

WIND, LUFTTEMPERATUR UND KOHLENDIOXIDPROFILE IN EINEM FICHTENFORST WÄHREND DES WALDATEM-2003 SOMMEREXPERIMENTES

J. LÜERS, C. THOMAS, RUPPERT, T. FOKEN

Abteilung Mikrometeorologie, Universität Bayreuth, Deutschland

1 EINLEITUNG

Im Extremsommer 2003 wurde durch die Universität Bayreuth und das angegliederte Bayreuther Institut für terrestrische Ökosystemforschung (BITÖK) im Schwerpunkt der mikrometeorologischen Forschung das komplexe Wald-Grenzschicht Experiment WALDATEM-2003 (WAVELET Detection and Atmospheric Turbulence Exchange Measurements) durchgeführt. Die Feldkampagne fand in den Monaten Mai bis Anfang August 2003 an der internationalen Waldklima- und FLUXNET-Station GE1 Weidenbrunnen (50°08'53" N und 11°52'00" E, 775 m ü. NN) statt und ist Bestandteil intensiver Untersuchungen über die atmosphärischen Energie- und Stoffflüsse und von kohärenten Strukturen innerhalb und oberhalb eines Nadelwaldes. Der 32 m hohe Messturm der Station liegt nahe des Großen Waldsteins (877 m ü. NN) auf dem bewaldeten Höhenzug des Fichtelgebirges in einem rund 19 m hohen Fichtenforst.

Durch die Verwendung von schnellen und mittleren Messtechniken war es möglich, die atmosphärischen Flüsse und die Dynamik des Austausches zwischen Wald und atmosphärischer Grenzschicht übergreifend zu beobachten und auf verschiedenen zeitlichen Skalen zu erfassen und zu vergleichen.

Die vorliegende Arbeit wird auf die Auswertung der Experiment begleitenden zeitlich gemittelten meteorologischen Turmmessungen am Standort Weidenbrunnen eingehen. Eine Übersicht über das komplette WALDATEM-2003 Experimentdesign gibt Thomas et al. (2004). Die schnellen Messungen mit einer Probenahmefrequenz von 10 Hz bzw. 20 Hz (CO₂-Analytoren, Sonics) zur Detektion und zur Untersuchung dynamischer Eigenschaften kohärenter Strukturen über dem Fichtenbestand mittels Wavelet-Analyse werden bei Thomas und Foken (2004a, b) vorgestellt. Ergebnisse der aufwendigen Messungen (REA) der CO₂- und ¹³C-Isotopenflüsse im Waldökosystem während WALDATEM-2003 finden sich bei Ruppert et al. (2004).

2 METHODEN

Ergänzend zu den Routinemessungen am Standort Weidenbrunnen vor allem bezüglich der CO₂-Flussmessungen im FLUXNET-Netzwerk (Rebmann et al. 2004) und am 200 m entfernt liegenden Standort Pflanzgarten bezüglich der Erfassung von O₃, SO₂, NO_x am Messcontainer (Klemm und Lange 1999, Klemm et al. 2004) und ergänzend zu den langfristigen, klimatischen Untersuchungen einzelner Zeitreihen im Beobachtungsgebiet Fichtelgebirge/Bayreuth (Foken 2003 und Foken und Lüers 2003) wurden während WALDATEM-2003 die Vertikalprofilmessungen zur Erfassung der zeitlich auf 10 Minuten gemittelten Lufttemperaturen und Luftfeuchten durch zusätzliche Geber (Psychrometer nach Frankenberger) auf sechs Messhöhen im und über dem Waldbestand erweitert und seit Frühling 2004 ins Standardprogramm übernommen. Zur Abschätzung der Oberflächentemperaturen am Waldboden wurde zusätzlich der langwellige Strahlungsfluss in 4.6 m ü. G. im Stammraum bestimmt und mit einem Emissionskoeffizienten $\epsilon = 0.99$ in Temperaturen zurückgerechnet. Zur Messung horizontaler Windgeschwindigkeiten (10 min Mittel) im und über dem Bestand wurden sieben Schalensternanemometer (T. Friedrichs GmbH & Co., Windgeschwindigkeitsgeber 4034) in den Messhöhen 2 m, 10 m, 16 m, 18 m, 21 m, 25 m und 32 m ü. G. eingesetzt. Im Bereich der Kronenoberkante (19 m) wurden die Messhöhen enger gesetzt, um den entscheidenden Umkehrpunkt im Windprofil optimal auflösen zu können. Zur kontinuierlichen Bestimmung des Verlaufes der mittleren Kohlendioxidkonzentration in und über dem Wald wurden am Hauptturm in

den Messhöhen 0.03 m, 0.30 m, 0.90 m, 2.25 m, 5.25 m, 15.0 m, 21.6 m und 32.6 m ü. G. Gasansaugleitungen installiert, die an einen zentralen Gasanalysator (Li-Cor Inc., Li-820) angeschlossen wurden. Hier wurden die Messhöhen zur besseren Erfassung des starken bodennahen Vertikalgradienten in den ersten 6 m des Profils höher aufgelöst. Diese Profilanlage wurde an der Abteilung Mikrometeorologie selbst entwickelt. Die erfassten Datenreihen wurden routinemäßig einer täglichen, groben Online-Korrektur unterzogen und nach dem Experimentabschluss nach intensiver QA/QC und nach bestmöglicher Datenlückenschießung zur Auswertung freigegeben. Durch unterschiedliche Messhöhen und Höhengauflösung bei der synchronisierten Messung der Wind-, Lufttemperatur und Kohlendioxid-Profile bot sich eine einheitliche Interpolation der Zwischenwerte der jeweiligen Stützpunkte an. Zum Einsatz kam die Methode nach Akima (1970). Diese erlaubt eine Vermeidung typischer Interpolationsartefakte am unbekanntem Rand der eindimensionalen Vertikalprofile. Für die Interpolation der zeitlichen Zwischenwerte kam ein einfacher, symmetrischer Glättungsalgorithmus zum Einsatz. Mit diesem Vorgehen konnten räumlich und zeitlich kontinuierliche, zweidimensionale Datenmatrizen bzw. Diagramme und animierte Filmsequenzen der vertikalen Verteilung der entsprechenden meteorologischen Parameter im Fichtenforst für die Experimentlaufzeit gewonnen werden.

