

Mikrometeorologische, pflanzenökologische und bodenhydrologische Messungen in Fichten- und Buchenbeständen des Tharandter Waldes

Micrometeorological, plant-ecological, and soil-hydrological measurements in stands of spruce and beech in the Tharandt forest

Bernhofer, C., Grünwald, T., Spank, U., Clausnitzer, F., Eichelmann, U., Feger, K.H., Köstner, B., Prasse, H., Menzer, A. & Schwärzel, K.

Abstract

This paper addresses micrometeorological, plant-ecological, and soil-hydrological measurements in stands of spruce and beech as a means to understand the processes. The long-term flux site Anchor Station Tharandt (dominated by 120-year-old spruce) shows the high dynamics of land surface-atmosphere interactions as well as the climatologically relevant effects on turbulent energy flux partitioning, carbon sequestration, and evapotranspiration (ET). Climate, phenology, and fluxes support the idea of dividing the year into an 'active phase' (April–September) and a 'dormant phase' (October–March); carbon sequestration, available energy (net radiation), and sensible heat flux are almost negligible in the dormant season. Only ET shows a significant contribution to the annual budget (25% of the active phase) from interception (evaporation from wetted needles) driven by sensible heat flux from the atmosphere. The interannual variation of the fluxes is generally small (e.g., 500 to 650 gC m⁻² yr⁻¹ of C uptake) even for the severe drought year of 2003 (400 gC m⁻²) or with thinning in 2002. Compared to the beech site, the spruce site – at least in the active season – experienced similar rates of ET but smaller rates of C uptake. Canopy drip was 55% of precipitation at the spruce site. Canopy drip (40%) and stem flow (25%) added up to 65% of canopy precipitation at the beech site. This difference likely explains the generally higher soil moisture at the beech site. As a consequence of this study, models with sufficient complexity are recommended to represent the structural differences of different forest types including their phenophases. For a better representation of forests, e.g., in climate models, land surface-atmosphere interactions must be included.

Keywords: spruce, beech, Tharandt forest, evapotranspiration, interception, carbon sequestration, interannual variability, land surface-atmosphere interactions

Zusammenfassung

Diese Arbeit benutzt mikrometeorologische, pflanzenökologische und bodenhydrologische Messungen als Mittel zum Prozessverständnis. Der langfristige Flussmessstandort Ankerstation Tharandter Wald (von 120-jährigen Fichten dominiert) zeigt die große Dynamik der Landoberflächen-Atmosphären-Wechselwirkungen wie auch ihre Klimaeffekte auf die Verteilung der turbulenten Wärmeströme, die Kohlenstoffsequestrierung und die Evapotranspiration (ET). Klimawerte, Phänologie und

Flüsse unterstützen die Einteilung des Jahres in eine ‚aktive Phase‘ (April–September) und eine ‚Ruhephase‘ (Oktober–März): Kohlenstoffsequestrierung, zur Verfügung stehende Energie (Strahlungsbilanz) und fühlbarer Wärmestrom sind in der Ruhephase praktisch vernachlässigbar. Nur ET zeigt einen signifikanten Beitrag zur Jahresbilanz (25% der aktiven Phase) aus der Interzeption (Evaporation von benetzten Nadeln), die vom fühlbaren Wärmestrom aus der Atmosphäre angetrieben wird. Die zwischenjährliche Variation der Flüsse ist im Allgemeinen klein (z. B. 500–650 gC m⁻² yr⁻¹) C-Aufnahme), selbst mit dem starken Dürrejahr 2003 (400 gC m⁻²) oder dem Effekt der Durchforstung 2002. Verglichen mit der Buche erreicht die Fichte – zumindest in der aktiven Periode – ähnliche Werte von ET aber niedrigere bei der C-Aufnahme. Die Kronentraufe beträgt bei der Fichte nur ca. 55% des Niederschlages, bei der Buche summieren sich ca. 40% Kronentraufe und knapp 25% Stammabfluss zu etwa 65% Bestandesniederschlag. Dieser Unterschied erklärt möglicherweise die im Allgemeinen höhere Bodenfeuchte am Buchenstandort. Als Resultat aus dieser Arbeit werden Modelle mit ausreichender Komplexität empfohlen, welche Bestandesstruktur und Phänophasen berücksichtigen. Das ist eine Voraussetzung für eine bessere Berücksichtigung von Wäldern mit ihren Landoberflächen-Atmosphären-Wechselwirkungen, z. B. in Klimamodellen.

Schlüsselwörter: Fichte, Buche, Tharandter Wald, Evapotranspiration, Interzeption, Kohlenstoffsequestrierung, zwischenjährliche Variabilität, Landoberflächen-Atmosphären-Wechselwirkungen

1 Einleitung

Langjährige Untersuchungen zur Entwicklung von genutzten Wäldern in Abhängigkeit von den Standortbedingungen gehören zum Standardrepertoire der Forstwissenschaften (BAUMGARTNER 1967). Ziel solcher Untersuchungen sind Erkenntnisse zum standortgerechten Waldbau und der Erhalt der Waldfunktionen wie Holzproduktion und Bodenschutz. In der Vergangenheit konnten die so gewonnenen Erfahrungen gut in die forstliche Praxis übertragen werden. Durch die Klimaänderung, aber auch durch anderen, z.B. wirtschaftlichen, Anpassungsdruck müssen heute vermehrt Modelle herangezogen werden, die den wechselnden Bedingungen im Klima und im Bestandesaufbau Rechnung tragen können (FREER-SMITH et al. 2007). Solche Modelle werden anhand von Messdaten entwickelt und überprüft. Parallel zu den Modellen haben diese Messungen in den letzten Jahrzehnten an Komplexität gewonnen. Sie benutzen Methoden aus vielen Disziplinen und vermitteln ein komplexes Gesamtbild des Zustandes von Wäldern und ihrer Wechselbeziehungen mit

der Landschaft bzw. den Umweltressourcen Boden, Wasser und Luft.

Am Beispiel der langjährigen Untersuchungen der TU Dresden im Tharandter Wald (BERNHOFER 2002) wird hier der Entwicklungsstand der mikrometeorologischen, pflanzenökologischen und bodenhydrologischen Messungen dokumentiert. Dabei werden zunächst die meteorologischen Größen, die Energie- und Kohlenstoffbilanzen sowie der Wasserhaushalt an dem seit den 90-er Jahren intensiv untersuchten fichten-dominierten Standort betrachtet. Danach werden parallele Messungen über zwei Jahre an einem Buchenstandort mit diesen langjährigen Ergebnissen verglichen, um einerseits den Unterschied zwischen Nadel- und Laubwald zu verdeutlichen und um andererseits eine typische Entwicklung aus der forstlichen Praxis – Umbau von Fichten- in Buchenbestände – nachzuvollziehen.

2 Standorte und Messungen

2.1 Untersuchte Fichten- und Buchenstandorte

Die Standorte für die Untersuchungen befinden sich etwa 15 km südwestlich des Zentrums von Dresden im Tharandter Wald. Der Tharandter Wald bildet in den unteren Lagen der Nordabdachung des Erzgebirges ein geschlossenes Waldgebiet von ca. 6.000 ha. Er ist durch überwiegend sanftwellige Geländeformen zwischen 350 und 400 m über NN gekennzeichnet. Im Norden schließt sich das Lommatzsch-Meißner Hügelland und im Osten das tief eingeschnittene Tal der Weißeritz an. Im Südwesten wird das Gebiet durch den Colmnitzbach und im Süden durch den Seerenbach begrenzt.

In diesem Waldgebiet werden seit Ende der 1950er Jahre forstmeteorologische Messungen durchgeführt. Dazu gehörte bereits 1958 ein Messturm auf einer ca. 50 m x 80 m großen Lichtung (dem „Wildacker“), der erst in den späten 1990er Jahren aus Sicherheitsgründen abgebaut werden musste. In der Nähe des Wildackers wurde 1990 im geschlossenen Bestand ein neuer Stahlgerüstturm im Bereich des sog. „Ökomessfeldes“ in der Forstabteilung 236 errichtet. Wegen der Langfristigkeit der Untersuchungen spielte die für die technische Erschließung und Zugänglichkeit günstige Lage eine Rolle. Seit 1996 werden beide Standorte (Wildacker mit Messungen im Freiland über Gras; Ökomessfeld mit 42 m Messturm im Fichtenbestand) zur Bezeichnung „Ankerstation Tharandter Wald“ zusammengefasst. An diesem Beispiel werden die klassischen und die neuen Methoden zur messbasierten Analyse forstlicher Standorte erläutert. Von den übrigen Messstationen im Untersuchungsgebiet wird der Buchenstandort „Buchhübel“ herangezogen; für einen Gesamtüberblick aller Stationen in und um den Tharandter Wald wird auf die Internetinformationen der Professur Meteorologie (TU Dresden) verwiesen.

