

Räumlich-differenzierte Berechnung und Bewertung des Standortwasserhaushaltes von Wäldern des Mittelgebirges

Spatially differentiated modeling and evaluation of soil water conditions in forest sites of low mountain ranges

Kai Schwärzel, Ronny Peters, Rainer Petzold, Janet Häntzschel, Alexander Menzer, Falko Clausnitzer, Uwe Spank, Barbara Köstner, Christian Bernhofer & Karl-Heinz Feger

Abstract

The forest hydrological model BROOK90 was integrated into a GIS framework to calculate and evaluate soil water conditions in forest sites based on climate, topography, soil, and tree species. Model results are visualized in a novel forest site map using indicators for soil drought, soil water excess, and transpiration constraints. Based on knowledge of the number of days in which thresholds of these indicators were exceeded, an evaluation framework for soil water conditions was developed. The model was tested at the Tharandt Forest for an area with varying soil conditions and different tree species. Results can be used to derive and test new forest management strategies. For instance, recommendations for achieving optimum growth based on tree species or stand structure choices can be derived. Further research should focus on relating soil water indices with growth indices.

Keywords: soil water, site evaluation, climate change, forest transformation

Zusammenfassung

Auf der Basis des forsthydrologischen Modells BROOK90 wurde ein Modellsystem zur Berechnung und Beurteilung des Standortwasserhaushaltes in Abhängigkeit von Klima, Relief, Boden und Bestockung entwickelt. Implementierte Indikatoren zur Ausschöpfung des Bodenwasservorrates, der Einschränkung der Transpiration und des Auftretens von Staunässe erlauben eine Visualisierung der Modellergebnisse in Form neuartiger Standortskarten. Basierend auf der Kenntnis der Unterschreitungshäufigkeiten von Schwellenwerten dieser Indikatoren wurde ein fünfstufiger Bewertungsrahmen für den Wasserhaushalt aufgestellt. Das Modell wurde im Tharandter Wald für ein Gebiet mit variierenden Böden und unterschiedlicher Bestockung (Buche, Eiche, Fichte und Kiefer) getestet. Die Ergebnisse zeigen, dass diese Vorgehensweise eine differenzierte Informationsgrundlage für die forstliche Planung liefert. Beispielsweise können Entscheidungen zu Baumartenwahl und Bestandesstruktur abgeleitet werden. Forschungsbedarf besteht vor allem in der Verknüpfung der im Modell implementierten Indikatoren des Wasserhaushaltes mit Wachstumsparametern und physiologisch definierten Schwellenwerten.

Schlüsselwörter: Bodenwasser, Standortsbewertung, Klimawandel, Waldumbau

1 Einleitung

Die Planung und erfolgreiche Umsetzung waldbaulicher Maßnahmen erfordert eine räumlich-differenzierte Charakterisierung des Standortwasserhaushaltes. Vor allem die Kenntnis des pflanzenverfügbaren Bodenwasserangebots und auch eines möglichen Überschusses in Form von Stauwasser ist ausschlaggebend für die Bewertung von Stabilität, Leistungsfähigkeit und Risikobelastung einer Bestockung (vgl. z. B. WAGNER 2004, RENNENBERG et al. 2004, AMMER et al. 2005, KÖLLING et al. 2007). Die objektive Klassifizierung des ökologisch wirksamen Standortsfaktors Wasser ist auch für die Zuordnung zu einem Standortstyp im Rahmen der forstlichen Standortserkundung/-kartierung unabdingbar. Derzeit werden meist semi-empirische Definitionen des Standortwasserhaushaltes angewendet; eine quantitative Bestimmung der Wasserhaushaltskomponenten von Waldstandorten ist bislang nur vereinzelt erfolgt (vgl. Übersichtsartikel von GAUER et al. 2011).

Für eine räumlich-differenzierte Berechnung des Wasserhaushalts von Waldstandorten müssen Modellparameter für Boden und Vegetation abgeleitet sowie meteorologische Daten in angemessener räumlicher Diskretisierung bereitgestellt werden. Dieser vergleichsweise hohe Aufwand ist jedoch mit einem sehr großen Nutzen verbunden. Im Vergleich zur üblichen Ansprache des Wasserhaushaltes wird durch prozessorientierte Simulation des Wasserumsatzes eine Vielzahl von Daten verfügbar, die eine detaillierte, überregional vergleichbare Ansprache erlauben (vgl. HAMMEL & KENNEL 2001). Außerdem sind auch Veränderungen in der Bewirtschaftung (z. B. Baumartenwahl, Bestandesdichte) und der Einfluss klimatischer Extreme (z. B. Dürre) hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und damit für das waldbauliche Handeln quantifizierbar. SCHWÄRZEL et al. (2011) entwickelten deshalb als Grundlage für die Klassifikation des Wasserhaushalts von Waldstandorten ein Modellsystem zur Prognose und Bewertung von Bodenwasserbedingungen in Abhängigkeit von Klima, Relief, Boden und Bestockung.

In der vorliegenden Studie wurde dieses Modellsystem genutzt, um für ein Testgebiet im Tharandter Wald (gelegen in den unteren Lagen des Osterzgebirges) Komponenten des Wasserhaushalts für die Hauptbaumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer standörtlich-differenziert zu berechnen und zu regionalisieren. Ziel war es, auf der Basis dieser Ergebnisse einen Rahmen zur Bewertung des Wasserhaushalts von Waldstandorten aufzustellen, diese Bewertung für das Testgebiet anzuwenden und die Ergebnisse der Bewertung in Form neuer Standortskarten darzustellen.

