

Bodengebundene Fernerkundungssysteme zur Vertikalsondierung

aerologischer Parameter für operationelle Anwendungen

H. Steinhagen

Einleitung

Die Leistungsfähigkeit bodengebundener Fernerkundungsmethoden ist hinsichtlich der verwendeten Interpretationsmethoden und der technischen Ausrüstung in der Vergangenheit wesentlich verbessert worden, so dass derzeit mit verschiedenen Messsystemen ein neuartiger Datentyp bereitgestellt werden kann, der den vertikalen Verlauf von Wind, Temperatur und Wasserdampf mit einer zeitlichen Auflösung im Bereich von 1 bis 60 Minuten beschreibt (Clifford et al., 1994, Engelbart and Steinhagen, 2000). Durch Anwendung dieser neuen Messverfahren werden einerseits neue Möglichkeiten für die Analyse und Interpretation der mesoskaligen Vertikalstruktur der Atmosphäre eröffnet. Andererseits kann durch die Bereitstellung entsprechender Daten für die Validierung und den Antrieb numerischer Vorhersage- und Ausbreitungsmodelle, für synoptische Kurzfristprognosen und Überwachungssysteme sowie für die Parametrisierung mesoskaliger Atmosphärenstrukturen den verschiedenartigen Anforderungen nach zeitlich und räumlich hochaufgelösten Messinformationen entsprochen werden. Dabei ist auch in Zukunft von einer Kombination direkter und indirekter Messverfahren in operationellen Messnetzen auszugehen.

Vorteile bodengebundener Fernerkundungsverfahren

Bei der Erfassung von atmosphärischen Strukturen bis hinunter in den Mikro- α Bereich zeigen die in dem weltweiten operationellen aerologischen Messnetz von ca. 800 Stationen täglich 2 – 4 mal durchgeführten Radiosondenmessungen einige nicht überwindbare methodische Mängel:

- Aufgrund der geringen Aufstiegs geschwindigkeit der Radiosonde existiert zwischen der Messung in verschiedenen Schichten der Atmosphäre eine Zeitverzögerung. So vergehen bei einer Ballonsteiggeschwindigkeit von $v_A = 5 \text{ m/s}$ zwischen der Erfassung aerologischer Messgrößen in der bodennahen Schicht und einer Höhe von 30 km etwa 100 Minuten. Demzufolge können die atmosphärischen Strukturen in verschiedenen Schichten nicht zeitsynchron erfasst werden.
- Die horizontalen Windkomponenten führen zu einem räumlichen Verdriften der Radiosonde, so dass bei hochaufgelösten Modellen keine vollständigen Profile für einen Gitterpunkt gewonnen werden können. In Abhängigkeit von der horizontalen Windgeschwindigkeit v_H können die Radiosonden um 30 km ($v_H=5\text{m/s}$) bis 120 km ($v_H=20\text{m/s}$) verdriften (s.a. Abb. 1).

- Das standardgemäße Zeitintervall aufeinanderfolgender Radiosondenmessungen von 6 bzw. 12 Stunden ist für die Erfassung mesoskaliger Strukturen nicht ausreichend. Dieses Zeitintervall kann jedoch nur mit erheblichem logistischen Aufwand verringert werden.

Die genannten methodischen Mängel können durch den Einsatz bodengebundener Fernerkundungssysteme wie Windprofiler Radar (WPR), Radio-Akustischen Sondierungssystemen (RASS), Mikrowellenradiometern (MR) und akustischen Sondierungssystemen (Sodar) vermieden werden. Diese Messsysteme ermöglichen die Erfassung vertikaler Wind-, Temperatur- und Wasserdampfprofile in einer vertikalen Luftsäule mit hoher zeitlicher Auflösung von 1 bis 60 Minuten (s.a. Abb. 1). Überdies haben bodengebundene Fernerkundungssysteme für den Einsatz in meteorologischen Messnetzen den Vorteil, dass die laufenden Kosten für eine Messung im Vergleich zur Radiosondierung sehr gering sind und die Erzeugung der meteorologischen Daten, deren Qualitätskontrolle sowie die Systemüberwachung vollautomatisch ohne Bedienpersonal erfolgen kann. Durch Kombination verschiedener bodengebundener Fernerkundungssysteme ist es möglich, alle mit einer Radiosonde gemessenen meteorologischen Parameter bereitzustellen. Der gesamte vertikale Messbereich einer Radiosonde kann jedoch nur durch Kombination von boden- und satellitengebundenen Fernerkundungssystemen erfasst werden.

