

DYNAMIK DES WIND- UND TEMPERATURPROFILS AN EINEM MITTELGEBIRGESTANDORT MITTELS SODAR-RASS

J.-C. MAYER, C. THOMAS und TH. FOKEN

Abteilung Mikrometeorologie, Universität Bayreuth, Bayreuth, Deutschland

1 EINLEITUNG

An einem Mittelgebirgsstandort wurden auf kontinuierlicher Basis Wind- und Temperaturprofile gemessen. Die Messung erfolgte fernerkundlich mittels eines SODAR-RASS. Ziel der Untersuchung war es, den Standort näher zu charakterisieren, sowie tageszeit- und windrichtungsabhängige Veränderungen der Profile zu erfassen. Die Datenauswertung umfasste sowohl den gesamten Zeitraum der Messungen, als auch gezielt bestimmte Ereignisse. Zur Sicherstellung der Qualität wurden Vergleiche mit den Messungen eines Ultraschallanemometers vorgenommen.

Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Erfassung der Mischungsschichtentwicklung gelegt. Die obere Begrenzung der Mischungsschicht manifestiert sich unter konvektiven Bedingungen als abgehobener Bereich erhöhter Reflektivität (Beyrich, 1997, Seibert et al., 1999). Die Beobachtung der Mischungsschichtentwicklung ist bis heute nicht automatisierbar, insbesondere nicht an komplexen Standorten (Coulter, 2003). Auch in der vorliegenden Arbeit wurde die Höhe der Mischungsschicht visuell aus den Profilen abgeleitet. Das Verhalten der nächtlichen stabilen Grenzschicht war ebenfalls Gegenstand der Untersuchung. Entkopplung vom großräumigen Windfeld sowie das Auftreten von Grenzschichtstrahlströmen (Low-Level-Jets) wird gezielt betrachtet.

2 EXPERIMENTBESCHREIBUNG

Alle in dieser Studie verwendeten Daten wurden während des Austausch-Experiments WALDATEM-2003 (WAVElet Detection and Atmospheric Turbulence Exchange Measurements) gewonnen (Thomas et al., 2004). Es fand von Mai bis Juli 2003 im Fichtelgebirge (NE-Bayern) in der Nähe des Großen Waldstein in einem Fichtenwald mit einer mittleren Kronenhöhe von 19 m statt. Das SODAR-RASS System wurde auf einer Waldlichtung (50°08'39''N, 11°52'00''E) von etwa 100 x 200 m Ausdehnung nahe der FLUXNET Station GE1 Waldstein/ Weidenbrunnen betrieben, die in einer Höhe von 765 m ü. NN liegt (Abbildung 1).

An der FLUXNET Station Weidenbrunnen wurden während Experiments Profilmessungen im und über dem Bestand mittels Ultraschallanemometern durchgeführt. Die oberste Messhöhe dieser Profilmessung in 33 m ü. G. wurde zur Ankopplung der SODAR Messungen herangezogen.

Zur Sondierung wurde ein SODAR-RASS System DSDPA.90/64 der Firma Metek eingesetzt. Dabei handelt es sich um ein monostatisches SODAR mit einer bistatischen 1290 MHz RASS-Erweiterung.

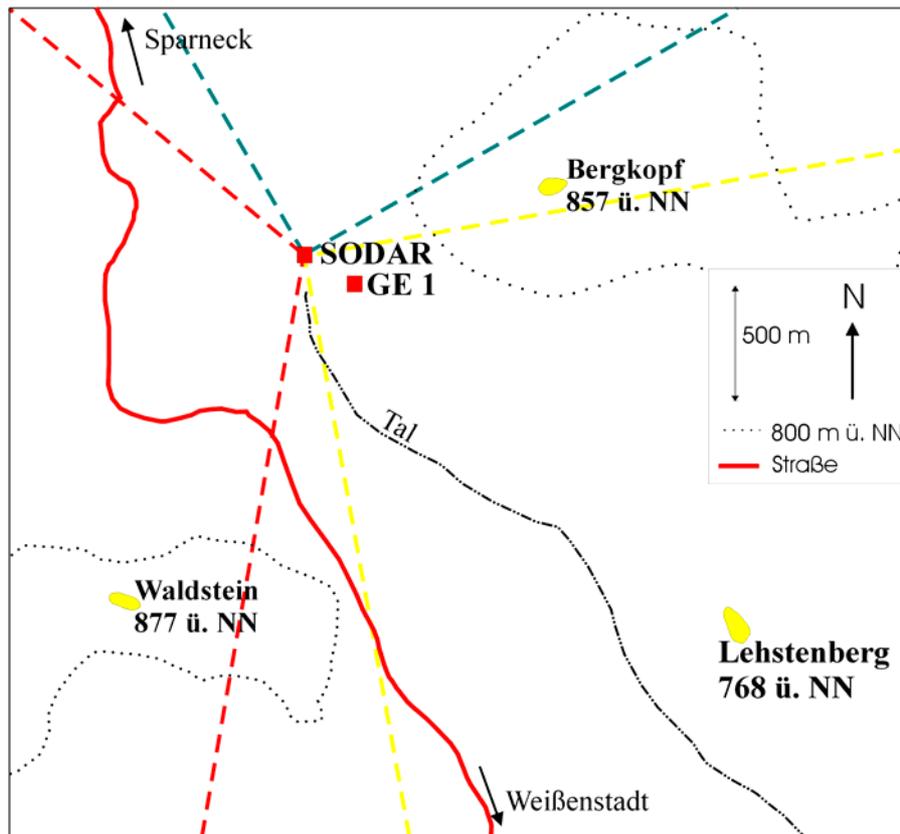


Abbildung 1: Schematische Karte des Waldsteingebietes mit Position des SODAR Systems sowie des Profils mit Ultraschallanemometern im Bereich der Station GE1. Des Weiteren sind die Grenzen der Anströmsektoren eingezeichnet. Sie ergeben sich aus der Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen. Die Grenzen liegen im Bereich der Minima dieser dreigipfligen Verteilung (Abbildung 3).

