

UBA - BE - 034

**MESSUNG DES WINDPROFILS
MITTELS AKUSTIKRADAR
IN GRAZ**

BERICHTE



MESSUNG DES WINDPROFILS MITTELS AKUSTIKRADAR IN GRAZ

UBA-BE-034

Wien, April 1995

Bundesministerium für Umwelt



Autoren: Wolfgang Spangl

Editorische Betreuung: Eva Langer

Impressum:

Medieninhaber und Herausgeber: Umweltbundesamt, 1090 Wien, Spittelauer Lände 5

© Umweltbundesamt, Wien, April 1995

Alle Rechte vorbehalten
ISBN 3-85457-217-4

Messung des Windprofils mittels Akustikradar in Graz

Report UBA-95-111 – Zusammenfassung

Der Raum Graz (Steiermark) ist durch charakteristische, topographisch bedingte Windverhältnisse und hohe Inversionshäufigkeit im Winter gekennzeichnet.

Zur Untersuchung des vertikalen Windprofils und der thermischen Stabilität betrieb das Umweltbundesamt vom 14.12.1989 bis 4.4.1990 in Graz ein Akustikradar (SODAR).

Im Grazer Becken tritt – vor allem an bewölkungsarmen Tagen und bei schwacher großräumiger Strömung – eine Talwindzirkulation auf; zwischen ca. 12 Uhr und 17 Uhr weht unterhalb 200 m Tal über Boden Südwind, bedingt durch Einströmen von Luft in das stärker erwärmte obere Talgebiet, in Höhen oberhalb 250 m Wind aus Nord bis West; zwischen 18 Uhr und 11 Uhr weht vertikal sehr einheitlicher Wind aus Nord bis Nordwest – bedingt durch Ausströmen kalter Luft aus dem Murtal. Am Talboden herrscht nachts und vormittags meist sehr schwacher unbeständiger Wind, nachmittags Südwind. Die Calmenhäufigkeit beträgt am Boden 67 %, in 100 m 7 %, in 200 m 4 %.

Die Windrichtungshäufigkeitsverteilung (Windrose) zeigt, entsprechend der Richtung des Murtales, in allen Höhen bis 250 m deutliches Überwiegen von Süd- und Nordwind, wobei sich mit der Höhe das Häufigkeitsmaximum von Nord nach Nordwest verschiebt. Dies ist eine Folge der Topographie des Murtales im Norden von Graz, wo die Hubertushöhe als östlicher Ausläufer des Plabutsch das Tal in den untersten 200 m einengt; dadurch tritt in den untersten 200 m nur Nordwind, darüber auch Nordwestwind auf. Westwind wird nur oberhalb 200 m beobachtet, wo die Überströmung der südlich des Plabutsch gelegenen Hügel möglich ist.

Der Vergleich der Echointensitäten als Maß für die thermische Stabilität der Atmosphäre mit Temperaturwerten von Graz-Mitte und Schloßberg zeigt, daß hohe Echointensitäten, welche als Indikator für Inversionsuntergrenzen herangezogen werden, nicht nur bei Inversionen, sondern auch bei isothermem Temperaturgradienten auftreten; unter diesem Gesichtspunkt ist die Klassifizierung eines Bereichs hoher Echointensität als "Untergrenze einer Inversion" zu speziell, man sollte eher von einem "sehr stabil geschichteten Höhenbereich" sprechen.

Boden- oder bodennahe Inversionen mit Untergrenzen unter ca. 150 m treten fast ausschließlich an wolkenarmen Tagen auf, an welchen es nachts zu Ausstrahlung und damit zu kontinuierlicher Abkühlung am Boden kommen kann.

Inversionen sind schwächer ausgeprägt oder fehlen, sobald sich in der Nacht Nebel bildet und damit die weitere Abkühlung verhindert. Bisweilen treten abgehobene Inversionen an Tagen mit Hochnebel auf, an denen man möglicherweise die Inversionsuntergrenze mit jener des Hochnebels gleichsetzen kann.

Während der untersuchten SO₂-Episoden zeigen Boden- und bodennahe Inversionen mit Untergrenzen unterhalb 200 m den größten Einfluß auf die SO₂-Belastung; höhergelegene Inversionen wirken sich bisweilen kaum auf das Immissionsgeschehen aus. Von entscheidender Bedeutung ist die Stabilität unterhalb einer abgehobenen Inversion; herrschen unterhalb der Inversion labile Bedingungen, so ist Schadstoffverdünnung möglich, die ein Anwachsen der SO₂-Konzentration verhindert oder verzögert; stabile Ausbreitungsbedingungen oder das Auftreten einer Bodeninversion unter einer abgehobenen Inversion führen zu hohen SO₂-Konzentrationen.

Die untersuchten Episoden zeigen, daß die Windgeschwindigkeiten gerade an wolkenarmen Tagen, an welchen Inversionen auftreten, in Bodennähe sehr gering sind und nachmittags 2 m/s, nachts 0.5 m/s nicht überschreiten; auch in dem vom SODAR erfaßten Bereich bis ca. 300 m übersteigen die Windgeschwindigkeiten selten 5 m/s.

Wind Profile Measurement by SODAR in Graz *Report UBA-95-111 – Summary*

The region of Graz (Styria) shows specific, topographically induced wind conditions and, especially in winter, a high inversion frequency.

The Federal Environment Agency therefore conducted measurements by SODAR (Sound Detecting and Ranging) between Dec. 14th, 1989 and April 4th, 1990 in order to investigate the vertical wind profile and the thermal lapse rate.

In the Graz Basin a valley wind circulation is observed particularly on days with low cloud cover and slow synoptic flow. South wind occurs below 200 m above ground between 12 a.m. and 5 p.m., for the rest of the day north to northwest winds blow. Above 250 m north to northwest winds prevail during the day. At the bottom of the valley there is very weak, changing winds at night, southerly winds in the afternoon. The calm frequency is 67% at the bottom of the valley, 7% 100 m above ground, 4% 200 m above ground.

The wind rose shows a clear prevalence of south and north winds up to 250 m above ground, with the frequency maximum moving to northwest with increasing altitude. This is due to the topography of the Mur valley, which is narrowed by the Hubertushöhe at the east slope of the Plabutsch (200 m above bottom of the valley); this is why below 200 m there is only north wind, whereas above there are also northwest winds. West winds occur only above 200 m, where they can flow over the hills in the south of the Plabutsch.

A comparison of the SODAR-Echo-Intensities and the temperatures measured in the Center of Graz and at the Schlossberg reveals that high echo intensities – which are used to indicate the lower boundaries of inversions – not only occur during inversions but also in connection with isotherm lapse rates; therefore a region of high echo intensities should be addressed as a “region of very stable lapse rate” instead of the lower boundary of an inversion.

Ground level inversions or inversions with lower boundaries below 150 m occur almost exclusively on days with low cloud cover, when high radiation at night leads to continuously falling temperatures near the ground.

Inversions are weaker or absent as soon as fog forms at night, which prevents further cooling of the ground. Sometimes lifted inversions occur on days with stratus cover; then the lower boundary of the inversion may be identified with the lower boundary of the cloud cover.

During the investigated sulfur dioxide episodes ground level inversions or inversions with lower boundaries below 200 m show the strongest impact on the SO₂ concentrations; higher inversions usually do not affect the air pollution. The lapse rate below lifted inversions appears to be of crucial importance, unstable lapse rates promote enhanced dispersion, thus inhibiting an increase in the concentration of SO₂, whereas stable lapse rates or even ground level inversions below lifted inversions lead to high concentrations.

Especially on days with low cloud cover and inversions the wind speed near the ground is very low (0.5 m/s at night, 2 m/s in the afternoon), even 300 m above ground it does not exceed 5 m/s.

INHALT

1	MOTIVATION DER MESSKAMPAGNE	1
2	MESSZEITRAUM UND AUFSTELLUNGSORT	1
3	WINDRICHTUNGSHÄUFIGKEIT	3
4	TAGESGANG VON WINDRICHTUNG UND –GESCHWINDIGKEIT	6
4.1	Windrichtung	6
4.2	Windgeschwindigkeit	8
5	SCHWEFELDIOXID–BELASTUNG	9
5.1	SO ₂ –Emission	9
5.2	Schwefeldioxid–Belastung in Graz	10
5.3	Schadstoffwindrosen	11
6	INVERSIONEN	13
7	FALLSTUDIEN	14
7.1	Episode 6. bis 14. Jänner 1990	15
7.1.1	Großwetterlage und Witterungsverlauf	15
7.1.2	Immissionssituation	17
7.1.3	Lokale Meteorologische Situation	18
7.1.4	Zusammenhang von Immission und Meteorologie	23
7.2	Episode 17. bis 28. Jänner 1990	25
7.2.1	Großwetterlage und Witterungsverlauf	25
7.2.2	Immissionssituation	27
7.2.3	Lokale Meteorologische Situation	28
7.2.4	Zusammenhang von Immission und Meteorologie	32
7.3	Episode 4. bis 10. Februar 1990	33
7.3.1	Großwetterlage und Witterungsverlauf	33
7.3.2	Immissionsverlauf	34
7.3.3	Lokale Meteorologische Situation	35
7.3.4	Zusammenhang von Immission und Meteorologie	36
7.4	Episode 3. bis 10. März 1990	37
7.4.1	Großwetterlage und Witterungsverlauf	37
7.4.2	Immissionssituation	38
7.4.3	Lokale Meteorologische Situation	38
7.4.4	Zusammenhang von Immission und Meteorologie	41
8.	ZUSAMMENFASSUNG	42
8.1.	Wind	42
8.2.	Inversionen	43
8.3.	Bedeutung der Stabilitäts– und Windverhältnisse für das Immissionsgeschehen	45



1 MOTIVATION DER MESSKAMPAGNE

Im Bereich der Stadt Graz stellt erhöhte Luftschadstoffbelastung vor allem im Winter ein nennenswertes Umweltproblem dar. Wegen der erfahrungsgemäß außergewöhnlich hohen Belastung bei Schwefeldioxid (SO_2) und Stickstoffdioxid (NO_2) ist das Stadtgebiet von Graz als Smogalarmgebiet ausgewiesen, wenngleich in den letzten Jahren niemals Smogalarmgrenzwerte überschritten wurden; es kam allerdings häufig zu Überschreitungen von SO_2 -Grenzwerten der Immissionsschutzvereinbarung (BGBl. 443/1987).

Verantwortlich dafür sind neben der regional vergleichsweise hohen Emissionsdichte von SO_2 und Stickoxiden die topographische Situation und die damit verbundenen meteorologischen Verhältnisse.

Das Grazer Becken liegt am Alpensüdrand und ist damit gegenüber Nord- und Westwind abgeschirmt; die Lage am Ausgang des Murtales bewirkt die häufige Ausbildung eines thermisch induzierten Talwindsystems mit Nordwind (Talauswind) nachts und vormittags und Südwind (Taleinwind) am Nachmittag; Süd- und Nordwind stellen die bei weitem überwiegenden Windrichtungen dar. Die Windgeschwindigkeiten sind, insbesondere in Bodennähe, häufig sehr gering, was den Luftmassenaustausch und damit die horizontale Verdünnung von Schadstoffen hemmt.

Zudem ist das Grazer Becken ein Gebiet mit hoher Inversionshäufigkeit v.a. im Winter. Bei Hochdruckwetterlagen bilden sich häufig Boden- oder bodennahe Inversionen aus, insbesondere an wolkenarmen Tagen, an denen es nachts und morgens zufolge Ausstrahlung zu sehr tiefen Temperaturen am Talboden kommt.

Die bisherigen Kenntnisse über die Wind- und Temperaturverteilung in Graz wurden aus Fesselballonmessungen sowie aus Bodenmessungen gewonnen.

Ziel der SODAR-Meßkampagne war es, sowohl Aufschluß über die Windverhältnisse über Graz zu erhalten, als auch Information über das – gerade im Winter für das Immissionsgeschehen kritische – Auftreten von Inversionen zu gewinnen.

2 MESSZEITRAUM UND AUFSTELLUNGORT

Das SODAR (Akustikradarsystem) wurde in Graz vom 14. Dezember 1989 bis 4. April 1990 vom Umweltbundesamt betrieben.

Das Gerät war auf einem freien Gelände bei der Brauerei Reininghaus aufgestellt. Es wurden Windrichtung und -geschwindigkeit in Höhen bis 500 m über Grund erfaßt, sowie die Echo-Intensität als Maß für Turbulenz bzw. Inhomogenität der Atmosphäre.

Die Anlage wurde von Dr. H. Hojesky und F. Zimmerl betreut, und zwar in Zusammenarbeit mit dem Amt der Stmk. Landesregierung, Fachabteilung Ia. Tatkräftige Hilfe hat das Umweltbundesamt von Doz. Dr. R. Lazar, Universität Graz, bekommen, vor allem bei der Platzwahl für das Akustikradarsystem. Sein Kollege Pilz hat wesentlich zur störungsfreien Messung beigetragen, indem er den Betrieb des Akustikradars kontrolliert hat.

Das Akustikradar war in Graz auf einer Fläche ca. 200 m östlich der Brauerei Reininghaus und ca. 300 m südlich des Köflacher Bahnhofs aufgebaut (Abb. 1). Der Standort war insofern günstig, als der Umgebungslärm für städtische Verhältnisse relativ gering war. Die große Fläche war ideal, um Echos an Gebäuden oder Bäumen sowie Lärmbelästigung von Anrainern vermeiden zu können. Das System stand ungefähr auf Höhe des Stadtzentrums (ca. 360 m) und

westlich der Talmitte (1.5 km westl. der Mur). Somit war die Gewähr gegeben, einen für das Grazer Becken repräsentativen Standort zu haben.

Neben dem SODAR wurde eine mobile Wetterstation (SEDAC-Anlage) betrieben, welche Windgeschwindigkeit und -richtung in 6 m Höhe registrierte.

In die Untersuchung einbezogen werden zudem Daten von folgenden Meßstellen des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung, welches freundlicherweise die Daten zur Verfügung gestellt hat:

- Windrichtung und -geschwindigkeit an der Immissionsmeßstelle Graz Süd;
- Temperaturwerte der Meßstellen Graz Mitte, Schloßberg, Platte und Plabutsch-Fürstenstand;
- Schwefeldioxid-(SO₂-)Konzentrationen der Meßstellen Graz Süd, Graz West, Graz Nord und Graz Mitte.

Die genannten Immissionsmeßstellen befinden sich am Talboden. Die Temperaturmeßstelle Schloßberg liegt auf dem Gipfel des Schloßberges in 450 m Seehöhe, Platte auf dem Platte-Gipfel in 661 m Seehöhe, Plabutsch-Fürstenstand auf dem Gipfel des Plabutsch in 763 m Seehöhe. Von diesen drei Temperaturmeßstellen liegen Meßwerte ab 1.3.1990 vor.

Technische Beschreibung der SODAR-Anlage

“SODAR” bedeutet “Sound Detecting and Ranging”. Dieses Gerät sendet akustische Signale aus und empfängt das Echo dieser Signale.

Das Akustikradar-(SODAR-)system, das das Umweltbundesamt betreibt, ist ein monostatisches System, bei dem Sender und Empfänger eine Einheit bilden. Das System besteht aus drei Antennen; eine Antenne ist senkrecht nach oben gerichtet, die beiden anderen um 30 Grad aus der Vertikalen geneigt; die Neigungsachsen dieser beiden Antennen stehen in einem Winkel von 90 Grad zueinander. In diesen befindet sich ein Sender, der auch als Empfänger für die Echos fungiert.

Das Gerät sendet Schallwellen aus, welche an Dichteinhomogenitäten in der Atmosphäre rückgestreut (reflektiert) und vom Empfänger registriert werden. Die senkrechte Antenne mißt die Intensität des rückgestreuten Echos sowie die vertikale Windgeschwindigkeit; die beiden geneigten Antennen messen die horizontalen Windgeschwindigkeitskomponenten. Die Windmessung erfolgt unter Ausnützung des Dopplereffektes, d.h. der Frequenzverschiebung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der rückstreuenden Teilchen relativ zum Empfänger.

Die Echointensität läßt Aussagen über die Homogenität bzw. Turbulenzstruktur der Atmosphäre zu, wobei die Streuung der Vertikalgeschwindigkeit weitere Information liefert. Hohe Echointensitäten stehen häufig mit Inversionsuntergrenzen in Verbindung, können aber auch durch Konvektion bei starker Bodenerhitzung oder durch starke Windscherung bedingt sein.

Die technischen Daten des Akustikradarsystems können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Die Schallfrequenz, mit der das System arbeitet, beträgt 2300 Hz (liegt also im hörbaren Bereich);
- die Sendeleistung beträgt 300 Watt (100 Watt je Antenne);
- das rückgestreute Echo liegt in einem Leistungsbereich von 1 bis 10 Mikrowatt.
- Die Dauer des Tonimpulses beträgt bei dem in Graz angewandten Betriebsmodus 150 Millisekunden; der Abstand der Tonimpulse beträgt 4 Sekunden.

- Der Durchmesser des Parabolspiegels beträgt 1.2 m und die Strahlbreite des ausgesendeten Signals ist 9 Grad. Die Genauigkeit der Windmessung beträgt bei der Geschwindigkeit $\pm 0,2$ m/s und bei der Richtung ± 5 Grad.
- Der Höhenbereich, in dem das Akustikradar in Graz arbeitete, reicht von 50 m bis maximal 500 m über Grund.
- Die vertikale Auflösung, d.h. die Mächtigkeit der Schicht, für die die einzelnen Werte gelten, beträgt für den Wind 25 m, bei der Echointensität 5 m.
- Die Integrationszeit ist 30 Minuten, es wurden also Halbstundenmittelwerte (HMW) gebildet.

Soferne nichts anderes angeführt ist, handelt es sich bei allen angegebenen Werten um Halbstundenmittelwerte (HMW).

3 WINDRICHTUNGSHÄUFIGKEIT

Die Windrichtungshäufigkeitsverteilung ist durch die Topographie des Murtales und Grazer Beckens und die dadurch bedingten herrschenden Zirkulationsverhältnisse bestimmt. Das sich nach Norden hin verengende Grazer Becken bedingt, daß Nord- und Südwind die überwiegenden Richtungen darstellen.

Entsprechend den gängigen meteorologischen Erfahrungen bildet sich im Murtal und Grazer Becken bei ungestörten Verhältnissen – d.h. Wetterlagen mit geringer Bewölkung und geringer Beeinflussung des bodennahen Windfeldes durch die synoptische Strömung – ein Talwind-system aus, bei welchem nachts Nordwind, tagsüber (bzw. nachmittags) Südwind beobachtet wird. Diese Zirkulation wird durch die tagsüber stärkere Erwärmung des oberen Talgebietes gesteuert, wo Luft aufsteigt, was in Bodennähe das Einströmen von Luft nach Norden in das Murtal zur Folge hat (Taleinwind); nachts fließt kalte Luft das Murtal herab (Talauswind).

Die Häufigkeit der gemessenen Windrichtungen wird in Windrosen in einer 36-teiligen Richtungsskala dargestellt.

Nordwind entspricht der Richtung 360 Grad (Windrichtungsklasse 36), Ostwind 90 Grad (Windrichtung 9), Südwind 180 Grad (Windrichtungsklasse 18), Westwind 270 Grad (Windrichtungsklasse 27), u.s.w.

Abb. 2 zeigt die Windrichtungsverteilung des Windes am Boden (10 m Höhe, Meßstelle Graz Süd), Abb. 3 bis Abb. 7 die Windrichtungshäufigkeit des mit dem SODAR gemessenen Windes in den Höhenstufen von 50 m bis 250 m über Boden. In Höhen über 250 m liegen zu wenige Echos vor, um repräsentative Aussagen machen zu können. Windgeschwindigkeiten unter 0.5 m/s wurden als Calmen (Windstille) klassifiziert und sind nicht in die Häufigkeitsverteilung miteinbezogen.

In allen Höhenstufen über dem SODAR-Standort dominiert bei weitem Nord- bis Nordnordwestwind.

Während in 50 m Höhe die Häufigkeitsverteilung bei Nordwind (355 bis 5 Grad) mit 20.4 % ein scharfes Maximum aufweist, tritt in größeren Höhen zunehmend mehr Nordnordwestwind auf. In Höhen oberhalb 250 m tritt ein sekundäres Maximum der Häufigkeitsverteilung bei Westnordwestwind auf.

Da die Messungen im Winter durchgeführt wurden, ist der Zeitraum mit Talauswind, d.h. Nordwind, wesentlich länger als der Zeitraum mit Taleinwind, d.h. Südwind. Zudem ist der Taleinwind mit geringen Windgeschwindigkeiten verbunden, die häufig bereits als Calmen eingestuft werden, was das Überwiegen von Nord- bzw. Nordnordwestwind in der Windrichtungsstatistik zusätzlich verstärkt.

Die Drehung des Windes von Nord auf Nordnordwest mit zunehmender Höhe ist durch die Topographie des nordwestlich der Meßstelle gelegenen Plabutsch bedingt. Diesem östlich vorgelagert ist die Hubertushöhe, die ins Murtal vorspringt und sich ca. 200 m über den Talboden erhebt. Dadurch tritt in den untersten Niveaus der Talauswind primär als Nordwind auf. Oberhalb dieses Hindernisses kommt der Talauswind mehr aus Nordnordwest; hier wird das Murtal durch den sich ca. 400 m über den Talboden erhebenden Fürstenstand (Gipfel des Plabutsch) eingeengt.

Der in höheren Niveaus gemessene Westwind kommt durch Überströmung der südlich des Plabutsch gelegenen Hügel zustande, die die untersten Luftschichten gegen Westen abschirmen.

Auffallend ist die außerordentlich hohe Calmenhäufigkeit von 66.9 % in Graz Süd gegenüber 8.0 % in 50 m über dem SODAR. Bei Windgeschwindigkeiten über 0.5 m/s dominiert, anders als in 50 m über dem SODAR, in Graz Süd Südwind bei weitem; die Nordwindhäufigkeit macht ca. ein Viertel jener von Südwind aus, Ostwind tritt fast nie auf.

Dies ist die Folge der sehr geringen Windgeschwindigkeiten, die nachts am Boden auftreten, sodaß jene Tageszeit, während derer Nordwind zu erwarten ist, in der Windrichtungsstatistik zumeist bereits unter Windstille fällt.

Die Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit von der Windrichtung zeigt für Graz Süd ein Maximum bei Windrichtungen von 160 bis 210 Grad mit Geschwindigkeiten bis 2 m/s, ansonsten liegen sie zumeist unter 1 m/s; bei Wind aus 170 bis 360 Grad (West) traten vereinzelt Geschwindigkeiten bis 5 m/s auf.

Demgegenüber zeigt die Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit in 50 m Höhe von der Windrichtung die höchsten Werte bei Nordwind, wo im Sektor von 310 bis 20 Grad Geschwindigkeiten bis 8 m/s, vereinzelt bis 20 m/s auftraten; ein sekundäres Maximum tritt bei Südwind (140 bis 200 Grad) mit Geschwindigkeiten bis 4 m/s auf; vereinzelt hohe Geschwindigkeiten traten bei Westwind (bis 10 m/s) auf.

Zum Vergleich der Windverhältnisse in Graz werden Daten der Meßstellen Schöckl und Graz Flughafen (Thalerhof) herangezogen. Die Meßstelle Schöckl befindet sich in exponierter Lage nördlich von Graz und zeigt weitgehend die Windverhältnisse in der freien Atmosphäre.

Graz Flughafen liegt südlich von Graz im Grazer Becken, wo dieses deutlich weiter ist als im Stadtgebiet; dort sind die Variabilität der Windrichtung – bei Dominieren von Nord und Süd – größer als in Graz und die Calmenhäufigkeit geringer.

Tabelle 1 gibt die Windrichtungshäufigkeitsverteilung in Prozent (%) am Gipfel des Schöckl (Gipfelhöhe 1436 m) im Norden von Graz an, und zwar für 8 Windrichtungsklassen (NE, E,, NW, N), C bedeutet Calme (Windstille).

