

Die Transpiration eines Fichten- und Buchenbestandes unter Bodentrockenheit im Tharandter Wald

Transpiration of a spruce and beech stand under soil drought conditions in the Tharandt Forest

Barbara Köstner & Falko Clausnitzer

Abstract

To evaluate the water balance of a site, requirements of the forest stand under changing environmental conditions have to be considered. Among the different components of the site water balance, stand transpiration represents the physiological response of the trees and can be taken as a link to carbon relations. A regulating and hence critical parameter mediating between water and carbon balance is canopy conductance. Water-use efficiency is an indicator of this relationship. At a spruce and beech site, xylem sap flow measurements were applied to estimate canopy transpiration (E_c) and canopy conductance (g_c). During the growing season of 2006, E_c at the spruce site ($161 \text{ mm season}^{-1}$) was significantly lower than at the beech site ($182 \text{ mm season}^{-1}$) while the total-year balances were similar. This was related to a period of soil drought during summer which was more pronounced at the spruce site than at the beech site. In contrast to beech, canopy conductance of spruce was reduced to minimal values independent of atmospheric conditions, and water-use efficiency was increased. From the findings it can be concluded that site conditions and tree species lead to measurable differences in the water balance of sites which should accordingly be expressed in water-balance models. The presented measured data are fundamental to value transpiration-related indicators of water-balance models.

Keywords: canopy conductance, xylem sap flow, water-use efficiency, *Fagus sylvatica*, *Picea abies*

Zusammenfassung

Für die Bewertung des Standortwasserhaushaltes sind die Anforderungen der Bestockung unter sich ändernden Umweltbedingungen mit zu berücksichtigen. Von den unterschiedlichen Wasserhaushaltskomponenten gibt die Bestandestranspiration die physiologische Reaktion der Bäume wider und steht somit auch dem Kohlenstoffhaushalt am nächsten. Eine regulierende und somit kritische Größe stellt die Bestandesleitfähigkeit dar, die zwischen Wasser- und Kohlenstoffhaushalt vermittelt. Als Indikator für diese Regulation wird das Verhältnis von Kohlenstoffaufnahme zu Wasserabgabe, die sog. Wassernutzungseffizienz, herangezogen. An einem Fichten- und Buchenstandort wurde mittels Xylemsaftflussmessungen die Bestandestranspiration (E_c) und -leitfähigkeit (g_c) bestimmt. Von Mai bis Oktober 2006 lag E_c am Fichtenstandort ($161 \text{ mm Saison}^{-1}$) deutlich unter E_c von Buche mit $182 \text{ mm Saison}^{-1}$ während die Gesamtjahresbilanz ähnlich war. Dies stand in Beziehung mit einer Phase sommerlicher Bodentrockenheit, die sich am Fichtenstandort deutlicher als

am Buchenstandort auswirkte. Im Gegensatz zu Buche war während der Bodentrockenheit die Bestandesleitfähigkeit von Fichte, unabhängig von atmosphärischen Bedingungen, auf minimale Werte reduziert und die Wassernutzungseffizienz erhöht. Aus den Befunden kann gefolgert werden, dass Standortverhältnisse und Baumarten zu messbaren Unterschieden im Standortwasserhaushalt führen, die auch in Wasserhaushaltsmodellen darstellbar sein sollten. Die vorliegenden Messdaten sind grundlegend, um transpirationsbezogene Indikatoren von Wasserhaushaltsmodellen zu bewerten.

Schlüsselwörter: Bestandesleitfähigkeit, Xylemsaftfluss, Wassernutzungseffizienz, *Fagus sylvatica*, *Picea abies*

1 Einleitung

Die Transpiration von Baumbeständen stellt eine wesentliche Komponente des Standortwasserhaushaltes dar. Andererseits sind langfristig bestimmte, maximale Transpirationsraten ein Indikator für die Anpassung von Bäumen an ihren Standort sowie für die Eignung des Standortes für die jeweilige Baumart. In der Wasserhaushaltsforschung wird der Anteil der Transpiration häufig entweder gar nicht explizit, sondern nur als Gesamtverdunstung (ET) angegeben, oder sie wird mit sehr unterschiedlichen Methoden bzw. Modellen bestimmt, so dass eine Vergleichbarkeit schwierig ist (s. PECK & MAYER 1996). Aus forsthydrologischer Sicht ist es interessant, die Baum- bzw. Bestandestranspiration (E_c) von anderen Komponenten der Wasserbilanz zu trennen, da sie über die Bestandesleitfähigkeit (g_c) eng mit dem Kohlenstoffhaushalt der Bäume verknüpft ist. Erst die zunehmende Anwendung von Xylemsaftflussmessungen an Bäumen und ihre Hochrechnung auf die Bestandesebene hat es ermöglicht, die Wassernutzung von Beständen in Bezug zu biometrischer Struktur, hydraulischer Architektur und physiologischen Kenngrößen der Bestände (u. a. KÖSTNER et al. 2001, 2004, MOORE et al. 2004, POYATOS et al. 2007) zu untersuchen. Die hydraulische Architektur ist artspezifisch, aber innerhalb einer Art modifikationsfähig und stellt somit eine mittel- bis langfristige Anpassung der Bäume an den Standort dar (SELLIN 2001). Kenngrößen dieser Anpassung sind zum Beispiel das Verhältnis von hydroaktiver Wurzel- zu Sprossoberfläche, das Verhältnis von Blatt- zu Splintfläche oder das Verhältnis von leitender Stammquerschnittsfläche zur Summe der leitenden Querschnitte der Äste. Mittel- bis kurzfristige Anpassungen an die Wasserverfügbarkeit des Standortes geschehen durch Variation der hydraulischen und stomatären Leitfähigkeit. Diese sind zum Beispiel von der aktuellen Membranpermeabilität, vom Wassergehalt des Gewebes und der Luftfeuchte abhängig. Limitierung der Transpiration tritt zum einen im Tagesverlauf bei hohem Verdunstungsanspruch, d. h. hohem Wasserdampfättigungsdefizit

