73	0.55	0.64
	MP	0.22	0.02	0.43	
Matrixpotential	WC	-1.94	-12.49	-7.18	0.74
	MP	0.74	0.66	0.81	
Hüllkurven- Ansatz Fichte	WC	0.60	0.73	0.55	0.81
	MP	0.56	0.34	0.44	

* Normiertes Gütemaß aus SCEM-UA als Mittelwert für alle drei Tiefen

4.2.2.2 Buchenplot

4.2.2.2.1 Hüllkurven-Ansatz

Nach erfolgreicher Anwendung des Hüllkurven-Ansatzes am Fichtenplot wurde diese Vorgehensweise auch für den Buchenplot durchgeführt. Die zu optimierenden Modellparameter des Buchenplots wurden aus der Sensitivitätsanalyse für den θ des Fichtenplots übernommen. Im Gegensatz zur Fichte, wirft die Buche im Herbst ihre Blätter ab und beeinflusst damit über den Parameter LAI die Berechnung der Transpiration beträchtlich. Daher wurde für die Parameteroptimierung des Buchenplots der Modellparameter LAImax hinzugefügt. Die Modellparameter und ihre dazugehörigen Ober- und Untergrenzen des Parameterraums sowie die algorithmischen Parameter für SCEM-UA sind den Tabellen im Anhang zu entnehmen (siehe Tabelle A. 4 und Tabelle A. 5). Nach einer Aufwärmphase von etwa 45000 Iteration wurden stationäre Verhältnisse für die einzelnen GR-Werte der Modellparameter erreicht (siehe Abbildung A. 10). Die nachfolgenden Iterationen bildeten somit den Stichprobenumfang für die Berechnung der Parameterunsicherheit. Die Ergebnisse der Parameteroptimierung mit dem SCEM-UA Algorithmus und die Parameterunsicherheit sind in der Abbildung 32 dargestellt.

Für den zweijährigen Simulationszeitraum von 2009 bis 2010 wurde sowohl für die θ als auch für die pF-Werte eine gute Übereinstimmung zwischen den simulierten und gemessenen Werten gefunden. In Abbildung 32 (A) sind die θ für die Messtiefen 30 cm und 60 cm dargestellt. In den Messtiefen von 30 cm und 60 cm wird ein R^2 von 0.81 und 0.79 sowie ein RMSE von 0.02 erreicht. Die Dynamik der Messwerte je Tiefe kann durch die Simulation tendenziell gut wiedergegeben werden. Die Entwässerungsphasen im Sommer 2009 können durch die simulierten θ nicht so gut reproduziert werden, wie für den Sommer 2010. Auch hier zeigt sich, dass die simulierten θ nicht in der Lage sind

die absoluten minimalen Messwerte, welche im Sommer erreicht werden, abzubilden. In der Messtiefe 30 cm werden von Mitte Mai bis Anfang Juli 2009 die θ durch die Simulation deutlich unterschätzt. Von Juli bis August 2009 überschätzt die Simulation den θ . Für die Wiederbefeuchtungsphase im Herbst (2009) zeigt sich, dass die Simulationen in beiden Bezugstiefen die starken Schwankungen des θ nicht wiedergegeben werden können und erst ab Mitte Dezember das Niveau der gemessenen θ wieder erreichen. Die zweite Wiederbefeuchtungsphase im Jahre 2010 konnte aufgrund von Messwertfehlern nicht mit einbezogen werden.

In Abbildung 32 (B) werden die simulierten und gemessenen pF-Werte dargestellt. Durch die analogen pF-Meter und der Kalibrierungsproblematik (siehe 3.3.2) umfasste die Datengrundlage für den kurzen Kalibrierungszeitraum deutlich weniger Daten. Für die Tiefe 30 cm wurde durch die Modellkalibrierung ein R^2 von 0.53 und für 60 cm ein R^2 von 0.45 erreicht. Für beide Tiefen wurden die pF-Werte durch die Modellkalibrierung von Januar bis Anfang Mai 2009 überschätzt. Auch hier zeigt sich für die Tiefe 60 cm im Zeitraum von Juli bis August 2009, dass die Simulation analog zum θ den pF-Wert unterschätzt. Die starken Fluktuationen der gemessenen pF-Werte in der Wiederbefeuchtungsphase im Herbst 2009 werden durch die Simulation (30 und 60 cm) nicht befriedigend nachgebildet. Für den Rest des Kalibrierungszeitraumes werden die Dynamik und das Niveau der pF-Werte durch die Simulation gut reproduziert. Die Zunahme der pF-Werte im Sommer wird allgemein besser nachgebildet als für den Fichtenplot. Die pF-Meter liefern Messwerte, die weit über den oberen Messwertbereich der Tensiometer (-850 hPa) hinaus reichen und gewährleisten somit eine verbesserte Datengrundlage in Trockenphasen für die Modellkalibrierung. Der Hüllkurven-Ansatz hat für beide Standorte gezeigt, dass eine Modellkalibrierung beider Outputgrößen über die Optimierung der sensitiven Modellparameter für den θ und einer aus den Messwerten abgeleiteten Hüllkurve für die simulierte pF-Kurve möglich ist. In Abbildung 33 sind die *posteriori* Parameterverteilung aller 4 Optimierungsläufe mit SCEM-UA dargestellt. Man kann erkennen, dass sich für die einzelnen Ansätze verschiedene Parameterverteilungen ergeben. Ein direkter Vergleich der Verteilungen ist im eigentlichen Sinne nur für den θ - und den Hüllkurven-Ansatz möglich. Aus der Abbildung geht hervor, dass insbesondere die bodenhydraulischen Parameter sich im Bezug auf ihren Parameterbereich, bis auf die Ausnahme für n_2 , deutlich unterscheiden.

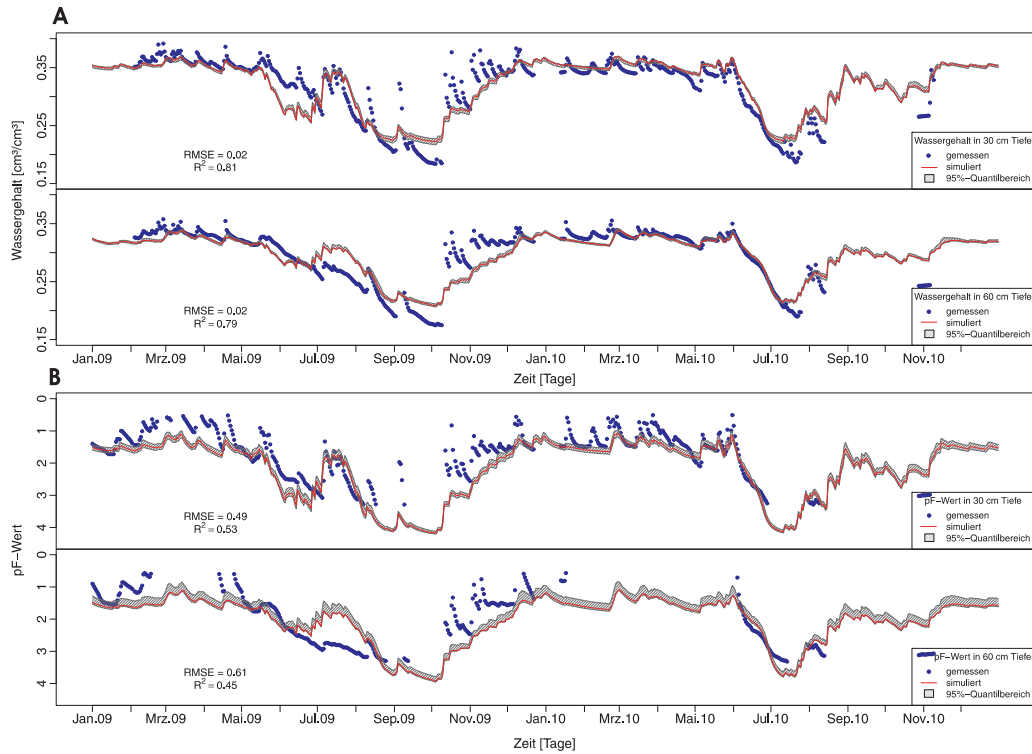


Abbildung 32: Ergebnisse der SCEM-UA Parameteroptimierung und –unsicherheit der θ (A) und ψ_m (B) für den Hüllkurven-Ansatz des Buchenplots.

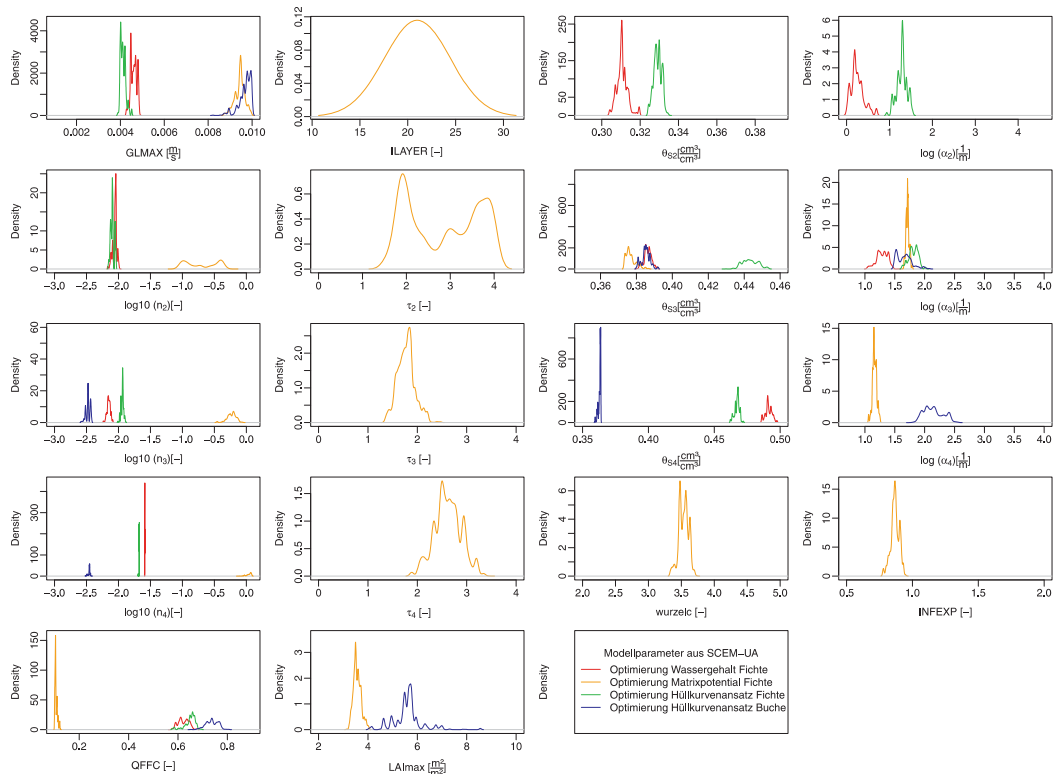


Abbildung 33: Vergleich der posteriori Wahrscheinlichkeitsverteilung für die untersuchten Modellparameter aus dem SCEM-UA Optimierungsverfahren für die verschiedenen Ansätze des Fichten- (Fi) und Buchenplot (Bu). Die rote Linie kennzeichnet die Optimierung der Parameter aus dem Wassergehalt θ -Ansatz (Fi), orange Matrixpotential ψ_m -Ansatz (Fi), grün (Fi) und blau (Bu) des Hüllkurven-Ansatzes.

4.3 Modellevaluierung

4.3.1 Fichtenstandort

Die Modellevaluierung des Fichtenplots (Hüllkurven-Ansatz) wurde für eine Zeitreihe von 3 Jahren durchgeführt. Auch wurde für die Modellevaluierung eine einjährige Aufwärmphase (2007) vorgeschaltet.

Die Ergebnisse der Modellevaluierung sind für die drei Tiefen des θ in Abbildung 34 und für das ψ_m (als pF-Wert) in Abbildung 35 dargestellt. Die Güte der Modellevaluierung in 15 cm Tiefe liegt bei einem R^2 von 0.62 und entspricht damit der Modelleffizienz aus der Modellkalibrierung. Für die Tiefe 30 cm ergibt sich aus der Modellevaluierung ein R^2 von 0.05. Es ist zu erkennen, dass bis Mitte Juni 2008 die θ durch das Modell gut wiedergegeben werden konnten. Nach einem fast viermonatigen Datenausfall in allen Tiefen überschätzt das Modell den θ in 30 cm für den Rest des Evaluierungszeitraumes deutlich im Niveau. Die Dynamik der θ wird jedoch gut wiedergegeben. Die Messwerte aus der Tiefe in 75 cm können nicht für die Modellevaluierung verwendet werden, da es sich bei den Messungen offensichtlich um Fehlwerte handelt. Nachforschungen haben ergeben, dass die Messwerte seit 2006 im Niveau nur noch zwischen 17 mm und 20mm variieren. Der saisonale Verlauf des θ ist trotz der Einschränkungen im Niveau noch zu erkennen.

Mögliche Erklärung für dieses Verhalten kann auf einen Kabeldefekt oder auf eine fehlerhafte Kalibrierung nach neuem Einbau des Messwertgebers zurückgeführt werden. Die Modellevaluierung für die pF-Werte besitzen eine Modelleffizienz $R^2 < 0.06$. Die Evaluierungsdatensätze der gemessenen pF-Werte waren für die Tiefen 30 cm und 75 cm deutlich reduziert (Messfehler/Datenausfall). Die Simulation wird in 15 cm und 75 cm Tiefen ab Ende 2008 bis Mitte 2010 zeitweise deutlich unterschätzt.

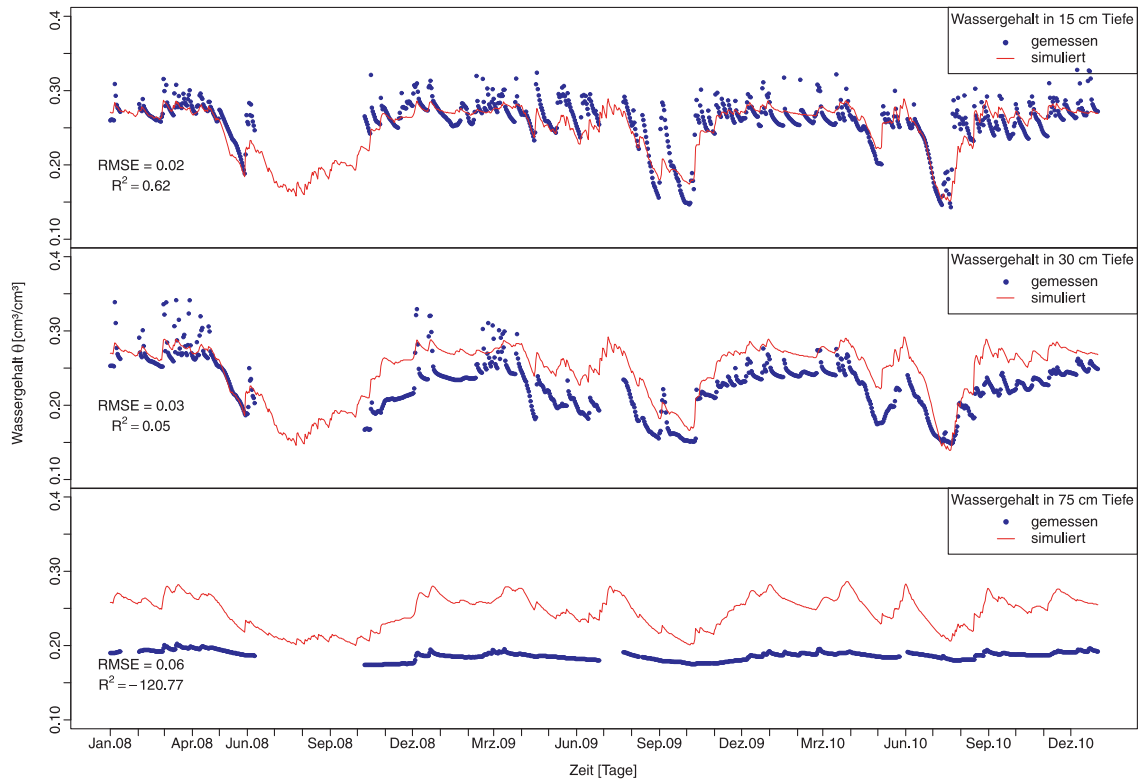


Abbildung 34: Ergebnisse der Modellevaluierung für das Wassergehalt θ in 15, 30, und 75 cm Tiefe des Fichtenplots für den Zeitraum 01.01.2008 bis 01.02.2010.

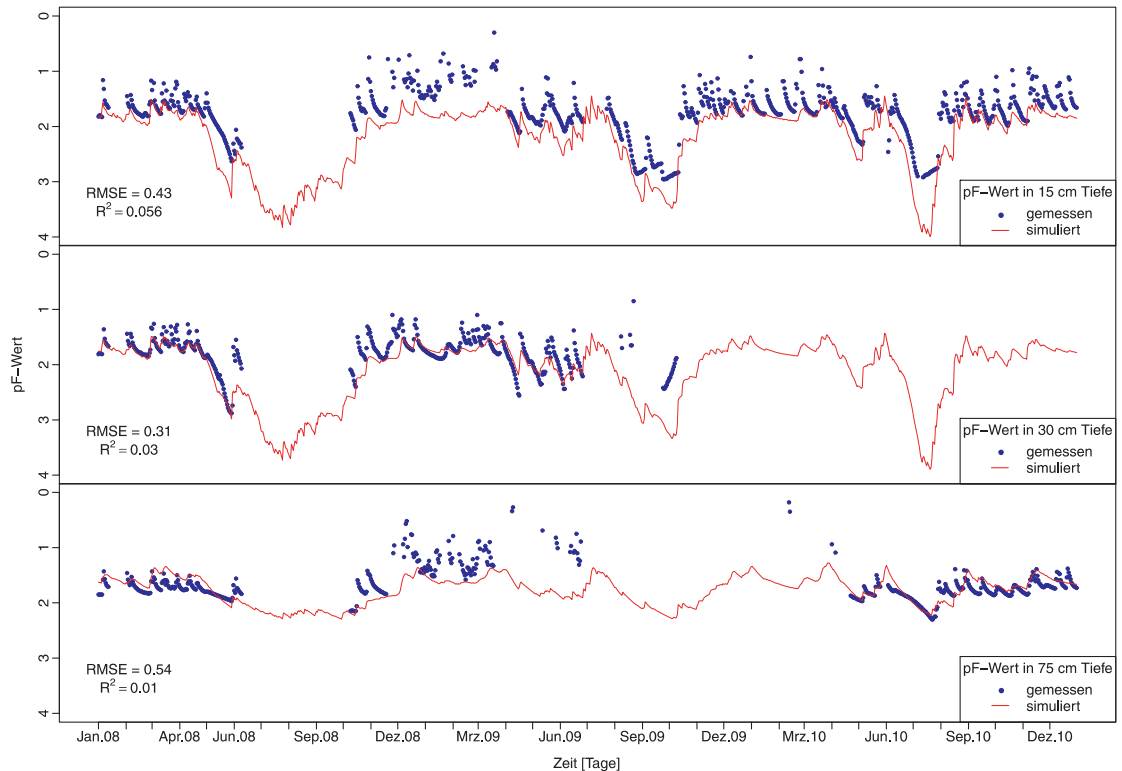


Abbildung 35: Ergebnisse der Modellevaluierung für die Matrixpotenziale ψ_m in 15, 30, und 75 cm Tiefe des Fichtenplots für den Zeitraum 01.01.2008 bis 01.02.2010.

