

## Einfluss von Boden und Bestockung auf den Standortwasserhaushalt

### *Impact of soil and stand properties on soil water conditions*

Ronny Peters, Falko Clausnitzer, Barbara Köstner, Christian Bernhofer,  
Karl-Heinz Feger & Kai Schwärzel

#### Abstract

*As an objective water balance classification is lacking for forest sites, efforts were made to develop a model-based site classification system taking into account the effects of relief, soil and stand type on soil water conditions. As a first step, this paper displays the results of a BROOK90 application evaluating the influence of these three factors on soil water balance with a strong emphasis on drought conditions. Model runs have been carried out for four different soil types, four stand types and a meteorological input covering the range of typical forest sites in the Tharandt Forest as a testing area. Concepts of drought stress quantification help to point out the effects of stress on the sites.*

*In drought years, deciduous trees and soils with limited water retention properties show the effects of drought stress more strongly. The effects of both soil and stand properties were of the same magnitude as the influence of the conventionally considered relief-based meteorological variation at the site.*

**Keywords:** *soil water modelling, sensitivity studies, drought, transpiration*

#### Zusammenfassung

Die forstliche Standortklassifikation ist bundesweit uneinheitlich und bezüglich der Bewertung des Gesamtwasserhaushalts meist subjektiv. Um eine Vereinheitlichung zu erreichen, wird eine modellbasierte, objektive Klassifikation angestrebt, die neben der reliefbasierten meteorologischen Variabilität auch Bodenform und Bestockung einbezieht. In diesem Artikel werden die Ergebnisse vergleichender BROOK90-Simulationen, die den Effekt unterschiedlicher Böden, Baumarten und Ausrichtungen im Gelände untersuchen, dargestellt und diskutiert. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Betrachtung von Wasserverfügbarkeit. Es wurden Parametrisierungen für vier verschiedene Bodenformen mit den Bestockungen Buche, Eiche, Fichte und Kiefer verwendet. Die reliefbedingten meteorologischen Standortcharakteristiken richten sich nach den lokalen Gegebenheiten des Testgebiets Tharandter Wald. Für das Konzept der Darstellung von Unterschieden hinsichtlich des Standortwasserhaushaltes wurden hierfür im Modell implementierte Stressindikatoren verwendet.

Es zeigt sich, daß in Trockenjahren die Laubbäume höhere Stressindikatoren erreichen. Gleichfalls treten bei Böden mit geringerer Wasserretention erwartungsgemäß mehr Stressstage auf. Bestockung und Bodeneigenschaften haben einen Einfluß auf Wasserknappheit in der Größenordnung wie die zur forstlichen Standortklassifikation verwendeten morphologischen Geländeeigenschaften.

**Schlüsselwörter:** Bodenwasser-Modellierung, Sensitivitätsanalyse, Trockenheit, Transpiration

### 1 Einleitung

Für die forstliche Planung spielt die Kenntnis wasserhaushaltsbezogener Standorteigenschaften eine zentrale Rolle. Traditionell erfolgt in Mitteleuropa die Klassifizierung von Waldstandorten nach Wasserhaushaltsstufen, erhoben im Rahmen von Feldansprachen. Diese Verfahren sind qualitativ, subjektiv, statisch und variieren hinsichtlich der dabei berücksichtigten Einflussgrößen von Bundesland zu Bundesland. So erfolgt in einigen Bundesländern die Klassifikation ausschließlich anhand des Reliefs (Hanglage/Exposition), in anderen Bundesländern werden zusätzlich Bodeneigenschaften einbezogen (GAUER et al. 2011). Allen Verfahren ist jedoch gemeinsam, dass die Wirkung klimatischer Extreme oder unterschiedlicher Bestockungen auf das Bodenwasserregime nicht abgebildet werden kann.

Um die Standortklassifikation bezüglich des Wasserhaushalts zu objektivieren und dabei auch den Einfluss sich ändernder Rahmenbedingungen (Klimaextreme, Waldumbau) darzustellen, ist eine modellgestützte Bewertung des Wasserhaushaltes erforderlich. BROOK90 (FEDERER et al. 1995) ist ein eindimensionales Wasserhaushaltsmodell, das durch Verwendung bestockungstypischer Parameter und Beschreibung physiologischer Prozesse eine baumartenspezifische Modellierung ermöglicht. Dabei erfolgt eine physikalisch begründete Modellierung des Bodenwassertransportes unter Einbeziehung horizontspezifischer Bodeneigenschaften wie Wasserretention und hydraulische Leitfähigkeit.

Aus forstlicher Sicht ist das Auftreten von Bodentrockenheit und von Wasserüberschuss in Form von Stauwasser ein wesentliches Kriterium für Anwuchsverhalten und Wachstumsdepressionen. Daher sind für die flächenhafte Bewertung des Standortwasserhaushaltes aussagekräftige Indikatoren für die Bodenwasserbedingungen zu entwickeln und im Modell zu implementieren. Diese Indikatoren sind so zu konzipieren, dass auch eine räumliche Visualisierung der Bodenwasserbedingungen in Form neuartiger Standortskarten ermöglicht wird.

In diesem Artikel wird das Konzept zur Indikation des im Wurzelraum verfügbaren Wassers vorgestellt. Dazu wurde anhand von Messungen parametrisierte Modell BROOK90 für verschiedene Standorte des Testgebiets Tharandter Wald angewendet und der Einfluss von Relief, Boden und Bestockung auf den Wasserhaushalt und seine Komponenten untersucht. Außerdem wird eine Sensitivitätsanalyse zum Einfluss bestockungsspezifischer Parameter, die Wasseraufnahme und Transpiration steuern, präsentiert und diskutiert.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 BROOK90 und Indikatoren des Wasserhaushaltes