der Luft (D) auf, wenn die Nachleitung von Wasser durch das Boden-Wurzel-Spross-System nicht der Transpirationsrate der Blätter entsprechen kann, zum andern periodisch aufgrund geringer Bodenfeuchte. Den ersten Mechanismus bezeichnet man auch als sog. „dynamischen Stress“, den zweiten als „statischen Stress“ (vgl. SELLIN 1997). Der erste Typ der Limitierung tritt unter mitteleuropäischen Standortbedingungen häufig auf und ist gekennzeichnet durch einen bestandestypischen maximalen Wert von E_c , der mit steigendem D nicht überschritten wird. Damit verbunden ist eine Reduktion von g_c und folglich auch der Aufnahme von Kohlendioxid (vgl. KÖSTNER et al. 2008). Wegen der Häufigkeit des Auftretens ist dieser Limitierungstyp produktionsökologisch besonders bedeutsam. Der zweite Typ der Limitierung tritt erst bei anhaltender Bodentrockenheit auf und bezeichnet den typischen Trockenstress von Pflanzen. Unter extremen Bedingungen oder gehäuftem Auftreten gefährdet er die Überlebensfähigkeit der Bäume bzw. die langfristige Stabilität des Bestandes. Es ist davon auszugehen, dass beide Limitierungen durch den Klimawandel gefördert werden.

Landpflanzen verhalten sich in der Regel so, dass Kohlenstoffaufnahme und Wasserabgabe in einem ausgewogenen Verhältnis zueinander stehen, welches auch unter extremen Umwelteinflüssen einen bestimmten Schwankungsbereich nicht verlässt (COWAN 1982). Dieses Verhältnis von Kohlenstoffaufnahme zu Wasserabgabe wird als Wassernutzungseffizienz (WUE) bezeichnet und mit unterschiedlichen Methoden bestimmt. WUE ist meist am Morgen oder Vormittag höher als am Nachmittag und während Perioden guter Wasserversorgung niedriger als in Trockenperioden. In der Literatur finden sich hierzu jedoch von Fall zu Fall unterschiedliche Befunde (u. a. PEREIRA 1995, REICHSTEIN et al. 2002). In der vorliegenden Arbeit wird das Transpirationsverhalten eines Fichten- und Buchenbestandes im Jahresverlauf sowie während einer moderaten Trockenperiode untersucht. Dabei soll die saisonale Variation der täglichen Transpiration, ihre maximalen Werte sowie ihre Abhängigkeit von atmosphärischen und edaphischen Bedingungen herausgearbeitet werden. Es ist das Ziel, art- und bestandespezifische Unterschiede für eine standortgenaue Parametrisierung eines Wasserhaushaltsmodells (PETERS et al. 2011) verfügbar zu machen und zur Beurteilung eines modellinternen Indikators der Transpiration (SCHWÄRZEL et al. 2011) für die räumliche Bewertung des Wasserhaushalts von Waldstandorten beizutragen.

2 Material und Methoden

2.1 Messstandorte im Tharandter Wald

Die vorliegenden Messungen wurden an einem Fichten- und einem Buchenstandort im Tharandter Wald durchgeführt. Der Tharandter Wald liegt ca. 20 km SW von Dresden und stellt mit 60 km² Fläche das größte zusammenhängende Waldgebiet in Sachsen dar. An dem von Fichten (*Picea abies* [L.] Karst.) dominierten Standort „Ankerstation Tharandter Wald“ (385 m ü. NN, 50°57'49"N, 13°34'01"O) finden langfristige Messungen zum Waldwachstum (GEROLD 2004) und Wasser- und Kohlenstoffhaushalt (GRÜNWARD & BERNHOFER 2007, BERNHOFER et al. 2011) statt. Am davon nördlich gelegenen, mit Buche (*Fagus sylvatica* L.) bestockten Standort „Landberg“ (385 m ü. NN, 50°57'49" N, 13°34'01" O) werden seit 2005 Messungen zum Wasser- und Kohlenstoffhaushalt durchgeführt (SPANK & BERNHOFER 2008, SCHWÄRZEL et al. 2009). Entsprechend langjähriger meteorologischer Aufzeichnungen an der Ankerstation beträgt die mittlere jährliche Temperatur

7,7 °C mit einer mittleren Jahresniederschlagssumme von 820 mm. Das Bestandesalter des Fichtenstandortes betrug im Jahr 2006 114 Jahre, das des Buchenbestandes 98 Jahre. Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Saftflussmessungen zur Bestimmung der Bestandestranspiration werden seit 2001 an der Ankerstation Tharandter Wald (CLAUSNITZER et al. 2011) und seit 2005 am Landberg durchgeführt.

2.2 Erfassung der Bestandestranspiration

Die hier vorgestellten Xylemsaftflussmessungen erfolgten nach der Methode von GRANIER (1987). Dabei werden 2 nadelförmige Temperatursensoren mit einem vertikalen Abstand von 15 cm radial in den Splintbereich des Baumes eingebracht. Der obere Messsensor besitzt eine aus Konstantan bestehende 2 cm lange Heizwicklung, welche eine Heizleistung von 0,2 W (12 V, 120 mA) erhält, durch die sich das umschließende Holz erwärmt. Der untere Sensor dient als Referenz ohne Heizung. Durch Aufsteigen des Saftstromes kommt es zu einer Abkühlung und Verringerung der Temperaturdifferenz zwischen beheiztem und unbeheiztem Sensor. Die sich stetig ändernde Temperaturdifferenz wird als Spannungsdifferenz [mV] kontinuierlich aufgezeichnet und wurde als 10-Min.-Mittelwert gespeichert. Die Xylemsaftflussmessungen wurden in der Regel in 2 m Höhe an 2 Seiten der 8-9 Messbäume pro Standort durchgeführt.