Bodengebundene Vertikalsondierung meteorologischer Parameter

In den vergangenen 20 Jahren wurden Windprofiler-Radar (WPR), die eine Messung von Vertikalprofilen des Windvektors mit hoher zeitlicher Auflösung auf der Grundlage der Rückstreuung von in die Atmosphäre abgestrahlten elektromagnetischen Wellen ermöglichen, zunehmend in der meteorologischen Forschung eingesetzt. Durch die erfolgreiche Implementierung des amerikanischen Windprofiler- Demonstrationsnetzes (NOAA, 1994) sowie eines europäischen, experimentellen Netzwerkes von WPR, das 1997 im Rahmen von FASTEX (Fronts and Atlantic Storm Track Experiment) und CWINDE (COST Wind Initiative for a Network Demonstration in Europe) von der europäischen COST 76 Aktion erstmals getestet wurde, konnten die Vorzüge eines operationellen Einsatzes dieser neuartigen Systeme aufgezeigt werden. Es gibt 3 WPR-Grundtypen, die in den Frequenzbereichen bei 50, 400 oder 1000 MHz arbeiten. In Abhängigkeit von diesen Frequenzen erfassen WPR verschiedene Höhenbereiche der Atmosphäre, die typisch mit 1,5-25 km (50 MHz), 0,5-16 km (400 MHz) oder 0,1-3 km (1000 MHz) angegeben werden können (Clifford et al., 1994). In Deutschland sind für diese Anwendungen Frequenzen von 53.5, 482 und 1290 MHz vorgesehen.