3 ERGEBNISSE

Die Ergebnisse der Auswertung der gemittelten Profile und der begleitenden meteorologischen Messungen während WALDATEM-2003 zeigen sowohl typische als auch außergewöhnliche mikrometeorologische Situationen und Effekte in einem Fichtenforst während einer – aufgrund der extrem heißen und trockenen Witterung 2003 – nicht typischen Sommerperiode.

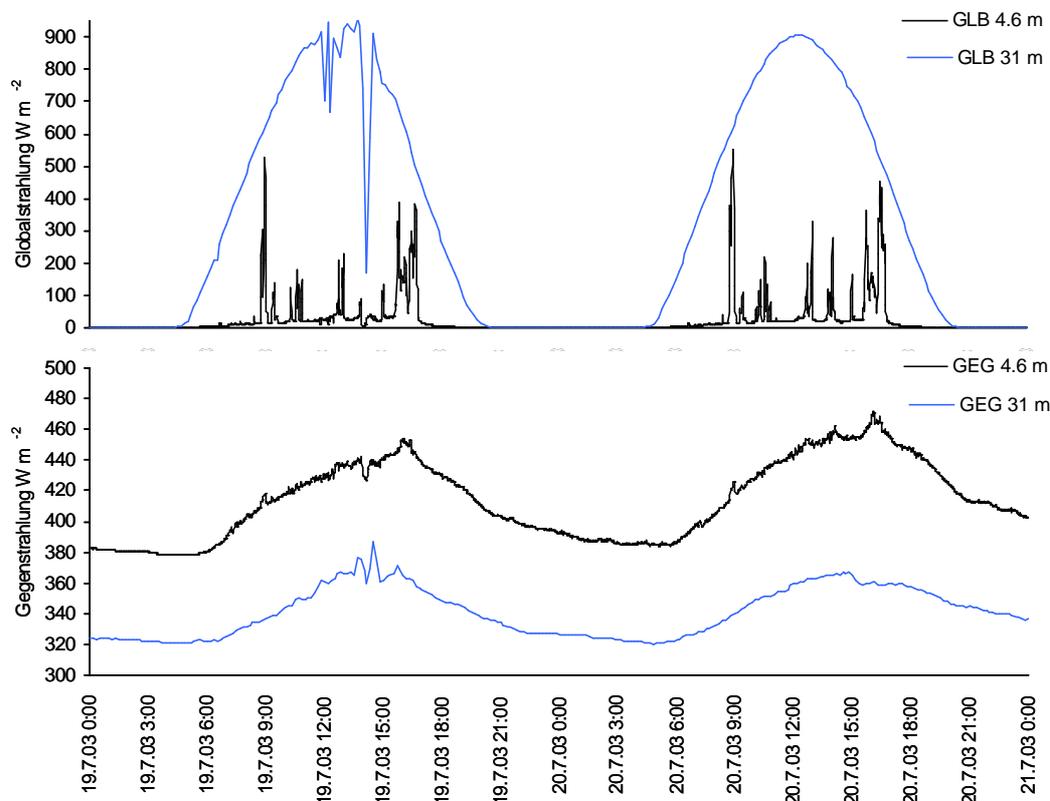


Abbildung 1: Kurzwellige (oben) und langwellige (unten) Strahlungsbedingungen, Messstandort Waldstein Weidenbrunnen (775 m ü. NN), WALDATEM-2003 Experiment, Zeitausschnitt 19. Juli und 20. Juli 2003. GLB = Globalstrahlung, GEG = Gegenstrahlung jeweils in $W m^{-2}$ in 4.6 m ü. G. (Stammraum) und in 31 m ü. G. (12 m über Kronendach).

Die Strahlung ist ein zentraler Parameter zur Steuerung physiologischer Vorgänge im Ökosystem. Die kurzwelligigen und langwelligigen Komponenten der Strahlungsbilanz wurden im und über dem Fichtenforst mittels Pyradiometern und Pyrgeometern bestimmt, die in den Höhen 4.6 m (Stammraum) und 31.0 m (12 m über Kronendach) am Hauptturm installiert waren. Durch den Vergleich der beiden unabhängigen Strahlungsmessungen konnten die stark unterschiedlichen Bestrahlungsverhältnisse im Bestand und darüber quantifiziert werden. Die Abbildung 1 zeigt exemplarisch anhand zweier herausgegriffener Tage (19. Juli und 20. Juli 2003) im kurzwelligigen Bereich eine mittlere Reduktion der Globalstrahlung im Stammraum am Standort Weidenbrunnen um rund 90 %. Weiterhin typisch für Beleuchtungsverhältnisse in einem Pflanzenbestand ist zum einen eine deutliche Verkürzung der Tageslichtzeit mit Globalstrahlungsbeträgen größer 10 W m^{-2} , die sich am Standort Weidenbrunnen im Juni/Juli morgens durch eine rund 3stündige Verzögerung (4:30 MEZ, 7:30 MEZ) und abends durch eine Vorverlagerung der Dämmerung von fast 2.5 Stunden (17:30 MEZ, 20:00 MEZ) bemerkbar macht. Zum anderen spielt der schnelle Wechsel zwischen hoher und niedriger Strahlungsintensität durch Fluktuation der so genannten „Sunflecks“ (Dauer und Intensität abhängig durch den „Gap Light Index GLI“, Whatley and Whatley, 1980) im Pflanzenbestand eine bedeutende Rolle beim Dargebot der PAR (Photosynthetisch Aktive Strahlung).