Über eine im Labor erstellte, empirische Kalibrationskurve wird die Temperaturdifferenz in eine Flussdichte (heat flux density, HFD) umgerechnet. Da sich an den beiden Messstandorten keine systematischen Unterschiede von HFD zwischen den Messbäumen ergaben, erfolgte die Hochrechnung der Saftflussmessungen auf die Bestandestranspiration (E_c) über den mittleren HFD-Wert der Bäume multipliziert mit der kumulativen Splintfläche (AS_{cum}) des Bestandes:

$$E_c = HFD \cdot AS_{cum} \quad [\text{ml/m}^2/\text{s}]$$

Da für die vorliegenden Ergebnisse nur Tageswerte verwendet wurden, konnte die im Tagesverlauf auftretende, zeitliche Verzögerung zwischen Blatttranspiration in der Krone und Saftfluss im Stamm der Bäume vernachlässigt werden.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Jahresverlauf der Bestandestranspiration E_c und -leitfähigkeit g_c

Kontinuierliche Messungen des Saftflusses der Bäume mit Hochrechnung auf die Bestandestranspiration bildeten die Grundlage für die Validierung des forsthydrologischen Standortmodells BROOK90 (SCHWÄRZEL et al. 2009, PETERS et al. 2011, SCHWÄRZEL et al. 2011). Beispielhaft sei hier der Jahresverlauf von 2006 dargelegt, da in diesem Jahr eine Sommer-trockenheit auftrat. Hinsichtlich der atmosphärischen Faktoren ist die treibende Kraft der Transpiration das Wasserdampf-sättigungsdefizit der Luft, das von Lufttemperatur und Luftfeuchte bestimmt wird. Über die Photosynthese und stomatare Leitfähigkeit hängt die Transpiration auch von der Strahlung bzw. von der verfügbaren Verdunstungsenergie ab. Die Niederschläge blieben 2006 mit 776 mm a⁻¹ unter dem langjährigen Durchschnitt und waren nach dem Trockenjahr 2003 die geringsten an den Standorten. Die mittlere Jahrestemperatur

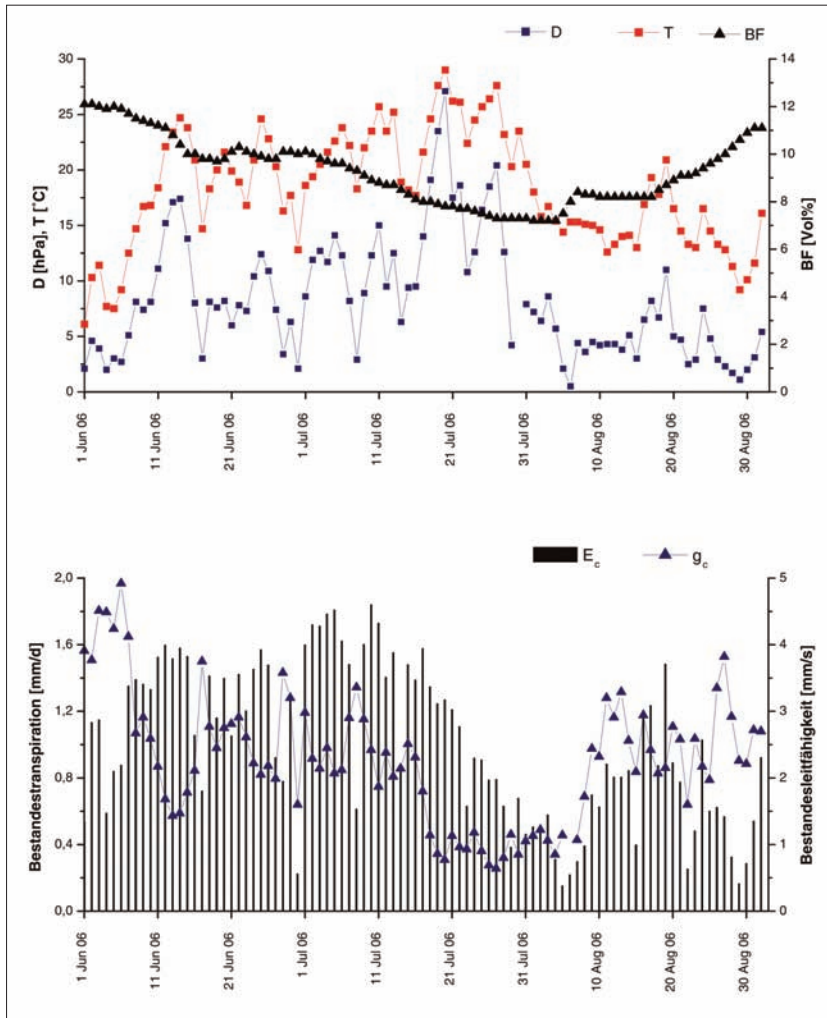


Abb. 1: Jahresverlauf der Tagesmittelwerte von Bodenfeuchte, BF (unter 30 cm Tiefe), Lufttemperatur, T und Dampfdruckdefizit der Luft, D (Messhöhe 42 m) am Fichtenstandort (oben) sowie Tagessummen der Bestandstranspiration, E_c und Tagesmittelwerte der Bestandesleitfähigkeit, g_c für 2006 (unten).

Fig. 1: Annual daily means of soil water content (BF, below 30 cm depth), air temperature (T) and vapor pressure deficit (D) (measurement height 42 m) at the spruce site (above) as well as daily sums of canopy transpiration (E_c) and daily means of canopy conductance (g_c) for 2006 (below).

entsprach mit 8,9 °C der von 2003. Auch das mittlere jährliche D war mit 4,3 hPa überdurchschnittlich hoch und wurde nur von 2003 (4,9 hPa) übertroffen. Während der sehr warmen Monate Juni und Juli nahm die Bodenfeuchte fortlaufend ab und erreichte im Juli und August kritische Werte. Gleichzeitig waren in diesen Monaten Temperatur und D deutlich erhöht (Abb. 1, oben). Typische maximale Werte von E_c betragen in 2006 1,6 mm d⁻¹. Ab Mitte Juli war jedoch eine stetige Abnahme von E_c zu verzeichnen mit minimalen Werten Anfang August. Ein ähnliches Verhalten war für die Leitfähigkeit zu beobachten. Erst nach Niederschlägen kam es zu einem leichten Wiederanstieg von E_c und g_c (Abb. 1, unten). Auch in Jahren ohne ausgeprägte Bodentrockenheit werden maximale Werte von E_c im Juni und Juli erreicht, während ab August eine fortlaufende Abnahme in den Herbst hinein erfolgt. Aus Messungen im Jahr 2003 ist bekannt, dass am Fichtenstandort die Transpiration bei Unterschreiten eines kritischen Schwellenwertes des Bodenwassergehaltes von 9,5 Vol. % in den oberen 40 cm Boden (entspricht 43 % des pflanzenverfügbaren Wassers) linear mit abnehmendem Bodenwassergehalt absinkt (CLAUSNITZER et al. 2011). Bei 8 Vol. % Bodenfeuchte beträgt E_c nur noch ca. 30 % der Werte ohne Bodentrockenheit bei sonst optimalen meteorologischen Bedingungen. An einem Kiefernstandort bei Hartheim wurde ein kritischer Schwellenwert bei einem Bodenwassergehalt von ca. 16 Vol. % gefunden (STURM et al. 1996, KÖSTNER 2001). In den Kiefern konnte bei anhaltender Trockenheit auch ein Anstieg des Pflanzenhormons Abscisinsäure im Xylemsaft beobachtet werden, was eindeutig auf Trockenstress hinweist. Es ist davon auszugehen,

dass an Standorten mit höherer Wasserspeicherkapazität des Bodens dieser periodische Trockenstress seltener auftritt (vgl. ALSHEIMER et al. 1998).

