

**KfK 4520
August 1989**

SODAR-Windmessungen während ausgeprägter bodennaher Temperaturinversionen

**P. Thomas, S. Vogt
Institut für Meteorologie und Klimaforschung**

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Meteorologie und Klimaforschung

KfK 4520

**SODAR-Windmessungen während ausgeprägter
bodennaher Temperaturinversionen**

P. Thomas, S. Vogt

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

Immer häufiger werden SODAR-Geräte (Sound Detection and Ranging) eingesetzt, um mit geringem Personalaufwand, zeitlich kontinuierlich und räumlich gut aufgelöst Vertikalprofile des Windes zu messen. Diese Winddaten dienen als Eingangsgrößen für atmosphärische Transport- und Ausbreitungsmodelle, der Umgebungsüberwachung von Industrieanlagen und ganz allgemein zur Untersuchung eines breiten Spektrums meteorologischer Phänomene. Die SODAR-Meßtechnik hat längst ihre Tauglichkeit bewiesen, sofern die mit SODAR erfaßten Daten dazu dienen, Windstatistiken für längere Zeiträume zu erstellen.

An Industriestandorten, die ein Potential zur Freisetzung gesundheitsgefährdender Stoffe besitzen, z.B. chemische Fabrikanlagen, Kernkraftwerke usw., muß ein SODAR darüber hinaus in der Lage sein, die Windverhältnisse auch während kurzer Freisetzungszeiten zuverlässig zu messen. Dies wäre z.B. während störfallbedingter Freisetzung wichtig. Besonders interessante Situationen für die Ausbreitung von Schadstoffen sind ausgeprägte Temperaturinversionen. Ob ein SODAR auch während solcher Inversionslagen die Windverhältnisse zuverlässig zu erfassen vermag, wird in der vorliegenden Arbeit untersucht.

Die Auswahl der Inversionslagen, sowie der direkte Datenvergleich zwischen SODAR und konventionellen Windmeßgeräten (Anemometer und Windfahne) wird ermöglicht durch den 200 m hohen meteorologischen Meßmast auf dem Gelände des Kernforschungszentrums.

Bei der Auswahl der Inversionen wurde unterschieden zwischen Bodeninversionen und abgehobenen Inversionen. Die absolute Häufigkeit beider Inversionstypen zusammengenommen ist zwar gering (< 7%), jedoch treten sie im Mittel an jedem zweiten Tag mindestens einmal auf.

Der Vergleich zwischen SODAR und Mast ergab, daß ein SODAR auch in Situationen mit ausgeprägten Boden- bzw. abgehobenen Inversionen die Windwerte zuverlässig zu erfassen vermag. Die Bestimmung der Windrichtung in niedrigen Höhen bei Situationen mit abgehobenen Inversionen muß im Einzelfall allerdings kritisch geprüft werden, da hier die größten Abweichungen im Vergleich zu den Mastmessungen auftreten.

Summary

Wind measurements with a SODAR during strong temperature inversions near the ground

SODAR (Sound Detection and Ranging) equipment has been increasingly used to measure vertical wind profiles with little expenditure in terms of staff, continuously over time and with a good spatial resolution. These information serves as input variables for atmospheric transport and dispersion models, environmental monitoring of industrial facilities and, generally, for investigating a broad spectrum of meteorological phenomena. The SODAR principle has proved its suitability since long provided that the data recorded with SODAR have served to establish wind statistics valid for extended periods of time.

At industrial sites potentially releasing substances prejudicial to health, e.g., chemical plants, nuclear power plants, etc., a SODAR must, moreover, be capable of measuring reliable the wind conditions also during short periods of release. This would, e.g., be important during accidental releases. Especially interesting situations for pollutant dispersion are distinct temperature inversions. It will be examined in this paper whether a SODAR is capable of measuring reliable the wind conditions also during those inversions.

The selection of the situations of inversion as well as the direct intercomparison of data supplied by SODAR and conventional wind measuring instruments (anemometer and wind vane) are possible at the 200 m meteorological tower erected at the Karlsruhe Nuclear Research Center.

In selecting the inversions a distinction was made between ground based inversion and elevated inversion. Although the absolute frequency of occurrence of both types of inversion taken together is low (< 7%), they occurred on the average at least once every second day. The comparison between SODAR and the meteorological tower has shown that a SODAR is able to measure reliably the wind data also in situations characterized by strong ground based and elevated inversions, respectively. However, the determination of wind direction at low altitudes in situations of elevated inversions must be critically examined because in these situations the deviations are maximum compared to measurements made at the meteorological tower.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. EINLEITUNG	1
2. DATEN	1
2.1 Mastdaten	1
2.2 SODAR-Prinzip und Daten	2
3. TEMPERATURINVERSIONEN	3
3.1 Bodeninversionen (BI)	3
3.2 Abgehobene Inversionen (AI)	4
4. VERFÜGBARKEIT DER SODAR-DATEN	5
4.1 Verfügbarkeit im gesamten Zeitraum	5
4.2 Verfügbarkeit bei Bodeninversionen	5
4.3 Verfügbarkeit bei abgehobenen Inversionen	5
5. VERGLEICH ZWISCHEN SODAR- UND MASTDATEN	6
5.1 Gesamter Zeitraum	7
5.2 Bodeninversionen (BI)	7
5.3 Abgehobene Inversionen (AI)	8
6. SCHLUßFOLGERUNGEN	8
7. LITERATUR	9

1. EINLEITUNG

Immer häufiger werden SODAR-Geräte (Sound Detection and Ranging) eingesetzt, um mit geringem Personalaufwand, zeitlich kontinuierlich und räumlich gut aufgelöst Vertikalprofile des Windes zu messen. Diese Winddaten dienen als Eingangsgrößen für atmosphärische Transport- und Ausbreitungsmodelle, der Umgebungsüberwachung von Industrieanlagen und ganz allgemein zur Untersuchung eines breiten Spektrums meteorologischer Phänomene.

Die SODAR-Meßtechnik hat, wie in verschiedenen Vergleichsmessungen gezeigt (CH88, KA84, HO85A, HO85B), längst ihre Tauglichkeit bewiesen, sofern die mit SODAR erfaßten Daten dazu dienen, Windstatistiken für längere Zeiträume zu erstellen. Neben ein- bzw. zweidimensionalen Statistiken der Windrichtung und -geschwindigkeit bzw. der Kombination aus beiden, sind hier vor allem drei- und vierdimensionale Ausbreitungsstatistiken gemeint /VO83/.

An Industriestandorten, die ein Potential zur Freisetzung gesundheitsgefährdender Stoffe besitzen, z.B. chemische Fabrikanlagen, Kernkraftwerke usw., muß ein SODAR darüber hinaus in der Lage sein, die Windverhältnisse auch während kurzer Freisetzungzeiten zuverlässig zu messen. Dies wäre z.B. während störfallbedingter Freisetzung wichtig. Besonders interessante Situationen für die Ausbreitung von Schadstoffen sind ausgeprägte Temperaturinversionen. In dieser Arbeit ist zwischen zwei Fällen unterschieden:

- a) "Abgehobene" Inversion: In Bodennähe liegt eine instabile bis neutrale und darüber eine stabile Schichtung vor.
- b) Bodeninversion: Die Atmosphäre ist in Bodennähe stabil, darüber aber neutral bis instabil geschichtet.

Ob ein SODAR auch während solcher Inversionslagen die Windverhältnisse zuverlässig zu erfassen vermag, wird in der vorliegenden Arbeit untersucht.

2. DATEN

2.1 Mastdaten

Am Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) wird ein umfangreiches, meteorologisches Informationssystem (MIS) betrieben. Es besteht aus nahezu 50 meteorolo-

gischen Meßinstrumenten, die überwiegend an einem 200 m hohen Gittermast installiert sind. In Tab. 1 und Abb. 1 sind die Meßgeräte übersichtlich dargestellt. Neben den Vertikalprofilen der Windgeschwindigkeit, der Windrichtung, der Lufttemperatur, des Taupunktes und der mittels Vektorfahnen gemessenen Standardabweichungen der vertikalen und horizontalen Windrichtung werden Niederschlag, Luftdruck und Strahlung als 10-min Mittelwerte auf Magnetband gespeichert. In /H084/ ist eine detaillierte Beschreibung des MIS zu finden. In der vorliegenden Auswertung werden aus diesen 10-min Mittelwerten 30-min Mittelwerte gebildet und die weiteren Berechnungen damit durchgeführt. Das MIS ist einerseits Teil des Sicherheits- und Überwachungssystems des KfK, zum anderen werden mit den gemessenen Daten auch Forschungsaufgaben durchgeführt. Beispiele sind: Turbulenzuntersuchungen in der Grenzschicht, Auswertung von Ausbreitungsexperimenten und klimatologische Studien.

2.2 SODAR-Prinzip und Daten

Ein SODAR arbeitet nach dem Prinzip des Echolotes. Kurze, hörbare Schallimpulse werden gebündelt in die Atmosphäre abgestrahlt. Aus jeder Höhe wird ein geringer Bruchteil der Schallenergie zurückgestreut und wieder empfangen. Die Frequenz des empfangenen Signals ist gegen die Sendefrequenz aufgrund der Bewegung des Streuvolumens verschoben (Dopplereffekt). Aus der Laufzeit, Intensität und der Frequenzverschiebung des zurückgestreuten Schallimpulses werden Vertikalprofile der Rückstreuamplitude, der Windgeschwindigkeit, der Windrichtung und deren Standardabweichungen bestimmt.

In Abb. 2 sind die drei Schalltrichter des SODAR zu sehen, in denen die Druckkammern untergebracht sind, die abwechselnd als Lautsprecher und als Mikrofon arbeiten. Man spricht daher von einem monostatischen Doppler-SODAR. Das SODAR, Typ AO der Firma Remtech, Frankreich, steht auf der vom Wald umgebenen Meßwiese ca. 200 m vom Meßmast entfernt.