<i>Tab. 1: Windrichtungshäufigkeitsverteilung in % am Gipfel des Schöckl</i>				
	<i>Dez. 1989</i>	<i>Jän. 1990</i>	<i>Feb. 1990</i>	<i>März 1990</i>
<i>NE</i>	1.1	0.0	0.0	1.1
<i>E</i>	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>SE</i>	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>S</i>	1.1	0.0	1.2	3.2
<i>SW</i>	22.6	28.0	22.6	19.4
<i>W</i>	34.4	11.8	17.2	5.4
<i>NW</i>	17.2	33.3	44.0	54.9
<i>N</i>	15.1	11.8	8.3	11.8
<i>C</i>	8.6	15.1	6.0	4.3

Am Schöckl tritt fast ausschließlich Wind aus den Sektoren Südwest bis Nord auf, wobei das Häufigkeitsmaximum meist im Nordwesten liegt.

Tabelle 2 gibt die Windrichtungshäufigkeitsverteilung in Prozent (%) am Flughafen Graz–Thalerhof (Seehöhe 340 m) im Süden von Graz an, und zwar für 8 Windrichtungsklassen (NE, E,, NW, N), C bedeutet Calme (Windstille).

<i>Tab. 2: Windrichtungshäufigkeitsverteilung in % am Flughafen Graz–Thalerhof</i>				
	<i>Dez. 1989</i>	<i>Jän. 1990</i>	<i>Feb. 1990</i>	<i>März 1990</i>
<i>NE</i>	4.3	0.0	9.5	7.5
<i>E</i>	4.3	2.1	6.0	4.3
<i>SE</i>	25.8	12.9	15.5	16.1
<i>S</i>	10.8	22.6	13.1	17.2
<i>SW</i>	14.0	21.5	6.0	7.5
<i>W</i>	6.5	7.5	6.0	4.3
<i>NW</i>	19.4	14.0	23.8	18.3
<i>N</i>	5.4	10.8	11.9	9.7
<i>C</i>	9.7	8.6	8.3	15.1

Am Flughafen Graz–Thalerhof treten am häufigsten Winde aus Südost bis Süd sowie Nordwest bis Nord auf, wobei das Verhältnis zwischen nördlichen und südlichen Winden deutlich ausgewogener ist als in Graz selbst. Aufgrund der freieren Lage in einem weiten Becken ist die Streuung der Windrichtung um die Nord– und Südrichtung größer als in Graz, auch östliche und westliche Winde treten häufiger auf.

Die Windverhältnisse im Grazer Becken sind weitgehend von jenen in der freien Atmosphäre entkoppelt; sie sind von der Topographie, die das großräumige Windfeld modifiziert, sowie von der durch die Topographie gesteuerten lokalen Zirkulation bedingt.

4 TAGESGANG VON WINDRICHTUNG UND –GESCHWINDIGKEIT

4.1 Windrichtung

Im folgenden werden Mittlere Tagesgänge von Windrichtung und –geschwindigkeit in Graz in am Boden sowie in Höhen von 50 m, 100 m, 150 m, 200 m, 250 m, 300 m und 350 m über dem SODAR für den gesamten Meßzeitraum, 14.12.1989 – 4.4.1990, sowie für verschiedene Wetterlagen diskutiert.

Zur Unterscheidung von Wetterlagen wird die Strömungslagenklassifikation von Steinacker verwendet [Steinacker R., 1991: "Eine ostalpine Strömungslagenklassifikation", Universität Innsbruck]; nach dieser werden die einzelnen Tage entsprechend der Isohypsenverteilung im 850-hPa-Niveau (ca. 1500 m Seehöhe) über dem Ostalpenraum acht Strömungslagen (Nord, Nordost, Ost,, Nordwest) zugeordnet; Tage ohne ausgeprägte Strömungslage werden als Gradientschwache Lagen klassifiziert, Tage, an denen die Strömungslage sich deutlich ändert, z.B. infolge eines Frontdurchganges, werden als Variable Lagen klassifiziert.

Die 112 Tage des Untersuchungszeitraums 14.12.1989 – 4.4.1990 verteilen sich wie folgt auf die einzelnen Strömungslagen:

Strömungslage	variabel	NO	O	SO	S	SW	W	NW	N	gradientschwach
Tage	20	3	2	3	4	18	15	7	0	40

Aufgrund des seltenen Auftretens von Nordost-, Ost-, Südost-, Süd- und Nordwestlagen sind Mittelwerte über diese Tage als nicht repräsentativ anzusehen.

Abb. 8 zeigt den mittleren Tagesgang der Windrichtung in 50 bis 350 m Höhe für alle Tage (14.12.1989 – 4.4.1990), Abb. 9 für Gradientschwache Lagen, Abb. 10 bis Abb. 16 für die Strömungslagen Nordost bis Nordwest (Nord trat nicht auf), Abb. 17 für Variable Lagen.

Zu berücksichtigen ist, daß oberhalb von 200 m vor allem nachmittags infolge geringer Echointensität die Verfügbarkeit der Meßdaten relativ gering ist und die angegebenen Werte nur noch beschränkte Repräsentativität besitzen.

Abb. 18 zeigt den Mittleren Tagesgang der Windrichtung in Graz Süd für die einzelnen Strömungslagen: Gradientschwache Lage; Nordostlage, Ostlage und Südostlage (NE, E, SE) gemeinsam, Südlage (S); Südwestlage (SW); Westlage (W); Nordwestlage (NW) und Variable Lage.

Im Mittel über alle Tage weht nachts und vormittags in allen Höhen zwischen 50 und 300 m über Boden Nordwind, wobei die Windrichtung mit der Höhe leicht auf Nordwest dreht.

Ca. zwischen 11 und 17 Uhr weht der Wind in den unteren 200 m aus Süd, darüber auf West bis Nordwest, wobei in 150 m Höhe vormittags auch nordöstliche Komponenten auftreten.

Im großen und ganzen spiegelt diese Windrichtungsverteilung die Talwindzirkulation wieder, die sich in den unteren 200 m ausbildet, während darüber im Mittel beständig Nord- bis Nordwestwind weht.

Gradientschwache Tage zeigen die Talwindzirkulation noch deutlicher; nachts und vormittags weht Nordnordwestwind, dessen Richtung zeitlich und höhenmäßig sehr konstant ist; in den unteren 150 m weht zwischen 12 und 17 Uhr relativ homogener und konstanter Südwind, in 200 m Süd- bis Südostwind; beim Übergang von Talau- zu Taleinwind treten primär westliche Windkomponenten auf. In 250 bis 300 m Höhe tritt nachmittags Nord- bis Westwind auf.

Nordostlagen sind in den Niveaus oberhalb 100 m durchgehend von sehr beständigem Nordwind gekennzeichnet, der ca. um 12 Uhr etwas nach Nordwest, nachmittags nach Nordost

abweicht; in 50 m Höhe ist die Windrichtung variabler mit östlichen Komponenten morgens. Oberhalb 200 m fehlen nachmittags infolger geringer Echointensität meist die Meßwerte.

Ostlagen zeigen in allen Höhen einen Wechsel zwischen ziemlich homogenem Nord- bis Nordwestwind nachts und vormittags und Süd- bis Ostwind nachmittags.

Bei Südostlagen ist die zeitliche und höhenmäßige Variabilität der Windrichtung groß; es zeichnet sich aber auch an diesen Tagen in allen Niveaus überwiegend Nordwind nachts und vormittags und Süd- bis Ostwind nachmittags ab.

Südlagen zeigen einen klaren Wechsel von Nordwind auf höhenmäßig sehr homogenen Südwind um 10 Uhr; abends geht die Windrichtung nach und nach von Süd auf West über. Nachts überwiegt in 50 m Höhe Nordostwind, darüber Nord- bis Nordwestwind.

Relativ inhomogene Windrichtungsverhältnisse kennzeichnen Südwestlagen. Nachts tritt Wind aus Nord bis West auf – mit zunehmender Höhe mehr aus West –, wobei bereits morgens der Wind oberhalb 300 m auf Südwest dreht. In den unteren Niveaus tritt zwischen 12 und 16 Uhr stark variabler Südwind auf.

Westlagen zeigen – analog Südlagen – in allen Niveaus bis 200 m einen relativ klaren Wechsel zwischen Nordwind nachts und vormittags und Südwind nachmittags, wobei oberhalb 250 m auch nachmittags West- bis Nordwind weht.

Nordwestlagen weisen den ganzen Tag über beständigen Nordwestwind auf.

Analoge Verhältnisse treten bei Variablen Wetterlagen auf, wo die Windrichtung aber stärker zwischen Nord und West schwankt und zwischen 10 und 14 Uhr auch nordöstliche Komponenten auftreten.

Die Windrichtung am Talboden (Graz Süd) zeigt bei den meisten Strömungslagen wesentlich uneinheitlichere Verhältnisse, wobei sich der Wechsel zwischen nächtlichem Nord- und nachmittäglichem Südwind nur unscharf abzeichnet.

Gradientschwache Lagen zeigen hier in der zweiten Nachthälfte meist westlichen Wind, zwischen 8 und 16 Uhr Wind aus Ost bis Süd, in der ersten Nachthälfte Nordwestwind.

Im Mittel über Nordost-, Ost- und Südostlagen trat nachts zumeist West- bis Südwestwind, tagsüber Südwind auf.

Südlagen sind durchgehend von Südwind gekennzeichnet.

Südwestlagen sowie Westlagen zeigen ein ähnliches Bild wie Gradientschwache Lagen.

Bei Nordwestlagen tritt durchgehend Nord- bis Westwind auf.

Variable Lagen zeigen in der zweiten Nachthälfte und tagsüber überwiegend südlichen, in der ersten Nachthälfte westlichen Wind.

Die uneinheitlicheren Windrichtungsverhältnisse in Bodennähe sind teilweise durch die Unsicherheiten der Windrichtungsmessung bei niedrigen Windgeschwindigkeiten (Calmen) bedingt; diese sind in die mittleren Tagesgänge einbezogen. Zudem ist generell die Windrichtung bei niedrigen Geschwindigkeiten unbeständiger. Außerdem ist in Graz Süd mit einer stärkeren Beeinflussung des Windfeldes durch Gebäude und Bäume zu rechnen.

Der Wind über dem Grazer Becken zeigt bei Nordostlagen, Nordwestlagen sowie bei Variablen Lagen keinerlei Ausbildung einer Talwindzirkulation, sondern das Durchgreifen der synoptischen Strömung bis in Bodennähe. Die anderen Strömungslagen zeigen in unterschiedlich starker Ausprägung einen tageszeitlichen Windrichtungswechsel, der bei Gradientschwachen Lagen, Ost-, Süd- und Westlagen am deutlichsten, bei Südwestlagen am unschärfsten ist.

Bei Ost- und Südlagen umfaßt der Windrichtungswechsel die Atmosphäre bis in Höhen von 300 m, bei Gradientschwachen Lagen und Westlagen weht ab 250 m zumeist auch tagsüber nördlicher bis westlicher Wind.

Demgegenüber weht bei Südlagen am Boden (Graz Süd) auch nachts Südwind, ab 50 m Höhe Wind aus Nordost- bis Nordwest.

4.2 Windgeschwindigkeit

Abb. 19 zeigt den mittleren Tagesgang der Windgeschwindigkeit in Höhen von 50 bis 350 m für alle Tage des Meßzeitraumes, Abb. 20 für Gradientschwache Lagen, Abb. 21 für Südwestlagen, Abb. 22 für Westlagen, Abb. 23 für Variable Lagen. Für die anderen Wetterlagen wurde wegen der mangelnden Repräsentanz infolge der geringen Anzahl der Tage auf eine graphische Darstellung verzichtet.

Abb. 24 zeigt den mittleren Tagesgang der Windgeschwindigkeit in Bodennähe (Graz Süd) für die einzelnen Wetterlagen (analog Abb. 18).

Fehlende Werte sind in den Abbildungen durch den Wert "null" gekennzeichnet.

Die Windgeschwindigkeit über dem SODAR zeigt im Mittel einen relativ schwach ausgeprägten Tagesgang. In 50 m Höhe liegt die mittlere Windgeschwindigkeit nachts um 3 m/s, nachmittags um 2 m/s. Die Geschwindigkeit nimmt mit der Höhe zu; diese Zunahme wird mit zunehmender Höhe stärker; sie ist nachmittags am geringsten ausgeprägt. In 300 m Höhe werden nachts ca. 5 m/s, nachmittags ca. 2 m/s beobachtet.

Am Boden (Graz Süd) liegt die mittlere Windgeschwindigkeit bei allen Strömungslagen außer Nordwestlagen in der zweiten Nachthälfte unter 0.5 m/s, was die enorm hohe Calmenhäufigkeit an dieser Meßstelle sowie das weitgehende Fehlen von Nordwind – welcher in der Talwindzirkulation nachts auftritt – erklärt.

Gradientschwache Lagen, Nordost-, Ost-, Südost-, Südwest-, West- und Variable Lagen zeigen einen relativ gleichartigen mittleren Tagesgang der Windgeschwindigkeit mit Werten unter 0.5 m/s zwischen 22 und 10 Uhr; nachmittags steigen die Geschwindigkeiten auf bis 1 m/s an, wobei sie bei West- und Variablen Lagen ab 16 Uhr wieder unter 0.5 m/s fallen.

Bei Südlagen steigt die Windgeschwindigkeit – bei ähnlichem Verlauf zwischen 1 und 14 Uhr – zwischen 15 und 24 Uhr auf Werte bis 1.5 m/s.

Diese Verhältnisse zeigen, daß in Bodennähe der Taleinwind (Südwind) kräftiger ausgebildet ist als der Talauswind (Nordwind); bei Südlagen, die oberhalb 50 m einen Wechsel von Nord- und Südwind zeigen, tritt am Boden nur Südwind auf, der nachmittags überdurchschnittlich hohe Geschwindigkeiten aufweist.

Völlig anders ist der Mittlere Tagesgang bei Nordwestlagen, bei denen nachts niedrige Werte (0.5 bis 1 m/s), zwischen 6 und 18 Uhr Werte zwischen 1 und 2.5 m/s auftreten.

Die Windgeschwindigkeit über dem SODAR zeigt – ausgenommen Südlagen – völlig andere mittlere Tagesgänge als jene am Boden.

Bei Gradientschwachen Lagen (Abb. 20) zeigt die Geschwindigkeit über dem SODAR zwei Minima ca. um 10 und 18 Uhr, die mit der Drehung des Windes zwischen Nord und Süd zusammenfallen; in 50 m werden um 10 Uhr 1.0 m/s, um 18 Uhr 1.5 m/s beobachtet. Nachmittags und nachts erreicht die Geschwindigkeit in 50 m 2 m/s. Die Windgeschwindigkeit nimmt zwischen 19 und 23 Uhr von 50 m bis 200 m mit der Höhe ab; die höchsten Windgeschwindigkeiten werden in 50 bis 100 m beobachtet; in der zweiten Nachthälfte sowie tagsüber nimmt die Wind-

geschwindigkeit mit der Höhe zu; diese Zunahme ist vormittags am ausgeprägtesten, wo in 300 m Höhe um 4 m/s auftreten (nachmittags um 2 m/s).

Ein analoges Verhalten der Windgeschwindigkeit tritt bei Südwest-, West- und Nordwestlagen auf, wohingegen bei Südlagen die Windgeschwindigkeit in allen Höhen nachmittags zunimmt. In 50 m Höhe treten morgens ca. 1.5 m/s, nachmittags 2 bis 3 m/s auf. Ähnliche Verhältnisse treten bei Ost- und Südostlagen auf.

Die höchsten Windgeschwindigkeiten werden bei Variablen Lagen beobachtet, wo ebenfalls nachmittags die Geschwindigkeit deutlich höher ist als nachts und morgens. Morgens treten in 50 m Höhe ca. 2.5 m/s auf, nachmittags 4 m/s, in 300 m sind es morgens 4 bis 5 m/s, nachmittags 4 bis 7 m/s.

Die Echointensität weist im Mittel einen Tagesgang mit hohen Werten nachts, niedrigen Werten nachmittags auf. Dies ist durch die im Mittel thermisch stabile Schichtung der Atmosphäre in der Nacht bedingt, während nachmittags infolge stärkerer Durchmischung homogene atmosphärische Verhältnisse auftreten.

Vergleichsweise hohe Echointensitäten werden am Nachmittag bei Gradientenschwachen Lagen, Südostlagen, Südwestlagen und Variablen Lagen beobachtet, relativ geringe Echointensitäten am Nachmittag bei Nordostlagen, Ostlagen, Südlagen und Nordwestlagen.

5 SCHWefeldioxid-BELASTUNG

5.1 SO₂-Emission

Die SO₂-Emission erfolgt in Graz relativ einheitlich mit flächenhaftem Emissionsschwerpunkt im zentralen Stadtgebiet sowie in einigen entfernter gelegenen Einzelmitteln (Zellstofffabrik im Gratkorner Becken, Kraftwerke im südlichen Grazer Becken).

Die folgenden Angaben zur SO₂-Emission in Graz werden dem Bericht der Fachabteilung Ia der Landesbaudirektion beim Amt der Steiermärkischen Landesregierung "Emissionskataster der Landeshauptstadt Graz, Ausgabe November 1989" entnommen.

Laut diesem betragen die SO₂-Emissionen in Graz an einem Wintertag 15.385 t (pro Tag) (bzw. 17.781 t, wenn das Fernheizkraftwerk Mellach außer Betrieb ist und die entsprechende Versorgung von Graz aus stattfinden muß).

Davon entfallen 55 % auf Betriebe, 42 % auf den Hausbrand und 3 % auf den Verkehr.

Die SO₂-Emissionsdichte weist die höchsten Werte im Stadtzentrum, d.h. in den Bezirken I bis VI, auf; im I. Bezirk (ausgenommen Schloßberg und Stadtpark) und in den zentrumsnahen Bereichen der Bezirke II bis VI, sowie in einzelnen Teilen von Eggenberg und Gösting liegen die typischen winterlichen SO₂-Emissionen über 1 kg/ha.h, im größten Teil des dicht besiedelten Stadtgebietes zwischen 0.2 und 1 kg/ha.h.

Typischer Tagesgang der SO₂-Emission im Winter: Zwischen 23 und 4 Uhr 300 kg/h, anschließend leichter, um 6 Uhr steiler Anstieg auf ca. 900 kg/h; zwischen 7 und 17 Uhr 900 kg/h, um 18 Uhr Rückgang auf ca. 600 kg/h, zwischen 20 und 23 Uhr langsamer Rückgang auf 300 kg/h.

Die Emissionen von Betrieben liegen dabei zwischen 6 und 18 Uhr mit 500 kg/h über dem nächtlichen Wert von 200 kg/h, die Hausbrandemissionen zeigen langsames Ansteigen und Absinken und fallen erst zwischen 20 und 23 Uhr von tagsüber ca. 400 kg/h auf das niedrige nächtliche Niveau von ca. 100 kg/h ab.

5.2 Schwefeldioxid-Belastung in Graz

Tabelle 3 gibt die Monatsmittelwerte (MMW) der SO_2 -Konzentration an den Meßstellen Graz Nord, Graz West, Graz Süd und Graz Mitte für die Monate Dezember 1989 bis März 1990 an.

	Nord	West	Süd	Mitte
Dezember 1989	0.040	0.056	0.055	0.059
Jänner 1990	0.055	0.051	0.044	0.057
Februar 1990	0.032	0.032	0.028	0.044
März 1990	0.031	0.022	0.024	0.029

Tabelle 4 gibt die maximalen monatlichen Tagesmittelwerte (TMW) der SO_2 -Konzentration an den Meßstellen Graz Nord, Graz West, Graz Süd und Graz Mitte für die Monate Dezember 1989 bis März 1990 an.

	Nord	West	Süd	Mitte
Dezember 1989	0.077	0.122	0.096	0.121
Jänner 1990	0.109	0.119	0.088	0.122
Februar 1990	0.065	0.057	0.050	0.063
März 1990	0.064	0.062	0.058	0.059

Tabelle 5 gibt die maximalen monatlichen Halbstundenmittelwerte (HMW) der SO_2 -Konzentration an den Meßstellen Graz Nord, Graz West, Graz Süd und Graz Mitte für die Monate Dezember 1989 bis März 1990 an.

	Nord	West	Süd	Mitte
Dezember 1989	0.226	0.249	0.147	0.246
Jänner 1990	0.243	0.258	0.176	0.201
Februar 1990	0.158	0.162	0.098	0.136
März 1990	0.166	0.115	0.117	0.194

Die Meßstelle Graz Mitte, welche direkt im Stadtzentrum liegt, weist stets die höchste SO_2 -Belastung auf, Graz Süd die niedrigste.

Die Monate Dezember 1989 und Jänner 1990 zeigen eine deutlich höhere Belastung als Februar und März 1990.

5.3 Schadstoffwindrosen

Schadstoffwindrosen stellen die mittlere Schadstoff-(SO₂-)konzentration für die einzelnen Windrichtungen dar; es wird für jeden Windrichtungssektor (in einer 36-teiligen Skala) jeweils der Mittelwert über jene SO₂-Werte gebildet, die gleichzeitig mit den entsprechenden Windrichtungswerten auftreten.

Abb. 25 bis Abb. 28 zeigen SO₂-Konzentrations-Windrosen für die Meßstellen Graz Süd, Graz West, Graz Nord und Graz Mitte, jeweils für den Wind der Station Graz Süd.

Abb. 29 bis Abb. 31 zeigen SO₂-Konzentrations-Windrosen für die Meßstelle Graz Nord mit dem SODAR-Wind in den Niveaus 50, 150 und 250 m, Abb. 32 bis Abb. 34 zeigen SO₂-Konzentrations-Windrosen für die Meßstelle Graz West mit dem SODAR-Wind in den Niveaus 50, 150 und 250 m, Abb. 35 bis Abb. 37 zeigen SO₂-Konzentrations-Windrosen für die Meßstelle Graz Süd mit dem SODAR-Wind in den Niveaus 50, 150 und 250 m, Abb. 38 bis Abb. 40 zeigen SO₂-Konzentrations-Windrosen für die Meßstelle Graz Mitte mit dem SODAR-Wind in den Niveaus 50 m, 150 m und 250 m.

Die SO₂-Konzentrations-Windrosen mit dem Wind von Graz Süd sind aufgrund des sehr hohen Calmenanteils dieser Station nicht besonders repräsentativ.

Die SO₂-Immission wird primär durch Emissionen des Stadtzentrums von Graz bestimmt.

Die mittlere SO₂-Konzentration ist bei Windstille jeweils am höchsten, was auf die ungünstigen Ausbreitungsverhältnisse bei windschwachen Situationen zurückzuführen ist und auf das Dominieren nahegelegener Quellen hindeutet.

In Graz Süd traten die höchsten mittleren SO₂-Konzentrationen bei Bodenwind aus Nord bis Südost (Maximum bei 30 Grad: 0.039 mg/m³) auf, bei Windstille 0.045 mg/m³. Die windrichtungsabhängige Konzentrationsverteilung entspricht der Lage der Meßstelle südwestlich des Stadtzentrums.

In Graz West traten die höchsten mittleren SO₂-Konzentrationen bei Nordwind, Ostsüdostwind und Südwind am Boden auf (Maximum bei 110 Grad: 0.041 mg/m³), bei Windstille 0.049 mg/m³. Die hohen SO₂-Werte bei – seltenem – Südostwind sind auf die Emission des Stadtzentrums zurückführbar; ob die hohen Werte bei Nordwind auf örtliche Emissionen oder Transport aus dem Gratkorner Becken zurückzuführen sind, läßt sich nicht angeben.

In Graz Nord traten die höchsten mittleren SO₂-Konzentrationen bei Bodenwind aus Südwest bis Ost auf (Maximum bei 180 Grad: 0.039 mg/m³), bei Windstille 0.045 mg/m³. Diese Windrichtungsabhängigkeit zeigt klar den Einfluß der Emission des südöstlich gelegenen Stadtzentrums.

Die Station Graz Mitte zeigt eine vergleichsweise isotrope Windrichtungsabhängigkeit der SO₂-Konzentration mit etwas höheren Werten bei östlichen Winden (Maximum bei 100 Grad: 0.049 mg/m³), bei Windstille 0.054 mg/m³.