2 Material und Methoden

2.1 Modellgebiet Tharandter Wald

Der Tharandter Wald als größtes zusammenhängendes Waldgebiet in Sachsen befindet sich ca. 20 km SW von Dresden in den unteren Lagen des Osterzgebirges. An zwei standörtlich-repräsentativen Flächen unter Fichte („Ankerstation“) und Buche (Landberg) erfolgen seit 1996 (Fichte) und 2005 (Buche) kontinuierliche Messungen zum Energie- und Wasserhaushalt (GRÜNWARD & BERNHOFER 2007, SPANK & BERNHOFER 2008, SCHWÄRZEL et al. 2009b, BERNHOFER et al. 2011, CLAUSNITZER & KÖSTNER 2011). Diese Messungen bildeten die Grundlage für die Entwicklung und Kalibrierung des Modells (SCHWÄRZEL et al. 2009a). In diesem Beitrag werden Ergebnisse zur Bewertung des Standortwasserhaushaltes für das Testgebiet Landberg vorgestellt. Am Landberg finden sich überwiegend Braunerden, z. T. pseudovergleyt und/ oder podsoliert, auf Quarzporphyr, Basalt und Sandstein (Abb. 1a). Bei den Böden handelt sich zumeist um periglaziär umgelagerte Fließerden, die auch durch Lössbeimengungen beeinflusst sind. Die Erschließung des Unterbodens durch Wurzeln wird durch hohe Steingehalte, Bodenverdichtung und Staunässe behindert. Im Testgebiet sind ebene und schwach geneigte Plateaulagen vorherrschend. Dort finden sich die durch Staunässe geprägten Böden (Abb. 1). Tiefer eingeschnittene Täler treten im Südwesten des Testgebietes auf. Die Reliefunterschiede betragen 135 m. Der mittlere Jahresniederschlag ist 870 mm, die mittlere jährliche Grasreferenzverdunstung 640 mm. Die Klimatische Wasserbilanz im Mittel der Vegetationsperiode ist mit minus 35 mm als gering einzustufen (AG BODEN 2005). Weiterführende Informationen zu Klima, Geologie, Böden und Vegetation des Tharandter Waldes sowie zu den Testgebieten finden sich in BERNHOFER (2002) und FEGER et al. (2008).

2.2 Modellsystem

Für die Simulation des Bodenwasserhaushaltes wurde das forsthydrologische Standortmodell BROOK90 (in der Version vom LWF, KENNEL & HAMMEL 2001) in eine GIS-Umgebung integriert. Innerhalb des GIS erfolgt die Regionalisierung von Punktmessdaten, die Übernahme und Verschneidung vorhandener digitaler Flächendaten, die Simulationsrechnungen und

die Ergebnisdarstellung. Eine ausführliche Beschreibung des Modellsystems findet sich in SCHWÄRZEL et al. (2009a).

Die räumlich-differenzierte Modellierung und Bewertung des Standortwasserhaushaltes erfordert räumlich-differenzierte meteorologische Eingangsgrößen. Ausgangsdaten zur räumlich-differenzierten Berechnung der meteorologischen Größen waren die digitalen Daten des Höhenmodells DHM/M745 (LANDESVERMESSUNGSAMT SACHSEN 1996). Diese Rasterdaten liegen in einer horizontalen Auflösung von 25 m und einer vertikalen Genauigkeit von 1 m vor. Über die digitalen Geländehöhen wurden in der GIS-Umgebung für das gesamte Modellgebiet Neigungs- und Ausrichtungswerte abgeleitet. Basierend auf den Zusammenhängen zwischen Geländemorphologie und den jeweiligen meteorologischen Größen wurden für jedes Pixel einzelne Klimagrößen bezüglich einer Klimastation ermittelt (vgl. Tabelle 1). Die berechneten Werte der jeweiligen Geländepunkte wurden nachfolgend mit dem Wert des Pixels, in dem sich die Klimastation befindet, normiert. Die sich dadurch ergebenden Faktoren (z. B. für Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung) bzw. Differenzen (z. B. für Windrichtung) beschreiben die kleinräumlichen Unterschiede in der Verteilung der Klimaelemente bezüglich der Stationslage. Über diese Faktoren/Differenzen können die Messwerte der im Modellgebiet befindlichen Klimastation auf täglicher Basis regionalisiert werden. Durch den Einsatz von Fuzzy-Inference-Systemen (FIS) konnte auf eine elegante und einfache Weise die Rechenzeit signifikant reduziert werden (PETERS et al. 2011b).

Informationen zu den Böden wurden aus der vom Staatsbetrieb Sachsenforst bereitgestellten forstlichen Standortskarte (Maßstab 1:10.000), der zur Karte gehörigen Legenden-Information (SCHWANECKE 1993) und aus Altdaten von Profilbeschreibungen abgeleitet. Zusätzlich wurden mehr als 30 Profile im Tharandter Wald entsprechend AG BODEN (2005) feldbodenkundlich und horizontweise beprobt. Im Labor erfolgte horizonspezifisch die Ermittlung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit, der Wasserretention, der Trockenrohddichte, der Textur und der C- und N-Gehalte. Einzelheiten zu diesen Messungen und den dazu verwendeten Methoden finden sich in SCHWÄRZEL et al. (2009b). Aus den vorhandenen und neu erhobenen Daten (Bohrlochbeschriebe, eigene