Es wird abwechselnd ein Schallimpuls von ca. 1600 Hz abgestrahlt und empfangen. Jede Antenne liefert die Radialgeschwindigkeit eines Luftpaketes entlang der Schallstrahlachse. Um daraus horizontale und vertikale Komponente des Windvektors zu berechnen, sind zwei Antennen um 18° aus der Vertikalen geneigt. Die Projektion ihrer Strahlachsen in die Horizontalebene bilden einen rechten Winkel. Die dritte Antenne zeigt vertikal nach oben.

Die zurückgestreuten Schallimpulse werden mittels der schnellen Fouriertransformation (FFT) ausgewertet und die folgenden Größen berechnet:

- Rückstreuamplitude der vertikalen Antenne A_w
- Standardabweichung von A_w
- horizontale Windgeschwindigkeit, WG
- vertikale Windgeschwindigkeit, w
- Standardabweichung von w
- horizontale Windrichtung, WR
- Standardabweichung von WR

Im zugrunde gelegten Auswertezeitraum (Oktober 1984 bis September 1985) wurden diese Meßgrößen als 30-min Werte erfaßt. Die unterste Meßhöhe betrug 40 m, die 20 Höhenstufen waren äquidistant in 20 m Schichtdicken eingeteilt.

3. TEMPERATURINVERSIONEN

Bei adiabatischen Zustandsänderungen (ohne Wärmezufuhr- oder -abfuhr) in der Atmosphäre kühlt sich ein aufsteigendes Luftpaket um 0,976 K pro 100 m ab. Diese Temperaturabnahme wird adiabatischer Temperaturgradient γ genannt. Nimmt die Temperatur mit der Höhe langsamer ab oder steigt sie sogar an, so spricht man von einer Temperaturinversion. In /DI75/ findet man für den Standort KfK Statistiken des Temperaturgradienten γ als Funktion der Höhe bis 200 m ü. Gr., der Tages- und Jahreszeit sowie Stundenmittelwert von γ für die vier Jahreszeiten.

Für den Datenvergleich SODAR-Mast wurde aus jeweils drei 10-min-Werten der Mastmessungen ein Halbstundenmittelwert gebildet. Dies ergibt im betrachteten Zeitraum für die Windrichtung bzw. -geschwindigkeit und die Temperatur in jeder Meßhöhe $365 \times 48 = 17\,520$ mögliche Halbstundenwerte. Waren zwei oder drei 10-min Werte nicht vorhanden, so wurde der betreffende Halbstundenwert bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

Bei der Auswahl der Temperaturinversionen wurde unterschieden zwischen:

- Bodeninversionen (BI),
- abgehobenen Inversionen (AI).

3.1 Bodeninversionen (BI)

Derartige Situationen sind charakterisiert durch eine Temperaturzunahme, be-

ginnend bei der untersten Meßhöhe (2 m). Oberhalb der Obergrenze der Bodeninversion herrscht neutrale bis labile Temperaturschichtung (Abb. 3). Eine Abluftfahne, die sich innerhalb der Bodeninversion ausbreitet, zeigt die typische Form "fanning"; befindet sich die Achse der Abluftfahne gerade an der Obergrenze der Bodeninversion, so stellt sich die Form des "lofting" ein, (siehe Abb. 4).

In der vorliegenden Untersuchung wurden nur die stärker ausgeprägten Inversionen ($\gamma \geq 1.0 \text{ K}/100 \text{ m}$) ausgewählt. Gleichzeitig mußte oberhalb der Inversion eine Temperaturabnahme von $\gamma \leq -0.65 \text{ K}/100 \text{ m}$ vorhanden sein. Je nach Lage der Inversionsobergrenze bei 60 m, 100 m oder 130 m wurde zwischen den Typen BI1, BI2 und BI3 unterschieden, siehe Abb. 3. Aus den vorhandenen 17 402 Halbstundenwerten ergaben sich insgesamt 961 Halbstundenwerte mit BI. Dies entspricht zwar nur 5,5% der Gesamtzeit, tatsächlich tritt an jedem zweiten Tag im Jahresmittel eine derartige Situation mindestens einmal auf. Diese Situationen treten im August mit 26 Tagen am häufigsten und im Dezember mit 8 Tagen am seltensten auf. Im Mittel dauern die ausgewählten Situationen 2 h an; nur 5% dauern länger als 6 h. Am häufigsten treten die BI in den Abendstunden auf, während in der Mittagszeit keine BI zu finden sind. Abb. 6 zeigt eine Aufschlüsselung des Tagesgangs der BI für die Typen BI1 bis BI3.

3.2 Abgehobene Inversionen (AI)

Starke Bodenerwärmung durch die aufgehende Sonne verursacht dann in den frühen Morgenstunden vom Boden her ausgehend, den allmählichen Aufbau einer bodennahen Schicht mit Temperaturabnahme und damit den Abbau der Bodeninversion vom Boden her. Erreicht diese Schicht die Abluftfahne, so kann dies in größerer Entfernung zu sehr hohen Bodenkonzentrationen führen.

Bei den dann auftretenden AI nimmt die Temperatur, beginnend bei der untersten Meßhöhe, zunächst mit der Höhe ab, danach steigt sie an (Abb. 3). Die typische Form einer Abluftfahne in solchen Fällen wird "trapping" genannt, sofern die Kaminmündung noch unterhalb der Temperaturzunahme liegt. Eine solche Situation tritt häufig über Städten in bis zu 300 m Höhe auf. Der speziellen Form "fumigation" gehen Verhältnisse voraus, die ein "fanning" bewirkten. Beide Formen der Abluftfahne sind in Abb. 5 dargestellt.

Die Auswahlkriterien für AI sind analog zu den BI gewählt, siehe Abb. 3. BI sind mit 199 Fällen ($\approx 1,1\%$) relativ selten. Sie treten meist in den Frühstunden bei Sonnenaufgang auf (Abb. 7) und dauern höchstens 2 h an.

4. VERFÜGBARKEIT DER SODAR-DATEN

Zur Berechnung der Verfügbarkeit wurden nur die Zeiten berücksichtigt, in denen das SODAR tatsächlich arbeitete. Dies war der Fall in 10 061 Halbstunden, entsprechend 62% der Gesamtzeit. Für diese Zeiten wurde untersucht, wie häufig Meßwerte in Abhängigkeit der Höhe vorhanden waren. Ausfälle sind meist bedingt durch zu niedrige Rückstreuamplituden oder zu hohen Umgebungslärm.

4.1 Verfügbarkeit im gesamten Zeitraum

Unabhängig von den herrschenden Temperaturverhältnissen wurde die Verfügbarkeit des SODAR bis 420 m Höhe während der oben erwähnten 10 061 Halbstunden (≈ 100%) ermittelt und in Abb. 8 dargestellt. Windrichtung und -geschwindigkeit unterschieden sich in ihrer Verfügbarkeit kaum; sie sind daher in einer Kurve zusammengefaßt. Die Verfügbarkeit der Standardabweichungen σ_w und σ_θ des Vertikalwindes und der horizontalen Windrichtung sowie die Rückstreuamplitude A_w der vertikal ausgerichteten Antenne sind ebenfalls eingezeichnet.

Ausgehend von niedrigen Meßhöhen, nimmt die Verfügbarkeit der Windrichtung und der -geschwindigkeit nach oben zu und erreicht in 140 m mit 97% den höchsten Wert. Über 340 m sinkt die Verfügbarkeit für WR und WG unter 90%; sie beträgt in 420 m Höhe noch 80%.

4.2 Verfügbarkeit bei Bodeninversionen

Während 575 Halbstunden herrschten Bodeninversionen und gleichzeitig arbeitete das SODAR. Auf diesen Zeitraum wird die Verfügbarkeit bezogen und als prozentualer Anteil in Abb. 9 dargestellt. Die Bezeichnung der Kurven ist analog zu Abb. 8. Der Verlauf der Verfügbarkeit von WR und WG ist ähnlich wie in Abb. 8, allerdings beträgt die maximale Verfügbarkeit in 140 m Höhe 95% und fällt mit zunehmender Höhe schneller ab. So liegt die Verfügbarkeit in 240 m Höhe schon unter 90% und beträgt in 420 m Höhe nur noch 66%.

4.3 Verfügbarkeit bei abgehobenen Inversionen

Im Falle abgehobener Inversionen entsprechen 155 Halbstunden 100% Verfügbarkeit. In allen Höhen zwischen 60 m und 220 m wird eine hohe Verfügbarkeit von nahezu 99% für WR und WG erreicht (Abb. 10). Erst über 360 m Höhe liegt sie

unter 90%. Der Abfall in größeren Höhen erfolgt dann allerdings rascher im Vergleich zum gesamten Zeitraum. In 420 m Höhe beträgt die Verfügbarkeit von WR und WG nur noch 74%.

5. VERGLEICH ZWISCHEN SODAR- UND MASTDATEN

Für den Vergleich werden 30-min Werte der Windrichtung bzw. -geschwindigkeit korreliert, die mit dem SODAR und dem Mast in den Meßhöhen 60 m, 100 m, 160 m, und 200 m simultan erfaßt wurden. Werden die Wertepaare als Punkte in einem kartesischen Koordinatensystem (x-Koordinate $\hat{=}$ SODAR-Wert; y-Koordinate $\hat{=}$ Mast-Wert) eingetragen, so kann durch die sich ergebende Punktwolke eine Regressionsgerade gelegt werden:

$$y = Ax + B \quad (1)$$

Dabei wird die Summe Q der Quadrate der Abstände der Punkte von der Geraden minimalisiert. A ist die Steigung der Regressionsgeraden; B stellt den y-Achsenabschnitt dar.

$$Q = \sum_{i=1}^N (y_i - Ax_i - B)^2 \quad (2)$$

N ist die Zahl der Punkte bzw. Wertepaare x_i, y_i . Als Maß für die Stärke des Zusammenhanges der Wertepaare x_i, y_i wird der Korrelationskoeffizient

$$R = \frac{\text{cov}(x,y)}{\sqrt{\text{var}(x) \cdot \text{var}(y)}} = A \frac{\text{var}(x)}{\text{var}(y)} \\ = \frac{\frac{1}{N} \sum x_i y_i - \left(\frac{1}{N} \sum x_i\right) \left(\frac{1}{N} \sum y_i\right)}{\sqrt{\left(\frac{1}{N} \sum x_i^2 - \left(\frac{1}{N} \sum x_i\right)^2\right) \left(\frac{1}{N} \sum y_i^2 - \left(\frac{1}{N} \sum y_i\right)^2\right)}} \quad (3)$$

angegeben. Sind die Wertepaare exakt korreliert, d.h. liegen die x_i, y_i -Wertepaare auf der Regressionsgeraden, so ist $R=1$. Sind die Meßwerte x_i und y_i identisch, so ist außerdem $A=1$ und $B=0$, d.h. die Regressionsgerade wird zur Winkelhalbierenden des 1. Quadranten der x-y-Ebene.