Im Rahmen unseres Vorhabens wurde für die Modellierung des Wasserhaushaltes LWF-Brook90 in der Version 3.3 (HAMMEL & KENNEL 2001, vgl. z.B. SCHWÄRZEL et al. 2009a) genutzt, wobei in diesem Artikel die Begriffe BROOK90 und BROOK90, Version LWF3.3 synonym verwendet werden. BROOK90 berechnet den Wasserhaushalt und seine Komponenten auf der Standortsskala in Tagesschritten (FEDERER 1995). Eingangsdaten sind täglicher oder auch zeitlich höher aufgelöster Freilandniederschlag, tägliches Minimum und Maximum der Lufttemperatur sowie Dampfdruck, Globalstrahlung oder Sonnenscheindauer und Windgeschwindigkeit als Tagesmittelwerte. Der Bestand wird im Modell durch Baumhöhe, Stammzahl, Durchwurzelungstiefe und -intensität, den saisonalen Verlauf von Blattflächenindex und die Blattleitfähigkeit beschrieben. Die Charakterisierung des Bodens erfolgt im Modell durch horizontspezifische Materialfunktionen (Wasserretention und hydraulische Leitfähigkeit). BROOK90 berechnet die potenzielle Transpiration unter Berücksichtigung der baumartenspezifischen, maximalen Blattleitfähigkeit nach SHUTTLEWORTH-WALLACE (1985). Die maximal mögliche, tägliche Wasseraufnahmerate durch die Wurzeln ergibt sich aus dem Gradient des aktuellen Bodenwasserpotenzials im Wurzelraum und dem kritischen minimalen Blattwasserpotenzial geteilt durch die Summe aus Pflanzen- und Rhizosphären-Widerstand. Im Modell wird zu Beginn jedes Tages die nach Shuttleworth-Wallace ermittelte potenzielle Transpiration mit der maximal möglichen Wasseraufnahmerate verglichen. Als aktuelle Transpiration wird dann das Minimum der beiden Werte in den nachfolgenden Kalkulationen der Wasserflüsse verwendet. Ausgabegrößen der Modellrechnungen sind auf täglicher Basis Evaporation, Interzeption, Transpiration, diverse Abflusskomponenten (Sickerwasserrate, Oberflächenabfluss, Bypass-Fluss, lateraler Abfluss, Abfluss am Pegel) sowie Wasserspannung und Wassergehalt für verschiedene Bodentiefen. Als Grundlage für die Bewertung des Wasserhaushaltes von Waldstandorten wurden zusätzlich

Indikatoren der Bodentrockenheit, des Wasserüberschusses und des Trockenstresses durch Transpirationseinschränkung (in BROOK90: „transpiration ratio“) im Modell implementiert (SCHWÄRZEL et al. 2009a). Bodentrockenheit tritt auf, wenn das Verhältnis von aktuellem Bodenwassergehalt zu potenziell nutzbarer Feldkapazität (nFK) des Wurzelraumes den 40%-Schwellenwert unterschreitet. Wasserüberschuss wird im Modell angezeigt, wenn an zwei aneinander folgenden Tagen der aktuelle Bodenwassergehalt in 40 cm Tiefe den Wassergehalt bei Feldkapazität übertrifft. Dieser Schwellenwert ‚Wasserüberschuss‘ kennzeichnet das Auftreten von Staunässe. Als Tage mit Trockenstress werden dabei Tage bezeichnet, an denen das Verhältnis von aktueller zu potenzieller Transpiration den 70%-Schwellenwert unterschreitet. Im Modell werden die Häufigkeiten der täglichen Über- bzw. Unterschreitung dieser Schwellenwerte jeweils für den Zeitraum Juni bis August jeden Jahres aufsummiert. Mehr Informationen zu den Indikatoren finden sich in SCHWÄRZEL et al. (2009a).

### 2.2 Böden

Vier repräsentative Böden des Testgebietes Tharandter Wald wurden für diese Modellstudie ausgewählt. Dabei handelt es sich um Braunerden, z. T. schwach podsoliert und pseudo-vergleyt, aus Rhyolith und Basalt, sowie um einen Podsol auf Kreidesandstein. Die Ausgangssubstrate stellen meist periglaziäre Fließerden mit teilweise starrer Beimischung von Lösslehm dar (Tab. 1). Diese Profile wurden bodenkundlich charakterisiert (AG BODEN 2005) und anschließend beprobt. Bei den Standorten mit geringen Steingehalten wurden ungestörte Proben für die Ermittlung der Wasserretention und der ungestörten hydraulischen Leitfähigkeit entnommen. Bei den skelettreichen Profilen konnte nur die Wasserretention bestimmt werden. Die für die Modellierung erforderliche Leitfähigkeitsfunktion wurde für skelettreiche Standorte geschätzt nach dem Ansatz von WÖSTEN et al. (1999) unter Einbeziehung der im Labor ermittelten Bodentextur und Wasserretention. Hohe Steingehalte und Dichtlagerung des Unterbodens begrenzen die Solummächtigkeit. Deshalb ist das pflanzenverfügbare Wasser der Standorte als gering einzuschätzen.

**Tab. 1:** Profilkennzeichnung der verwendeten Modellböden. nFK = pflanzenverfügbares Wasser.

**Tab. 1:** Profile description of the model soils. nFK = plant available water.

Bodenform	Symbol	Standortsformen- gruppe	Solummächtig- keit [cm]	nFK Solum [mm]
Schwach podsoliger Braunerde-Pseudogley aus schuttführendem Fließ-Tonschluff über tiefem schuttführenden Fließ-Tonlehm aus Lösslehm, Rhyolith und Basalt	p2BB-SS	M2: mittelfrischer, mäßig nährstoff-versorgter Standort	48	60
schwach podsolige Pseudogley-Braunerde aus Fließ-Lehmschluffgrus über tiefem Grus aus Rhyolith und Lösslehm	p2SS-Bv	M3: trockener, mäßig nährstoff-versorgter Standort	60	100
Normbraunerde aus Fließ-Schutttonschluff über Fließ-Normallehmschluff aus Basalt und Lösslehm	BBn	K3: trockener, kräftiger Standort	60	60
Normpodsol aus schutt-führendem Fließ-Lehm-sand über schuttführ-endem Fließ-Reinsand über tiefem Fließ-Reinsand-schluff aus Sand-stein und Lösslehm	PPn	A3: trockener, armer Standort	75	110

In Tabelle 1 sind auch die Nährkraft- und Feuchtestufen der Standorte aufgelistet.

### 2.3 Pflanzenparameter

Die Parametrisierung der am Landberg anzutreffenden Buchenbestockung (*Fagus sylvatica*) beruht auf Messungen (BERNHOFER et al. 2011, SCHWÄRZEL et al. 2009b). In der Nähe des Landberges befindet sich die Ankerstation Tharandt, die meteorologische Referenzstation für diese Untersuchung. Der dortige, intensiv untersuchte Fichtenbestand bildet die Grundlage für die hier verwendete Parametrisierung für Fichte (*Picea abies*) (BERNHOFER et al. 2011, CLAUSNITZER et al. 2011, KÖSTNER & CLAUSNITZER 2011, SCHWÄRZEL et al. 2009b). Die Parametrisierung für Buche und Fichte wurde in vorangegangenen Arbeiten anhand gemessener Bodenwasser-, Safffluss- und Eddy-Messungen getestet (SCHWÄRZEL et al. 2007, 2009a). Sensitive, die Verdunstung steuernde Parameter sind in Tab. 2 dargestellt.