Der Untersuchungsstandort der Ankerstation Tharandter Wald befindet sich auf der Hochfläche mit einer durchschnittlichen Höhe von 375 m und ist mit einem älteren Fichtenbestand bestockt. Innerhalb des bewaldeten Untersuchungsgebietes im Umkreis des Messturms mit einem Radius von 0,5 km (78,5 ha), welches 36 Waldparzellen umfasst, nehmen nach MELLMANN et al. (2003) Nadelbäume eine Fläche von 87 % ein, weitere 13 % bestehen aus Laubwald. 72 % der Gesamtfläche sind von der Gemeinen Fichten (*Picea abies*) bestanden, wovon etwa die Hälfte ein Bestandesalter von mindestens 80 Jahren aufweist. Außerdem kommen die Europäische Lärche

(*Larix decidua*), die Douglasie (*Pseudotsuga douglasii*) und die Gemeine Kiefer (*Pinus sylvestris*) vor. Laubbaumvertreter sind die Gemeine Birke (*Betula pendula*) und die Rotbuche (*Fagus sylvatica*). Teile der untersuchten Fläche sind von manchmal sehr dichtem Unterwuchs bedeckt. Überschirmungsgrad und Bodenbewuchs wurden parzellenweise geschätzt und ergaben für das Untersuchungsgebiet mittlere Werte von 73 % bzw. 56%. Die Bestandesparameter wurden von MELLMANN et al. (2003) 1999 in Abhängigkeit von der typischen Quellfläche der Flussmessungen abgeschätzt und sind in Tab. 1 angegeben. Sie sind durch entsprechende Werte für den Buchenbestand ergänzt.

Die Werte in Tab. 1 werden durch den Altfichtenbestand auf der den Messturm umgebende Parzelle dominiert. Er wurde 1887 durch Plätzeaat begründet (FRÜHAUF 1998). In einem Auslichtungsversuch wurde der Bestockungsgrad seit den 1990-er Jahren gezielt verringert (24 Plots mit einer Plotgröße von 30 m x 40 m, davon 12 mit unterschiedlicher Auflichtung und 12 Kontrollplots). In den aufgelichteten Plots wächst Drahtschmiele (*Deschampsia flexuosa*) bzw. in sechs Plots als Voranbau Rotbuche. In den Plots mit hohem Bestockungsgrad gibt es dagegen wenig Unterwuchs. Im April 2002 fand an der Ankerstation Tharandter Wald und im Umfeld eine – für dieses Bestandesalter typische – Durchforstung statt, die die Baumzahl um ca. 30 % und die Biomasse um ca. 20 % reduzierte, im Januar 2007 kam es 300 m in Richtung WSW zu einem Windbruch von 2 ha.

Der Buchenstandort „Buchhübel“ befindet sich nahe einer Basaltkuppe (Landberg, 386 m über NN) im Norden des Tharandter Waldes. Die Messstation wurde 2005 in einem autochthonen Buchenbestand (durchschnittliches Alter ca. 100 Jahre) errichtet. Zwischen April 2006 und Oktober 2008 wurden von einem 37 m hohen Messturm mikrometeorologische Messungen durchgeführt. Die Bestandeshöhe (ca. 30 m) und die Bestandesgrundfläche (30 bis 35 m² ha⁻¹) waren an beiden Standorten ähnlich, die laubabwerfenden Buchen verfügten aber nur über einen Blattflächenindex von ca. 4 gegenüber von ca. 7 bei den immergrünen Fichten. Beim Sturm „Kyrill“ im Januar 2007 kam es am Buchen- und Fichtenstandort zu Schäden, meist jedoch nicht in Turmnahe. Der Unterwuchs am Buchhübel ist von Vorblüherern mit einer kurzen aktiven

Tab. 1: Bestandesparameter an der Ankerstation (1999, Fichte) in Abhängigkeit von der typischen Quellfläche der Flussmessungen (nach MELLMANN et al. 2003) und an der Station Buchhübel (2007, Buche, nach SPANK 2010).

Tab. 1: *Stand parameters for the typical footprint of flux measurements at the Anchor Station (1999, spruce, according to MELLMANN et al. 2003) and at the Buchhübel site (2007, beech, according to SPANK 2010).*

	Fichte (1999)	Buche (2007)
Bestandesalter [Jahre]	108	ca. 100
Bestandeshöhe [m]	26,5	30
Bestandesdichte [n ha ⁻¹]	477	331
Mittlerer Brusthöhen- durchmesser [cm]	33	35
Blattflächenindex [m ² m ⁻²]	7,6	3,9
Bestandesgrundfläche [m ² ha ⁻¹]	35,8	30,9

Periode im April charakterisiert. Nach vollem Laubaustrieb im Mai reduzierte sich der Unterwuchs wieder.

Der Fichtenbestand stockt auf schwach podsoligen, mäßig pseudovergleyten Braunerden aus Schuttlemm oder aus Schutt führendem Lehm jeweils über tiefem Lehmschutt aus Lösslehm und Quarzporphyr. Der Buchenbestand stockt hauptsächlich auf schwach podsoligen Pseudogley-Braunerden aus Fließ-Lehmschluffgrus über tiefem Grus aus Rhyolith und Lösslehm und auf schwach podsoligen Braunerden aus Fließ-Sandschluffschutt über Fließ-Schutt aus Sandstein, Lösslehm und Basalt. Detaillierte Informationen zu den Böden finden sich in FEGER et al. (2008) und in SCHWÄRZEL et al. (2009).

Der wichtigste Unterschied zwischen buchen- und fichtendominierten Wäldern ist der regelmäßige vollständige Laubfall bei der Rotbuche, während die immergrüne Fichte mehrere physiologisch aktive Nadeljährgänge gleichzeitig aufweist (SCHMIDT-VOGT 1977). Diese unterschiedliche zeitliche Dynamik macht sich in allen Größen bemerkbar, vom Bestandesklima (MAYER et al. 2002) bis zum Wasserhaushalt. Hier werden die Wasser- und Kohlenstoffflüsse betrachtet. Ein guter Indikator für die aktive Phase der Bestände sind die phänologischen Phasen Laubtrieb, Laubverfärbung und Blattfall bei der Buche bzw. Maitrieb bei der Fichte. Sie sind in Tab. 2 im Vergleich mit langjährigen Messungen (Beginn der Aufzeichnungen im Jahr 1962) am Internationalen Phänologischen Garten in Hartha (am östlichen Rand des Tharandter Waldes) zusammengefasst. Der Abstand zwischen Laubaustrieb und Laubfall (‘Vegetationsperiode der Buche’) war 2006 um 6 Tage und 2007 um 10 Tage gegenüber dem langjährigen Mittel vergrößert. Eine Veränderung, die in den letzten Jahren häufig auftritt und mit dem Klimawandel in Verbindung gebracht wird (MENZEL et al. 2005).

Tabelle 3 zeigt die deutlichen Unterschiede in den meteorologischen Bedingungen zwischen der aktiven und der Ruheperiode, die hier grob mit dem Sommerhalbjahr (April bis September) und dem Winterhalbjahr (Oktober bis März)

gleichgesetzt werden. Die entscheidenden Steuergrößen für Verdunstung und Kohlenstoffhaushalt (Strahlung, Temperatur und Sättigungsdefizit) sind in beiden Jahreshälften völlig unterschiedlich, während die Windgeschwindigkeit im Winter nur etwas höher ausfällt und der Niederschlag etwas geringer. Dieser Unterschied in den steuernden Größen erlaubt es uns, die beiden meteorologischen Jahreshälften als aktive bzw. Ruheperiode anzusprechen. Das gilt aber nur vereinfachend: Ohne ausreichende Wasserversorgung (z. B. im Sommer 2003 und 2006) kommt es auch im Sommerhalbjahr zu Einschränkungen der Aktivität im Sommerhalbjahr. Der Winterniederschlag wurde bei Schnee mit täglicher Auflösung manuell erfasst, ab Anfang 2000 mit Hilfe einer Niederschlagswaage bei zehnmütiger Auflösung.

2.2 Messungen

Klassische Verfahren zur objektiven Analyse forstlicher Standorte untersuchen vor allem den Waldzustand, aber auch Boden und Klima als Zustandsgröße (eher statische Betrachtung). Neue Verfahren betrachten auch die Wechselbeziehungen zwischen Wald und Umwelt (eher dynamische Betrachtung). Dazu werden die Energie- und Massenflüsse zwischen Vegetation, Boden und Atmosphäre, aber auch zwischen den Organen der Pflanze oder Bereichen des Bestandes erhoben (eine Pionierarbeit dazu ist BAUMGARTNER 1956). Diese Flüsse sind in der Regel an Transportmedien wie Wasser und Luft gebunden. Daher werden Stofftransporte oft über den Wassertransport (z. B. im Boden) oder den turbulenten Luftaustausch gemessen. Nachdem Modelle mit Hilfe dieser Messungen entwickelt, parametrisiert, angetrieben und schließlich auch überprüft werden, müssen die Ansprüche der Modelle berücksichtigt werden. Das betrifft z. B. die räumliche oder zeitliche Auflösung der Daten.

Die Messungen und ihre räumliche Anordnung sind in Abbildung 1 exemplarisch für die Ankerstation Tharandter Wald angegeben. Die Datenerhebung konzentriert sich auf drei Bereiche: erstens über dem Bestand (Flüsse von Strahlung,

Tab. 2: Phänologische Beobachtungen an den Buchen- und Fichtenbeständen (2006 und 2007) im Vergleich mit den langjährigen Beobachtungen am Internationalen Phänologischen Garten in Hartha (Ortsteil von Tharandt).

Tab. 2: Phenological observations of beech and spruce stands (2006 and 2007) compared to long-term observations at the International Phenological Garden in Hartha (part of the community of Tharandt).