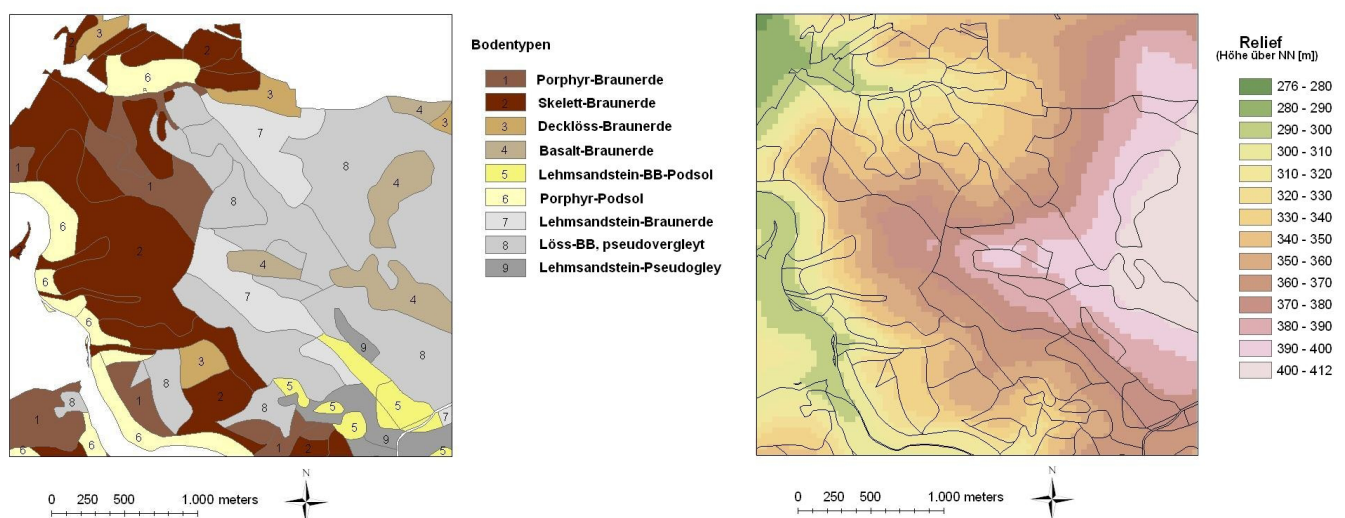


Abb. 1: (a) Bodenkarte (links) und Relief (rechts), Testgebiet Landberg, Tharandter Wald (BB = Braunerde).

Fig. 1: (a) Soil map (left) and relief (right) of the modeled area, Landberg, Tharandter Wald (BB = Braunerde).

Tab. 1: Methoden zur Bereitstellung regionalisierter meteorologischer Eingangsdaten für die räumlich-verteilte Modellierung des Wasserhaushaltes.

Tab. 1: *Methods for the appropriation of spatially distributed meteorological input data for the simulation of soil water conditions.*

| Witterungsgröße | Regionalisierungsmethode |
|--------------------------------------|--|
| Maximum der Lufttemperatur | Vorhersage in Abhängigkeit der Geländehöhe (FRANKE et al. 2004). |
| Minimum der Lufttemperatur | Keine Höhenabhängigkeit gefunden, Stationsdaten genutzt. |
| Dampfdruck | Keine Höhenabhängigkeit gefunden, Stationsdaten genutzt. |
| Globalstrahlung | Vorhersage in Abhängigkeit der Neigung und Ausrichtung, Beschattungseffekte gegenüberliegender Hänge wurden berücksichtigt (GOLDBERG & HÄNTZSCHEL 2002, HÄNTZSCHEL et al. 2005). |
| Windgeschwindigkeit und Windrichtung | Basierend auf Windfeldmodellierung (mit WiTRaK) wurden durch die AG Bernhofer 10 regionale Verteilungsmuster abgeleitet (KERSCHGENS et al. 2001). |
| Freilandniederschlag | Abgeleitet aus Wind-Verteilungsmustern, Geländehöhe, Hangneigung und Ausrichtung (GOLDBERG 1999, FRANKE et al. 2008) |

Kartiererfahrung) wurden repräsentative Bodenprofile mit horizontspezifischen Angaben zur Bodentextur, den Humus- und Skelettgehalten sowie der Trockenrohddichte generiert. Im Fall vorliegender Messungen wurden den Horizonten die ermittelten Parameter der Wasserretentions- und Leitfähigkeitsfunktion zugeordnet. Waren solche Messwerte nicht vorhanden, schätzten wir diese Parameter nach dem Ansatz von WÖSTEN et al. (1999). Um den Einfluss von Bodenskelett auf den Bodenwasservorrat abzubilden, wurde die Mächtigkeit skeletthaltiger Horizonte in Abhängigkeit des volumetrischen Steingehaltes prozentual reduziert. Modellrelevante Daten zur Beschreibung der Bestände (Durchwurzelungstiefe und horizontspezifische Wurzelintensität, bestandsspezifische Blattleitfähigkeit, Blattflächenindex etc.) wurden für Fichte und Buche aus den Intensivmessungen abgeleitet und für Kiefer und Eiche der Literatur entnommen (PETERS et al. 2011a).

Bei der räumlich-differenzierten Simulation des Standortwasserhaushaltes werden für jedes Pixel auf täglicher Basis die Verdunstungs- und Abflusskomponenten sowie Bodenwassergehalte und Matrixpotentiale für verschiedene Bodentiefen berechnet. Um diese Vielzahl von Daten zu verarbeiten und in Form von neuen Standortskarten darstellen zu können, wurden von uns Indikatoren für die Bewertung des Standortwasserhaushaltes im Modell implementiert. Diese Indikatoren beschreiben die Ausschöpfung des Bodenwasservorrats, die Einschränkung der Transpiration und das Auftreten von Staunässe. Für eine standortgerechte und nachhaltige Bewirtschaftung interessiert vorrangig, ob unter den gegebenen Klimabedingungen die im Boden verfügbare Wassermenge ein gesichertes und nach Möglichkeit optimales Bestandeswachstum des Bestandes gewährleistet. Für den Indikator Ausschöpfung des Bodenwasservorrats orientieren wir uns deshalb am Wasserangebot für die Pflanzen. Für jeden Tag des Modelldurchlaufs und für jedes Pixel wird das Verhältnis des aktuellen zum potenziell pflanzenverfügbaren Wasservorrat des Wurzelraumes gebildet. Bodentrockenheit tritt auf, wenn dieses Verhältnis einen bestimmten Schwellenwert unterschreitet. Diese Tage werden für die jeweiligen Betrachtungszeiträume für jedes Pixel aufsummiert. Die Stabilität der Bestände wird nicht nur durch Wassermangel, sondern auch durch Staunässe ausgelösten Sauerstoffmangel im Wurzelraum verursacht. Für die modellgestützte Klassifikation des Wasserhaushaltes von Wäldern interessiert daher, welchen Einfluss feuchte Witterungsperioden auf den Bodenlufthaushalt