Für die Untersuchung alternativer, im Tharandter Wald nicht nennenswert anzutreffender Bestockungen wurden Waldkiefer (*Pinus sylvestris*) und Stieleiche (*Quercus robur*) ausgewählt. Die Parametersätze für diese Baumarten wurden der Literatur entnommen (Tab. 2). Für Kiefer fanden sich zwei Quellen, die sich beide auf den Kiefernforst in der südlichen Oberrheinebene bei Hartheim (47°56' N, 7°36' E) (STURM et al. 1998, STURM 1988) beziehen. Die mittlere Jahrestemperatur beträgt hier 9,8°C, der Jahresniederschlag 647 mm und die mittlere jährliche Sonnenscheindauer 1.800 h (STURM 1988). Für Stieleiche (*Quercus robur*) konnte kein vollständiger Parametersatz für einen einzelnen Bestand gefunden werden. In MORECROFT & ROBERTS (1999) sind Parameter der Temperaturabhängigkeit der potentiellen Verdunstung für einen Altbestand in Oxfordshire (Südengland) zu finden. Umfangreiche Veröffentlichungen (z. B. EPRON & DREYER 1993, GRANIER & BREDÁ 1996) beziehen sich auf einen Traubeneichenbestand (*Quercus petraea*) im Forêt domaniale de Champenoux, Lothringen (Ostfrankreich) (48°44'N, 6°14'E). Die Modellparameter aus der Literatur sind in Tabelle 2 aufgeführt.

**Tab. 2:** Sensitive, die Verdunstung steuernde Parameter für Buche, Fichte, Eiche, und Kiefer. Die Werte für Buche und Fichte stammen aus eigenen Erhebungen (BERNHOFER et al. 2011, CLAUSNITZER et al. 2011, KÖSTNER & CLAUSNITZER 2011, SCHWÄRZEL et al. 2009b); Spannen der Literaturwerte exemplarisch für Kiefer.

**Tab. 2:** Parameters to which transpiration is most sensitive for beech, spruce, oak and pine trees. Values for beech and spruce are from measurements made on site (BERNHOFER et al. 2011, CLAUSNITZER et al. 2011, KÖSTNER & CLAUSNITZER 2011, SCHWÄRZEL et al. 2009b); ranges of values taken from the literature are shown for pine trees as an example.

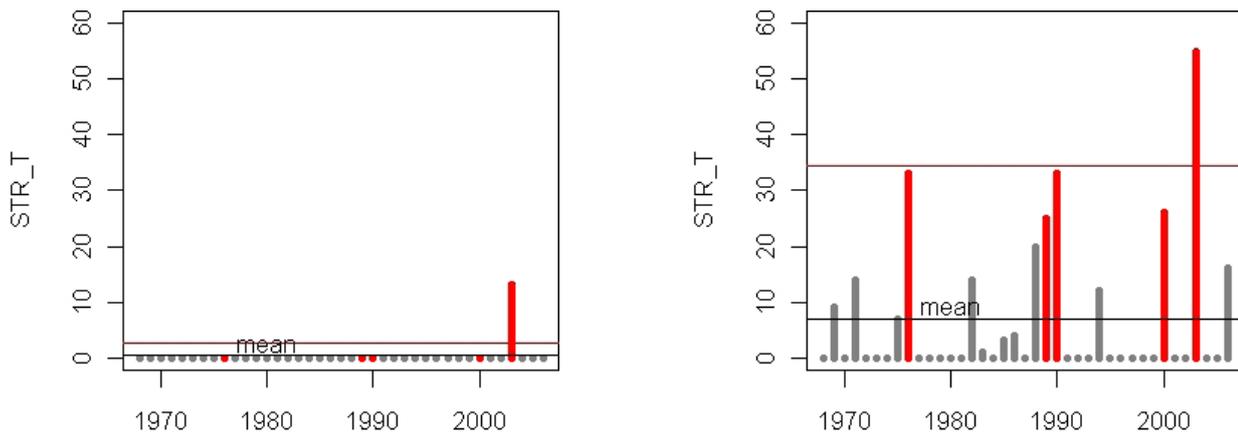
Parameter	Buche	Fichte	Eiche	Kiefer	Kiefer (min)	Kiefer (max)
max. Blatteleitfähigkeit $g_{l,max}$ [mm/s]	4,5	3,4	5,3 (FEDERER et al. 1996)	4,9 (STURM 1988)	2,0 (POYATOS et al. 2008)	10,0 (KÖSTNER et al. 1996)
max. Pflanzenleitwert MXKPL [mm/d/MPa]	3,0	0,95	6,4 (GRANIER & BREDÁ 1996)	7,6 (STURM 1988)	4,0 (CIENCIALA et al. 1998)	14,0 (GRANIER et al. 1996)
krit. Blattwasserpotential $\Psi_{CR}$ [MPa]	-2,2	-2,2	-3,0 (EPRON & DREYER 1993)	-1,5 (STURM et al. 1998)		
max. LAI	4,0	7,6	4,0	3,0		

### 2.4 Auswahl des Bilanzzeitraumes

Aufgrund von Unterschieden in Austrieb, Dauer der Belaubung und Bedeckung unterscheidet sich der Wasserbedarf von Baumart zu Baumart im Jahresgang. Für die Vergleichbarkeit der Modellergebnisse zur Transpiration verschiedener Baumarten wurde der hier betrachtete Bilanzzeitraum auf die Periode maximaler Belaubung (Juni–August) gelegt. Da zu Beginn des Frühjahres der Bodenwasserspeicher in den Mittelgebirgsregionen meist gut gefüllt ist und erst im Laufe der Frühlingsmonate aufgebraucht wird, ist in den Monaten April und Mai selten von einer Angebotslimitierung der Transpiration auszugehen. Ein relativ trockenes und verdunstungsstarkes Frühjahr mit geringen Niederschlägen im April und Mai führt aber zu einer starken Ausschöpfung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers bereits zu Beginn des Sommers. Resultierend ist eine deutlich verringerte Transpiration in den frühen Stadien der Wachstumsperiode, wie z. B. im Jahr 2003 an Fichten im Tharandter Wald beobachtet (CLAUSNITZER et al. 2011).