Standort, phänologische Phase	2006	2007	Mittelwert und Standardabweichung
Buche (Phänol. Garten) Laubaustrieb Laubverfärbung Laubfall	29. April 19. Oktober 28. Oktober	18. April 30. September 21. Oktober	03. Mai ± 7 Tage 11. Oktober ± 7 Tage 26. Oktober ± 6 Tage
Buche (Buchhübel) Laubaustrieb Ca. 90% belaubt Laubverfärbung Start Höhepunkt Laubfall Allgemeiner Laubfall Ca. 90% entlaubt	23. April 03. Mai 23. Oktober 28. Oktober 01. November 23. November	13. April 20. April 01. Oktober 15. Oktober 22. Oktober 08. November	
Fichte (Ankerstation) Maitrieb	06. Mai	26. April	

Impuls, turbulenter Wärme, Wasserdampf und CO₂, sowie Niederschlag), zweitens im Stammraum (Strahlungsflüsse, Bestandesniederschlag) und drittens im Boden (Bodenwärmestrom, -temperatur, -wassergehalt und -saugspannung). Daneben werden Profilmessungen von Strahlung (PAR, Photosynthetically Active Radiation), Wind, Temperatur, Luftfeuchte und CO₂-Konzentration durchgeführt. Die zeitliche Auflösung der Messungen ist typischerweise 10s, die zu 10 min Werten gemittelt werden. Die Messung der turbulenten Ströme von fühlbarer Wärme, Wasserdampf und CO₂ wird mittels Eddykovarianz (EC) nach europäischem Standard (AUBINET et al. 2000) durchgeführt. Dabei werden aus hochfrequente Messungen (20–25Hz) der turbulenten Fluktuationen in der Atmosphäre halbständigen Flüsse berechnet. Die Transpiration wird darüber hinaus an mindestens 8 repräsentativen Bäumen mittels Xylem-Saftflussmethode erfasst (GRANIER 1987, KÖSTNER 2001) und ebenfalls zu 30 min-Werten zusammengefasst.

Die zweite, hier zum Vergleich herangezogene Messstation Buchhübel wurde 2005 errichtet. Zwischen April 2006 und Oktober 2008 wurden Turbulenz- und Strahlungsmessungen über dem Bestand durchgeführt. Prinzipiell war die Messkonfigurationen zur Bestimmung der Wasser- und Energiebilanzkomponenten am Buchhübel der an der Ankerstation sehr ähnlich. Lediglich die Art des eingesetzten Eddy-Kovarianz-Messsystems (EC-System) zur Bestimmung der turbulenten Flüsse musste aufgrund der netzunabhängigen (vor allem solaren) Stromversorgung am Buchhübel verändert

werden. So wurde anstelle eines Closed-Path-EC-Systems (Ankerstation) ein Open-Path-EC-Systems eingesetzt (siehe z. B. LEUNING & JUDD 1996). Alle anderen Messungen betreffend Strahlung, Transpiration, und Bodenfeuchte erfolgten jedoch mit den gleichen Gerätetypen und Messmethoden. Zusätzlich wurde an den Buchen noch der Stammabfluss an drei (zeitweilig an vier) repräsentativen Bäumen bestimmt. Zum Einsatz kam dabei eine Messkonfiguration nach REYNOLDS und HENDERSON (1967), wo mittels spiralförmiger Manschetten das am Stamm ablaufende Wasser aufgefangen und in Sammelfässer eingeleitet wird. In diesen werden dann der Füllstand und somit die Menge des Stammablaufs mittels Drucksonden bestimmt. Da bereits Niederschlagsereignisse > 15 mm einen Stammabfluss von mehr als 100 l zur Folge haben können, wurden die Sammelfässer mit automatischen Entleerungen versehen, die in regenfreien Perioden arbeiten. Nach einem Teilabbau des Turmes (Oktober 2008) mussten die Messungen zum turbulenten Austausch eingestellt und die Messungen die Strahlungskomponenten eingeschränkt werden. Alle übrigen Messungen insbesondere von Bestandesniederschlag und Transpiration sind aber bis heute in Betrieb. Detaillierte Angaben zur Station Buchhübel (Buchenbestand) und den an diesem Standort gewonnenen Ergebnissen finden sich in SPANK (2010).

Die Messungen werden darüber hinaus in Tab. 4 den Fragestellungen, einzelnen Messgrößen und den dafür verwendeten Messmethoden zugeordnet. Außerdem sind exemplarische

Tab. 3: Charakterisierung des Untersuchungszeitraums 1996 bis 2010 durch Tagesmittelwerte (Messsturm, 42 m) von kurzweiliger Einstrahlung Rg, Lufttemperatur Tair, Sättigungsdefizit der Luft VPD, Windgeschwindigkeit WS sowie durch Summen des Niederschlags P (Freifläche Wildacker, 1 m) an der Ankerstation (Winterhalbjahr Oktober bis März, Sommerhalbjahr April bis September). Minimum und Maximum der Reihen sind hervorgehoben.

Tab. 3: Characterization of the study period 1996 to 2010 in terms of mean daily values (tower, 42 m) of solar radiation Rg, air temperature Tair, vapor pressure deficit VPD, wind speed WS, and precipitation totals P (for the clearing 'Wildacker', 1 m) at the Anchor Station (Wi = winter half-year October–March, So = summer half-year, April–September). Minimum and maximum are indicated.

Jahre	Rg [MJ m ⁻² d ⁻¹]		Tair [°C]		VPD [hPa]		WS [m s ⁻¹]		P(Freiland) [mm]	
	Wi	So	Wi	So	Wi	So	Wi	So	Wi	So
96/97	4.8	16.7	2.5	13.7	1.6	5.5	3.4	3.1	295	385
97/98	5.0	15.5	3.5	14.0	2.0	5.3	3.8	3.2	378	458
98/99	4.6	16.2	2.5	14.8	1.6	5.8	3.8	3.0	490	435
99/00	4.3	16.7	3.0	14.7	1.4	6.3	4.0	3.0	504	333
00/01	4.8	15.2	4.1	13.6	2.0	5.2	3.4	3.2	334	479
01/02	5.3	15.4	3.9	14.6	2.1	5.3	3.8	2.9	420	625
02/03	5.0	17.8	1.8	15.7	1.5	7.8	3.3	3.0	437	230
03/04	5.0	16.0	2.5	13.8	1.7	5.5	3.7	3.1	359	419
04/05	5.2	16.5	2.5	14.3	1.6	6.0	3.6	2.8	487	428
05/06	5.3	17.1	1.5	15.3	1.4	6.7	3.4	2.9	399	359
06/07	5.2	17.0	6.0	15.0	1.9	5.6	3.8	3.0	396	506
07/08	5.2	16.6	3.5	14.3	1.7	5.2	3.5	2.8	383	430
08/09	4.8	17.4	2.7	15.4	1.5	6.0	3.2	2.9	403	427
09/10	5.2	16.0	2.0	14.0	1.6	5.4	3.2	2.9	408	665
Mittel	5.0	16.4	3.0	14.5	1.7	5.8	3.6	3.0	407	441
Jahreswert	10.7		8.8		3.8		3.3		848	

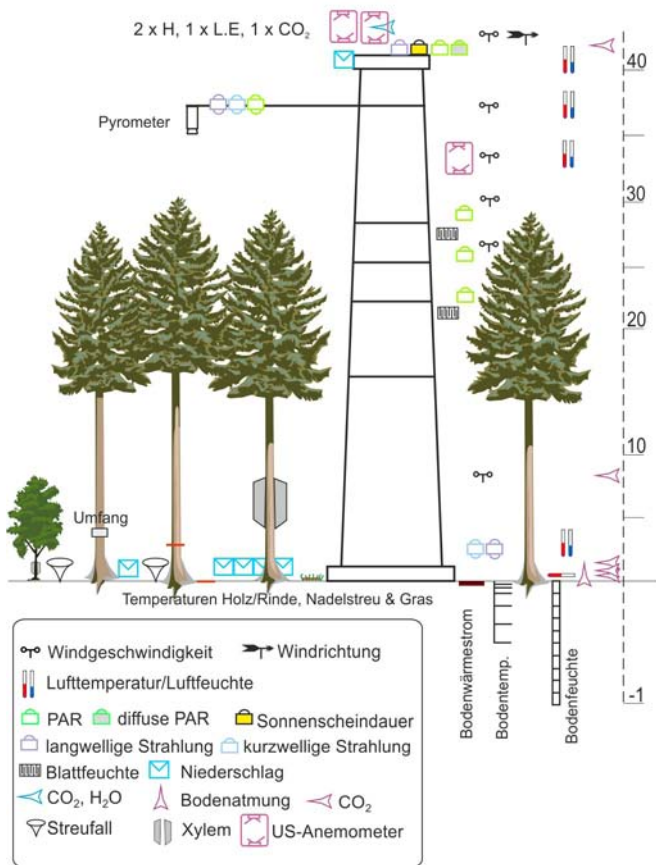


Abb. 1: Prinzipische Messanordnungen am Standort Ankerstation (Fichte) im Tharandter Wald, Stand 2010. Bildreihe rechts (von oben nach unten): Ultraschallanemometer in 42 m ü. Gr., Messmast mit oberster Messplattform und Strahlungsarm, Xylem-Saftflussmessungen und Dendrometermessungen, Doppelrinne (je 4 m lang) und Messfasser für den durchtropfenden Niederschlag, offene Bodengrube mit Bodenfeuchtemessfeld.