eines Standortes ausüben. Ein Bewertungsmaß hierfür ist traditionell die Luftkapazität (Anteil des Porenraums, der bei Feldkapazität mit Luft erfüllt ist). In dieser Arbeit wird angenommen, dass Sauerstoffmangel bzw. Bodenwasserüberschuss auftritt, wenn während der Hauptvegetationsperiode (Juni–August) in 4 dm Bodentiefe der aktuelle Wassergehalt den Wassergehalt bei Feldkapazität an zwei aufeinander folgenden Tagen überschreitet. Die Anzahl dieser Ereignisse wird während der Simulationsrechnung für jedes Pixel aufsummiert. Der Bezugspunkt 4 dm wurde gewählt, da im Tharandter Wald der Hauptwurzelungsraum unabhängig vom Bodentyp und der Baumart selten mächtiger als 4 dm ist. In diesem Zusammenhang wird als Hauptwurzelungsraum der Bereich in dm unter Geländeoberfläche angesehen, in dem sich 70 bis 80 % aller Wurzeln befinden (AK STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG 2003). Eine weitere Möglichkeit zur Beurteilung des Wasserhaushaltes von Standorten ist die Gegenüberstellung des aktuellen Transpirationsverhaltens der Vegetation in Bezug zur potenziell möglichen Transpiration. Für die Visualisierung der räumlich-verteilten Modellergebnisse werden für jedes Pixel des Modellgebietes Tage, an denen die aktuelle Transpiration auf < 70 % der potentiellen Transpiration sinkt, addiert. Begründungen zur Wahl der Schwellenwerte für Bodentrockenheit, Bodenwasserüberschuss und Transpirationseinschränkung werden untenstehend diskutiert.

3 Ergebnisse und Diskussion

In vorangegangenen Studien wurde gezeigt, dass die Bewertung des Wasserhaushaltes von Wäldern die Betrachtung von Einzeljahren und Jahren mit extremen Klimabedingungen erfordert (SCHWÄRZEL et al. 2009a, c). Erst dann finden sich bei gleicher Bestockung Unterschiede im Bodenwasserhaushalt zwischen den Standorten. Zum Beispiel wurde bei Buche in feuchten, verdunstungsschwachen Jahren nur eine geringe Variabilität der Transpiration in der Fläche beobachtet. In solchen Jahren beruhen die Unterschiede zwischen den Standorten vor allem auf reliefbedingten Unterschieden in der Einstrahlung. Dagegen wurde in trockenen, verdunstungsstarken Jahren die Höhe der Transpiration bei gegebenem Verdunstungsanspruch der Atmosphäre entscheidend durch die Wasserspeicherfähigkeit und das hydraulische Leitvermögen des Bodens bestimmt (SCHWÄRZEL et al. 2009a, c). Für die vorliegende Arbeit wurden deshalb die fünf trockensten Jahre (1976, 1989, 1990, 2000, 2003) des Simulationszeitraumes

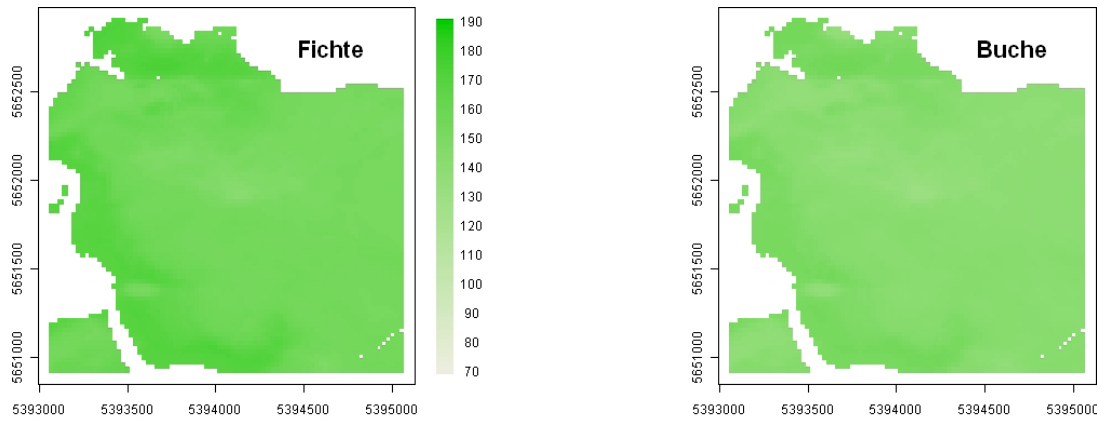


Abb. 2: Transpiration [mm] für Fichte und Buche, gemittelt über die Trockenjahre 1976, 1989, 1990, 2000, 2003, Zeitraum Juni – August, Landberg, Tharandter Wald.

Fig. 2: Sum of actual transpiration [mm] of spruce and beech (mean of the dry years 1976, 1989, 1990, 2000, 2003) for the months June–August, Landberg, Tharandter Wald.

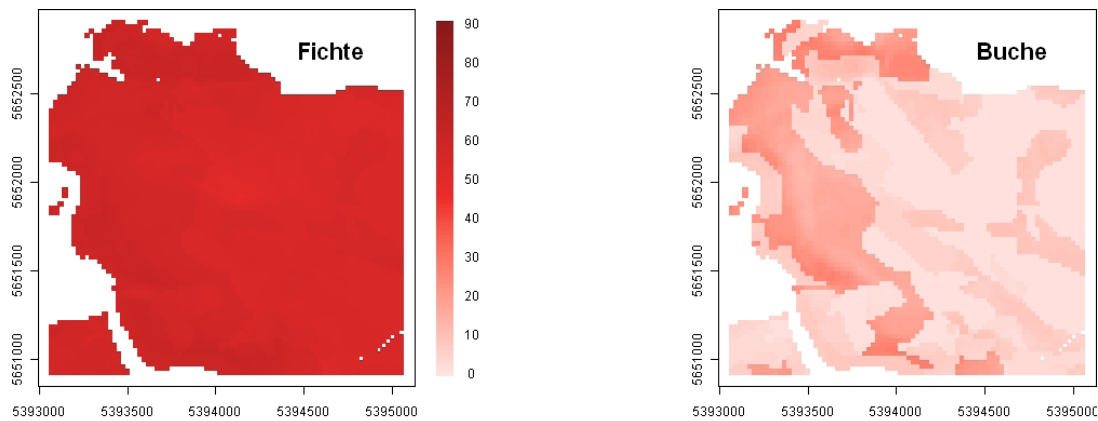


Abb. 3: Anzahl von Tagen in Trockenjahren (gemittelt über die Trockenjahre 1976, 1989, 1990, 2000, 2003), an denen der Quotient von aktueller zu potenzieller Transpiration $\leq 70\%$. Zeitraum Juni–August, Landberg, Tharandter Wald.