4.3.2 Buchenstandort

Für die Modellevaluierung des Buchenplots ergab sich aus der Datengrundlage eine etwa halbjährige Messreihe, welche unmittelbar nach Installation der Messwertgeber vor Ort begann. Darüber hinaus wurde durch eine fehlerhafte Programmierung des Datenloggers der FDR-Sonden, der θ in beiden Tiefen bis Anfang Februar 2009 ohne Kommastellen aufgezeichnet. Das Gütemaß der Modellevaluierung zeigt für den θ in der Tiefe 30 cm ein $R^2 < 0$ und in 60 cm 0.59. Es wird ersichtlich, dass die simulierten θ durch das Modell bis Anfang Oktober stark unterschätzt werden, jedoch ab Dezember 2009 bis Anfang Februar 2009 eine gute Übereinstimmung finden. Für die pF-Werte ergibt sich ein ähnliches Bild, so werden die pF-Wert von Juni bis Ende Dezember durch das Modell stark überschätzt. Nur von November bis Dezember zeigt sich in 60 cm Tiefe eine Unterschätzung der Messwerte. Diese Unter- bzw. Überschätzung der θ bzw. pF-Werte im Sommer und Anfang Winter kann möglicherweise auf die Datengrundlage zurückgeführt werden. Eine plausible Erklärung dafür könnte sein, dass durch die Installation der Messwertgeber Ende Mai eine Beeinträchtigung der Feinwurzeln stattgefunden hat.

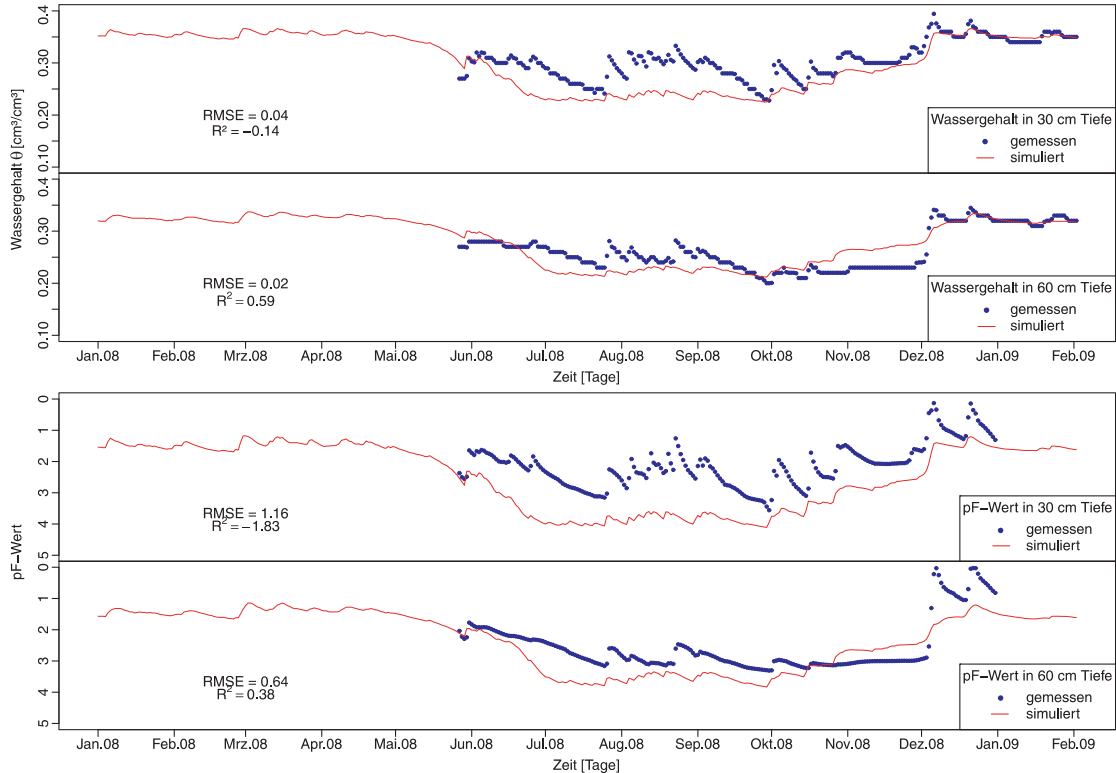


Abbildung 36: Ergebnis der Modellevaluierung für die Wassergehalte θ und Matrixpotenziale ψ_m in 30 cm und 60 cm Tiefe des Buchenplots für den Zeitraum 01.01.2008 bis 01.02.2009.

Durch eine Verletzung oder Abtrennung der Feinwurzeln wird der Einfluss der Transpiration auf die θ bzw. pF-Werte im Boden bis zur Ausbildung neuer Feinwurzeln im nächsten Frühling außer Kraft gesetzt. Eine verminderte Reduktion der θ bzw. pF-Werte durch Wegfallen der Transpiration könnte somit ein Grund für hohe bzw. niedrige Messwerte sein.

Fazit Modellevaluierung

Die Ergebnisse der Modellevaluierung für beide Standorte haben aus individuellen Gründen gezeigt, dass die in der Modellkalibrierung gefundene Güte der Modellierung nicht wiedergegeben werden kann. Aus Gründen der fehlerbehafteten kurzen Datenreihe für den Evaluierungszeitraum, steht eine eigentliche Modellevaluierung der Buchenfläche an einem valideren Datensatz noch aus. Für den Fichtenplot, ist sicher festzuhalten, dass eine bessere Datengrundlage wünschenswert gewesen wäre. Ausschlaggebend ist jedoch sicherlich auch der Aufbau des Messfeldes auf der Fichtenfläche der LUBW, der den räumlichen Zusammenhang der beiden Outputgrößen je Tiefe erschwert. Außerdem könnten durch Umbauten der Messwertgeber oder das Trockenjahr 2003 zu einer Veränderung der Bodenstruktur geführt haben.

4.4 Modellanwendung und Trockenstressanalyse

Eine Modellanwendung für einen 20-jährigen Retrospektivendatensatz von 1972 bis 1991 wurde für beide Standorte durchgeführt. Nach der Modellanwendung wurden die modellierten θ und ψ_m je Tiefe für eine statistische Auswertung der relevanten Trockenstressmerkmale genutzt. Für beide Standorte wurde die Anzahl, Dauer und Fehlmenge der Stressereignisse pro Jahr sowie die relative nutzbare Feldkapazität (nFk_r [-]) ermittelt. Als kritische Saugspannung wurde für beide Standorte ein ψ_m von -1300 hPa verwendet (PUHLMANN et al., 2010.), bei dem die Baumart (Buche) beginnt ihre Transpiration einzuschränken. Die kritische Saugspannung wurde in Wassergehalte umgerechnet und ist als θ_{krit} definiert.

4.4.1 Retrospektive

In Abbildung 37 ist die Anzahl der Stressereignisse pro Jahr (T_{krit}) und Berechnungstiefe für den Fichten- (A) und Buchenplot (B) dargestellt. Aus dem Interquartilabstand und dem Median wird ersichtlich, dass die Fichte bis in eine Tiefe von -0.3 m generell mehr T_{krit} aufweist als für die Buche. Ab einer Tiefe von -0.4 m gehen die T_{krit} für die Fichte zurück, was für die Buche nicht zutrifft.

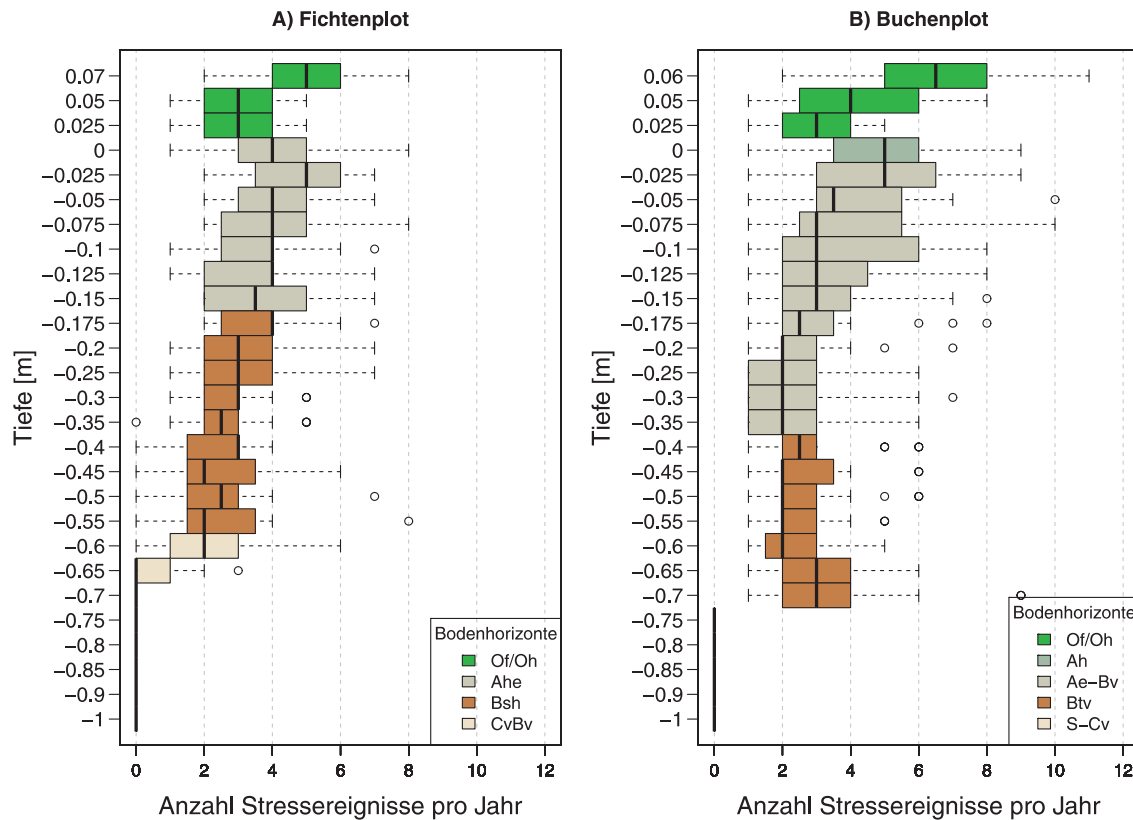


Abbildung 37: Anzahl der Stressereignisse pro Jahr und Tiefe für A) den Fichten- und B) den Buchenplot bei Heidelberg für den Zeitraum aus der Modellanwendung (1972 bis 1991).

Für den betrachteten Zeitraum zeigt sich außerdem, dass die Buche bis in eine Tiefe von -0,7 m in jedem Jahr mindestens ein T_{krit} aufweist, was für die Fichte im Vergleich nur bis zu einer Tiefe von -0,35 m der Fall ist. Aus den Interquartilabständen des Buchenplot sieht man, dass in niederschlagsarmen Jahren der Oberboden im extremen Fall bis zu 8-10 T_{krit} aufweisen kann und der der Fichte nur etwa 6-8 beträgt.

Für die Dauer der Stressereignisse (A_{krit}) pro Jahr zeigt sich, dass die Buche tendenziell länger unter dem Einfluss der Stressereignisse steht (Abbildung 38). Die Dauer der Stressereignisse bezieht sich dabei auf die Summe aller Tage pro Jahr, die Werte unter θ_{krit} aufweisen. Der Tiefenverlauf des Medianes für den Fichtenplot weist darauf hin, dass in den Bodenhorizonten Ahe und Bsh (bis -0,2 m) die längste Dauer an Stressereignissen von etwa 140 Tagen pro Jahr erreicht wird.

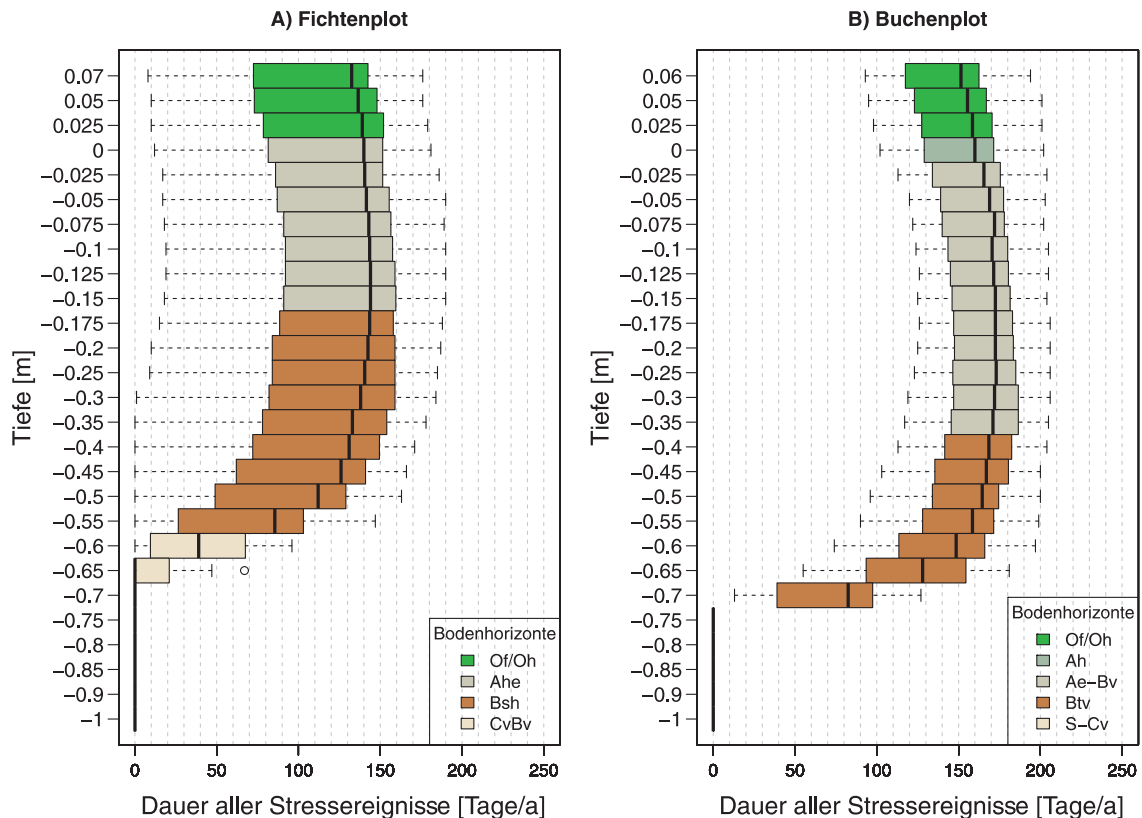


Abbildung 38: Dauer der Stressereignisse pro Jahr und Tiefe für A) den Fichten- und B) den Buchenplot bei Heidelberg für den Zeitraum aus der Modellanwendung (1972 bis 1991).

Für die Buche ergibt sich ein ähnliches Bild, wobei die A_{krit} , wie schon für die Anzahl der Stressereignisse gezeigt hat, bis in tiefere Bodenbereiche (-0.4 m) vordringt. Im Vergleich zur Fichte weisen die Mediane der Buche auf eine längere Dauer der Stressereignisse pro Jahr hin und betragen noch bis zu einer Tiefe von -0.4 m etwa 170 Tage. Aus den unteren Whiskern des Fichtenstandorts geht hervor, dass die Fichte in eher feuchten Jahren nur eine sehr kurze Dauer der Stressereignisse von etwa 20 bis 30 Tage pro Jahr im Oberboden und nur geringe bis keine im Unterboden aufweist. Für die Buche hingegen zeigt sich, dass im Oberboden die Stressereignisse mindestens 120 Tage pro Jahr betragen und bis in eine Tiefe von -0.65 m des Unterbodens nur einen schwachen Rückgang aufweisen.

In Abbildung 39 sind die Fehlmengen in mm pro Jahr und Mächtigkeit über die Tiefe in A) für die Fichte und in B) für die Buche abgebildet. Das Wasserdefizit des Auflagehorizontes erscheint für beide Standorte sehr groß und ist durch die unsicheren hydraulischen Parametern und die grobe Diskretisierung in der Modellierung nur eingeschränkt zu interpretieren. Aus der erschwerten Probenahme/Messung des lockeren Materials ergeben sich Unsicherheit, welche dazu geführt haben, dass es allgemein noch sehr wenig Studien gibt, die sich mit den hydraulischen Eigenschaften von Auflagen

auseinandersetzen (HAMMEL und KENNEL, 2001). Die Fehlmengen des Fichtenplots zeigen für den mineralischen Boden einen maximalen Bereich bei etwa -0.05 m bis -0.175 m an, wo ein Defizit von etwa -45 mm/m a erreicht wird. Danach nimmt die Fehlmenge bis hin zum CvBv stetig ab. Das Gesamtdefizit pro Jahr beträgt für die Fichte 31 mm im Bezug auf die Mächtigkeit der Durchwurzeltenraums (Medianwert).

Die Fehlmengen der Buche lassen für den Oberboden ein etwas höheres Defizit erkennen als bei der Buche, das bis etwa -0.175 m konstant bei 1.3 mm/a liegt. In der Tiefe von -0.2 m bis -0.35 m befindet sich der maximal Bereich des Wasserdefizits mit 60 mm/m a. Ab dem Btv- Bodenhorizont nimmt das Wasserdefizit stetig ab und weist in einer Tiefe von -0.75 m kein Wasserdefizit mehr auf. Das Gesamtdefizit des des Durchwurzeltenbereichs des Buchenstandorts beträgt mit 43 mm/m a fast ein drittel mehr als bei dem Fichtestandort. Für die Einschätzung der Wasserversorgung der Fichte und Buche (siehe Abbildung 40 und Abbildung 41) kann durch die Darstellung der nFK_r im Gegensatz zu den rein jahresbezogenen statistischen Auswertungen der Trockenstressgrößen, die saisonale Ausprägung von Trockenstress über die Tiefe und Zeit besser sichtbar gemacht werden.