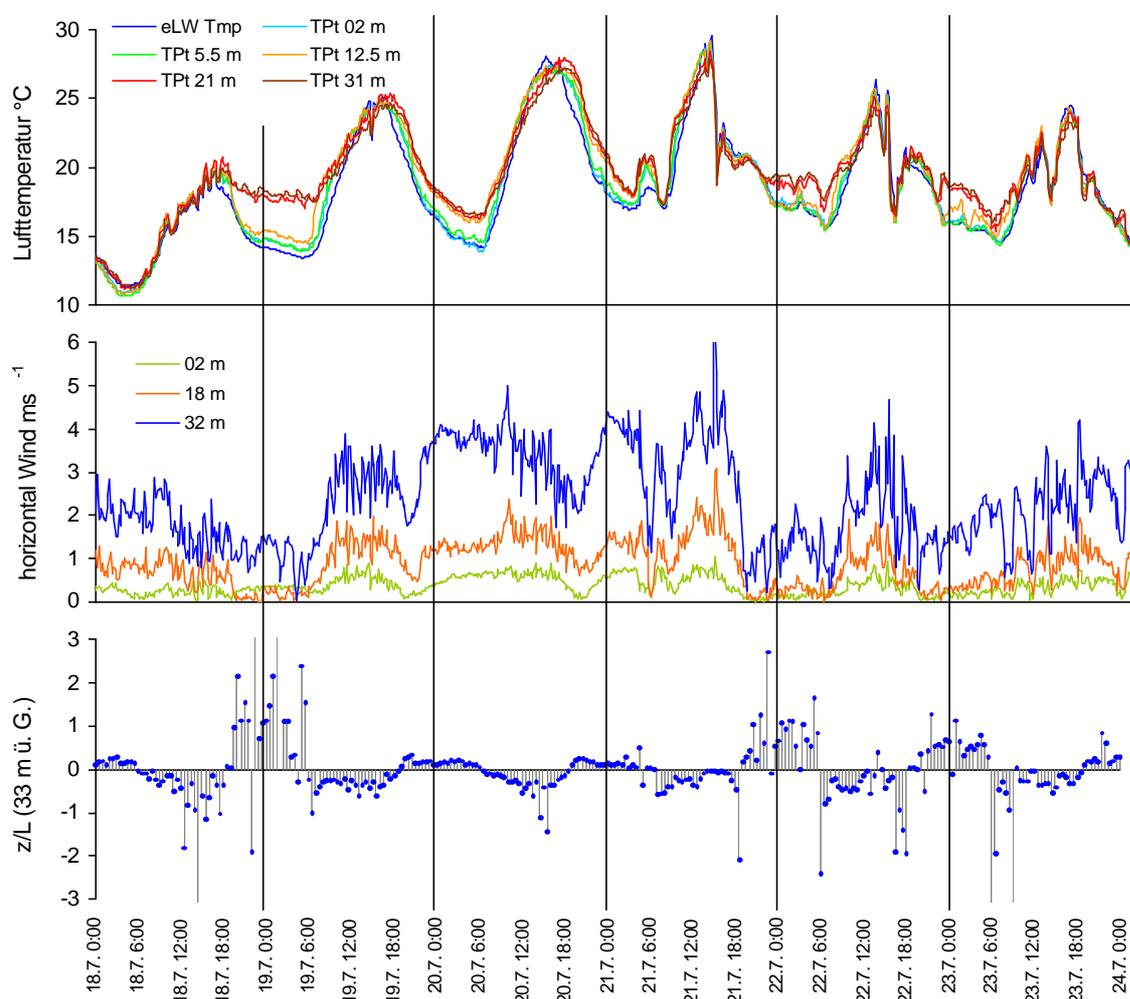


Abbildung 2: Korrigierte Zeitreihen am Messstandort Waldstein Weidenbrunnen (775 m ü. NN), WALDATEM-2003 Experiment, Zeitausschnitt 18. Juli bis 23. Juli 2003. Vertikalprofil der Lufttemperaturen (oben), eLWTmp = Temperatur langwellige Ausstrahlung ($\epsilon=0.99$), TPt = Trockentemperatur vent. Psychrometer in entsprechenden Höhen in Metern über Grund im und über dem Fichtenforst (Baumhöhe 19 m); horizontale Windgeschwindigkeiten (Mitte) im Bestand (2 m) im Kronenraum (18 m) und oberhalb Bestand (32 m); Stabilitätsbedingungen $\zeta = z/L$ (z = Messhöhe, L = Obukhov-Länge) gemessen auf 33 m Höhe über Grund.

Bemerkenswert ist der über den Monaten Mai, Juni und Juli recht konstante Offset von knapp 60 W m^{-2} beim Vergleich der Gegenstrahlung gemessen im Bestand und oberhalb der Baumkrone. Ein nicht unerheblicher Teil der langwelligen Energie bleibt durch die Gegenstrahlung des Kronendaches auch bei Ausstrahlungsnächten im Bestand erhalten.

Exemplarisch für eine typische sommerliche Situation wurden in Abbildung 2 die Tage vom 18. Juli bis 23. Juli 2003 ausgewählt. Die korrigierten und synchronisierten Zeitreihen der Lufttemperaturen und der horizontalen Windgeschwindigkeiten in verschiedenen Messhöhen und der Stabilitätsbedingungen über dem Bestand dargestellt als $\zeta = z/L$ ($z =$ Messhöhe, $L =$ Obukhov-Länge) zeigen das Beispiel für eine neuerliche Erwärmungsphase nach Durchzug einer kurzen, Regenschauer bringenden Kaltfront, die die voran gegangene Hitzeperiode nur am 17. Juli 2003 unterbrach. Vergleichend zur Abbildung 2 ist in Abbildung 3 der Temperaturverlauf im Wald durch eine zweidimensionale Interpolation der chronologischen Vertikalprofile der Lufttemperaturen aus sechs verschiedenen Messhöhen zusammenhängend dargestellt. In der Nacht zum 19.07. entwickelte sich zwischen 21 Uhr MEZ und 7 Uhr MEZ eine extrem starke Inversion innerhalb des Fichtenforstes aus, mit einer scharfen Grenze exakt im Kronenraum.