Fig. 3: Number of days in dry years (mean of the years 1976, 1989, 1990, 2000, 2003) in which the actual transpiration is $\leq 70\%$ of the potential transpiration for the months June–August, Landberg, Tharandter Wald.

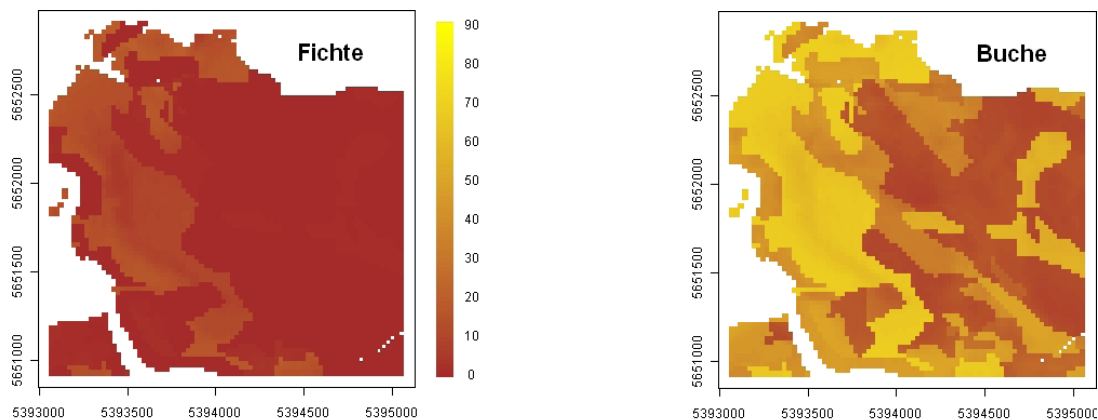


Abb. 4: Anzahl von Tagen in Trockenjahren (gemittelt über die Trockenjahre 1976, 1989, 1990, 2000, 2003), an denen der Quotient von aktueller zu potenzieller nutzbarer Feldkapazität des Hauptwurzelraumes $\leq 40\%$. Zeitraum Juni–August, Landberg, Tharandter Wald.

Fig. 4: Number of days in dry years (mean of the years 1976, 1989, 1990, 2000, 2003) in which the actual plant-available soil water pool in the main root zone is $\leq 40\%$ of the potential plant-available soil water pool in the main root zone, for the months June–August, Landberg, Tharandter Wald.

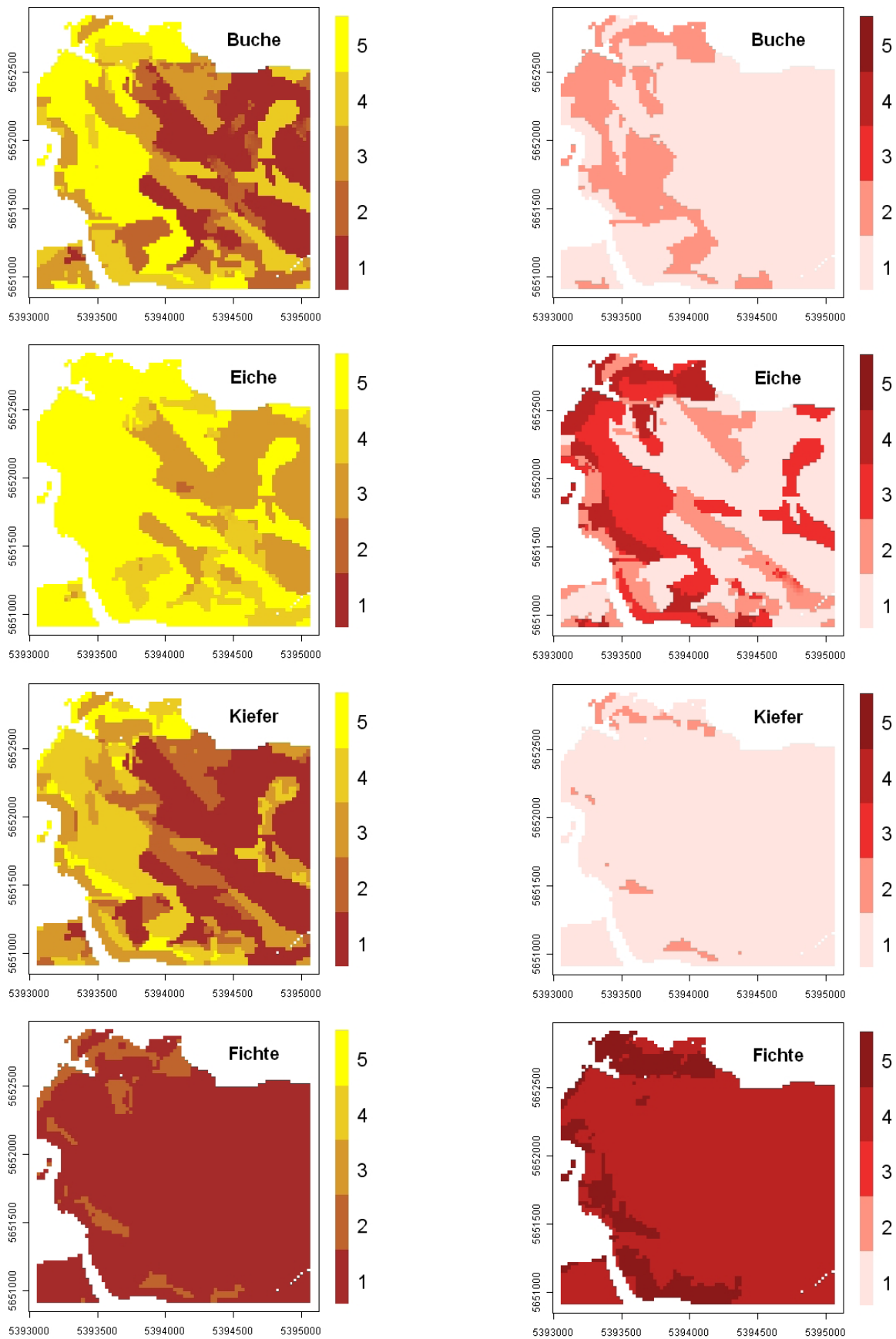


Abb. 5: Einstufung des Standortswasserhaushaltes für Buche, Eiche, Fichte und Kiefer basierend auf der Ausschöpfung des Bodenwasservorrates (linke Seite) und der Einschränkung der Transpiration (rechte Seite) jeweils in Trockenjahren, Landberg, Tharandter Wald.