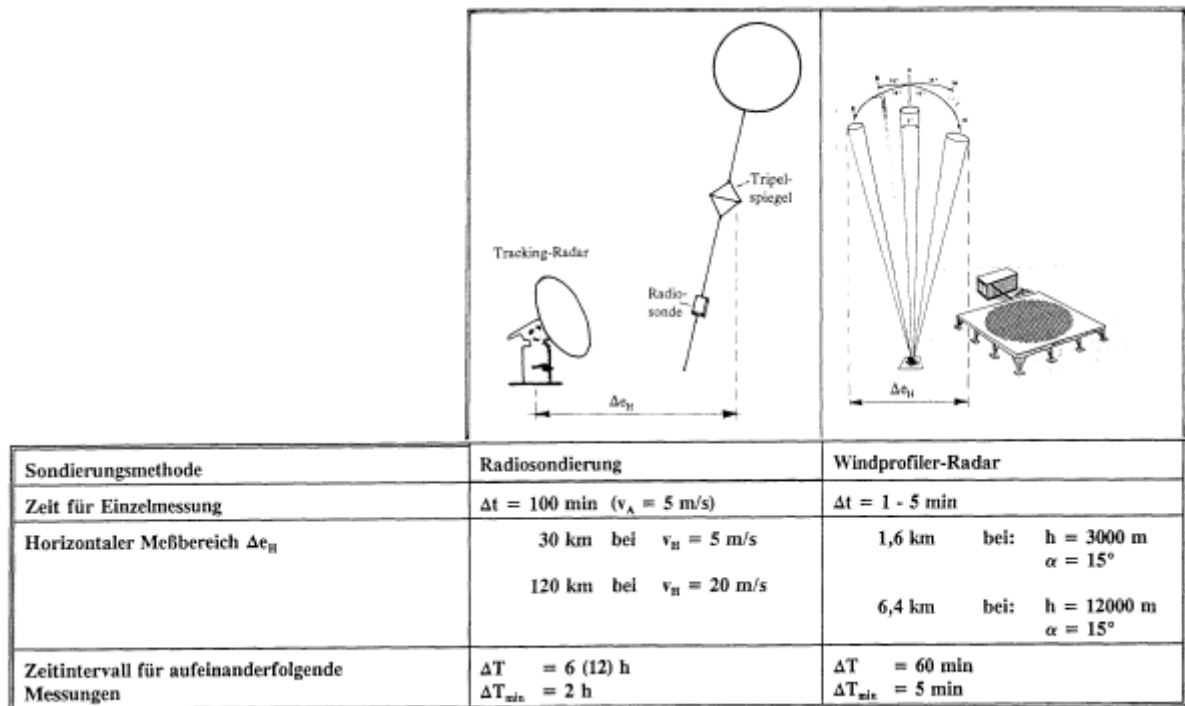


Abb. 1 Vergleich von Radiosondierung und bodengebundener Fernerkundung, speziell Windprofiler Radar, hinsichtlich der Zeit für eine einzelne Messung im gesamten vertikalen Messbereich, des horizontalen Messbereiches und des Zeitintervalls für aufeinanderfolgende Messungen.

Mit den Erprobungen der ersten europäischen 1290 MHz und 482 MHz WPR am Meteorologischen Observatorium Lindenberg (MOL) wurden die Voraussetzungen für den operationellen Einsatz dieser neuartigen Systeme im DWD geschaffen (Engelbart et al., 1996; Steinhagen et al., 1998). Das aufgrund seines Höhenmessbereiches für operationelle Anwendungen in Wetterdiensten prädestinierte 482 MHz WPR, arbeitet mit verschiedenen Höhen- und Zeitaufösungen. Typisch sind vertikale Auflösungen von 250 und 500 m. Dabei kann ein vertikaler Messbereich von 0,5-16 km mit einer 80%-Verfügbarkeit bei 12,8 km erfasst werden. Langzeitvergleiche der Windmessung mit dem 482 MHz WPR und entsprechenden Radiosondenmessungen zeigten, dass die Differenz der Horizontalgeschwindigkeit kleiner als 0,4 m/s im unteren und 0,7 m/s im oberen Höhenbereich und somit geringer als die durchschnittliche Messgenauigkeit beider Systeme ist (Görsdorf, 2000). Windmessungen in Höhen bis 500 m können vorteilhaft aus Sodarmessungen mit einer vertikaler Auflösung von ca. 20 m gewonnen werden (Engelbart et al., 1999).

Auf der Grundlage der Rückstreuung elektromagnetischer Wellen an akustischen Wellenstrukturen, die in die Atmosphäre ausgesandt wurden, können Vertikalprofile der virtuellen Temperatur mit hoher vertikaler und zeitlicher Auflösung gewonnen werden. Derartige Radio-Akustische Sondierungssysteme (RASS) können als Ergänzung sowohl zu einem WPR als auch zu einem Sodar implementiert und operationell betrieben werden. Dabei beruht die Bestimmung der Temperatur auf dem Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und virtueller Temperatur. Der vertikale Messbereich von RASS wird in erster Linie durch die atmosphärische

Dämpfung akustischer Wellen bestimmt und beträgt etwa 0,4–4 km für das 482 MHz WPR/RASS und 30–300 m für ein Sodar/RASS (Steinhagen et al., 1998; Engelbart et al., 1999).

In den vergangenen 10 Jahren wurden auch Fernerkundungstechnologien entwickelt, um den für den Ablauf atmosphärischer Prozesse wichtigen Parameter Wasserdampf mit hoher zeitlicher Auflösung zu erfassen. Für wetterdienstliche operationelle Anwendungen hat sich der Einsatz von Mehrkanal-Mikrowellenradiometern, sogenannten Mikrowellenradiometer-Profilern (MRP), als besonders zweckmäßig erwiesen, weil diese Systeme unter Allwetterbedingungen, mit Ausnahme bei Regen, zuverlässig betrieben werden und überdies, unter der Voraussetzung der Implementierung entsprechender Empfangskanäle, neben Wasserdampfprofilen auch Vertikalprofile der Temperatur und des Flüssigwassers bereitstellen können.

Wegen der Bedeutung des Wasserdampfes für den Wasserhaushalt der Atmosphäre ist auf Vorschlag der Leitung des WCRP (World Climate Research Programme) vorgesehen, am MOL einen Validierungspunkt für boden- und satellitengebundene Fernerkundungssysteme zur Sondierung des Wasserdampfes im Rahmen des „Global Water Vapour Project“ (GVaP) zu errichten. Mit der Implementierung eines MRP am MOL wurde ein erster wichtiger Schritt zur Erweiterung des MOL-Messprogramms zu einer GVaP-Referenzstation getan.