SCHWÄRZEL et al. (2009a) stellten fest, dass die Betrachtung langjähriger Mittelwerte für die Bewertung des Standortwasserhaushaltes kaum aussagekräftig ist. Abbildung 1 bestätigt dies. Gezeigt werden für zwei Modellstandorte unter Buche für jedes Jahr des betrachteten Zeitraums, die Anzahl der Tage an denen die reale Transpiration den 70 %-Wert der potenziellen Transpiration unterschreitet. Bei Braunerde-Pseudogley (p2BB-SS, vgl. Tab. 1) wird nur 2003 eine größere Anzahl von Unterschreitungstagen beobachtet, während beim Normpodsol (PPn, vgl. Tab. 1) dieser Wert auch in anderen Jahren häufig unterboten wird. Jedoch gibt der Mittelwert dieser Unterschreitungstage (schwarze Linie) nur wenig Auskunft über die Ausprägung sehr trockener Jahre. Würde allerdings nur das extremste Jahr der Modellierungsperiode berücksichtigt (hier 2003), ergäbe sich eine große Abhängigkeit vom gewählten Betrachtungszeitraum. Daher schlagen wir vor, für die modellgestützte Bewertung des Standortwasserhaushaltes die 5 trockensten Jahre aus der knapp 40jährigen Reihe zu mitteln (rote Linie in Abb. 1 und Abb. 2)

In Abb. 2 sind für den Normpodsol-Standort unter Buche Werte der realen und potenziellen Transpiration der Einzeljahre gegenübergestellt. In durchschnittlichen Jahren kann



**Abb. 1:** Anzahl der Tage mit Trockenstress bei Buche unter Braunerde-Pseudogley (li.) und Normpodsol (re.). rot: 5 trockenste Jahre, Mittelwert (schwarze Linie) und Mittelwert für Trockenjahre (rote Linie).

**Fig. 1:** Number of days with drought stress for beech, left: on p2BB-SS, right: on PPn. black line: mean, red columns: 5 driest years, red line: mean of 5 driest years.

aufgrund der ausreichenden Niederschläge und der dadurch regelmäßigen Auffüllung des Bodenwasserspeichers der Verdunstungsanspruch der Atmosphäre durch die Transpiration befriedigt werden. Das langjährige Mittel aus aktueller Transpiration liegt nur geringfügig unterhalb dessen der potentiellen Transpiration. Eine Gegenüberstellung dieser Größen besitzt folglich nur für Trockenjahre Aussagekraft.

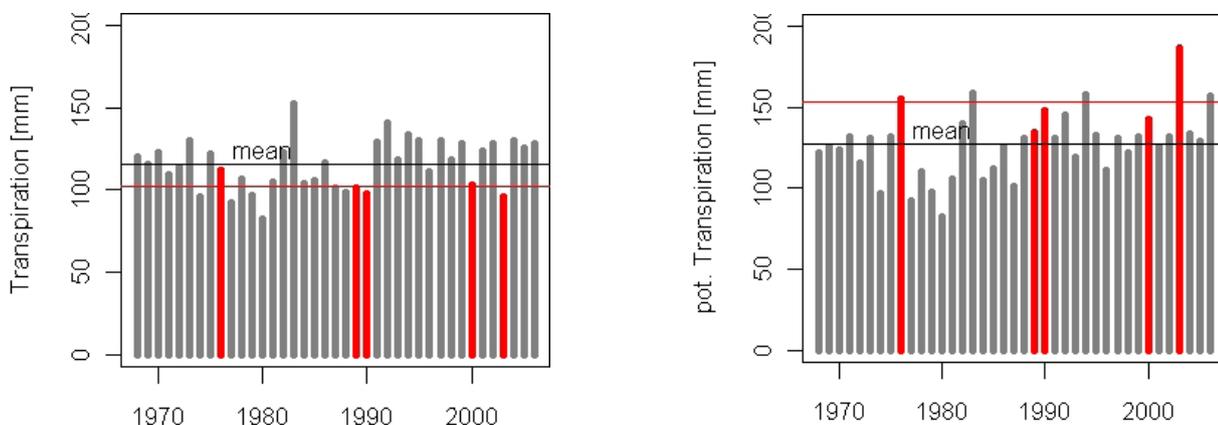
Daher beziehen sich die Bilanzierungen nachfolgend auf Mittelwerte aus den trockensten Jahren der Berechnungszeitspanne. Dies sind die Trockenjahre 1976, 1989, 1990, 2000 und 2003.

### 3 Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1 Sensitivitätsanalyse zur Verdunstung

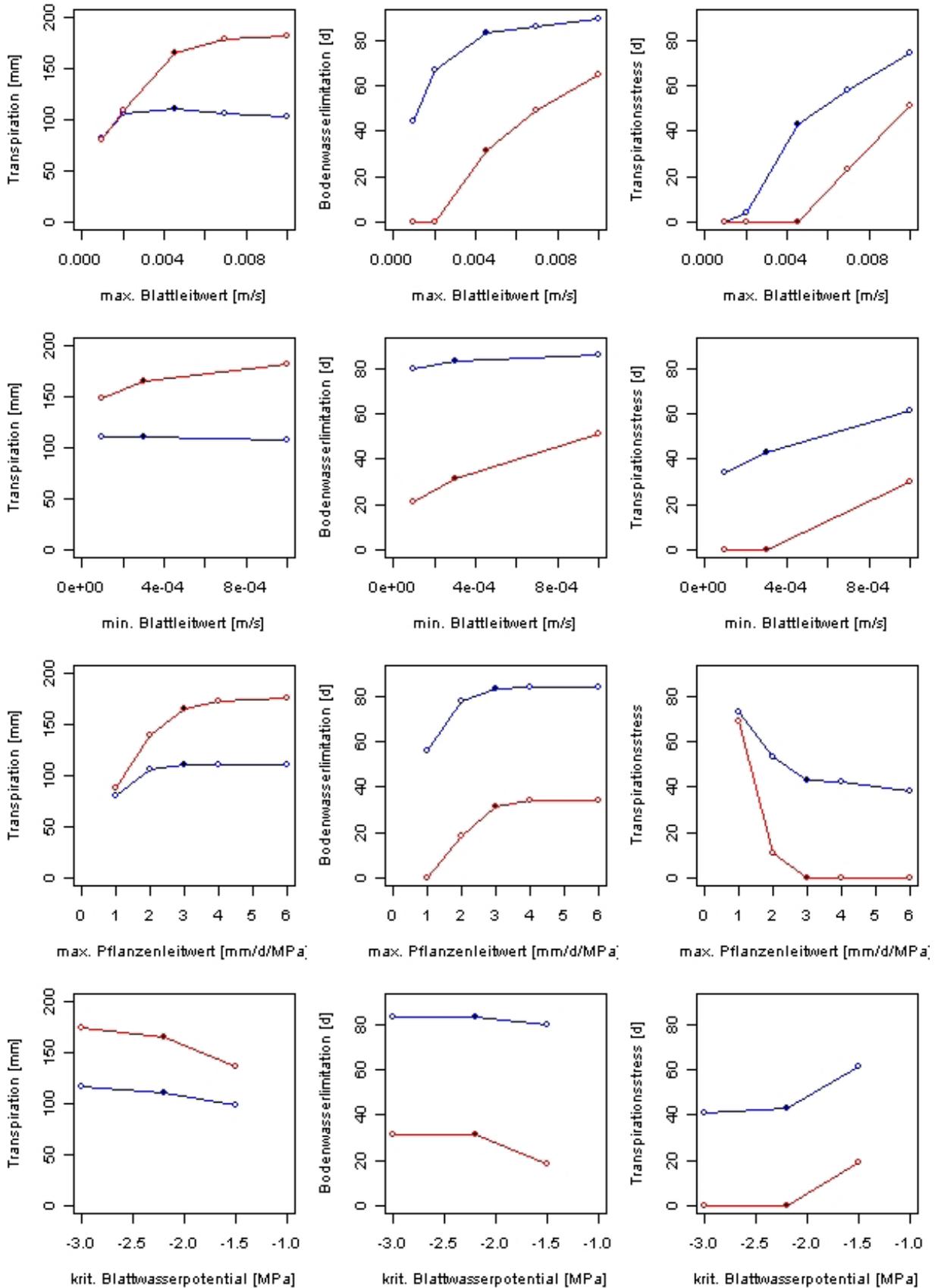
BROOK90 benötigt zur Modellierung des Wasserhaushaltes die Kenntnis von Parametern, welche die physiologischen Prozesse der Wasseraufnahme und Transpiration steuern. Aufgrund fehlender Messwerte werden solche baumartenspezifischen Parameter häufig geschätzt. Um die Auswirkung