Fig. 5: Assessment of soil water conditions of beech, oak, spruce, and pine stands based on the depletion of plant-available soil water (left side) and the reduction in transpiration (right side) in years with high evaporation demand and little precipitation, Landberg, Tharandter Wald.

(1968–2008) zur Bewertung des Wasserhaushaltes herangezogen. Da die saisonale Entwicklung von Buche, Eiche, Fichte und Kiefer unterschiedlich verläuft, haben wir den Zeitraum Juni bis August für die Bewertung des Wasserhaushaltes ausgewählt. Damit ist sichergestellt, dass der Blattflächenindex aller Baumarten voll entwickelt ist. Zu beachten ist aber, dass der vorzeitige Blattfall als Reaktion auf eine eingeschränkte Wasserverfügbarkeit durch unser Modellsystem nicht abgebildet wird.

In Abbildung 2 sind für die Trockenjahre gemittelte Werte der Transpiration für Buche und Fichte gegenübergestellt. Für Fichte ergeben sich mit etwa 70 mm für drei Monate sehr geringe Transpirationswerte. Im Gegensatz zu Fichte variiert die Transpiration der Buche beträchtlich in der Fläche (120–160 mm). Die höchsten Transpirationswerte finden sich auf den staunässegeprägten Standorten und in Hanglage im SW des Testgebietes. Bei den letztgenannten Standorten beruhen die höheren Transpirationswerte auf dem höheren Niederschlagseintrag, der geländebedingt ist (vorherrschende Hauptwindrichtung und Auskämmeffekte). Aufgrund des höheren Niederschlages steht den Buchen auf diesen Standorten mehr Wasser für die Wurzelwasseraufnahme zur Verfügung. Die geringsten Transpirationswerte für Buche finden sich auf den stark skeletthaltigen Porphy-Braunerden.

Die große Anzahl von Tagen, an denen bei Fichte der Quotient von aktueller zu potenzieller Transpiration $\leq 70\%$ war, verdeutlicht, dass der Verdunstungsanspruch der Atmosphäre in trockenen, verdunstungsstarken Jahren aber auch in durchschnittlichen Jahren (nicht gezeigt) durch die Fichte nicht befriedigt werden kann (Abb. 3). Bei Buche ist diese Transpirationseinschränkung in Trockenjahren deutlich geringer ausgeprägt als bei Fichte. Einschränkungen der Transpiration treten bei Buche vor allem an Standorten mit hohen Skeletthalten auf (Abb. 3).

Abbildung 4 zeigt für Buche und Fichte die Anzahl der Tage in Trockenjahren, an denen der 40%-Schwellenwert (= Bodentrockenheit) des potenziell pflanzenverfügbaren Bodenwassers unterschritten wurde. Nur bei Buche waren Standorte mit Transpirationseinschränkung (Abb. 3) auch deutlich von Bodentrockenheit betroffen. Insbesondere die stark skeletthaltigen, südseitig ausgerichteten Porphy-Braunerden sowie die flachgründigen Basalt-Braunerden in Plateaulage sind bei Bestockung mit Buche anfällig für eine starke Austrocknung des Bodens in verdunstungsstarken Trockenjahren (vgl. Abb. 1). Im Gegensatz zu Buche fällt unter Fichte der Wasservorrat im Wurzelraum während der Trockenjahre nur an wenigen Tagen unter den 40%-Schwellenwert des potenziellen Bodenwasservorrates des Wurzelraumes. Offensichtlich schränkt die Fichte bereits vor Erreichen dieses Schwellenwertes die Transpiration ein.

Vorangegangene Arbeiten haben gezeigt, dass das Zuwachsverhalten bei Bäumen sehr stark vom aktuell pflanzenverfügbaren Bodenwasser im Wurzelraum abhängig ist (z. B. GILES et al. 1985, LEBOURGEOIS et al. 2005). GRANIER et al. (2007) schlussfolgerten, dass sich Transpiration und Primärproduktion von Wäldern signifikant verringern, wenn 60 bis 80% des potenziell verfügbaren Bodenwasservorrates des Wurzelraumes aufgezehrt sind. RIEK et al. (1995) fanden enge Zusammenhänge zwischen dem Quotienten aus aktueller zu potenzieller Transpiration und der Jahrringbreite von Kiefern. Zuwachsdepressionen wurden beobachtet, wenn sich der Transpirationsquotient im Juli auf Werte $< 60\%$ belief. Diese Beispiele verdeutlichen, dass für die räumlich-differenzierte

Bewertung des Standortswasserhaushaltes von Wäldern die Unterschreitungshäufigkeiten der oben definierten Schwellenwerte des Bodenwasservorrates und der Transpiration sinnvoll sind. Basierend auf den errechneten Unterschreitungenstagen für die Ausschöpfung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers und den Transpirationsquotienten wurde für beide Indikatoren ein fünfstufiger Bewertungsrahmen mit Klassenbreiten von 15 Tagen aufgestellt. Bei Klasse 1 werden die Schwellenwerte an weniger als 15 und bei Klasse 5 an mehr als 60 Tagen unterschritten. In Abbildung 5 werden die Ergebnisse dieser Bewertung für Buche, Eiche, Fichte und Kiefer gegenübergestellt.