Als Maß für die Abweichung der Wertepaare x_i, y_i wird zusätzlich die mittlere quadratische Abweichung

$$D = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (x_i - y_i)^2} \\ = \sqrt{\frac{1}{N} \sum x_i^2 + \sum y_i^2 - 2 \sum x_i y_i} \quad (4)$$

berechnet.

5.1 Gesamter Zeitraum

Das SODAR war in Betrieb vom 1. 10. 1984 19:00 MEZ bis zum 5. 9. 1985 9:00 MEZ. Dies ergibt eine maximal mögliche Anzahl von 16 253 Halbstundenwerten pro Meßgröße und -höhe. Infolge Stillstandzeiten wegen Hardwarefehlern oder Wartung am SODAR, bzw. weil das SODAR bei Feldexperimenten mehrere Wochen außerhalb des KfK stationiert war, sowie Datenausfällen während besonderer Wettersituationen arbeitete das SODAR nur ca. 5 000 Stunden lang.

Die Anzahl N korrelierbarer Wertepaare betrug so letztendlich zwischen 9 597 und 10 048. Abb. 11 und 12 und Tab. 2 zeigen die Ergebnisse des Vergleichs für die Windgeschwindigkeit. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist in den Zeichnungen nur jedes 10. Wertepaar dargestellt.

Der Korrelationskoeffizient R nimmt mit der Höhe zu, nur in 60 m Höhe ist er kleiner als 0.9. Unabhängig von der Meßhöhe ist dagegen die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung D .

Die Ergebnisse für die Windrichtung sind in Abb. 12 und Tab. 2 dargestellt. Die Korrelationskoeffizienten sind insgesamt höher, zeigen aber kaum eine Abhängigkeit von der Meßhöhe.

5.2 Bodeninversionen (BI)

Zur Beantwortung der in der Einleitung gestellten Frage, ob ein SODAR während BI die Windverhältnisse zuverlässig zu erfassen vermag, um damit die Ausbreitung von Schadstoffen abschätzen zu können, ist die Lage der Meß- bzw. Vergleichshöhe relativ zur Obergrenze der BI wichtig. Entsprechend wird in den Tabellen 3 bzw. 4 unterschieden, ob sich die Vergleichshöhe über bzw. in der BI befindet. Um die in den Tabellen 3 und 4 zusammengestellten Ergebnisse leichter mit denjenigen in Tab. 2 (gesamter Zeitraum) vergleichen zu können, sind in Abb. 13 der Korrelationskoeffizient R und die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung D für den Vergleich der Windgeschwindigkeiten dargestellt. Abb. 13 bezieht sich dabei auf Vergleichshöhen über der BI. Analog zeigt Abb. 14 die Ergebnisse für den Vergleich der Windrichtungen.

5.3 Abgehobene Inversionen (AI)

Analog wie im Abschnitt 5.2 wurde bei den Auswertungen danach unterschieden, ob die Vergleichshöhe innerhalb oder unterhalb der AI liegt. In den Tabellen 5 und 6 sind die Ergebnisse N, R, D, A und B aufgelistet. Die Abbn. 13 und 14 zeigen wiederum den Unterschied zu den Ergebnissen des gesamten Zeitraumes, wenn zwischen Inversionen und labilen bzw. neutralen Situationen nicht unterschieden wird.

6. SCHLUßFOLGERUNGEN

Zwar ist die absolute Häufigkeit von Inversionslagen relativ gering (< 7%), jedoch treten sie im Mittel an jedem zweiten Tag auf. Eine störfallbedingte Freisetzung von Schadstoffen kann aber zu jeder Zeit erfolgen, und die Windverhältnisse müssen auch während Inversionslagen zuverlässig erfaßt werden. Die wesentlichen Resultate des Vergleichs sind:

a) Windgeschwindigkeit bei abgehobenen Inversionen

- Der Korrelationskoeffizient R für Meßhöhen unterhalb der Inversionen ist nur geringfügig kleiner als im gesamten Zeitraum. Innerhalb der abgehobenen Inversionen ist R sogar größer.
- Die Standardabweichung D ist unterhalb sowie in der Inversion deutlich kleiner als im gesamten Zeitraum.

b) Windgeschwindigkeit bei Bodeninversionen

- R ist in den unteren Höhen innerhalb der Bodeninversion höher, darüber aber kleiner als im gesamten Zeitraum.
- D ist innerhalb der Bodeninversion deutlich kleiner als im gesamten Zeitraum, oberhalb der Bodeninversion wird D größer, ist aber immer noch kleiner als im gesamten Zeitraum.

c) Windrichtung bei abgehobenen Inversionen

- R ist unterhalb der Inversion deutlich geringer und in der Inversion etwa gleichgroß wie im gesamten Zeitraum.
- D ist unterhalb der Inversion nahezu doppelt so groß wie im gesamten Zeitraum, in der Inversion dagegen etwas kleiner. Für die Fälle "unterhalb der Inversion" ergab eine detaillierte Untersuchung, daß die Richtungsabweichungen zwischen SODAR und Mastdaten immer dann groß (> 60°) sind, wenn die Windgeschwindigkeit $\leq 1.0 \text{ ms}^{-1}$ beträgt.

d) Windrichtung bei Bodeninversionen

- R und D sowie deren Profile sind ähnlich wie im gesamten Zeitraum.
- Oberhalb der Bodeninversion ist D allerdings etwas größer.

e) Verfügbarkeit der SODAR-Meßwerte

- die Verfügbarkeit ist während Bodeninversionen niedriger und während abgehobener Inversionen etwas größer als während des gesamten Auswertezitraumes. In der größten Meßhöhe von 420 m liefert das SODAR auch während Bodeninversionen immer noch während 2/3 der Meßzeit Windgeschwindigkeit und -richtung.
- In den unteren Höhen ist die Verfügbarkeit während abgehobener Inversionen sogar höher als während des gesamten Auswertezitraumes.

Abschließend kann gesagt werden, daß ein SODAR die Windwerte zuverlässig zu erfassen vermag auch in Situationen mit ausgeprägten Boden- bzw. abgehobenen Inversionen. Die Bestimmung der Windrichtung in niedrigen Höhen bei Situationen mit abgehobenen Inversionen muß im Einzelfall - vor allem bei wind-schwachen Lagen - kritisch geprüft werden, da hier die größten Abweichungen im Vergleich zu den Mastmessungen auftreten. Allerdings ist die Anzeige einer Windfahne bei derartigen Situationen bekanntermaßen fragwürdig. Ein SODAR ist hier vom Meßprinzip (remote sensing Messung integriert über ein Meßvolumen) eindeutig im Vorteil.

7. LITERATUR

- /CH88/ Chintawongvanich Pr., Olsen R. Remote sensors intercomparison study. Symposium on Lower Tropospheric Profiling. 31. Mai - 3. Juni. Boulder Co. 1988
- /DI75/ Dilger H., Nester K., Vogt S.: Statistische Auswertungen des Wind-, Temperatur- und Feuchteprofils sowie der Strahlung und der Windrichtungsfluktuation am Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK 2164. 1975.
- /HO84/ von Holleuffer-Kypke R., Hübschmann W.G., Süß F., Thomas P.: Meteorologisches Informationssystem des Kernforschungszentrums Karlsruhe. Atomkernenergie, Kerntechnik Vol. 44, No. 4, 300-304. 1984.

- /H085A/ von Holleuffer-Kypke R., Hübschmann W., Thomas P.: Testbericht über das monostatische Doppler-SODAR B. KfK 3928. 1985.
- /H085B/ von Holleuffer-Kypke R., Hübschmann W., Thomas P.: Testbericht über das monostatische Doppler-SODAR R. KfK 3929. 1985.
- /KA84/ Kaimal J.C., Gaynor J.E.: An evaluation of wind measurements by four Doppler SODARs, NOAA/ERL, U.S. Department of Commerce, Boulder CO, 1984.
- /V083/ Vogt S.: Three and four-parameter diffusion statistics as a basis for calculating the long-term pollution load. KfK 3477. 1983.

TABELLE 1
Meteorologische Meßgeräte des MIS

Meßgerät	Meßgröße	Meßhöhe in m	Abfrage- rhythmus
Schalenstern- Anemometer	horizontale Windge- schwindigkeit	2, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 130, 160, 200	4 s
Blattwindfahne	Windrichtung	40, 60, 80, 100, 160, 200	4 s
	vertikale Windrichtung		1 s
	Schwankungsbreite der vert. Windrichtungsfluktuation		1 s
Vektorfahne	horizontale Windrichtung	40, 100, 160	1 s
	Schwankungsbreite der hor. Windrichtungsfluktuation		1 s
	Betrag des Windgeschwindig- keitsvektors		1 s
Pt 100-Thermo- meter	Temperatur	2, 30, 60, 100, 130, 160, 200	4 s
Taupunktsensor	Taupunkt	2, 30, 100, 200	4 s
Albedometer	Globalstrahlung		4 s
	Reflexstrahlung	2 m	4 s
Strahlungs- bilanzmesser	Einstrahlung		4 s
	Ausstrahlung		4 s
Baroferengeber	Luftdruck	1 m	10 min
Regenmesser	Niederschlag	1 m	10 min

TABELLE 2
Ergebnisse der Regressionsanalyse für
Windgeschwindigkeit und -richtung im gesamten Zeitraum.