Die Einstellungen des SODAR-RASS Systems wurden dahingehend ausgewählt, eine möglichst große Reichweite und eine hohe Datenverfügbarkeit zu erreichen. Dabei mussten Störeinflüsse von den Lichtungsgrenzen vermieden werden. Durch umfangreiche Tests im Vorfeld des Experiments wurde die akustische Sondierfrequenz auf 1650 Hz festgelegt. Die vertikale Ausdehnung des Messbereichs lag zwischen 40 und 980 m ü. G. bei einer Höhenauflösung von 20 m. Ein Antennenlauf, d.h. eine komplette Messung, dauerte mit diesen Einstellungen rund 18 s.

3 DATENBEARBEITUNG

Das SODAR-RASS System lieferte als Ausgabe Mittelwerte über 5 Minuten sowie die ungemittelten Daten eines jeden Antennenlaufs. Als erster Bearbeitungsschritt wurden Fehlercodes, die das System zu jeder Messung mit ausgibt, ausgewertet. Die Fehlercodes geben Auskunft über wesentliche Merkmale des Rückstreupektrums und über das Signal-Rausch-Verhältnis. Zur weiteren Bearbeitung gelangten nur Daten, für die der Fehlercode gleich 0 war, d.h. keine Einschränkungen in der Datenqualität vorhanden waren.

Lücken innerhalb eines jeden Profils wurden mittels einer Akima-Interpolation gefüllt (Akima, 1970). Des Weiteren wurden die Profile räumlich geglättet. Dazu wurde ein gewichteter Glättungsfilter eingesetzt, welcher den aktuellen Wert mit 70 %, darüber und darunter liegende Werte mit je 15 % gewichtet. Als letzter Schritt wurde eine zeitliche Interpolation mit dem Verfahren von Akima angewendet, mit einer maximalen Interpolationsweite von zwei Zeitschritten, also insgesamt 10 Minuten. Aus diesen Daten wurden 10- und 30-Minuten Mittelwerte berechnet.

4 ERGEBNISSE

Bei einem vertikalen Messbereich von 40 m bis 980 m ü. G. und einer Höhenauflösung von 20 m wurde eine Verfügbarkeit der Daten von mehr als 50 % bis in eine Höhe von 360 m ü. G. erreicht (siehe Abbildung 2). Die Abnahme der Datenverfügbarkeit mit der Höhe liegt in der Absorption des Schalls in der Atmosphäre begründet. Dadurch wird mit zunehmender Höhe häufiger kein verwertbares Signal mehr erhalten. Die Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen in einer Höhe von 40 m ü. G. zeigte eine dreigipflige Struktur, mit Maxima bei 30°, 120° und 270° (Abbildung 3). Diese Verteilung entspricht den Ergebnissen, die mit dem Ultraschallanemometer der Profilmessungen (siehe Thomas und Foken, 2004) in 33 m ü. G. ermittelt wurden. Aus dieser Verteilung wurden für die weiteren Auswertungen drei Hauptsektoren abgegrenzt. Der Südost-Sektor von 80° bis 170°, der West-Sektor von 190° bis 310° und der Nordsektor von 330° bis 60°.

Ein Vergleich der Zeitreihen des Horizontalwindes und der Windrichtung von Messungen mittels Ultraschallanemometer und SODAR zeigt eine gute Übereinstimmung. Die mittlere Abweichung zwischen den beiden Messsystemen liegt bei 3,5° für die Windrichtung und 0,2 m s⁻¹ für die horizontale Windgeschwindigkeit. Die hohe Korrelation erlaubt es, die Messdaten der Eddy Kovarianz Station als Referenz zur Überprüfung der SODAR RASS Ergebnisse heran zu ziehen.