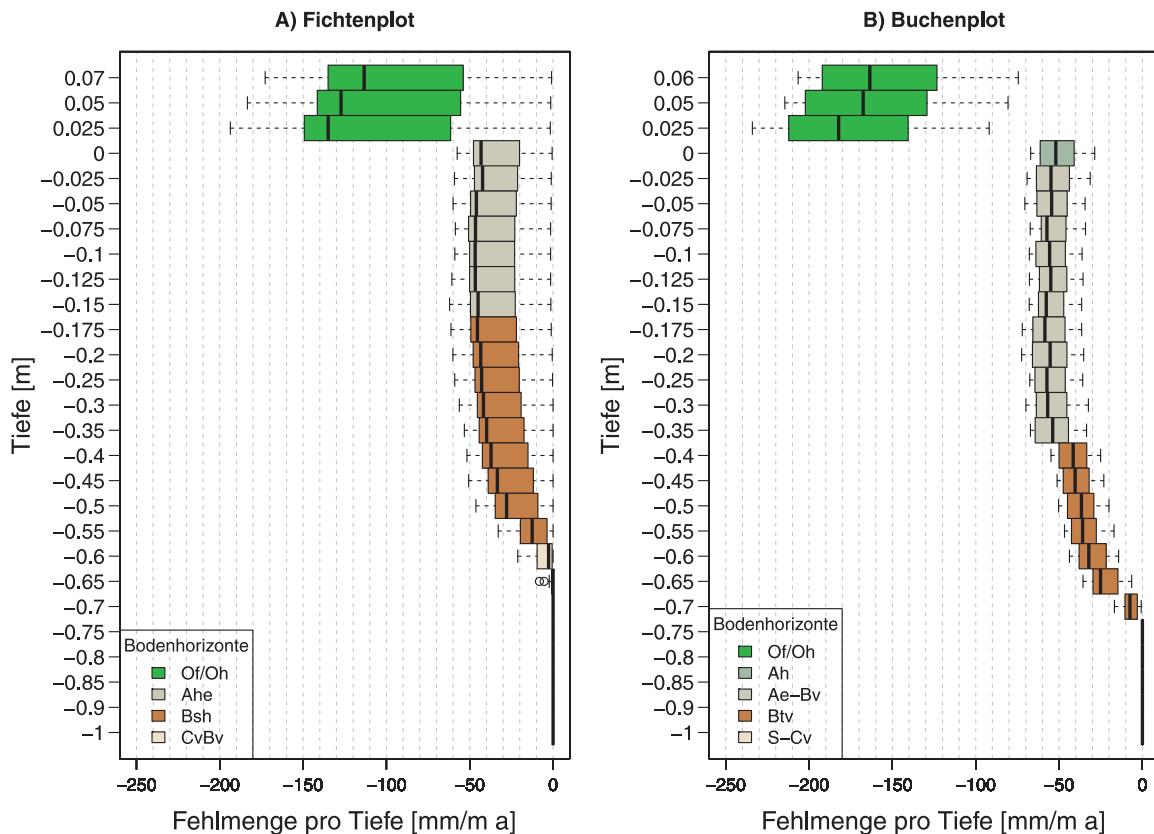


Abbildung 39: Wasserdefizit pro Jahr und Tiefe für A) den Fichten- und B) den Buchenplot bei Heidelberg für den Zeitraum aus der Modellanwendung (1972 bis 1991).

Im Vergleich stellt sich heraus, dass die Buche pro Saison längere und tiefer gehende geringe nFK_r aufweist als diese für die Fichte beobachtet werden kann. Nimmt man als Referenz den von GRANIER et al. (1999) vorgeschlagenen kritischen relative nFK (nFK_{krit}) von 0.4, so erkennt man, dass die Unterschreitung von 0.4 am Buchenplot deutlich tiefer reicht und um ein vielfaches länger dauert als für die Fichte.

Für die extremen Trockenjahre von 1976 (850 mm/a) und 1991 (800 mm/a), welche sich insbesondere durch die geringen sommerlichen Niederschlagssummen (1976 bei 200 mm/a und 1991 bei 110 mm/a) von auszeichnen, sieht man für die Buche, dass der Übergang im Bereich unter nFK_{krit} viel schneller von statten geht, als das für die Fichte der Fall ist. Aus dem Jahre 1987, welches eine große Jahresniederschlagssumme (1450 mm/a) und eher gleichmäßig verteilte Niederschläge über den Sommer aufweist, geht für die Fichte hervor, dass über den Sommer keine bzw. kaum eine Unterschreitung des nFK_{krit} vorkommt. Für die Buche hingegen sieht man, dass trotz der Niederschläge der kritische Schwellenwert gegen Ende des Sommers unterschritten wird. Für extreme Trockenjahre, wie z.B. 1976 oder 1991, die sehr geringe sommerliche Niederschlagsmengen aufweisen, werden für beide Baumarten tiefgehende und lang andauernde Unterschreitungen der nFK_{krit} sichtbar.

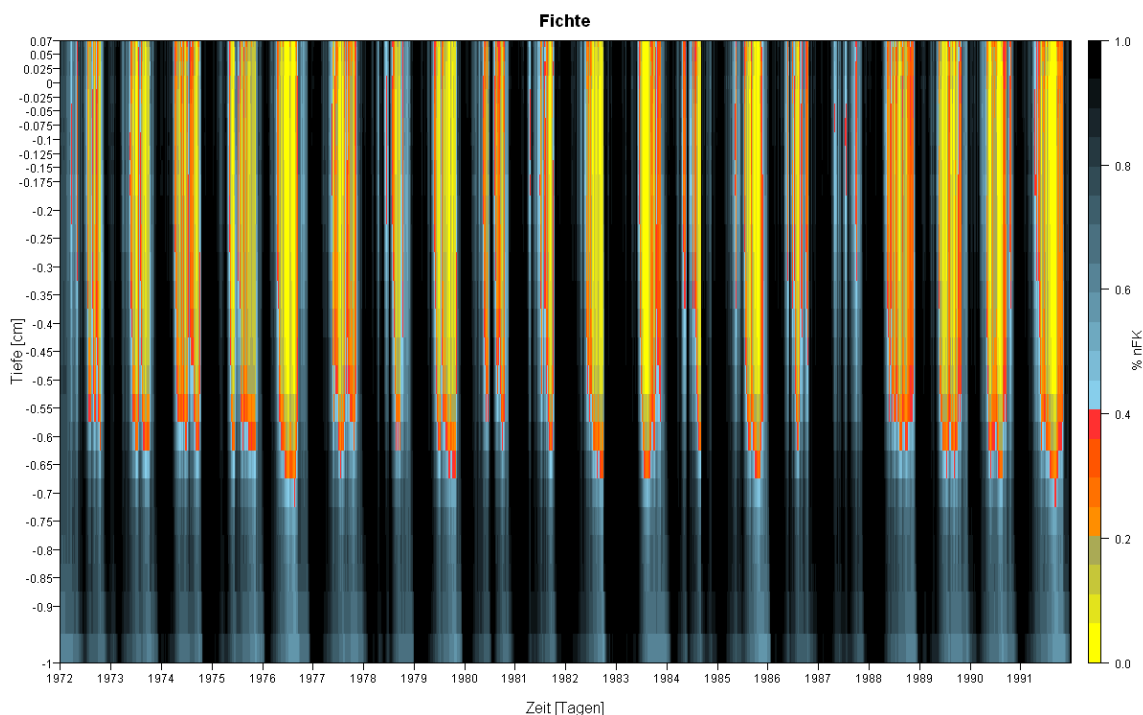


Abbildung 40: Verlauf der relativen nutzbaren Feldkapazität (nFK_r) über die Tiefe und den Zeitraum von 1972 bis 1991 für den Fichtenplot.

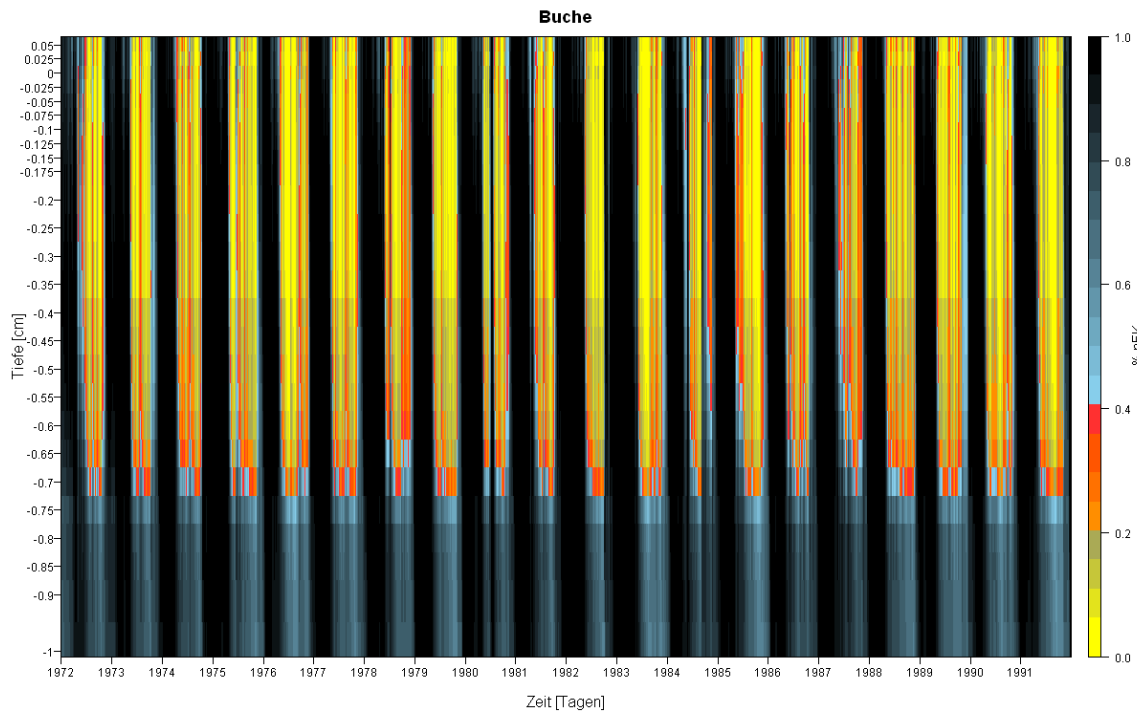


Abbildung 41: Verlauf der relativen nutzbaren Feldkapazität (nFK_r) über die Tiefe und den Zeitraum von 1972 bis 1991 für den Buchenplot.

Aus der Analyse der relevanten Trockenstressmerkmale wird ersichtlich, dass die Buche für den gesamten Zeitraum der 20 Jahre eine geringere Anzahl und eine längere Andauer der Stressereignisse als die Fichte aufweist, was darauf zurückzuführen ist, dass ein Trockenstressereignis für die Buche im Schnitt länger dauert als für die Fichte. Auch im Bezug auf das Wasserdefizit zeigte die Buche eine höhere Fehlmenge als die Fichte auf. Im nächsten Schritt wurden die Evapotranspirationskomponenten der beiden Baumarten betrachtet und in jährlich kumulierter Form dargestellt (Abbildung 42). Aus der Gesamtevpotranspiration (EVAP) wird deutlich, dass die Fichte (800 mm/a) im Jahresmittel etwas mehr Evapotranspiration aufweist als die Buche (750 mm/a). Aus dem kumulierten jährlichen Verlauf der Transpiration (TRAN) geht hervor, dass die Buche mehr Wasser für die Transpiration verbraucht und eine deutlichere Konzentration von Transpiration auf das Sommerhalbjahr aufweist als die Fichte. Die Evaporation aus dem Interzept für Regen (IRVP) beträgt für die Fichte doppelt so viel wie für die Buche und liegt bei etwa 300 mm pro Jahr. Aus dem Vergleich der kumulierten jährlichen Bodenverdunstung (SLVP) beider Baumarten erkennt man, dass die Buche im Mittel bei 100 mm/a und die Fichte bei etwa 50 mm/a liegen. Darüber hinaus ist für die Buche und in abgeschwächter Form für die Fichte, eine Einschränkung der Bodenverdunstung mit Beginn der Vegetationszeit zu erkennen.

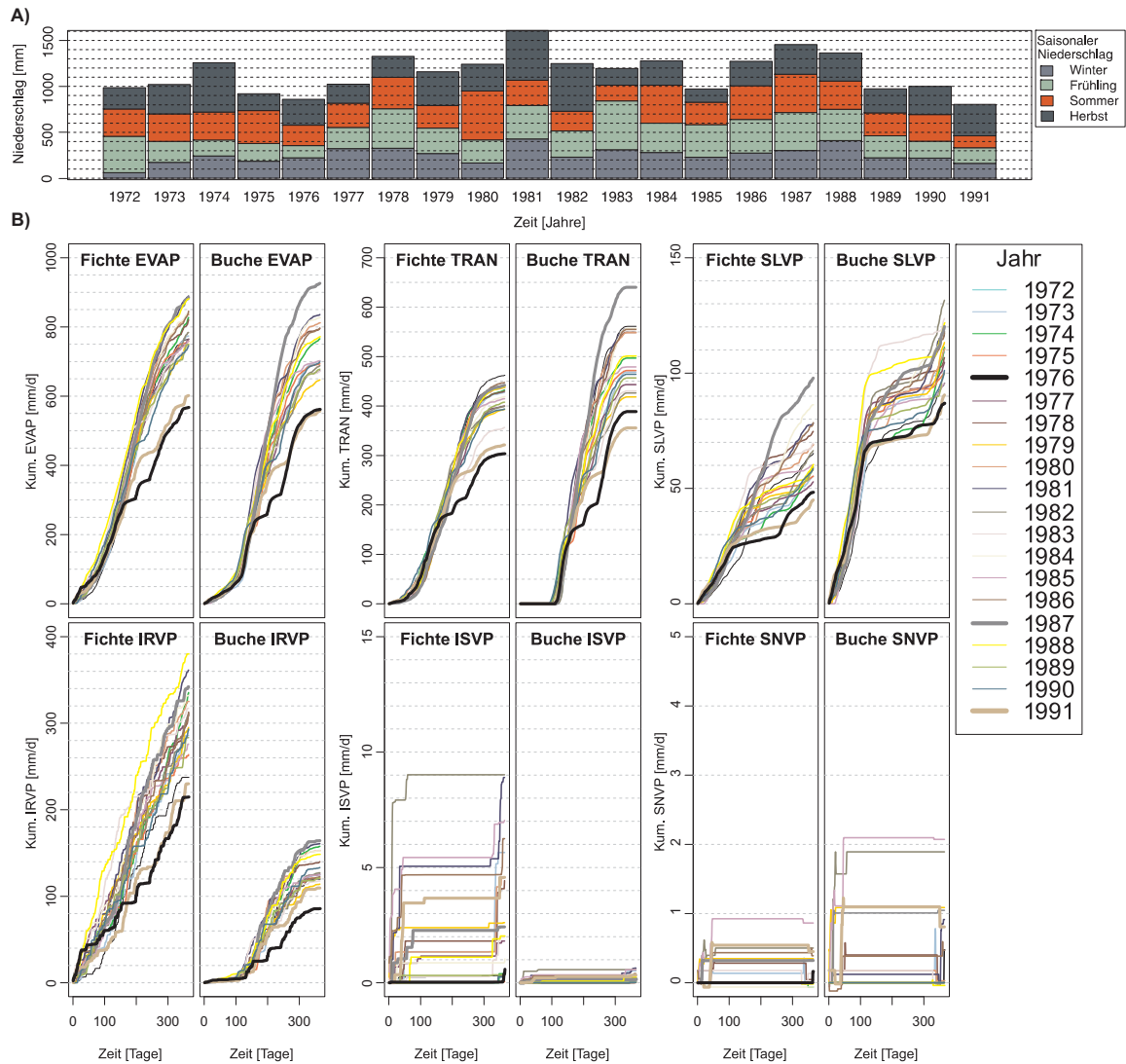


Abbildung 42: Saisonaler Jahresniederschlag A) und Aufteilung der jährlichen kumulierten Gesamtevapotranspiration (EVAP) B) in ihre einzelnen Komponenten, von Transpiration (TRAN), Evaporation des interzeptierten Regens (IRVP), Evaporation des interzeptierten Schnees (ISVP), Bodenevaporation (SLVP) und Schneeevaporation (SNVP) für den Zeitraum von 1972 bis 1991. Die Trockenjahre 1976 und 1991, sowie das feuchte Jahr 1987 wurden hervorgehoben.

Die stärkste Bodenverdunstung wird in der Vegetationslosezeit für die Buche erbracht, was darauf hin deutet, dass durch die Vegetationsbedeckung die Bodenverdunstung für die Zeit mit hohen Verdunstungsanforderungen im Frühling und Sommer limitiert ist. Dies würde auch die geringere Bodenverdunstung der immergrünen Baumart Fichte über das Jahr betrachtet erklären.

Für eine abschließende Bewertung des Bodenwasserhaushalts der beiden Standorte wurde in Abbildung 43 der Verlauf der relativen nFK des effektiven Wurzelraums (nFK_{rWe}) dargestellt. Aus den Baumarten spezifisch berechneten Grenzen der kritische nFK_r wird erkennbar, dass die Buche einen geringeren Bereich zwischen FK und kritischem nFK_{rWe} aufweist als dies für die Fichte der Fall ist. Der kritische nFK_{rWe}

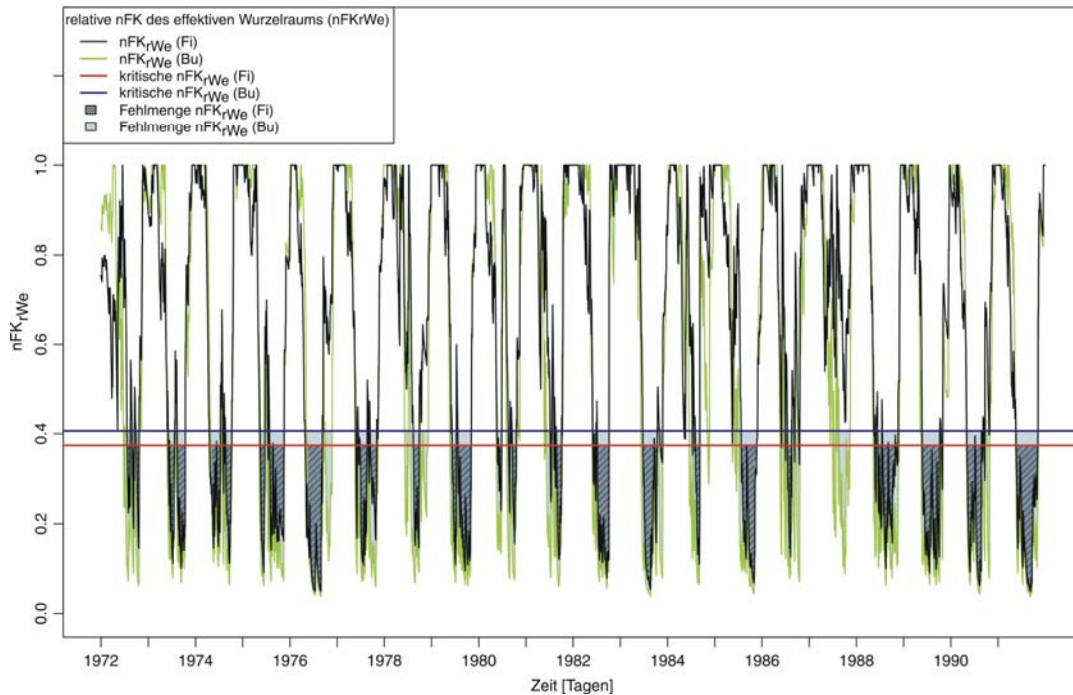


Abbildung 43: Verlauf der relativen nFK des effektiven Wurzelraums (nFK_{rWe}) für Fichte (schwarze Linie) und Buche (grüne Linie) über den Zeitraum von 1972 bis 1991 und die kritische nFK_{rWe} (blau=Buche und rot=Fichte), welche aus der kritischen Saugspannung von -1300 hPa abgeleitet wurde.

wurde über die kritische Saugspannung von -1300 hPa abgeleitet. Die Werte des kritischen nFK_{rWe} liegen für die Buche bei 0.4 und für die Fichte bei 0.38.

Fazit Trockenstress/Wasserdefizit

Aus den Ergebnissen der 20 jährigen Zeitreihe von 1972 bis 1991 hat sich gezeigt, dass die Buche im Vergleich zur Fichte unter deutlich mehr Trockenstresstagen pro Jahr steht. Die insgesamt länger andauernden Stressereignisse und die größere Durchwurzelungstiefe ermöglichen einen tiefer greifenden Trockenstress im Boden der Buche. Für die Fichte wird erkennbar, dass der Standort eher kurzzeitigen Stressereignissen ausgesetzt ist und sich im Bezug auf die geringer erreichten Tiefen als auch auf die dabei entstandenen kleineren Fehlmengen der Stressereignisse pro Jahr bemerkbar machen. Das Wasserdefizit im Boden liegt für die Buche um etwa 13 mm/m pro Jahr höher als für die Fichte.