Meßgröße	Vergleichshöhe	N	R	D	A	B
WG	200 m	9597	0.96	1.15	1.11	0.02
	160 m	9984	0.96	1.06	1.07	0.17
	100 m	10048	0.93	0.93	1.11	- 0.41
	60 m	10005	0.86	1.04	1.05	0.23
WR	200 m	9889	0.97	21.1	0.92	11.9
	160 m	9979	0.97	24.3	0.91	12.8
	100 m	9775	0.97	22.4	0.93	10.2
	60 m	9702	0.96	27.2	0.91	10.8

Es bedeutet: WG Windgeschwindigkeit
 WR Windrichtung
 N Zahl der korrelierten Wertepaare x_i, y_i
 R Korrelationskoeffizient
 D Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung
 in m/s bzw. Grad
 A Steigung der Regressionsgeraden
 B y-Achsenabschnitt

TABELLE 3
Vergleichshöhe über Inversionsobergrenze
bei Bodeninversionen BI1, BI2 oder BI3

Meßgröße	BI	Vergleichshöhe	N	R	D	A	B
WG	BI1, BI2 oder BI3	200 m	501	0.95	0.93	1.02	0.57
	BI1, BI2 oder BI3	160 m	519	0.94	0.86	0.95	0.69
WR	BI1, BI2 oder BI3	200 m	522	0.97	24.5	0.92	14.8
	BI1, BI2 oder BI3	160 m	537	0.96	28.8	0.91	15.4

TABELLE 4
Vergleichshöhe in der Inversion bei Bodeninversionen BI1, BI2 oder BI3

Meßgröße	BI	Vergleichshöhe	N	R	D	A	B
WG	B3	100 m	108	0.95	0.59	1.12	- 0.54
	B2 oder B3	60 m	307	0.92	0.58	1.15	- 0.14
WR	B3	100 m	107	0.98	20.7	0.98	6.1
	B2 oder B3	60 m	310	0.97	23.6	0.98	3.3

TABELLE 5
Vergleichshöhe in der abgehobenen Inversion

Meßgröße	BI	Vergleichshöhe	N	R	D	A	B
WG	AI1, AI2 oder AI3	200 m	130	0.97	0.69	1.02	0.26
	AI1 oder AI2	160 m	113	0.98	0.63	0.99	0.42
WR	AI1, AI2 oder AI3	200 m	153	0.96	21.8	0.94	12.7
	AI1 oder AI2	160 m	117	0.97	17.5	0.87	18.1

TABELLE 6
Vergleichshöhe unter der abgehobenen Inversion

Meßgröße	BI	Vergleichshöhe	N	R	D	A	B
WG	A2 oder A3	100 m	64	0.91	0.66	0.92	0.12
	A1, A2 oder A3	60 m	150	0.86	0.65	0.98	0.01
WR	A2 oder A3	100 m	66	0.93	43.6	0.78	23.5
	A1, A2 oder A3	60 m	153	0.86	50.7	0.69	37.1

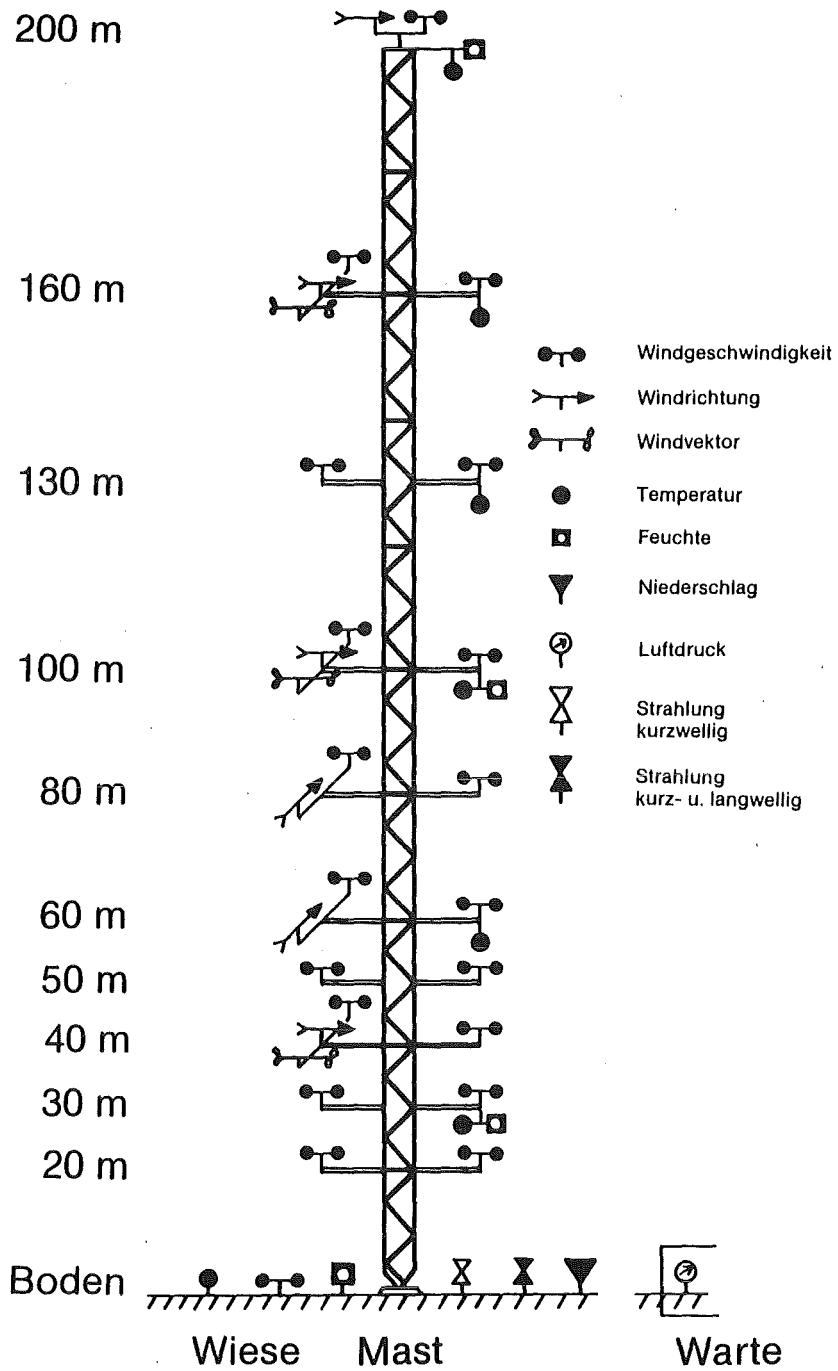


Abbildung 1: Instrumentierung des Met. Informationssystems MIS.

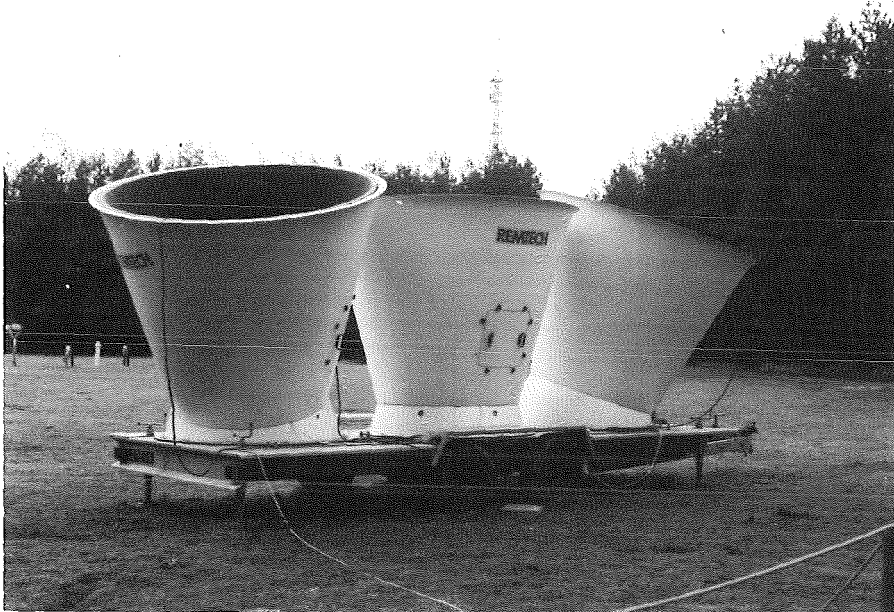


Abbildung 2: Schalltrichter des SODAR auf der meteorologischen Wiese (Meßmast im Hintergrund).