Integrierte Fernerkundungssysteme

Die Bereitstellung von Vertikalprofilen des Windes, der Temperatur und des Wasserdampfes mit hoher zeitlicher und vertikaler Auflösung kann nur durch Kombination verschiedener bodengebundener Fernerkundungssysteme erfolgen (Steinhagen et al. 2000), wie z.B. durch Kombination von WPR, RASS und MRP.

Abb. 2 zeigt ein integriertes Fernerkundungssystem bestehend aus 2 WPR jeweils kombiniert mit RASS, einem Sodar/RASS und einem MRP, wie es am MOL implementiert wurde, um für den Referenzpunkt der „Lindenberger Säule“ sich ergänzende und z.T. überlappende Messinformationen in hoher zeitlicher und angepasster vertikaler Auflösung als Langzeitmonitoring bereitzustellen. Alle Messdaten werden in der Datenbank „Lindenberger Säule“ gespeichert und stehen dort für weitere Auswertungen und Validierungen zur Verfügung. Für Echtzeit-Nutzer werden die WPR-/RASS-Daten auch real-time zum europäischen WPR-Datenzentrum nach Bracknell/UK sowie für die regionale Vorhersage zum RZ Potsdam und zur Fww Tempelhof übertragen. Real-time-Daten der MOL-WPR werden neben anderen europäischen WPR auch im Internet unter <http://www.meteo.gov.uk/sec5/sec5pg5.html> präsentiert.

Ausgehend von dem erreichten Entwicklungsstand bei der Anwendung von WPR/RASS hat der Deutsche Wetterdienst im Rahmen des Projektes „Messnetz 2000“ entschieden, sein aerologisches Messnetz mit den sehr aufwendigen Ballonsondierungen durch zeitlich höher auflösende 482 MHz WPR-/RASS-Messungen zu ergänzen, so dass ab 2002-2004 die Bereitstellung dieser Messinformationen im aerologischen Messnetz des DWD vorgesehen ist (Lehmann et al., 1999; Lehmann et al. 2000).