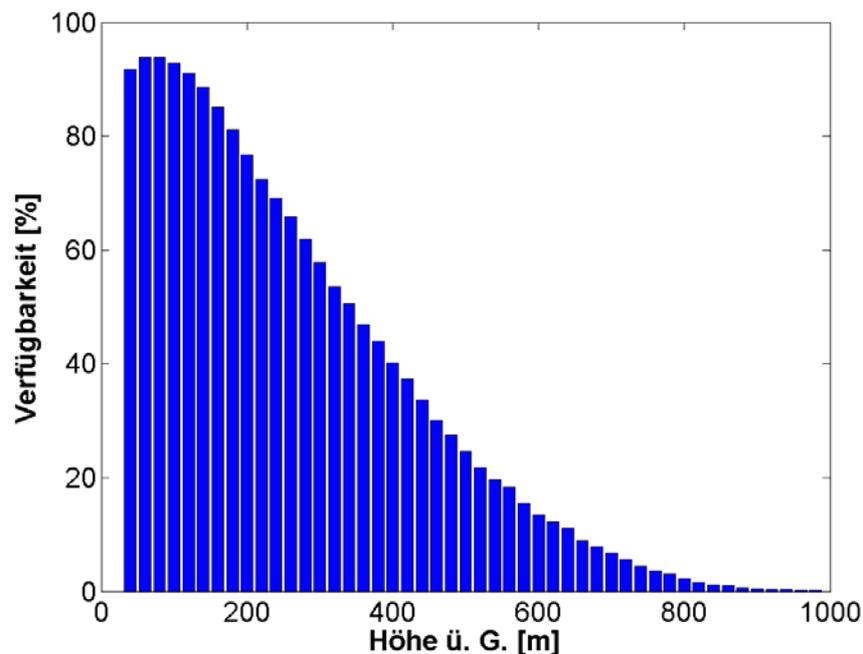


Abbildung 2: Relative Verfügbarkeit der SODAR RASS Daten vom 15. Mai bis 16. Juli 2003. Es wurden insgesamt 6367 Profile mit 5 min Auflösung gemessen.

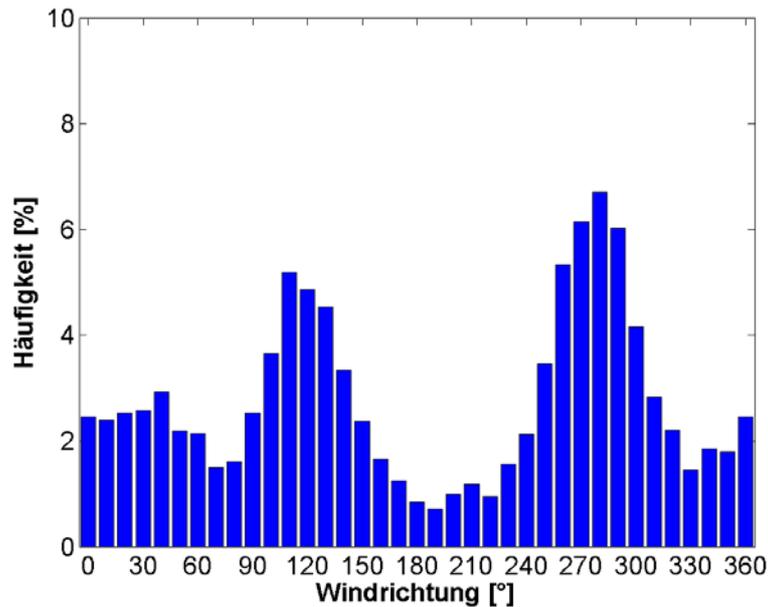


Abbildung 3: Relative Häufigkeit der Windrichtungen in einer Höhe von 40 m ü. G. im Zeitraum 15. Mai bis 16. Juli 2003.

Betrachtet man die einzelnen Sektoren und die korrespondierenden Bedingungen in der Höhe, so ergibt sich folgendes Bild: Bei bodennaher Anströmung aus dem SE-Sektor liegen in 600 m ü. G. südliche bis westliche Windrichtungen vor. Das bedeutet, dass der Wind bei Annäherung an den Boden eine Drehung gegen den Uhrzeigersinn vollführt. Die Drehung liegt im Mittel über alle Zeiten mit bodennaher Südostströmung bei ca. 80°. Bei bodennaher Anströmung aus dem W-Sektor ist nur eine schwache Windrichtungsänderung mit der Höhe zu erkennen. Die Winddrehung mit der Höhe für den SE- und den W-Sektor sind in Abbildung 4 dargestellt. In den mittleren Windprofilen ist für den SE-Sektor eine deutliche Störung im Vergleich zum W-Sektor zu erkennen. In 100 m bis 200 m ü. G. ist bei südöstlicher Anströmung in den Nachtstunden häufig ein leichtes Windmaximum zu finden.