3.2 Korrelation von E_c und g_c mit atmosphärischen Faktoren

Während die tägliche Kronendachtranspiration linear mit der Strahlung zunimmt, ist eine Einschränkung der Transpiration durch „Lufttrockenheit“, d. h. durch hohe Werte von D zu beobachten. Die Transpiration nimmt daher nicht linear mit steigendem D zu, sondern erreicht einen Sättigungswert, der dem maximalen $E_{c,max}$ des Bestandes entspricht (Abb. 2, links). Werte von $E_{c,max}$ hängen von der Baumart, vom Bestandesalter, von der Bestandesstruktur bzw. der hydraulischen Architektur und dem Blattflächenindex (LAI) ab, können daher zwischen den Jahren variieren. Bei periodischer Bodentrockenheit sind alle Tageswerte von E_c bei vergleichbaren meteorologischen Bedingungen deutlich reduziert. Unter diesen Bedingungen ist g_c weniger von den atmosphärischen Faktoren (Strahlung, Temperatur, Luftfeuchte) als vom internen Hormonhaushalt gesteuert (u. a. TARDIEU & DAVIES 1993). Das Stresshormon Abscisinsäure, das in den Wurzeln gebildet und in die Blätter transportiert wird, beeinflusst dann die Stomataregulation. Ohne den Einfluss von Bodentrockenheit nimmt g_c von maximalen Werten bei niedrigem D mit zunehmendem D typischerweise beständig ab. Unter Bodentrockenheit ist diese dynamische Beziehung unabhängig von der Strahlungsintensität praktisch ausgeschaltet (Abb. 2, rechts).

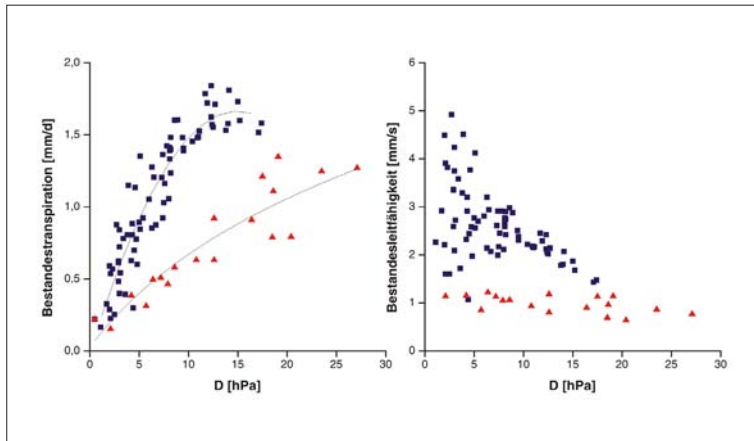


Abb. 2: Korrelation der täglichen Bestandestranspiration, E_c (links) bzw. der mittleren täglichen Bestandesleitfähigkeit, g_c (rechts) mit dem Sättigungsdefizit der Luft, D (gemittelt über 24 h) für Tage ohne Bodentrockenheit (Quadrate) und mit deutlicher Bodentrockenheit (Dreiecke) am Fichtenstandort für das Jahr 2006 mit Trockenheitsphase vom 17. Juli bis 05. August.

Fig. 2: Correlation of daily canopy transpiration (E_c) (left) and mean daily canopy conductance (g_c) (right) with the vapor pressure deficit (D) (average over 24 hrs) for days without (squares) and with significant soil drought (triangles) at the spruce site for the year 2006, including a drought phase from July 17th to August 5th.

Dieses „Umschalten“ auf eine andere, interne Steuerung der Leitfähigkeit wird von den meisten Wasserhaushaltsmodellen unzureichend oder gar nicht simuliert, da als Voraussetzung zunächst eine exakte Vorhersage des kritischen mittleren Bodenwassergehaltes und eine realistische Wiedergabe der Dynamik in der transienten Phase erforderlich wäre. In der Realität kann diese Phase von einzelnen Bäumen je nach Wurzeltiefe und individuellem Standort zu unterschiedlichen Zeitpunkten erreicht werden. Entsprechend kann die punktuell gemessene Bodenfeuchte nur als Näherungswert für die „mittlere“ Bodenfeuchte an den Wurzeln der Bäume gelten. Erst bei extremer Bodentrockenheit stellt sich ein einheitliches Verhalten aller Bäume ein (vgl. Lu et al. 1995).

3.3 Wassernutzungseffizienz der Bestände

Für die forstliche Bewertung ist nicht allein der Standortwasserhaushalt, sondern vor allem seine Wirkung auf den Kohlenstoffgewinn der Bäume bzw. auf das Bestandeswachstum von Bedeutung. Der Indikator „Wassernutzungseffizienz“ gibt das Verhältnis von Kohlenstoffaufnahme zur Wasserabgabe der Bäume oder des Bestandes an. Die sog. intrinsische Wassernutzungseffizienz (WUE_i) bezeichnet die von externen Faktoren nicht unmittelbar abhängige WUE . Sie wird als Quotient von Transpiration und Leitfähigkeit berechnet. Neuerdings wird ein analoges Verhältnis auf Ökosystemebene angewandt, das als inhärente Wassernutzungseffizienz bezeichnet wird (BEER et al. 2009). In der vorliegenden Untersuchung wurde die Bruttoprimärproduktion des Bestandes (GPP, GRÜN WALD & BERNHOFER 2007, SPANK & BERNHOFER 2008, BERNHOFER et al. 2011) auf E_c bzw. auf g_c aus Saftflussdaten bezogen. Dadurch wird das Verhalten der Bäume im Vergleich zu anderen Ökosystemkomponenten verdeutlicht. Im saisonalen Verlauf zeigte sich, dass WUE_i früher als WUE auf Bodentrockenheit mit einem Anstieg reagiert. Wobei nur am Fichtenstandort auch eine deutliche Erhöhung von WUE während der Trockenphase festzustellen war (Abb. 3).