Durch die Betrachtung der einzelnen Evapotranspirationskomponenten wurde ersichtlich, dass die Buche einen viel stärker auf das Sommerhalbjahr bezogenen Wasserbedarf aufweist als die Fichte. Die Buche gehört zu den wechselgrünen Baumarten und weist bis zum Anfang der Vegetationsphase fast ausschließlich Bodenverdunstung auf. Mit Beginn des Blattaustriebs steigt der Wasserbedarf über die hohen Transpirationsleistungen im April stark an und bleibt über die Vegetationszeit auf einem hohen Niveau bis zum

Blattabwurf im Herbst. Die jährliche Transpiration variiert innerhalb des Zeitraums von 1972 bis 1991 für die Buche von 388 mm/a bis 640 mm/a und für die Fichte von 300 mm/a bis 462 mm/a. FALK et al. (2008) gibt für zwei Fichtenstandorte auf Braunerde in Bayern eine langjährige mittlere Transpirationen von 379 mm/a bzw. 431 mm/a an. Für verschiedene Standorte der Buche in Nord Bayern finden sich Spannbreiten von 166 mm/a bis 349 mm/a (SCHMIDT, 2007). Ein direkter Vergleich der jährlichen Transpiration stellt sich jedoch aufgrund der unterschiedlichen klimatischen Verhältnisse und Standortseigenschaften der punktuellen Messungen als schwierig heraus.

Der Boden wird aufgrund der Vegetationsbedeckung und der damit einhergehenden Veränderung der Strahlungs- und Windverhältnissen im Bestand durch die Vegetation vor Verdunstung geschützt. Darüber hinaus könnte, durch eine starke Austrocknung im Frühling/Sommer die Humusaufgabe, die Bodenevaporation aufgrund der sehr geringen ungesättigten Leitfähigkeit eingeschränkt werden und kann nur noch durch geringe Mengen über die Diffusion erbracht werden. Die Fichte hingegen ist immergrün und weist dadurch einen besseren über das Jahr verteilten Gesamtverlust der Evapotranspiration auf.

Der höhere Trockenstress der Buche im Frühling/Sommer ist aber nicht allein durch die Transpiration zu erklären. Aus den Bodeneigenschaften beider Standorte geht hervor, dass die Buche eine geringere nFK_r zwischen FK und nFK_{krit} des effektiven Wurzelraums aufweist, welcher in Kombination mit der hohen saisonalen Transpirationsleistungen der Baumart, zu einer generell schlechteren Wasserversorgung und zu einer höheren Anfälligkeit für Trockenstress während der Vegetationszeit am Standort führt. Eine Auswirkung der Trockenstressereignisse auf die danach folgende Vegetationsperiode ist aus den Ergebnissen nicht zu erkennen. Somit reichen die Niederschläge im Herbst und Winter aus, um den Bodenwasserspeicher wieder zu füllen. Der für die Untersuchung verwendete kritische Schwellenwert des ψ_m aus PUHLMANN et al. (2010) zeigt nach einer Umrechnung in nFK_r eine gute Übereinstimmung mit dem von GRANIER et al. (1999) vorgeschlagenen kritischen nFK_r von 0.4.

4.4.2 Gruppierte Auswertung

In Anlehnung an die regionale Prognose des mittleren saisonalen Niederschlags für den Standort nach ARBEITSKREIS-KLIWA (2006) wurden jeweils 2 mögliche Fälle erstellt. Die gruppierte Auswertung wird für jeweils eine 4 jährige Periode für die Fichte und Buche ausgeführt, wobei Fall 1 für Jahre mit überdurchschnittlichen und Fall 2 für Jahre mit unterdurchschnittlichen Niederschlagssummen steht. Darüber hinaus sollten die Jahre einen feuchteren Herbst/Winter und eine trockeneren Frühling/Sommer aufweisen. Die jeweils 4 jährige Periode wurde auf die relevanten Stressgrößen Fehlmengen, Dauer und Anzahl der Stressereignisse untersucht (Abbildung 44). Aus der Darstellung geht für die Fichte hervor, dass für den Fall 2 die mittlere Anzahl und damit auch die mittlere Dauer der Stressereignisse über alle Tiefen zunimmt. Es entstehen jedoch kaum größere mittlere Fehlmengen für die Fichte, was darauf schließen lässt, dass durch unterdurchschnittliche Jahresniederschläge mit feuchten Herbst/Winter und trockenem Frühling/Sommer tendenziell mehr Stressereignisse hinzu kommen, aber kaum Auswirkungen auf die mittlere Fehlmenge pro Jahr haben.

Für die Buche ergibt sich aus dem Verlauf der mittleren jährlichen Dauer, dass sich Fall 1 und Fall 2 im Oberboden kaum unterscheiden, jedoch im Unterboden bei -0.76 m etwa im mittel 4-5 Stressereignisse statt finden. Aus der mittleren Anzahl der gesamten Tage mit Trockenstress pro Jahr wird deutlich, dass für Fall 2 eine Zunahme über alle Tiefen zu verzeichnen ist und sich bis zu einer Tiefe von -0.6 m mit etwa 10 [mm/m a] auf die mittleren jährlichen Fehlmengen auswirkt. Aus den Ergebnissen der gruppierten Auswertung kann festgehalten werden, dass sich für eine Abnahme der Niederschlagssummen im Frühling und Sommer nur für die Buche eine Verschlechterung des Bodenwasserhaushalts aufweist. Für die Fichte zeigte sich, dass ein Rückgang der Niederschlagssummen im Frühling/ Sommer keine Veränderung erbringt. Auch hier wird wieder deutlich, dass eine starke Zunahme der Transpiration der Buche zu einer Verschärfung des Trockenstress im Frühling/Sommer führen kann.

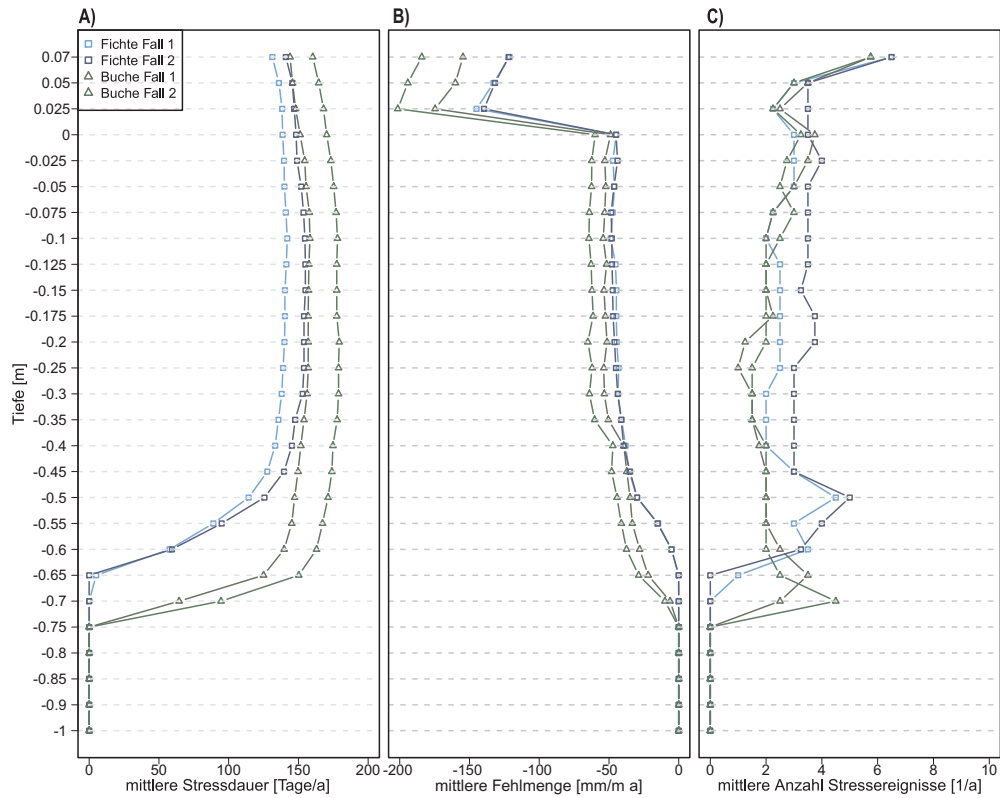


Abbildung 44: Gruppierte Auswertung einer jeweils 4 jährigen Periode für die Fichte und Buche, wobei Fall 1 für Jahre mit überdurchschnittlichem und Fall 2 für Jahre mit unterdurchschnittlichen Niederschlagssummen steht.

5 Schlussfolgerung und Ausblick

Im Rahmen der Klimafolgenforschungsprojekte der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württembergs werden auf den Level II-Flächen Daten zu Baumzustand und -wachstum, Nährstoffkreislauf, Stoffeintrag, Bodenzustand, Bodenvegetation sowie Meteorologie, also zur Dynamik von Umweltveränderungen erhoben. Unter anderem sollen an diesen Standorten in Baden-Württemberg das Auftreten von Trockenstressereignissen für die Hauptbaumarten Fichte und Buche untersucht werden.

Mit dem forsthydrologischen Modell LWF-Brook90 konnten die erhobenen Daten für die Quantifizierung hydrologischer Prozesse im System Boden-Vegetation-Atmosphäre genutzt und einen Einblick in den Wasserhaushalt zweier Waldstandorte gegeben werden. Die Voraussetzung gleicher klimatischer und geologischer Verhältnisse für beide Standorte, ermöglichte eine Interpretation der Resultate des Bodenwasserhaushalts auf den Unterschied in der Vegetation und den Bodeneigenschaften zurückzuführen.

Die Sensitivitätsanalyse hat gezeigt, dass für die Modellkalibrierung am gemessenen Wassergehalt θ oder Matrixpotential ψ_m unterschiedliche hydrologische und vor allem bodenhydraulische Modellparameter beteiligt sind. Die verwendete Sampling-Methode der Monte-Carlo-Simulation stellte sich als sehr rechenintensiv heraus, daher wird für weitere Untersuchungen vorgeschlagen eine effizientere Methode für die Generierung der Input-Parametersets wie z.B. die *Latin Hypercube Sampling*-Methode zu benutzen, welche über einen höheren Stichprobenumfang und intelligentere Zufallsziehungen ein robusteres Ergebnis liefern könnte. Eine interessante Fragestellung wäre auch, ob standortsabhängige Unterschiede in der Sensitivität der Modellparameter auf die Modellierung der Wassergehalte vorhanden sind.

Die Parameteroptimierung mit dem SCEM-UA Algorithmus erfolgte für drei verschiedene Ansätze. Die Ansätze Wassergehalt θ und Matrixpotential ψ_m bestätigten die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse und zeigten, dass durch eine reine Anpassung der sensitiven Parameter keine Modellkalibrierung gefunden werden konnte, die eine gute Übereinstimmung der beobachteten und simulierten Wassergehalte θ und Matrixpotentiale ψ_m hätte gewährleisten können. Unter Einbeziehung der Feld-pF-Charakteristik im Hüllkurven-Ansatz und einer modifizierten Gütefunktion für die

Berechnung der *posteriori*-Verteilung der Modellparameter im SCEM-UA-Algorithmus konnte eine zufriedenstellende Modellkalibrierung in allen Tiefen für beide Standorte erreicht werden. Für die Modellierung der Saugspannung im Boden hat sich gezeigt, dass durch die pF-Meter Messungen eine Verbesserung der Modellkalibrierung in der Entwässerungsphase erwirkt werden konnte und somit eine solidere Ausgangslage für die Analyse von Stressereignissen gewährleistet.

Die Unsicherheit der Modellergebnisse konnte jedoch nicht alleine auf die Parameterunsicherheit zurückgeführt werden. Somit könnten modellstrukturelle Unsicherheiten oder die Unsicherheit der Messdaten, welche zu der Beschreibung der Randbedingungen verwendet werden, einen besseren Überblick über die Unsicherheit der Modellergebnisse geben. SPANK (2010) hebt in seiner Studie hervor, wie wichtig die Betrachtung der Unsicherheiten der Eingangsdaten sind und zeigt beispielhaft für die Inputgröße Globalstrahlung, dass Messunsicherheiten einen großen Effekt auf die Modellergebnisse aufweisen.

Die Modellevaluierung konnte die guten Ergebnisse aus der Modellkalibrierung für den Fichtenplot nicht bestätigen. Für den Buchenstandort steht eine Modellevaluierung an valideren Datenzeitreihe noch aus.

Aus der Trockenstressanalyse für den Zeitraum von 1972 bis 1991 ergaben sich folgende wichtige Erkenntnisse für die Level II-Flächen bei Heidelberg:

- Die Buche am Standort Heidelberg ist einer deutlich höheren jährlichen Stressintensität ausgesetzt als die Fichte. Für die Fichte zeigte sich des Weiteren, dass die Stressereignisse längst nicht so tief in den Boden reichten wie bei dem Buchenstandort.
- Die höheren jährlichen Fehlmengen der Buche zeigen im Vergleich, dass dem Standort weniger Wasser für die Transpiration und damit für das Baumwachstum und -vitalität zur Verfügung steht.
- Der festgestellte erhöhte Trockenstress pro Jahr und Tiefe des Buchenstandorts, kann einerseits auf das physiologische Transpirationsverhalten und andererseits auf die Bodeneigenschaften am Standort zurückgeführt werden.

Der verwendete kritische Schwellenwert von -1300 hPa (PUHLMANN et al., 2010), deckt sich gut mit dem von GRANIER et al. (1999) vorgeschlagenen Wert der relativen nutzbaren Feldkapazität von 0.4.

Die Trockenstressanalyse konnte für beide Standorte realistische Ergebnisse liefern und kann für weiteren Level II-Standorte durchgeführt werden und somit zu einer besseren Einschätzung des Trockenstressrisikos für die einzelnen Waldbestände in Baden-Württemberg ermöglichen. Über die einfachen Fallbeispiele konnte gezeigt werden, dass die Buche für zwei mögliche Klimaszenarios mit trockenerem Frühling und Sommer zusätzlichen Stresssituationen ausgesetzt ist. Dies könnte zu einer Veränderung der Konkurrenzfähigkeit am Standort und zu einem geringeren Baumwachstum führen.

Literaturverzeichnis

- AG-BODEN** (Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden) (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. verbesserte und erweiterte Auflage. Schweitzerbart'sche Verlagsbuchhandlung. 437 S., Hannover.
- AJAMI, N., Duan, Q. und SOROOSHIAN, S.** (2007): An integrated hydrologic Bayesian multimodel combination framework: Confronting input, parameter, and model structural uncertainty in hydrologic prediction. *Water Resour. Res* 43 (1).
- ALDINGER, E., HÜBNER, W., MICHIELS, H.-G., MÜHLHÄUSER, G., SCHREINER, M. und WIEBEL, M.** (1998): Standortkunde: Überarbeitung der Standortkundlichen regionalen Gliederung im Südwestdeutschen Standortkundlichen Verfahren. Mitteilung des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung (39), 5–66.
- ANDERS, S.** (2002): Ökologie und Vegetation der Wälder Nordostdeutschlands. Kessel, Remagen-Oberwinter.
- ARBEITSKREIS-KLIWA** (2006): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland. Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, Karlsruhe, München, Offenbach.
- BAUMGARTNER, A. und LIEBSCHER, L.H.-J.** (1990): Allgemeine Hydrologie. Quantitative Hydrologie. Borntraeger, Berlin.
- BERNIER, P., BRÉDA, N., GRANIER, A., RAULIER, F. und MATHIEU, F.** (2002): Validation of a canopy gas exchange model and derivation of a soil water modifier for transpiration for sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) using sap flow density measurements. *Forest Ecology and Management* 163 (1-3), 185–196.
- BEVEN, K.J.** (2006): Rainfall-runoff modelling. The primer. J. Wiley, Chichester, UK, New York.
- BEVEN, K. und BINLEY, A.** (1992): The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. *Hydrol. Process* 6 (3), 279–298.
- BORCHERT, H. und KÖLLING, C.** (2003): Klimawandel und Nachhaltigkeit aus forstlicher Sicht. Klimaänderung unter forstliche Aspekt. LWF aktuell (37), 8–13.
- BROOKS, R.H. und COREY, A.T.** (1966): Properties of porous media affecting fluid flow. *J. Irrigation and Drainage Div., Proc. Am. Soc. Civil Eng.* IR 2 (92), 61–88.
- BURGER, H.** (1929-1953): Holz, Blattmenge und Zuwachs: I. Die Weymouthsföhre, II. Die Douglasie, III. Föhren und Fichten Verschiedener Herkunft, IV. 80j. Buchenbestand, V. Föhren und Fichten Verschiedener Herkunft, VI. Ein Plenterwald Mittlerer Standortsgüte, VII. Die Lärche, VIII. Die Eiche, IX. Die Föhre, X. Die Buche, XI. Die Tanne, XII. Fichten im Plenterwald, XIII. Fichten im Gleichaltrigen Hochwald, Mitt. Schweiz. Anst. f. d. forstl. Vers.-Wesen, : I. 1929, 15, 243-292, II. 1936, 19, 21-72, III. 1937, 20, 101-114, IV. 1939, 21, 307-348, V. 1942, 22, 10-62, VI. 1941, 22, 377-445, VII. 1945, 24, 7-103, VIII. 1947, 25, 211-279, IX. 1948, 25, 435-493, X. 1949, 26, 419-468, XI. 1951, 27, 247-286, XII. 1952, 28, 109-156, XIII. 1953, 29, 38-130.

- CENTRITTO, M., TOGNETTI, R., LEITGEB, E., STŘELCOVÁ, K. und COHEN, S.** (2011): Above Ground Processes: Anticipating Climate Change Influences. In: M. Bredemeier, S. Cohen, D.L. Godbold, E. Lode, V. Pichler, P. Schleppi (Editors), Ecological Studies. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 31–64.
- COWEN, I.R.** (1965): Transport of water in the soil-plant-atmosphere system. *J. Appl. Ecol.*, 2, 221–239.
- DUAN, Q., SOROOSHIAN, S. und GUPTA, V.** (1992): Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resour. Res.* 28 (4), 1015.
- DYCK, S. und PESCHKE, G.** (1995): Grundlagen der Hydrologie. Verl. für Bauwesen, Berlin.
- EISOLD, B.** (2002) Überprüfung der Eignung des physikalisch begründeten Ansatzes "BROOK90" für die Berechnung von N-A Charakteristika im Einzugsgebiet der Weißritz. Diplomarbeit, TU Dresden, Dresden.
- ELLENBERG, H.** (1996): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. E. Ulmer, Stuttgart.
- FALK, W., DIETZ, E., GRÜNERT, S., SCHULTZE, B. und KÖLLING, C.** (2008): Wo hat die Fichte genügend Wasser? Neue überregional gültige Karten des Wasserhaushalts von Fichtenbeständen verbessern die Anbauentscheidung. *LWF aktuell* 66, 21–25.
- FEDDERER, C.A.** (2002): BROOK 90: A simulation model for evaporation, soil water, and streamflow. <http://www.ecoshift.net>. Accessed.
- FEDDERER, C.A., VÖRÖSMARTY, C., FEKETE, B.** (1996): Intercomparison of Methods for Calculating Potential Evaporation in Regional and Global Water Balance Models. *Water Resour. Res.* 32 (7), 2315.
- FEDDES, R.A., KOWALIK, P., KOLINSKA-MALINKA, K. und ZARADNY, H.** (1976): Simulation of field water uptake by plants using a soil water dependent root extraction function. *Journal of Hydrology* 31 (1-2), 13–26.
- FEYEN, L.U.C., KHALAS, M. und VRUGT, J.A.** (2008): Semi-distributed parameter optimization and uncertainty assessment for large-scale streamflow simulation using global optimization / Optimisation de paramètres semi-distribués et évaluation de l'incertitude pour la simulation de débits à grande échelle par l'utilisation d'une optimisation globale. *Hydrological Sciences Journal* 53 (2), 293–308.
- FINSTERLE, S.** (2004): Multiphase Inverse Modeling. Review and iTOUGH2 Applications. *Vadose Zone Journal* (3), 747–762.
- FRANCHINI, M., GALEATI, G. und BERRA, S.** (1998): Global optimization techniques for the calibration of conceptual rainfall-runoff models. *Hydrological Sciences Journal* 43 (3), 443–458.
- FRANKS, S., BEVEN, K., QUINN, P. und WRIGHT, I.** (1997) On the sensitivity of soil-vegetation-atmosphere transfer (SVAT) schemes: equifinality and the problem of robust calibration. *Agricultural and Forest Meteorology* 86 (1-2), 63–75.
- GELMAN, A. und RUBIN, D.B.** (1992): Inference from Iterative Simulation Using Multiple Sequences. *Statist. Sci.* 7 (4), 457–472.