Die Abhängigkeit der SO₂-Konzentration der Meßstelle Graz Nord vom Wind in der Höhe über dem SODAR zeigt für die unteren 100 m die geringsten Werte bei Nordwestwind, bei Wind aus Südwest über Süd bis Ost höhere Werte (0.040 bis 0.050 mg/m³). Mit zunehmender Höhe treten höhere mittlere SO₂-Konzentrationen auch bei Nordwind, in 250 m Höhe bei Nordnordwestwind auf, wobei auch aus Süd- und Südwest aus engen Sektoren erhöhte SO₂-Werte auftraten.

Tabelle 6 gibt die Windrichtung maximaler mittlerer Konzentration – sofern diese über mehr als 1 % der Meßzeit auftrat – , die entsprechende Konzentration sowie die mittlere Konzentration bei Windstille in Graz Nord an.

Tab. 6: Windrichtung maximaler mittlerer Konzentration (je Windrichtung) (Grad), die entsprechende Konzentration sowie die mittlere Konzentration bei Windstille in mg/m^3 in Graz Nord

Höhe	Richtung (Grad)	Konzentration (mg/m^3)	Konzentration bei Windstille (mg/m^3)
50 m	180	0.050	0.061
100 m	200	0.047	0.056
150 m	10	0.047	0.058
200 m	90	0.055	0.053
250 m	340	0.058	0.044

Die SO_2 -Konzentration in Graz Mitte ist kaum von der Windrichtung in den unteren 150 m über dem Grazer Becken abhängig; bei Nordwind traten leicht erhöhte Werte auf. Bei Nordwind in 250 m traten deutlich höhere SO_2 -Konzentrationen als bei südlichem Wind auf.

Tabelle 7 gibt die Windrichtung maximaler mittlerer Konzentration – sofern diese über mehr als 1 % der Meßzeit auftrat –, die entsprechende Konzentration sowie die mittlere Konzentration bei Windstille in Graz Mitte an.

Tab. 7: Windrichtung maximaler mittlerer Konzentration (je Windrichtung) (Grad), die entsprechende Konzentration sowie die mittlere Konzentration bei Windstille in mg/m^3 in Graz Mitte

Höhe	Richtung (Grad)	Konzentration (mg/m^3)	Konzentration bei Windstille (mg/m^3)
50 m	20	0.051	0.066
100 m	20	0.054	0.056
150 m	40	0.051	0.055
200 m	350	0.050	0.052
250 m	340 / 360	0.052	0.040

An der Meßstelle Graz Süd traten die höchsten mittleren SO_2 -Konzentrationen bei Wind in 50 m bis 150 m Höhe aus Nord bis Nordost auf; mit der Höhe verliert sich diese Richtungsabhängigkeit zunehmend und ist in 200 und 250 m Höhe weitgehend isotrop.

Tabelle 8 gibt die Windrichtung maximaler mittlerer Konzentration – sofern diese über mehr als 1 % der Meßzeit auftrat –, die entsprechende Konzentration sowie die mittlere Konzentration bei Windstille in Graz Süd an.

Tab. 8: Windrichtung maximaler mittlerer Konzentration (je Windrichtung) (Grad), die entsprechende Konzentration sowie die mittlere Konzentration bei Windstille in mg/m^3 in Graz Süd

Höhe	Richtung (Grad)	Konzentration (mg/m^3)	Konzentration bei Windstille (mg/m^3)
50 m	20	0.051	0.049
100 m	50	0.051	0.040
150 m	360	0.046	0.041
200 m	350	0.047	0.040
250 m	260	0.048	0.039

In Graz West traten die geringsten SO₂-Konzentrationen bei Nordwestwind in 50 bis 150 m Höhe auf, die höchsten Konzentrationen bei Nordnordostwind, daneben mittlere bei Wind aus Nordost über Ost bis Südwest. Am deutlichsten ist das Konzentrationsmaximum bei Nordnordostwind in 100 m ausgeprägt, für den Wind in größeren Höhen nimmt die Richtungsabhängigkeit der SO₂-Konzentration mehr gleichmäßige Form an, wobei – mit Ausnahme in 200 m – Nord- bis Nordnordostwind mit den höchsten Konzentrationen verbunden war.

Tabelle 9 gibt die Windrichtung maximaler mittlerer Konzentration – sofern diese über mehr als 1 % der Meßzeit auftrat –, die entsprechende Konzentration sowie die mittlere Konzentration bei Windstille in Graz West an.

<i>Tab. 9: Windrichtung maximaler mittlerer Konzentration (je Windrichtung) (Grad), die entsprechende Konzentration sowie die mittlere Konzentration bei Windstille in mg/m³ in Graz West</i>			
<i>Höhe</i>	<i>Richtung (Grad)</i>	<i>Konzentration (mg/m³)</i>	<i>Konzentration bei Windstille (mg/m³)</i>
<i>50 m</i>	<i>10</i>	<i>0.047</i>	<i>0.058</i>
<i>100 m</i>	<i>20</i>	<i>0.053</i>	<i>0.045</i>
<i>150 m</i>	<i>40</i>	<i>0.050</i>	<i>0.046</i>
<i>200 m</i>	<i>350</i>	<i>0.047</i>	<i>0.045</i>
<i>250 m</i>	<i>20 / 340</i>	<i>0.048</i>	<i>0.039</i>

Die unterschiedliche Windrichtungsabhängigkeit der SO₂-Belastung bei Betrachtung des Windes in verschiedenen Höhen sagt nichts darüber aus, in welcher Höhe tatsächlich Schadstofftransport stattfindet. Die Schadstoffwindrosen zeigen jedoch klar, daß das Stadtzentrum die bei weitem dominierende SO₂-Emissionsquelle ist, daß daneben aber auch Advektionsprozesse aus dem Gratkornener Becken – speziell für die Meßstelle Graz West – von Bedeutung sein könnten.

6 INVERSIONEN

Eine exakte Bestimmung von Inversionsunter- oder -obergrenzen aus den SODAR-Daten ist schwierig und mit großen Unsicherheiten verbunden. Dieses Kapitel gibt daher einen qualitativen Überblick über das Auftreten von Inversionen; als Inversionsuntergrenze wird der Bereich maximaler Echointensität angenommen, sofern nicht hohe Echointensitäten offenkundig durch andere Prozesse, z.B. vertikale Windscherung, bedingt sind.

Tabelle 10 gibt eine Zusammenstellung der Häufigkeit jener Tagen, an denen über einen bestimmten Zeitraum im Meßbereich des SODAR eine (abgehobene oder Boden-)Inversion identifizierbar ist, aufgegliedert nach Strömungslagen nach Steinacker.

Auch wenn aufgrund des während des Meßzeitraums sehr seltenen Auftretens von Nordost-, Ost-, Südost-, Nordwest- und Nordlagen keine repräsentativen Aussagen möglich sind, kann festgestellt werden, daß Variable und Westlagen überdurchschnittlich oft mit länger anhaltenden Inversionen verbunden sind, Nordwest- und Südlagen dagegen mit geringerer Inversionsdauer.

Tab. 10: Häufigkeit des Auftretens von Inversionen für einzelne Strömungslagen, für Dauer der Inversion <6 h, 6–12 h, 12–18 h sowie >18 h.

Strömungslage	<6h	6–12h	12–18h	>18h	Ausfall	Summe
<i>variabel</i>	4	7	9	0	0	20
<i>NE</i>		1	2	0	0	3
<i>E</i>	1	1	0	0	0	2
<i>S</i>	1	1	1	0	0	3
<i>S</i>	2	2	0	0	0	4
<i>SW</i>	1	8	7	1	1	18
<i>W</i>	0	5	8	1	1	15
<i>NW</i>	7	0	0	0	0	7
<i>N</i>	0	0	0	0	0	0
<i>gradientschwach</i>	6	15	16	1	2	40
<i>Summe</i>	23	41	41	3		

Inversionen, die mit dem SODAR identifizierbar waren und länger als 12 Stunden andauerten, traten an 44 Tagen und damit an mehr als einem Drittel der Meßzeit auf.

Die Inversionen wurden bevorzugt in der zweiten Nachthälfte und vormittags beobachtet. Nur 23 der 110 Tage, an denen SODAR-Meßdaten verfügbar sind, zeichneten sich durch Inversionen von weniger als 6 Stunden Dauer aus.

7 FALLSTUDIEN

Die folgenden Absätze zeigen anhand einiger detailliert untersuchten Episoden Zusammenhänge zwischen der durch das Akustikradar erfaßten meteorologischen Situation und der Immissionssituation in Graz.

Dafür wurden Episoden gewählt, an denen besonders hohe SO₂-Immissionskonzentrationen bzw. starkes Ansteigen oder Abfallen zu beobachten waren. Zur Beurteilung wurde der Schadstoff SO₂ gewählt, dessen Emission relativ gleichmäßig über das zentrale Stadtgebiet von Graz verteilt erfolgt. Demgegenüber ist die Emission von NO viel stärker auf Einzelemittenten wie Straßen oder Großfeuerungsanlagen konzentriert, in deren Umgebung die Immissionsschwerpunkte von NO₂ und vor allem NO liegen.

Berücksichtigt wurden die Meßstellen Graz Nord, West, Süd und Mitte (Abb. 1).

Abb. 41 bis Abb. 44 zeigen den Verlauf der Tagesmittelwerte (TMW) und maximalen Halbstundennittelwerte (HMWmax) von SO₂ an den Meßstationen Graz Nord, Graz West, Graz Süd und Graz Mitte für die Monate Dezember 1989 bis März 1990.

Bei den in den Abbildungen dieses Kapitels dargestellten Inversionshöhen handelt es sich um Inversionsuntergrenzen, die aus SODAR-Echodaten abgeschätzt wurden. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Lokalisierung einer Inversionsuntergrenze aus SODAR-Daten bisweilen großen höhenmäßigen Unsicherheiten unterliegt, die in Einzelfällen 100 m oder mehr betragen können. Zu beachten ist auch, daß das SODAR erst oberhalb 50 m Meßwerte liefert und sehr seichte Bodeninversionen nicht mehr erfaßt werden können. Hohe Echointensitäten in einem Bereich zwischen 50 und 70 m Höhe werden als Bodeninversion interpretiert, in den Abbildungen aber in dieser Höhe angegeben; es kann auch nicht ausgeschlossen werden, daß bereits

vor dem Auftreten hoher Echointensitäten knapp oberhalb 50 m Bodeninversionen bestehen, die erst nach leichter Hebung oder bei entsprechend großer Mächtigkeit in den SODAR-Echos sichtbar werden.

Anzumerken ist ferner, daß die Angabe "Inversion" in den Abbildungen keine unmittelbare Information über die Intensität oder die Eindeutigkeit der Identifizierbarkeit der Inversionsuntergrenze zuläßt und Schlüsse über das Vorhandensein und die immissionsrelevante Wirksamkeit von dargestellten Inversionen nur anhand der im Text gegebenen Beschreibung bzw. Interpretation sinnvoll sind.

Folgende Zeiträume werden detailliert untersucht: 6.–14.1., 17.–28.1., 4.–10.2. und 3.–10.3.1990. Es handelt sich dabei um die Zeiträume maximaler SO₂-Belastung in Graz während der SODAR-Meßkampagne.

7.1 Episode 6. bis 14. Jänner 1990

Zwischen 16.12.1989 und 6.1.1990 traten in Graz relativ niedrige SO₂-Konzentrationen auf (die täglichen Maximalwerte überschritten fast nie 0.10 mg/m³), da trotz windschwacher Wetterlage mit großräumig stabiler Temperaturschichtung keine bodennahen – d.h. mit dem SODAR in Höhen bis ca. 400 m erfaßbaren – Inversionen vorhanden waren und damit zumindest in diesen unteren Luftschichten vertikaler Austausch und gute Schadstoffverdünnung möglich waren. Richtungsmäßig unbeständiger, mäßig starker Wind verhinderte auch lokale oder regionale Advektion.

Das deutliche Absinken der SO₂-Belastung an allen Stationen vom 5. auf den 6.1. war auf einen Frontdurchzug zurückzuführen, der auch in Bodennähe zu einem Luftmassenwechsel führte.

Der Zeitraum vom 6.–14.1.1990 war von den tiefsten Temperaturen des Jahres 1990 – gemessen in Graz Mitte sowie an der Station Graz-Flughafen – gekennzeichnet. Die vergleichsweise hohen SO₂-Werte in dieser Zeit sind teilweise auf die entsprechend den tiefen Temperaturen erhöhten Emissionen aus Hausbrand, Fernheizwerken und Kraftwerken zurückzuführen, doch ist keine direkte Korrelation zwischen dem Verlauf der SO₂-Konzentration und dem Verlauf der Temperatur festzustellen; auch andere Schadstoffe weisen einen ähnlichen Verlauf auf; die zeitlichen Variationen der SO₂-Konzentration sind durch das Zusammenspiel des Tagesganges der Emission mit den meteorologischen Verhältnissen bedingt.

7.1.1 Großwetterlage und Witterungsverlauf

Die Großwetterlage war über den gesamten Zeitraum von einem Hochdruckgebiet geprägt, in das vereinzelt atlantische Fronten eindringen, die jedoch im Grazer Raum kaum wetterwirksam waren.

Das Hochdruckgebiet hatte am 6.1. sein Zentrum über Rumänien und dem Schwarzen Meer, Österreich lag an seinem Westrand noch teilweise im Bereich südwestlicher Strömung; es dehnte sich am 8.1. nach Westen aus und hatte bis zum 15.1. seinen Kern über dem Alpenraum bzw. Slowenien.

Die über Nordeuropa hereinziehenden Fronten bzw. Tiefdruckgebiete beeinflussten dieses Hochdruckgebiet kaum.

Zwischen 5.1. und 6.1. verlagerte sich eine Kaltfront über Mitteleuropa nach Südosteuropa. Zwischen 8.1. und 9.1. überquerte eine Kaltfront Mitteleuropa ostwärts, am 10.1. zog eine Kaltfront nördlich der Alpen über Mitteleuropa.

Während des gesamten Zeitraums gab es keine Niederschläge, es lag auch keine Schneedecke.

Abb. 45 zeigt die meteorologischen Parameter, die die Wetterlage im Raum Graz vom 6.1. bis 15.1. charakterisieren. Dargestellt sind der Bedeckungsgrad ("Bed. Flughafen", angegeben in Achtel) und die Temperatur ("T Flughafen", angegeben in Grad C) am Flughafen Graz-Thalerhof sowie die Temperatur ("T Schöckl", angegeben in Grad C), Windrichtung ("WIRI Schöckl", angegeben in Grad), Windgeschwindigkeit ("WIGE Schöckl", angegeben in m/s) und Bedeckungsgrad ("Bed. Schöckl", angegeben in Achtel) auf dem Schöckl. Der Bedeckungsgrad "9 Achtel" bedeutet "Himmel nicht sichtbar", d.h. meist Nebel.

Der Temperaturverlauf beider Stationen zeigt, daß ab 7.1. mit wenigen Ausnahmen zwischen Grazer Becken und Schöckl eine Inversion herrschte; am Schöckl lagen die Temperaturen bis zu 10 °C höher als im Grazer Becken. Der Tagesgang in Graz-Flughafen ist vom Bedeckungsgrad stark abhängig. Im betrachteten Zeitraum wurde durchwegs hochnebelartige Bewölkung beobachtet, die zwischen 7. und 13.1. – wenn überhaupt – nachts auftrat und sich tagsüber meist vollständig auflöste. Der Bedeckungsgrad am Flughafen wird zur Beurteilung des Angebots an Sonneneinstrahlung am Boden herangezogen.

Am Schöckl wurde fast keine Bewölkung beobachtet. Die (geringe) Bewölkung, die am 10.1. sowohl in Graz Flughafen als auch – länger anhaltend – am Schöckl beobachtet wurde, stand mit einer Kaltfront in Verbindung, die nördlich an Österreich vorbeizog.

Am 13.1., 6 Uhr, sowie am 13.1. ab 18 Uhr wurde in Graz Flughafen meist geschlossene niedrige Bewölkung, zeitweise Nebel beobachtet, während es am Schöckl fast wolkenlos war. Der 14.1. war morgens in Graz neblig, mittags wolkenfrei, abends wieder von geschlossener Bewölkung gekennzeichnet.

Während des gesamten Zeitraums wurde am Flughafen Graz-Thalerhof umlaufender Wind gemeldet; dies deutet darauf hin, daß im Bereich Thalerhof keine ausgeprägte Strömung vorhanden war. Die Windgeschwindigkeiten am Flughafen lagen durchwegs um 1 m/s.

Die Windrichtung am Schöckl wechselte von NW am 6.1. um 6 Uhr auf SW bis 7.1. um 18. Uhr, um dann wieder über W auf NW zu drehen. Von 10.1., 12 Uhr bis 12.1., 12 Uhr liegen Calmen vor. Die Windgeschwindigkeit am Schöckl lag meist zwischen 2 und 4 m/s. Das Maximum am 9.1. um 6 Uhr charakterisiert den Frontdurchzug, verbunden mit Temperaturabnahme von -2 °C (8.1., 18 Uhr) auf -7 °C (9.1., 6 Uhr). Eine direkte Auswirkung auf Wind und Temperatur in Graz Flughafen hatte der Frontdurchgang nicht, doch führte er dort zu einer Auflösung des Nebels bzw. Hochnebels und damit zum Ansteigen der Tageshöchsttemperaturen.

Der Zeitraum von 9. bis 12. 1. war dann am Flughafen von bewölkungsfreiem Wetter mit starken Tagesgängen der Temperatur gekennzeichnet. Am 13. und 14.1. führte geschlossene Bewölkung, zeitweise Nebel, über dem Grazer Becken zu Temperaturrückgang und geringen Temperaturtagesgängen.

Der Temperaturrückgang vom 13.1., 18 Uhr auf den 14.1., 6 Uhr am Schöckl ist auf den Durchzug einer Kaltfront zurückzuführen, die den Alpenraum streifte, aber kaum Bewölkung verursachte. Sie führte zur Nebelauflösung am Morgen des 14.1. in Graz Flughafen.

Nach mehrtätigen Calmen kam am 12.1., 12 Uhr am Schöckl Westwind auf, der dann auf Nord bzw. Nordwest drehte, aber 2.5 m/s nicht überschritt. Graz-Flughafen meldete schwachen umlaufenden Wind.

7.1.2 Immissionssituation

Die SO₂-Konzentration blieb an den vier betrachteten Meßstellen am 6.1. unter 0.04 mg/m³; am 7.1. setzte ein Anstieg ein, erhöhte SO₂-Werte lagen dann bis 13.1. vor. Der 13. und 14.1. wiesen – ähnlich der Zeit bis 6.1. – einen ungewöhnlich strukturlosen Verlauf bei niedrigen, von Station zu Station aber recht unterschiedlichen Werten auf.

Tabelle 11 gibt die TMW sowie die HMWmax der 4 Meßstellen in mg/m³ an (links TMW, rechts HMWmax).

<i>Tab. 11: TMW sowie die HMWmax der 4 Meßstellen in mg/m³ an (links TMW, rechts HMWmax)</i>								
	<i>Nord</i>		<i>West</i>		<i>Süd</i>		<i>Mitte</i>	
<i>6.1.</i>	<i>0.027</i>	<i>0.036</i>	<i>0.024</i>	<i>0.035</i>	<i>0.019</i>	<i>0.023</i>	<i>0.032</i>	<i>0.038</i>
<i>7.1.</i>	<i>0.041</i>	<i>0.083</i>	<i>0.051</i>	<i>0.162</i>	<i>0.031</i>	<i>0.069</i>	<i>0.044</i>	<i>0.080</i>
<i>8.1.</i>	<i>0.069</i>	<i>0.126</i>	<i>0.068</i>	<i>0.140</i>	<i>0.044</i>	<i>0.082</i>	<i>0.064</i>	<i>0.109</i>
<i>9.1.</i>	<i>0.095</i>	<i>0.164</i>	<i>0.086</i>	<i>0.146</i>	<i>0.052</i>	<i>0.125</i>	<i>0.081</i>	<i>0.132</i>
<i>10.1.</i>	<i>0.088</i>	<i>0.166</i>	<i>0.119</i>	<i>0.258</i>	<i>0.088</i>	<i>0.151</i>	<i>0.122</i>	<i>0.201</i>
<i>11.1.</i>	<i>0.099</i>	<i>0.241</i>	<i>0.096</i>	<i>0.201</i>	<i>0.072</i>	<i>0.126</i>	<i>0.091</i>	<i>0.167</i>
<i>12.1.</i>	<i>0.101</i>	<i>0.243</i>	<i>0.075</i>	<i>0.149</i>	<i>0.070</i>	<i>0.121</i>	<i>0.107</i>	<i>0.170</i>
<i>13.1.</i>	<i>0.081</i>	<i>0.104</i>	<i>0.007</i>	<i>0.022</i>	<i>0.028</i>	<i>0.036</i>	<i>0.043</i>	<i>0.061</i>
<i>14.1.</i>	<i>0.069</i>	<i>0.114</i>	–	–	<i>0.029</i>	<i>0.056</i>	<i>0.043</i>	<i>0.079</i>
<i>15.1.</i>	<i>0.049</i>	<i>0.096</i>	–	–	<i>0.019</i>	<i>0.026</i>	<i>0.035</i>	<i>0.046</i>
<i>16.1.</i>	<i>0.109</i>	<i>0.191</i>	<i>0.055</i>	<i>0.139</i>	<i>0.051</i>	<i>0.111</i>	<i>0.081</i>	<i>0.133</i>
– <i>Keine Werte vorhanden</i>								

Abb. 46 zeigt den Verlauf der HMW für SO₂ an den vier Meßstellen zusammen mit der aus den SODAR-Echos ermittelten Inversionshöhe sowie Winddaten aus 6 m Höhe am SODAR-Standort (Windrichtung: WIRI 6 m, in Grad, Windgeschwindigkeit: WIGE 6 m, in m/s) und die Temperatur an der Station Graz Mitte (T Graz Mitte, angegeben in Grad C) für den Zeitraum von 6.1. mittags (12 h) bis 8.1. mittags (12 h), Abb. 47 die selben Größen für den Zeitraum 8.1. mittags (13 h) bis 10.1. Mitternacht (24 h), Abb. 48 für den 11.1., Abb. 49 für den 12. und 13.1., Abb. 50 für den 14. und 15.1.

Bis 7.1., 4 Uhr zeigen die SO₂-Werte aller 4 Stationen einen gleichmäßigen Verlauf zwischen 0.02 mg/m³ und 0.03 mg/m³. Ab 7.1., 5 Uhr stiegen in Graz West die Werte, ab 7 Uhr auch an den anderen Stationen. Während in Graz West um 20 Uhr ein deutlicher Spitzenwert von 0.162 mg/m³ auftrat, stieg die Konzentration an den anderen Stationen langsam und gleichmäßig bis in die Vormittagsstunden des 8.1. an; Graz Nord wies einzelne Konzentrationsspitzen am 7.1. auf.

Am Nachmittag des 8.1. nahmen die Konzentrationen an allen Meßstellen auf ca. 0.05 mg/m³ ab, um im Laufe des 9.1. erneut anzusteigen; auf eine leichte Abnahme am Abend des 9.1. folgten die Jänner-Maxima am 10.1. vormittags (außer Graz Nord mit Maximum am 16.1.): 0.258 mg/m³ in Graz West, 0.201 mg/m³ in Graz Mitte, 0.151 mg/m³ in Graz Süd; im weiteren Verlauf des 10.1. nahmen die Werte wieder etwas ab.

Am 11.1. lagen die Konzentrationen zunächst unverändert zwischen 0.050 und 0.075 mg/m³ und begannen um ca. 7 Uhr anzusteigen, am deutlichsten in Graz West (auf 0.201 mg/m³); in Graz Nord war zwischen 9 und 10 Uhr ein rasanter Anstieg von 0.100 auf 0.241 mg/m³ zu be-

obachten. Anschließend erfolgte allmähliches Absinken der SO_2 -Werte (0.06 bis 0.10 mg/m^3), am Abend dann ein leichter Anstieg in Graz Mitte, West und Süd.