In trockenen, verdunstungsstarken Jahren wird bei Kiefer der Schwellenwert des Transpirationsquotienten kaum unterschritten. Dies gilt mit Einschränkung auch für Buche. Stärkere Bodenaustrocknung tritt unter Kiefer und Buche nur auf den stark skeletthaltigen und den geringmächtigen Standorten auf. Im Vergleich zu Buche und Kiefer kann Eiche erheblich negativere Blattwasserpotenziale entwickeln (vgl. PETERS et al. 2011a) und folglich auch eine höhere Wurzelwasseraufnahme realisieren. Deshalb trocknen unter Eiche die staunässegeprägten Standorte in Plateaulage deutlich stärker aus als unter Buche und Kiefer. Auf den geringmächtigen Basalt-Braunerde-Standorten und den stark skeletthaltigen Porphy-Braunerden wird unter Eiche der 70%-Schwellenwert des Transpirationsquotienten in Trockenjahren an mehr als 30 Tagen und bei den südlich ausgerichteten Standorten sogar an bis zu 60 Tagen in der Periode Juni bis August unterschritten. Weiterhin verdeutlicht Abbildung 5, dass diese Standorte bei Eichenbestockung sehr extrem austrocknen können. Bei Fichte beobachten wir zwar kaum eine Unterschreitung des 40%-Schwellenwertes des potenziell pflanzenverfügbaren Bodenwassers, aber eine äußerst häufige Unterschreitung des Schwellenwertes der Transpiration auf allen Standorten des Testgebietes.

Die Einstufung des Standorts nach dem Bodenwasserhaushalt indiziert vor allem das Überdauerungsvermögen der Baumarten bei Trockenheit, während die Einstufung nach der Transpirationseinschränkung näher mit der Beeinträchtigung des Kohlenstoffgewinns unter Trockenheit in Zusammenhang steht. Aufgrund der Modellergebnisse lässt sich weiter verallgemeinern, dass die Fichte auf den Standorten am Landberg aufgrund der hohen Stufe für Transpirationseinschränkung nicht geeignet ist. Dagegen erscheint die Buche auf allen Standorten grundsätzlich geeignet, obwohl durch die starke Ausschöpfung des Bodenwasservorrates auf den südexponierten Porphy-Braunerden und auf den flachgründigen Basaltbraunerden keine optimalen Wachstumsbedingungen herrschen. Die Kiefer stellt die Alternative auf den ziemlich armen Porphy-Podsolen mit starker Südexposition dar. Bodenverdichtung und Staunässe kann die Wurzelentwicklung vieler Baumarten auf den Plateaustandorten hemmen und damit selbst in Buchenbeständen Windwurf begünstigen (SCHWÄRZEL et al. 2009a, EICHHORN 1992, ZOTH & BLOCK 1992). Aus forstökologischer Sicht würde sich auf diesen Standorten auch die Einbringung von Eiche anbieten. Waldbaulich wäre dies aber aufgrund der Konkurrenzstärke der Buche unter der gegenwärtigen Bewirtschaftung nicht umsetzbar (WIEDEMANN 1951, VON LÜPKE 1998).

4 Schlussfolgerungen

Die Synthese von meteorologischen Rahmenbedingungen, bodenphysikalischen Eigenschaften und physiologischen Reaktionsmustern einzelner Baumarten im beschriebenen