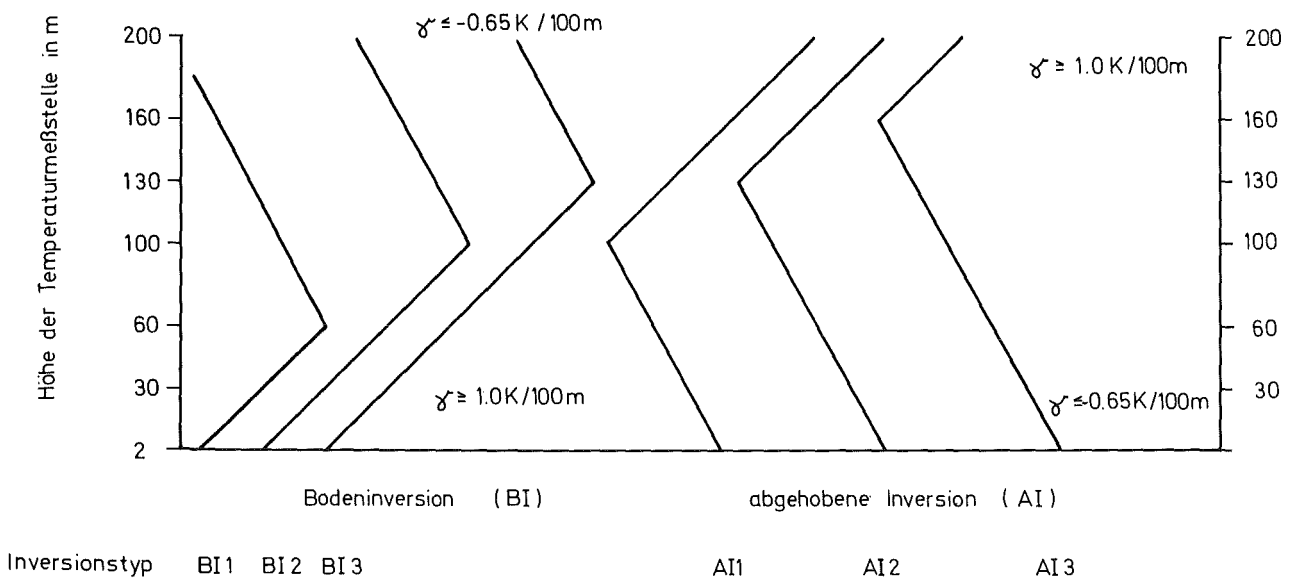


Abbildung 3: Einteilungskriterien für die Auswahl von Bodeninversionen bzw. abgehobenen Inversionen.

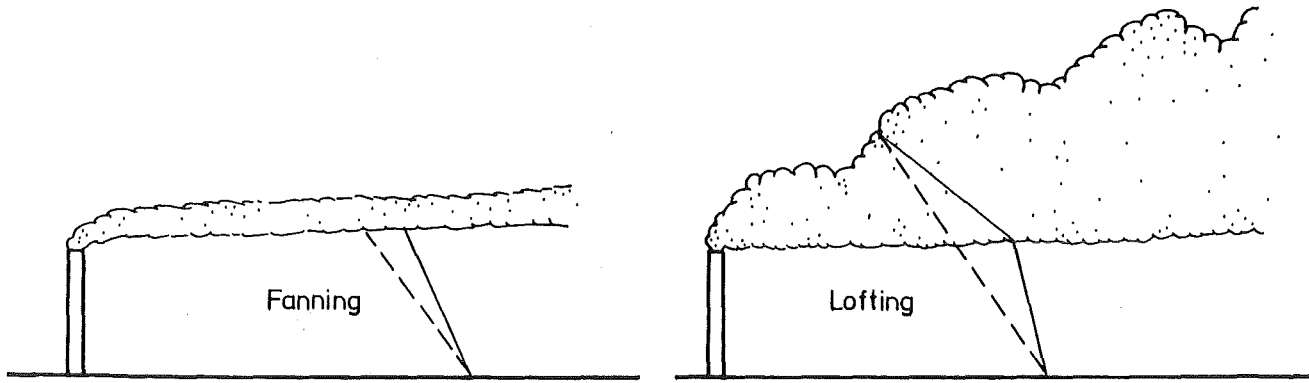


Abbildung 4: Abluftfahnen bei Bodeninversionen.
----- adiabatische Temperaturschichtung
——— aktuelle Temperaturschichtung

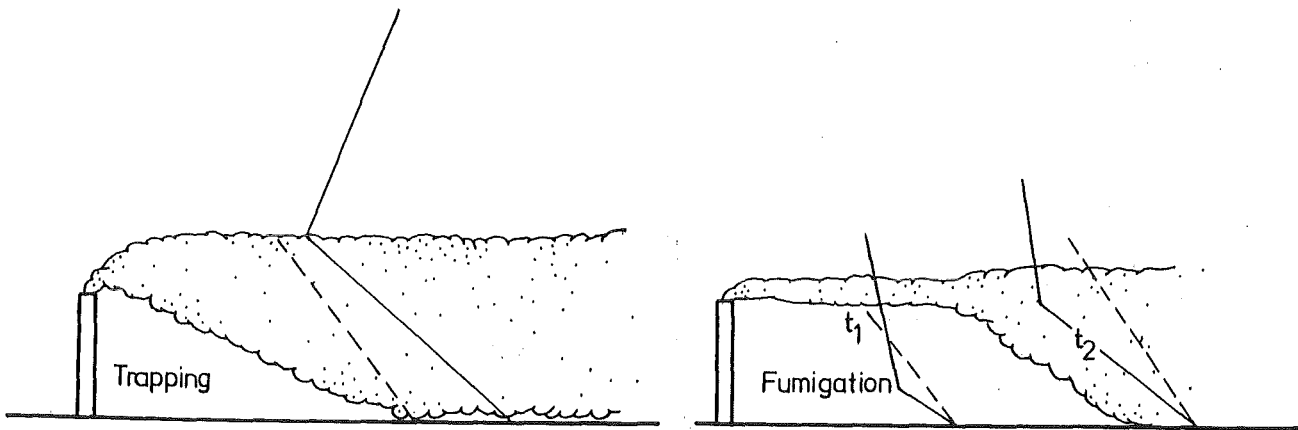


Abbildung 5: Abluftfahnen bei abgehobenen Inversionen.

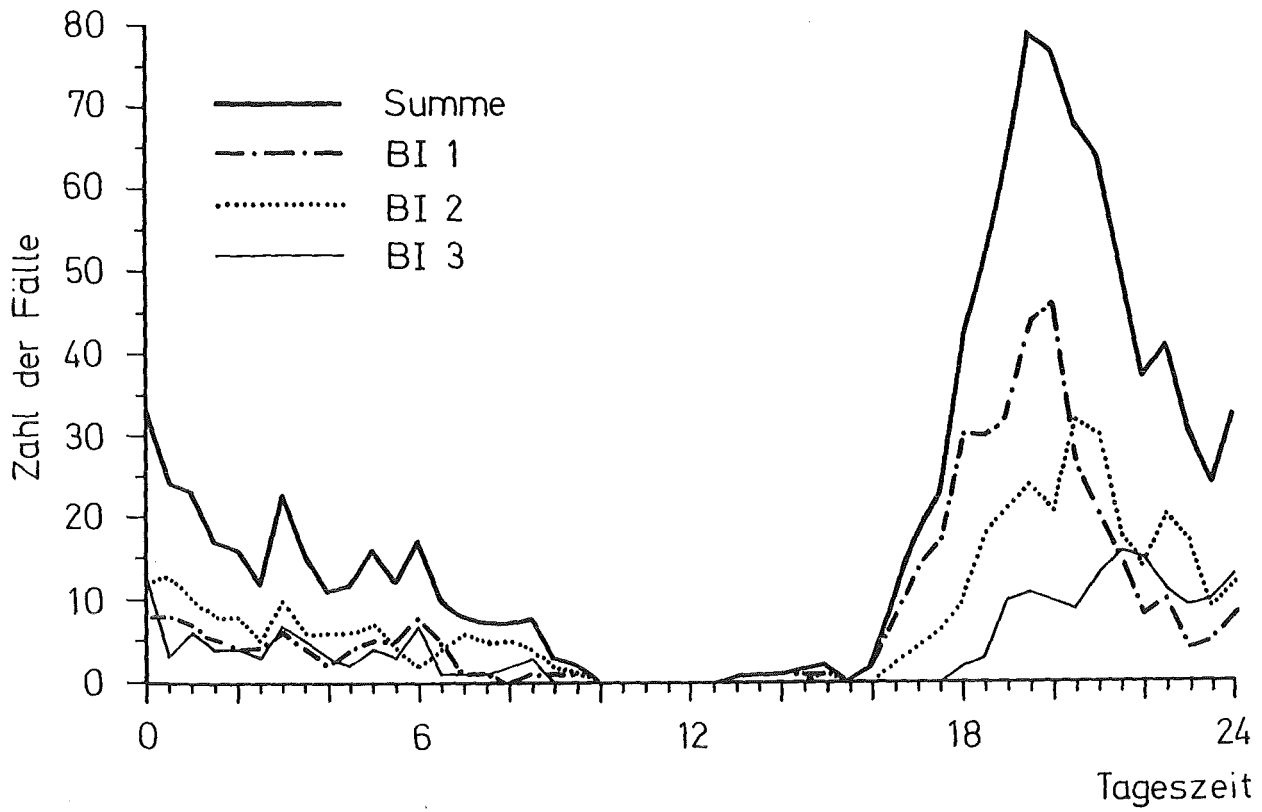


Abbildung 6: Tagesgang der Bodeninversionen getrennt nach Typen sowie deren Summe.