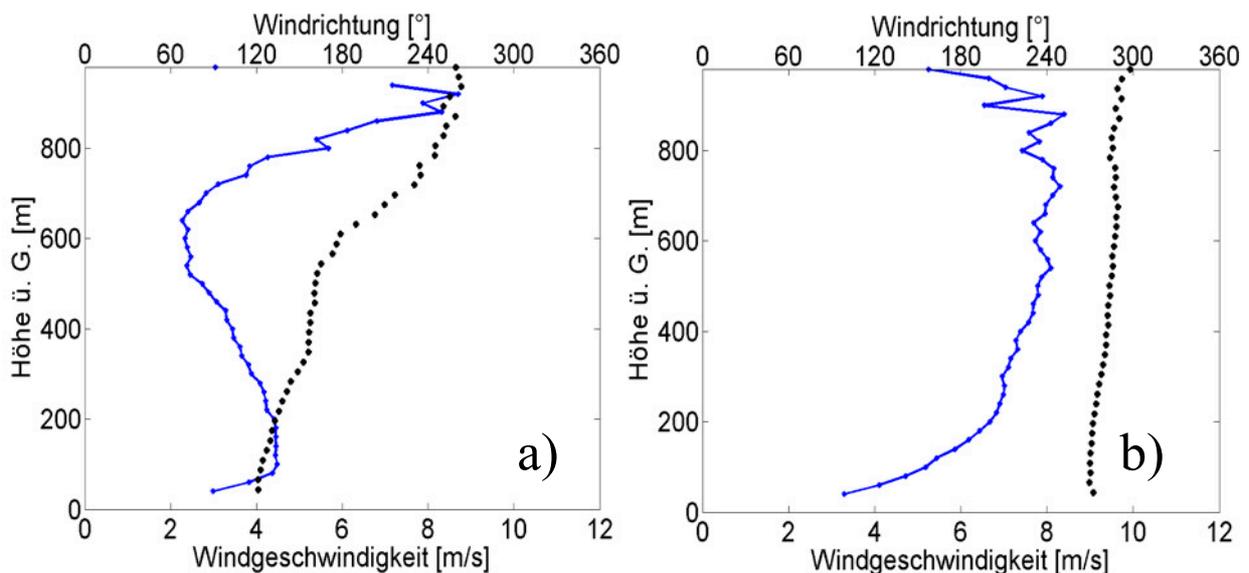


Abbildung 4: Mittlere Profile des Horizontalwindes und der Windrichtung über den gesamten Experimentzeitraum bei bodennaher Anströmung aus dem SE-Sektor (a) und aus dem W-Sektor (b). Die durchgezogene, blaue Linie zeigt horizontale Windgeschwindigkeiten, die schwarzen Punkte die Windrichtung.

Bei bodennaher Anströmung aus dem N-Sektor (nicht gezeigt) liegen in 600 m ü. G. überwiegend nordwestliche Windrichtungen vor. Somit kommt es zu einer Winddrehung im Uhrzeigersinn bei Annäherung an den Boden. Einige Zeiträume mit diesen Anströmbedingungen werden noch eingehender betrachtet.

Wählt man die bodennahen Anströmsektoren als Referenz, und betrachtet die zugehörige Verteilung der Windrichtung und -geschwindigkeit in der Höhe, so ergibt sich für die einzelnen Sektoren ein deutlich unterschiedliches Verhalten (siehe Abbildung 5). Bei bodennaher Anströmung aus dem W-Sektor verlagert sich der Mittelwert der Anströmrichtungen nur schwach von westlichen auf nordwestliche Richtungen, die Bandbreite der Anströmrichtungen ist in der Höhe kaum breiter als in 40 m ü. G. Die horizontalen Windgeschwindigkeiten nehmen allerdings deutlich zu und liegen meist über 6.0 m s^{-1} . Anders ist die Situation bei bodennaher SE-Anströmung. Hier überwiegen zur gleichen Zeit in der Höhe südliche bzw. südwestliche Windrichtungen. Die horizontalen Windgeschwindigkeiten sind dabei in der Höhe nicht generell größer als bodennah, und liegen größtenteils unterhalb ca. 6.5 m s^{-1} . Bei bodennahem Wind aus dem N-Sektor liegen in der Höhe überwiegend Nordwest-Strömungen vor, mit meist nicht mehr als 6 m s^{-1} horizontaler Windgeschwindigkeit.

Der mittlere Vertikalwind in 40 m ü. G. zeigt eine deutliche Richtungsabhängigkeit, wie aus Abbildung 6 zu ersehen ist. Der W-Sektor zeigt im Mittel einen leicht positiven Vertikalwind. Dieser resultiert aus der Anströmung des Fichtelgebirges aus dem flachen Vorland und der damit verbundenen Ablenkung der Stromlinien nach oben. Der SE-Sektor weist im Mittel einen negativen Vertikalwind auf. Bei Anströmung aus dem SE-Sektor liegt der SODAR-Standort bereits auf Rückseite des Sattels, die Strömung erhält eine talwärtige Komponente. Der N-Sektor erreicht vor allem in Richtung seiner östlichen Grenze leicht negative Werte. Diese zunehmend negativeren mittleren vertikalen Windgeschwindigkeiten resultieren aus Überströmungseffekten des Bergkopfs (857 m ü. NN), der im N-Sektor etwa in Richtung 45° liegt.