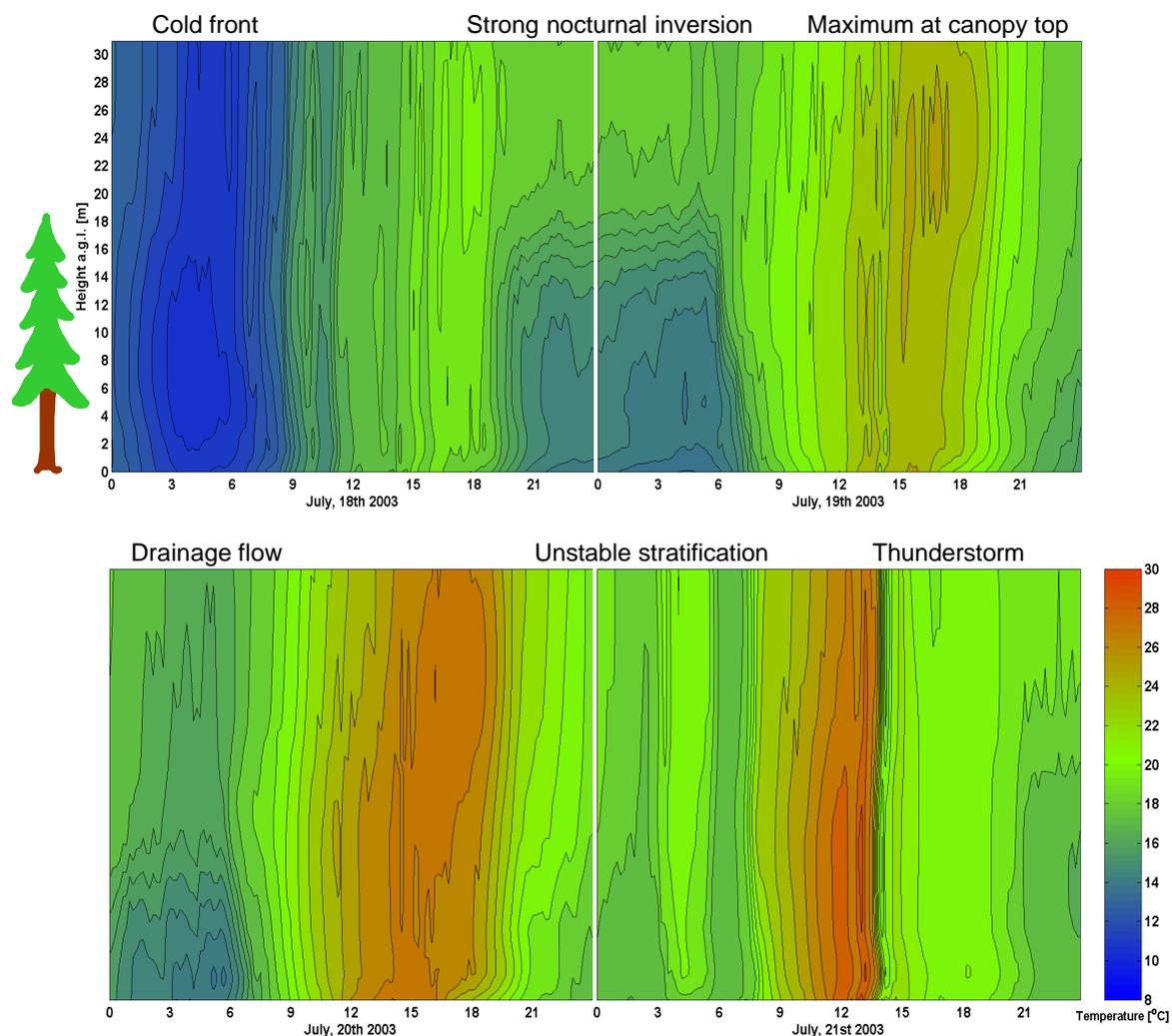


Abbildung 3: Chronologische Vertikalprofile (im Original 10 min Mittel sechs verschiedener Messhöhen) der Lufttemperaturen am Messstandort Waldstein Weidenbrunnen (775 m ü. NN), WALDATEM-2003 Experiment. Zeitausschnitt 18. Juli bis 21. Juli 2003. Zweidimensionale Interpolation der Zwischenwerte: vertikale Werteachse Interpolation nach Akima (1970), Zeitachse symmetrische Glättung. Höhe der Baumkronenoberkante 19 m.

Diese Differenzierung ist nicht nur im Temperaturprofil verfolgbar, sondern bestätigt sich auch durch deutlich stabile Bedingungen oberhalb der Baumkronen (Abbildung 2, unten) und höhere Windgeschwindigkeiten in 2 m ü. G. als direkt im Kronenbereich in 18 m ü. G. (Abbildung 2, Mitte). Solch eine starke Inversion (Temperaturdifferenz Stammraum zum Kroneninnern von über 4 K) kam während des Experimentes interessanterweise bevorzugt in einer Ausstrahlungsnacht nach einem kühleren Tag mit Schauerereignissen zustande. Am 19.07. und 20.07. lässt sich ein typischer mikrometeorologischer Effekt mit pflanzenphysiologischer Bedeutung verfolgen, wobei sich beginnend kurz nach Mittag bis in den Nachmittag (~18 Uhr MEZ) der Kronenbereich deutlich als Wärmeinsel im Profil abzeichnet. Bezeichnend ist das regelmäßige, recht abrupte Ende ab 18 Uhr MEZ, das sich anschaulich im merklichen Abflauen der Winde im ganzen Profil durchpaust und den scharfen Übergang von einer nachmittäglichen labilen in eine stabile Schichtung am Abend markiert (Abbildung 2).

Nicht jede Strahlungsnacht weist eine solche Entkoppelung zwischen der Luft im Bestand und der Atmosphäre oberhalb auf. Deutlich erhöhte Windgeschwindigkeiten (Abbildung 2, Mitte) in der Nacht zum 21.07. - möglicherweise durch orographisch geprägte (Kanalisation) Ausgleichsströmungen in tropisch warmen (20 °C) Nächten hervorgerufen - führen zu einer Auflösung der abendlichen Inversion und einer Durchmischung bis zum Waldboden.