Zu Beginn des 12.1. war an den Stationen Mitte, Süd und Nord Abfallen der Konzentration zu beobachten, dem ab 5 Uhr bzw. 7 Uhr ein von Station zu Station unterschiedlicher Anstieg folgte, am eindrucksvollsten in Graz Nord, wo um 10 Uhr ein deutliches Maximum erreicht wurde. Ab diesem Zeitpunkt erfolgte an allen Meßstellen allmähliches, mehr oder minder monotoneres Absinken bis 15 Uhr, dem zwischen 22 und 24 Uhr weiteres drastisches Abfallen (außer Graz Nord) auf die nahezu konstanten Werte des 13.1. folgte.

Am 13.1. lagen die Konzentrationen in Graz Nord (um 0.080 mg/m^3) deutlich über denen der anderen Meßstellen; im Verlauf des gesamten Tages war kaum eine zeitliche Variation zu erkennen.

Die SO_2 -Werte stiegen zu Beginn des 14.1. infolge der Inversion etwas an (auf 0.114 mg/m^3 um 10 Uhr in Graz Nord, 0.079 mg/m^3 um 12 Uhr in Graz Mitte) und fielen ca. zwischen 12 und 15 Uhr deutlich ab (um 0.04 mg/m^3 in Graz Nord, um 0.03 mg/m^3 in Graz Mitte); auf diesem Niveau verblieben die Werte bis 15.1. mittags und stiegen dann leicht an (Maximum in Graz Nord 0.069 mg/m^3 um 13 Uhr).

Am 16.1. erfolgte ab 5 Uhr deutliches Ansteigen in Graz Nord und Mitte; in Graz Nord wurde um 11 Uhr das Maximum mit 0.191 mg/m^3 erreicht, in Graz Mitte um 13.30 Uhr 0.118 mg/m^3 , um 20 Uhr 0.133 mg/m^3 , anschließend fielen sie allmählich ab.

Generell fällt auf, daß Graz Süd die geringsten Werte aufweist, während die Immissionsspitzen in Graz West und Nord gemessen wurden; diese beiden Stationen weisen auch einen ziemlich ungleichmäßigen Verlauf mit einzelnen kurzzeitigen Spitzen und starken Variationen auf, während Graz Süd und Mitte einen recht gleichmäßigen Verlauf zeigen.

7.1.3 Lokale Meteorologische Situation

Verlauf der Meßgrenze

Die Meßgrenze ist die Höhe, bis zu der auswertbare Echos vorliegen; sie liegt meist zwischen 150 und 350 m, es gibt jedoch auch Zeiträume, in denen gar keine Echos gemessen wurden. Bisweilen kommen auch aus einem Höhenbereich oberhalb einer Zone ohne Echos noch auswertbare Daten.

Die Meßgrenze lag für den 6.1. bei ca. 180 m, stieg dann in der Nacht auf den 7.1. auf über 350 m (bis ca. 8 Uhr) und fiel bis 17 Uhr auf 50 m ab. Extrem schwache Echos oder deren gänzlicher Ausfall am Nachmittag sind ein häufig auftretendes Phänomen, das auf sehr homogene atmosphärische Verhältnisse rückschließen läßt; dies entspricht der guten Durchmischung in Bodennähe am Nachmittag bei starker Sonneneinstrahlung. In der Nacht vom 7. auf den 8.1. lag die Meßgrenze um 250 m, am Nachmittag des 8.1. bis zum 9.1. 1h zwischen 150 und 200 m, um in der ersten Tageshälfte des 9.1. auf ca. 300 m anzusteigen. In der Nacht vom 9. auf den 10.1. lag die Meßgrenze um 300 m.

In den Abendstunden des 8.1. lagen oberhalb der Meßgrenze noch einige Echos vor, die die Bestimmung einer Inversion gestatten; für den 9.1., 17 und 18 Uhr, läßt sich ebenfalls eine Inversion vermuten.

Am 11.1. schwankte die Meßgrenze relativ stark zwischen 175 und 375 m und fiel am Nachmittag stark ab; um 17 Uhr liegen überhaupt keine auswertbaren Echos vor.

Die Meßgrenze folgte am 12. und 13.1. dem "typischen" Verlauf. Zu Beginn des 12.1. lag sie bei über 300 m und sank bis 15 Uhr auf ca. 200 m ab; zwischen 16 und 17 Uhr fehlen Echos überhaupt, was auf große Homogenität der Atmosphäre schließen läßt.

Anschließend stieg die Meßgrenze auf 350 m während der Nacht vom 12. auf den 13. 1., zwischen 17 und 18 Uhr am 13.1. erleidet sie einen Einbruch auf 125 m, um dann wieder auf bis 350 m anzusteigen.

In dieser Höhe lag die Meßgrenze am 14.1. bis ca. 9 Uhr und sank dann ziemlich kontinuierlich bis 17 Uhr auf 170 m ab. In der folgenden Nacht war die Echointensität in Bodennähe bis zur Meßgrenze in ca. 150 m außerordentlich niedrig; oberhalb eines echolosen Bereichs zeichnete sich jedoch eine Schicht sehr hoher Echointensität in ca. 350 m Höhe ab.

Verlauf der Inversionshöhe (-untergrenze) und der Temperatur

Am 6.1. ist in den SODAR-Daten keine Inversion zu erkennen. Bei geschlossener Wolken-
decke blieb die Temperatur in Graz Mitte zwischen -3.5 und -3.0 °C.

Mit Auflösung der Bewölkung zu Beginn des 7.1. sank die Temperatur infolge Ausstrahlung bis 8 Uhr auf -8.3 °C; um 5 Uhr bildete sich oberhalb 350 m – bei rasanter Zunahme der Echointensität oberhalb 200 m – eine Inversion aus; ihre Untergrenze sank rasch auf 200 m; um 13 Uhr begann sie sich zu heben und (wahrscheinlich) aufzulösen, während die Temperatur infolge Sonneneinstrahlung auf -3.3 °C um 16 Uhr stieg. In der folgenden Nacht sank sie auf -10.2 °C (6 Uhr) ab, erreichte aber am 8.1. bei geringem Tagesgang nur ein Maximum von -5.4 °C, was auf infolge Bewölkung verminderte Einstrahlung zurückzuführen war.

Ab 7.1., 21 Uhr zeichnete sich in ca. 300 m eine Inversion ab (oberhalb eines echolosen Bereichs), die bis 8.1., 6 Uhr relativ schwach ausgeprägt war, danach wesentlich deutlicher; die Untergrenze sank zunächst von ca. 250 m auf ca. 160 m; danach löste sie sich nach leichter Hebung auf. Unterhalb zeichnete sich zwischen 9 und 15 Uhr eine Bodeninversion ab.

Analog zeichnete sich ab 8.1., 22 Uhr eine Inversion in ca. 400 m ab (oberhalb eines echolosen Bereichs), die am Morgen des 9.1. auf ca. 200 m sank und bis ca. 12 Uhr anhielt. In diesem Zeitraum fand der Frontdurchzug statt, der am Schöckl registriert wurde und sich – vermutlich – in den hohen Windgeschwindigkeiten oberhalb 200 m abzeichnete, in Graz Flughafen jedoch kaum Auswirkungen hatte. Die extrem hohen Echointensitäten können zusätzlich zum Temperaturgradienten durch den starken Gradienten der Windgeschwindigkeit bedingt sein. Die Temperaturverläufe der Stationen Schöckl und Graz Flughafen bzw. Graz Mitte zeigen, daß es sich dabei im Grazer Becken um eine maskierte Kaltfront handelte, deren Kaltluftmasse wärmer war als die am Boden lagernde Luft; daher führte der Kaltfrontdurchzug nicht zu einer Auflösung der Inversion, wohl aber der nächtlichen Bewölkung.

Nach 12 Uhr nahmen die Echointensitäten ab, undeutlich zeichnet sich eine sich hebende Bodeninversion ab, die nachts ca. 250 m erreichte. Die Temperatur in Graz Mitte stieg währenddessen auf $+0.2$ °C (15 Uhr) und sank in der folgenden Nacht auf -7.5 °C (6 Uhr).

Die Inversion am 10.1. ab 4 Uhr wurde aus Echomaxima von relativ großer vertikaler Ausdehnung abgeleitet; ihre Lage ist daher unsicher. Man kann aus den Echos ableiten, daß sich hintereinander zwei Inversion hoben (5 bis 9 Uhr sowie 8 bis 11 Uhr); danach liegen keine hohen Echointensitäten mehr vor. Während dieses Zeitraums lag die Temperatur am Flughafen sowie in Graz Mitte infolge starker Tageserwärmung (auf 4.3 °C in Graz Mitte, 16 Uhr) über jener am Schöckl.

Am 11.1. traten ab 6 Uhr hohe Echointensitäten in einem relativ breiten Bereich in ca. 200 m auf, die sowohl durch den Temperaturgradienten, als auch die vertikale Windgeschwindigkeits-

scherung bedingt sein können; die zu dieser Zeit ansteigenden SO_2 -Konzentrationen deuten auf das Vorhandensein einer Inversion hin, die sich langsam hob. Zwischen 14 und 23 Uhr sind vereinzelte starke Echos aus Höhen von 150 bis 300 m vorhanden, die möglicherweise auf eine Inversion schließen lassen.

Am 12.1. sank ab 3 Uhr eine Inversion von 250 m auf etwas über 100 m um 6 Uhr ab; wegen der großen vertikalen Erstreckung des Bereichs maximaler Echointensität ist die genaue Festlegung der Inversionsuntergrenze schwierig; diese Inversion hob sich dann etwas, worauf eine zweite Inversion um 11 h sichtbar wird, vermutlich eine sich hebende Bodeninversion, die bis 14 Uhr in ca. 160 m verfolgbar ist.

Der 13.1. war zunächst durch eine schwache Inversion gekennzeichnet, die sich ab ca. 2 Uhr ausmachen läßt und die rasch stieg; ab ca. 6 Uhr war sie besser ausgeprägt in ca. 200 m zu erkennen und hob sich bis 12 Uhr auf ca. 260 m, um sich dann wahrscheinlich aufzulösen; darunter befand sich bis ca. 11 Uhr ein Bereich extrem geringer Echointensität, d.h. homogener Durchmischung, zwischen 11 und 14 Uhr wahrscheinlich eine sekundäre Inversion in ca. 140 m Höhe.

Schließlich war ab 19 h eine Inversion in ca. 160 m vorhanden, die sich am 14.1. bis ca. 12 Uhr auf ca. 100 m absenkte und dann auflöste oder hob, wobei ständig unterhalb der Inversion sehr niedrige Echointensitäten auftraten.

Während in der Nacht vom 14. auf den 15.1. in Bodennähe die Echointensitäten extrem gering waren, trat ab ca. 18 Uhr in ca. 350 m Höhe eine Inversion auf, die bis 15.1., 5 Uhr (ab diesem Zeitpunkt liegen wegen Geräteausfall keine Meßwerte vor) in 300 bis 400 m Höhe zu verfolgen ist.

Die Temperatur in Graz Mitte zeigte am 13.1. einen infolge starker Bewölkung nur schwach ausgeprägten Tagesgang; zwischen 1 und 10 Uhr lag die Temperatur nahezu konstant bei ca. -6°C , nachmittags erreichte sie maximal -2°C .

Auch am 14.1. gab es einen weniger ausgeprägten Tagesgang als vor dem 12.1., wobei sich die in den SODAR-Daten erkennbare Inversion kurz vor Erreichen des Temperaturmaximums auflöste; die folgende Nacht sowie der 15.1. wiesen bedecktes Wetter auf, sodaß der 15.1. praktisch keinen Temperaturtagesgang aufwies. Die starke Bewölkung und die dadurch bedingte geringe Abkühlung in der Nacht und am Morgen waren der Grund dafür, daß sich keine bodennahe Inversion ausbildete.

Die Inversionen zeigen im allgemeinen ihre stärkste Ausprägung in der zweiten Nachthälfte und vormittags, wenn der Boden auskühlt. Stark ausgeprägte Inversionen in bis ca. 200 m Höhe bildeten sich meist, wenn die Temperatur am Boden nachts sank, und lösten sich auf bzw. hoben sich, bevor die Temperatur ihr Tagesmaximum erreichte, wobei nachmittags aufgrund der geringen Echointensität keine Aussage über die Verhältnisse oberhalb ca. 200 m möglich ist; das Auftreten hoher Echointensitäten in der ersten Nachthälfte oberhalb eines echolosen Bereiches am 7., 8., 9. und 11.1. läßt die Interpretationsmöglichkeit zu, daß sich auch nachmittags in größerer Höhe eine Inversion hält.

Möglicherweise verhinderte die geringe Bewölkung am 10.1. die Bildung einer Inversion in der Nacht vom 10. zum 11.1., in der die Temperatur nicht so rasch sank.

Wind

Abb. 51 und Abb. 52 zeigen die Windrichtung und die Windgeschwindigkeit an der Meßstelle Graz Süd und über dem SODAR in 50 m, 100 m, 150 m, 200 m und 250 m Höhe vom 6.-7.1.1990, Abb. 53 und Abb. 54 die selben Größen am 8. und 9.1.1990, Abb. 55 und Abb. 56

am 10. und 11.1.1990, Abb. 57 und Abb. 58 am 12. und 13.1.1990, Abb. 59 und Abb. 60 am 14. und 15.1.

Am 6. und 7.1. wehte in allen Höhen unbeständiger Wind; am Boden überwog deutlich südlicher Wind, der nachts zeitweise auf Nordwest drehte. Die Bodenwindmessungen beim SODAR zeigen einen deutlicheren Richtungswechsel zwischen Süd und Nordwest als jene in Graz Süd. Ähnlich schwankte in 50 bis 150 m Höhe die Richtung am 6.1. bis 16 Uhr in einem breiten Bereich um Süd, nachts lag sie dann zwischen West und Nord. Am 7.1. wehte zwischen 10 und 16 Uhr unbeständiger Wind aus südlichen Richtungen, danach Nordwind. In höheren Niveaus war am 7.1. Südwind seltener, West- bis Nordwind überwog bei weitem, was den Verhältnissen auf dem Schöckl entspricht. Die Windrichtungsverhältnisse in den unteren Niveaus entsprechen der Talwindzirkulation, die sich allerdings relativ unscharf ausbildet.

Die Windgeschwindigkeit lag in Graz Süd am 6.1. meist um 0.5 m/s und stieg nachts zeitweise auf 1 m/s an; mit Einsetzen der Inversion am 7.1., 6 Uhr nahm die Windgeschwindigkeit in allen Niveaus deutlich ab (um 0.5 m/s in 50 bis 150 m); die Geschwindigkeit des Bodenwindes beim SODAR war deutlich niedriger (fast stets unter 0.5 m/s) und erreichte nur am 7.1. um 13 Uhr 1 m/s.

Der Wind über dem SODAR wies am 6.1. bis 10 Uhr zumeist Geschwindigkeiten von 0.5 bis 1 m/s auf, nachmittags und nachts stiegen sie auf 1.5 bis 2.5 m/s. Am 7.1. sank die Geschwindigkeit zwischen 7 und 15 Uhr auf um 0.5 m/s und stieg abends – vor allem in den unteren Höhenniveaus – wieder an, wobei in 50 m 2.5 m/s, in 100 m 1.5 m/s erreicht wurden.

Am 8.1. herrschte am Boden bis 12 Uhr sehr schwacher und richtungsunbeständiger Wind (beim SODAR Calme), anschließend – nach Auflösung der Inversion um ca. 13 Uhr – Südwind mit ca. 1 m/s. In der Höhe trat am 8.1. bis 10 Uhr nördlicher Wind auf, danach Südwind, der bis 20 Uhr nach und nach auf West drehte.

Die Windgeschwindigkeit lag in allen Höhen am 8.1. um 1 m/s und überschritt nur kurz morgens in 200 m 2 m/s. Zwischen 10 und 24 Uhr war die Geschwindigkeit vom Boden bis in 200 m sehr einheitlich um 1.5 m/s.

Zu Beginn des 9.1. – mit Einsetzen der Inversion und Drehung des Windes oberhalb 100 m auf Nord – begann die Windgeschwindigkeit oberhalb 200 m rasch anzusteigen, sie erreichte in 200 m vormittags über 4 m/s, in 250 m 7 bis 8 m/s. In 150 m wurden morgens nur 2 m/s erreicht; in 50 und 100 m nahm die Windgeschwindigkeit bis 5 Uhr auf unter 0.5 m/s ab und anschließend wieder zu auf ca. 1 m/s.

Am 9.1. wehte in den unteren 100 m bis 16 Uhr meist Südwind (morgens zeitweise Ostwind), ansonsten hielt am 9.1. der Nordwind an, der zwischen 10 und 17 Uhr auf Süd, zeitweise West wechselte. Der Windrichtungswechsel von Talaus- und Taleinwind war zeitlich und höhenmäßig sehr uneinheitlich.

Die Geschwindigkeit sank um 12 Uhr in allen Höhen drastisch ab (1 m/s in 200 und 250 m) und blieb in den unteren 150 m den Rest des Tages bei 1 m/s; in größeren Höhen stieg sie wieder an (in 250 m bis 4 m/s).

Zwischen 9.1., 17 Uhr und 10.1., 14 Uhr wehte oberhalb 100 m durchwegs Nordwind, am Boden unbeständiger Südwind, in 50 m schwankte die Richtung zwischen Nord und Süd über West. Die Windgeschwindigkeit stieg in der zweiten Nachthälfte deutlich an, oberhalb 200 m wurden 6 m/s erreicht, in 100 m 2 m/s. Diese Windgeschwindigkeiten waren wesentlich höher als am Schöckl, wo zwischen 10.1., 6 Uhr und 12.1., 6 Uhr Windstille herrschte. Am Boden lag die Windgeschwindigkeit unter 0.5 m/s, am Flughafen wehte umlaufender Wind mit maximal 1 m/s. Somit handelt es sich bei dem relativ starken Nordwind über dem Grazer Becken um ein lokales Phänomen.

Am Nachmittag des 10.1. stellten sich unregelmäßige Windrichtungsverhältnisse ein, zeitweise wehte in 100 bis 150 m Ostwind; oberhalb 200 m fehlen infolge sehr geringer Echointensität Meßwerte. Ab 21 Uhr überwog Nordwind, der bis 11.1., 10 Uhr anhielt. Die Windgeschwindigkeit lag ab 14 Uhr unter 2 m/s, wobei die höchste Geschwindigkeit in 50 m auftrat; sie stieg am 11.1. ab 5 Uhr in größeren Höhen wieder deutlich an, wobei in 250 m 5.5 m/s, in 200 m 4.5 m/s erreicht wurden, während in den unteren Niveaus die Geschwindigkeit absank; um 12 Uhr traten nochmals hohe Windgeschwindigkeiten auf (4 m/s in 150 und 200 m). Mit Drehung des Windes auf Süd bis West nach 12 Uhr flaute der Wind in allen Höhen auf unter 1 m/s ab.

Nach 18 Uhr drehte der Wind in allen Höhen auf Nord, die Windgeschwindigkeit nahm zunächst leicht auf bis 2 m/s, um 23 Uhr auf 4 m/s zu.

Am 12.1. erfolgte um 13 Uhr der Wechsel von Nordwind auf unbeständigen Südwind in allen Höhen, wobei zwischen 16 und 17 Uhr infolge geringer Echointensität nur aus 50 m Werte vorliegen. Nordwind stellte sich erst ab ca. 21 Uhr ein, in der Nacht herrschte sehr unbeständiger, meist nördlicher bis nordwestlicher Wind.

Die Windgeschwindigkeit lag nachts und vormittags am 12.1. bis 8 Uhr oberhalb 200 m über 4 m/s, in 100 m bis 2 m/s, bis 15 Uhr in 150 und 200 m noch bis 3 m/s. Nachmittags sowie bis 23 Uhr lag sie dann um 1 m/s.

Die folgende Nacht brachte geringere Windgeschwindigkeiten (um 2 m/s in 200 m, lediglich in 250 m wurden 4 m/s überschritten); bis 200 m lag die Geschwindigkeit ab 11 Uhr am 13.1. um 1 m/s.

Am 13.1. drehte der Wind um 11 Uhr – beginnend in 50 m – nach und nach in allen Höhen auf Süd, um 19 Uhr rasch wieder auf Nord. Die Windgeschwindigkeit stieg wieder an, unterhalb 200 m bis 2 m/s, in 250 m bis 3.5 m/s.

Der 14.1. wies in Graz Süd stets Südwind mit Geschwindigkeit unter 0.5 m/s auf, die nur kurz nachmittags über 1 m/s stieg; in höheren Niveaus wehte bis 11 Uhr Nordwind (in 50 m zeitweise West- bis Nordwestwind), danach Südwind, der ab 21 Uhr wieder auf West bis Nord drehte. Am 15.1. liegen infolge Ausfall des SODAR ab 6 Uhr keine Werte mehr vor. Die Windgeschwindigkeit in der Höhe lag am 14.1. bis 6 Uhr bis 3 m/s (oberhalb 150 m), danach unter 2 m/s.

Insgesamt zeigt die Gradientschwache Episode vom 6. bis 13.1.1990 folgende Charakteristika:

- In Bodennähe traten zumeist außerordentlich geringe Windgeschwindigkeiten (häufig unter 0.5 m/s) auf, wobei die höchsten Werte regelmäßig ca. zwischen 10 und 16 Uhr beobachtet wurden, d.h. in jener Zeit, die Taleinwind (Südwind) erwarten läßt. Während die Bodenwindmessung beim SODAR nachts überwiegend Windstille erfaßte, zeigt die Windmessung bei der Station Graz Süd nachts sehr schwachen Südwind. Generell war die Windrichtung in Graz Süd – bei überwiegend südlicher Richtung – stark schwankend.
- In den vom SODAR erfaßten Höhen zeichnete sich meist recht unscharf ein Windrichtungswechsel zwischen Nordwind nachts und vormittags und Südwind nachmittags bis abends ab; dabei war der Nordwind wesentlich einheitlicher und beständiger als der Südwind. Ein solcher Richtungswechsel wurde am 7., 8., 9., 11., 12., 13. und 14.1. beobachtet; am 6.1. wehte von 0 bis 16 Uhr Südwind, am 10.1. nachmittags – soweit die wenigen vorhandenen Echos eine Aussage zulassen – Süd- bis Ostwind.
- Hohe Windgeschwindigkeiten traten bevorzugt in der zweiten Nachthälfte auf, wobei die Windgeschwindigkeit mit der Höhe zunahm. Dies zeigt, daß der Talauswind mit wesentlich höheren Windgeschwindigkeiten verbunden war als der Taleinwind und auch höhenmäßig wesentlich homogener war. Die Windgeschwindigkeiten oberhalb 200 m lagen dabei meist bis 4 m/s.

Die wesentlich höheren Geschwindigkeiten in der zweiten Nachthälfte am 9.1. dagegen dürften durch die synoptische Strömung (Auswirkung eines Frontdurchganges) bedingt gewesen sein.

- Die Talwindzirkulation bildete sich unbeeinflusst durch die zeitweise auftretende niedrige Bewölkung aus.

7.1.4 Zusammenhang von Immission und Meteorologie

Der Anstieg der SO_2 -Werte an allen Stationen setzte am 7.1. morgens mit Beginn der Inversion und Abflauen des Windes (am Boden und in Höhen bis 200 m) ein. Die vorangegangenen Tage waren von bedecktem, relativ windigem Wetter (mit richtungs- und geschwindigkeitsmäßig ziemlich unbeständigem Wind) gekennzeichnet, bei dem kaum Inversionen auftraten und die SO_2 -Konzentrationen niedrig blieben.

Der kausale Zusammenhang zwischen Inversionen mit tiefen Untergrenzen und hohen Immissionskonzentrationen tritt in den Meßdaten meist zutage, doch lassen sich etliche Konzentrationsspitzen allein durch (niedrige) Inversionen nicht erklären.

So trug das häufige Inversionswetter vom 7.1., 5 Uhr bis 10.1., 12 Uhr zum Aufbau der hohen Konzentrationen bei, die am 8.1. mittags und am 10.1. mittags ihre Maxima erreichen, insbesondere, was den recht gleichmäßigen Anstieg der Konzentration in Graz Süd und Mitte angeht. Doch war gerade mit der Hebung (Auflösung) der Inversion am 7.1., 17 Uhr kein Absinken der Konzentration zu beobachten.