- GRANIER, A., BRÉDA, N., BIRON, P und VILLETTE, S.** (1999) A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling* 116 (2-3), 269–283.
- GRANIER, A., REICHSTEIN, M., BRÉDA, N., JANSSENS, I., FALGE, E., CIAIS, P., GRÜNWALD, T., AUBINET, M., BERBIGIER, P., BERNHOFER, C., BUCHMANN, N., FACINI, O., GRASSI, G., HEINESCH, B., IIVESNIEMI, H., KERONEN, P., KNOHL, A., KÖSTNER, B., LAGERGREN, F., LINDROTH, A., LONGDOZ, B., LOUSTAU, D., MATEUS, J., MONTAGNANI, L., NYS, C., MOORS, E., PAPALE, D., PEIFFER, M., PILEGAARD, K., PITA, G., PUMPANEN, J., RAMBAL, S., REBMANN, C., RODRIGUES, A., SEUFERT, G., TENHUNEN, J., VESALA, T. und WANG, Q.** (2007): Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agricultural and Forest Meteorology* 143 (1-2), 123–145.
- GRUNDMANN, J.** (2010): Analyse und Simulation von Unsicherheiten in der Flächen-differenzierten Niederschlags-Abfluss-Modellierung. Institut für Hydrologie und Meteorologie TU Dresden, Dresden.
- HAMMEL, K. und KENNEL, .M.** (2001): Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. *Forstliche Forschungsberichte München* (185).
- HARLIN, J.und KUNG, C.-S.** (1992): Parameter uncertainty and simulation of design floods in Sweden. *Journal of Hydrology* 137 (1-4), 209–230.
- HEINZE, M., SÄNGER, H. und ATTULA, R.** (1997): Zur Abschätzung der Durchwurzelungstiefen von Waldböden aus Bodenparametern. *Beitr. für Forstwirtschaft u. Landsch.ökol.* 31 (4), 161–164.
- HELTON, J. und. DAVIS, F.J.** (2000): Sampling-based methods In: SALTELLI, A., CHAN, K., SCOTT, E.M. (Hrsg.): *Sensitivity Analysis*. John Wiley & Sons, Chichester, England, 101-154.
- HILLEL, D.** (1998): *Environmental soil physics*. Academic Press London, San Diego.
- HÖRMANN, G., SCHERZER, J., SUCKOW, F., MÜLLER, J., WEGEHENKELI, M., LUKES, M., HAMMEL, K., KNIß, A. und MEESENBURG, H.** (2003): Wasserhaushalt von waldökosystemen: Methodenleitfaden zur Bestimmung der Wasserhaushaltskomponenten auf Level II-Flächen. Level II Ad hoc AG "Wasserhaushalt" der Bund-Länder-Arbeitsgruppe Forstliches Umweltmonitoring. Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) Referat 533.
- HORNBERGER, G. und SPEAR, R.** (1981): An approach to the preliminary analysis of environmental systems. *J. Environmental Management* (12), 7–18.
- JARVIS, P.G.** (1976): The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Phil. Trans. R. Soc. London.* B 273, 593-610.
- KIRKBY, M.J.; NADEN, P.S., BURT, T.P. und BUTCHER, D.P.** (1993): Model calibration and verification. In: Kirkby, M. J. Naden P.S. Burt T.P und Butcher D.P (Hrsg.): *Computer simulation in physical geography*. J. Wiley, Chichester ; New York.

- KOLB, S.** (2011): Quantifizierung von Verdunstungsprozessen in überfluteten Wäldern. Masterarbeit, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg.
- LAFLEUR, P.M. und ROUSE, W.R.** (1990): Application of an energy combination model for evaporation from sparse canopies. *Agricultural and Forest Meteorology* 49 (2), 135–153.
- LARCHER, W.** (1994) Ökophysiologie der Pflanzen. Leben, Leistung und Stressbewältigung der Pflanzen in ihrer Umwelt. E. Ulmer, Stuttgart.
- LEE, G., TACHIKAWA, Y. und TAKARA, K.** (2007): Quantification of Parameter Uncertainty in Distributed Rainfall-Runoff Modelling. *Annals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.* (50 B), 45–56.
- LEITGEB, E., GARTNER, K., NADEZHDINA, N., ENGLISCH, M. und CERMAK, J.** (2002): Ecological Effects of Pioneer Species on Soil Moisture Regime in An Early Successional Stage, Following Wind-throw in a Spruce Stand. *Proceedings of the IUFRO Conference on Restoration of Boreal and Temperate Forests / Gardiner E.S., Breland L.J. [Comp.]. Reports / Skov & Landskab* 11, 193–194.
- LI, K., JONG, R. und DE BOISVERT, J.** (2001): An exponential root-water-uptake model with water stress compensation. *Journal of Hydrology* 252 (1-4), 189–204.
- LOHAMMAR, T.; LARSSON, L., LINDER, S., FALK, S.O.** (1980): FAST-simulation models of gaseous exchange in Scots pine. In: Person, T. (Hrsg.): *Structure and function of northern coniferous forests*. *Ecol. Bull.*, 32, 505-523.
- MAIDMENT, D.R.** (1993): *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill, New York.
- MASEYK, K.S., LIN, T., ROTENBERG, E., GRÜNZWEIG, J.M., SCHWARTZ, A. und YAKIR, D.** (2008): Physiology-phenology interactions in a productive semi-arid pine forest. *New Phytologist* 178 (3), 603–616.
- MCKAY, M.D., BECKMAN, R.J. und CONOVER, W.J.** (1979): A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. *Technometrics* 21 (2), 239.
- MELCHING, C.** (1995): Reliability Estimation. In: SINGH, V. P. (Hrsg.): *Computer Models of Watershed Hydrology*, Highlands Ranch, Colorado USA.
- MELLERT, K., RÜCKER, G., WEIS, W., TIEMANN, J. und BRENDDEL, .J.** (2009): Validierung von Pedotransferfunktionen. Projektbericht, ZEBRIS GIS und Consulting/ ESMM.
- MENZEL, A. und FABIAN, P.** (1999) Growing season extended in Europe. *Nature* 397 (6721), 659.
- MERTENS, J., STENGER, R. und BARKLE, G.F.** (2006): Multiobjective Inverse Modeling for Soil Parameter Estimation and Model Verification. *Vadose Zone Journal* 5 (3), 917.
- MUTTIL, N. und LIONG, S.** (2004): A superior exploration-exploitation balance in shuffled complex evolution. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 130 (3), 1202–1205.
- NASH, J. und SUTCLIFFE, J.** (1970): River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10 (3), 282–290.

- NEMES, A., SCHAAP, M., LEIJ, F. und WÖSTEN, J.** (2001): Description of the unsaturated soil hydraulic database UNSODA version 2.0. *Journal of Hydrology* 251 (3-4), 151–162.
- PENMAN, H.L.** (1948): Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. *Proceedings of the Royal Society A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 193 (1032), 120-145.
- POETER, E. und HILL, M.** (1999): UCODE, a computer code for universal inverse modeling. *Computers & Geosciences* 25 (4), 457–462.
- POOL, S.** (2011): Auswirkungen von Ungenauigkeiten in der feldbodenkundlichen Ansprache auf die Schätzung bodenhydraulischer Kenngrößen mit Pedotransferfunktionen. Diplomarbeit, TU Dresden, Dresden.
- PUHLMANN, H., MORGENSTERN, Y. und VON WILPERT, K.** (2008): Trockenstress für Waldbestände in Baden-Württemberg. *FVA-Einblick+ (1/2008 Wald und Wasser)*, 28–35.
- PUHLMANN, H., VON WILPERT, K., LUKES, M. und DRÖGE, W.** (2009): Multistep outflow experiments to derive a soil hydraulic database for forest soils. *European J. of Soil Science*, 60 (5), 792-806.
- PUHLMANN, H., MORGENSTERN, Y., HÖLSCHER, A. und VON WILPERT, K.** (2010): Water stress induced transpiration reduction and effects on radial growth of beech, Zürich.
- PUHLMANN, H. und VON WILPERT, K.** (2011): Pedotransfer functions for water retention and unsaturated hydraulic conductivity of forest soils [in press]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* (12), 61–71.
- RATTO, M. und SALTELLI, A.** (2001): Model assessment in integrated procedures for environmental impact evaluation: software prototypes. *GLUEWIN User's Manual. Estimation of human impact in the presence of natural fluctuations (IMPACT)*, Deliverable 18. Joint Research Centre of European Commission (JRC), Institute for the Protection and Security of the Citizen (ISIS), Ispra, Italien.
- RIDOLFI, L., D'ODORICO, P., PORPORATO, A. und RODRIGUEZ-ITURBE, I.** (2000): Duration and frequency of water stress in vegetation: An analytical model. *Water Resour. Res* 36 (8), 2297.
- RUTTER, A., KERSHAW, K., ROBINS, P. und MORTON, A.** (1971): A predictive model of rainfall interception in forests, 1. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agricultural Meteorology* 9, 367–384.
- SCHMIDT, M.** (2007): Canopy transpiration of beech forests in Northern Bavaria – Structure and function in pure and mixed stands with oak at colline and montane sites. Dissertation, Universität Bayreuth, Bayreuth.
- SCHÖNE, S.** (2004): Modellierung der Evapotranspiration und Interzeption unterschiedlicher Vegetationseinheiten in Teileinzugsgebieten der Roten Weißeritz (Osterzgebirge). Diplomarbeit, Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg.
- SCHOUPS, G., HOPMANS, J., YOUNG, C., VRUGT, J. und WALLANDER, W.** (2005): Multi-criteria optimization of a regional spatially-distributed subsurface water flow model. *Journal of Hydrology* 311 (1-4), 20–48.

- SCHULZE K., DURNER, W., BEVEN, K. und HUWE, B.** (2001): Parameter - „Equifinality“ und das Problem der robusten Kalibrierung von Stickstoff-haushaltsmodellen. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft (96), 123–124.
- SCHWÄRZEL, K., PETERS, R., PETZOLD, R.H.J., MENZER, A., CLAUSNITZER, F., SPANK, U., KÖSTNER, B., BERNHOFER C. und FEGER, K.H.** (2011): Räumlich-differenzierte Berechnung und Bewertung des Standortswasserhaushaltes von Wäldern des Mittelgebirges. AFSV (12), 119–126.
- SEEGERT, J.** (1998): Die interannuelle Variabilität des Wasserhaushaltes des hydro-meteorologischen Experimentalgebietes Wernersbach vor dem Hintergrund unterschiedlicher forstlicher Nutzung. - Unveröffentlichte Diplomarbeit. Fakultät Forst- Geo- und Hydrowissenschaften der Technischen Universität Dresden.
- SHUTTLEWORTH, W.J. und GURNEY, R.J.** (1990): The theoretical relationship between foliage temperature and canopy resistance in sparse crops. Quart. J.R. Meteorol. Soc. 116, 497-519.
- SHUTTLEWORTH, W.J. und WALLACE, J.S.** (1985): Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. Q.J.R. Meteorol. Soc 111 (469), 839–855.
- SIEBER, A.** (2003): Parameterstudien und unsicherheitsanalysen mit dem Einzugsgebietsmodell TAC^D. Diplomarbeit, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg.
- ŠIMŮNEK, J., van ŠEJNA, M. und GENUCHTEN, M.T.H.** (1998): HYDRUS-1D. Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat and Multiple Solutes in Variably Saturated-Media. Version 2.0. International Ground Water Modelling Center (IGWMC), Colorado School of Mines, Golden, Colorado.
- SOROOSHIAN, S., DUAN, Q. und GUPTA, V.K.** (1993): Calibration of rainfall-runoff models: Application of global optimization to the Sacramento Soil Moisture Accounting Model. Water Resour. Res 29 (4), 1185.
- SPANK, U.** (2010): Site Water Budget: Influence of Measurement Uncertainties on Measurement Results and Model Results. Dissertation, TU Dresden, Dresden.
- SPEAR, R., und HORNBERGER, G.** (1980): Eutrophication in peel inlet—II. Identification of critical uncertainties via generalized sensitivity analysis. Water Research 14 (1), 43–49.
- SSYMANK, A.** (1994): Neue Anforderungen im europäischen Naturschutz: Das Schutzgebietssystem Natura 2000 und die FFH-Richtlinie der EU. Natur und Landschaft 69 (9), 395–406.
- STEWART, J.B.** (1988): Modelling surface conductance of pine forest. Agric. For. Meteorol., 43, 19-35.
- SWIFT, L.W.** (1976): Algorithm for solar radiation on mountain slopes. Water Resour. Res. 12, 108-112.
- THOM, A.** (1975-1976): Momentum, mass and heat exchange. In Monteith, J. L. (Hrsg.), Vegetation and the Atmosphere. Academic Press, London ;, New York.
- VAN GENUCHTEN, M.T.H.** (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. (44), 892–898.

- VAN GENUCHTEN, M.T.H., LEIJ, F., and YATES, S.** (1991): The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, Version 1.0, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California.
- VON WILPERT, K.** (1990): Die Jahrringstruktur von Fichten in Abhängigkeit vom Bodenwasserhaushalt auf Pseudogley und Parabraunerde. Ein Methodenkonzzept zur Erfassung standortspezifischer Wasserstreßdisposition. Inst. für Bodenkunde u. Waldernährungslehre d. Albert-Ludwigs-Univ., Freiburger.
- VON WILPERT, K., SCHRÖTER, H., HANEWINKEL, M. und MEINING, S.** (2010): Waldzustandsbericht 2010 für Baden-Württemberg. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg.
- VRUGT, J.A., GUPTA, H.V., BOUTEN, W. und SOROOSHIAN, S.** (2003): A Shuffled Complex Evolution Metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters. *Water Resour. Res* 39 (8), 1–16.
- VRUGT, J.A., DIKS, C., BOUTEN, W. und VERSTRATEN, J. M.** (2005): Improved treatment of uncertainty in hydrologic modeling: Combining the strengths of global optimization and data assimilation. *Water Resour. Res* 41 (1), 389–397.
- VRUGT, J.A., TER BRAAK, C.J.F., GUPTA, H.V. und ROBINSON, B.A.** (2009): Equifinality of formal (DREAM) and informal (GLUE) Bayesian approaches in hydrologic modeling? *Stoch Environ Res Risk Assess* 23 (7), 1011–1026.
- VRUGT, J.A., STAUFFER, P.H., WÖHLING, T., ROBINSON, B.A. und VESSELINOV, V.V.** (2008a): Inverse Modeling of Subsurface Flow and Transport Properties: A Review with New Developments. *Vadose Zone Journal* 7 (2), 843.
- VRUGT, J.A., TER BRAAK, C.J.F., CLARK, M.P., HYMAN, J.M. und ROBINSON, B.A.** (2008b). Treatment of input uncertainty in hydrologic modeling: Doing hydrology backward with Markov chain Monte Carlo simulation. *Water Resour. Res* 44.
- WARREN, J.M., BROOKS, J.R., DRAGILA, M.I. und MEINZER, F.C.** (2011): In situ separation of root hydraulic redistribution of soil water from liquid and vapor transport. *Oecologia* 166 (4), 899–911.
- WONISCH, A., TAUSZ, M., HAUPOLTER, M., KIKUTA, S. und GRILL, D.** (1999): Stressphysiological response patterns in spruce needles relate to site factors in a mountain forest. *Phyton (Austria)* 39 (4), 269–274.
- WÖSTEN, J.H.M., LILLY, A., NEMES, A. und LE BAS, C.** (1999): Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* 90 (3-4), 169–185.
- YAPO, P.O., GUPTA, H.V. und SOROOSHIAN, S.** (1998): Multi-objective global optimization for hydrologic models. *Journal of Hydrology* 204 (1-4), 83–97.
- ZIMMERMANN, L. und FEGER, .K.-H.** (1995): Der Bodenwasserhaushalt an einem Fichtenstandort im Hochschwarzwald - Messung und Modellierung zur Deutung der montanen Nadelvergilbung. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* (160), 141–149.
- ZIRLEWAGEN, D.** (2003): Raum-zeitliche Abhängigkeiten bei der Modellierung von Bodenzustand und Stoffflüssen. *Freiburger Forstliche Forschung: Boden- und Wasserversorgung*, Freiburg.

Anhang

Abbildungen im Anhang

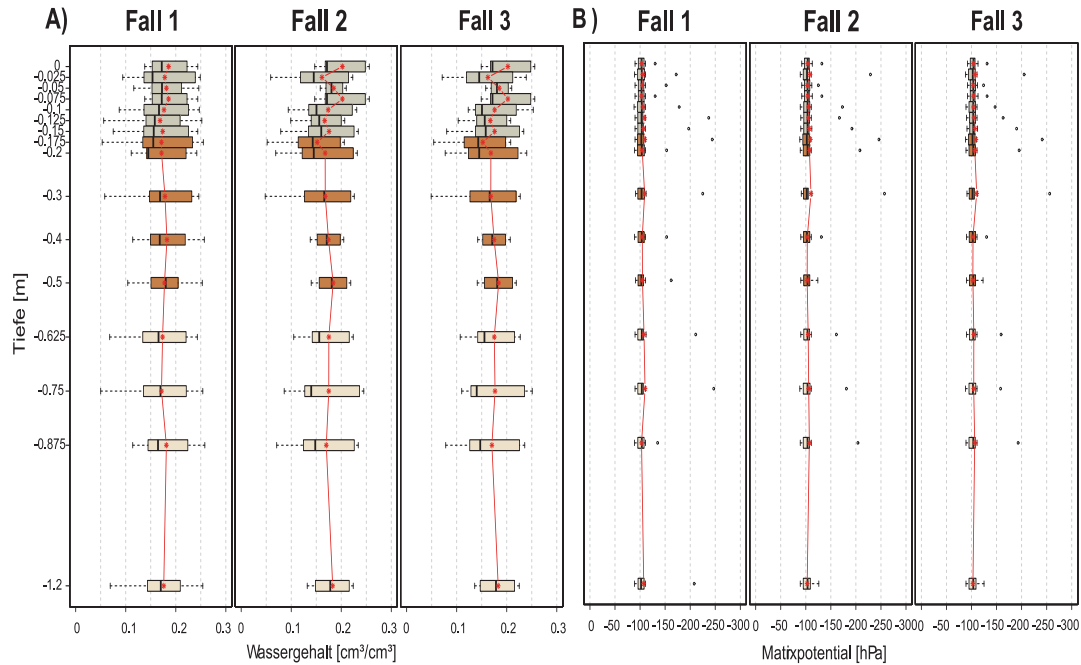


Abbildung A. 1: Boxplot für die Modellierung der Bewässerungsphase der 100 Verläufe des Wassergehalts θ (A) und des Matrixpotenzials ψ_m (B) je Tiefe und Fall.