Fig. 1: Schematic of the measurements at the Anchor Station (spruce) in the Tharandt forest, as of 2010. Pictures at the right (starting at the top): Ultrasonic anemometer 42 m above ground, tower with topmost platform and radiation boom, xylem sapflow measurements and dendrometer measurements, double trough (length 4 m each) and measurement vessel for canopy drip, open soil pit with measurements of soil moisture.

Anwendungen der so gewonnenen Daten angegeben, für die das hier vorgestellte Messkonzept konzipiert ist. z. B. erlaubt die getrennte Messung der Verdunstungskomponenten Transpiration, Evaporation und Interzeption eine prozessgerechte Modellierung der Evapotranspiration und damit eine korrekte Berücksichtigung der Bestandesstruktur in einem Wasserhaushaltsmodell.

An der Ankerstation Tharandter Wald begannen die Flussmessungen mittels EC Ende März 1996; seit Herbst 1996 liegen durchgängige Reihen vor. Fehlende Werte (im Schnitt 8% der Einzelwerte) oder Zeiten mit geringer Turbulenz (vor allem nachts, 21% der Einzelwerte) wurden auf Halbstundenbasis nach anerkannten Verfahren ergänzt (GRÜNWARD & BERNHOFER 2007). Diese Daten stehen über Datenbanken (des 'Carbo-Europe Integrated Project' = CEIP und der globalen Initiative FLUXNET; siehe BALDOCCHI et al. 2001) zur Verfügung. Aus dieser Kooperation sind etwa 60 Publikationen mit einem Koautor aus dem Autorenteam dieses Artikels und etwa 150 andere Publikationen entstanden, die diese Daten nutzen (Stand 2010).

Durch das Interesse an der potentiellen Kohlenstoffsenske von Wäldern stehen heute global zahlreiche Standorte zur Verfügung, die vergleichbare Messungen durchführen (BALDOCCHI et al. 2001), wenn auch nur an wenigen über so lange Zeit und vor allem in der gleichen Komplexität. Diese Messungen sind die Grundlage für wichtige Untersuchungen zum globalen Kohlenstoff- und Wasserhaushalt (z. B. BEER et al. 2009, LASSLOP et al. 2010, TEULING et al. 2010).

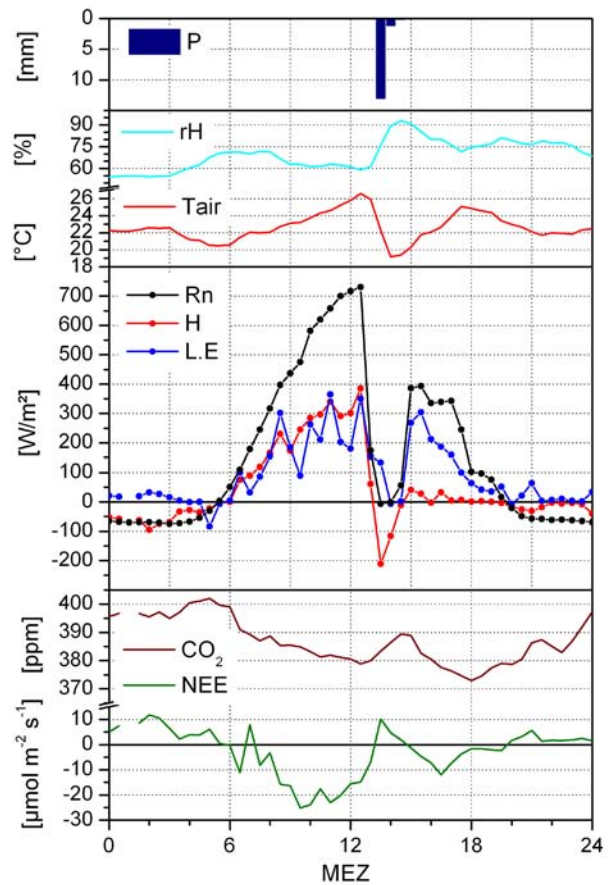


Abb. 2: Tagesgang der Energie- und Kohlenstoffflüsse und ihrer meteorologischen Einflussgrößen an der Ankerstation Tharandter Wald (Fichte), 4. Juli 1999.

Fig. 2: Diurnal course of energy and carbon fluxes and relevant meteorological drivers at the Anchor Station Tharandt (spruce), 4 July 1999.

Tab. 4: Messbasierte Standortinformationen (Fragestellungen, Messgrößen, Messmethoden und exemplarische Anwendungen), wie sie an der Ankerstation (Fichte) und der Station Buchhübel (Buche) gewonnen werden.

Tab. 4: *Measurement-based site information (objectives, measured quantities, measurement methods and example applications), as applied at the Anchor Station (spruce) and the Buchhübel Station (beech).*

Fragestellung	Teilaufgaben (gemessene Größe)	verwendete Messmethoden	Anwendung
Hintergrundinformation	Klimagrößen: R _g , T _{air} , VPD, WS, P, ...	Standardmeteorologie (Messstation auf Freifläche bzw. Messungen über der Krone)	Klimazuordnung, Modell- antrieb
Energieangebot	Strahlungsbilanz R _n	4 Komponenten- Pyrradiometer	Parameterbestimmung (Albedo); Modellanpassung, -validierung; Bestimmung der zur Verfügung stehenden Energie AE=R _n - G - J _i
	Bodenwärmestrom G	Bodenwärmestromplatten	
	Speicheränderung J _i	Profile (T _{air} , VP), Tempera- tur der Biomasse	
Wasserdargebot	Bestandesniederschlag	Regenrinne im Bestand	Bestimmung des zur Verfügung stehenden Nie- derschlagswassers AP=P _c + P _s = P - I
	Stammabfluss	Stammmanschetten	
Verdunstung	Gesamtverdunstung ET	Eddykovarianz EC: Ultra- schallanemometer mit H ₂ O-Gasanalyator	Direktmessung bei ausrei- chender Turbulenz (ca. 80% aller 30-min-Werte)
	Transpiration T	Xylemsaftfluss	Modellierung, Validierung pflanzenphysiologischer Modelle
	Interzeption I	I=P _c - P _s	Modellierung, Validierung von Interzeptionsmodellen
	Evaporation E(T) _s	TDR, Tensiometer	Bodenfeuchte- und Saugspannungsverlauf; Modellierung, Validierung Bodenwassertransport- modellen
Kohlenstoffhaushalt	Nettoprimärproduktion NEP bzw. Nettokohlenstoffhaus- halt NEE (NEP = - NEE)	Eddykovarianz EC: Ultra- schallanemometer mit CO ₂ -Gasanalyator	Direktmessung bei ausrei- chender Turbulenz (ca. 80% aller 30-min-Werte) inkl. Speicheränderung
		CO ₂ -Profile	
	Gesamtatmung TER	Bodenkammern, Modellie- rung aus EC bei Nacht	Modellierung, Validierung von Wachstumsmodellen; Vergleich mit Inventuren
	Bruttoprimärproduktion GPP	GPP= - NEE + TER	

3 Ergebnisse langjähriger Messungen

In diesem Abschnitt wird zunächst der Fichtenstandort mit seinen langjährigen Messungen betrachtet. Dabei soll die Dynamik und damit auch die Relevanz der Landoberflächen-Atmosphären-Wechselwirkung am Beispiel eines Tagesganges der Energie- und Stoffflüsse deutlich gemacht werden (Abschnitt 3.1). Danach werden die Jahressgänge (der Komponenten der Energie-, Wasser- und Kohlenstoffhaushalte) von Beispielsjahren dargestellt, um typische Reaktionen auf atmosphärische Antriebe (wie Trockenepisoden) zu zeigen (Abschnitt 3.2). Es folgt die Darstellung und statistische Analyse der Halbjahreswerte exemplarischer Bilanzkomponenten, um die zwischenjährliche Variabilität zu verdeutlichen (Abschnitt 3.3). Am Ende des Kapitels steht der Vergleich zwischen dem Buchen- und Fichtenstandort auf Basis der zwei exemplarischen Vegetationsperioden 2006 und 2007.

3.1 Tagesgänge

Die große zeitliche Auflösung der mikrometeorologischen Messungen erlaubt es, Landoberflächenprozesse detailliert nachzuvollziehen. In Abbildung 2 wird das beispielhaft anhand eines Gewitterdurchzugs demonstriert. Bis knapp nach 12:00 haben war der 4. Juli 1999 ein schöner Sommertag. Die Temperatur erreicht 26°C, die relative Feuchte ist um 60%, die Strahlungsbilanz übersteigt 700 W m⁻² und beide turbulenten Wärmeströme steigen in etwa parallel an (das Bowenverhältnis $\beta = H/L.E$ ist ca. 1). Der Nettokohlenstoffstrom aus der CO₂-Aufnahme erreicht fast -25 μmol m⁻² s⁻¹, die CO₂-Konzentration sinkt in der labil geschichteten Atmosphäre auf 380 ppm. Der Durchzug des Gewitters ändert alle Messdaten drastisch: Die Temperatur sinkt auf 19°C, die relative Feuchte steigt auf 90%, die Strahlungsbilanz ist für eine Stunde etwa 0 W m⁻². Der latente Wärmestrom kann zwar während des Gewitters

nicht zuverlässig bestimmt werden, danach erreicht er aber Werte wie vor dem Ereignis. Der fühlbare Wärmestrom kehrt sich um und ist jetzt zum Bestand gerichtet. Damit treibt die Zufuhr fühlbarer Wärme aus der Atmosphäre die Verdunstung (vor allem Interzeptionsverdunstung) an! Das Bowenverhältnis wird somit zunächst negativ, wird aber später (mit zunehmender Abtrocknung) leicht positiv. Der Nettokohlenstoffstrom (Summe aus CO₂-Aufnahme und Respiration) wird kurzzeitig positiv. Dabei steigt die CO₂-Konzentration in der stabil geschichteten Atmosphäre bis auf 390 ppm an. Danach beruhigt sich der Tag und der Nettokohlenstoffstrom erreicht gegen 16:00 Uhr noch -10 μmol m⁻² s⁻¹.