dieser Parameterunsicherheit auf den Wasserhaushalt und seine Indikatoren bewerten zu können, führten wir eine Sensitivitätsanalyse durch. Wie oben beschrieben, wird im Modell die Verdunstung als Minimum aus potenzieller Transpiration, also dem atmosphärischem Verdunstungsanspruch (Nachfrage) und maximaler Pflanzenwasseraufnahme (Angebot) berechnet. Folglich wird die aktuelle Transpiration entweder durch Parameter der Shuttleworth-Wallace-Gleichung für die potentielle Verdunstung oder durch die Parameter für die maximale Wasseraufnahmerate (insbesondere kritische Blattwasserspannung  $\Psi_{cr}$  und dem maximalen Pflanzenleitwert MXKPL) gesteuert. Grundsätzlich gilt: Wirkt eine Parameteränderung verdunstungsfördernd, treten geringere Bodenfeuchten auf und der Indikator „Bodentrockenheit“ ( $STR_{bw}$ ) erreicht höhere Werte. Die Wirkung auf den Trockenstress ( $STR_T$ ) hängt jedoch davon ab, ob der Parameter die Angebots- oder Nachfrageseite der Transpiration beeinflusst. Der Indikator  $STR_T$  steht für die Anzahl der Tage, an denen das Verhältnis von aktueller zu potenzieller Transpiration den 70%-Schwellenwert unterschreitet. Das tritt nur im Falle angebotslimitierter Transpiration auf. Parameter, welche die potentielle Transpiration erhöhen, führen zu einer häufigeren Unterschreitung des



**Abb. 2:** Transpiration und potentielle Transpiration für die Einzeljahre. Buche unter Normpodsol. rot: 5 trockenste Jahre, Mittelwert (schwarze Linie) und Mittelwert für Trockenjahre (rote Linie).

**Fig. 2:** Actual and potential transpiration for beech, left: on p2BB-SS, right: on PPn. black line: mean, red columns: 5 driest years, red line: mean of 5 driest years.



**Abb. 3:** Sensitivität der Transpiration, der Bodenwasserlimitation und des Transpirationsstresses auf die Modellparameter maximale und minimale Blattleitfähigkeit, maximaler Pflanzenleitwert und kritisches Blattwasserpotential für Buche und 2003, Braunerde-Pseudogley (rot) und Normpodsol (blau), gefüllte Symbole für Originalparameter.

**Fig. 3:** Sensitivity of transpiration, limited soil water supply and transpiration stress on the model parameters maximum and minimum leaf water conductivity, maximum plant conductivity and critical leaf water potential for beech in 2003, on p2BB-SS (red) and PPN (blue). Filled symbols indicate the applied parameters.

70%-Limits. Parameter, welche die maximale Pflanzenwasseraufnahme erhöhen, erhöhen den Quotienten und führen zu kleineren Werten dieses Stressindikators. Abbildung 3 bestätigt dies anhand von Modellrechnungen für den Buchenbestand für das trockene und verdunstungsstarke Jahr 2003. Ausgehend von den aus Messungen abgeleiteten Parametern (jeweils schwarzes Symbol in der Mitte) wurden die Parameter maximaler und minimaler Blattleitwert (für potentielle Transpiration) sowie maximaler Pflanzenleitwert und kritisches Blattwasserpotential (für maximale Pflanzenwasseraufnahme) variiert. Dargestellt sind die Ergebnisse für den Braunerde-Pseudogley und Normpodsol (vgl. Tab. 1).

Auf Änderungen des maximalen Blattleitwertes und des Pflanzenleitwertes erfolgen besonders sensitive Reaktionen. Zu beachten ist, dass der Podsol-Standort bereits zu Beginn der Sommerperiode sehr trocken ist und damit die Änderungen geringer sind. Trotz verdunstungsfördernder Parameteränderung wird deshalb die Verdunstung in der betrachteten Zeitspanne verringert als Resultat der bereits im Frühsommer erfolgten Bodenwasserausschöpfung.

Die Kenntnis über die Sensitivität dieser Parameter auf den berechneten Wasserhaushalt und seine Komponenten ist bedeutsam, wenn Szenarien alternativer Bestockungen betrachtet werden. Die beiden letzten Spalten der Tab. 2 zeigen beispielsweise die Spannweiten der in der Literatur gefundenen Werte der maximalen Blattleitfähigkeit und der maximalen Pflanzenleitfähigkeit für die mit Literaturwerten parametrisierten Bestockung Kiefer. Auch für Eiche wurden von den in Tab. 2 aufgeführten Werten stark abweichende Angaben gefunden. Als maximalen Blattleitwert ermittelten MORECROFT & ROBERTS (1999) einen Wert von 12,2 mm/s, während DREYER et al. (1990) ein kritisches Blattwasserpotential von -2,24 MPa (-3,3 nach BRÉDA et al. 1993, *Q. robur* -2,5 nach OSONUBI & DAVIES 1978, zit. in BACKES 1996) bestimmt haben.