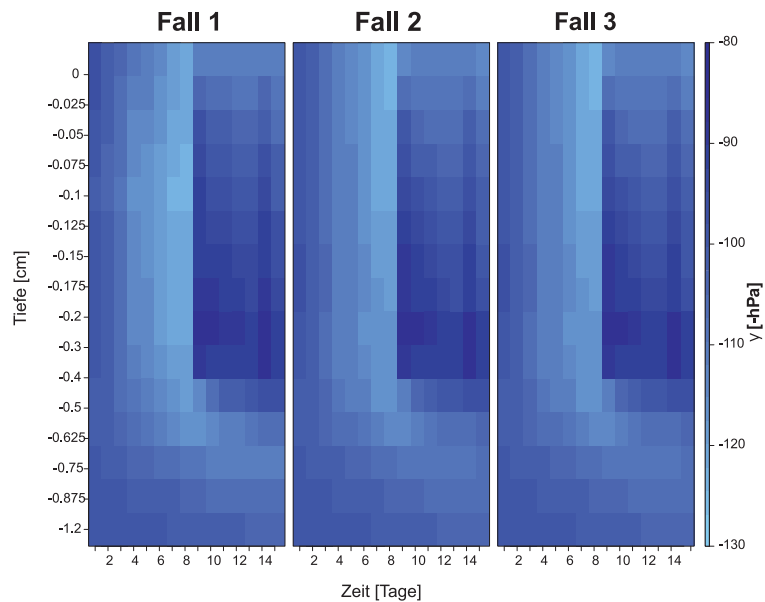


Abbildung A. 2: Verlauf des ψ_m über die Tiefe und Zeit für Fall 1 bis 3, für den Verlauf der TRD aus dem Monte-Carlo Lauf 1 mit LWF-Brook90 für die Bewässerungsphase.

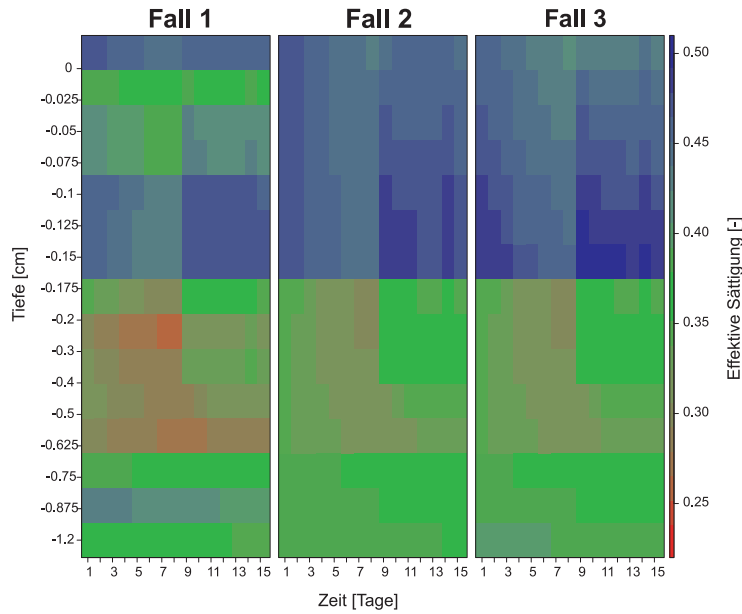


Abbildung A. 3: Verlauf der Effektiven Sättigung über die Tiefe und Zeit für Fall 1 bis 3, für den Verlauf der TRD aus dem Monte-Carlo Lauf 1 mit LWF-Brook90 für die Bewässerungsphase.

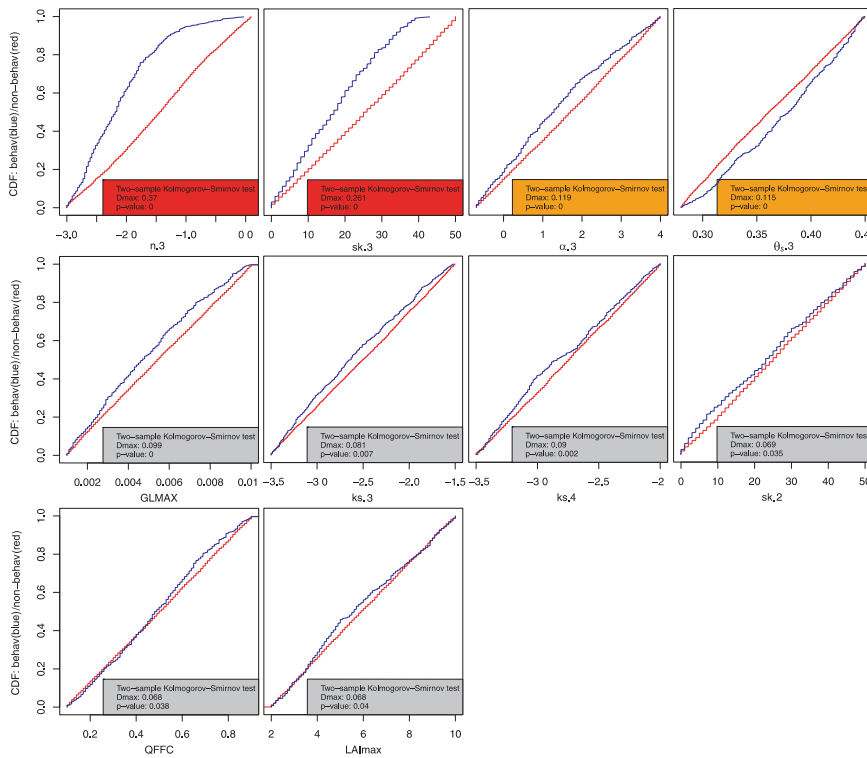


Abbildung A. 4: Ergebnis der „Regional Sensitivity Analysis“ und des Kolmogorov-Smirnov-Tests (siehe Kästen in den einzelnen Abbildungen) für die Modellierung des Wassergehalts θ in 30 cm Tiefe des Fichtenplots.

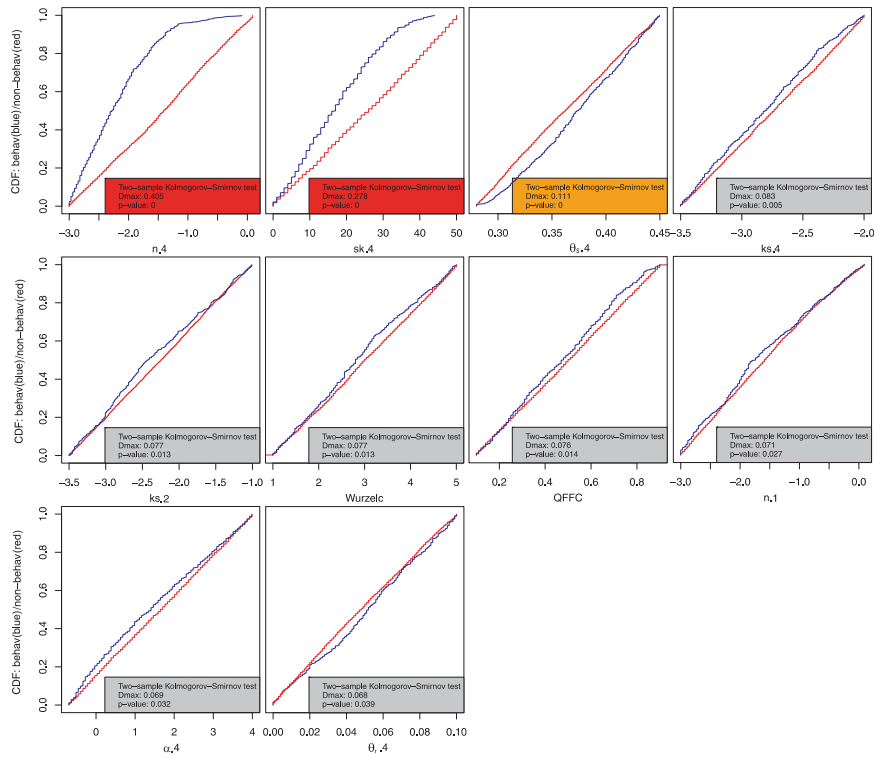


Abbildung A. 5: Ergebnis der „Regional Sensitivity Analysis“ und des Kolmogorov-Smirnov-Tests (siehe Kasten in den einzelnen Abbildungen) für die Modellierung des Wassergehalts θ in 75 cm Tiefe des Fichtenplots.

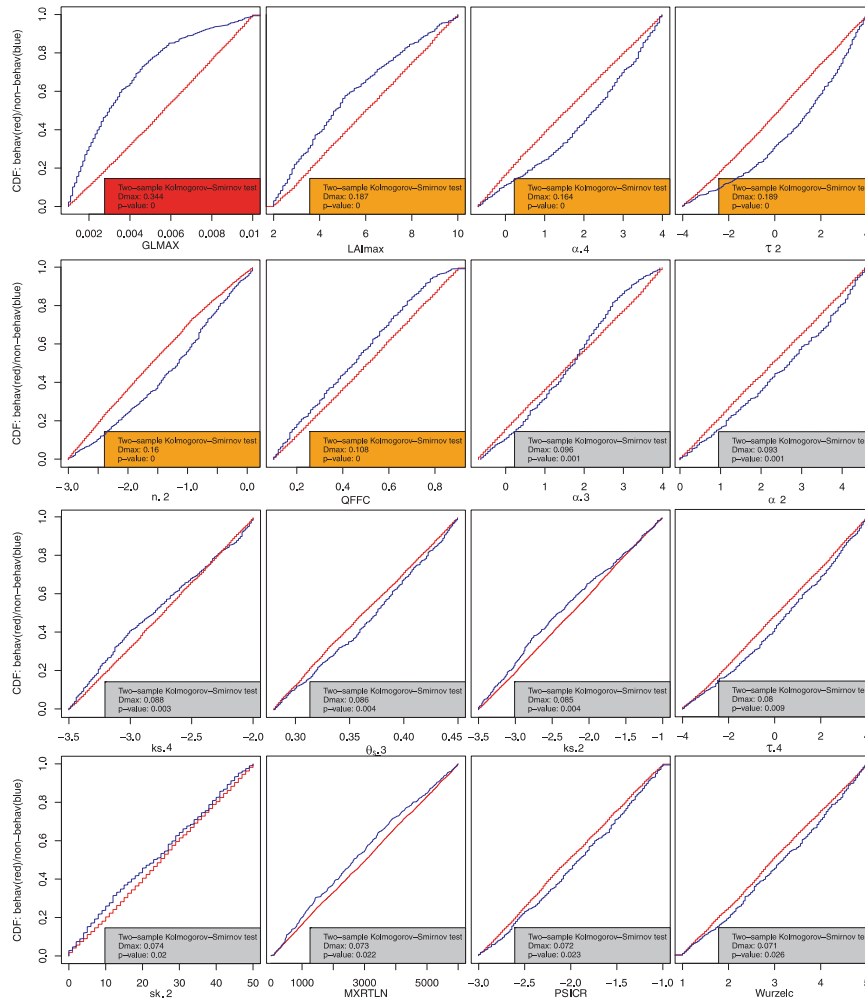


Abbildung A. 6: Ergebnis der „Regional Sensitivity Analysis“ und des Kolmogorov-Smirnov-Tests (siehe Kasten in den einzelnen Abbildungen) für die Modellierung des Matrixpotenzials ψ_m in 15 cm Tiefe des Fichtenplots.

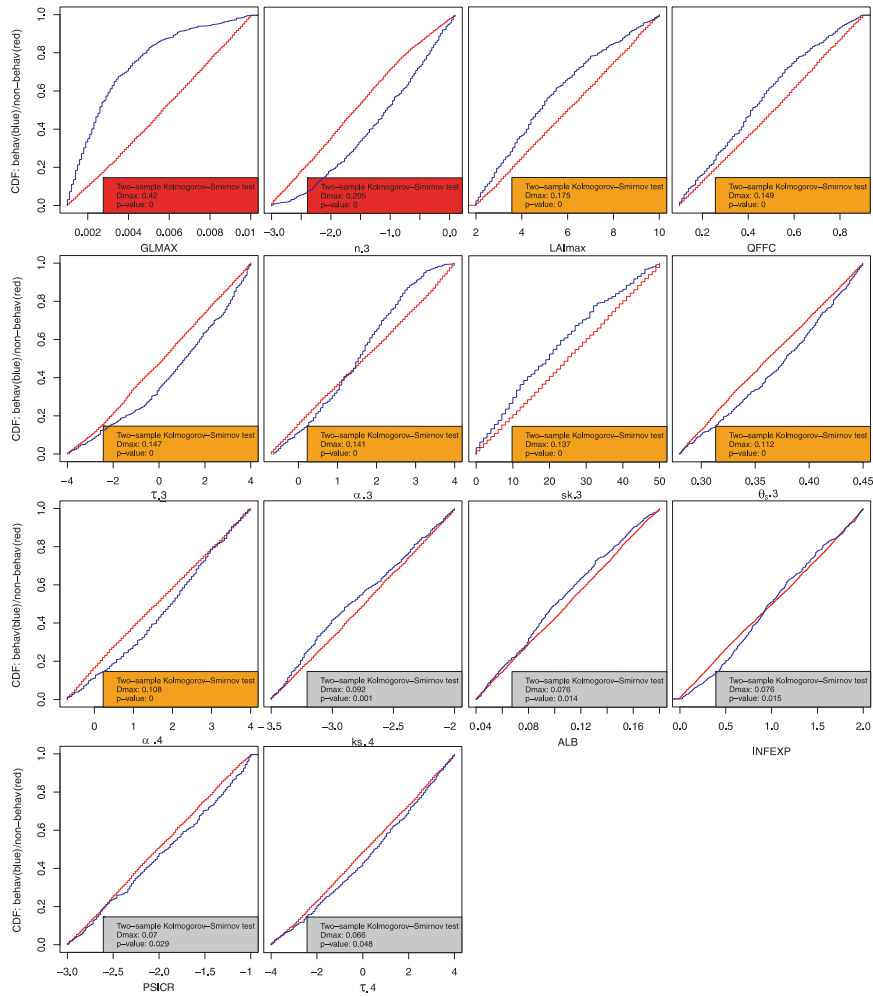


Abbildung A. 7 Ergebnis der „Regional Sensitivity Analysis“ und des Kolmogorov-Smirnov-Tests (siehe Kasten in den einzelnen Abbildungen) für die Modellierung des Matrixpotenzials ψ_m in 30 cm Tiefe des Fichtenplots.

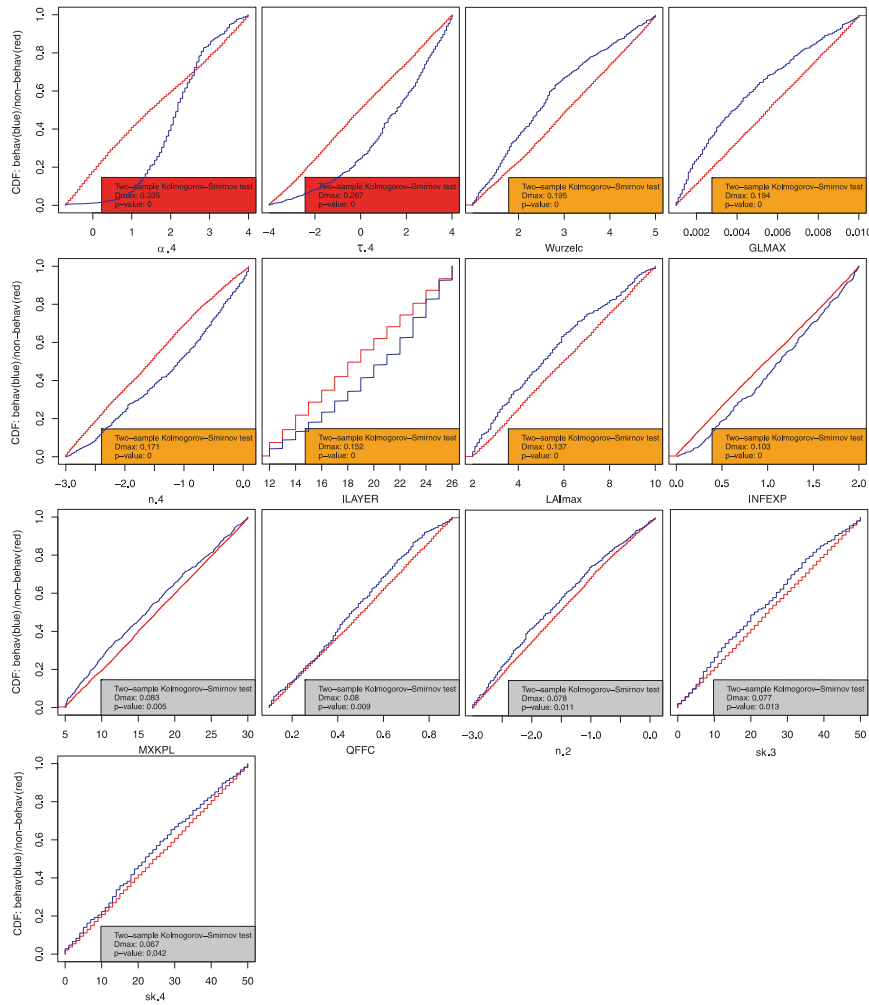


Abbildung A. 8: Ergebnis der „Regional Sensitivity Analysis“ und des Kolmogorov-Smirnov-Tests (siehe Kasten in den einzelnen Abbildungen) für die Modellierung des Matrixpotenzials ψ_m in 75 cm Tiefe des Fichtenplots.