Das Beispiel zeigt die enorme kurzzeitige Dynamik in den Landoberflächen-Atmosphäre-Wechselwirkungen, die auch vom Typ der Landoberfläche selbst abhängt und z.B. bei einer Wiese deutlich anders ausfallen kann. Es macht deutlich, welchen Herausforderungen z.B. die Wettervorhersage gegenübersteht, wenn sie versucht, diese Rückkopplungen mit der Landoberfläche zu berücksichtigen. Eine Bildung von Ensemblesmitteln (wie in BERNHOFER et al. 2003) verwischt diese Zusammenhänge. Für die Beurteilung der langfristigen Lebensbedingungen von Wäldern ist jedoch die Statistik des Wetters und damit das Klima mit seinen Perioden, Trends und Extremen entscheidend.

3.2 Jahresgänge

Die täglichen Werte der Energiebilanzkomponenten werden im Jahresgang in Abbildung 3 für den Fichtenbestand und das Beispielsjahr 2006 dargestellt. Im Frühjahr und Herbst dominiert der latente Wärmestrom (β zwischen 0 und 1), im Sommer sind beide turbulenten Wärmeströme etwa gleich (β um 1) und im Winter wird die Energie für die Verdunstung fast ausschließlich aus dem fühlbaren Wärmestrom zur Verfügung gestellt (β negativ). Häufig handelt es sich dabei um eine ‚Interzeptionsoase‘: Der benetzte Bestand wird von relativ warmer Luft mit ausreichendem Sättigungsdefizit umspült und verdunstet trotz fehlendem Strahlungsangebot. Im Beispielsjahr 2006 ist außerdem deutlich eine Trockenperiode erkennbar, die Mitte Juni begann und Ende Juli endete. Die Verdunstungseinschränkung beginnt offenbar nach etwa 3 Wochen um den 192. Tag (11. Juli). In dieser Zeit ist das Bowenverhältnis deutlich über 1.

Der Jahresgang der Kohlenstoffflüsse ist in Abbildung 4 dargestellt. Nach einem langen Winter mit Schneedecke setzt erst im April 2006 die Nettokohlenstoffaufnahme ein, erreicht mit einer Monatssumme von ca. 100 g C m⁻² im Mai/Juni den Höhepunkt und geht im milden Herbst 2006 erst allmählich wieder auf Null zurück. Lediglich die Nettokohlenstoffbilanz der Wintermonate ist typischerweise negativ: Der Verlust

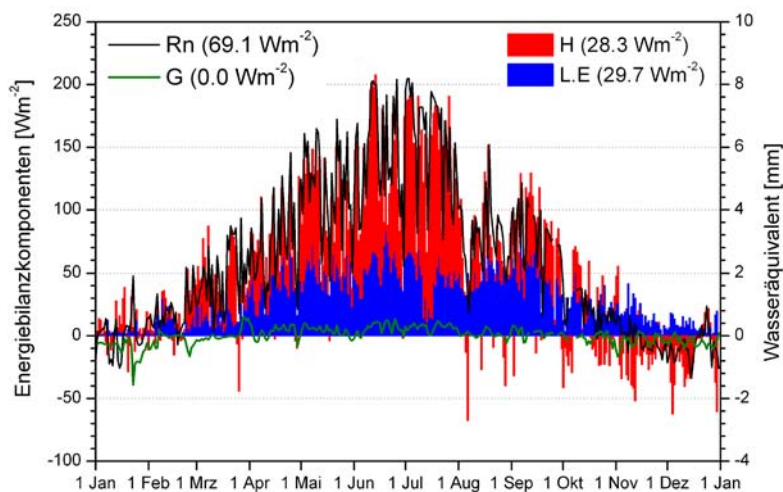


Abb. 3: Jahresgang der Tagesmittelwerte der Energiebilanzkomponenten und deren jährliche Mittelwerte an der Ankerstation Tharandter Wald (Fichte), Beispielsjahr 2006.

Fig. 3: Annual course of daily means of the energy budget components (including annual mean values) at the Anchor Station Tharandt (spruce), example year 2006.

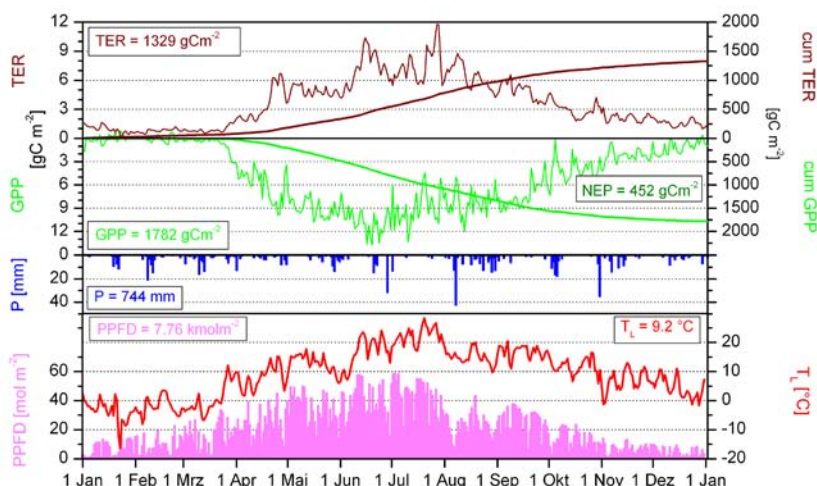


Abb. 4: Jahresgang der Komponenten des Kohlenstoffhaushaltes und ihrer meteorologischen Einflussgrößen an der Ankerstation Tharandter Wald (Fichte), Beispielsjahr 2006.

Fig. 4: Annual course of carbon budget components and relevant meteorological drivers at the Anchor Station Tharandt (spruce), example year 2006.

durch die Atmung übersteigt im Winter den geringen Gewinn an den wenigen Tagen mit ausreichendem Strahlungsangebot bei höheren Temperaturen. Klar ist zu erkennen, dass die Bruttoproduktion der Strahlung (Photosynthetic Photon Flux Density, PPFD) folgt, während die Atmung durch die Temperatur bestimmt wird. Auch der Rückgang der Produktion durch Wassermangel in der zweiten Julihälfte ist zu erkennen. Die Jahreswerte für NEP (Net Ecosystem Productivity), TER (Total Ecosystem Respiration) und GPP (Gross Primary Productivity) sind mit 500, 1300 bzw. 1800 g m⁻² typisch für den Fichtenbestand. Damit hat er im europäischen Vergleich eine mittlere bis hohe Kohlenstoffaufnahme (BERNHOFER et al. 2003).

3.3 Langjährige Variabilität

Die durchgängigen, lückengefüllten Reihen der Flüsse an der Ankerstation Tharandter Wald wurden nach Sommer- und Winterhalbjahr getrennt ausgewertet (Abb. 5). Typischerweise werden die Jahresbilanzen durch das Sommerhalbjahr vollständig dominiert. Die Nettokohlenstoffaufnahme zwischen Oktober und März ist nahe Null und der latente Wärmestrom erreicht etwa 30% des Wertes zwischen April und September. Der fühlbare Wärmestrom und die zur Verfügung stehende Energie AE sind im Winterhalbjahr jeweils etwa 15% der Werte des Sommerhalbjahres. Generell lässt sich der Jahreswert (Oktober–September) mit einer erklärten Varianz von ca. 80% – 95% aus dem Sommerhalbjahr ableiten, nur beim fühlbaren Wärmestrom ist die erklärte Varianz mit 45% deutlich niedriger. Die langjährige Variabilität ist trotz extremer Einzeljahre (z. B. Dürre 2003) oder Beeinflussung durch das Management des Standortes (Auflichtung 2002 im Fichtenbestand) gering. Jahreswerte von 570 g C m⁻² NEP, 440 mm

Verdunstung (mittlerer Energiefluss 35 W m⁻²) und 25 W m⁻² fühlbarer Wärmestrom (Wasseräquivalent 350 mm) sind typisch. Die geringste relative Streuung der Jahreswerte gab es bei AE mit ca. ±10 W m⁻² um den Mittelwert von 65 W m⁻² (Wasseräquivalent 830 mm).