Ein weiteres sommerspezifisches Phänomen mit nicht unerheblicher Wirkung auf das Waldökosystem konnte während des Experimentes mehrfach lückenlos messtechnisch dokumentiert werden. So zeigt der 21. Juli den abrupten turbulenten Einbruch in den Waldbestand durch ein heftiges, aber kurzlebiges Gewittersturmereignis am Nachmittag (zumeist pünktlich zwischen 13 Uhr und 15 Uhr MEZ) und - wiederholt im Extremsommer 2003 - mit anschließenden isothermen Bedingungen bei nächtlichen Temperaturen um 20 °C (tropische Nacht).

Das Beispiel in Abbildung 4 und Abbildung 5 vom 02. Juni und 03. Juni 2003 (heiße, sonnige Sommertage) soll ein typisches Muster im Tagesgang der Vertikalprofile der horizontalen Windgeschwindigkeiten im Fichtenforst am Weidenbrunnen während der Sommermonate näher erläutern. Wie bei den Temperaturprofilen und bei den Julitagen zuvor zeigen sich hier besonders deutlich die markanten Zeitpunkte am Abend (18 Uhr bis 19 Uhr MEZ) und am Morgen (7:00 Uhr bis 8:00 Uhr MEZ), die die Phasen überwiegend stabiler und labiler Zustände eingrenzen.

Der abendliche Zusammenbruch der dynamisch generierten Turbulenz und die beginnende Entkopplung verdeutlicht sich im Abflauen des Windes über das ganze Profil und nahezu windstille Bedingungen im Waldbestand über die erste Nachthälfte hinweg bis es im Mittel der relevanten Fälle erst kurz nach Mitternacht zu einer Ausbildung eines sekundären Windmaximums im Stammraum zwischen 2 m und 6 m kommt. In der Regel sind diese sekundären Maxima gebunden an das Auftreten der nächtlichen Temperaturminima am gleichen Ort und zur gleichen Zeit. Erst nach der zuvor beschriebenen Verzögerung von gut drei Stunden nach astronomischem Sonnenaufgang (gegen 4:30 Uhr MEZ) setzt sich die strahlungsforcierte atmosphärische Turbulenz gegen 7:30 Uhr MEZ bis zum Waldboden durch und führt zu einer rasch einsetzenden Kopplung und Durchmischung der Luftschicht im Bestandesinneren.

Bestätigung findet dieses Tagesgangmuster ebenfalls durch die Häufigkeitsanalyse der stabilen und labilen Einzelfälle bezüglich ihres Auftretens zu einer bestimmten Tageszeit. In Abbildung 6 links ist der mittlere Tagesgang stabiler Zustände in der Höhe der Turbulenzmessstation in 33 m aufgetragen, ein nahezu identisches Bild ergibt sich ebenfalls anhand der Turbulenzmessungen in 2.25 m ü. G. im Bestand.

Interessanterweise ist dieses Muster auffällig gebunden an großräumige Anströmungen aus Ost-südost (Sektor 105° bis 135°). Fast 30 % aller Windrichtungen bei einer stabilen Schichtung entsprechen diesem Sektor (Abbildung 6, rechts) und auch für die ausgewählte Situation vom 02. Juni und 03. Juni 2003 (Abbildung 5, unten) ergab sich eine beständige Anströmung aus Südost. Die restlichen Prozente verteilen sich gleichmäßig zu geringen Anteilen auf die übrigen Windrichtungssektoren.

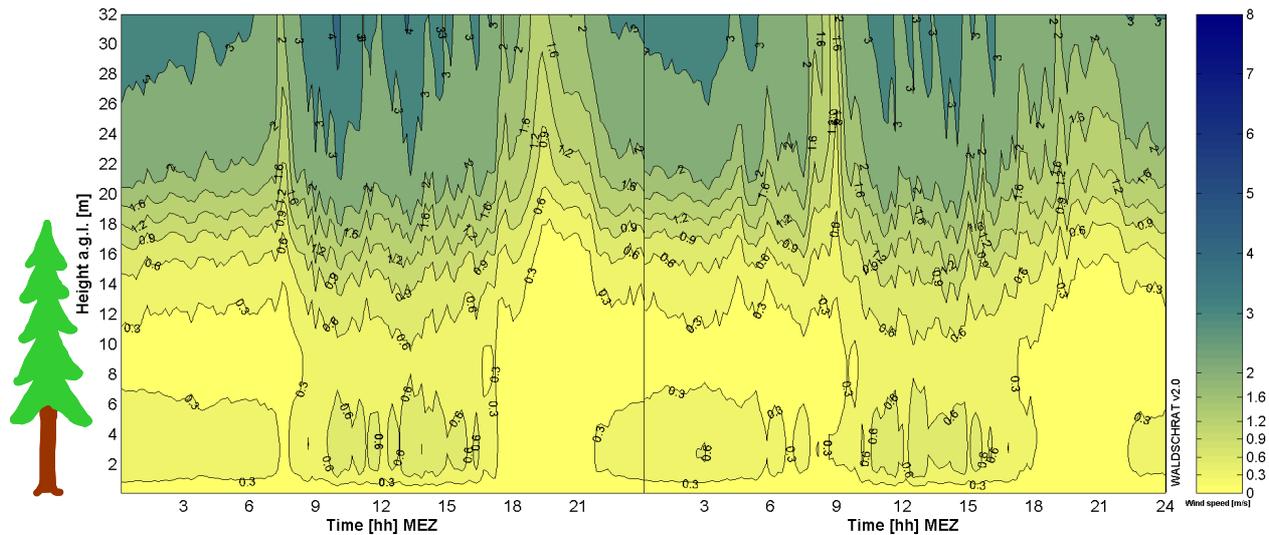


Abbildung 4: Chronologische Vertikalprofile (im Original 10 min Mittel sieben verschiedener Messhöhen) der horizontalen Windgeschwindigkeit (Schalensternanemometer) am Messstandort Waldstein Weidenbrunnen (775 m ü. NN), WALDATEM-2003 Experiment, Zeitausschnitt 02. Juni bis 03. Juni 2003. Zweidimensionale Interpolation der Zwischenwerte: vertikale Werteachse Interpolation nach Akima (1970), Zeitachse symmetrische Glättung. Höhe der Baumkronenoberkante 19 m.