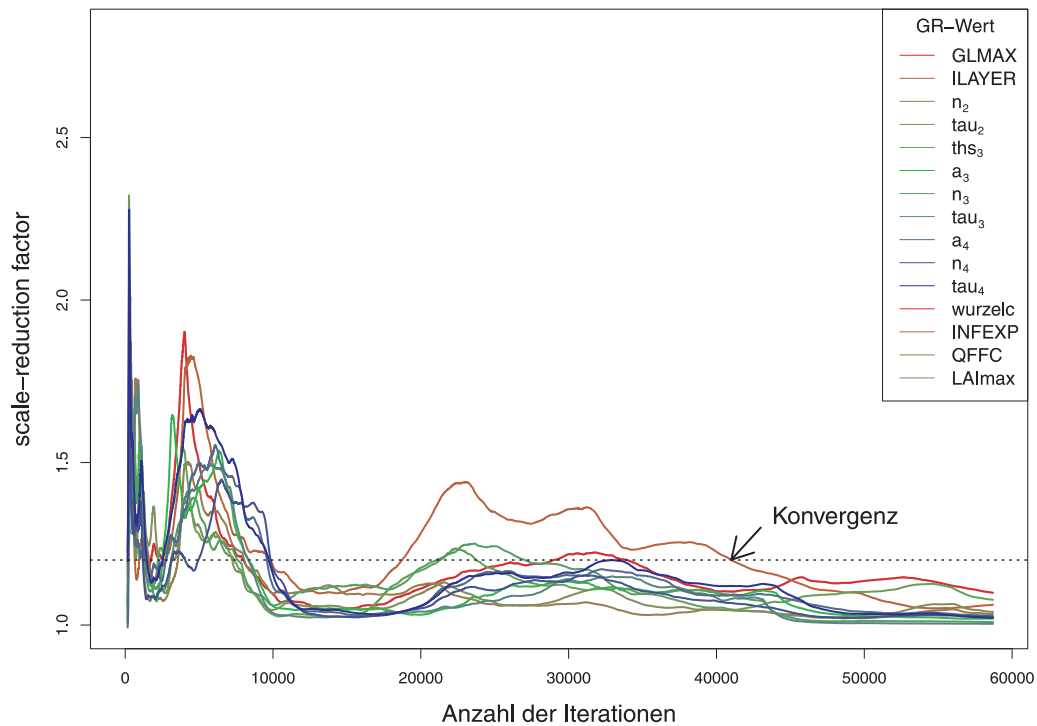


Abbildung A. 9: Evaluierung des Konvergenzverhaltens der untersuchten Modellparameter mit dem Gelman-Rubin Kriterium für den Fichtenplot mit dem ψ_m -Ansatz

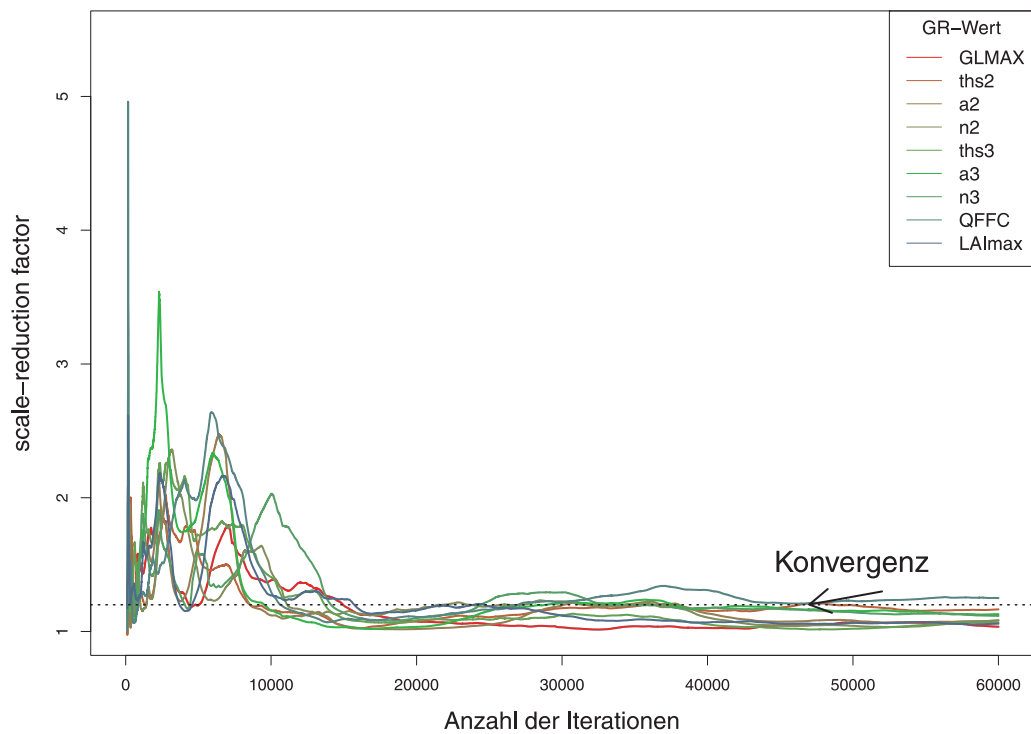


Abbildung A. 10: Evaluierung des Konvergenzverhaltens der untersuchten Modellparameter mit dem Gelman-Rubin Kriterium für den Buchenplot mit dem Hüllkurven-Ansatz

Tabellen im Anhang

Tabelle A. 1: Modelleinstellung für LWF-Brook90 und Ergebnisse der Parameteroptimierung mit SCEM-UA des Hüllkurven-Ansatzes für den Fichten- und Buchenplot (siehe opt. Parameter)

Parameter	Beschreibung	Literatur/ Herkunft	Wert (Fichte)	Werte (Buche)	Einheit
Klimadaten					
SR	Solarstrahlung auf eine horizontal Fläche	Daten INTERRA			[MJ m ⁻²]
Tmax	max. Lufttemperatur	INTERRA			[°C]
Tmin	min. Lufttemperatur	INTERRA			[°C]
Tmean	mittl. Lufttemperatur	INTERRA		dynamisch	[°C]
Ea	akt. Dampfdruck	INTERRA			[kPa]
Uw	Windgeschwindigkeit	INTERRA			[m s ⁻¹]
PreInt	Niederschlag	DWD ST. 5574			[mm d ⁻¹]
Meteorologische Parameter					
ALB	Albedo ohne Schnee	FEDERER, 2002	0,14	0,18	[-]
ALBSN	Albedo Schneeeauflage	FEDERER, 2002	0,14	0,23	[-]
C1	Eintrag Solarstrahlung vs. Sonnenscheindauer	FEDERER, 2002	0,25	0,25	[-]
C2	Neigung Solarstrahlung vs. Sonnenscheindauer	FEDERER, 2002	0,5	0,5	[-]
C3	Korrekturfaktor langwellige Strahlung bei bedecktem Himmel	FEDERER, 2002	0,2	0,2	[-]
WNDRAT	Verhältnis Uw (Tag/Nacht)	FEDERER, 2002	0,3	0,3	[-]
FETCH	Windlauflänge Wetterstation (WS)	FEDERER, 2002	5000	5000	[m]
Z0W	Rauigkeitsparameter WS	FEDERER, 2002	0,005	0,005	[m]
ZW	Windmesshöhe WS	FEDERER, 2002	10	10	[m]
Vegetationsdaten					
LPC	min. LAI bei geschlossener Vegetation	FEDERER, 2002	4	4	[-]
CS	SAI/Höhe geschlossene Kronendach	FEDERER, 2002	0,035	0,035	[m ⁻¹]
CZS	Rauigkeit/Höhe für glattes, geschlossenes Kronendach	FEDERER, 2002	0,13	0,13	[-]
CZR	Rauigkeit/Höhe für rauhes geschlossenes Kronendach	FEDERER, 2002	0,05	0,05	[-]
HS	Höhe unter der CZS vorkommt	FEDERER, 2002	1	1	[m]
HR	Höhe über der CZR vorkommt	FEDERER, 2002	10	10	[m]
ZMINH	ZA-Höhe, Referenzhöhe über dem Kronendach	FEDERER, 2002	2	2	[m]
RHOTP	Gesamte Blatt-/projezierten Fläche	FEDERER, 2002	2,5	2,5	[-]
NN	Wind/Diffusivität Extinktionskoeffizient	FEDERER, 2002	2,5	2,5	[-]

Fortsetzung Tabelle A.1

Parameter	Beschreibung	Literatur/ Herkunft	Wert (Fichte)	Werte (Buche)	Einheit
Interzeptionsparameter					
RSTEMP	Grundtemperatur für Übergang Schnee zu Regen	FEDERER,2002	-0,5	-0,5	[°C]
DURATN	durchschnittliche Dauer des täglichen Niederschlags pro Monat	FEDERER,2002	4	4	[hr]
INTR	Iniziale Interzeption Regen	FEDERER,2002	0	0	[mm]
INTS	Iniziale Interzeption Schnee	FEDERER,2002	0	0	[mm]
FRINTL	Interzeptionsanteil Regen pro Einheit LAI	FEDERER,2002	0,06	0,06	[-]
FSINTL	Interzeptionsanteil Schnee pro Einheit LAI	FEDERER,2002	0,04	0,04	[-]
FRINTS	Interzeptionsanteil Regen pro Einheit SAI	FEDERER,2002	0,06	0,06	[-]
FSINTS	Interzeptionsanteil Schnee pro Einheit SAI	FEDERER,2002	0,04	0,04	[-]
CINTRL	max. Interzeptionsspeicher Regen pro Einheit LAI	FEDERER,2002	0,15	0,15	[mm]
CINTRS	max. Interzeptionsspeicher Regen pro Einheit SAI	FEDERER,2002	0,15	0,15	[mm]
CINTSL	max. Interzeptionsspeicher Schnee pro Einheit LAI	FEDERER,2002	0,6	0,6	[mm]
CINTSS	max. Interzeptionsspeicher Schnee pro Einheit SAI	FEDERER,2002	0,6	0,6	[mm]
Schneeparameter					
MELFAC	Gradtag Faktor auf offenem Terrain	FEDERER,2002	1,5	1,5	[MJ m ⁻² d ⁻¹ K ⁻¹]
CCFAC	Kältegehalt Faktor	FEDERER,2002	0,3	0,3	[MJ m ⁻² d ⁻¹ K ⁻¹]
LAIMLT	Parameter für die Abhängigkeit der Schneeschmelze vom LAI	FEDERER,2002	0,2	0,2	[-]
SAIMLT	Parameter für die Abhängigkeit der Schneeschmelze vom SAI	FEDERER,2002	0,5	0,5	[-]
GRDMLT	Rate der Schneeschmelze aus der Schneedecke	FEDERER,2002	0,35	0,35	[mm d ⁻¹]
MAXLQF	max. flüssige Wasserfraktion von Schnee	FEDERER,2002	0,05	0,05	[-]
KSNVP	Mutliplikator um Schnee-evaporationsproblem zu lösen	FEDERER,2002	0,3	0,3	[-]
SNODEN	Schneedichte	FEDERER,2002	0,3	0,3	[mm mm ⁻¹]

Fortsetzung Tabelle A.1

Parameter	Beschreibung	Literatur/ Herkunft	Wert (Fichte)	Werte (Buche)	Einheit
Blattparameter, welche die pot. Evapotranspiration beeinflussen					
GLMAX	max. Blattleitfähigkeit	opt. Parameter	0.0099	0.0040	[m s ⁻¹]
CR	Lichtextinktionskoeff. Für projezierten LAI+SAI	FEDERER,2002	0.5	0.6	[-]
GLMIN	min. Blattleitfähigkeit	MELLERT et al., 2009	0.0001	0.0009	[m s ⁻¹]
RM	max. Solarstrahlung bei der FR=1	FEDERER,2002	1000	1000	[W m ⁻²]
R5	Solarstrahlung bei der die Leitfähigkeit halbiert ist	FEDERER,2002	100	100	[W m ⁻²]
CVPD	VPD bei der die Leitfähigkeit halbiert ist	FEDERER,2002	2	2	[kPa]
TL	mittlere Tageslufttemperatur unterhalb der die Stomata geschlossen bleibt	FEDERER,2002	0	0	[°C]
T1	niedrigste mittlere Tageslufttemperatur bei der die Stomata nicht Temperatur limitiert ist	FEDERER,2002	10	10	[°C]
T2	höchste mittlere Tageslufttemperatur bei der die Stomata nicht Temperatur limitiert ist	FEDERER,2002	30	30	[°C]
TH	mittlere Tageslufttemperatur oberhalb der die Stomata geschlossen bleibt	FEDERER,2002	40	40	[°C]
Pflanzenparameter, welche die Bodenwasserversorgung beeinflussen					
MXKPL	max. Pflanzenleitfähigkeit	FEDERER,2002	8	8	[mm d ⁻¹ MPa ⁻¹]
MXRTLN	max. Wurzellänge pro Flächeneinheit	MELLERT et al., 2009	3000	3000	[m m ⁻²]
LAI _{max}	max. LAI	FEDERER,2002 opt.Parameter	6	5.51	[m ² m ⁻²]
inirlen	Iniziale wasserabsorbierende Wurzellänge pro Flächeneinheit	FEDERER,2002	10	10	[m]
inirdep	Iniziale Wurzeltiefe	FEDERER,2002	1.5	1.5	[m a ⁻¹]
rgrogate	Vertikale Wurzelwachstumsrate	FEDERER,2002	0.033	0.033	[a]
rgroper	Zeitspanne des gesamten Wurzelwachstums	FEDERER,2002	0	0	[-]
FXYLEM	Anteil des Pflanzen- widerstands im Xylem	FEDERER,2002	0.5	0.5	[-]
PSICR	min. Wasserpotenzial der Blätter	FEDERER,2002	-2	-2	[MPa]
RTRAD	durchschnitt. Wurzelradius	FEDERER,2002	0.35	0.35	[mm]
NOOUTF	hydraulic Lift Wurzel (Aus=1, Ein=0)	FEDERER,2002	1	1	[-]

Fortsetzung Tabelle A.1

Parameter	Beschreibung	Literatur/ Herkunft	Wert (Fichte)	Wert (Buche)	Einheit
Abflussparameter					
ILAYER	Anzahl der Bodenschichten über die die Infiltration verteilt wird	abgeschätzt	25	25	[-]
INFEXP	Infiltrationsexponent	FEDERER,2002	0,5	0,5	[-]
BYPAR	1 = BYFL erlaubt, 0 verhindert BYFL	FEDERER,2002	1	1	[-]
QFPAR	Wassergehalt zwischen akt. Und gesättigten Wassergehalt (BYPAR=1)	FEDERER,2002	0,5	0,5	[-]
QFFC	Anteil BYFL an Gesamt-abfluss bei FK & BYPAR=1	opt. Parameter	0.66	0.74	[-]
IMPERV	Versiegelungsgrad (für SRFL)	FEDERER,2002	0	0	[-]
DSLOPE	Hangneigung für DSFL	Profilsprache	11	12	[°]
LENGTH	Hanglänge für DSFL	FEDERER,2002	100	100	[m]
DRAIN	Multiplikator für VFLUX, für die Drainage in Grundwasser	FEDERER,2002	1	1	[-]
GSC	Abfluss aus Grundwasserspeicher	FEDERER,2002	0	0	[d ⁻¹]
GSP	Fraktion des Abflusses aus Tiefenversickerung	FEDERER,2002	0	0	[-]
numerische Parameter					
DTIMAX	max. Iterations Zeitschritte pro Tag	Randbedingung	1	1	[d]
DSWMAX	max. erlaubt Veränderung Bodenfeuchte in einer Bodenschicht während der Iteration	Randbedingung	0,5	0,5	[%]
DPSIMAX	max. potenzielle Differenz Boden-wassergehalt zwischen Boden-schicht, wenn sie geringer ist als DPSIMAX kein vertikaler Transport	Randbedingung	0,05	0,05	[kPa]

f

Fortsetzung Tabelle A.1

Parameter	Beschreibung	Literatur/ Herkunft	Werte (Fichte)	Werte (Buche)	Einheit
Standortparameter					
ESLOPE	Hangneigung	Profilansprache	11	12	[°]
ASPECT	Hangrichtung	Profilansprache	270	203.4	[°]
Bodenparameter					
NMat	Anzahl der im Modell benutzten Materialien (=Horizonte)	Diskretisierung	5	5	[-]
NLAYER	Anzahl der Berechnungs- knoten (Diskretisierung)	Diskretisierung	32	32	[-]
QLAYER	Anzahl der Boden- schichten um SRFL zu berechnen, 0 unterbindet SRFL	FEDERER, 2002	0	0	[-]
IMODEL	Hydraulische Funktion Clapp&Hornerberger (0) oder Mualem van Genuchten (1)	HAMMEL & KENNEL, 2001	1	1	[-]
dr	Wurzeldichtevertelung über Bodenschichten	HEINZE et al., 1997	2	3	[m ³ m ⁻³]
RSSA	Bodenevaporations- widerstand bei FK	FEDERER, 2002	200	200	[s m ⁻¹]
RSSB	Exponent der in Beziehung zu RSSA und dem Bodenwasser- potential steht	FEDERER, 2002	1	1	[-]
Parameter für die Mualem van Genuchten-Gleichung					
θ_{s1}	Wassergehalt bei Sättigung Humusaufgabe (HG)	WOSTEN et al., 1999	0.766	0.766	[cm ³ cm ⁻³]
θ_{r1}	residuale Wassergehalt (HG)	WÖSTEN et al., 1999	0	0	[cm ³ cm ⁻³]
α_1	emp. Formparameter (HG)	WÖSTEN et al., 1999	1.288	1.288	[m ⁻¹]
n_1+1	emp. Formparameter (HG)	MORGENSTERN FVA	1.205	1.205	[-]
K_{s1}	ungesättigte Leitfähigkeit (HG)	WÖSTEN et al., 1999	80	80	[mm d ⁻¹]
Sk_1	Skelettanteil (HG)	abgeschätzt	0	0	[%]
τ_1	Tortuositätsfaktor	WÖSTEN et al., 1999	0.4	0.4	[-]
θ_{s2}	1 mineral. Bodenhorizont	opt. Parameter	0.3135	0.3828	[cm ³ cm ⁻³]
θ_{r2}	1 mineral. Bodenhorizont	abgeschätzt	0	0.001	[cm ³ cm ⁻³]
α_2	1 mineral. Bodenhorizont	opt. Parameter	3.676	5.346	[m ⁻¹]
n_2+1	1 mineral. Bodenhorizont	opt. Parameter	1.124	1.084	[-]
K_{s2}	1 mineral. Bodenhorizont	PTF PUH2, Renger et al. 2009	791	700	[mm d ⁻¹]
Sk_2	1 mineral. Bodenhorizont	Profilansprache	5	1	[%]
τ_2	1 mineral. Bodenhorizont	HAMMEL & KENNEL, 2001	0.5	0.5	[-]

Fortsetzung Tabelle A.1

Parameter	Beschreibung	Literatur/ Herkunft	Werte (Fichte)	Werte (Buche)	Einheit
Parameter für die Mualem van Genuchten-Gleichung					
θ_{s3}	3 mineral. Bodenhorizont	opt. Parameter	0.3314	0.3565	[cm ³ cm ⁻³]
θ_{r3}	3 mineral. Bodenhorizont	abgeschätzt	0	0.001	[cm ³ cm ⁻³]
α_3	3 mineral. Bodenhorizont	opt. Parameter	6.038	7.666	[m ⁻¹]
n_3+1	3 mineral. Bodenhorizont	opt. Parameter	1.141	1.086	[-]
K_{s3}	3 mineral. Bodenhorizont	Renger et al. 2009	1538	519.8	[mm d ⁻¹]
Sk_3	3 mineral. Bodenhorizont	Profilsprache	426	2	[%]
T_3	3 mineral. Bodenhorizont	HAMMEL & KENNEL, 2001	0.5	0.5	[-]
θ_{s4}	4 mineral. Bodenhorizont	PTF PUH2; Renger et al. 2009	0.3275	0.3835	[cm ³ cm ⁻³]
θ_{r4}	4 mineral. Bodenhorizont	abgeschätzt	0	0	[cm ³ cm ⁻³]
α_4	4 mineral. Bodenhorizont	PTF PUH2; Renger et al. 2009	6.65	1.152	[m ⁻¹]
n_4+1	4 mineral. Bodenhorizont	PTF PUH2; Renger et al. 2009	1.187	1.188	[-]
K_{s4}	4 mineral. Bodenhorizont	PTF PUH2; Renger et al. 2009	426	43	[mm d ⁻¹]
Sk_4	4 mineral. Bodenhorizont	Profilsprache	30	35	[%]
T_4	4 mineral. Bodenhorizont	PTF PUH2	0.5	-0.6504	[-]
θ_{s5}	5 mineral. Bodenhorizont	abgeschätzt	0.1	0.1	[cm ³ cm ⁻³]
θ_{r5}	5 mineral. Bodenhorizont	abgeschätzt	0	0	[cm ³ cm ⁻³]
α_5	5 mineral. Bodenhorizont	Randbedingung	1.3	1.3	[m ⁻¹]
n_5+1	5 mineral. Bodenhorizont	PTF PUH2; Renger et al. 2009	1.187	1.188	[-]
K_{s5}	5 mineral. Bodenhorizont	Profilsprache PTF PUH2	426	43	[mm d ⁻¹]
Sk_5	5 mineral. Bodenhorizont	Profilsprache	0	0	[%]
T_5	5 mineral. Bodenhorizont	PTF PUH2	0.5	-0.6504	[-]