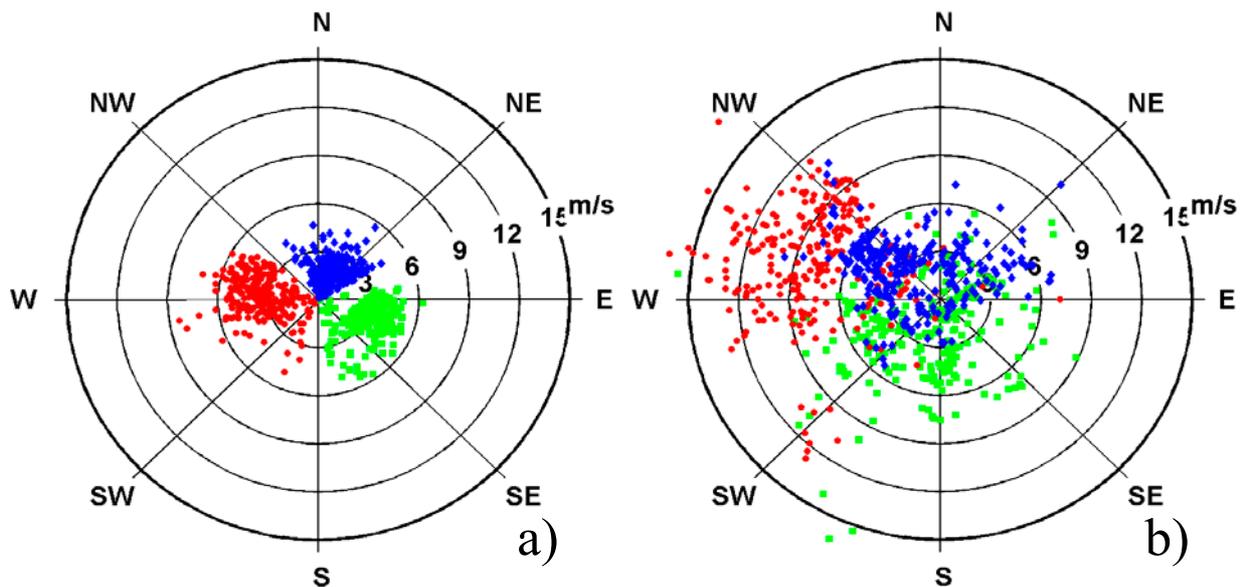


Abbildung 5: Verteilung der Windrichtung und der Horizontalgeschwindigkeit in 40 m (a) und 600 m (b) über Grund. Die bodennahe Anströmung erfolgt aus: SE-Sektor (grüne Quadrate), W-Sektor (rote Kreise), N-Sektor (blaue Rauten). Es wurden nur Daten ausgewertet, zu denen zeitgleiche Messwerte für 40 m und 600 m ü. G. vorlagen.

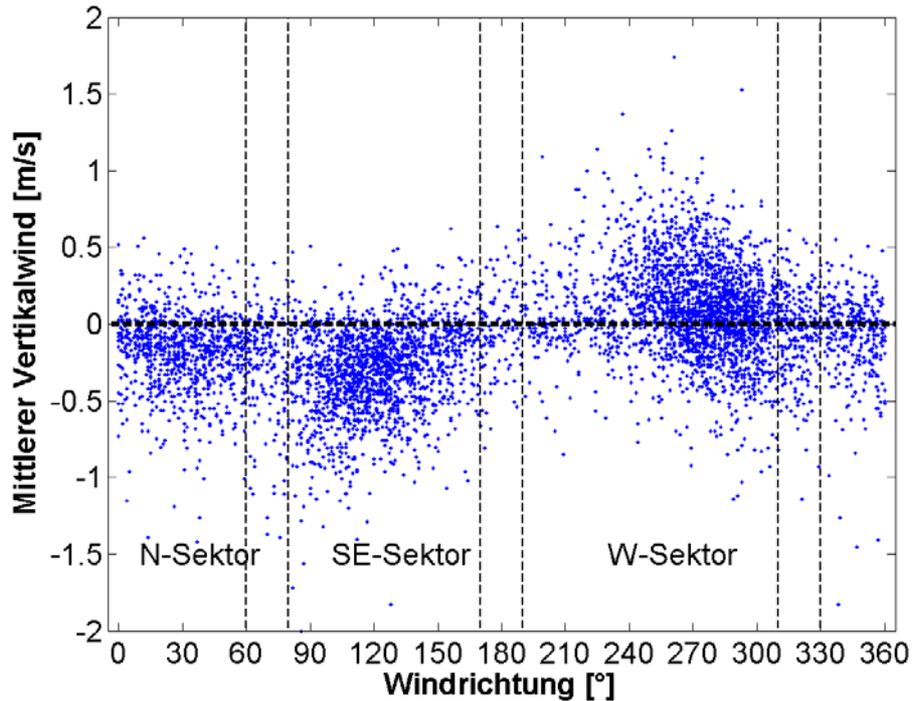


Abbildung 6: Abhängigkeit der vertikalen Windgeschwindigkeit von der Windrichtung in 40 m ü. G. für die gesamte Zeit des Experiments.

In den Abend- und Nachtstunden war insbesondere bei bodennaher Anströmung aus dem Nordsektor und stabiler Schichtung häufig eine Entkopplung vom großräumigen Windfeld zu beobachten. Abbildung 7 zeigt die abrupte Drehung des Windes auf westliche Richtungen im Bereich des Windminimums. Gleichzeitig bildet sich ein tiefliegendes Windmaximum innerhalb der entkoppelten Schicht aus.