Abbildung 5 verdeutlicht die unerwartete Stabilität der Flüsse aus den einzelnen Halbjahren und steht im Kontrast zur großen zwischenjährlichen Variabilität am landwirtschaftlichen Standort im gleichen Gebiet (PRESCHER et al. 2010). Gleichzeitig ordnen sich die beiden Sommerhalbjahre 2006 und 2007 gut in die 14-jährige Statistik ein, die später für den Vergleich mit dem Buchenstandort herangezogen werden. Damit kann der Nachteil der kurzen Reihe am Buchenstandort etwas kompensiert werden.

3.4 Vergleich zwischen buchen- und fichtendominierten Wäldern

Abbildung 6 zeigt den Vergleich der Wasserhaushaltskomponenten in der Vegetationsperiode zwischen Fichten- und Buchenstandort basierend auf gefilterten EC-Daten: 2006 ist die Gesamtverdunstung zwischen Mai und September an beiden Standorten mit 360 mm (Fichte) bzw. 340 mm (Buche) fast gleich, ähnlich verhält es sich 2007 mit 400 mm (Fichte) bzw. 370 mm (Buche). Die Transpiration (Krone plus Unterwuchs, inkl. Evaporation vom Boden) beträgt bei der Fichte etwa 55% der Gesamtverdunstung, der Rest ist Interzeption (Stammablauf bzw. Stammabsorption vernachlässigt). Mit ca. 170 mm allein zwischen Mai und September ist die Interzeption bei der Fichte eine bedeutende Wasserhaushaltsgröße. Bei der Buche beträgt die Transpiration etwa 70%, die Interzeption im gleichen Zeitraum nur 30% (etwas über 100 mm).

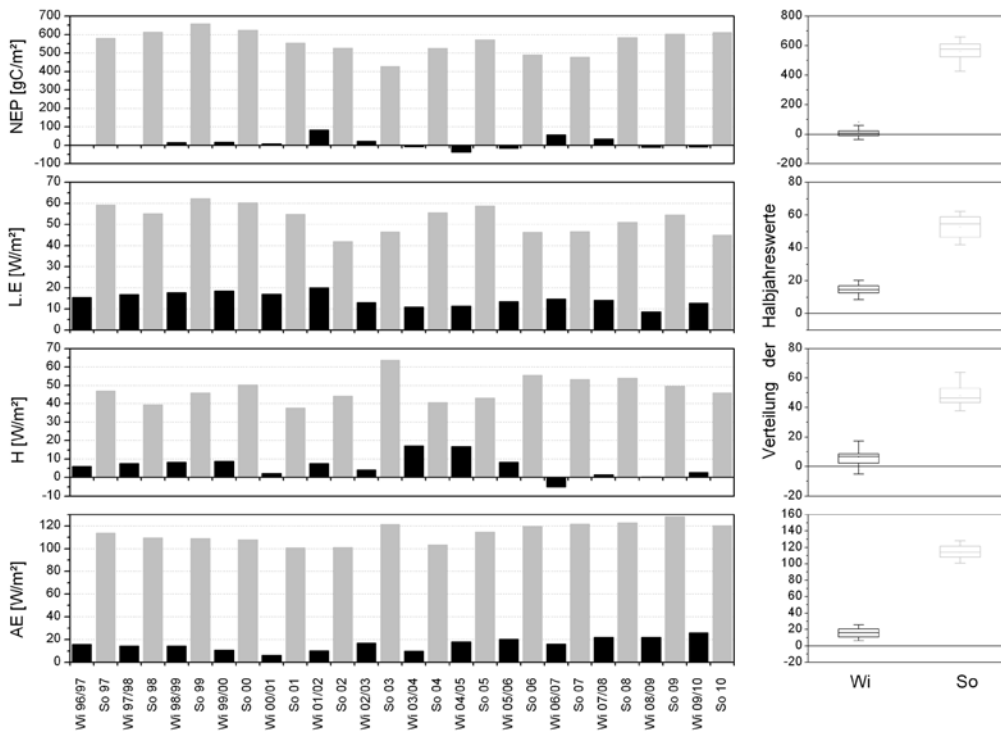


Abb. 5: Langjährige Variabilität der Energie- und Kohlenstoffhaushaltskomponenten in Halbjahresschritten (Winter: Oktober bis März, Sommer: April bis September) getrennt nach zur Verfügung stehender Energie AE (Nettostrahlung minus Speicheränderung), fühlbarem Wärmestrom H, latentem Wärmestrom L.E und C-Nettofluss NEP an der Ankerstation Tharandter Wald (Fichte).

Fig. 5: Long-term variability of the energy and carbon budget components for winter and summer half-years (winter: October–March, summer: April–September): available energy AE (net radiation minus storage), sensible heat flux H, latent heat flux L.E and net ecosystem production of C NEP at the Anchor Station Tharandt (spruce).

Nachdem in der laubfreien Zeit der Buche nur geringe Interzeptionsverluste auftreten, bleibt die mit 250 mm geschätzte jährliche Gesamtinterzeption des Buchenstandorts deutlich unter den ca. 350 mm beim Fichtenstandort zurück. Diese Unterschiede werden von den Messungen des Bestandniederschlags am Fichtenstandort (60% des jährlichen Freilandniederschlags von 800 mm; DOLMAN et al. 2003) und durch die Messungen der Transpiration (CLAUSNITZER et al. 2010) gestützt. Die ‚Strahlungsinterzeption‘ (die Abschwächung des Strahlungstransfers durch das Kronendach) beträgt bei den Buchen etwas mehr als 90% (8,5% werden durchgelassen) und bei den Fichten 80–90% (variabel, ja nach Parzelle). Im Gegensatz zur Interzeption beim Niederschlag lässt der Fichtenbestand also etwas mehr Strahlung als der Buchenbestand durch.

Die Gesamttranspiration am Fichtenstandort aus Eddykovarianz-Messungen ist allerdings mit ca. 210 mm in der Vegetationsperiode deutlich höher als der Wert von 150 mm aus den Xylem-Saftflussmessungen. Wir vermuten, dass dieser Unterschied durch den Beitrag des Unterwuchses und dem jüngerer Bestände in größerer Entfernung vom Messturm weitgehend erklärt werden kann. Am Buchenstandort wird die Interzeption durch die überragende Wirkung des Stammabflusses (ca. 200 mm im Jahr) vermindert, die Transpiration ist in der Vegetationsperiode höher als bei der Fichte (KÖSTNER & CLAUSNITZER 2011).

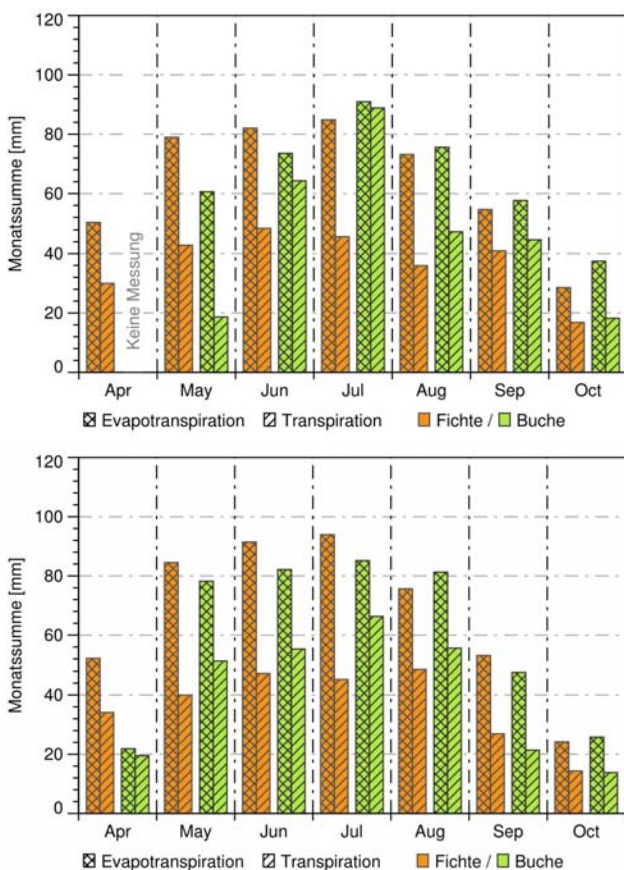


Abb. 6: Vergleich der Evapotranspiration und der Transpiration (aus EC-Daten abgeleitet) zwischen einem Buchen- und einem Fichtenbestand im Tharandter Wald (oben 2006, unten 2007).

Fig. 6: Comparison of evapotranspiration and transpiration (from EC data) between a beech and a spruce stand in the Tharandt forest (upper panel 2006, lower panel 2007).

Abbildung 7 zeigt den Vergleich der Komponenten des Kohlenstoffhaushaltes in der Vegetationsperiode zwischen Fichten- und Buchenstandort. Zunächst zeigen beide Standorte eine vergleichbare Gesamtatmung TER von 100 g C m⁻² (April, September und Oktober) bis ca. 250 g C m⁻² (Mai, Juni, Juli und August). Die Nettoaufnahme NEE ist in der voll belaubten Phase (Juni bis September) bei der Buche mit im Durchschnitt 100 g C m⁻² im Monat deutlich über dem Wert der Fichten mit 60 g C m⁻². In den strahlungsreichen Übergangsmonaten (April, Mai) beträgt NEE bei den Fichten ca. 100 g C m⁻², bei den Buchen ist der Wert bedeutend geringer. Im Oktober ist der Nettogewinn an C für beide Standorte bereits sehr gering.