Das Zusammentreffen des raschen Anstiegs der Belastung in Graz West am 7.1., 20 Uhr und der hohen Werte danach, sowie des nicht ganz so auffälligen Konzentrationsanstiegs in Graz Nord, mit dem Aufkommen relativ starken Nordwindes (bis 2.5 m/s in 50 m Höhe gegenüber 0.5 m/s) in den unteren 100 m läßt auf Advektion als Ursache dieser Spitze schließen; Transport aus dem Gratkorner Becken wäre eine naheliegende Erklärung; allerdings würde man bei Advektion aus dem Gratkorner Becken auch in Graz Nord erhöhte Immissionswerte erwarten; eventuell könnten auch lokale Emittenten diese Immissionsmaxima in Graz West verursachen; der Emissionskataster stützt diese Annahme jedoch nicht sehr.

Das Absinken der Immissionskonzentration am Nachmittag des 8.1. dürfte mit der Hebung (Auflösung) der Inversion und dem Aufkommen relativ starken Südwindes in Bodennähe (bis über 1.5 m/s in Graz Süd) in Zusammenhang stehen, wobei in Graz Nord die Abnahme der Konzentration am spätesten zu beobachten war.

Der Aufbau höherer Konzentrationen am 9. und 10.1. begann mit dem Absinken der Inversionsuntergrenze zu Beginn des 9.1. Graz Nord und West wiesen zwischen 7 und 11 Uhr besonders erhöhte Werte auf, die durch den von 7 bis 9 Uhr in den unteren 100 m herrschenden südlichen bis östlichen Wind bedingt sein könnten, d.h. durch Advektion aus dem grazer Stadtzentrum; dies dürfte in Graz Nord für den Zeitraum von 10 bis 15 Uhr bei mäßigem Südwind der Fall sein.

Der relativ starke Nordwind (über 2 m/s) in 50 und 100 m um 23 Uhr könnte für die Konzentrationsspitze in Graz West verantwortlich sein.

Für den 10.1., 1 bis 11 Uhr, kann die relativ niedrige Inversionsuntergrenze als Hauptursache des weiteren Anstiegs der SO_2 -Konzentration an allen Meßstellen angesehen werden, wobei die Spitzenwerte in Graz West um 4 Uhr und um 10 Uhr mit dem Aufkommen von relativ starkem Nordwind in 100 und 150 m in Verbindung stehen können. In Graz Mitte, Graz Süd und Graz West zeigt die Immissionskonzentration einen klaren inversen Zusammenhang mit der Inversionshöhe.

Ein Absinken der Konzentration an allen Stationen – am spätesten in Graz Mitte – war mit der Hebung (Auflösung) der Inversion, dem raschen Temperaturanstieg am Talboden und dem Abflauen des starken Nordwindes zwischen 10 und 13 Uhr verbunden. Die Konzentrationsspitze in Graz Mitte und Graz West um 21 Uhr könnte dann durch starken Nordwind in 50 und 100 m bedingt sein.

Der 11.1. war von einem Ansteigen der Konzentrationen an allen Stationen ab 8 Uhr gekennzeichnet, der mit der Ausbildung einer Inversion oberhalb ca. 150 m einherging. Dieser Anstieg erfolgte in Graz West relativ steil und früh, Graz Nord wies zwischen 9 und 10 Uhr einen rasanten Anstieg der SO_2 -Konzentration von 0.100 auf 0.241 mg/m^3 auf. Für diesen plötzlichen Anstieg kann keine meteorologische Erklärung gegeben werden.

Nach diesem vormittäglichen Maximum sanken die Werte nach Auflösung (Hebung) der Inversion an allen Stationen langsam auf ein Niveau von ca. 0.07 bis 0.10 mg/m^3 ab, auf dem sie den ganzen Nachmittag verblieben.

Am 12.1. stiegen die SO_2 -Werte an allen Stationen morgens stark an, in Graz Nord wurde mit 0.243 mg/m^3 der Maximalwert des Winters 1989/90 erreicht, der weit über den gleichzeitigen Konzentrationen in Graz Mitte (um 0.15 mg/m^3) und West lag. Diese hohen Konzentrationen gingen mit einer ausgeprägten Inversion oberhalb ca. 100 m einher. Während der Hebung einer darunterliegenden Bodeninversion zwischen 12 und 15 Uhr sanken die Konzentrationen gleichmäßig und stiegen in der ersten Nachthälfte noch leicht an (Maxima in Graz Mitte bei 0.12 mg/m^3). Zwischen 23 und 24 Uhr erfolgte an allen Meßstellen außer Graz Nord rasches Absinken der Konzentration.

Die Windverhältnisse zeigten am 12.1. oberhalb 100 m bis 12 Uhr Nordwind, dessen Geschwindigkeit mit 2 m/s bis über 4 m/s relativ hoch lag; in 50 m drehte der Wind schon nachts auf West und ab 12 Uhr auf Süd. Wie weit die hohen SO_2 -Werte in Graz Nord durch Advektion von Norden (d.h. aus dem Gartkorner Becken) bedingt sind, kann nicht beurteilt werden.

Trotz Ausbildung einer Inversion am 13.1. kam es an diesem Tag nicht zu einem neuerlichen Anstieg der SO_2 -Konzentration, sondern vielmehr am 12.1., 23 Uhr in Graz Mitte, Graz Süd und Graz West zu einem Absinken auf Werte, die ab diesem Zeitpunkt sehr konstant blieben; lediglich in Graz Nord blieb die SO_2 -Konzentration auf einem vergleichsweise hohen Niveau von 0.09 mg/m^3 .

Die Windverhältnisse über dem Grazer Becken zeigen am 13.1. in der Nacht relativ uneinheitliche, wenngleich überwiegend nördliche bis westliche Richtungen bei Geschwindigkeiten unter 2 m/s. Südwind wehte zwischen 13 und 18 Uhr und war homogener und konstanter als an den Vortagen, obwohl zeitweilige Bewölkung die Sonneneinstrahlung verminderte. Die Windgeschwindigkeit in der zweiten Nachthälfte und vormittags war geringer als an den Vortagen, insbesondere in 100 bis 200 m Höhe.

Anders als an den Tagen zuvor wies der 13.1. – infolge zeitweiliger Bewölkung – nur einen geringen Temperaturtagesgang und ein Temperaturmaximum von $-2.1\text{ }^\circ\text{C}$ in Graz Mitte auf.

Die am 13.1. oberhalb ca. 200 bis 250 m liegende Inversion beeinflusste offenbar das Immissionsgeschehen kaum, unterhalb konnten sich die Schadstoffe gut verdünnen. Die niedrigen Echointensitäten deuten am 13., 14. und 15.1. auf sehr gute Durchmischung unterhalb der abgehobenen Inversion hin.

Der langsame Konzentrationsanstieg in Graz Nord, Mitte und Süd am Vormittag des 14.1. war durch das Vorhandensein einer niedrigen Inversion in der Nacht und vormittags bedingt; nach Inversionsauflösung um ca. 13 Uhr sanken die SO_2 -Konzentrationen noch stärker ab als am 13.1.

Insgesamt deuten die sehr gleichmäßigen Konzentrationsverläufe vom 13. bis 15.1. auf relativ gute Durchmischung hin. Obwohl auch ab dem 13.1. Inversionen auftraten, lagen diese offensichtlich hoch genug, um den Aufbau erhöhter SO_2 -Konzentrationen in Bodennähe nicht zuzulassen.

Die höchsten SO_2 -Konzentrationen traten jeweils morgens und vormittags auf, wenn hohe SO_2 -Emissionen mit ungünstigen Ausbreitungsbedingungen zusammentrafen. Die höchsten SO_2 -Werte – am 10., 11. und 12.1. – waren mit Inversionen verbunden, bei denen sehr hohe Echointensitäten in einem Bereich, der sich von 50 bis 100 m bis in ca. 250 m erstreckte; abgehobene, auch sehr ausgeprägte Inversionen, unterhalb derer ein Bereich geringerer Echointensität auftrat, wie am 7., 8. und 9.1., waren mit geringeren Konzentrationsanstiegen verbunden; die abgehobenen Inversionen, die vom 13. bis 15.1. oberhalb eines Bereich sehr niedriger Echointensität beobachtet wurden, hatten keine oder nur geringe Konzentrationsanstiege zur Folge.

Daraus läßt sich der Schluß ziehen, daß die Ausbreitungsbedingungen in Bodennähe ausschlaggebend für das Immissionsgeschehen sind; Sperschichten bereits in 200 m Höhe führen, wenn darunter gute Schadstoffverdünnung möglich ist, nicht zu Konzentrationsanstiegen.

Die niedrigsten und ausgeprägtesten Inversionen und damit einhergehend die höchsten SO_2 -Konzentrationen traten an Tagen auf, an denen nachts kein Nebel bzw. Hochnebel auftrat und starke nächtliche Abkühlung möglich war.

Der 13. bis 15.1. zeichnen sich durch gut ausgeprägten Südwind in allen Höhen nachmittags aus; demgegenüber waren die Tage mit hoher SO_2 -Belastung von nur schwach ausgeprägtem Südwind in der Höhe gekennzeichnet. Möglicherweise trug auch der Südwind in der Höhe zu den – gegenüber den anderen Grazer Stationen – erhöhten SO_2 -Werten in Graz Nord vom 13. bis 15.1. bei.

7.2 Episode 17. bis 28. Jänner 1990

Vom 16. bis 25.1. traten in Graz mit bis zu 0.20 mg/m^3 (Graz Mitte und Nord) hohe SO_2 -Konzentrationen auf, die jedoch hinter jenen der Episode 9.–12. 1. zurückblieben. Am 19.1. sanken die Konzentrationen auf unter 0.10 mg/m^3 ab, am 26.1. fielen sie auf Werte um 0.05 mg/m^3 , die bis 2.2. anhielten.

7.2.1 Großwetterlage und Witterungsverlauf

Abb. 61 zeigt die meteorologischen Parameter, die die Wetterlage im Raum Graz vom 16.1. bis 28.1. charakterisieren. Dargestellt sind der Bedeckungsgrad (Bed. Flughafen, angegeben in Achtel) und die Temperatur (T Flughafen, angegeben in Grad C) am Flughafen Graz–Thalerhof sowie die Temperatur (T Schöckl, in Grad C), Windrichtung (WIRI Schöckl, angegeben in Grad), –geschwindigkeit (WIGE Schöckl, angegeben in m/s) und Bedeckungsgrad (Bed. Schöckl, angegeben in Achtel) auf dem Schöckl. Der Bedeckungsgrad "9 Achtel" bedeutet "Himmel nicht sichtbar", d.h. Nebel.

Am 16.1. lag der Ostalpenraum am Nordrand eines schwachen Hochdruckgebietes mit Kern über Spanien; eine Warmfront überquerte mit starker, relativ milder westlicher Strömung Österreich, verbunden mit starker Bewölkung am Schöckl. Die Westströmung griff auch auf den grazer Raum über und bewirkte die Auflösung des Hochnebels, der seit 14.1. hier lagerte; sie machte sich mit Windgeschwindigkeiten über 6 m/s am Schöckl bemerkbar. Am Schöckl war diese Wetterlage mit kontinuierlichem Temperaturanstieg verbunden.

Der 17.1. war durch eine ähnliche Luftdruckverteilung, aber relativ windschwaches und wolkenarmes Wetter gekennzeichnet.

Am 18.1. schwächte sich das Hochdruckgebiet über Südwesteuropa ab, und eine Kaltfront griff auf den Ostalpenraum über, die kalte und feuchte Luftmassen heranzuführte. Am Schöckl war zwischen 17.1., 18 Uhr und 19.1., 6 Uhr ein Temperaturrückgang von $+5\text{ °C}$ auf -6 °C festzustellen. Gleichzeitig war es bedeckt, ohne daß es jedoch zu nennenswerten Niederschlägen kam. Am Schöckl frischte der Wind auf und erreichte seinen Maximalwert am 19.3., 6 Uhr mit ca. 12 m/s ; zu dieser Zeit lag der Alpenraum bereits am Gradientschwachen Ostrand eines Hochdruckgebietes, sodaß diese hohen Windgeschwindigkeiten synoptisch nicht ganz erklärbar sind.

Die Tageshöchsttemperatur in Graz Flughafen stieg bis 17.1., 12 Uhr (Maximum 9 °C) und ging danach wieder leicht zurück; der Tagesgang war vom Bedeckungsgrad abhängig. Die seit 9.1. zwischen Schöckl und Graz-Flughafen bestehende großräumige Inversion löste sich am 18.1. mithin auf.

In Graz Flughafen war das Wetter am 16. und 17.1. dunstig, am 16.1., 6 Uhr herrschte noch Nebel, dann geringe Bewölkung. Am Morgen des 18.1. war es wieder neblig, den ganzen Tag regnete es leicht bei bedecktem Himmel. Am Morgen des 19.1. lag Nebel an dieser Station, der sich rasch auflöste.

Am 19.1. lag Österreich am Ostrand eines Hochdruckgebietes, das sich am 20.1. etwas nach Süden verlagerte. An seiner Nordseite streiften am 20.1. Störungsausläufer den Alpenraum und bewirkten vermehrte Bewölkung, die bis 21.1. abends anhielt; der 21.1. war von starker Nordwestströmung gekennzeichnet. Die Temperatur am Schöckl nahm von 19.1., 6 Uhr (-6 °C) bis 21.1., 18 Uhr ($+2\text{ °C}$) kontinuierlich zu. Am 22.1. verstärkte sich das südwesteuropäische Hochdruckgebiet wieder, das am 23.1. sein Zentrum über dem Ostalpenraum hatte. In den Morgenstunden des 24.1. erreichte eine Front den Alpenraum mit starker westlicher Strömung, die feuchtmilde atlantische Luftmassen nach Mitteleuropa brachte und zu vermehrter Bewölkung sowohl am Schöckl als auch in Graz Flughafen führte. Am 25.1. – der Bedeckungsgrad nahm kurzzeitig ab – erreichte eine Warmfront die Alpen, am Morgen des 26.1. überquerte bei starker Westströmung (bedingt durch ein Sturmtief über Südsandinavien) eine Kaltfront den Alpenraum. Von diesem Zeitpunkt an herrschte bis 1.2., 6 Uhr in Graz Flughafen meist dichte Bewölkung (mindestens $7/8$, zeitweise Nebel), wobei es sich bis auf den 28.1. und 1.2. um praktisch geschlossene niedrige Bewölkung handelte.

Auf den leichten Temperaturanstieg am Schöckl vom 25.1. folgte ein deutlicher Temperaturabfall von $+2\text{ °C}$ auf -4 °C bis 27.1., 6 Uhr.

Am 27.1. verstärkte sich kurzzeitig wieder der Hochdruckeinfluß, der Schöckl war abends wolkenfrei, während in Graz Flughafen Nebel herrschte. Am 28.1. erreichte abermals ein frontales System den Ostalpenraum, diesmal verbunden mit südwestlicher Strömung, die eine Erwärmung am Schöckl (auf $+2\text{ °C}$ am 28.1., 18 Uhr) sowie dichte Bewölkung, zeitweise Nebel verursachte, der bis 29.1. abends anhielt.

Das Wetter in Graz Flughafen war bis 21.1. dunstig und niederschlagsfrei. Am 22.1., 6 Uhr wurde seichter Bodennebel gemeldet, am 23.1., 6 Uhr Nebelschwaden, auch der Morgen des 24.1. war neblig.

Am 26.1. regnete es mindestens ab 12 Uhr, um 18 Uhr wurde Gewitter gemeldet; um 18 Uhr wurden 16 mm Niederschlag (6–18 Uhr) registriert, am Schöckl 14 mm , dort fiel erstmals in diesem Jahr Schnee (6 cm).

In der folgenden Nacht schneite es in Graz. Der nächste Tag war neblig, der Nebel löste sich am 28.1. vor 6 Uhr auf.

7.2.2 Immissionssituation

Der Verlauf der SO_2 -Konzentration (mg/m^3) an den Meßstellen Graz Nord, Graz West, Graz Süd und Graz Mitte, die Windrichtung (WIRI, Grad) und Windgeschwindigkeit (WIGE, m/s), gemessen in 6 m Höhe beim SODAR (nur Abb. 62), sowie die aus SODAR-Daten ermittelte Inversionshöhe/-untergrenze am 17. und 18.1.1990 sind in Abb. 62 dargestellt, am 19. und 20.1. in Abb. 63, am 21. und 22.1. in Abb. 64, am 23. und 24.1. in Abb. 65, am 25. und 26.1. in Abb. 66, am 27. und 28.1. in Abb. 67.

Nachdem am 16.1. in Graz Nord die SO_2 -Konzentration $0.19 \text{ mg}/\text{m}^3$ erreicht hatte, traten am 17.1. vergleichbare Maximalwerte auch in Graz Mitte und Süd auf. An den Meßstationen Graz Nord und Mitte stieg in der Nacht vom 16. zum 17.1. zunächst die SO_2 -Konzentration von ca. 0.075 auf über $0.110 \text{ mg}/\text{m}^3$ an, um ca. um 5 Uhr wieder abzusinken. Mittags waren an allen drei Stationen deutliche Anstiege auf über $0.18 \text{ mg}/\text{m}^3$ zu beobachten, die Spitzenwerte traten zwischen 10 und 12 Uhr auf. Ungewöhnlich sind die hohen Werte in Graz Süd, dessen Belastung sonst deutlich unter jener der anderen Stationen lag. Nach 10 bzw. 12 Uhr fielen die Werte an allen drei Stationen wieder ab, am stärksten in Graz Süd (auf ca. $0.04 \text{ mg}/\text{m}^3$), in Graz Mitte blieben sie mit über $0.10 \text{ mg}/\text{m}^3$ am höchsten. Auf langsames Absinken bis Mitternacht folgte am 18.1. ein erneuter, diesmal langsamer Anstieg in Graz Mitte und Süd auf über $0.12 \text{ mg}/\text{m}^3$, während die Konzentrationen in Graz West bis 14 Uhr auf ca. $0.04 \text{ mg}/\text{m}^3$ blieben und dann bis 16 Uhr sprunghaft auf ca. $0.14 \text{ mg}/\text{m}^3$ anstiegen. Bis zum Ende des Tages sanken die Werte an allen drei Stationen auf unter $0.06 \text{ mg}/\text{m}^3$; in Graz West ist vom Beginn der Meßdaten um 14 Uhr kontinuierliches Absinken der Belastung festzustellen.

Am 19.1. lagen die SO_2 -Konzentrationen bis 11 Uhr um $0.05 \text{ mg}/\text{m}^3$ mit einem kurzen Anstieg in Graz Mitte um 8 Uhr auf $0.08 \text{ mg}/\text{m}^3$, dem ein genereller Abfall nachmittags auf unter $0.03 \text{ mg}/\text{m}^3$ folgte. Am Abend stiegen die Konzentrationen an allen Stationen an (maximal $0.09 \text{ mg}/\text{m}^3$), pendelten sich in der Nacht bei ca. $0.05 \text{ mg}/\text{m}^3$ ein und stiegen am Morgen des 20.1. auf um $0.12 \text{ mg}/\text{m}^3$, wobei in Graz Nord bis $0.17 \text{ mg}/\text{m}^3$ auftraten. Nach einem nachmittäglichen Minimum pendelten sich die Werte in der Nacht vom 20. auf 21.1. um $0.08 \text{ mg}/\text{m}^3$ ein. Die Konzentrationen aller Stationen lagen stets in einem ähnlichen Bereich.

Der 21.1. wies vormittags Spitzen bis $0.13 \text{ mg}/\text{m}^3$ (Graz West) auf, tagsüber lagen die Werte unter $0.10 \text{ mg}/\text{m}^3$, abends traten Spitzen bis $0.13 \text{ mg}/\text{m}^3$ (Graz Mitte) auf. In der Nacht von 21.1. auf 22.1. sanken die Konzentrationen leicht ab und stiegen am Morgen des 22.1. bis $0.14 \text{ mg}/\text{m}^3$ (Graz Mitte). Nachmittags erfolgte ein Einbruch auf unter $0.05 \text{ mg}/\text{m}^3$.

In der folgenden Nacht stiegen die Konzentrationen wieder leicht an und erreichten am 23.1. morgens $0.17 \text{ mg}/\text{m}^3$ in Graz West, $0.15 \text{ mg}/\text{m}^3$ in Graz Mitte. Nachmittags sanken sie, abends erfolgte in Graz West ein steiler Anstieg auf $0.15 \text{ mg}/\text{m}^3$, der an den anderen Stationen schwächer ausgeprägt war.

Nach leichtem Absinken in der folgenden Nacht wurden am Morgen des 24.1. – ausgenommen Graz Nord – bis $0.12 \text{ mg}/\text{m}^3$ erreicht. Auf diesem Niveau blieben die Konzentrationen zwischen 9 und 14 Uhr.

In der Nacht sanken die Konzentrationen leicht, um am Morgen des 25.1. erneut anzusteigen, wobei in Graz West $0.15 \text{ mg}/\text{m}^3$, in Graz Süd $0.11 \text{ mg}/\text{m}^3$ erreicht wurden.

In der ersten Nachthälfte vom 25.1. auf den 26.1. wurden bis $0.12 \text{ mg}/\text{m}^3$ erreicht, in der Nacht sanken die Konzentrationen kontinuierlich. Mit Ausnahme der Station Graz Nord stiegen die Werte am Morgen des 26.1. nochmals auf bis $0.08 \text{ mg}/\text{m}^3$, um danach auf unter $0.03 \text{ mg}/\text{m}^3$ abzufallen.

Am Morgen des 27.1. erfolgte ein leichter Konzentrationsanstieg an allen Meßstellen auf bis $0.06 \text{ mg}/\text{m}^3$; auf leicht erhöhtem Niveau hielten sich die Konzentrationen den ganzen Tag und

wiesen in der folgenden Nacht in Graz Nord vereinzelte Spitzen bis 0.07 mg/m^3 auf. Am Vormittag des 28.1. stiegen sie an allen Stationen weiter bis 0.08 mg/m^3 und sanken in der folgenden Nacht unter 0.04 mg/m^3 .

Tabelle 12 gibt die TMW (links) und HMWmax (rechts) für den 17. und 18.1. in mg/m^3 an. "–" kennzeichnet den Ausfall der Daten.

Tab. 12: TMW (links) und HMWmax (rechts) für den 17. und 18.1. in mg/m^3 ("–" kennzeichnet den Ausfall der Daten.)								
	Nord		West		Süd		Mitte	
17.1.	0.077	0.193	–	–	0.079	0.176	0.105	0.195
18.1.	0.048	0.138	0.045	0.118	0.070	0.124	0.073	0.108
19.1.	0.029	0.081	0.041	0.087	0.028	0.055	0.040	0.077
20.1.	0.072	0.180	0.065	0.119	0.057	0.090	0.068	0.114
21.1.	0.060	0.127	0.072	0.131	0.065	0.115	0.077	0.127
22.1.	0.055	0.141	0.051	0.114	0.059	0.138	0.060	0.136
23.1.	0.066	0.147	0.071	0.191	0.060	0.115	0.076	0.152
24.1.	0.065	0.087	0.082	0.124	0.071	0.119	0.076	0.122
25.1.	0.069	0.143	0.066	0.129	0.062	0.102	0.069	0.117
26.1.	0.024	0.068	0.028	0.084	0.028	0.074	0.034	0.081
27.1.	0.028	0.053	0.016	0.053	0.013	0.031	0.020	0.032
28.1.	0.033	0.067	0.035	0.075	0.027	0.064	0.034	0.067

7.2.3 Lokale Meteorologische Situation

Verlauf der Inversionshöhe (–untergrenze) und Temperatur

Am 17.1. lagen zwischen 7 und 10 Uhr hohe Echointensitäten aus einem großen Höhenbereich (50 bis 250 m) vor, die jedoch grob die Festlegung einer Inversion mit Untergrenze in ca. 200 m erlauben, die sich bis 12 Uhr – infolge steilen Temperaturanstiegs am Boden – hob und auflöste. Ab ca. 20 Uhr zeichnet sich nach rascher Bodenabkühlung (von 11.5 °C auf 2.4 °C) eine Bodeninversion ab, die sich am 18.1., 6 Uhr hob, gefolgt von einer weiteren, sich um 11 Uhr hebenden Bodeninversion. Die Temperatur am Boden stieg am 18.1. infolge starker Bewölkung nur mäßig (bis 7 °C).