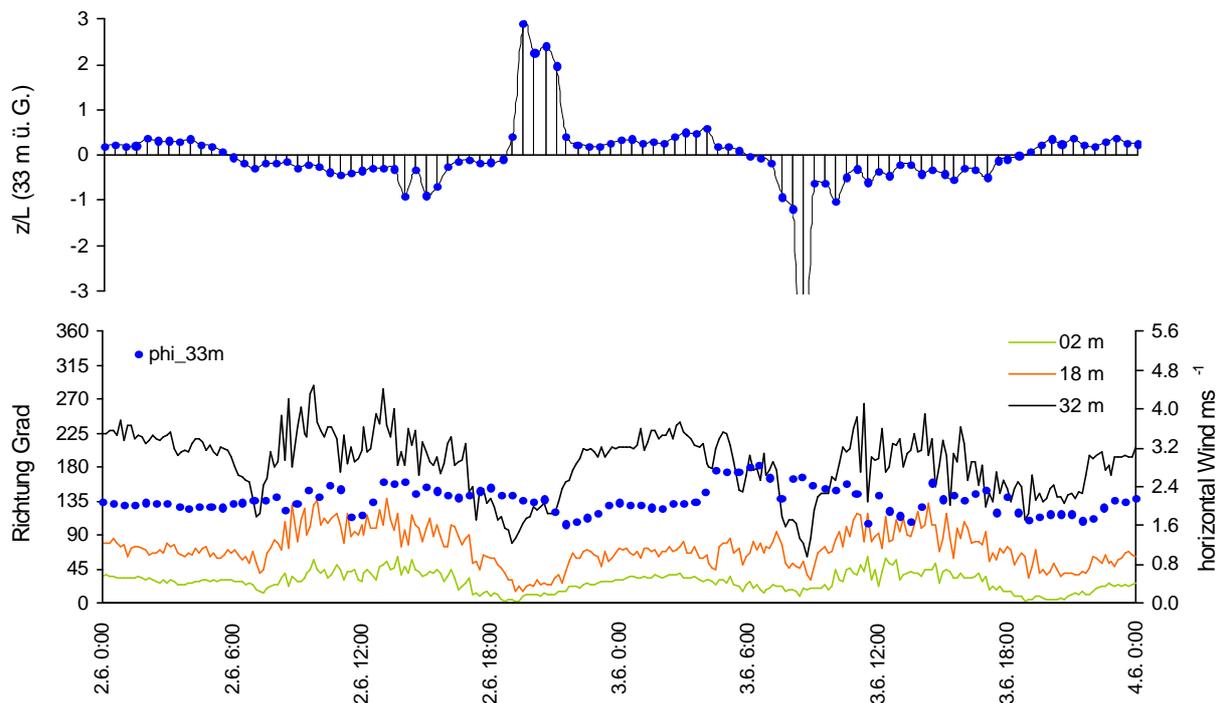


Abbildung 5: Korrigierte und synchronisierte Zeitreihen, Messstandort Waldstein Weidenbrunnen (775 m ü. NN), WALDATEM-2003 Experiment, Zeitausschnitt 02. Juni und 03. Juni 2003. Stabilitätsbedingungen $\zeta = z/L$ (z = Messhöhe, L = Obukhov-Länge) gemessen auf 33 m Höhe über Grund (oben), horizontale Windgeschwindigkeiten im Bestand (2 m) im Kronenraum (18 m) und oberhalb Bestand (32 m) und Windrichtung ϕ in 32 m (unten).

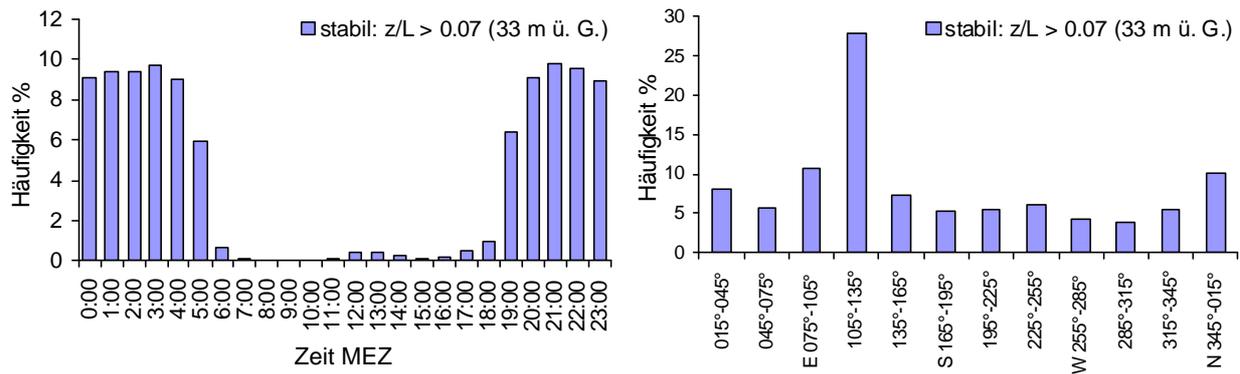


Abbildung 6: Häufigkeitsanalyse stabiler Situationen ($\zeta > 0.07$, z/L , z = Messhöhe, L = Obukhov-Länge) am Messstandort Waldstein Weidenbrunnen (775 m ü. NN), WALDATEM-2003 Experiment, Zeitausschnitt 21. Mai bis 31. Juli 2003. Links: Relative Häufigkeit stabiler atmosphärischer Schichtung oberhalb der Baumbestandes bezüglich der Tageszeit und rechts Vorkommen stabiler Lagen in Abhängigkeit der Windrichtung (zwölf 30° Sektoren) in 33 m ü. G.