Die Verteilung der Energie-, Verdunstungs- und Niederschlagsbilanz auf ihre jeweiligen Komponenten ist in Abbildung 8 für die Vegetationsperiode an beiden Standorten dargestellt. Es dominieren die Gemeinsamkeiten: Das Bowenverhältnis liegt knapp über 1, die Interzeption ist für fast 50% der Gesamtverdunstung verantwortlich und die Verdunstung vom Boden bzw. Unterwuchs für ca. 20%. Der verbleibende Teil von ca. 35% für die Transpiration (bestimmt aus den Xylem-Saftflussmessungen) ist erstaunlich niedrig, unterscheidet sich aber ebenfalls kaum zwischen Buchen und Fichten, wenn nur die aktive Periode betrachtet wird. Den größten Unterschied gibt es in der Verteilung des Niederschlags: Bei der Buche summieren sich ca. 40% Kronentraufe und knapp

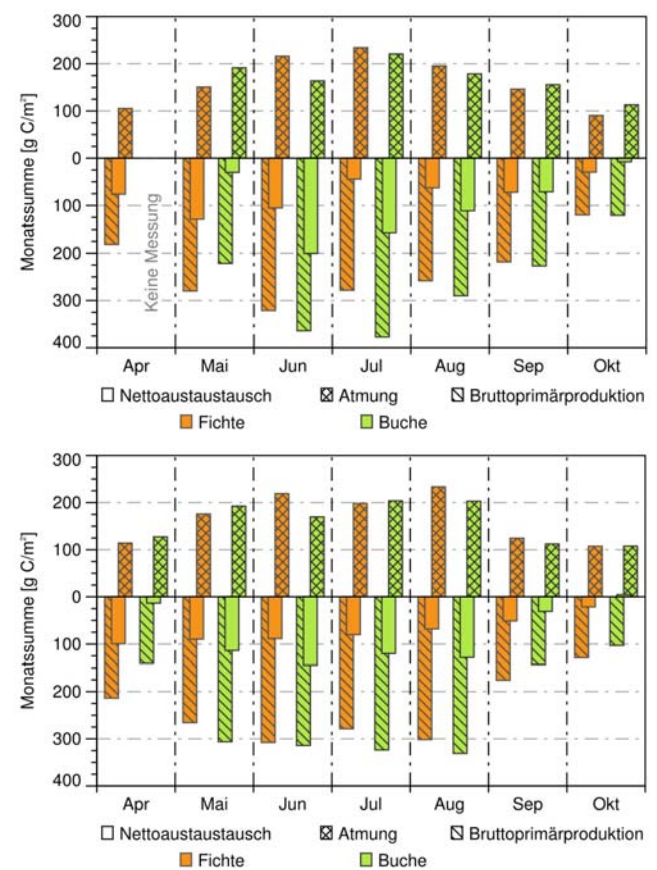


Abb. 7: Vergleich des Kohlenstoffhaushalts zwischen einem Buchen- und einem Fichtenbestand im Tharandter Wald (oben 2006, unten 2007).

Fig. 7: Comparison of the C budget between a beech and a spruce stand in the Tharandt forest (upper panel 2006, lower panel 2007).

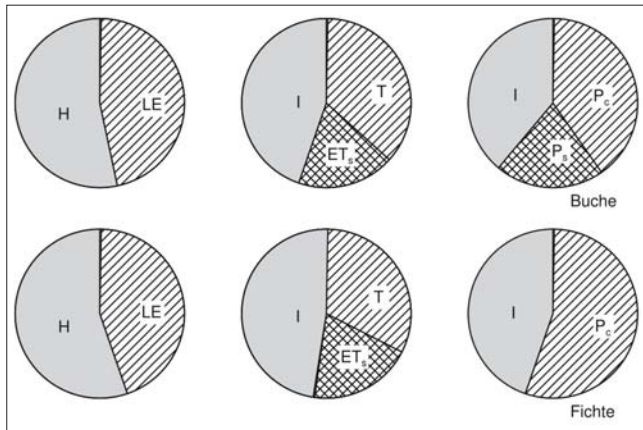


Abb. 8: Vergleich der Energie-, Verdunstungs- und Niederschlagsbilanz zwischen einem Buchen- und einem Fichtenbestand im Tharandter Wald (nach Mittelwerten der Sommerhalbjahre 2006 und 2007). Basis Strahlungsbilanz, Gesamtverdunstung aus EC-Messungen bzw. Freilandniederschlag am jeweiligen Standort; die Schließungslücke wurde über das Bowenverhältnis der turbulenten Wärmeströme geschlossen.

Fig. 8: Comparison of the energy, ET, and precipitation budget between a beech and a spruce stand in the Tharandt forest (average values of summer half-years 2006 and 2007). Based on net radiation, total ET from EC measurements and above canopy precipitation, respectively, at each site; the closure gap was closed by applying the Bowen ratio of the turbulent fluxes.

25% Stammabfluss zu etwa 65% Bestandesniederschlag, während der Bestandesniederschlag bei der Fichte (unter Vernachlässigung des Stammabflusses) nur ca. 55% des Niederschlages ausmacht. Relativ hohe Anteile der Interzeption im Vergleich zur Kronendachtranspiration wurden auch durch Untersuchungen auf größerer Raumskala (MATZNER et al. 2004) in mit Fichten bzw. Buchen bestockten Wassereinzugsgebieten bestätigt. Bei geringerer Strahlungsinterzeption kann die Buche also einen deutlich höheren Anteil des Niederschlages ihren Wurzeln zuführen.

Die Kohlenstoffbilanzen (siehe Abb. 7) zeigen für das Sommerhalbjahr eine ähnliche Verteilung von GPP auf ca. 30% NEP und 70% TER bei der Fichte bzw. auf ca. 35% NEP und 65% TER bei der Buche. Bei ähnlichen Werten von GPP auf 1600 g C m⁻² in der Summe von April bis September bedeutet das eine um ca. 60 g C m⁻² höhere Kohlenstoffaufnahme bei der Buche.

4 Schlussfolgerungen

Fichte ist immer noch die am weitesten verbreitete Nutzbaumart in Deutschland mit ca. 30%, der Anteil von Buchen von etwa 14% nimmt durch gezielten Umbau von Forsten aber zu. Buche wäre zudem die dominante Baumart in den meisten natürlichen Wäldern der Tieflandregionen Mitteleuropas, wo sie durch die Landwirtschaft und durch andere Baumarten weitgehend verdrängt wurde. Es ist daher gerade vor dem Hintergrund der sich verändernden Klimabedingungen wichtig, die funktionalen Unterschiede von Buchen und Fichten zu kennen. Der hier durchgeführte Vergleich hat bestätigt, dass der natürliche Konkurrenzvorteil der ‚ausgewachsenen‘ Buchen gegenüber ‚ausgewachsenen‘ Fichten in der sehr effektiven Nutzung der Strahlung ohne zu hohen Interzeptionsverlust

liegt. Die Kombination der hohen Strahlungsabsorption in der Krone (Lichtkonkurrenz) mit der Verringerung der Interzeption durch den Stammabfluss zu den eigenen Wurzeln (Wasserkonkurrenz) erlaubt der Buche eine höhere Kohlenstoffaufnahme, da sie am Anfang von Trockenperioden über einen höheren Bodenwasservorrat verfügen als Fichten.

Die Rolle der Ruhephase (hier definiert als Winterhalbjahr zwischen Oktober und März) in den Jahresbilanzen kann für die Fichte aus den 14-jährigen Messungen gut beantwortet werden. Für den Gewinn an Kohlenstoff ist dieser Zeitraum – unter dem derzeitigen Klima! – vernachlässigbar. Die Verdunstung und damit die Wiederbefeuchtung des Bodens nach einem trockenen Sommer werden aber durch die relativ hohe Interzeptionsverdunstung der Fichte – auch in der Ruhephase – stark beeinflusst. Unter der extremen Annahme, dass ein Buchenbestand in dieser Zeit nur Evaporation zulässt und dass die Abschätzungen der Interzeption aus dem Energiehaushalt des Fichtenbestandes richtig sind, stehen dem Buchenbestand bei gleichem Niederschlag etwa 150 mm mehr zur Verfügung, um das sommerliche Bodenwasserdefizit aufzufüllen. Dieser Unterschied zwischen Buchen- und Fichtenbeständen kann sich noch in der Vegetationsperiode des Folgejahres bemerkbar machen.

Modelle der Energie-, Wasser- und Kohlenstoffhaushalte von Wäldern sollten es erlauben, diese typischen Unterschiede im Jahresgang abzubilden. Einschicht-Modelle von Typ „Big Leaf“ sind nicht gut geeignet, diese komplexen Wechselwirkungen zwischen Transpiration, Interzeption und Evaporation aus Krone und Unterwuchs korrekt wiederzugeben. Gerade der relativ niedrige Anteil der Transpiration der Baumschicht – sowohl bei Buchen als auch bei Fichten – schränkt die Bedeutung der physiologischen Kontrolle für die Gesamtverdunstung ein. Gleichzeitig werden Informationen zur Dauer des Niederschlages und der Abtrocknung des Bestandes (und damit der Menge der Interzeptionsverdunstung) und die phänologischen Phasen wie Laubaustrieb und Laubfall wichtiger. Zur besseren Abbildung des Wasserhaushaltes müssen daher zumindest Zweischicht-Modelle verwendet werden, welche die Struktur (Krone und Stammraum) ausreichend wiedergeben. In diesem Heft werden von Koautoren dieses Beitrages Vorschläge gemacht, wie eine solche Modellierung für den Standortswasserhaushalt flächenhaft durchgeführt werden kann.