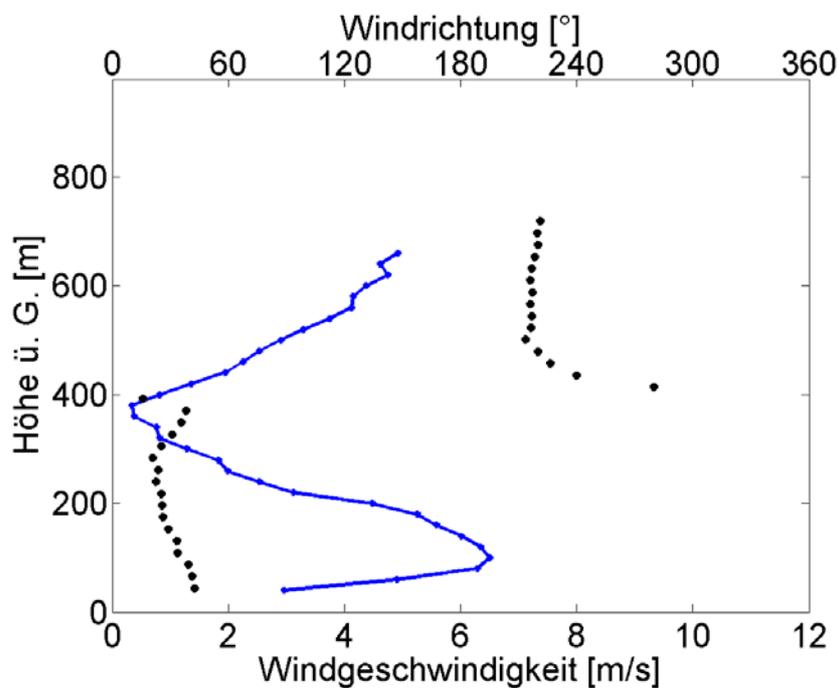


Abbildung 7: Mittlere Profile der horizontalen Windgeschwindigkeit (blaue Linie) und Windrichtung (schwarze Punkte) vom 10. Juni 23:30 Uhr bis 11. Juni 00:40 Uhr MEZ. Der untere Bereich bis etwa 350 m ü. G. ist deutlich von der darüber liegenden Westströmung entkoppelt.

In der Nacht vom 14. Juni auf den 15. Juni trat ein Low-Level-Jet (LLJ) auf. Die Definition eines LLJ erfolgt hier nach Stull (1988), der pauschal alle Windmaxima unterhalb von 1500 m ü. G. als LLJ bezeichnet, sofern die Windgeschwindigkeit darüber um mehr als 2 m s^{-1} abfällt. Zugleich erfüllt dieser LLJ auch die strengeren Kriterien der Kategorie 1 nach Engelbart et al. (2003), die $10 \text{ m s}^{-1} \leq v_{\text{max}} \leq 12 \text{ m s}^{-1}$ sowie eine darüber liegende Geschwindigkeitsabnahme von mindestens 5 m s^{-1} erfordern.

Von etwa 21:00 Uhr am 14. Juni bis ca. 01:00 Uhr am 15. Juni herrschte bodennah Wind aus dem Nordsektor vor. In der Höhe war zu dieser Zeit eine abrupte Drehung des Windes auf westliche Richtungen festzustellen. Die vertikale Position dieser besonders intensiver Richtungsscherung verlagerte sich im Laufe dieser Zeit in größere Höhen, und befand sich ab 2:00 Uhr, zum Zeitpunkt der maximalen Windgeschwindigkeit des LLJ, außerhalb der SODAR Reichweite. Unmittelbar unterhalb dieser Scherfläche zeigt auch die akustische Reflektivität der Atmosphäre ein zweites Maximum, welches sich zusammen mit der Scherfläche in größere Höhen verlagerte. Die Ursache für dieses Maximum waren wahrscheinlich Wellen.

Nachdem sich die Nordströmung bis in die Höhe durchgesetzt hatte, verblieb innerhalb dieser Schicht nur eine leichte Winddrehung mit der Höhe im Uhrzeigersinn. Das Maximum der Windgeschwindigkeit wurde um 02:00 Uhr in einer Höhe von 260 m ü.G. erreicht und betrug knapp 12 m s^{-1} (siehe Abbildung 8). Bis zum Morgen sank die Höhe des Windmaximums auf unter 200 m ü.G. ab. Ein Bereich, der durch mechanisch induzierte Turbulenz auf Grund der hohen Windgeschwindigkeit eine erhöhte akustische Reflektivität unterhalb des LLJ aufweist, sank bis 6:00 Uhr auf etwa 100 m ü. G. ab. Dann stieg er schnell an. Ab etwa 8:00 Uhr war kein abgehobenes Reflektivitätsmaximum mehr erkennbar. Dieser LLJ ereignete sich somit innerhalb des stabilen Bereichs, der zu diesem Zeitpunkt von der in der Höhe vorherrschenden Westströmung vollständig entkoppelt war.