Am Abend dieses Tages zeichnete sich oberhalb eines echolosen Bereichs ab 20 Uhr eine von 350 m bis 24 Uhr auf 200 m absinkende Inversion ab.

Am 19.1. gab es möglicherweise zwischen 1 und 10 Uhr und zwischen 19 Uhr und 20.1., 4 Uhr Bodeninversionen. Die starken Temperaturschwankungen am 19.1. von 2 bis 6 Uhr deuten auf relativ starken Luftmassenaustausch hin, der durch die hohen Windgeschwindigkeiten bedingt war.

Deutlicher trat am 20.1. zwischen 7 und 15 Uhr – nach Winddrehung in 50 m von Nord auf Süd bis West – eine abgehobene Inversion in ca. 150 m bis 200 m in Erscheinung. Zwischen 20 Uhr und 21.1., 11 Uhr gab es eine Bodeninversion.

Am Nachmittag des 21.1. traten ab 16 Uhr in einem Höhenbereich von 100 m bis 300 m hohe Echointensitäten auf, die eine Inversionsuntergrenze andeuten.

Am 22.1. trat zwischen 0 und 5 Uhr eine Inversion mit Untergrenze in ca. 150 m auf, anschließend traten Echos sehr hoher Intensität unterhalb 180 m auf, wahrscheinlich eine bis 11 Uhr sich hebende Bodeninversion.

Zwischen 20 Uhr und 23.1., 2 Uhr, möglicherweise auch die ganze Nacht, trat eine Bodeninversion auf, zwischen 4 und 12 Uhr deuten hohe Echointensitäten zwischen 50 m und 200 m Höhe auf eine sich hebende Inversion hin.

Im Zeitraum von 19 Uhr bis 23.1., 5 Uhr trat wieder eine Bodeninversion auf, worauf zwischen 5 und 12 Uhr sehr hohe Echointensitäten zwischen 50 m und 250 m auf eine sich hebende Inversion schließen lassen; zwischen 17 und 22 Uhr trat wieder eine Boden- oder bodennahe Inversion auf.

Die Echointensitäten am 25.1. ab 1 Uhr lassen auf eine sich ab 6 Uhr hebende Bodeninversion schließen.

Möglicherweise bestand zwischen 19 und 24 Uhr eine Inversion in ca. 250 m Höhe.

Am 26.1. deuten hohe Echointensitäten in Bodennähe ab Mitternacht, in Höhen bis 150 m von 7 bis 8 Uhr sowie von 9 bis 13 Uhr auf eine Boden- oder bodennahe Inversion hin. Der Zeitraum extrem starken Windes in der Höhe von 14 bis 16 Uhr weist sehr niedrige Echointensitäten auf, anschließend wurden bis 18 Uhr unterhalb 150 m hohe Echointensitäten gemessen. Wieweit diese Echos mit bodennahen Inversionen in Verbindung stehen, ist unsicher.

Am 27.1. traten bis 5 Uhr sehr niedrige Echointensitäten auf; zwischen 5 und 9 Uhr bestand möglicherweise eine abgehobene Inversion in ca. 150 m Höhe, ab 9 Uhr zeichnet sich eine solche in den SODAR-Daten deutlich ab, wobei unterhalb der Inversion die Echointensitäten sehr niedrig waren.

Der 27.1. wies einen hohen Bedeckungsgrad niedriger Wolken und einen geringen Tagesgang der sehr niedrig bleibenden Temperatur auf, sodaß die abgehobene Inversion wahrscheinlich die Hochnebeluntergrenze markiert. Sie hob sich von ca. 150 m, 9 Uhr auf ca. 250 m am 28.1., 3 Uhr.

Danach tritt in den SODAR-Daten ein Bereich hoher Echointensität zwischen ca. 300 und 450 m auf, der eine sich absenkende Inversion kennzeichnet, welche von ca. 12 bis 15 Uhr Bodennähe erreichte. Ab 6 Uhr trat zudem eine ausgeprägte Bodeninversion auf, die sich um ca. 18 Uhr etwas hob und um 20 Uhr rasch auflöste. Die Windverhältnisse deuten darauf hin, daß am 28.1. zwischen 3 und 16 Uhr mit Südwind Warmluftadvektion in der Höhe erfolgte, die sich im Lauf des Tages in tiefere Luftschichten durchsetzte und ca. um 15 Uhr Bodenniveau erreichte. Der Temperaturverlauf in Graz Mitte zeigt bis 20 Uhr anhaltende Erwärmung, die um diese Zeit jedenfalls nur durch Warmluftadvektion bedingt sein konnte.

Das Abfallen der Echointensität und die Inversionsauflösung nach 20 Uhr standen mit dem Aufkommen sehr starken Windes ab 18 Uhr in Verbindung.

Wind

Abb. 68 bis Abb. 79 zeigen Windrichtung und Windgeschwindigkeit an der Station Graz Süd sowie über dem SODAR in 50, 100, 150, 200 und 250 m Höhe am 17. und 18.1.1990, am 19. und 20.1., am 21. und 22.1., am 23. und 24.1., am 25. und 26.1 sowie am 27. und 28.1.

Am Schöckl wehte der Wind am 17. und 18.1. durchwegs aus Nordwest, wobei die Geschwindigkeit am 17.1. um 2 m/s, am 18.1. bei 5 m/s lag.

Am 17.1. wechselte der Wind in allen Höhen – einschließlich am Boden – um ca. 11 Uhr von Nord bis Nordwest auf Süd, um ca. 18 Uhr auf Nord bis Nordost. Die Windgeschwindigkeit lag am Boden nachts und vormittags unter 0.5 m/s, am Nachmittag um 1 m/s; nachts schwankte die Geschwindigkeit oberhalb 50 m stark zwischen 0.6 und 4 m/s, nachmittags lag sie durchwegs um 1 m/s.

Um 19 bzw. 20 Uhr kam es bei der Winddrehung auf Nord zu Windgeschwindigkeiten über dem SODAR von 4 m/s in 150 m und 6 m/s in 250 m Höhe, die mit dem Kaltlufteinbruch am Schöckl

in Zusammenhang stehen dürften. Für Kaltluftzufuhr spricht auch der relativ rasche Temperaturrückgang in Graz Mitte von 11.5 °C (15 Uhr) auf 2.4 °C (22 Uhr). Nach kurzem Abflauen des Windes wurden in der folgenden Nacht (bis 8 Uhr) relativ hohe Windgeschwindigkeiten beobachtet, und zwar bei Geschwindigkeitsabnahme mit der Höhe (bis 4 m/s in 50 m). Zu dieser Zeit wehte Nord- bis Nordwestwind; in Graz Süd blieb die Geschwindigkeit unter 0.5 m/s, beim SODAR wurden am Boden bis 1 m/s gemessen. Die Windrichtung in Graz Süd war sehr variabel.

Die niedrige Meßgrenze des SODAR am 18.1. deutet auf zunehmend homogene Durchmischung der Atmosphäre hin; nachmittags sind auch aus 100 m kaum Echos vorhanden. In 50 m und 100 m trat nachmittags Ost- bis Südwind auf; die Windgeschwindigkeit nahm auf unter 1 m/s ab.

In der folgenden Nacht frischte der ab 21 Uhr oberhalb 50 m wehende Nordwind auf; (zwischen 3 und 6 Uhr über 8 m/s). Parallel traten am Schöckl bei Kaltluftadvektion hohe Windgeschwindigkeiten (12 m/s um 6 Uhr) auf. Die hohen Windgeschwindigkeiten über Graz kamen durch das Durchgreifen der kalten Nordströmung zustande; bei raschen Schwankungen sank die Temperatur in Graz Mitte unter 0 °C. Nach kurzem Abflauen um 9 bis 10 Uhr stiegen die Windgeschwindigkeiten oberhalb 50 m nochmals bis 6 m/s. Geringe Echointensitäten und niedrige Meßgrenze deuten auf sehr homogene atmosphärische Verhältnisse hin.

Die Windgeschwindigkeit in Graz Süd lag während dieser Episode starken Windes mit bis 1 m/s vergleichsweise hoch und erreichte am 19.1. zwischen 12 und 15 Uhr über 1.5 m/s. Dabei wehte in Graz Süd durchwegs Süd- bis Ostwind. Zwischen 15 und 17 Uhr wurde auch in 50 und 100 m Südwind beobachtet, sonst durchgehend Nordwind.

Auch in der Nacht von 19. auf 20.1. traten bis 2 Uhr oberhalb 50 m Windgeschwindigkeiten zwischen 2 und 5 m/s auf, wobei die Geschwindigkeit mit der Höhe abnahm. Parallel zum Abflauen des Windes um 2 Uhr auf 0.5 bis 3 m/s – bei Geschwindigkeitszunahme mit der Höhe – wurde die Windrichtung unbeständiger zwischen Nord und Südwest, gleichzeitig sank die Temperatur weiter ab von ca. +1 auf ca. -1 °C.

Bei relativ unbeständigen Windrichtungen trat am 20.1. zwischen 13 und 17 Uhr vorwiegend Südwind auf, danach – auch am Boden – Nord- bis Westwind, der später auf Nord bis Ost drehte. Die Windgeschwindigkeit stieg abends an und erreichte um Mitternacht in allen Höhen 5 m/s; am 21.1. nach 2 Uhr fiel sie wieder auf 1 bis 3 m/s ab bei Geschwindigkeitsabnahme mit der Höhe. Geschwindigkeitszunahme mit der Höhe stellte sich ab 11 Uhr ein, als die Geschwindigkeit in den unteren 100 m auf 0.5 m/s absank. Zu diesem Zeitpunkt drehte der Wind von Nordost auf Nordwest.

Zwischen 14 und 16 Uhr trat in Graz Süd sowie in 50 m Südwind auf, sonst wehte den ganzen Tag über Wind aus Nordost bis Nordwest. Die Windgeschwindigkeit nahm nach 15 Uhr wieder zu, in 250 m wurden 4 m/s überschritten. Die Geschwindigkeit nahm bis 22.1., 4 Uhr mit der Höhe zu, anschließend herrschte geschwindigkeits- und höhenmäßig sehr einheitlicher Nordwind (bis 5 m/s). Nach dessen Abflauen um 12 Uhr stellte sich in den unteren 100 m bis 16 Uhr Südwind ein; die Geschwindigkeit in Graz Süd stieg auf 1.5 m/s, darüber lag sie bei 2.2 m/s. Ab 19 Uhr stellte sich starker homogener Nordwind (ausgenommen am Boden) mit Geschwindigkeitsabnahme mit der Höhe ein (5 m/s in 50 m, 3 m/s in 200 m). Die Windgeschwindigkeit unterhalb 200 m nahm am 23.1. um 2 Uhr auf 1 bis 2 m/s ab, um 7 Uhr (oberhalb 100 m) wieder auf 4 bis 5 m/s zu. Um 12 Uhr mit Drehung des Windes von Nord auf Süd nahm die Windgeschwindigkeit über dem SODAR auf unter 2 m/s ab, in Graz Süd nahm sie auf 1 m/s zu. Mit der Winddrehung von Süd auf Nord um 17 Uhr war eine Zunahme der Windgeschwindigkeit über dem SODAR auf bis 5 m/s verbunden; die Geschwindigkeit nahm am 24.1. um 1 Uhr auf unter 2 m/s ab und nach 6 Uhr – bei deutlicher Geschwindigkeitszunahme mit der Höhe – wieder zu (6 m/s

in 250 m). Bereits ab 1 Uhr drehte der Wind oberhalb 200 m – zeitweise in 150 m – von Nord auf Südwest; am Schöckl wehte um diese Zeit Westwind mit 10 bis 12 m/s.

Am Vormittag des 24.1. schwankten die Windgeschwindigkeiten stark (2 bis 5 m/s). Es kam am 24.1. nicht zur Ausbildung von Südwind, nachmittags wehte auch in Graz Süd Nordwind (bis 1 m/s, in 50 m 3 m/s). Nach 18 Uhr drehte der Wind in allen Niveaus auf Nordwest, die Geschwindigkeit nahm in 50 m bis 4 m/s, in 300 m bis 7 m/s zu. Der Nordwestwind drehte zu Beginn des 25.1. auf Nord, um 12 Uhr auf Süd. Die Windgeschwindigkeit lag nachts um 5 m/s, nach einem Minimum um 7 Uhr – bei kurzzeitiger Winddrehung auf Süd – um 3 m/s und nahm nachmittags auf unter 1 m/s ab. Ab 18 Uhr wurde oberhalb 150 m Südwind, darunter Nordwind beobachtet, ehe sich ab 23 Uhr in allen Höhen Südwind einstellte, dessen Geschwindigkeit – bei Zunahme mit der Höhe – auf 5 m/s (100 m) bis 8 m/s (250 m) anstieg. Der bodennahe Nordwind entsprach dem Ausströmen kalter Luft aus dem Murtal und wurde dann von der großräumigen Südwestströmung abgelöst. Die sehr starken Temperaturschwankungen am Boden, die nur teilweise dem Tagesgang entsprachen, waren durch die wiederholten Windrichtungswechsel bedingt – v.a. der Temperaturanstieg auf 9.2 °C am 26.1., 4 Uhr, als Folge des starken Südwindes.

Am 26.1. drehte der Wind um 7 Uhr auf Nord bis Nordost, die Geschwindigkeit nahm unterhalb 150 m auf unter 0.5 m/s ab. Um 10 Uhr stieg sie auf ca. 5 m/s, um ab 12 Uhr – bei Nordwind – Werte bis 20 m/s (50 m) bzw. 30 m/s (200 m) zu erreichen; am Boden betrug sie maximal 4 m/s. Diese ungewöhnlich hohen Windspitzen waren durch die um diese Zeit durchziehende Kaltfront bedingt; sowohl in Graz als auch am Schöckl fiel die Temperatur am 26.1. deutlich. Nach 16 Uhr drehte der Wind auf Süd, um 21 Uhr auf Ost, die Geschwindigkeit lag um 2 bis 3 m/s.

Nach diesem Kaltlufteinbruch war es am 26.1. und am 27.1. in Graz sehr windschwach, am Schöckl herrschte am 27.1. morgens Windstille. Während am Schöckl die Bewölkung im Laufe des 27.1. verschwand, war in Graz der Himmel am 27.1. bedeckt, zeitweise gab es Nebel. Bei Windgeschwindigkeiten, die nur selten 2 m/s überschritten, herrschten sehr unregelmäßige Windrichtungsverhältnisse. In Höhen oberhalb 150 m überwog Wind aus Nord über West bis Süd, am Boden Wind aus Nordost bis Süd.

Ab 19 Uhr wehte oberhalb 200 m recht einheitlicher Nordwind, wobei die Geschwindigkeit in 250 m auf 3 bis 4 m/s zunahm, in Bodennähe wehte schwacher Südwind, dazwischen Westwind.

Am 28.1. änderten sich zwischen 1 und 5 Uhr die Windverhältnisse grundlegend, in Höhen bis 150 m stellte sich einheitlicher Nordwind ein, darüber Südwind; in den unteren Niveaus nahm die Geschwindigkeit deutlich zu (bis 5 m/s in 50 m, 3 m/s in 100 m). Dieser starke Nordwind in den unteren 150 m kam durch das Ausströmen kalter Luft aus dem Murtal zustande, während oberhalb davon wärmerer Südwind wehte, der zur Ausbildung einer ausgeprägten Inversion führte. Der Südwind setzte sich um 12 Uhr auch in 100 und 150 m durch, um 16 Uhr in 50 m und am Boden. Parallel dazu nahm die Geschwindigkeit in der Höhe deutlich zu und erreichte um 16 Uhr – beim Durchgreifen des Südwindes bis zum Boden – in 250 m 8 m/s, in 150 m 6 m/s. Nach einem Minimum der Geschwindigkeit in allen Höhen um 17 Uhr nahm die Windgeschwindigkeit ab 18 Uhr noch mehr zu, in 200 m bis 13 m/s, in 100 m bis 9 m/s, am Boden bis 4 m/s; ab diesem Zeitpunkt wehte höhenmäßig äußerst einheitlicher Südwind.

Am Schöckl wehte am 28.1. den ganzen Tag über bei kontinuierlichem Temperaturanstieg Südwestwind mit bis 10 m/s.

Die meteorologische Situation zeigt folgende Charakteristika:

- An Tagen mit geringer oder mäßiger Bewölkung – 17.1., 21.1., 22.1., 23.1., in geringerem Maß am 19.1., 20.1. – traten starke Temperaturtagesgänge auf; die Temperatur stieg zwischen 9 und 14 Uhr meist steil an und sank dann langsam ab, wobei die morgendlichen Minima meist um 0 °C lagen. Die entsprechenden Nächte bzw. Vormittage wiesen Echos bis in 300 m sowie vermutlich Bodeninversionen auf. Während Boden- oder bodennahe Inversionen meist ab ca. 20 Uhr im SODAR durch hohe Echointensitäten zwischen 50 m und 80 m gekennzeichnet waren, erweiterte sich der Bereich hoher Echointensität morgens (ca. ab 5 Uhr) auf 50 bis 200 m, ehe sich die Inversion gegen Mittag auflöste. Dieser Zeitraum war meist mit den höchsten SO₂-Konzentrationen verbunden.
- Ein klarer Wechsel zwischen Südwind und Nordwind trat am 17.1., 19.1., 22.1. und 23.1. auf, d.h., an wolkenarmen Tagen; am 21.1. wehte nur in 50 m und am Boden Südwind.
- Die synoptische Strömung zeigte am 24.1. mit dem Überströmen der westlich von Graz gelegenen Berge einen unmittelbaren Einfluß auf die Windverhältnisse im Grazer Becken, sowie mit dem Südwind in Höhen bis 300 m ab 25.1., 23 Uhr, mit dem Kaltlufteinbruch ab 26.1., 14 Uhr, sowie mit dem Durchgreifen des Südwindes bis zum Boden im Verlauf des 28.1.

7.2.4 Zusammenhang von Immission und Meteorologie

Am 17. und 18.1. war ein klarer Zusammenhang zwischen Inversionen und Konzentrationsverlauf zu erkennen. Die tiefen Temperaturen am Morgen des 17.1. führten zu einer Bodeninversion und mittelbar zu einem Anstieg der SO₂-Konzentrationen ab 8 Uhr, die nach 12 Uhr relativ rasch absanken. Das weitere Abfallen der SO₂-Konzentrationen, das sich ab 20 Uhr abzeichnete, war eine Folge des auch in Bodennähe relativ starken Windes.

Am Morgen des 18.1. führten die Stabilisierung der bodennahen Atmosphäre und die Abnahme der Windgeschwindigkeit wieder zu einem allmählichen Konzentrationsanstieg in Graz Mitte und Süd, wohingegen der steile Anstieg in Graz Nord zwischen 14 und 16 Uhr nur durch Advektion bedingt sein kann. Um diese Zeit drehte in Bodennähe der Wind auf Süd, sodaß Schadstofftransport aus dem Stadtzentrum wahrscheinlich ist. Nach 20 Uhr führte der auffrischende Wind zu einem Absinken der SO₂-Konzentration.

Der 19.1. zeigte bei hohen Windgeschwindigkeiten nur einen sehr geringen Konzentrationsanstieg am Morgen, v.a. in Graz Mitte, und sehr niedrige Werte tagsüber, erst um 16 Uhr stiegen die SO₂-Konzentrationen infolge Stabilisierung der bodennahen Atmosphäre an. Nach leichtem nächtlichen Absinken der Konzentration wurden am Morgen des windschwachen 20.1. an allen Stationen 0.10 mg/m³ überschritten, wobei der steile Konzentrationsanstieg in Graz Nord zwischen 8 und 10 Uhr durch Transport durch den in 50 m auf Süd drehenden Wind bedingt sein dürfte. Bereits vor Auflösung der abgehobenen Inversion (15 Uhr) sank ab 12 Uhr die SO₂-Konzentration an allen Stationen ab und stieg abends bis 0.09 mg/m³.

0.10 mg/m³ wurden am Morgen des 21.1. in Graz Süd und West überschritten. Trotz relativ hoher Windgeschwindigkeiten (bis 4 m/s in 200 m) sanken die Konzentrationen am 21.1. nur wenig und stiegen am Abend infolge stabiler Ausbreitungsbedingungen wieder an. Bei relativ starkem Nordwind stiegen am Vormittag des 22.1. die SO₂-Werte in Graz West und Süd über 0.12 mg/m³, in Graz Mitte erst nach dem Abflauen des Windes um 12 Uhr. Der rasche Konzentrationsrückgang nach 13 Uhr war eine Folge der Labilisierung der Atmosphäre.

Das Vorhandensein einer Inversion trug am Morgen des 23.1. zum Konzentrationsanstieg über 0.10 mg/m³ bei, wobei der starke Nordwind vermutlich für die niedrige Konzentration in Graz Nord verantwortlich war. Die höchste Konzentration trat in Graz West auf.

Abends stiegen die Konzentrationen in Graz Mitte und West erneut über 0.10 mg/m^3 , sowie am 24.1. zwischen 9 und 18 Uhr; anders als an den vorangegangenen Tagen sanken die SO_2 -Werte am 24.1. nachmittags nicht ab; infolge zeitweiliger Bewölkung stieg die Temperatur nachmittags nur mäßig an, es kam nur zu geringfügiger Labilisierung, wie die SODAR-Daten zeigen.

Auch am 25.1. traten Konzentrationsanstiege morgens und abends in Verbindung mit Inversionen auf, wobei die Konzentrationsspitze in Graz Nord um 8 Uhr mit dem Windrichtungswechsel auf Süd einherging.

Die sehr einheitlichen, abfallenden Konzentrationen ab 25.1., 22 Uhr waren die Folge von relativ guter Durchmischung und hohen Windgeschwindigkeiten. Am 26.1. bauten sich in Graz Mitte, Süd und West zwischen 7 und 10 Uhr nochmals SO_2 -Konzentrationen bis 0.08 mg/m^3 auf, die durch eine Inversion und die kurzfristig geringeren Windgeschwindigkeiten – verbunden mit Richtungswechsel auf Nord – bedingt waren. Dies dürfte auch die Ursache der vergleichsweise niedrigen Werte in Graz Nord gewesen sein.

Schließlich fielen die Konzentrationen infolge des Kaltfronteinbruchs zwischen 11 und 13 Uhr auf unter 0.03 mg/m^3 , der mit extremen Windgeschwindigkeiten und raschem Luftmassenwechsel verbunden war.

Danach blieben auch am 27. und 28.1. die SO_2 -Konzentrationen zumeist unter 0.05 mg/m^3 . Der leichte Konzentrationsanstieg am 27.1. ab 7 Uhr war durch das Vorhandensein einer abgehobenen Inversion bedingt; die vereinzelt Konzentrationsspitzen in Graz Nord könnten auf Advektion aus dem Stadtzentrum zurückzuführen sein.

Die ausgeprägte Bodeninversion am 28.1. zwischen 5 und 20 Uhr führte zu einem kontinuierlichen Konzentrationsanstieg bis 16 Uhr, ehe das Aufkommen sehr starken Windes auch in Bodennähe zu einem Konzentrationsrückgang führte. Auch am 28.1. könnte die späte Konzentrationsspitze in Graz Nord eine Folge von SO_2 -Advektion aus dem Stadtzentrum gewesen sein.

Insgesamt war der Verlauf der SO_2 -Konzentration durch das Zusammenspiel des Tagesganges der SO_2 -Emission mit dem Auftreten von Inversionen bzw. stabilen Ausbreitungsbedingungen bedingt, welche morgens und vormittags sowie ab abends die Schadstoffverdünnung hemmen.