Die Sensitivitätsanalyse verdeutlicht, dass das Modell sehr sensitiv auf den Blattleitwert und den Pflanzenleitwert reagiert. Darin zeigt sich ein großes Dilemma für das Vorhaben, bestockungsspezifische Parameter für Szenarien unterschiedlicher Waldbewirtschaftung zu verwenden: In der Literatur existiert eine breite Palette an Parameterwerten, aber meist ist für einen Bestand kein konsistenter Parametersatz verfügbar. Eine Zuordnung von Parametern zu Bestandeseigenschaften wie Alter oder Bestandesdichte bzw. Aussagen über mögliche Abhängigkeiten von Bodenart oder Klimazone sind bislang nicht möglich. Die Parameterunsicherheit für die Bestockung ist folglich als sehr hoch einzuschätzen, wenn keine Untersuchungsergebnisse aus den Modellgebieten vorliegen.

### 3.2 Wasserhaushalt und Stressindikatoren

In Tab. 3 sind die aktuelle und die potenzielle Transpiration sowie die Indikatoren des Wasserhaushaltes für alle Modellböden und Bestockungen dargestellt. Alle berechneten Werte wurden gemittelt für die Sommerperioden der fünf trockensten Jahre des Betrachtungszeitraumes. Die angegebenen Spannen spiegeln die Variation durch lokale meteorologische Verhältnisse entsprechend des Reliefs wider. Wasserüberschuss in Form von Stauwasser ( $STR_{FK}$ ) spielt bei den betrachteten Standorten nur eine geringe Rolle. Die Unterschiede bezüglich der einzelnen Böden sind gering, für die verschiedenen Bestockungen vernachlässigbar.

Es ist deutlich erkennbar, dass der Einfluss von Bodenart und Bestockung in der gleichen Größenordnung liegt, wie

die Variabilität des Reliefs, die traditionell als Grundlage für die Wasserhaushaltsklassifikation von Waldstandorten dient. Das gilt sowohl für die Transpiration als auch für die Stressindikatoren.

Für Buche und Eiche zeigt sich jeweils eine ähnliche Verteilung der Indikatoren Bodentrockenheit ( $STR_{BW}$ ) und Trockenstress ( $STR_T$ ). Für die stärker verdunstende Eiche wird das 40%-Limit des pflanzenverfügbaren Bodenwasservorrates öfter unterschritten als bei Buche. Die Anzahl der Tage, an denen der 70%-Wert der potenziellen Transpiration unterschritten wird, unterscheidet sich jedoch weniger deutlich, da die Eichen auch bei trockeneren Böden eine stärkere maximale Wasseraufnahme ermöglichen. Das resultiert einerseits aus dem wesentlich höheren maximalen Pflanzenleitwert MXKPL. Andererseits führt das niedrigere kritische Blattwasserpotential der Eiche zu größeren Potentialgradienten (vgl. Tab. 2).

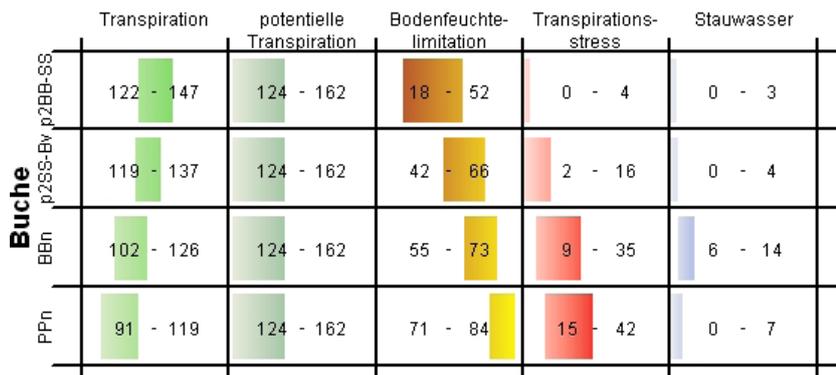
Kiefer zeigt trotz einer hohen Verdunstung eine geringere Anzahl von Tagen mit Unterschreitung der Schwellenwerte. Ursache hierfür ist die wesentlich geringere Interzeption, die insbesondere in den Trockenjahren eine deutlich stärkere Erneuerung der Bodenwasservorräte als bei Buche, Eiche und Fichte nach sich zieht. Außerdem begrenzt der niedrige LAI die potentielle Verdunstung. Das hohe (betragsmäßig kleine) kritische Blattwasserpotential von -1,5 MPa reduziert bei austrocknenden Böden den Potentialgradienten und führt daher in solchen Phasen zu geringerer Transpiration. Dadurch wird die Austrocknung verlangsamt;  $STR_{BW}$  fällt geringer aus als für Buche und Eiche (vgl. Tab. 2).

Eine Kombination der beiden Indikatoren des Wasserhaushaltes zur Standortcharakterisierung ermöglicht eine Einschätzung, wie stark der Verdunstungsanspruch befriedigt werden kann und inwieweit die Ursache dafür in den Bodenwasserbedingungen zu suchen ist. Der Nutzen der Berücksichtigung zweier verschiedener Parameter fällt bei der Betrachtung der Werte für Fichte auf. Bei allen Böden unter Fichte ist die Anzahl der Tage der Unterschreitung des 70%-Wertes der potenziellen Transpiration sehr hoch, obwohl der 40%-Schwellenwert des Indikators Bodentrockenheit kaum unterschritten wird. Aufgrund des extrem niedrigen maximalen Pflanzenleitwertes MXKPL (Tab. 2) kann die Fichte keine hohen Verdunstungsraten erreichen. Das 70%-Limit der potentiellen Verdunstung kann nur erreicht werden, wenn die potentielle Verdunstung gering genug ausfällt. Die Spannen für den Trockenstress  $STR_T$  sind für alle Böden gleich, egal wie oft das 40%-Limit des Bodenwassers unterschritten wird. Eine Verdunstungslimitierung durch mangelnden Bodenwasservorrat ist demnach nicht gegeben. Zu beachten ist, dass die Fichte im Gegensatz zu Buche, Eiche und Kiefer für die betrachteten Böden nicht standortsgerecht ist.