Mit zunehmendem Sättigungsdefizit nimmt WUE typischerweise ab, d. h. an Tagen mit hohem D „kostet“ der Gewinn von Kohlenstoff mehr Wasser (Abb. 4, links). Dagegen verhält sich WUE_i von Fichte relativ unabhängig von D und beschreibt das pflanzeninterne Regulationsniveau (Abb. 4, rechts). Während jedoch bei Fichte WUE bzw. WUE_i in der Trockenphase deutlich erhöht ist, bleiben die Werte bei Buche annähernd im ursprünglichen Bereich, was auf eine geringere Beeinträchtigung durch die Bodentrockenheit hinweist. Dies entspricht der höheren Bodenfeuchte (Minimum 15 Vol. %) während der Trockenphase am Buchenstandort.

Die hier vorgestellten Ergebnisse von Fichte mit einer Erhöhung von WUE bzw. WUE_i unter Trockenstress entsprechen früheren Ergebnissen auf Blattebene (u. a. PEREIRA 1996). Neuere Messungen auf Ökosystemebene konnten keine Erhöhung von WUE unter Bodentrockenheit beobachten (REICHSTEIN et al. 2002). Offensichtlich hängen die Ergebnisse auch davon ab, ob die Werte direkt an den Pflanzen gewonnen wurden bzw. aus welchen Kohlenstoff- (Netto-/Bruttoprimärproduktion) und Wasserflüssen (Transpiration/Gesamtverdunstung) WUE berechnet wurde.

Es bleibt zu betonen, dass trotz Erhöhung von WUE unter Trockenheit, die absolute Kohlenstoffaufnahme aufgrund der niedrigen g_c -Werte stark eingeschränkt ist. Erhöhte Werte von WUE können daher nur als Beitrag zur Verbesserung des Überdauerungsvermögens während Trockenperioden gewertet werden. Mit dem Klimawandel wird die Bedeutung des Wasserhaushaltes für den Kohlenstoffhaushalt zunehmen. Die dynamische Reduktion der Bestandesleitfähigkeit unter Bodentrockenheit wird heute in Wasserhaushaltsmodellen noch ungenügend beschrieben. Auch muss die Erniedrigung von g_c aufgrund der zunehmenden atmosphärischen CO_2 -Konzentration zukünftig in Wasserhaushaltsmodellen Berücksichtigung finden.

3.4 Vergleich der Jahre 2006 und 2007

Im Jahr 2006 erreichte die Jahrestranspiration am Fichtenstandort 214 mm und am Buchenstandort 193 mm, wobei die Buche im Sommer weniger auf die Bodentrockenheit reagierte und höhere Werte als Fichte aufwies. Durch die höheren Saftflussraten von Fichte im Frühjahr und zusätzlichen Wasserverbrauch im Winter gleichen sich die Summen auf Jahresbasis weitgehend aus (Abb. 5). Dagegen liegt im Jahr 2007, das mit einer Jahresdurchschnittstemperatur von 9,5 °C, Jahresniederschlägen von 857 mm und einem mittleren Sättigungsdefizit von 3,7 hPa deutlich wärmer und feuchter war, E_c von Buche (213 mm) weit über Fichte (137 mm). Bemerkenswert ist der Beginn des Saftsteigens der Buche im März, während der Blattaustrieb im April erfolgte, und die längere Phase des Saftflusses im Herbst 2007. Die Unterschiede zwischen den Baumarten im Jahr 2007 können zum einen in der günstigeren Witterung liegen, die eher der Buche zugute kommt. Zum anderen hat der Sturm Kyrill im Januar 2007 zu einem erheblichen Verlust an grünen Zweigen am Fichtenstandort geführt, wodurch die Blattfläche und der Neuaustrieb reduziert wurden. Limitierend wirkte auf die Transpiration jedoch auch hohe atmosphärische Feuchte, d.h. häufige Niederschläge und hohe Luftfeuchtigkeit, die Blattnässe und Schließen der Spaltöffnungen bewirken. So nahm

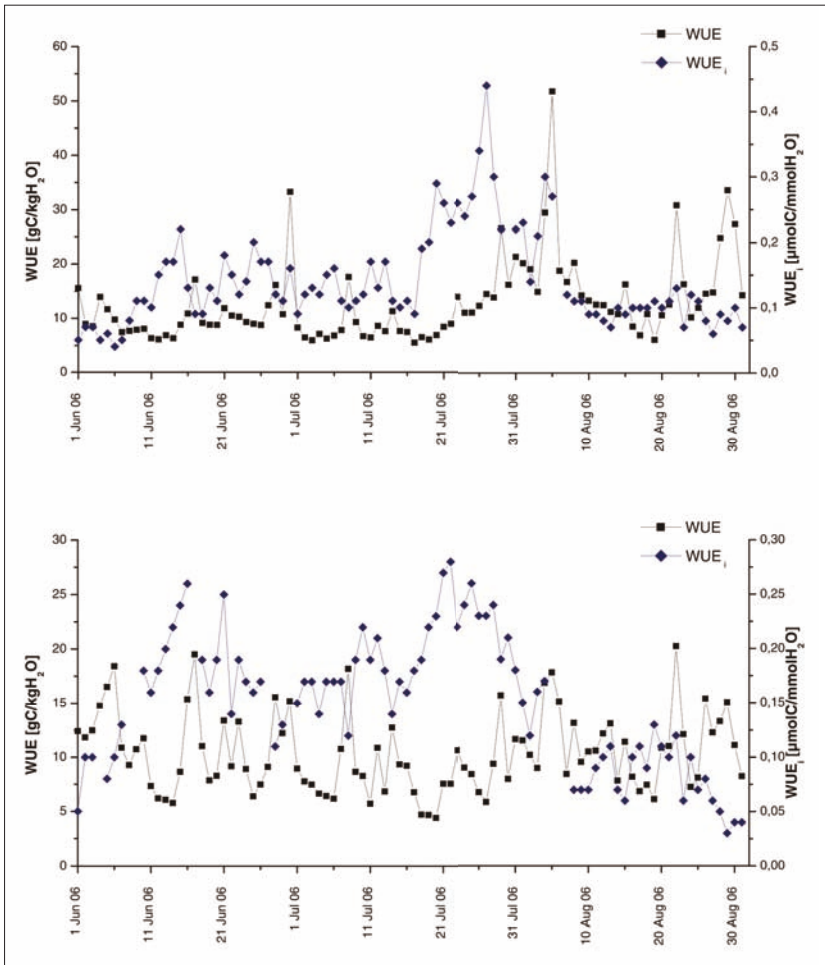


Abb. 3: Jahresverlauf der täglichen Wassernutzungseffizienz, WUE (Quadrate) bzw. der inhärenten Wassernutzungseffizienz, WUE_i (Rauten) für das Jahr 2006 mit einer Periode von Bodentrockenheit vom 17. Juli bis 05. August für Fichte (oben) und Buche (unten).