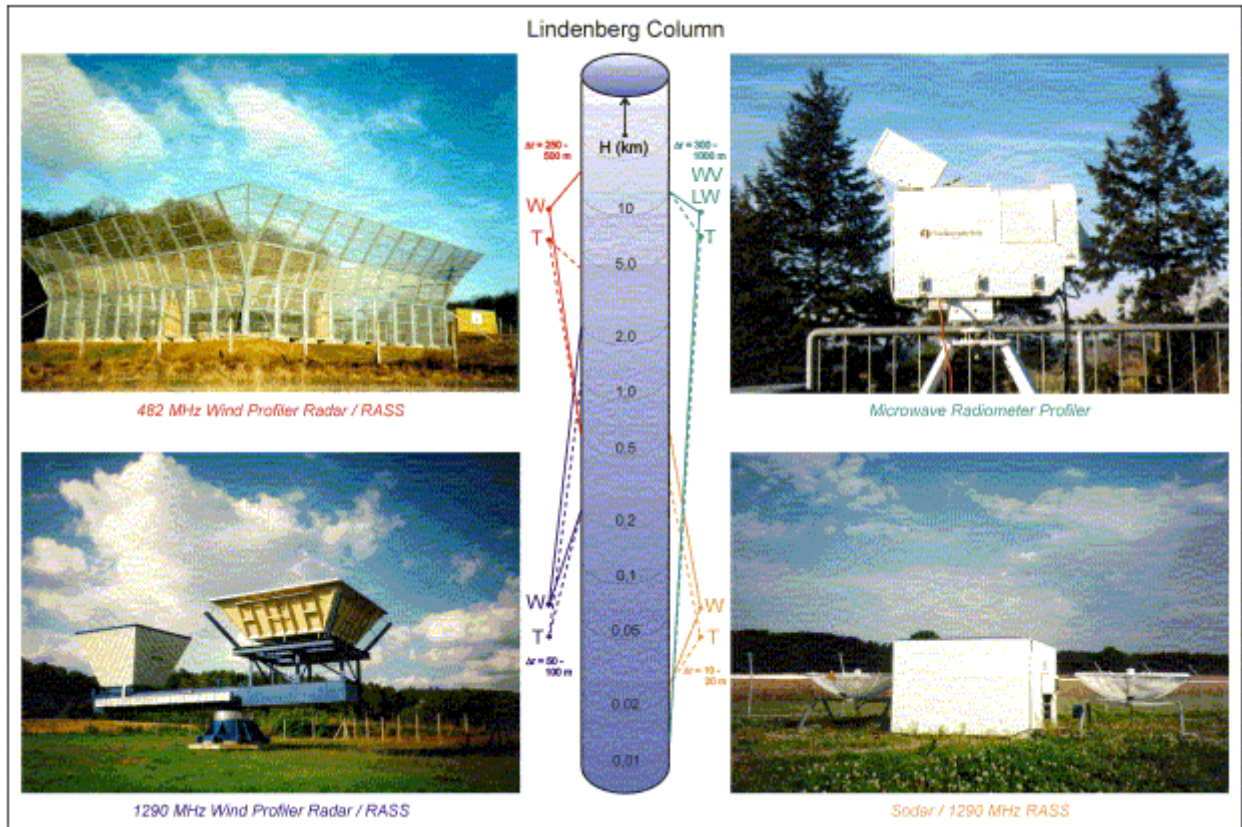


Abb. 2 Integriertes bodengebundenes Fernerkundungssystem bestehend aus 482 MHz WPR/RASS (links, oben), 1290 MHz WPR/RASS (links, unten) Sodar/ 1290 MHz RASS (rechts, unten) und MRP (rechts, oben) zur Vertikalsondierung des Windes (W), der Temperatur (T), des Wasserdampfes (WV) und des Flüssigwassers (LW) innerhalb der „Lindenberger Säule“ mit einer zeitlichen Auflösung von 1 - 60 Minuten und einer variablen vertikalen Auflösung von Δr .

In Tabelle 1 sind für die am MOL implementierten bodengebundenen Fernerkundungssysteme aus Abb. 2 die wesentlichen anwenderspezifischen Merkmale (vertikaler Messbereich, vertikale Auflösung und Mittelungsintervall) im Vergleich zur Radiosondenmessung angegeben.

System	Vertikaler Messbereich			Vertikale Auflösung	Mittelungsintervall		
	Wind	Temp	Wasserdampf		Wind	Temp	Wasserdampf
Sodar/RASS	20-400m	30-300m	-	20m	10min	10min	-
1290 MHz WPR/RASS; Low-Mode	0,2-2km	0,2-1,0km	-	100m	25min	5min	-
482 MHz WPR/RASS; Low-Mode	0,5-7,5km	0,4-3km	-	250m	25min	5min	-
482 MHz WPR/RASS; High-Mode	2,6-16km	--	-	500m	25min	-	-
MWR	-	0,1-10km	0,1-10km	0,3-1km	-	10min	10min
Rawinsonde	0,3-35km	0-35km	0-35km	50-100m	-	-	-

Tab. 1 Vertikaler Messbereich, vertikale Auflösung und Mittelungsintervall bodengebundener Fernerkundungssysteme und der Radiosondenmessungen.

Fallbeispiel von Messungen bodengebundener Fernerkundungssysteme

Abb. 3 zeigt ein Fallbeispiel halbstündlich gemittelter 482 MHz WPR-Messungen als Zeit-Höhendarstellung vom 21.11.–22.11.2000, (12:00 UTC). In dieser Darstellung ist die Messung im „Low-Mode“ (vertikale Auflösung: 250 m; Höhenmessbereich: 0.5-7.5 km) mit der Messung im „High-Mode“ (vertikale Auflösung: 500 m; Höhenmessbereich: 2.6-16 km) kombiniert. Die Wettersituation an diesen Tagen war einerseits durch das über den Britischen Inseln liegende Tief TRACY und den nachfolgenden Wirbel WINNIE, der TRACY vollkommen in seine Zirkulation aufnahm und andererseits durch ein ausgeprägtes Hochdruckzentrum im Raum Murmansk/Archangelsk gekennzeichnet, das einen Kerndruck von mehr als 1040 hPa aufwies. Die okkludierenden Fronten der Tiefdruckgebiete kamen zunächst am 21.11. außerordentlich schnell nach Osten voran. In Abb. 3 ist der Jet am 21.11 von 12:00 bis 19:00 UTC im Höhenbereich von 6 bis 9.5 km mit einer maximalen Windgeschwindigkeit von ca. 40 m/s bei 7 km und süd-südwestlichen Windrichtungen deutlich zu erkennen. Im Höhenbereich bei 7 km drehte die Windrichtung am 21.11. zwischen 19:00 und 22:00 von Südwest auf Nordwest. Mit dem Durchgang eines Höhentroges zwischen 21:00 des 21.11. und 01:00 des 22.11. trat im Höhenbereich um 7 km eine maximale Windgeschwindigkeit von 32 m/s auf.