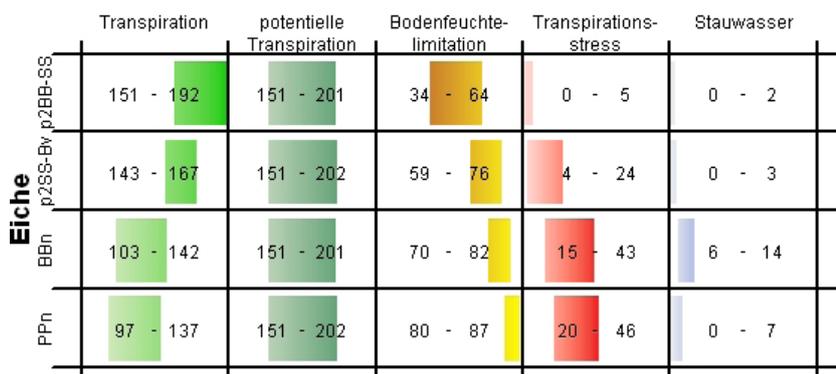
## 4 Schlussfolgerungen

Anhand von vier verschiedenen Böden des Tharandter Waldes konnte mit Hilfe von Modellrechnungen gezeigt werden, dass die hydraulischen Bodeneigenschaften einen ähnlichen Einfluss auf Transpiration und Trockenstress haben wie reliefbedingte räumliche Schwankungen der meteorologischen Bedingungen. Ferner zeigt auch die Art der Bestockung eine deutliche Wirkung auf den Wasserhaushalt.

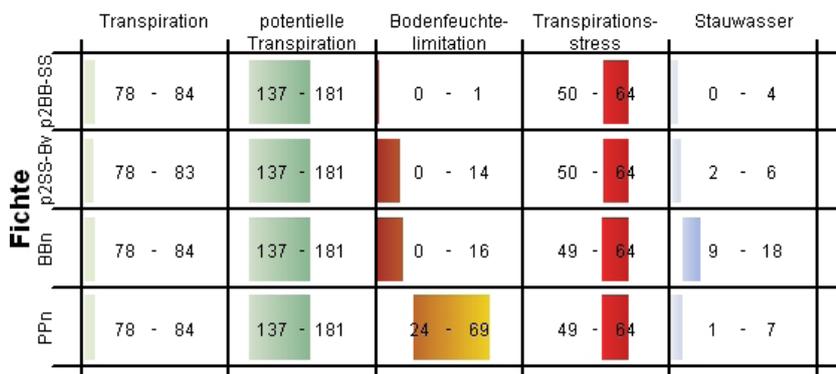
Die Beurteilung von Trockenstress anhand der zwei Parameter Bodenfeuchte-limitierung und Trockenstress hebt unterschiedliche Aspekte des Wassermangels hervor und unterstreicht damit verdunstungsbezogene Pflanzeigenschaften. So



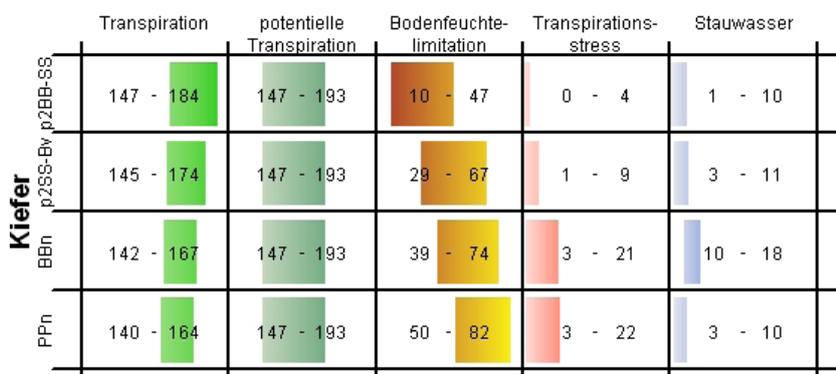
a)



b)



c)



d)

**Tab. 3:** Aktuelle und potentielle Transpiration (beide im mm), Stressindikatoren für Bodenwasserlimitierung ( $STR_{BW}$ ) und Trockenstress ( $STR_T$ ), jeweils Juni–August, Mittelwert der Trockenjahre 1976, 1989, 1990, 2000 und 2003 und Feuchtestreß ( $STR_{FK}$ ) Mittel der Feuchtestjahre 1971, 1974, 1977, 1980 und 1995.

**Tab. 3:** Actual and potential transpiration (in mm) as well as stress indicators for soil water limitation ( $STR_{BW}$ ), for drought ( $STR_T$ ) (for June–August, means of driest years 1976, 1989, 1990, 2000 and 2003) and for stagnant moisture (average of wettest years 1971, 1974, 1977, 1980 and 1995).

weist der hohe Verdunstungsstressindikator für Fichte gepaart mit einer äußerst geringen Bodenfeuchtelimitation auf eine schlechte Anpassung der Baumart an den Standort hin.

Eine Sensitivitätsanalyse der wichtigsten transpirationssteuernden Pflanzenparameter legt die Wirkung der Parameter auf die Stressindikatoren offen. Parameter, die die maximale

Pflanzenwasseraufnahme steuern, wirken konträr auf die Trockenstressindikatoren.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Kombination von Bodeneigenschaften und physiologischen Kennwerten verschiedener Baumarten zu einer sinnvollen Standortsbewertung führen kann, die dem beobachteten Verhalten von Beständen an verschiedenen Standorten entspricht. Vorteil der

modellgestützten Bewertung ist die nachvollziehbare Quantifizierung und Abstufung.

Eine bessere Kenntnis solcher Zusammenhänge ermöglichte eine spezifischere Stressbetrachtung, z. B. durch bestockungstypische Limits in den Stressindikatoren.

Vor dem Hintergrund der dargestellten Parametersensitivität ist jedoch zu betonen, dass noch erheblicher Forschungsbedarf bezüglich bestockungsspezifischer Parameter, die die Wasseraufnahme und Transpiration regulieren, besteht. Es fehlen allgemein Studien, aus denen sich komplette Parametersätze ableiten lassen. Weiter besteht Bedarf an Studien aus einer Region, bei denen vergleichend bestockungsspezifische Parameter für unterschiedliche Baumarten aber bei ähnlichen Standortbedingungen ermittelt werden.

## Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Förderung unseres Verbundprojektes (Kennzeichen FE 504/2-1 und -2).