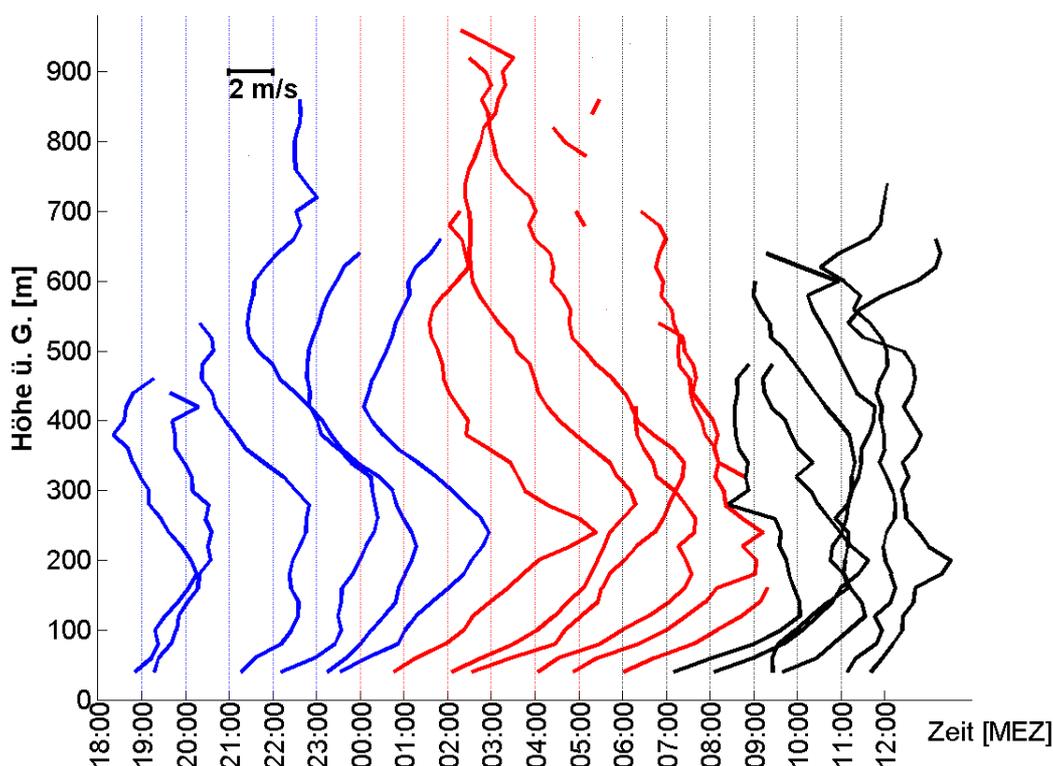


Abbildung 8: Profilserie der horizontalen Windgeschwindigkeit aus 30 min Mittelwerten vom 14. Juni 18:00 Uhr bis 15. Juni 11:30 Uhr MEZ. Zur besseren Unterscheidung sind immer 6 Profile in der gleichen Farbe dargestellt. Zu jedem Profil gehört eine senkrechte Referenzlinie, die einer Windgeschwindigkeit von 0 m s^{-1} entspricht.

An einigen Tagen konnte die morgendliche Entwicklung der Mischungsschicht in den SODAR Daten verfolgt werden. Exemplarisch sei hier der 06. Juni herausgegriffen, für den Abbildung 9 eine Profilersie der akustischen Reflektivität der Atmosphäre zeigt. Die Reflektivität ist proportional zum Temperaturstrukturkoeffizienten C_T^2 . Unter konvektiven Bedingungen gilt ein abgehobenes Reflektivitätsmaximum als Maß für die Höhe der Mischungsschicht (Beyrich, 1997).

Bei dem im Rahmen von WALDATEM-2003 eingesetzten Messsystem stellt das zum Tagesbeginn abhebende Maximum der Reflektivität zugleich die Grenze der Reichweite des SODAR Systems dar. Nur unter den Bedingungen der erhöhten Reflektivität durch die sich unterhalb entwickelnde Mischungsschicht werden auch aus größeren Höhen noch auswertbare Signale erhalten. Nachdem sich die Grenze der Mischungsschicht aus der Reichweite des SODAR Systems herausentwickelt hat, bricht die Höhenreichweite wieder zusammen, da kein starker Reflektor mehr vorhanden ist.