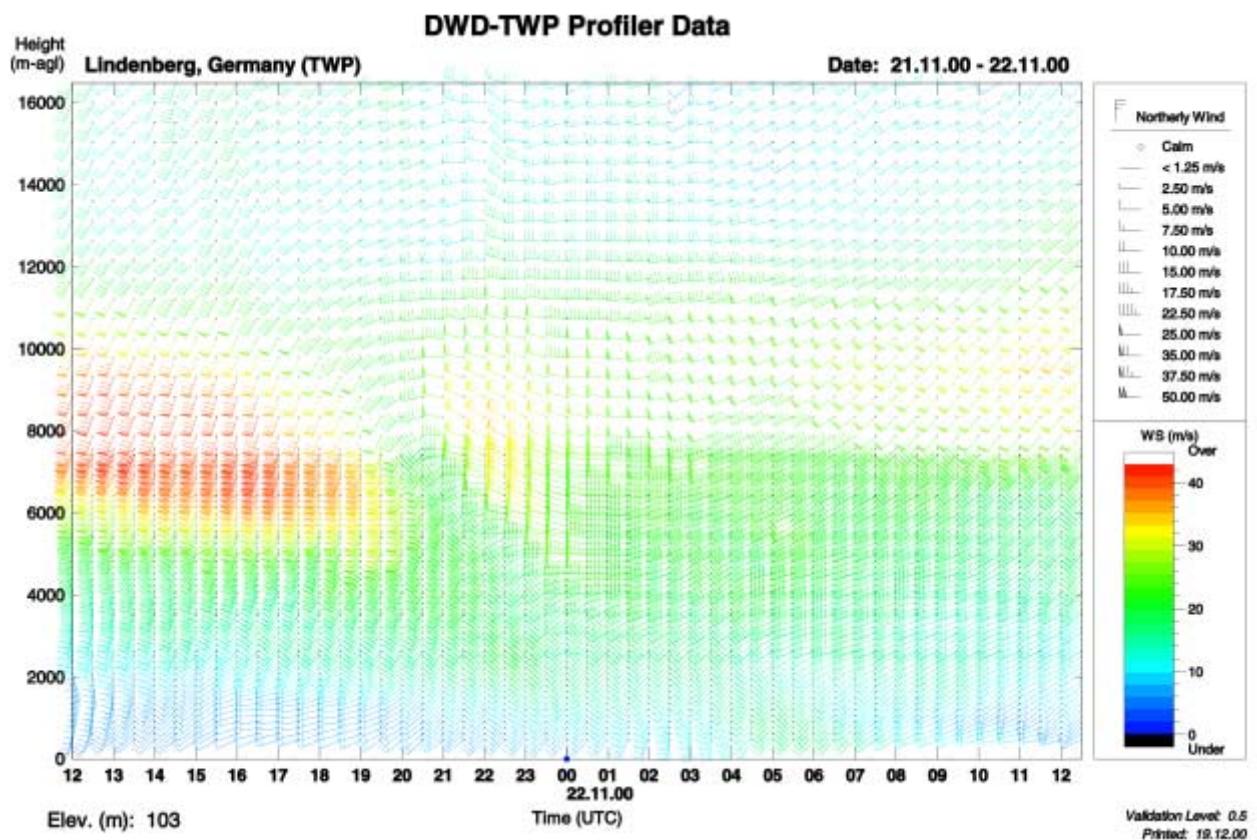


Abb. 3 Zeit-Höhendarstellung von halbstündlich gemittelten Windmessungen im Low- und High-Mode des 482 MHz WPR vom 21. November 2000, 12:00 UTC bis 22. November 12:00 UTC.