Fig. 3: Annual daily water-use efficiency (WUE) (squares) and inherent water-use efficiency (WUE_i) (diamonds) for the year 2006, including a drought phase from July 17th to August 5th for spruce (above) and beech (below).

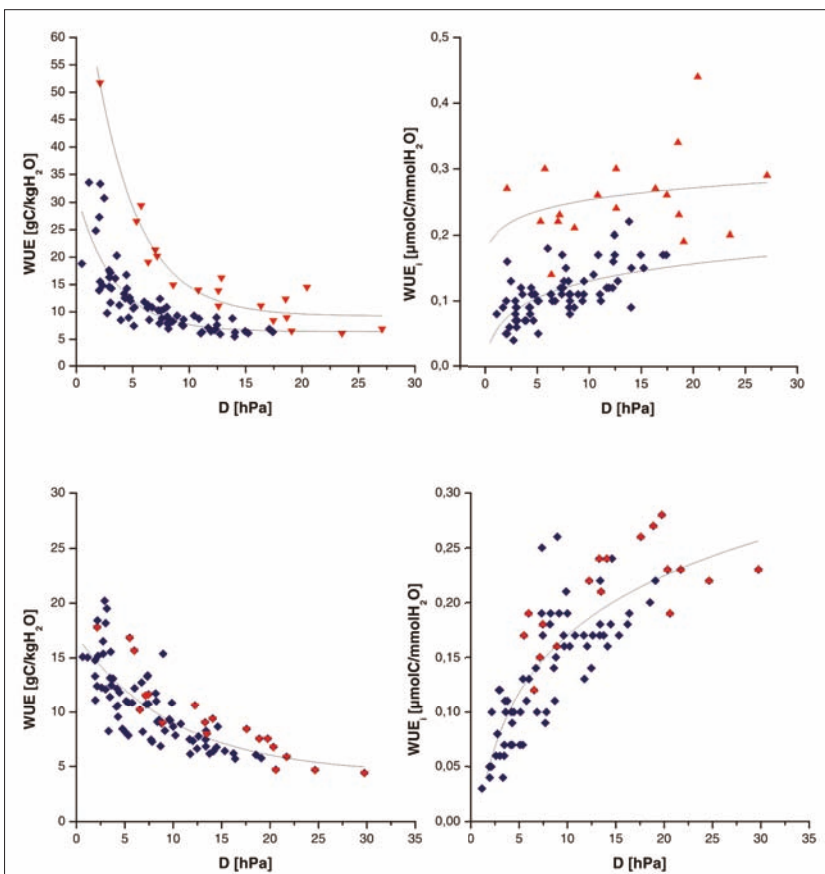


Abb. 4: Korrelation der täglichen Wassernutzungseffizienz, WUE (links) bzw. der inhärenten Wassernutzungseffizienz, WUE_i (rechts) mit dem Sättigungsdefizit D (gemittelt über 24 h) für Tage ohne Bodentrockenheit (Rauten) und mit Bodentrockenheit (Dreiecke) für Fichte (oben) und Buche (unten) im Jahr 2006 mit Trockenheitsphase vom 17. Juli bis 05. August.

Fig. 4: Correlation of daily water-use efficiency (WUE) (left) and inherent water-use efficiency (WUE_i) (right) with vapor pressure deficit (D) (average of 24 hrs) for days without (diamonds) and with soil drought (triangles) for spruce (above) and beech (below) in the year 2006, including a drought phase from July 17th to August 5th.

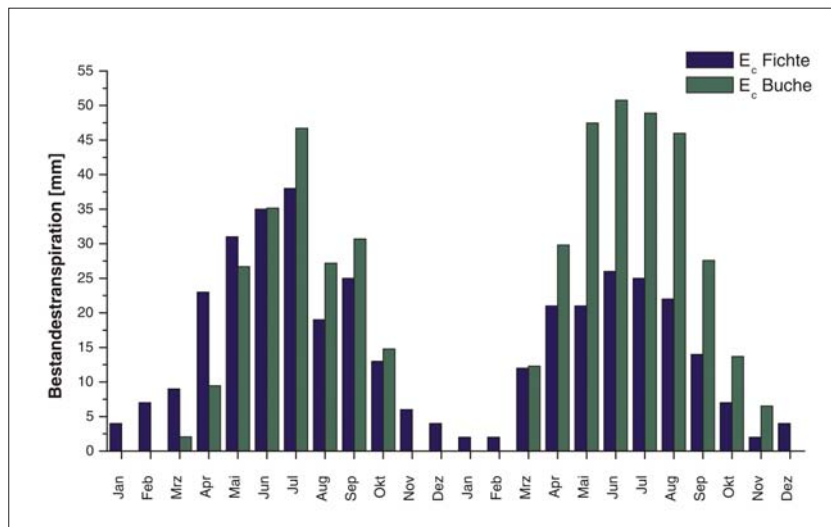


Abb. 5: Monatswerte der Bestandestranspiration, E_c am Fichten- und Buchenstandort für die Jahre 2006 (links) und 2007 (rechts).

Fig. 5: Monthly canopy transpiration (E_c) at the spruce and beech site for the years 2006 (left) and 2007 (right).

am Fichtenstandort die monatliche Transpiration mit der Anzahl der Niederschlagstage linear ab (CLAUSNITZER et al. 2011).