Tabelle A. 2: Festlegung der algorithmischen Parameter für SCEM-UA und SEM-Algorithmus für die Parameteroptimierung des Matrixpotenzial-Ansatzes (ψ_m)

Parameter	Beschreibung	Einstellung
n_{scem}	Anzahl der zu optimierenden Parameter	15
q	Anzahl der Komplexe	15
s	Populationsgröße	150
L	Anzahl der Evolutionsschritte	1
T_{like}	likelihood Verhältnis	10 ⁶
Cn	Sprungrate	0,62

Tabelle A. 3: Kalibrierungsparameter des LWF-Brook90 Modells mit der Angabe der Unter- und Obergrenze des Parameterraumes für die Parameteroptimierung mit SCEM-UA des ψ_m Ansatz

Parameter (LWF-BROOK90)	Einheit	Untere Grenze	Obere Grenze
GLMAX	[m/s]	0,001	0,01
ILAYER	[-]	12	26
exp(n_2)	[-]	-3	0,09
τ_2	[-]	0	4
θs_3	[cm ³ /cm ³]	0,3733	0,4666
exp(α_3)	[1/m]	-0,693	4
exp(n_3)	[-]	-3	0,09
τ_3	[-]	0	4
exp(α_4)	[1/m]	-0,693	4
exp(n_4)	[-]	-3	0,09
τ_4	[-]	0	4
wurzelc	[-]	2	5
INFEXP	[-]	0	2
QFFC	[-]	0,1	0,9
LAlmax	[m ² /m ²]	4	10

Tabelle A. 4: Kalibrierungsparameter des LWF-Brook90 Modells mit der Angabe der unteren und oberen Grenze des Parameterraumes für die Parameteroptimierung mit SCEM-UA für den Buchenplot

Parameter (LWF-BROOK90)	Einheit	Untere Grenze	Obere Grenze
GLMAX	[m/s]	0,001	0,01
θs_2	[cm ³ /cm ³]	0,37	0,4166
exp(α_2)	[1/m]	0	4,605
exp(n_2)	[-]	-3	0,09
θs_3	[cm ³ /cm ³]	0,34	0,389
exp(n_3)	[-]	-3	0,09
QFFC	[-]	0,1	0,9
LAlmax	[m ² /m ²]	2	10

Tabelle A. 5: Festlegung der Algorithmus Parameter für SCEM-UA des Buchenplots

Parameter	Beschreibung	Einstellung
n_{scem}	Anzahl der zu optimierenden Parameter	8
q	Anzahl der Komplexe	10
s	Populationsgröße	100
L	Anzahl der Evolutionsschritte	1
T_{like}	likelihood Verhältnis	10^6
Cn	Sprungrate	0,76

Verzeichnis der Abkürzungen im Text

BK	Berechnungsknoten
B _{Kurve}	Bewässerungskurve
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DREAM	Differential-Evolution-Metropolis-Algorithm
DWD	Deutscher Wetterdienst
E _{kurve}	Entwässerungskurve
FutMon	Further Development and Implementation of an EU-level Forest Monitoring System
FVA	Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg
GA	Gruppierte Auswirkungen
GR	GELMAN-RUBIN (1992) Konvergenzkriterium <1.2
Hüllkurven-Ansatz	Optimierung mit den auf den Wassergehalt sensitiven Modellparametern in SCEM-UA und eine über die pF-Kurve modifizierten Gütemaß
KS-Test	Kolmogorov-Smirnov Test
LR	Lineare Regression
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz
MCS	Monte-Carlo-Simulation
MVG	Mualem- van Genuchten
N-A Modell	Niederschlags-Abfluss Modell
PTF	Pedotransferfunktion
R _{Hüll}	Modifizierte Gütemaß nach NASH & SUTCLIFFE für den Hüllkurven-Ansatz
R _{Mod}	Modifizierte Gütemaß nach NASH & SUTCLIFFE für den Wassergehalt- und den Matrixpotenzial-Ansatz
RMSE	Gütemaß Root mean square error
RSA	Regional Sensitivity Analysis
R ²	Gütemaß nach NASH & SUTCLIFFE (1970)
SA	Sensitivitätsanalyse
SCE-UA	Shuffled-Complex-Evolution-Algorithm
SCEM-UA	Shuffled-Complex-Evolution-Metropolis-Algorithm
SS-BB	Pseudogley-Braunerde
SVAT	Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer
UDATA	Umweltschutz und Datenanalyse

Verzeichnis der Abkürzungen im Text

ü.N.N.	über Normalnull
X	Kronenzentrum, Position der Messwertgeber der FVA
Y	Kronenrand, Position der Messwertgeber der FVA
Z	Kronenlücke, Position der Messwertgeber der FVA
Θ-Ansatz	Optimierung mit den auf den Wassergehalt sensitiven Modellparametern in SCEM-UA
Ψ-Ansatz	Optimierung mit den auf das Matrixpotenzial sensitiven Modellparametern in SCEM-UA

Verzeichnis der Symbole im Text

a	Faktor, für Fichte= 1848, Buche= 1922 nach MENZEL und FABIAN (1999)	[-]
A	Verfügbare Energie über der Krone	[W m ⁻²]
a_b	Konstante 0,01	[m s ^{-1/2}]
ABH	Anzahl der betrachteten Tiefen i	[-]
ALB	Albedo bzw. Schneeralbedo ALBSN	[-]
A_{krit}	Anzahl der Stressereignisse pro Jahr	[a ⁻¹]
A_S	Verfügbare Energie am Boden	[W m ⁻²]
b	Faktor, für Fichte= -317, Buche= -348	[-]
BHD	Brusthöhendurchmesser	[cm]
C	Nettoauffangrate	[mm]
CD_n	Kältetage	[Tage]
cf	Umrechnungsfaktor von [MJ/m ² d] in [W/m ²] = 0.0864	
C_n	Sprungrate (SCEM-UA Algorithmus Parameter)	[-]
C_{org}	Gehalt an organischem Kohlenstoff	[Masse %]
c_p	spezifische Wärme der Luft	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
$CVPD$	Faktor des Dampfdruckdefizit bei der die Leitfähigkeit halbiert ist	[kPa]
d	Nullpunktverschiebung	[m]
D_0	Sättigungsdefizit im Bestand	[kPa]
D_a	Sättigungsdefizit in der Referenzhöhe	[kPa]
D_c	Sättigungsdefizit $D_c = z_{0c} + d_c$, d_c Nullpunktverschiebung für einen geschlossenen Bestand der Bestandeshöhe h	[kPa]
D_{ENSEF}	Bestandesdichte	[-]
D_{iff}	Differenz	[-]
d_{krit}	Fehlmenge Wasser	[mm a ⁻¹]
dl :	Anteil der Zeit zwischen Sonnenaufgang und –untergang an Tageslänge	[d ⁻¹]
d_{max}	Abstand zwischen kumulierten Verteilungsfunktionen	[-]
e	aktuelle Dampfdruck	[hPa]
E	Evaporation	[mm m ⁻²]
EA_{max}	maximal mögliche Dampfdruck	[hPa]
E_C	Transpiration	[mm m ⁻²]
E_E	Temperatur abhängige Sättigungsdampfdruck über Eis	[hPa]

Verzeichnis der Symbole im Text

E_s	Bodenverdunstung	[mm m ⁻²]
EVAP	Gesamtevapotranspiration	[mm]
E_w	Temperatur abhängige Sättigungsdampfdruck über Wasser	[hPa]
f_i	Anteil der Gesamtwurzellänge der Bodenschicht i	[-]
f_p	Projektionsfaktor	[-]
F_{rel}	relative Feuchte	[%]
f_x	Anteil des Pflanzenwiderstands im Xylem	[-]
G	Bodenwärmestrom	[W m ⁻²]
g_l	Blattleitfähigkeit	[m s ⁻¹]
GLMAX	maximale Blattleitfähigkeit	[m s ⁻¹]
GLMIN	minimale Blattleitfähigkeit	[m s ⁻¹]
g_{sc}	Bestandesleitfähigkeit	[m s ⁻¹]
G(x)	kumulierte gute Verteilungsfunktion	[-]
h	Bestandeshöhe	[m]
i	steht für die Tiefen 15, 30, 75 cm bzw. 30, 60 cm	[-]
I	Verdunstungsrate	[mm]
I_{LAI}	Interzeptionsfraktion pro Einheit LAI	[-]
I_{ph}	potentiell mögliche Einstrahlung auf eine horizontale Ebene	[MJ m ⁻²]
I_{ps}	potentiell mögliche Einstrahlung auf eine geneigte Ebene	[MJ m ⁻²]
IRVP	Evaporation des interzeptierten Regens	[mm]
I_{SAI}	Interzeptionsfraktion pro Einheit SAI	[-]
ISVP	Evaporation des interzeptierten Schnees	
k	KARMAN-Konstante 0,4	[-]
K_h	Eddy-Diffusivität in Bestandeshöhe	[mm d ⁻¹]
k_l	Extinktionskoeffizient	[-]
K_i	hydraulische Leitfähigkeit der Rhizosphäre	[mm d ⁻¹]
K_s	gesättigte hydraulische Leitfähigkeit	[cm ³ cm ⁻³]
$K(\theta)$	Wasserleitfähigkeit	[mm d ⁻¹]
L	Anzahl der Evolutionsschritte (SCM-UA Algorithmus Parameter)	
LAI	Blattflächenindex	[m ² m ⁻²]
LAI _{max}	maximaler Blattflächenindex	[m ² m ⁻²]
LK	Luftkapazität Poren > 50 µm (pF<1.8)	[Vol %]
L_v	Latente Verdampfungsenergie	[J kg ⁻¹]

Verzeichnis der Symbole im Text

M_i :	in Abhängigkeit der Tiefe (i) berechnetes Verhältnis der normierten Reststreuung zu normierten Streuung der Messdaten	
M_{XKPL}	maximale Pflanzenleitfähigkeit	[mm d ⁻¹ MPa ⁻¹]
n	Formfaktor der hydraulischen Funktion	[-]
N	Anzahl Zeitschritte der Analyse	
n_{ed}	Extinktionskoeffizient der Eddy-Diffusivität 2,5	[-]
n_{FK}	nutzbare Feldkapazität	[Vol. %]
n_{FK_r}	relative nutzbare Feldkapazität	[%]
$n_{\text{FK}_{\text{rWe}}}$	relative nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums	[-]
n_s	Stammzahl pro Fläche	[ha ⁻¹]
n_{SCEM}	Anzahl der zu optimierenden Parameter (SCEM-UA Algorithmus Parameter)	
P	Niederschlag	[mm]
PET	potenzielle Evapotranspiration	[mm]
p_i	simulierter Wert (θ , ψ_m) zum Zeitpunkt i	[cm ³ cm ⁻³]
p_i'	gemessener Wert (θ , ψ_m) zum Zeitpunkt i	[cm ³ cm ⁻³]
P_{rate}	Auffangrate des Niederschlags	[mm d ⁻¹]
PWP	permanente Welkepunkt	[Vol. %]
q	Anzahl der Komplexe (SCEM-UA Algorithmus Parameter)	[-]
Q	Wassermenge, die Fließquerschnitt durchströmt	[m ³ s ⁻¹]
r_{aa}	aerodynamischer Widerstand zwischen effektiver Quellhöhe und Referenzhöhe über dem Bestand	[s m ⁻¹]
r_{ac}	aerodynamischer Widerstand an der Blattoberfläche oder Grenzschichtwiderstand	[s m ⁻¹]
R_{ange}	Spannweite des gemessenen θ der Tiefe i	
r_{as}	aerodynamischer Widerstand der Bodenschicht gegen Wasserdampftransport von der Bodenoberfläche zur effektiven Quellhöhe	[s m ⁻¹]
r_{cs}	Spaltöffnungswiderstand im Blatt gegen Wasserdampftransport an die Atmosphäre	[s m ⁻¹]
R_{ELHT}	relative Bestandeshöhe	[-]
R_G	Globalstrahlung	[W m ⁻²]
R_{Gh}	potentielle solare Einstrahlung auf eine horizontale Ebene	[W m ⁻²]
R_{Gkor}^2	potentielle solare Einstrahlung auf eine geneigte Ebene	[W m ⁻²]
$R^2_{\text{Hüll}}$	modifizierte NASH und SUTCLIFFE Gütefunktion des Hüllkurven-Ansatzes	[-]

Verzeichnis der Symbole im Text

r_i	Widerstand der Pflanze gegen die Wasseraufnahme jeder Schicht i	$[s\ m^{-1}]$
R_K	kurzwellige solare Strahlung	$[W\ m^{-2}]$
R_L	langwellige solare Strahlung	$[W\ m^{-2}]$
R^2_{mod}	modifizierte NASH und SUTCLIFFE Gütefunktion den Wassergehalts- und Matrixpotenzials-Ansatzes	$[-]$
R_N	Strahlungsbilanz	$[W\ m^{-2}]$
r_p	Gesamtpflanzenwiderstand	$[MPa\ d\ mm^{-1}]$
R_{UKR}	verfügbare Energie unter dem Kronenraum	$[W\ m^{-2}]$
$R_{ÜKR}$	verfügbare Energie über dem Kronenraum	$[W\ m^{-2}]$
r_r	Gesamtwurzelwiderstand	$[MPa\ d\ mm^{-1}]$
r_s	Rhizosphärenwiderstand	$[MPa\ d\ mm^{-1}]$
r_{ss}	Bodenwiderstand gegen Wasserdampftransport aus dem Boden hin zur Bodenoberfläche	$[s\ m^{-1}]$
r_{ssa}	Bodenwiderstand bei Feldkapazität	$[s\ m^{-1}]$
r_{ssb}	Exponent konstant 1, Beziehung zwischen r_{ssa} und ψ	$[-]$
r_t	Gesamter Widerstand gegen die Wasseraufnahme aller Schichten	$[s\ m^{-1}]$
r_W	Quellen und Senken (Wurzelwasseraufnahme)	
r_x	Xylemwiderstand	$[MPa\ d\ mm^{-1}]$
s	Populationsgröße (SCEM-UA Algorithmus Parameter)	
S_{and}	Sandgehalt	$[\%]$
SAI	Stammflächenindex	$[m^2\ m^{-2}]$
S_{eff}	effektive Sättigung	$[-]$
S_{int}	Interzeptionsspeicher	$[mm]$
S_l	Blattfläche	$[cm]$
S_{LAI}	Speicherkapazität pro Einheit LAI	$[mm]$
$SLVP$	Bodenverdunstung	$[mm]$
U_{sch}	Schluffgehalt	$[\%]$
S_{krit}	kritische Schwellenwert als Wassergehalt oder Matrixpotential $[cm^3/cm^3]$ oder $[hPa]$	
S_{max}	maximale Interzeptionsspeichervermögen	$[mm]$
$SNVP$	Schneeverdunstung	$[mm]$
S_{SAI}	Speicherkapazität pro Einheit SAI	$[mm]$
S_{Ver}	maximal mögliche Wasseraufnahme aus dem Boden	$[mm\ d^{-1}]$
$S_{(x)}$	kumulierte schlechten Verteilungsfunktion	$[-]$
T	Verdunstungsrate	$[mm\ d^{-1}]$

Verzeichnis der Symbole im Text

T_i	Transpirationsrate der einzelnen Bodenschichten i	[mm d ⁻¹]
T_{krit}	Dauer der gesamten Stressereignisse pro Jahr	[Tage a ⁻¹]
T_{like}	likelihood Verhältnis (SCEM-UA Algorithmus Parameter)	
T_m	Tagesmittelwert der Lufttemperatur	[°C]
T_{max}	maximale Lufttemperatur	[°C]
T_{min}	minimale Lufttemperatur	[°C]
T_{on}	Tongehalt	[%]
TRAN	Modelloutput der Transpiration	[mm]
TRD	Trockenrohdichte	[gcm ⁻³]
TS _n	Wärmesumme	
t_0	Zeit in Tagen seit dem 1. November	[Tage]
T_0	Temperaturschwelle für Kältetage	[°C]
t_1	Zeit in Tagen seit dem 1. Februar	[Tage]
T_1	Temperaturschwelle für Wärmetage	[°C]
Δt	ein Tag	[Tag]
u	Windgeschwindigkeit	[m s ⁻¹]
u^*	Reibungsgeschwindigkeit	[m s ⁻¹]
u_h	Windgeschwindigkeit an der Bestandesoberkante	[m s ⁻¹]
w	Blattbreite	[m]
Wurzelc	baumartenspezifischen Wurzelkoeffizient	[-]
z	vertikale Fließstrecke	[m]
Z	mittlere Tiefe der Schicht	[cm]
z_a	Referenzhöhe	[m]
z_0	Rauigkeitshöhe am Boden	[m]
α	Formfaktor der hyd. Funktion (Lufteintrittspunkt)	[m ⁻¹]
α_i	modifizierte Formfaktor, der abhängig von Schichtdicke, Skelettanteil, Radius und Gesamtlänge der Wurzeln berechnet wird	[MPa]
γ	Psychrometerkonstante = 0,067	[kPa K ⁻¹]
ε	Emissivität der Atmosphäre	[-]
θ	aktueller Wassergehalt	[cm ³ cm ⁻³]
θ_F	Wassergehalt bei FK	[cm ³ cm ⁻³]
θ_{krit}	kritischer Schwellenwert des Wassergehalts	[cm ³ cm ⁻³]
θ_M	Wassergehalt bei PWP	[cm ³ cm ⁻³]
θ_r	residualer Wassergehalt	[cm ³ cm ⁻³]
θ_s	gesättigter Wassergehalt	[cm ³ cm ⁻³]
ρ	Dichte der Luft, 1.234	[kg m ⁻³]

Verzeichnis der Symbole im Text

ρ_t	Trockenrohdichte	[g cm ⁻³]
ρ_{tp}	Verhältnis projizierter zu Gesamtblattfläche	[-]
ρ_w	Wasserdichte	[kg m ⁻³]
$\rho_{wg d}$	Gravitationspotenzialdifferenz, wobei d für die Nullpunktverschiebung steht	[MPa]
σ	Stefan-Boltzmann Konstante $5.67 \cdot 10^{-8}$	[W m ⁻² K ⁻⁴]
ψ_{akt}	aktuelles Matrixpotential	[kPa]
ψ_c	minimales Blattwasserpotenzial (kritischer Wert)	[MPa]
ψ_{FK}	Matrixpotential bei Feldkapazität	[kPa]
ψ_l	Blattwasserpotenzial	[MPa]
ψ_M	Matrixpotential	[hPa]
ψ_t	gewichtetes mittleres Bodenwasserpotenzial	[MPa]
ψ_{ti}	Bodenwasserpotential	[kPa]
ψ_{xyl}	Xylempotenzial der Bodenoberfläche	[MPa]
Θ	der effektive Wassergehalt (	[-]
τ	Tortuositäts- bzw. Poreninteraktionsfaktor	[-]
f	Korrektur für die Bewölkung	[-]
Δ	Änderung des Dampfdrucks mit der Temperatur	[kPa K ⁻¹]

Ehrenwörtliche Erklärung:

Hiermit erkläre ich, dass die Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde.

Ort, Datum

Unterschrift