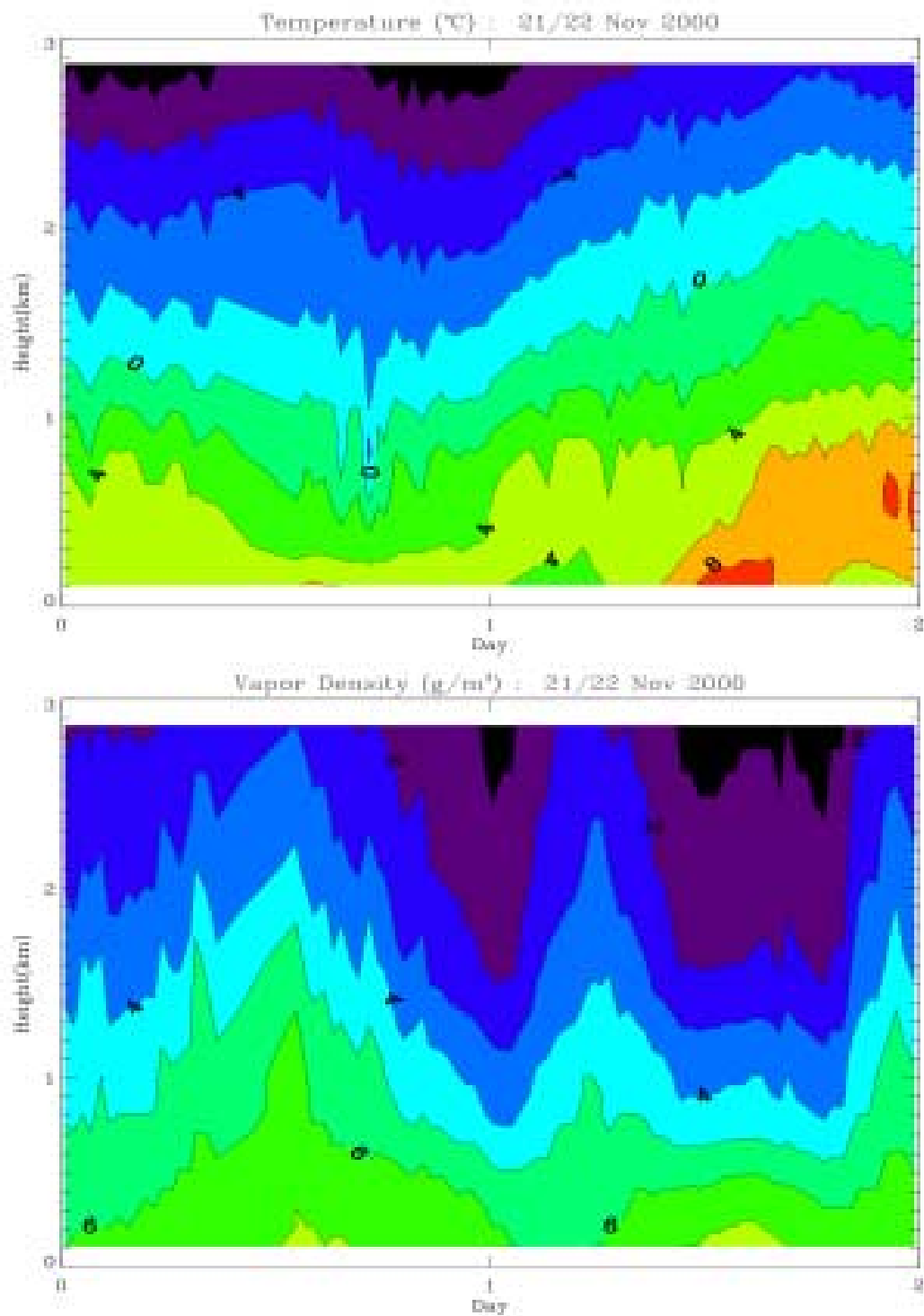


Abb. 4 Zeit-Höhendarstellung von halbstündlich gemittelten Temperatur- (oben) und Wasserdampfmessungen (unten) des Mikrowellenradiometer-Profilers vom 21. November 2000, 00:00 UTC bis 22. November 24:00 UTC.