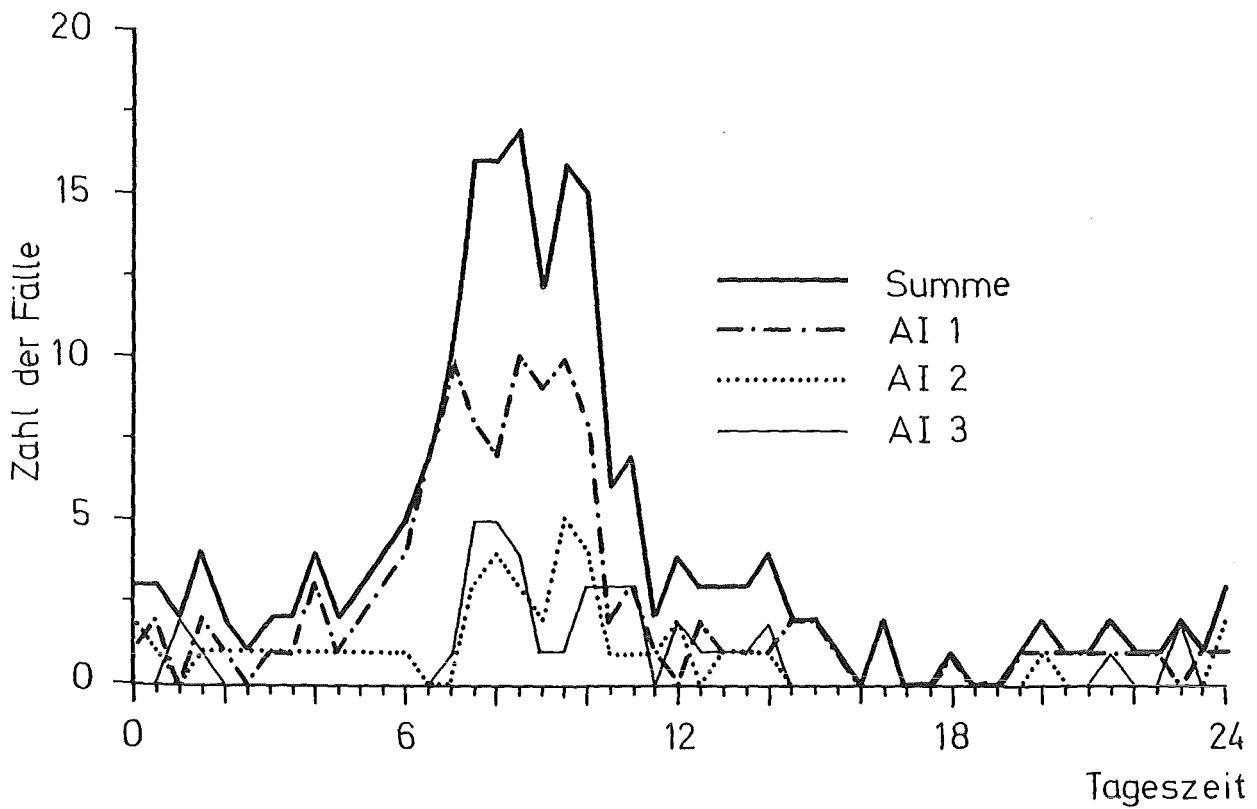


Abbildung 7: Tagesgang der abgehobenen Inversionen getrennt nach Typen sowie deren Summe.

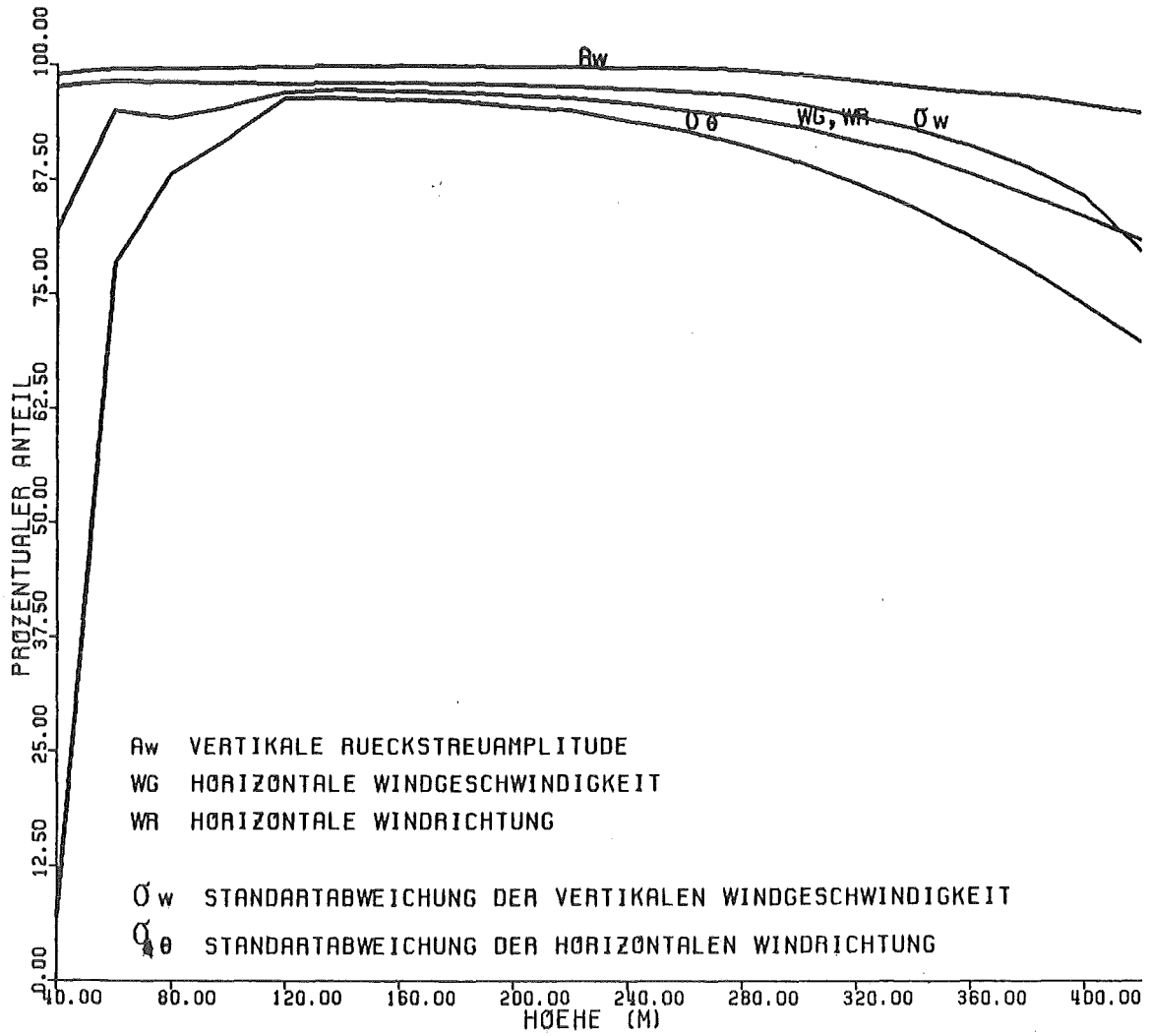


Abbildung 8: Verfügbarkeit der SODAR-Daten. Gesamter Zeitraum.

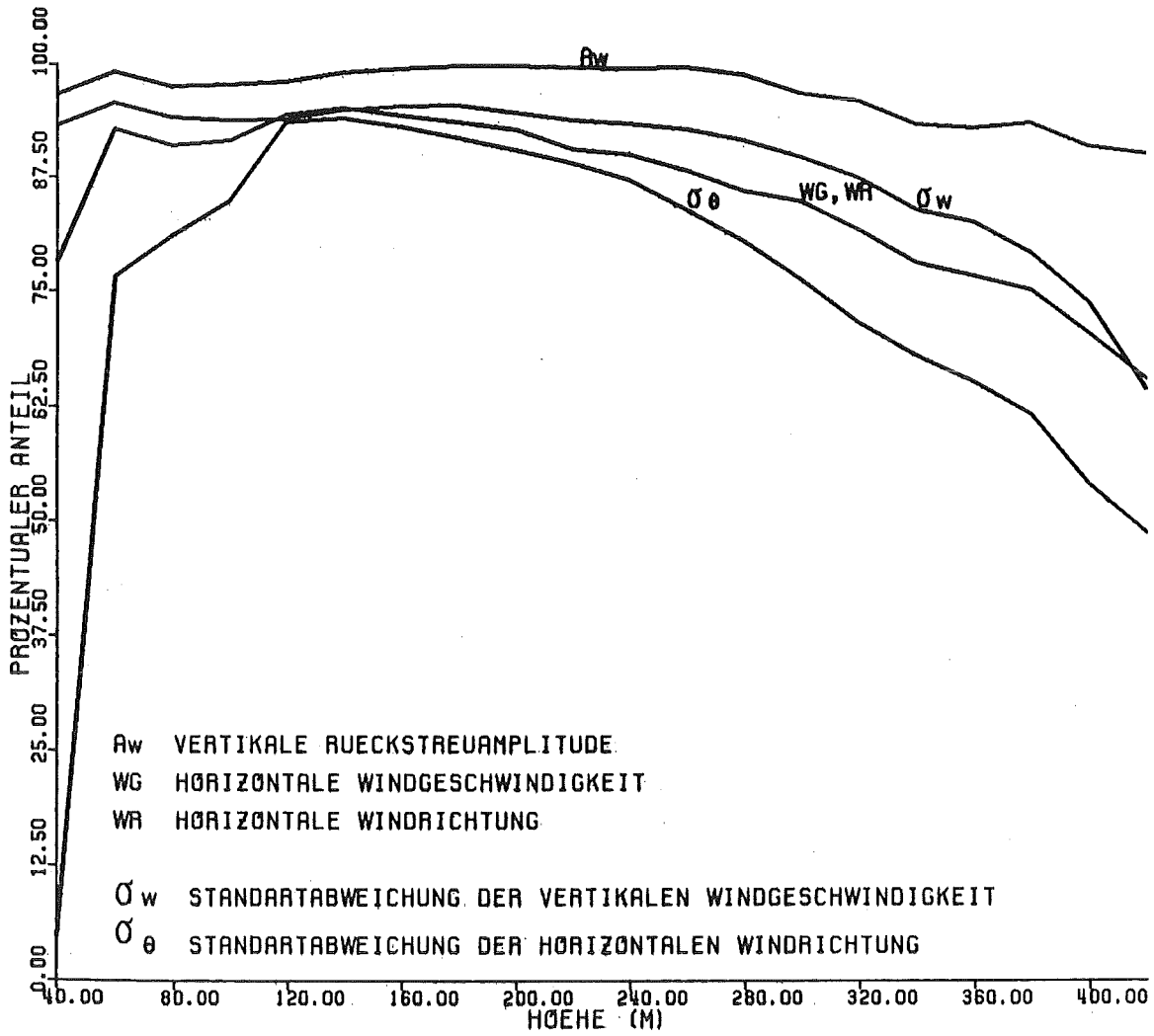


Abbildung 9: Verfügbarkeit der SODAR-Daten. Nur Bodeninversionen.