Starker Wind in den unteren 100 m über dem SODAR führte meist zu Schadstoffverdünnung. Das bisweilen von den anderen Meßstellen abweichende Verhalten von Graz Nord kann durch die Windverhältnisse erklärt werden, da es bei Südwind zu Advektion schadstoffbeladener Luft aus dem Stadtzentrum kam.

Die krasse Konzentrationsabnahme am 26.1., der über mehrere Tage sehr niedrige SO_2 -Werte folgten, war eine Folge eines Kaltlufteinbruchs, der das Grazer Becken "ausräumte", worauf es auch bei stabilen Ausbreitungsbedingungen besonders am 28.1. nur noch zu einer mäßigen Schadstoffanreicherung kam.

7.3 Episode 4. bis 10. Februar 1990

Zwischen dem 5. und 9.2.1990 traten in Graz verbreitet maximale SO_2 -Konzentrationen über 0.10 mg/m^3 , teilweise bis 0.15 mg/m^3 auf.

7.3.1 Großwetterlage und Witterungsverlauf

Abb. 80 zeigt den Verlauf der meteorologischen Parameter in Graz Flughafen und am Schöckl für den 3. bis 12.2.1990.

Der betrachtete Zeitraum war von mehrfachem Wechsel von Hochdrucklagen und Frontdurchzügen mit starker westlicher bis südwestlicher Strömung gekennzeichnet.

Am 3.2. lag über Südosteuropa ein schwaches Hochdruckgebiet, an dessen Nordwestrand der Alpenraum noch von Südwestströmung erfaßt wurde. In der Nacht von 3. auf 4.2. überquerte eine Kaltfront den Alpenraum, verbunden mit hoher Windgeschwindigkeit an der Station Schöckl. Graz Flughafen wurde erst später von stärkerem Nordwind erfaßt.

Es bildete sich ein Hochdruckgebiet über Mittel- und Südwesteuropa aus, das sich am 5.2. ostwärts verlagerte und seinen Kern über dem Ostalpenraum hatte. Diese Wetterlage war mit relativ hohen Temperaturen am Schöckl (bis 5 °C) verbunden, während in Graz Flughafen ein starker Tagesgang der Temperatur, bedingt durch das tagsüber meist wolkenarme Wetter, zu beobachten war.

Am 6.2. wurde das Hochdruckgebiet schwächer und verlagerte sich nach Osten; diese Situation mit südwestlicher Strömungslage nördlich der Alpen hielt auch am 7.2. an, wobei mehrere Fronten über Mitteleuropa zogen, bis am 8.2. auch der Alpenraum in den Bereich starker Westströmung geriet. Während des 7.2. herrschte über Österreich Warmluftadvektion, verbunden mit allmählichem deutlichem Temperaturanstieg am Schöckl; die hohe Windgeschwindigkeit am Schöckl (Südwest) am 7.2., 18 Uhr dürfte mit dem Durchzug einer Warmfront in Verbindung stehen. Gleichzeitig zog dichte Bewölkung auf, die sich am 8.2. zeitweise auflockerte, ehe zum Wechsel vom 8. auf den 9.2. eine Kaltfront Österreich überquerte, die am Schöckl einen Temperatursturz von 7 auf -2 °C in 12 Stunden sowie hohe Windgeschwindigkeiten aus Nordwest bewirkte und mit dichter Bewölkung verbunden war.

Hinter der Front baute sich ein Hochdruckgebiet auf, dessen Schwerpunkt am 9.2. über Frankreich, am 10.2. über dem Ostalpenraum lag. Die hohen Windgeschwindigkeiten in Graz Flughafen am 9.2. sind aus der synoptischen Lage nicht erklärbar.

In Graz Flughafen herrschte am 3.2. Nebel (Bedeckung 1/8); am 4.2., 5.2., 6.2. und 7.2. jeweils 6 Uhr und am 7.2., 18 Uhr handelte es sich um äußerst flachen Bodennebel. Am 8.2., 6 Uhr herrschte dichter Nebel, der sich bis 12 Uhr auflöste. Abends war es dunstig, bis zum 9.2., 6 Uhr regnete es ein wenig (0.1 mm), während am Schöckl leichter Schneefall beobachtet wurde.

7.3.2. Immissionsverlauf

Abb. 81 bis Abb. 83 zeigen den Verlauf der SO₂-Konzentration an den Stationen Graz Nord, West (Ausfall 5.-9.2.), Süd und Mitte sowie der ungefähren Inversionsuntergrenze und der Temperatur in Graz Mitte vom 4. bis 9.2.1990.

Bis zum 4.2., 16 Uhr herrschten an allen 4 Meßstellen niedrige Konzentrationen unter 0.05 mg/m³; am 4.2. ab 16 Uhr erfolgte ein deutlicher Anstieg, am stärksten in Graz Nord, wo 0.112 mg/m³ erreicht wurden. In Graz Mitte und Süd blieben die SO₂-Konzentrationen mit maximal 0.079 mg/m³ relativ niedrig. Nach nächtlichem Absinken stiegen die Werte in Graz Mitte und West am 5.2. ab 7 Uhr stark an, wobei das Maximum in Graz West um 8, in Graz Mitte um 12 Uhr erreicht wurde (über 0.16 mg/m³), ehe die Konzentration rasant abfiel. Um 18 Uhr trat nochmals eine Konzentrationsspitze (0.12 mg/m³) in Graz Mitte auf.

Am 6.2. stiegen die SO₂-Konzentrationen vormittags und abends an, in Graz Mitte wurden um 10 Uhr 0.13 mg/m³ erreicht; am 7.2. und 8.2. erfolgte ebenfalls vormittags ein deutlicher Konzentrationsanstieg, wobei kurzzeitige Spitzen in Graz Nord registriert wurden. Nach einem weiteren Maximum am Abend des 8.2. erfolgte ein allmählicher Konzentrationsabfall, bis am Nachmittag des 9.2. einheitlich unter 0.04 mg/m³ gemessen wurden.

Tabelle 13 gibt die TMW (links) und HMWmax (Rechts) der SO₂-Belastung in Graz für den 4. bis 10.2.1990 an.

<i>Tab. 13: TMW (links) und HMWmax (Rechts) der SO₂-Belastung in Graz für den 4. bis 10.2.1990</i>								
	<i>Graz Nord</i>		<i>Graz West</i>		<i>Graz Süd</i>		<i>Graz Mitte</i>	
<i>14.2.</i>	<i>0.032</i>	<i>0.112</i>	<i>0.024</i>	<i>0.066</i>	<i>0.015</i>	<i>0.059</i>	<i>0.021</i>	<i>0.079</i>
<i>5.2.</i>	<i>0.045</i>	<i>0.093</i>	–	<i>0.162</i>	<i>0.045</i>	<i>0.098</i>	<i>0.050</i>	<i>0.136</i>
<i>6.2.</i>	<i>0.051</i>	<i>0.096</i>	–	–	<i>0.045</i>	<i>0.077</i>	<i>0.053</i>	<i>0.123</i>
<i>7.2.</i>	<i>0.052</i>	<i>0.123</i>	–	–	<i>0.043</i>	<i>0.070</i>	<i>0.055</i>	<i>0.112</i>
<i>8.2.</i>	<i>0.065</i>	<i>0.158</i>	–	–	<i>0.050</i>	<i>0.084</i>	<i>0.062</i>	<i>0.120</i>
<i>9.2.</i>	<i>0.017</i>	<i>0.048</i>	–	<i>0.027</i>	<i>0.021</i>	<i>0.056</i>	<i>0.031</i>	<i>0.074</i>
<i>10.2.</i>	<i>0.035</i>	<i>0.084</i>	<i>0.037</i>	<i>0.078</i>	<i>0.027</i>	<i>0.064</i>	<i>0.037</i>	<i>0.088</i>

7.3.3 Lokale Meteorologische Situation

Verlauf der Inversionshöhe (–untergrenze) und Temperatur

Der 4.2. wies bis 5 Uhr eine Inversion mit Untergrenze in 50 bis 100 m Höhe auf, die mit dem Aufkommen starken Windes rasch verschwand. Abends zeichnete sich ab ca. 19 Uhr eine Bodeninversion ab, die sich am 5.2. ab ca. 4 Uhr hob und bis 12 Uhr in den SODAR-Echos beobachtbar ist.

Ab 19 Uhr zeichnete sich wieder eine Bodeninversion ab, die sich am 6.2. ab 6 Uhr hob und bis ca. 10 Uhr in den Echos beobachtbar ist. Sehr ähnlich war der Inversionsverlauf in der Nacht und am Morgen vom 6. auf den 7.2. sowie vom 7. auf den 8.2. Die Nacht vom 8. auf den 9.2. war noch bis ca. 4 Uhr sowie zwischen 8 und 9 Uhr von hohen Echointensitäten und vermutlich einer Inversion zwischen 50 und 150 m gekennzeichnet; sonst wies der 9.2. außerordentlich niedrige Echointensitäten auf, die die durch hohe Windgeschwindigkeiten bedingte gute Durchmischung der Beckenatmosphäre abbilden.

Der 4. bis 7.2., zeitweise der 8.2. waren fast wolkenlos und wiesen starke Temperaturtagesgänge auf; nächtliche Abkühlung führte zur Bildung bodennaher Inversionen.

Wind

Abb. 84 bis Abb. 89 zeigen Windrichtung und –geschwindigkeit Graz Süd sowie über dem SODAR in 50, 100, 150, 200 und 250 m Höhe vom 4. bis 9.2.1990.

Der 4.2. war von Nord- bis Westwind in Höhen bis 250 m gekennzeichnet, wobei die höchsten Geschwindigkeiten (7 m/s in 50 m, 13 m/s in 200 m) zwischen 6 und 8 Uhr beobachtet wurden, die durch die großräumige Strömung bedingt waren (gleichzeitig wehte am Schöckl Nordwestwind); in Graz Süd nahm die Geschwindigkeit auf 1 m/s zu. Der Windgeschwindigkeitsanstieg zwischen 6 und 8 Uhr ging mit einem dramatischen Abfall der Echointensität einher.

Die Geschwindigkeit lag nach 9 Uhr bei 2 m/s in Graz Süd, bei 4 m/s in 100 m. Ab 20 Uhr drehte der Wind auf Nord, in 200 m Nordost, wobei die Windgeschwindigkeit in 50 und 100 m um 5 m/s, darüber um 3 m/s lag, am Boden unter 0.5 m/s. Am 5.2. wehte oberhalb 100 m bis 12 Uhr durchgehend Nordwind, darunter schwankte der Wind stark zwischen Süd und Nordwest. In 150 und

200 m traten um 5 Uhr Windgeschwindigkeiten über 6 m/s auf; um diese Zeit nahm die Geschwindigkeit unterhalb 100 m auf ca. 1 m/s ab. Nach 12 Uhr nahmen die Windgeschwindigkeiten oberhalb 50 m generell ab, der Wind drehte bis 16 Uhr auf Süd. Sehr einheitlicher Nordwind hielt bis 6.2., 10 Uhr an, wobei die Geschwindigkeit oberhalb 150 m auf 4 m/s zunahm. Mit Richtungswechsel auf Süd (10 bis 16 Uhr) sank die Windgeschwindigkeit in der Höhe auf 1 bis 3 m/s, in Graz Süd nahm sie bis 1.5 m/s zu. Nach 18 Uhr nahm die Geschwindigkeit des Nordwindes oberhalb 50 m wieder zu, wobei in 50 m die höchsten Windgeschwindigkeiten (3 bis 4 m/s) auftraten und die Geschwindigkeit mit der Höhe abnahm; nach einem Geschwindigkeitsminimum um 3 bis 4 Uhr nahm die Windgeschwindigkeit in den unteren 50 m ab, es herrschte bis morgens Geschwindigkeitszunahme mit der Höhe.

Am 7.2. um 10 Uhr drehte in 50 m, um 13 Uhr darüber, der Wind auf Süd, die Windgeschwindigkeit am Boden nahm auf 1.5 m/s zu, in der Höhe ab.

Nach 19 Uhr herrschte wieder Nordwind, dessen Geschwindigkeit höhenmäßig einheitlich bis 23 Uhr auf 5 m/s anwuchs; den Rest der Nacht lagen die Geschwindigkeiten unterhalb 200 m niedrig um 2 m/s, tagsüber um 1 m/s; in 250 m wurden vormittags 4 m/s erreicht. Zwischen 11 und 16 Uhr drehte der Wind auf Süd, anschließend wehte Nordwind, dessen Geschwindigkeit – bei Zunahme mit der Höhe – rasch zunahm.

Am 9.2. trat infolge starker Bewölkung kein Taleinwind auf, vielmehr dürfte der zumeist wehende starke Nordwind (4 bis 6 m/s) durch die synoptische Strömungslage – am Schöckl herrschte Nordwestwind mit 5 bis 6 m/s – bedingt gewesen sein. Zwischen 2 und 4 Uhr trat Südwind mit ca. 2 m/s auf, sonst – auch in Graz Süd – Nordnordwestwind, dessen Geschwindigkeit abends oberhalb 50 m auf 8 bis 12 m/s stieg; die hohen Geschwindigkeiten am 9.2. waren eine Folge des an diesem Tag – vor allem am Schöckl – zu beobachtenden Kaltlufteinbruchs. Auch am Boden lagen die Geschwindigkeiten mit um 2 m/s ungewohnt hoch.

Die wolkenarmen Tage vom 5. bis 8.2. wiesen einen Wechsel von Talein- und Talauswind auf; die Geschwindigkeit des Taleinwindes war in der Höhe deutlich geringer als jene des Talauswindes, am Boden war sie deutlich höher (hier herrschte nachts zumeist eine Geschwindigkeit unter 0.5 m/s). In der ersten Nachthälfte traten die höchsten Windgeschwindigkeiten meist unterhalb 100 m auf; später nahm die Geschwindigkeit in den unteren Niveaus ab, und es stellte sich Geschwindigkeitszunahme mit der Höhe ein.

Am 4. und 9.2. stellte sich kein Taleinwind ein, da die Windverhältnisse im Grazer Raum von der großräumigen Nordwestströmung geprägt waren.

7.3.4 Zusammenhang von Immission und Meteorologie

Der Zeitraum von 4. bis 11.2. weist meist klare Zusammenhänge zwischen Immissionsspitzen und Inversionen auf. Die SO_2 -Werte stiegen regelmäßig in den späten Nacht- und Morgenstunden an, um nachmittags wieder abzusinken. Die niedrigen Konzentrationen am 4.2., die auch an den Tagen davor zu beobachten waren, waren durch inversionsarmes, von relativ starkem Wind gekennzeichnetes Wetter bedingt. Ebenso waren die sehr niedrigen Werte ab 9.2. auf windiges Wetter und großräumigen Luftaustausch zurückzuführen.

Inversionsbedingt war der Konzentrationsanstieg an allen Stationen am Abend des 4.2. Die unregelmäßigen Konzentrationsspitzen in Graz Nord können dabei nur durch Advektion mit dem starken Nordwind aus dem Gratkorner Becken erklärt werden.

Umgekehrt wies am Morgen des 5.2. bei anhaltendem Nordwind Graz Nord die niedrigsten SO_2 -Werte auf. Für den steilen Konzentrationsanstieg in Graz West um 8 Uhr geben die

meteorologischen Daten keine Erklärung. Der Konzentrationseinbruch in Graz Mitte zwischen 13 und 17 Uhr stand vermutlich in Zusammenhang mit der Winddrehung auf Süd, die in Graz Nord zu einem Konzentrationsanstieg führte.

Analog waren die kurzen Konzentrationsspitzen, die in Graz Nord am 6.2., 12 Uhr, 7.2., 11 Uhr und am 8.2., 11 Uhr beobachtet wurden, eine Folge des Windrichtungswechsels auf Süd und dadurch Advektion belasteter Luft aus dem Stadtzentrum. Der Zeitraum mit Südwind war an diesen Tagen in Graz Mitte und Süd mit Abfallen der SO_2 -Konzentration verbunden, vermutlich – neben der Auflösung der morgendlichen Inversion – infolge Advektion gering belasteter Luft aus dem Raum südlich von Graz.

Abends kam es zu einem vergleichsweise geringeren Konzentrationsanstieg, da um diese Zeit die bodennahe Atmosphäre noch nicht so stabil geschichtet ist wie morgens.

In der Nacht von 8. auf 9.2. setzte starker Nordwind ein, der im Lauf des 9.2. das Grazer Becken "ausräumte" und zu einem drastischen Absinken der SO_2 -Konzentration führte; die sehr einheitlichen und niedrigen SO_2 -werte an allen Stationen belegen gute Durchmischung.

7.4 Episode 3. bis 10. März 1990

Zwischen 4. und 7.3. traten in Graz SO_2 -Spitzenwerte um 0.10 mg/m^3 , fallweise bis 0.20 mg/m^3 auf.

7.4.1 Großwetterlage und Witterungsverlauf

Abb. 90 zeigt die meteorologischen Parameter der Stationen Schöckl und Graz Flughafen für den 2. bis 11.3.1990.

Am 2.3. lag Ostösterreich im Gradientschwachen Bereich einer Hochdruckbrücke, die sich von Frankreich zum Balkan erstreckte; nördlich der Alpen herrschte nordwestliche Strömung. Bis zum 3.3. herrschte weiterhin Kaltluftadvektion. Vom 3. bis 5.3. befand sich Österreich am Ost- rand eines ausgedehnten Hochdruckgebietes mit Kern über Frankreich. Dieses Hochdruck- gebiet schwächte sich am 6.3. deutlich ab und ging in eine Wetterlage mit deutlicher nordwest- licher Strömung über. Am Schöckl war der Zeitraum vom 4. bis 6.3. mit Temperaturanstieg ver- bunden, ehe am 7.3. eine Kaltfront, die den Ostalpenraum streifte, leichte Abkühlung brachte; nichtsdestoweniger setzte sich dann bis 8.3. die Erwärmung dank Advektion milder maritimer Luftmassen von Westen fort. Der 6. und 7.3. waren von verstärkter Bewölkung gekennzeichnet; am 7.3. lag dann der Ostalpenraum wieder im Übergangsbereich zwischen einem südwest- europäischen Hochdruckgebiet und nordwestlicher Strömung; am 8.3. verlagerte sich das Hochdruckgebiet auf den Balkan, Österreich lag in einem außerordentlich Gradientschwachen Gebiet.

Ab dem 9.3. wurde dann der Wetterverlauf von stärker werdender Nordwestströmung geprägt, verbunden mit mehreren Kaltfronten und zunehmender Bewölkung; besonders der Frontdurch- zug vom 9. auf den 10.3. bewirkte Abkühlung am Schöckl sowie auch eine Abnahme der Tages- höchsttemperaturen in Graz Flughafen, wobei hier auch der höhere Bedeckungsgrad eine we- sentliche Rolle spielte.

Anschließend erfolgte jedoch sofort wieder Warmluftadvektion, und am 11.3. lag Österreich wieder in der Übergangszone zwischen einem Hochdruckgebiet mit Kern über der Schweiz und nordwestlicher Strömung.

7.4.2 Immissionssituation

Abb. 91 bis Abb. 94 zeigen den Verlauf der SO_2 -Konzentration an den Meßstellen Graz Mitte, Graz Nord und Graz West, die aus den SODAR-Echos abgeleitete ungefähre Inversionsuntergrenze, sowie den Temperaturverlauf an den Meßstellen Graz Mitte, Schloßberg, Plabutsch-Fürstenstand und Platte, für den Zeitraum vom 3. bis 10.3.

Auf eine kurzzeitige Konzentrationsspitze (0.122 mg/m^3 in Graz Mitte) am 2.3. morgens folgte bis 3.3. mittags eine Periode extrem niedriger konstanter SO_2 -Werte (meist unter 0.02 mg/m^3), ehe zwischen 20 und 23 Uhr ein Anstieg auf ca. 0.07 mg/m^3 (Graz Mitte) erfolgte. Bis 4.3., 9 Uhr herrschten an allen Stationen Konzentrationen um 0.05 mg/m^3 , die mittags auf unter 0.02 mg/m^3 fielen. Ab 19 Uhr erfolgte ein neuerlicher Anstieg, wobei in Graz West bis 0.166 mg/m^3 auftraten. Die Konzentrationen lagen nachts um 0.05 mg/m^3 , stiegen am Morgen des 5.3. leicht an – am geringsten in Graz Nord – und sanken nachmittags ab. Am Abend des 5.3. erfolgte ein erneuter Anstieg, der in Graz Nord und Graz West ausgeprägter war als in Graz Mitte; am Vormittag des 6.3. stiegen die SO_2 -Konzentrationen weiter an und überschritten mittags 0.10 mg/m^3 . Nachmittags sanken sie leicht ab (ca. 0.07 mg/m^3) und stiegen am Vormittag des 7.3. über 0.10 mg/m^3 ; in Graz Mitte wurden 0.194 mg/m^3 erreicht. Ab Mittag fielen sie an allen Stationen auf unter 0.01 mg/m^3 ; abends erfolgte ein allmählicher Anstieg auf um 0.05 mg/m^3 , am Morgen des 8.3. wurden 0.08 mg/m^3 erreicht.

Ähnlich war der Verlauf in der Nacht vom 8. auf den 9.3. sowie am Morgen des 9.3. Ab 11 Uhr sanken die SO_2 -Werte allmählich auf ca. 0.05 mg/m^3 ab, um um 23 Uhr plötzlich auf 0.01 mg/m^3 abzufallen. Den ganzen 10.3. blieben sie unter 0.03 mg/m^3 .

Tabelle 14 gibt die TMW (rechts) und HMWmax (links) der vier Stationen in mg/m^3 an.

	Graz Nord		Graz West		Graz Süd		Graz Mitte	
3.3.	0.014	0.064	0.012	0.039	0.014	0.062	0.015	0.072
4.3.	0.034	0.166	0.027	0.078	0.028	0.051	0.031	0.060
5.3.	0.042	0.139	0.045	0.084	0.040	0.089	0.034	0.089
6.3.	0.064	0.138	0.062	0.106	0.058	0.099	0.059	0.163
7.3.	0.040	0.120	0.033	0.115	0.036	0.117	0.043	0.194
8.3.	0.036	0.071	0.033	0.085	0.035	0.081	0.036	0.081
9.3.	0.038	0.072	0.036	0.088	0.034	0.073	0.033	0.087
10.3.	0.015	0.027	0.010	0.017	0.011	0.021	0.013	0.026

7.4.3 Lokale Meteorologische Situation

Verlauf der Inversionshöhe (–untergrenze) und Temperatur

Der 3.3. wies in Graz Mitte und am Schloßberg einen relativ flachen Temperaturtagesgang auf, bedingt durch die Bewölkung, wobei zwischen den beiden Stationen stets ein sehr labiler Temperaturgradient bestand. Die starken Temperaturschwankungen an den Stationen Platte und Plabutsch zwischen 2 und 11 Uhr können nur durch zeitweilige Warmluftadvektion in der Höhe bedingt sein. Ab 12 Uhr stellte sich auch zwischen diesen Stationen und dem Talboden

ein labiler Temperaturgradient ein. Die SODAR-Daten zeigen am 3.3. außerordentlich niedrige Echointensitäten und lassen zu keinem Zeitpunkt unterhalb der Meßgrenze von ca. 150 m eine Inversion erkennen.

In der Nacht vom 3. auf den 4.3. stellten sich zwischen den vier Temperaturmeßstellen annähernd isotherme Verhältnisse ein; am Schloßberg kam es um 5 Uhr zu einem kurzzeitigen Temperaturanstieg infolge Warmluftadvektion. Die Stabilisierung der Talatmosphäre führte ab Mitternacht zu einer in den SODAR-Daten erkennbaren Bodeninversion; zwischen 4 und 10 Uhr lag eine Inversion oberhalb ca. 100 m, vermutlich als Folge der Erwärmung in Höhe des Schloßberges.

Nach 9 Uhr kam es infolge abnehmender Bewölkung zu einem raschen Temperaturanstieg an allen Meßstellen, wobei sich ein labiler Temperaturgradient ausbildete.

Um 20 Uhr stellten sich zwischen Graz Mitte und Schloßberg isotherme Verhältnisse ein, nachts herrschten zeitweise Inversion oder Isothermie; die SODAR-Echos deuten ab 20 Uhr eine Bodeninversion an, die bis 5.3., 6 Uhr anhielt und sich dann hob; bis 9 Uhr (150 m) war sie in den SODAR-Echos zu erkennen. Um diese Zeit setzte rascher Temperaturanstieg in Graz Mitte und etwas verzögert am Schloßberg ein.