Modellsystem stellt eine differenzierte Informationsgrundlage für die forstliche Planung dar. So können beispielsweise Hinweise für die optimale Bewirtschaftung hinsichtlich Baumartenwahl und Bestandesstruktur abgeleitet werden. Mit dem Modellsystem wurden die Grundlagen für ein überregional einheitliches Verfahren der Klassifikation des Standortwasserhaushalts geschaffen. Künftig ist die Interpretation der im Modellsystem implementierten Indikatoren im Hinblick auf den Standortfaktor Wasser (Ausschöpfung des Bodenvorrats, Einschränkung der Transpiration, Auftreten von Staunässe) durch Aufstellung von Zusammenhängen zwischen den Indikatoren und wachstumskundlichen Kenngrößen zu verbessern. Dazu sollten diese Indikatoren mit artspezifischen, physiologisch definierten Schwellenwerten verknüpft 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. 5. Aufl., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- AK STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (2003): Forstliche Standortaufnahme. 6. Aufl., IHW-Verlag, Eching bei München.
- AMMER, CH. & 19 Mitautoren (2005): Zur Zukunft der Buche (*Fagus sylvatica* L.) in Mitteleuropa – Kritische Anmerkungen zu einem Beitrag von RENNENBERG et al. (2004): AFJZ **176**: 60-67.
- BERNHOFER, CH. (Hrsg.) (2002): Exkursions- und Praktikumsführer Tharandter Wald. Material zum "Hydrologisch-meteorologischen Feldpraktikum". Tharandter Klimaprotokolle (ISSN 1436-5235), Band **6**: 1-292.
- BERNHOFER, C., SPANK, U., CLAUSNITZER, F., KÖSTNER, B., EICHELMANN, 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.
- CLAUSNITZER, F., KÖSTNER, B. (2011): Die Transpiration eines Fichten- und Buchenbestandes unter Bodentrockenheit im Tharandter Wald. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**: 29-35.
- EICHHORN, J. (1992): Wurzeluntersuchungen an sturmgeworfenen Bäumen in Hessen. *Forst und Holz* **47**: 555-559.
- EISENHÄUER, D.R., SONNEMANN, S. (2009): Waldbaustrategien unter sich ändernden Umweltbedingungen – Leitbilder, Zielsystem und Waldentwicklungstypen. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **8**: 71-88.
- FEGER, K.H., SCHWÄRZEL, K., MENZER, A. (2008): Wasserhaushalt von Waldstandorten des Tharandter Waldes. Exkursionsführer. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* **111**: 221-250.
- FRANKE, J., GOLDBERG, V., EICHELMANN, U., FREYDANK, E., BERNHOFER, C. (2004): Statistical analysis of regional climate trends in Saxony, Germany. *Climate Research* **27**: 145-150.
- FRANKE, J., HÄNTZSCHEL, J., GOLDBERG, V., BERNHOFER, C. (2008): Application of a trigonometric approach to the regionalization of precipitation for a complex small-scale terrain in a GIS environment. *Meteorol Appl.* **15**: 483-490.
- GILES, D.G., BLACK, T.A., SPITTLEHOUSE, D.L. (1985): Determination of growing season soil water deficits on a forested slope using water balance analysis. *Canadian Journal Forest Research* **15**: 107-114.
- GOLDBERG, V. (1999): Zur Regionalisierung des Klimas in den Hochlagen des Osterzgebirges unter Berücksichtigung des Einflusses von Wäldern (in German, with English summary). *Tharandter Klimaprotokolle* **2**.
- GOLDBERG, V., HÄNTZSCHEL, J. (2002): Application of a radiation model for small-scale complex terrain in a GIS environment. *Meteorologische Zeitschrift* **11**: 119-128.
- GRANIER, A. & 37 Mitautoren (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**: 123-145.
- GRÜNWALD, T., BERNHOFER, CH. (2007): A decade of carbon, water and energy flux measurements of an old spruce forest at the Anchor Station Tharandt. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology* **59**: 387-396.
- HAMMEL, K., KENNEL, M. (2001): Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. *Forstliche Forschungsberichte München* **185**: 1-136.
- HÄNTZSCHEL, J., GOLDBERG, V., BERNHOFER, C. (2005): GIS-based regionalisation of radiation, temperature and coupling measures in complex terrain for low mountain ranges. *Meteorological Applications* **12**: 33-42.
- KERSCHGENS, M., SPERLING, T., STEFFANY, F. (2001): Anwendung eines komplexen Ausbreitungsmodells zur Bestimmung von Immissionskenngrößen im gegliederten Gelände. Institut für Geophysik und Meteorologie Universität zu Köln.
- KÖLLING, C., ZIMMERMANN, L., WALENTOWSKI, H. (2007): Klimawandel: Was geschieht mit Buche und Fichte? *AFZ/DerWald* **61**: 584-588.
- LANDESVERMESSUNGSAMT SACHSEN (1996): Verzeichnis der Karten u. digitalen Daten. Dresden.
- LEBOURGEOIS, F., BREDAS, N., GRANIER, A., ULRICH, E. (2005): Climate-tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Trees-Structure and Function* **19**: 385-401.
- PETERS, R., SCHWÄRZEL, K., CLAUSNITZER, F., BERNHOFER, CH., FEGER, K.H. (2011a): Einfluss von Boden und Bestockung auf den Standortwasserhaushalt. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**: 99-107.
- PETERS, R., SCHWÄRZEL, K., FEGER, K.H. (2011b): Fuzzy-Inference-Systeme zur Regionalisierung des Standortwasserhaushaltes von Wäldern. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**: 109-115.
- RENNENBERG, H., SEILER, W., MATYSSEK, R., GESSLER, A., KREUZ-WIESER, J. (2004): Die Buche (*Fagus sylvatica* L.) – ein Waldbaum ohne Zukunft im südlichen Mitteleuropa? *AFJZ* **175**: 210-244.
- RIEK, W., WESSOLEK, G., VON LÜHRTE, A. (1995): Wasserhaushalt und Dickenwachstum von Kiefern (*Pinus sylvestris*) im Raum Berlin (in German with English Summary). *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* **166** (7): 138-144.
- SCHWÄRZEL, K., FEGER, K.H., HÄNTZSCHEL, J., MENZER, A., SPANK, U., CLAUSNITZER, F., KÖSTNER, B., BERNHOFER, C. (2009a): A novel approach in model-based mapping of soil water conditions at forest sites. *Forest Ecology and Management* **258**: 2163-2174.
- SCHWÄRZEL, K., MENZER, A., SPANK, U., CLAUSNITZER, F., HÄNTZSCHEL, J., GRÜNWALD, T., KÖSTNER, B., BERNHOFER, C., 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 Meteorol.* **149**: 1994-2006.

- SCHWÄRZEL, K., HÄNTZSCHEL, J., MENZER, A., SPANK, U., CLAUSNITZER, F., KÖSTNER, B., BERNHOFER, CH., FEGER, K.H. (2009c): Modellierung und Regionalisierung des Standortwasserhaushaltes von Wäldern im Mittelgebirge. In: K. v. WILPERT (ed.): Bedeutung des Klimawandels für Bodenprozesse. Freiburger Forstliche Forschung **82**: 123-134.
- SPANK, U., BERNHOFER, CH. (2008): Another simple method of spectral correction to obtain robust EC results. Boundary-Layer Meteorology **128**: 403-422.
- VON LÜPKE, B. (1998): Silvicultural methods of oak regeneration with special respect to shade tolerant mixed species. Forest Ecology and Management **106**: 19-26.
- WAGNER, S. (2004): Klimawandel – einige Überlegungen zu waldbaulichen Strategien. Forst und Holz **59**: 394-398.
- WIEDEMANN, E. (1951): Ertragskundliche Grundlagen der Forstwirtschaft. 3. Auflage. J.D. Sauerländers Verlag, Frankfurt/M.
- 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.
- ZOTH, R., BLOCK, J. (1992): Untersuchungen an Wurzelballen sturmgeworfener Baume in Rheinland-Pfalz. Forst-und Holz **47**: 566-571.

submitted: 17.11.2010
reviewed: 13.12.2010
accepted: 02.02.2011

Autorenanschrift:

Dr. Kai Schwärzel, Dr. Ronny Peters, Ass. d. FD Rainer Petzold, Dr. Janet Häntzschel, Dipl.-Forst. Alexander Menzer, Prof. Dr. Karl-Heinz Feger
Technische Universität Dresden
Institut für Bodenkunde und Standortlehre
Pienner Straße 19, 01737 Tharandt
E-Mail: kai.schwaerzel@forst.tu-dresden.de

Dipl.-Hydr. Falko Clausnitzer, Dr. Uwe Spank, PD Dr. Barbara Köstner, Prof. Dr. Christian Bernhofer
Technische Universität Dresden
Institut für Hydrologie und Meteorologie
Pienner Straße 21, 01737 Tharandt
E-Mail: falko.clausnitzer@forst.tu-dresden.de