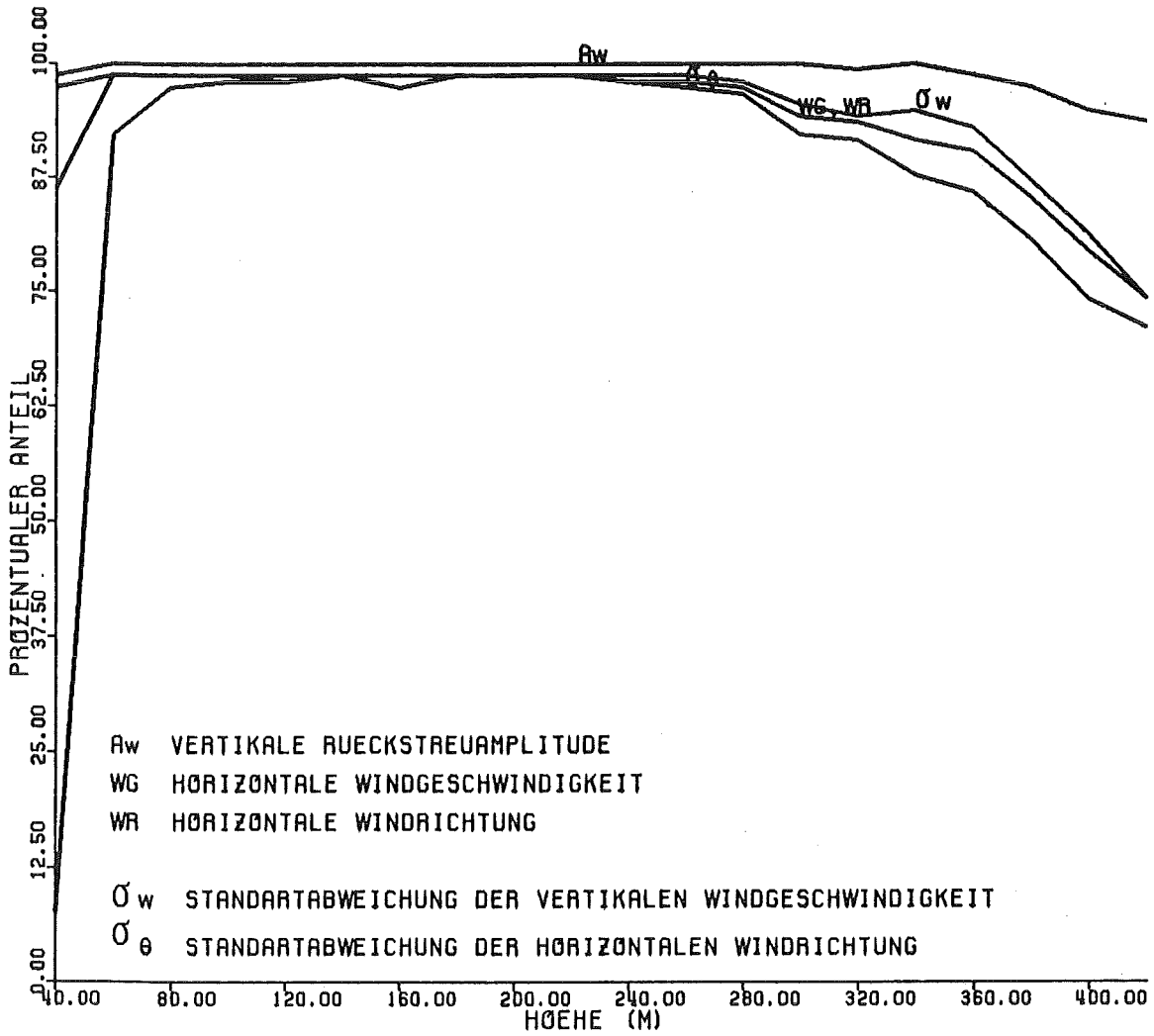


Abbildung 10: Verfügbarkeit der SODAR-Daten. Nur abgehobene Inversionen.

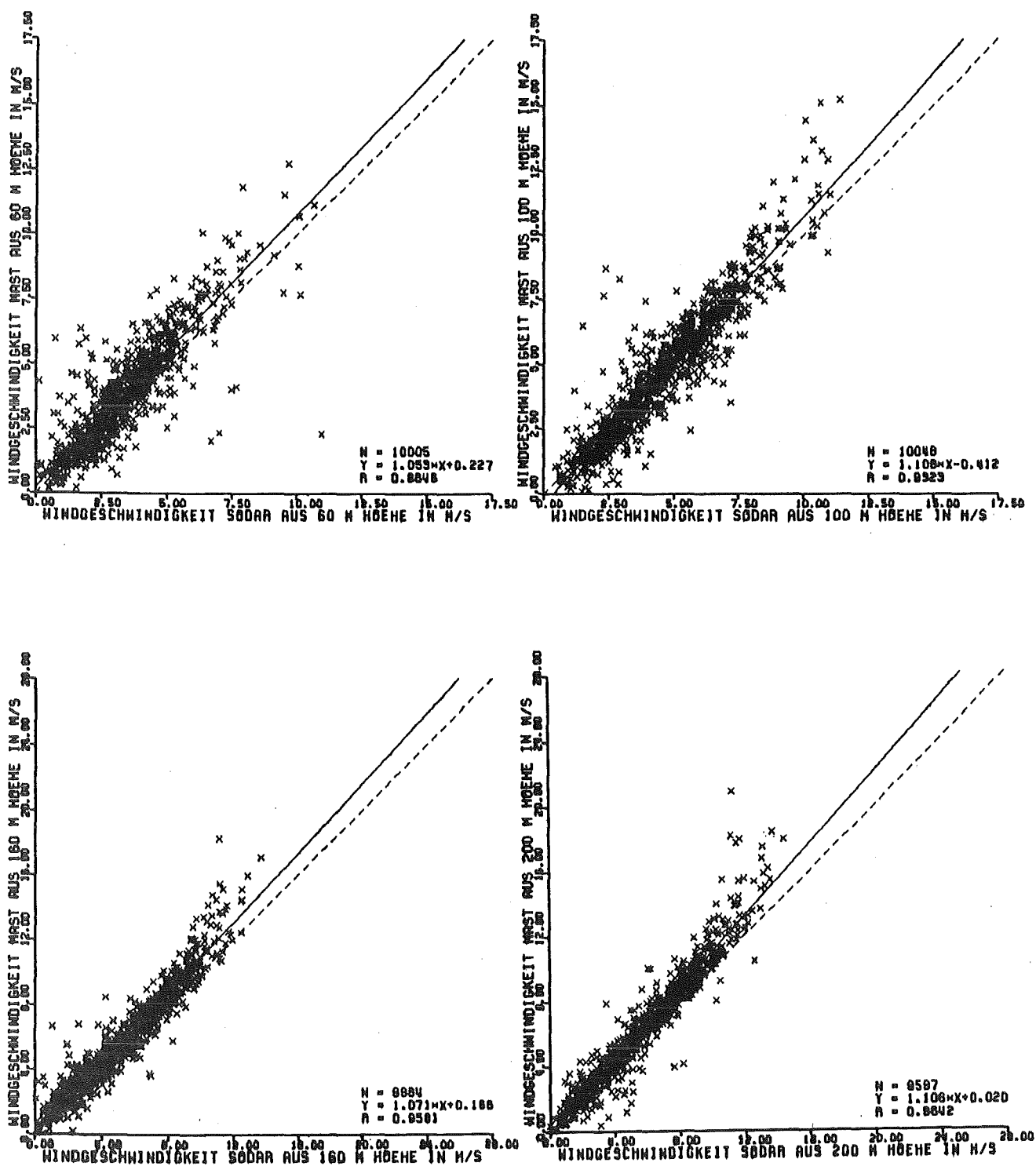


Abbildung 11: Wertepaare der Windgeschwindigkeit von SODAR und Mast. Gesamter Zeitraum (gezeichnet ist nur jedes 10. Wertepaar).
 — Regressionsgerade, --- Winkelhalbierende
 (entspricht der Regressionsgeraden, wenn keine systematischen Unterschiede zwischen den Meßwerten auftreten)