Nach dem Trogdurchgang drehte der Höhenwind wieder auf südwestliche Windrichtungen zurück und die Windgeschwindigkeit verringerte sich in diesem Höhenbereich auf Werte um 20 m/s.

Abb. 4 zeigt die Zeit-Höhendarstellung der Temperatur (oben) und des Wasserdampfes (unten) aus halbstündlich gemittelten Messungen mit dem MRP für das betrachtete Fallbeispiel vom 21./22. November 2000. Das Eintreffen der okkludierenden Front des Tiefs TRACY am 21.11. gegen 15:00 ist besonders gut an dem Temperaturrückgang in 1 km Höhe zu erkennen. Nachfolgend werden durch die Winddrehung auf Südwest wieder wärmere Luftmassen zugeführt. Der Verlauf des Wasserdampfes (Abb. 4, unten) zeigt einen im wesentlichen durch die Advektion bestimmten Verlauf. Mit der Winddrehung von südwestlichen auf westliche Richtungen werden trockenere Luftmassen herangeführt, die am 21.11. bei 1 km Höhe zwischen 12:00 UTC und 24:00 zu einem Abfall des Wasserdampfes von 6 auf 3 g/m³ führen. Durch die am 22.11. ab 00:00 UTC wiederum aus Südwest herangeführten feuchteren Luftmassen nimmt der Wasserdampfgehalt in Höhen bis zu 3 km wiederum zu.

Wie in diesem Fallbeispiel demonstriert, können im Gegensatz zu den Radiosondenmessungen durch halbstündlich gemittelte Messungen mit dem 482 MHz WPR und dem MRP, insbesondere bei hoher atmosphärischer Variabilität, die realen Wind-, Temperatur- und Wasserdampffelder mit hoher zeitlicher Auflösung exakt beschrieben werden.

Literatur

- Clifford, S.F., J.C. Kaimal, R.J. Latatits, and R.G. Strauch: Ground-based Remote Profiling in Atmospheric Studies: An Overview, Proc.IEEE, 82, 313-355, 1994.
- Engelbart, D., H. Steinhagen, U. Görzdorf, J. Lippmann, and J. Neisser: A 1290 MHz Profiler with RASS for Monitoring Wind and Temperature in the Boundary Layer, Contr. Atmos. Phys., 69, 63-80, 1996.
- Engelbart, D., H. Steinhagen, U. Görzdorf, J. Neisser, H.J. Kirtzel, and G. Peters: First Results of Measurements with a Newly Designed Phased-Array Sodar with RASS, Meteorol. Atmos. Phys., 71, 61-68, 1999.
- Engelbart, D.A.M. and H. Steinhagen: Ground-based remote sensing of atmospheric parameters using Integrated Profiling Stations, Journ. Phys. And Chem.of the Earth, 2000, in press.
- Görzdorf, U.: Genauigkeit und Verfügbarkeit von Windprofiler-/RASS-Messungen, Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 209, Selbstverlag des DWD, Offenbach am Main, 171, 2000.
- Lehmann, V., U. Görzdorf, H. Steinhagen und M. Jaeneke: Forschungsbericht zur Erprobung des 482 MHz Windprofilers, Lindenberg, 268, 1999.
- Lehmann, V., U. Görzdorf, T. Roschke, K.-J. Schreiber, H. Steinhagen und J. Weisbarth: Technische Konzeption für die 482 MHz Windprofiler im Messnetz 2000, Lindenberg, 91, 2000.
- NOAA: Wind Profiler Assessment Report and Recommendations for future use, NOAA, Silver Spring, Maryland, 141, 1994.
- Steinhagen, H., J. Dibbern, D. Engelbart, U. Görzdorf, V. Lehmann, J. Neisser, and J. Neuschaefer: Performance of the first European 482 MHz Wind Profiler Radar with RASS under operational conditions, Meteorol. Zeitschrift, 7, 248-261, 1998.
- Steinhagen, H. S. Andersson, D. Engelbart, U. Görzdorf, J. Güldner, V. Lehmann, J. Neisser, H. Pisch, and P. Ulrych: Configuration of future operational upper-air remote sensing stations, Proceedings of 9th Int. Workshop on Techn. and Scientific Aspects of MST Radar and Final COST 76 Wind Profiler Workshop, Toulouse, 2000, in press.