Die jährlichen Transpirationsraten an der Ankerstation Tharandter Wald variierten innerhalb des gesamten Beobachtungszeitraums von 2001–2009 zwischen 83 mm (2003) und 214 mm (2006), sie liegen damit im Bereich von Werten, wie sie auch für andere Fichtenaltbestände angegeben werden. In der Literatur finden sich jedoch häufig nur Angaben über einzelne Messjahre. Dabei entspricht die Spannweite von Messungen an verschiedenen Standorten etwa der Spannweite, die an der Ankerstation zwischen verschiedenen Messjahren gefunden wurde. Auch für Buche lassen sich ähnliche Werte der jährlichen Transpiration in der Literatur finden mit einer Spannweite von 178 mm bis 349 mm (MATZNER et al. 2004, SCHIPKA et al. 2005, SCHMIDT 2007). Neben Standort und Witterung wird E_c von der Bestandesstruktur beeinflusst. Bei Fichte nimmt die Transpiration ab dem Alter und damit verbundene Strukturänderungen ab (KÖSTNER et al. 2002), dagegen können bei Buche die Transpirationsraten unabhängig vom Alter mit der Baumhöhe und dem LAI zunehmen (KÖSTNER et al. 2004). Für die gesamte Wasserbilanz des Standortes ist vor allem bei weniger dichten Altbeständen die Evapotranspiration des Waldbodens mit zu berücksichtigen.

4 Schlussfolgerungen

Mit Saftflussmessungen lässt sich die Transpiration von Waldbeständen unabhängig von weiteren Verdunstungskomponenten im Wasserhaushalt bestimmen. Ferner können art- und bestandesspezifische atmosphärische und edaphische Kontrollfaktoren sowie Schwellenwerte der Transpirationslimitierung quantifiziert werden. Voraussetzung dafür sind kontinuierliche und langfristige Beobachtungen, um die Bandbreite von Umwelteinflüssen auf den Bestand erfassen zu können. Der häufigste Einfluss auf Transpiration und Leitfähigkeit, und damit auf die Kohlenstoffaufnahme der Bäume, sind Tage mit hohen Sättigungsdefiziten der Luft. An solchen Tagen ist der Wasserbedarf der Bäume hoch, der Kohlenstoffgewinn jedoch vergleichsweise niedrig und damit die Wassernutzungseffizienz der Bestände reduziert. Dies ist besonders bei Fichte ausgeprägt, die aufgrund ihrer natürlichen Herkunft an solche atmosphärische Bedingungen wenig angepasst ist. Obwohl die Wasserspeicherkapazität des Bodens am Fichtenstandort im Tharandter Wald vergleichsweise niedrig ist, trat innerhalb von neun Beobachtungsjahren nur zweimal Trockenstress durch periodische Bodentrockenheit auf. In dieser Zeit

ließ sich ein klarer Schwellenwert der Bodenfeuchte erkennen, der unabhängig von den atmosphärischen Bedingungen zu einer starken Einschränkung der Bestandesleitfähigkeit führte. Der Schwellenwert von 9,5 Vol. % Bodenfeuchte entspricht 43 % des pflanzenverfügbaren Wassers und ist damit in guter Übereinstimmung zu früheren Angaben in der Literatur. Trotz der Bodentrockenheit wurde in 2006 am Fichtenstandort die höchste Bestandestranspiration aller Beobachtungsjahre ermittelt. In der Jahresbilanz wird diese moderate Bodentrockenheit folglich weniger im Wasserhaushalt als im Kohlenstoffgewinn bzw. in der Wassernutzungseffizienz sichtbar. Bei Buche wirkte sich die Trockenheit im Jahr 2006 am Buchenstandort weniger auf Bodenfeuchte und Transpiration aus. Es ist zu fordern, dass Unterschiede im Standortwasserhaushalt aufgrund der Standortverhältnisse und Baumarten auch in Wasserhaushaltsmodellen entsprechend dargestellt werden können. Damit wäre die Basis gegeben, um transpirationsbezogene Indikatoren in Modellen, wie zum Beispiel Änderungen im Verhältnis von realer zu potenzieller Transpiration (SCHWÄRZEL et al. 2011) durch Messdaten physiologisch zu begründen.

Danksagung

Wir danken Uwe Eichelmann, Heiko Prasse und Udo Postel für ihre technische Unterstützung der Freilandmessungen sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für finanzielle Förderung (Kennzeichen FE 504/2-1, -2).

Literatur

- ALSHEIMER, M., KÖSTNER, B., FALGE, E., TENHUNEN, J.D. (1998): Temporal and spatial variation in transpiration of Norway spruce stands within a forested catchment of the Fichtelgebirge, Germany. *Ann. Sci. For.* **55**: 103-124.
- BEER, C., CIAIS, P., REICHSTEIN, M., BALDOCCHI, D., LAW, B.E., PAPALE, D., SOUSSANA, J.-F., AMMANN, C., BUCHMANN, N., FRANK, D., GIANELLE, D., JANSSENS, I.A., KNOHL, A., KÖSTNER, B., MOORS, E., ROUPSARD, O., VERBEECK, H., VESALA, T., WILLIAMS, C. A., WOHLFAHRT, G. (2009): Temporal and among-site variability of inherent water use efficiency at the ecosystem level. *Global Biogeochem. Cycles* **23**, GB2018, doi:10.1029/2008GB003233.
- BERNHOFER, CH., SPANK, U., CLAUSNITZER, F., KÖSTNER, B., GRÜNWALD, T., EICHELHANN, U., MENZER, A., FEGER, K.H., SCHWÄRZEL, K. (2011): Mikrometeorologische, pflanzenökologische und bodenphysiologische Messungen in Fichten- und