## Literatur

- AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. 5. Aufl., Hannover: 438 S.
- BACKES, K. (1996): Der Wasserhaushalt vier verschiedener Baumarten der Heide-Wald-Sukzession. Dissertation, Universität Göttingen: 134 S.
- BERNHOFER, CH., SPANK, U., CLAUSNITZER, F., KÖSTNER, B., EICHELHANN, U., MENZER, A., FEGER, K.H., SCHWÄRZEL, K. (2011): Mikrometeorologische, pflanzenphysiologische und bodenhydrologische Messungen in Buchen- und Fichtenbeständen des Tharandter Waldes. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**: 17-28.
- CIENCIALA, E., KUCERA J., RYAN M.G., LINDROTH A. (1998): Water flux in boreal forest during two hydrologically contrasting years; species specific regulation of canopy conductance and transpiration. *Ann. Sci. For.* **55**: 47-61.
- CLAUSNITZER, F., KÖSTNER, B., SCHWÄRZEL, K., BERNHOFER, CH. (2011): Relationships between canopy transpiration, atmospheric conditions and soil water availability – analyses of long-term measurements in an old Norway spruce forest at the Ore Mountains/Germany *Agricultural and Forest Meteorology* (submitted).
- DREYER, E., BOUSQUET, F., DUCREY, M. (1990): Use of pressure volume curves in water relation analysis on woody shoots: influence of rehydration and comparison of four European oak species. *Ann. Sci. For.* **47**: 285-297.
- EPRON, D., DREYER, E. (1993): Long-term effects of drought on photosynthesis of adult oak trees [*Quercus petraea* (Matt.) Liebl. and *Quercus robur* L.] in a natural stand 1993. *New Phytol.* **125**: 381-389.
- FEDERER, C.A. (1995): BROOK90: A simulation model for evaporation, soil water and stream flow, Version 3.1 Computer Freeware and Documentation. USDA Forest Service, PO Box 640, Durham NH 03825, USA.
- FEDERER, 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**: 2315-2321.
- GRANIER, A., BREDI, N. (1996): Modelling canopy conductance and stand transpiration of an oak forest from sap flow measurements. *Ann. Sci. For.* **53**: 537-546.
- GRANIER, A., BIRON, P., KÖSTNER, B., GAY, L.W., NAJJAR, G. (1996): Comparisons of xylem sap flow and water vapour flux at the stand level and derivation of canopy conductance for Scots pine. *Theor. Appl. Climatol.* **53**: 115-122.
- GAUER, J., FEGER, K.H., SCHWÄRZEL, K. (2011): Erfassung und Bewertung des Wasserhaushalts von Waldstandorten in der forstlichen Standortskartierung: Gegenwärtiger Stand und künftige Anforderungen *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**: 7-16.
- HAMMEL, K., KENNEL, M. (2001): Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushaltes von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. *Forstliche Forschungsberichte München* **185**: 1-136.
- KÖSTNER, B., BIRON, P., SIEGWOLF, R., GRANIER, A. (1996): Estimates of water vapor flux and canopy conductance of Scots pine at the tree level utilizing different xylem sap flow methods. *Theor. Appl. Climatol.* **53**: 105-113.
- KÖSTNER, B., CLAUSNITZER, F. (2011): Die Transpiration eines Fichten- und Buchenbestandes unter Bodentrockenheit im Tharandter Wald. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**: 29-35.
- MORECROFT, M.D., ROBERTS, J.M., (1999): Photosynthesis and stomatal conductance of mature canopy Oak (*Quercus robur*) and Sycamore (*Acer pseudoplatanus*) trees throughout the growing season. *Functional Ecology* **13**: 332-342.
- POYATOS, R., LORENZ, P., PINOL, J., RUBIO, C. (2008): Response of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and pubescent oak (*Quercus pubescens* Willd.) to soil and atmospheric water deficits under Mediterranean mountain climate. *Ann. Sci. For.* **65**: 306.
- SCHWÄRZEL, K., HÄNTZSCHEL, J., GRÜNWARD, T., KÖSTNER, B., BERNHOFER, CH., FEGER, K.H. (2007): Fundamentals of spatial-distributed simulation of water balance of forest sites. *Advances Geoscience* **11**: 43-47.
- SCHWÄRZEL, K., FEGER, K.H., HÄNTZSCHEL, J., MENZER, A., SPANK, U., CLAUSNITZER, F., KÖSTNER, B., BERNHOFER, CH. (2009a): A novel approach in model-based mapping of soil water conditions at forest sites. *For. Ecol. Manage.* **258**: 2163-2174.
- SCHWÄRZEL, K., MENZER, A., SPANK, U., CLAUSNITZER, F., HÄNTZSCHEL, J., GRÜNWARD, T., KÖSTNER, B., BERNHOFER, CH., FEGER, K.H. (2009b): Soil water content measurements deliver reliable estimates of water fluxes: A comparative study in a beech and a spruce stand in the Tharandt Forest (Saxony, Germany). *Agricultural and Forest Meteorology* **149**: 1994-2006.
- SCHWÄRZEL, K., PETERS, R., PETZOLD, R., HÄNTZSCHEL, J., MENZER, A., CLAUSNITZER, F., SPANK, U., KÖSTNER, B., BERNHOFER, CH., FEGER, K.H. (2011): Räumlich-differenzierte Berechnung und Bewertung des Standortwasserhaushaltes von Wäldern des Mittelgebirges. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**: 119-126.
- SHUTTLEWORTH, W.J., WALLACE, J.S. (1985): Evaporation from sparse crops – an energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **111** (469): 839-855.
- STURM, N., KÖSTNER, B., HARTUNG, W., TENHUNEN, J.D. (1998): Environmental and endogenous controls on leaf- and stand level water conductance in a Scots pine plantation. *Ann. Sci. For.* **55**: 237-253.
- STURM, N. (1988): Steuerung, Skalierung und Umsatz der Wasserflüsse im Hartheimer Kiefernforst (*Pinus sylvestris* L.). *Bayreuther Forum Ökologie* **63**: 190 S.
- WÖSTEN, J.H.M., LILLY, A., NEMES, A., LE BAS, C. (1999): Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* **90**: 169-185.

submitted: 13.01.2011  
reviewed: 15.02.2011  
accepted: 28.04.2011

**Autorenanschrift:**

Dr. Ronny Peters, Dr. Kai Schwärzel,  
Prof. Dr. Karl-Heinz Feger  
Technische Universität Dresden  
Institut für Bodenkunde und Standortslehre  
Pienner Straße 19, 01737 Tharandt  
E-Mail: [ronny.peters@forst.tu-dresden.de](mailto:ronny.peters@forst.tu-dresden.de)  
E-Mail: [kai.schwaerzel@forst.tu-dresden.de](mailto:kai.schwaerzel@forst.tu-dresden.de)  
E-Mail: [fegerkh@forst.tu-dresden.de](mailto:fegerkh@forst.tu-dresden.de)

Dr. Barbara Köstner, Falko Clausnitzer,  
Prof. Dr. Christian Bernhofer  
Technische Universität Dresden  
Institut für Hydrologie und Meteorologie  
Pienner Straße 21, 01737 Tharandt  
E-Mail: [barbara.koestner@forst.tu-dresden.de](mailto:barbara.koestner@forst.tu-dresden.de)  
E-Mail: [falko.clausnitzer@forst.tu-dresden.de](mailto:falko.clausnitzer@forst.tu-dresden.de)  
E-Mail: [christian.bernhofer@forst.tu-dresden.de](mailto:christian.bernhofer@forst.tu-dresden.de)