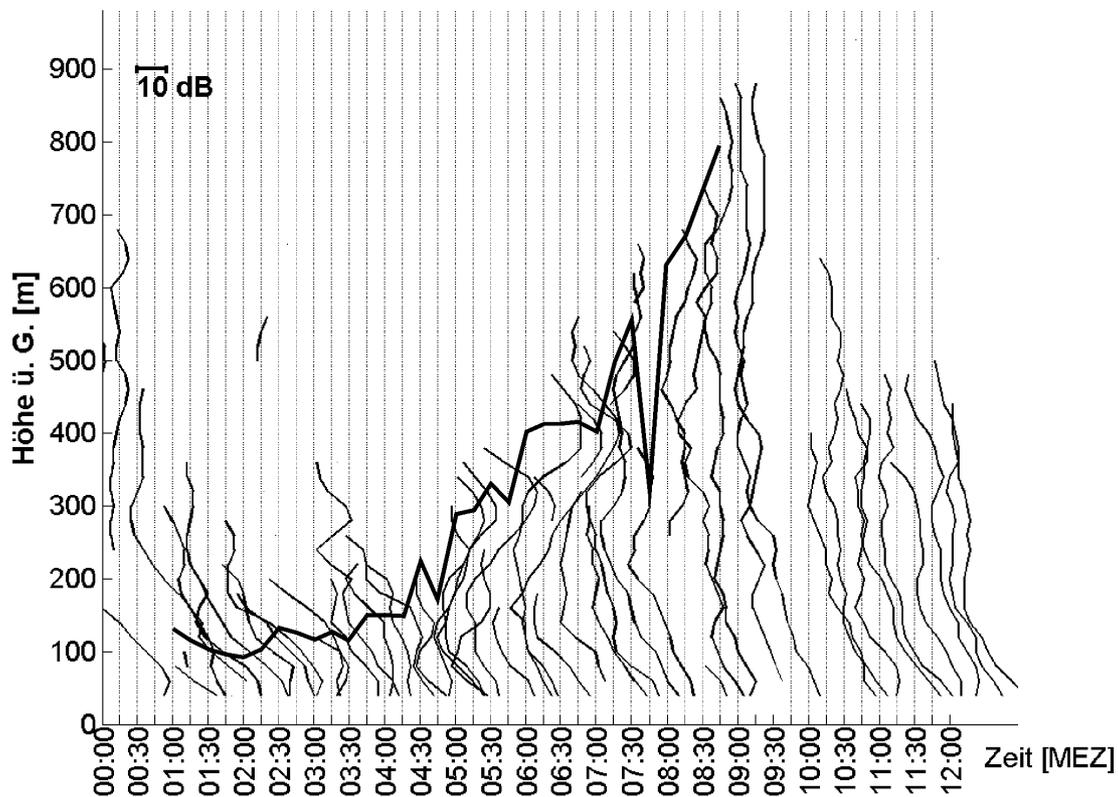


Abbildung 9: Profilerserien der akustischen Reflektivität der Atmosphäre für die Zeit vom 06. Juni 00:00 Uhr bis 12:00 Uhr MEZ. Zu jedem Profil gehört eine senkrechte Referenzlinie, die in diesem Bild einer Signalstärke von 80 dB entspricht. Die dicke Linie markiert zunächst die Obergrenze des bodennahen Bereichs hoher Reflektivität und folgt dann dem Verlauf des sich abhebenden sekundären Reflektivitätsmaximums.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Diese Studie hatte das Ziel, den Standort Waldstein hinsichtlich des Einflusses der Topographie auf die Profile von Wind und Temperatur oberhalb der maximalen Messhöhe des meteorologischen Turmes näher zu charakterisieren. Weiterhin sollten Entwicklung der Mischungsschicht und das Verhalten der stabilen nächtlichen Grenzschicht untersucht werden. Aus den Ergebnissen lassen sich die folgenden Schlüsse ziehen:

- Die Beobachtungen der Windrichtung und –geschwindigkeit zeigten eine gute Übereinstimmung zwischen Ultraschallanemometer und SODAR, so dass sich die Profile gemessen mit SODAR an die Profile des meteorologischen Turmes anschließen lassen.
- Die Windprofile zeigen deutliche Variabilitäten bei verschiedenen Anströmrichtungen. Die Ursache hierfür ist in der umgebenden Topographie zu suchen.
- Es konnte ein Low-Level-Jet beobachtet werden, sowie weitere Windmaxima innerhalb einer entkoppelten Grenzschicht. Diese Phänomene scheinen an bodennahe Anströmungen aus dem Nordsektor unter stabilen Bedingungen gebunden zu sein. Das stark gegliederte Gelände hat keinen hindernden Einfluss auf die Ausbildung eines LLJ.
- Die morgendliche Entwicklung der Mischungsschicht konnte an einigen Tagen beobachtet werden, bis sie jeweils etwa um 8:00 Uhr MEZ den Messbereich des SODAR überstieg

DANKSAGUNGEN

Wir danken den Mitarbeitern des BITÖK (Bayreuther Institut für terrestrische Ökosystemforschung) der Universität Bayreuth für ihren unermüdlichen Einsatz während des Experiments. Ein besonderer Dank gilt Prof. Franz Meixner vom Max-Planck-Institut Mainz für Chemie in Mainz, der uns das SODAR-RASS System für das Experiment zu Verfügung stellte. Das Experiment WALDATEM-2003 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. *J. Assc. Comp. Mach.*, 17, 589-602.
- Coulter, RL, Kallistratova, MA (2004). Two decades of progress in SODAR techniques; a review of 11 ISARS proceedings. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 85, 3-19.
- Emeis, S, Münkel, C, Vogt, S, Müller, W J, Schäfer, K (2003). Vertikale Windprofile in der Ekman-Schicht und Validierung von Mischungsschicht Höhenbestimmungen aus Sodar-Daten. 2. *Fachgespräch SODAR, Bundesamt für Strahlenschutz, Schriften* 115-129 pp.
- Engelbart, D A M, Görsdorf, U, Adedokoun, JA (2003). Klimatologie von Low-Level-Jets am Observatorium Lindenberg auf der Grundlage operationeller Sodar- und Windprofilermessungen. 2. *Fachgespräch SODAR, Bundesamt für Strahlenschutz, Schriften* 131-140 pp.
- Seibert, P, Beyrich, F, Gryning, SE, Joffre, S, Rasmussen, A, Tercier, P (2000). Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height. *Atmos. Environ.*, 84, 1001-1027.
- Stull, RB (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, Boston, London, 666 pp.
- Thomas, C, Foken, T (2004b). Untersuchung dynamischer Eigenschaften kohärenter Strukturen über einem hohen Fichtenwald mittels Wavelet-Analyse. *Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologen-Tagung*, Karlsruhe, Germany, 7 - 10 September 2004, (Extended Abstract and pdf-file on CD).
- Thomas, C, Ruppert, J, Lüers, J, Olesch, J, Bertolini, T, Mayer, JC, Schröter, J, Delany, AC, Foken, T (2004). Komplexes Wald - Grenzschicht Experiment WALDATEM-2003. *Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologen-Tagung*, Karlsruhe, Germany, 7 - 10 September 2004, (Extended Abstract and pdf-file on CD).