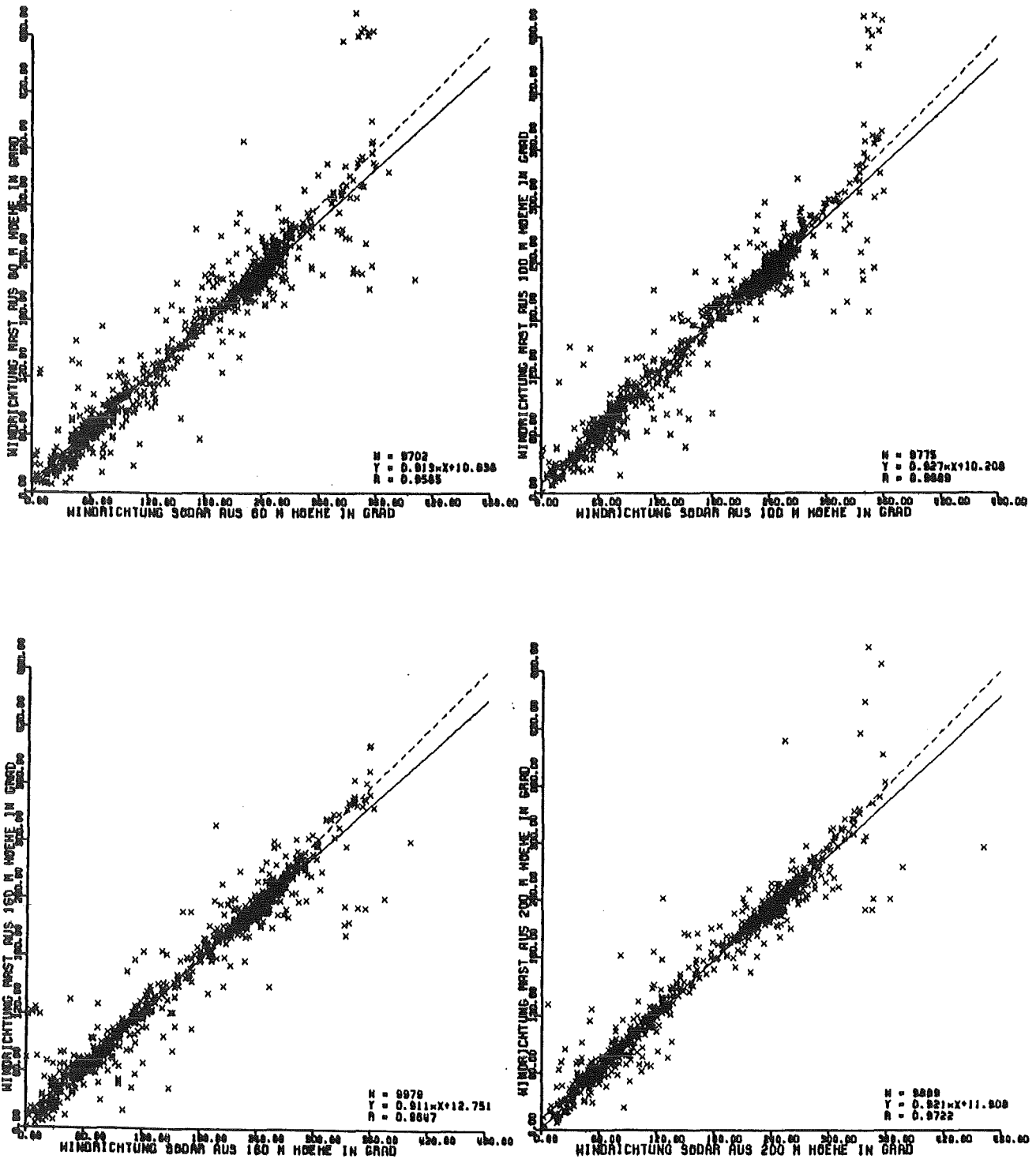


Abbildung 12: Wertepaare der Windrichtung von SODAR und Mast. Gesamter Zeitraum (gezeichnet ist nur jedes 10. Wertepaar).
— Regressionsgerade, --- Winkelhalbierende

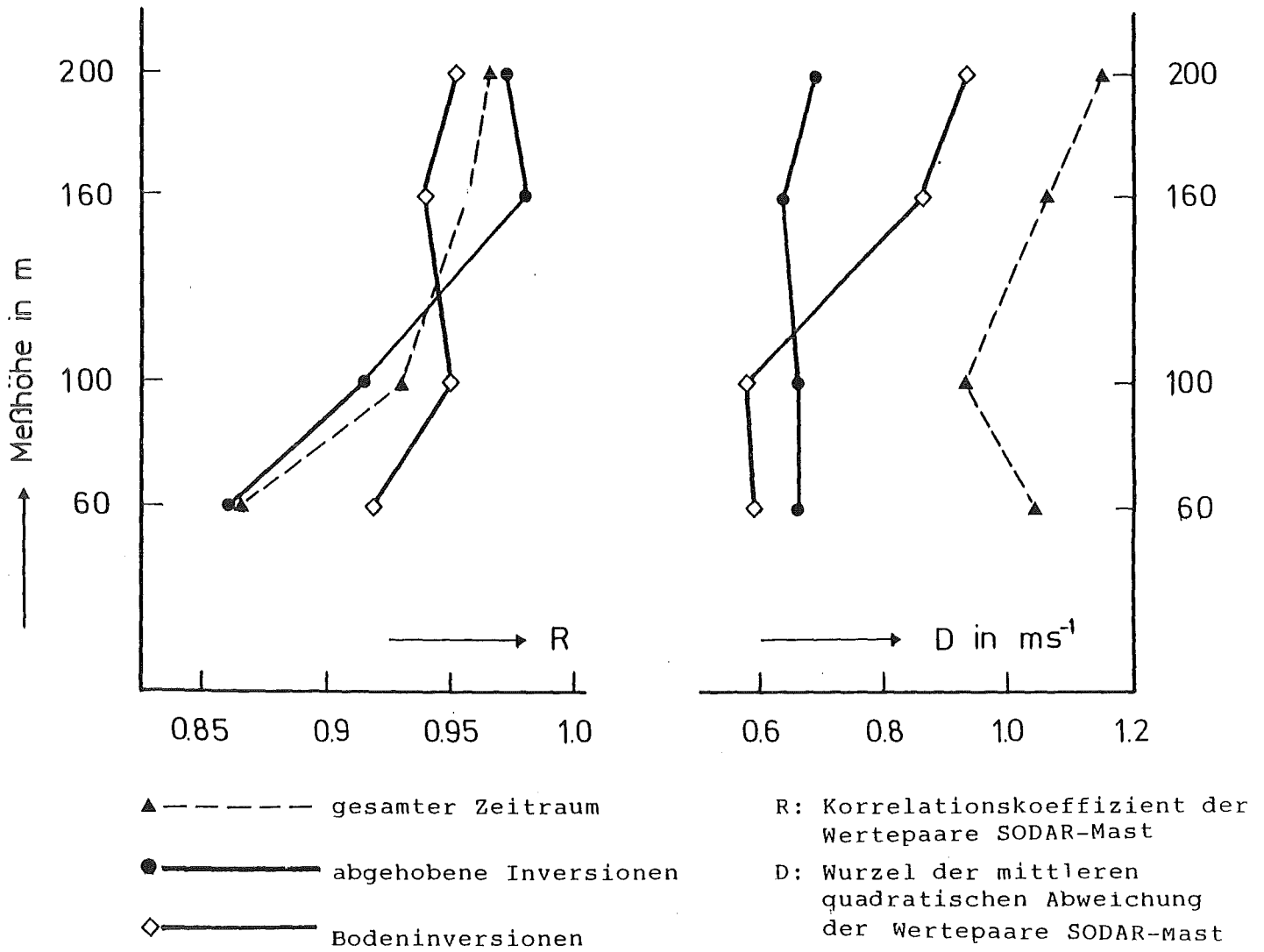


Abbildung 13: Ausgewählte Ergebnisse der Regressionsanalyse für die Windgeschwindigkeit als Funktion der Meßhöhe.

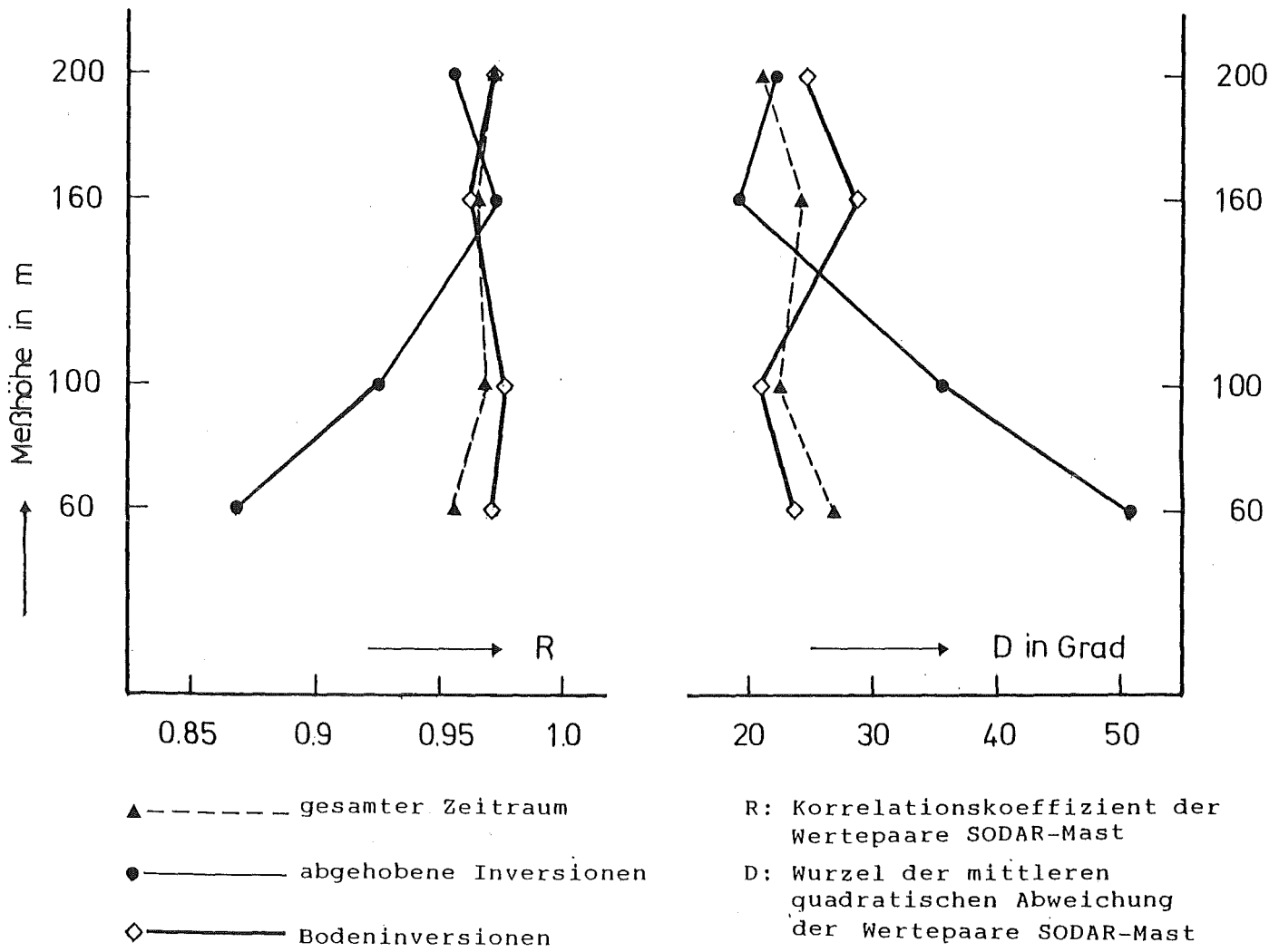


Abbildung 14: Ausgewählte Ergebnisse der Regressionsanalyse für die Windrichtung als Funktion der Meföhöhe.