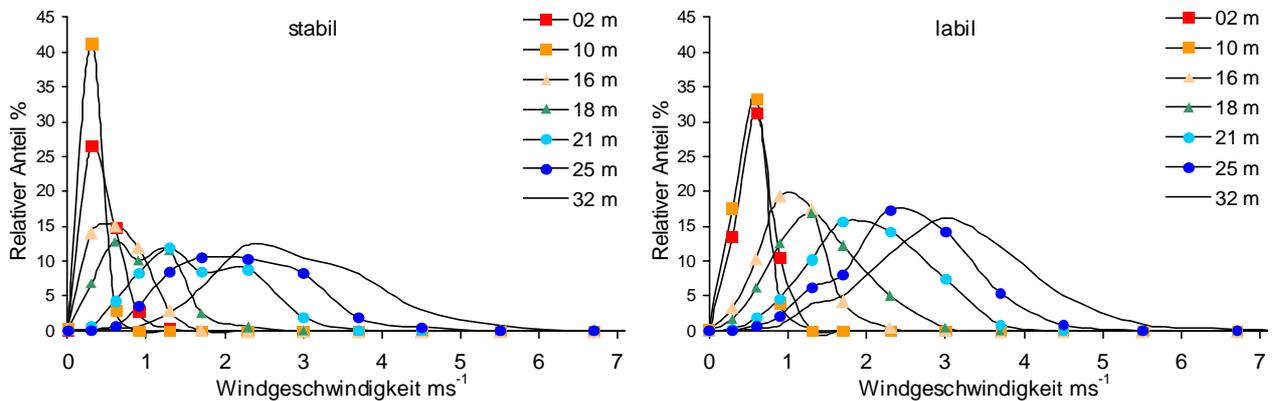


Abbildung 7: Spektrum der Windgeschwindigkeitsverteilungen in verschiedenen Messhöhen in Metern ü. G. und sortiert nach stabilen ($z/L > 0.07$) und labilen ($z/L < -0.07$) Bedingungen am Messstandort Waldstein Weidenbrunnen (775 m ü. NN), WALDATEM-2003 Experiment, Zeitausschnitt 21. Mai bis 31. Juli 2003. Höhe der Baumkronenoberkante 19 m.

Die in Abbildung 7 durchgeführte Analyse klassifiziert grob die je nach Messhöhe auftretenden Windgeschwindigkeiten in entsprechende Häufigkeitsspektren. Die Klasseneinteilung der Geschwindigkeiten entspricht einer logarithmischen Einteilung angelehnt an das über den Gesamtzeitraum gemittelte Windprofil. Im stabilen Fall bleibt das Spektrum der Windgeschwindigkeiten in 2 m und 10 m ü. G. eng begrenzt auf maximale Geschwindigkeiten kleiner 1.0 m s^{-1} , wobei - wie auch noch deutlicher bei einer Tag/Nacht Sortierung - auffällt, dass in Messhöhe 10 m (Stammraummitte) die geringsten Geschwindigkeiten auftreten. Im labilen Fall verschiebt sich das Spektrum der beiden unteren Messhöhen nur leicht Richtung höhere Geschwindigkeiten.

Deutlicher wird der Unterschied zwischen stabiler und labiler Lagen in den Messhöhen 16 m (unterer Kronenbereich) und 18 m (oberer Kronenbereich). Für die Messhöhen 21 m und 25 m (kurz oberhalb Kronenbereich) und schließlich für die Höhe 32 m nehmen die Anteile höherer Geschwindigkeiten und die Varianz der Werte erwartungsgemäß mit wachsender Entfernung zur Unterlage und stärkerer Labilität zu.

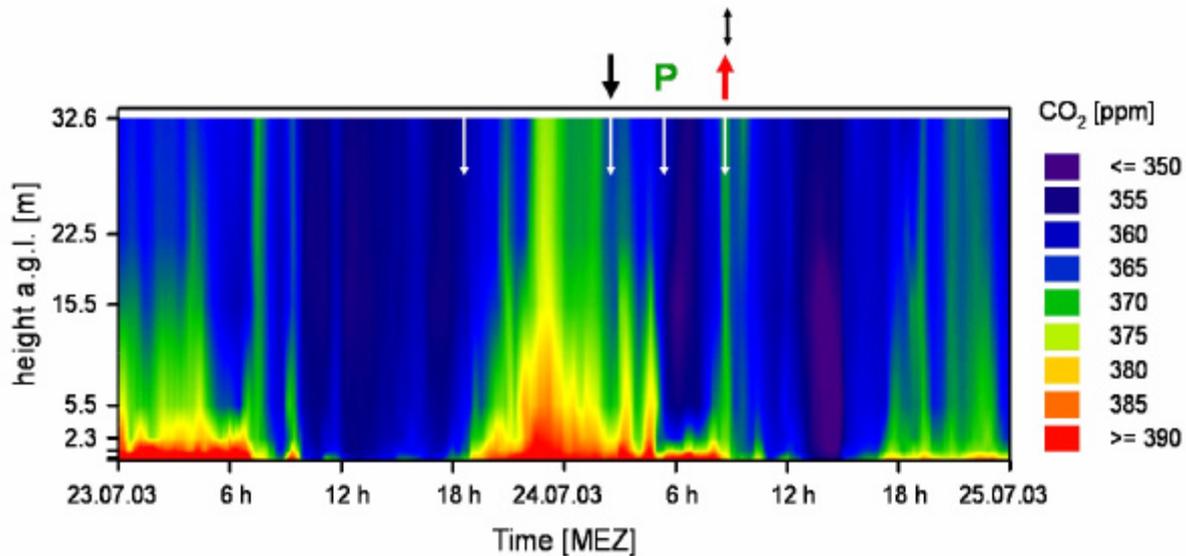


Abbildung 8: Chronologische Vertikalprofile (im Original 8 min Mittel acht verschiedener Messhöhen) der Kohlendioxidkonzentrationen in ppm (Gasanalysator Li-Cor LI-820,) am Messstandort Waldstein Weidenbrunnen (775 m ü. NN), WALDATEM-2003 Experiment, Zeitausschnitt 23. Juli und 24. Juli 2003. Die weißen Pfeile markieren entsprechende Zeitpunkte, der abwärtsgerichtete schwarze Pfeil markiert den Zeitpunkt eines nächtlichen Eintrages CO₂-armer, frischer Luft, der rote Pfeil den Zeitpunkt der morgendlichen Speicherentleerung unter gekoppelten (Doppelpfeil) Durchmischungsbedingungen. Das grüne P markiert den Zeitpunkt einsetzender Photosyntheseleistung der Waldpflanzen.