- Buchenbeständen des Tharandter Waldes. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**: 17-28.
- CLAUSNITZER, F., KÖSTNER, B., SCHWÄRZEL, K., BERNHOFER, CH. (2010): Relationships between canopy transpiration, atmospheric conditions and soil water availability – Analyses of long-term sap-flow measurements in an old Norway spruce forest of the Ore Mountains/Germany. *Agric. For. Meteorol.*, **151**: 1023-1034.
- COHEN, I.R. (1982): Regulation of water use in relation to carbon gain in higher plants. In: LANGE, O.L., NOBEL, P.S., OSMOND, C.B., ZIEGLER, H. (eds.): *Physiological Plant Ecology II. Water relations and carbon assimilation. Encyclopedia of Plant Physiology, Vol. 12 B*: 589-613.
- GEROLD, D. (2004): 20 Jahre ökologisches Messfeld Tharandt. Zuwachs und Ertrag der Fichte. *AFZ* **22**: 1223-1226.
- GRANIER, A. (1987): Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiol.* **3**: 309-320.
- GRÜNWARD, 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.
- KÖSTNER, B. (2001): Evaporation and transpiration from coniferous and broad-leaved forests in Central Europe – relevance of patch-level studies for spatial scaling. *Meteorology and Atmospheric Physics* **76**: 69-82.
- KÖSTNER, B., FALGE, E., TENHUNEN, J.D. (2002): Age-related effects on leaf area / sapwood area relationships, canopy transpiration, and carbon gain of *Picea abies* stands in the Fichtelgebirge/Germany. *Tree Physiol.* **22**: 567-574.
- KÖSTNER, B., MATYSSEK, R., HEILMEIER, H., CLAUSNITZER, F., NUNN, A.J., WIESER, G. (2008): Sap flow measurements as a basis for assessing trace-gas exchange of trees. *Flora* **203**: 14-33.
- KÖSTNER, B., SCHMIDT, M., FALGE, E., FLECK, S., TENHUNEN, J.D. (2004): Atmospheric and structural controls on carbon and water relations in mixed-forest stands of beech and oak. In: MATZNER, E. (ed.): *Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment. A German Case Study. Ecological Studies 172*, Springer, Berlin: 69-98.
- KÖSTNER, B., TENHUNEN, J.D., ALSHEIMER, M., WEDLER, M., SCHARFENBERG, H.-J., ZIMMERMANN, R., FALGE, E., JOSS, U. (2001): Controls on evapotranspiration in a spruce forest catchment of the Fichtelgebirge. In: TENHUNEN, J.D., LENZ, R., HANTSCHHEL, R. (eds.): *Ecosystem approaches to landscape management in Central Europe. Ecological Studies 147*, Springer Verlag, Berlin: pp 379-415.
- LU, P., BIRON, P., BRÉDA, N., GRANIER, A. (1995): Water relations of adult Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) under soil drought in the Vosges mountains: water potential, stomatal conductance and transpiration. *Ann. Sci. For.* **52**: 117-129.
- MATZNER, E., KÖSTNER, B., LISCHIED, G. (2004): Biogeochemistry of two forested catchments in a changing environment: A synthesis. In: MATZNER, E. (ed.): *Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment. A German Case Study. Ecological Studies 172*, Springer, Berlin: 457-490.
- MOORE, G.W., BOND, B.J., JONES, J.A., PHILLIPS, N., MEINZER, F.C. (2004): Structural and compositional controls on transpiration in 40- and 450-year-old riparian forests in western Oregon, USA. *Tree Physiol.* **24**(5): 481-491.
- PEREIRA, J.S. (1995): Gas exchange and growth. In: SCHULZE, E.D., CALDWELL, M.M. (eds.): *Ecophysiology of Photosynthesis. Ecol. Studies 100*, Springer-Verlag, Berlin: pp 147-181.
- PETERS, R., SCHWÄRZEL, K., CLAUSNITZER, F., BERNHOFER, C., FEGER, K.H. (2011): Einfluss von Relief, Boden und Bestockung auf den Standortwasserhaushalt. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**: 101-109.
- PECK, A., MEYER, H. (1996): Einfluss von Bestandesparametern auf die Verdunstung von Wäldern. *Forstw. Cbl.* **115**: 1-9.
- POYATOS, R., MARTÍNEZ-VILALTA, J., ČERMÁK, J., CEULEMANS, R., GRANIER, A., IRVINE, J., KÖSTNER, B., LAGERGREN, F., MEIRESSONNE, L., NADEZHINA, N., ZIMMERMANN, R., LLORENS, P., MENCUCCHINI, M. (2007): Phenotypic plasticity in structural and functional hydraulic characters in Scots pine: Analysis of variability across Eurasia. *Oecologia* **153**: 245-259.
- REICHSTEIN, M., TENHUNEN, J.D., ROUPSARD, O., OURCIVAL, J.-M., RAMBAL, S., MIGLIETTA, F., PERESSOTTI, A., PECCHIARI, M., TIRONE, G., VALENTINI, R. (2002): Severe drought effects on ecosystem CO₂ and H₂O fluxes in three Mediterranean evergreen ecosystems: revision of current hypotheses? *Global Change Biology* **8**: 999-1017.
- SCHWÄRZEL, K., MENZER, A., SPANK, U., CLAUSNITZER, F., HANTSCHHEL, J., GRÜNWARD, T., KÖSTNER, B., BERNHOFER, C., FEGER, K.H. (2009): 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). *Agric. For. Meteorol.* **149**: 1994-2006.
- SCHWÄRZEL, K., PETERS, R., PETZOLD, R., HANTSCHHEL, J., MENZER, A., CLAUSNITZER, F., SPANK, U., KÖSTNER, B., BERNHOFER, C., FEGER, K.H. (2011): Räumlich-differenzierte Berechnung und Bewertung des Standortwasserhaushaltes von Wäldern des Mittelgebirges. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**: 119-126.
- SELLIN, A. (1997): Variation in shoot water status of *Picea abies* (L.) Karst. trees with different life histories. *For. Ecol. Manage.* **97**: 53-62.
- SELLIN, A. (2001): Hydraulic and stomatal adjustment of Norway spruce trees to environmental stress. *Tree Physiol.* **21**: 879-888.
- SPANK, U., BERNHOFER, CH. (2008): Another simple method of spectral correction to obtain robust EC results. *Bound.-Layer Meteorol.* **128**: 403-422.
- 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.
- TARDIEU, F., DAVIES, W.J. (1993): Integration of hydraulic and chemical signaling in the control of stomatal conductance and water status of droughted plants. *Plant, Cell & Environ.* **16**: 341-349.

submitted: 08.12.2010

reviewed: 03.02.2011

accepted: 15.03.2011

Autorenanschrift:

Dr. Barbara Köstner, Falko Clausnitzer
 Technische Universität Dresden
 Professur für Meteorologie
 Piennner Straße 23, 01737 Tharandt,
 E-Mail: barbara.koestner@forst.tu-dresden.de
 E-Mail: falko.clausnitzer@forst.tu-dresden.de