Die Struktur von Vegetation spielt aber auch in der Simulation des Klimas eine – nach Ansicht der Autoren - bis jetzt unterschätzte Rolle: Zur besseren Berücksichtigung der Landoberflächen-Wechselwirkungen in Klimamodellen müssen Landnutzungsschemata verwendet werden, welche der tatsächlichen Komplexität inklusive ihrer Dynamik (Phänologie!) nahekommen. Solche Wasserhaushaltsmodelle und Bestandesmodelle (Landnutzungsschemata) existieren, ihre dynamische Kopplung mit Klimamodellen ist aber weitgehend noch zu leisten.

Danksagung

Erhebung der Daten, Entwicklung der Methoden und Anwendung auf die Fragestellungen dieses Beitrages wurden einerseits über die Haushaltsfinanzierung der TU Dresden, andererseits über eine Reihe von Graduiierungsarbeiten sowie im Rahmen von zahlreichen Projekten gefördert. Dazu gehören insbesondere Förderungen durch die DFG (FE 504/2, BE 1721/13) und die Europäische Kommission (CE-IP GOCE-CT-2003-505572). Ohne eine solche Kombination von

langfristigem institutionellem Engagement und drittmittelgestützter Forschung ist der universitäre Betrieb dieser wichtigen Standorte der Umweltforschung nicht möglich. Dafür sei allen Verantwortlichen und ihren Institutionen gedankt!

Außerdem möchten wir uns für die Verwendung eines Messturmes des MPI Jena und für wertvolle Hinweise durch die beiden Gutachter herzlich bedanken.

Literatur

- AUBINET, M., GRELE, A., IBROM, A., RANNIK, Ü., MONCRIEFF, J., FOKEN, T., KOWALSKI, A. S., MARTIN, P., BERBIGIER, P., BERNHOFER, C., CLEMENT, R., ELBERS, I., GRANIER, A., GRÜNWALD, T., MORGENSTERN, K., PILEGAARD, K., REBMANN, C., SNIJDERS, W., VALENTINI, R., VESALA, T. (2000): Estimates of the annual net carbon and water exchange of European forests: the EUROFLUX methodology. *Advances in Ecological Research* **30**: 113-175.
- BALDOCCHI, D.D., FALGE, E., GU, L., OLSON, R., HOLLINGER, D., RUNNING, S., ANTHONI, P., BERNHOFER, CH., DAVIS, K., FUENTES, J., GOLDSTEIN, A., KATUL, G., LAW, B., LEE, X., MAHLI, Y., MEYERS, T., MUNGER, W., OECHEL, W., PAW U, C., PILEGAARD, K., SCHMID, H.-P., VALENTINI, R., VERMA, S., VESALA, T., WILSON, K., WOLFSY, S. (2001): FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapour and energy flux densities. *Bull. Amer. Meteor. Society* **82**: 2415-2435.
- BAUMGARTNER, A. (1956): Untersuchungen über den Wärme- und Wasserhaushalt eines jungen Waldes. Promotion, Universität München.
- BAUMGARTNER, A. (1967): Entwicklungslinien der forstlichen Meteorologie. *Forstw. Cbl.* **86** (3): 156-175.
- 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, C., AUBINET, M., CLEMENT, R., GRELE, A., GRÜNWALD, T., IBROM, A., JARVIS, P., REBMANN, C., SCHULZE, E.-D., TENHUNEN, J.D. (2003): Spruce forests (Norway and Sitka spruce, including Douglas fir): Carbon and water fluxes and balances, ecological and ecophysiological determinants. In *Ecological Studies Vol 163, Fluxes of Carbon, Water and Energy of European Forests* (R. VALENTINI ed.): 99-123.
- BERNHOFER, CH. (2002): Exkursions- und Praktikumsführer Tharandter Wald. Tharandter Klimaprotokolle **6**: 292p.
- CLAUSNITZER, F., KÖSTNER, B., SCHWÄRZEL, K., BERNHOFER, C. (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. Submitted to *Agric. Forest Meteorol.*
- DOLMAN, A.J., MOORS, E.J., GRÜNWALD, T., BERBIGIER, P., BERNHOFER, C. (2003): Factors controlling forest atmosphere exchange of water, energy and carbon. In: *Biospheric Exchanges of Carbon, Water and Energy of European Forests*. In: VALENTINI, R.(ed.): *Ecological Studies* **163**: 207-224.
- FEGER, K.H., SCHWÄRZEL, K., MENZER, A. (2008): Wasserhaushalt von Waldstandorten des Tharandter Waldes. Exkursionsführer. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* **111**: 221-250.
- FREER-SMITH, P.H., BROADMEADOW M.S. J., LYNCH, J.M., (eds): (2007): *Forestry and climate change*. CABI, U.K., ISBN: 9781845932947, 260 pp.
- FRÜHAUF, C. (1998): Methoden der Verdunstungsbestimmung am Beispiel eines hundertjährigen Fichtenbestandes im Tharandter Wald: 185 Seiten (ISBN 3-86005-212-8)
- GRANIER, A. (1987): Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiol.* **3**: 309-320.
- 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* **59B**: 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., CLAUSNITZER, F. (2011): Die Transpiration eines Fichten- und Buchenbestandes unter Bodentrockenheit im Tharandter Wald. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**: 29-35.
- LASSLOP, G., REICHSTEIN, M., PAPALE, D., RICHARDSON, A.D., ARNETH, A., BARR, A., STOY, P., WOHLFAHRT, G. (2010): Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach: critical issues and global evaluation. *Global Change Biology* **16**: 187-208.
- LEUNING, R., JUDD, M. (1996): 'The relative merits of open- and closed-path analysers for measurements of eddy fluxes'. *Global Change Biology* **2**: 241-253.
- 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**: 457-490.
- MAYER, H., HOLST, TH., SCHINDLER, D., (2002): Mikroklima in Buchenbeständen – Teil I: Photosynthetisch aktive Strahlung. *Forstw. Cbl.* **121**: 301-321
- MELLMANN, P., GRÜNWALD, T., FRÜHAUF, C., PODLASLY, C., BERNHOFER, C. (2003): Eine objektive Methode zur Erstellung eines repräsentativen Bestandesparametersatzes mit Hilfe der Quellflächen-Analyse für die Ankerstation Tharandter Wald. *Tharandter Klimaprotokolle* (ISSN 1436-5235), Band **8**: 29-54.
- MENZEL, A., ESTRELLA, N., TESTKA, A. (2005): Temperature response rates from long-term phenological records. *Climate Res* **30**: 21-28.
- PRESCHER, A.-K., GRÜNWALD, T., BERNHOFER, C. (2010): Land use regulates carbon budgets in eastern Germany: from NEE to NBP. *Agric Forest Meteorol.* **150**: 1016-1025.
- REYNOLDS, E.R.C., HENDERSON, C.S. (1967): Rainfall Interception by Beech, Larch and Norway Spruce. *Forestry* **40** (2): 165-183.
- SCHMIDT-VOGT, H. (1977): *Die Fichte*. Bd. 1, Parey, Hamburg & Berlin.
- SCHWÄRZEL, K., MENZER, A., SPANK, U., CLAUSNITZER, F., HÄNTZSCHEL, J., GRÜNWALD, T., KÖSTNER, B., BERNHOFER, CH., 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). *Agricultural and Forest Meteorology* **149**: 1994-2006.
- SPANK, U. (2010): Site Water Budget: Influences of Measurement Uncertainties on Measurement Results and Model Results. Dissertation, TU Dresden.

TEULING, A.J., SENEVIRATNE, S.I., STÖCKLI, R. REICHSTEIN, M., MOORS, E., CIAIS, P., LUYSSAERT, S., VAN DEN HURK, B., AMMANN, C., BERNHOFER, C., DELLWIK, E., GIANELLE, D., GIELEN, B., GRÜNWALD, T., KLUMPP, K., MONTAGNANI, L., MOUREAUX, C., SOTTOCORNOLA, M., WOHLFAHRT, G. (2010): Contrasting response of European forest and grassland energy exchange to heatwaves. *Nature Geosci.* **3**: 722-727.

submitted: 18.12.2010

reviewed: 04.04.2011

accepted: 28.04.2011

Autorenanschrift:

Prof. Dr. Christian Bernhofer, Dr. Thomas Grünwald,
Uwe Spank, Falko Clausnitzer, Uwe Eichelmann,
Dr. Barbara Köstner, Heiko Prasse
Professur für Meteorologie
Institut für Hydrologie und Meteorologie
Technische Universität Dresden
Pienner Straße 23
01737 Tharandt,
E-Mail: christian.bernhofer@tu-dresden.de

Prof. Dr. Karl-Heinz Feger, Alexander Menzer,
Dr. Kai Schwärzel
Professur für Standortslehre und Pflanzenernährung
Institut für Bodenkunde und Standortslehre
Technische Universität Dresden
Pienner Straße 19
01737 Tharandt
E-Mail: fegerkh@forst.tu-dresden.de