Als abschließendes Beispiel zeigt die Abbildung 8 den chronologischen Verlauf der Vertikalprofile der Kohlendioxidkonzentrationen am Messstandort Weidenbrunnen für die zwei Tage 23. Juli und 24. Juli 2003. Kohlendioxid ist ein wichtiger Indikator für physiologische Aktivitäten im Ökosystem. Neben den Kohlendioxidflussmessungen mittels der Ultraschallanemometer und der hochauflösenden Gasanalysatoren (Ruppert et al. 2004) wurde ein gemittelttes Vertikalprofil zur kontinuierlichen Bestimmung der Kohlendioxidkonzentration in und über dem Wald betrieben. Dazu wurden am Hauptturm in acht verschiedenen Höhen Gasansaugleitungen installiert und an einen zentralen Gasanalysator (LI-820, Li-Cor Inc.) angeschlossen. Diese Profilanlage wurde an der Abteilung Mikrometeorologie im Jahre 2003 selbst entwickelt und 2004 für einen schnellen, mobilen Einsatz erheblich weiterentwickelt.

In Übereinstimmung mit den vorherigen Beobachtungen zeigt sich nach der Entkopplung der Bestandschicht von der freien Atmosphäre und Ausbildung stabiler Bedingungen ab 18 Uhr MEZ eine nächtliche Anreicherung der bodennahen Luftschicht mit CO₂ produziert durch Atmungsprozess der Bodenorganismen. Nicht untypisch wird durch einen kurzen „Breakdown“ gegen 2:30 Uhr MEZ CO₂-arme, frische Luft in den Bestand eingemischt. Mit Start der Photosyntheseleistung der Bäume ab etwa 5:00 Uhr MEZ zeigt sich typischerweise eine sehr rasche Abnahme der Kohlendioxidkonzentrationen in der Kronenschicht, während in der bodennahen Schicht aufgrund der Verzögerung von drei Stunden die nächtlich angereicherten Kohlendioxidkonzentrationen erst gegen 8:30 Uhr MEZ durch einen plötzlichen Durchbruch aus dem Bestand gemischt werden (siehe weiterführend Ruppert et al. 2004).

DANKSAGUNG

Wir danken den Mitarbeitern des BITÖK (Bayreuther Institut für terrestrische Ökosystemforschung) der Universität Bayreuth für die tatkräftige Unterstützung der experimentellen Arbeiten. Unser besonderer Dank gilt Herrn Johannes Olesch und Herrn Gerhard Müller für ihren technischen Sachverstand und Einsatz ohne den das WALDATEM-2003 Experiment nicht möglich gewesen wäre. Das Experiment wurde gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung, Vertrag PT BEO51 - 0339476 D.

LITERATUR

- Akima, H (1970): A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures. *Journal of the ACM*, **17(4)**:589-602.
- Foken, Th Hrsg. (2003): Lufthygienisch-Bioklimatische Kennzeichnung des oberen Egertales. Bayreuther Forum Ökologie, **100**, 69+XLVIII.
- Foken, Th; Lüers, J (2003): Klimawandel in Oberfranken. *Terra Nostra*, **6**, 129-135.
- Klemm, O; Lange, H (1999): Trends of Air Pollution in the Fichtelgebirge Mountains, Bavaria. *Environmental Science & Pollution Research*, **6**, 193-199.
- Klemm, O; Mangold, A; Held, A (2004): Turbulent deposition of ozone to a mountainous forest ecosystem. In Matzner, E: *Ecological Studies, Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment: a case study in NE-Bavaria, Germany*. Springer Verlag, **172**.
- Rebmann, C; Anthoni, P; Falge, E; Göckede, M; Mangold, A; Subke, J-A; Thomas, C; Wichura, B; Schulze, E-D; Tenhunen, JD; Foken, Th (2004): Carbon budget of a spruce forest ecosystem. In Matzner, E: *Ecological Studies, Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment: a case study in NE-Bavaria, Germany*. Springer Verlag, **172**, 143-160.
- Ruppert, J; Thomas, C; Foken, Th (2004): CO₂- und ¹³C-Isotopenfluss für die Untersuchung der Dynamik des CO₂-Austausches zwischen Ökosystem und Atmosphäre. Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologen-Tagung, Karlsruhe, Germany. 7. bis 10. Sep. 2004 (pdf-Datei auf CD).
- Schröter, J; Ruppert, J; Delany, AC; Foken, Th (2004): Horizontale advective Einflüsse auf den CO₂-Austausch eines Fichtenbestandes. Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologen-Tagung, Karlsruhe, Germany, 7. bis 10. Sep. 2004 (pdf-Datei auf CD).
- Thomas, C; Ruppert, J; Lüers, J; Olesch, J; Bertolini, T; Mayer, JC; Schröter, J; Delany, AC and Foken, Th (2004): Komplexes Wald-Grenzschicht Experiment WALDATEM-2003. Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologen-Tagung, Karlsruhe, Germany. 7. bis 10. Sep. 2004 (pdf-Datei auf CD).
- Thomas, C; Foken, Th (2004a): Detection of long-term coherent exchange over spruce forest using Wavelet Analysis, *Theor. & Appl. Climatol.*, accepted.
- Thomas, C; Foken, Th (2004b): Untersuchung dynamischer Eigenschaften kohärenter Strukturen über einem hohen Fichtenwald mittels Wavelet-Analyse. Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologen-Tagung, Karlsruhe, Germany. 7. bis 10. Sep. 2004 (pdf-Datei auf CD).
- Whatley, JM; Whatley, FR (1980). *Light and Plant Life*. London: Edward Arnold (Publishers) Limited.