Der 5.3. wies starke Tageserwärmung mit sehr labilen Verhältnissen in Bodennähe auf.

In der Nacht vom 5. auf 6.3. kam es an den Stationen Platte und Plabutsch nur zu einem geringfügigen Temperaturrückgang und ab Mitternacht zu einem Temperaturanstieg, sodaß sich eine großräumige Inversion zwischen diesen Gipfelstationen und dem Talboden bzw. Schloßberg ausbildete, wo die Temperaturen auf unter 3 °C sanken. Der Temperaturanstieg in der Höhe kann mit Warmluftadvektion und dem Aufziehen von Bewölkung in Verbindung stehen, die am 6.3. Bedeckungsgrade von 6/8 bis 8/8 erreichte.

Am 5.3. trat ab 20 Uhr eine Bodeninversion auf, die bis 6.3., 1 Uhr anhielt. Danach zeigen die SODAR-Daten eine Inversion mit Untergrenze in ca. 100 m Höhe, die bis ca. 17 Uhr anhielt, aber im Lauf des Tages an Intensität verlor. Zwischen 10 und 15 Uhr herrschte in Graz Mitte und Schloßberg praktisch die selbe Temperatur, danach fiel sie am Schloßberg deutlich und lag um 16 Uhr ca. 1.7 °C unter jener am Talboden. Die Temperatur in Graz Mitte – wo ab 11 Uhr ein gleichmäßiger, für wolkenarme Tage typischer Verlauf beobachtet wurde – überstieg um 17 Uhr die Werte auf der Platte. Am Schloßberg erfolgte um 21 Uhr ein rasanter Temperaturanstieg auf die Werte von Plabutsch und Platte (Isothermie zwischen Schloßberg, Platte und Plabutsch); ab diesem Zeitpunkt bestand eine sehr ausgeprägte Inversion zwischen Talboden und Schloßberg, die auch in den SODAR-Echos zu erkennen ist; sie senkte sich von ca. 100 m (21 Uhr) bis Mitternacht in Bodennähe und hielt bis 7.3. um 8 Uhr an.

Ab 4 Uhr am 7.3. erfolgte am Boden ein leichter Temperaturanstieg, der um 9 Uhr zu isothermem Temperaturgradienten in Bodennähe führte; danach zeigte der 7.3. einen "normalen" Temperaturverlauf an allen Stationen mit labilen Temperaturgradienten. Die SODAR-Echos zeigen ab 8 Uhr durchwegs gute Durchmischung bei niedrigen Echointensitäten.

Ab ca. 20 Uhr zeichnet sich wieder eine Bodeninversion ab, die sich am 8.3. bis 5 Uhr intensivierte und danach hob (150 m um 9 Uhr). Die Temperatur am Schloßberg lag die ganze Nacht unter jener in Graz Mitte.

Ab 10 Uhr zeigen die Echos gute Durchmischung, ab 19 Uhr wieder die Ausbildung einer Boden- oder bodennahen Inversion. Auch am Abend des 8.3. lag die Temperatur am Schloßberg unter jener am Talboden.

In der Nacht vom 8. auf den 9.3. kam es infolge von Bewölkung nur zum geringfügigem Abfallen der Temperaturen, auf der Platte zu einem Anstieg der Temperatur bis 9 Uhr, wofür Warmluftadvektion verantwortlich war. Die SODAR-Daten zeigen eine schwer lokalisierbare Inversion in

50 bis 150 m Höhe; ab 6 Uhr einen vertikal ausgedehnten Bereich hoher Echointensität, der – wie die Immissionsdaten zeigen – jedenfalls eine Inversionsuntergrenze kennzeichnet, die sich ab 9 Uhr auf ca. 250 m Höhe hob. Nichtsdestoweniger deutet der Temperaturgradient zwischen Graz Mitte und Schloßberg bis 19 Uhr stets auf labile Schichtung hin; der Temperaturgradient zwischen Graz Mitte und Schloßberg dürfte zumindest an diesem Tag nicht repräsentativ für die Stabilitätsverhältnisse über dem SODAR gewesen sein. Zwischen 19 und 21 Uhr deutet sich in den SODAR-Daten eine bodennahe Inversion an; um diese Zeit herrschte zwischen Graz Mitte und Schloßberg bereits Isothermie.

In der Nacht kam es zu sehr unregelmäßigen Temperaturverläufen, ab 22 Uhr zu Temperaturanstiegen, verbunden mit zeitweiser krasser Abnahme der Echointensität (d.h. Labilisierung in den untersten 100 m). Zwischen 1 und 3 Uhr kam es zu einem generellen Temperatursturz infolge eines Kaltlufteinbruchs, der hohe Windgeschwindigkeiten (bis 10 m/s) bewirkte. In dieser Phase zeigen die SODAR-Daten eine Inversion, die sich von ca. 250 bis 350 m um 2 Uhr bis 7 Uhr in Bodennähe absenkte; die Temperaturverläufe deuten darauf hin, daß die Abkühlung zuerst am Boden erfolgte (Inversion zwischen Schloßberg und Platte um 2 Uhr) und erst später die höheren Niveaus erfaßte. Um 9 Uhr nahmen die Echointensitäten rasch ab, danach herrschte gute Durchmischung; der 10.3. zeigte daraufhin labile Temperaturschichtung und einen ausgeprägten Temperaturtagesgang.

Möglicherweise bildete sich zwischen 19 und 21 Uhr eine Bodeninversion aus.

Wind

Abb. 95 bis Abb. 102 zeigen Windrichtung und –geschwindigkeit in 50, 100, 150, 200 und 250 m für den 3. bis 10.3.1990. Von Graz Süd liegen für diesen Zeitraum keine Winddaten vor.

Bis 3.3., 19 Uhr herrschte über Graz starker Nordwestwind mit Geschwindigkeiten über 5 m/s in 6 m und zeitweise weit über 10 m/s in den höheren Schichten, wobei der Wind vertikal äußerst homogen war. Die höchsten Windgeschwindigkeiten traten um 11 Uhr auf (13 m/s in 100 m). Das Minimum der Windgeschwindigkeit um 7 bis 8 Uhr dürfte mit dem zeitweiligen Temperaturanstieg auf Platte und Plabutsch in Verbindung stehen. Die hohen Windgeschwindigkeiten über Graz korrespondieren gut mit jenen am Schöckl und entsprechen der synoptischen Strömung (Nordwestwind).

Am Abend des 3.3. nahm die Windgeschwindigkeit auf unter 2 m/s ab, der Wind drehte auf Nord, die Richtungshomogenität nahm ab. Ab 4.3., 1 Uhr nahmen die Windgeschwindigkeiten wieder zu, in 50 m wurden um 2 Uhr 4 m/s überschritten; zunächst lagen die Geschwindigkeiten in den unteren 100 m höher als weiter oben, ab 4 Uhr nahm die Geschwindigkeit mit der Höhe zu (maximal 4 m/s). Während in den unteren 150 m Nordwind wehte, kam der Wind darüber mehr aus Nordwest und drehte am 4.3., 10 Uhr überhaupt auf West, um 13 Uhr auf Süd, wobei die Winddrehung in der Höhe zuerst erfolgte. Die Windgeschwindigkeit – die höhenmäßig sehr homogen war – zeigte nicht das Verhalten der Talwindzirkulation, vielmehr nahm sie am Nachmittag zu (5 m/s in 200 m, 4 m/s darunter); die Winddrehung dürfte demnach nicht eine Folge lokaler Zirkulation, sondern von der synoptischen Strömung gesteuert gewesen sein.

Um 17 Uhr nahm die Windgeschwindigkeit in allen Höhen ab, mit Winddrehung auf Nord um 20 Uhr wieder deutlich zu (7 m/s in 150 m, 4 m/s in 50 m).

Am 5.3. wehte zwischen 1 und 4 Uhr Süd- bis Südwestwind, danach Nordwind; die Geschwindigkeiten lagen zwischen 2 und 4 m/s. Zwischen 11 und 17 Uhr wehte Südwind mit Geschwindigkeiten von 2 bis 4 m/s (Geschwindigkeitszunahme mit der Höhe). Um ca. 17 Uhr drehte der Wind wieder auf Nord, die Windgeschwindigkeit nahm in 50 m auf 4 m/s zu; in der ersten Nacht-

hälfte herrschte Geschwindigkeitsabnahme mit der Höhe, ab 6.3., 2 Uhr war die Geschwindigkeit ziemlich einheitlich.

Der Wind drehte ab 2 Uhr zeitweise auf West bis Nordwest, ab 12 Uhr zeitweise auf Süd, bisweilen Ost. Der hohe Bedeckungsgrad läßt an diesem Tag keine Talwindzirkulation erwarten. Ab 18 Uhr wehte in den unteren 100 m Nordwind – der dem Talauswind entsprechen dürfte –, darüber Westnordwestwind; ab 23 Uhr beschränkte sich Nordwind auf die unteren 50 m. Die Windgeschwindigkeiten nahmen ab 18 Uhr, beginnend in der Höhe, deutlich zu (bis 6 m/s in 200 m).

Ein Zusammenhang zwischen den Temperaturverläufen auf Schloßberg, Platte und Plabutsch und den Windverhältnissen über Graz liegt nicht unmittelbar vor; möglicherweise stand die plötzliche Temperaturzunahme am Schloßberg mit der Winddrehung von Nord auf West in 100 m in Verbindung, da die Warmluftadvektion in der Höhe mit Westwind erfolgte. Ab 6.3., 22 Uhr befand sich der Schloßberg jedenfalls in der selben Luftmasse wie Platte und Plabutsch. Der Nordwind in 50 m drehte am 7.3., 4 Uhr langsam auf Nordwest und paßte sich damit dem Wind in höheren Niveaus an, der – verbunden mit rasanter Geschwindigkeitsabnahme – um 7 Uhr auf Nord drehte. Die hohen Windgeschwindigkeiten in der Nacht vom 6. auf den 7.3. dürften mit dem am Schöckl registrierten Kaltluftereinbruch in Verbindung stehen. Am 7.3. wehte bis 17 Uhr durchwegs Nordwest- bis Nordwind, die Geschwindigkeit nahm ab 11 Uhr wieder zu und erreichte über 7 m/s. Um 18 Uhr drehte der Wind auf Nordost, am 8.3., 1 Uhr wieder auf Nord. Der starke Nordwind verhinderte am 7.3. trotz geringer Bewölkung und sehr hoher Temperaturen die Ausbildung der Talwindzirkulation, welche aber am 8.3. – der ähnlich sonnig und warm war – in Erscheinung trat (Südwind von ca. 11 bis 16 Uhr), wobei die Winddrehung in 50 m schon um 8 Uhr einsetzte.

Nach einer unbeständigen Phase wehte ab 20 Uhr Nord- bis Nordwestwind, wobei der Wind mit der Höhe mehr aus West kam.

Die Windgeschwindigkeit zeigte in der Nacht von 7. auf 8.3. zunächst Geschwindigkeitsabnahme mit der Höhe (5 m/s in 50 m), ab 4 Uhr Zunahme mit der Höhe. Nachmittags lag sie um 2 m/s und stieg abends zeitweise auf 4 bis 6 m/s.

Am 9.10. drehte der Nordwind in 50 m um 10 Uhr auf Süd, in 100 m um 11 Uhr; darüber wehte vormittags weiter Nordwestwind. Die Geschwindigkeit lag in 50 m um 1 m/s, in 200 m bei 1 bis 3 m/s.

Ab 19 Uhr stellte sich wieder West- bis Nordwind ein; zwischen 19 und 20 Uhr traten Windgeschwindigkeiten von 4 bis 6 m/s, zwischen 23 Uhr und 10.3., 1 Uhr von 6 bis 10 m/s auf; die Windgeschwindigkeit nahm stets mit der Höhe zu; dies ging einem Temperatursturz in Graz voran und war die Folge einer Kaltfront. Unmittelbar danach drehte der Wind um 2 Uhr auf Süd bis Südwest, die Windgeschwindigkeit nahm auf 1 bis 4 m/s ab. Der Wind drehte um 6 Uhr teilweise auf Nordwest, um 8 Uhr wieder auf Süd, um 18 Uhr auf Ost bis Nordost. Dabei überwog in 50 m und 100 m morgens Süd- bis Südwestwind. Die Windverhältnisse am 10.3. waren von der synoptischen Strömung gesteuert und nicht durch die Talwindzirkulation.

7.4.4 Zusammenhang von Immission und Meteorologie

Die untersuchte Episode wird – abgesehen von einer Spitze an allen Stationen am 2.3., 8 Uhr – von Tagen mit außerordentlich niedriger und variationsarmer Konzentration (2. und 3.3. bis 16 h, 9.3. ab 24 h) eingefaßt.

Die niedrigen Werte am 2. und 3.3. waren auf den in allen Höhen starken Wind und das Fehlen stabiler Schichtung zurückzuführen, wodurch der Aufbau hoher Konzentrationen in Graz unterbunden wurde.

Ebenso waren die niedrigen Werte ab 9.3., 23 Uhr eine Folge des starken Windes.

Die erhöhten Konzentrationen zwischen 3.3., 24 Uhr und 9.3., 20 Uhr waren primär durch das Auftreten von Inversionen bedingt. Es kam jeweils nachts und v.a. morgens zum Ansteigen der Schadstoffkonzentration, nachmittags bei Labilisierung der bodennahen Atmosphäre zu deren Absinken.

Die ungewöhnlich hohen SO_2 -Konzentrationen in Graz Nord am 4.3., 20 bis 22 Uhr – bei relativ starkem Nordwind – könnten durch Transport aus dem Gratkorner Becken bedingt sein!

Am 6.3. kam es am Vormittag zu keiner Inversionsauflösung, vielmehr hielt den ganzen Tag über stabile Schichtung (Isothermie in Bodennähe, Inversion bis in Höhe des Plabutsch) an und bewirkte ein kontinuierliches Ansteigen der SO_2 -Konzentrationen, deren Maximum um 12 Uhr erreicht wurde.

Am 7.3. fielen die höchsten Konzentrationen zwischen 8 und 10 Uhr in einen Zeitraum niedriger Windgeschwindigkeit; mit dem Auffrischen des Windes auch in 50 m um 11 Uhr fielen die Werte rasant auf unter 0.02 mg/m^3 ab.

Am Morgen des 9.3. kam es noch zu einem Konzentrationsanstieg infolge einer bodennahen Inversion. Nach einem leichten Konzentrationsanstieg am Abend fielen die Werte um 23 Uhr rasant auf 0.01 mg/m^3 , da ein Kaltlufteinbruch mit hohen Windgeschwindigkeiten das Grazer Becken "ausräumte". Die labilen Ausbreitungsbedingungen am 10.3. führten dann zu sehr niedrigen SO_2 -Konzentrationen.

8. ZUSAMMENFASSUNG

Der Raum Graz ist durch charakteristische, topographisch bedingte Windverhältnisse und hohe Inversionshäufigkeit im Winter gekennzeichnet. Im Grazer Becken tritt – vor allem bei Strahlungswetterlagen und schwacher synoptischer Strömung – eine Talwindzirkulation auf, bei welcher nachts und vormittags Nordwind – bedingt durch Ausströmen kalter Luft aus dem Murtal – und nachmittags Südwind – bedingt durch Aufsteigen erwärmter Luft über dem Murtal – auftritt. Diese bisherigen Kenntnisse der Zirkulation sollten mit dem SODAR verifiziert und näher untersucht werden.

Zudem stellen die gerade im Winter häufigen bodennahen Inversionen für die Immissionssituation in Graz ein Problem dar, da bei derartigen austauscharmen Wetterlagen hohe Schadstoffanreicherungen auftreten können.

8.1. Wind

Die SODAR-Messungen zeigen sowohl im Mittel über den gesamten Meßzeitraum (Abb. 8) als auch an den – nach Steinacker klassifizierten – Gradientschwachen Tagen (Abb. 9), welche 40 der 112 Tage der Meßkampagne ausmachen, deutlich die Ausbildung der Talwindzirkulation. Zwischen 12 und 17 Uhr tritt unterhalb 200 m Südwind auf, in Höhen oberhalb 250 m Wind aus Nord bis West auf. Zwischen 18 Uhr und 11 Uhr weht höhenmäßig sehr einheitlicher Wind aus Nord bis Nordwest.

Am Talboden – herangezogen wird die Immissionsmeßstelle Graz Süd – herrscht nachts und vormittags meist sehr schwacher Wind sowohl von Süden als auch Norden, nachmittags Südwind; die Calmenhäufigkeit beträgt am Boden 67 %, in 100 m 7 %, in 200 m 4 %.

Eine Aufgliederung der mittleren Tagesgänge gemäß den Strömungslagen nach Steinacker (Abb. 9 bis Abb. 17) zeigt, daß sich die Talwindzirkulation auch bei Ostlagen, Südostlagen, Südlagen und Westlagen ausbildet.

Variable Lagen, Nordwestlagen und Nordostlagen zeigen dagegen den ganzen Tag über Nord- bis Nordwestwind in Höhen bis 350 m. Nordlagen traten während der Meßkampagne nicht auf.

Bei Südwestlagen treten unregelmäßige Windverhältnisse auf, bei denen sich in den unteren 200 m der Windrichtungswechsel der Talwindzirkulation abzeichnet, während darüber nachts Wind aus Nordwest bis West, tagsüber aus Süd bis West auftritt.

Die Windgeschwindigkeit zeigt sowohl im Mittel über alle Tage (Abb. 19) als auch an Gradientenschwachen Tagen (Abb. 20) einen charakteristischen Tagesgang. Nachmittags liegen die Geschwindigkeiten höhenmäßig relativ einheitlich um 2 m/s, wobei am Boden (Graz Süd) mit bis 1.5 m/s in dieser Zeit die höchsten Geschwindigkeiten auftreten. Von 18 bis 24 Uhr wird zwischen 50 und 200 m über Boden Geschwindigkeitsabnahme mit der Höhe beobachtet; die höchsten Geschwindigkeiten treten in 50 m auf (2.5 bis 3.0 m/s an Gradientenschwachen Tagen), die geringsten in 200 m (1.5 bis 2.0 m/s).

Im Verlauf der zweiten Nachthälfte und des Vormittags nimmt die Windgeschwindigkeit unterhalb 150 m ab, oberhalb 200 m zu, sodaß zwischen 24 und 12 Uhr Geschwindigkeitszunahme mit der Höhe beobachtet wird (um 2 m/s in 50 m, 3 bis 4 m/s in 200 m an Gradientenschwachen Tagen).

Die Windrichtungshäufigkeitsverteilung (Windrose) zeigt in allen Höhen bis 250 m (Abb. 3 bis Abb. 7) deutliche Maxima für Süd- und Nordwind, wobei sich mit der Höhe das Häufigkeitsmaximum von Nord nach Nordwest verschiebt und etwas verbreitert. Dies ist durch die Topographie des Murtales im Norden von Graz bedingt, wo die Hubertushöhe als östlicher Ausläufer des Plabutsch das Tal in den untersten 200 m einengt; dadurch tritt in den untersten 200 m nur Nordwind, darüber vermehrt auch Nordwestwind auf. Ostwind wird praktisch nie beobachtet, Westwind nur oberhalb 200 m, wo die Überströmung der südlich des Plabutsch gelegenen Hügel möglich ist.

In Graz Süd (Abb. 2) zeigt die Windrose ganz überwiegend Südwind, da Nordwind aufgrund seiner geringen Geschwindigkeit zumeist als Calme (Windstille) klassifiziert wird.

8.2. Inversionen

Aussagen über die thermische Stabilität der Atmosphäre werden primär aus den Echointensitäten der SODAR-Messung abgeleitet. Hohe Echointensitäten deuten i.allg. auf Änderungen in der Turbulenzstruktur der Atmosphäre hin und können als Hinweis auf Inversionsuntergrenzen interpretiert werden. Diese Angaben sind mit Unsicherheiten behaftet und können nur als qualitative Schätzungen behandelt werden. Die Identifizierung von Bodeninversionen ist schwierig, da Echos erst oberhalb 50 m vorliegen.

Für einen Teil der Meßzeit können Temperaturwerte der Stationen Schloßberg, Platte und Plabutsch zusätzlich zu den für den gesamten Zeitraum verfügbaren Temperaturdaten der Station Graz Mitte herangezogen werden, um die aus dem SODAR-Echos abgeleiteten Angaben der Inversionshöhe mit gemessenen Temperaturgradienten zu vergleichen. Dieser Vergleich zeigt, daß hohe Echointensitäten auch bei isothermem Temperaturgradienten auftreten; unter diesem Gesichtspunkt ist die Klassifizierung eines Bereichs hoher Echointensität als "Untergrenze einer Inversion" zu speziell, man sollte eher von einem "sehr stabil geschichteten Höhenbereich" sprechen.

Boden- oder bodennahe Inversionen mit Untergrenzen unter ca. 150 m treten fast ausschließlich an wolkenarmen Tagen auf, an welchen es nachts zu Ausstrahlung und damit zu kontinuierlicher Abkühlung am Boden kommen kann; die Minimaltemperatur am Boden tritt morgens auf, gefolgt von raschem Temperaturanstieg bis ca. 14 Uhr.

Inversionen sind schwächer ausgeprägt oder fehlen, sobald sich in der Nacht oder morgens Nebel bildet und damit die weitere Abkühlung verhindert. Bisweilen treten abgehobene Inversionen an Tagen mit Hochnebel auf, an denen man möglicherweise die Inversionsuntergrenze mit jener des Hochnebels gleichsetzen kann.

An wolkenarmen Tagen mit starken Temperaturtagesgängen werden in der ersten Nachthälfte hohe Echointensitäten zwischen 50 und 80 m über Boden beobachtet, die nach Mitternacht abnehmen. Gegen Morgen – beginnend zwischen 4 und 6 Uhr – treten häufig hohe Echointensitäten von 50 m bis ca. 200 m Höhe auf, die sich an manchen Tagen später als sich hebende Inversion abzeichnen. Über die Temperatur- bzw. Turbulenzverhältnisse, die hohe Echointensitäten in diesem ausgedehnten Höhenbereich bewirken, kann nichts ausgesagt werden; da derartige Echostrukturen – bei deutlichem morgendlichem Ansteigen der SO_2 -Emissionen – mit dem raschen Ansteigen der SO_2 -Immissionskonzentration einhergehen, charakterisieren sie jedenfalls stabile Ausbreitungsverhältnisse, d.h. wahrscheinlich Inversionen. Mit dem raschen Temperaturanstieg mittags nehmen auch die Echointensitäten in allen Höhen rasch ab.

Während der Episode mit den tiefsten Lufttemperaturen und den höchsten SO_2 -Konzentrationen im Jänner 1990 (7.–12.1.) wurden in der zweiten Nachthälfte und vormittags keine Boden-, sondern abgehobene Inversionen oberhalb ca. 200 bis 250 m beobachtet, die aber ebenfalls mit starkem Ansteigen der SO_2 -Konzentration verbunden waren. Diese Inversionen zeichneten sich – wenn auch undeutlicher als in der zweiten Nachthälfte und vormittags – auch in der ersten Nachthälfte sowie zeitweise nachmittags in Höhen bis 300 m ab. Die betreffenden Tage – v.a. 7.–9.1.1990 – wiesen vermutlich eine entsprechend mächtige bodennahe Kaltluftschicht auf, die sich auch tagsüber von der darüber liegenden, wahrscheinlich wärmeren Luft abgrenzte. Der betreffende Zeitraum war von einer anhaltenden starken Inversion zwischen Graz-Flughafen und Schöckl gekennzeichnet, lediglich die nachmittäglichen Maximaltemperaturen in Graz-Flughafen überstiegen die Temperatur am Schöckl.

Der Konzentrationsverlauf bei abgehobenen Inversionen und deren Relevanz für das bodennahe Immissionsgeschehen, hängen nicht nur von der Inversionshöhe, sondern auch von den Stabilitätsverhältnissen darunter ab. So werden an manchen Tagen unterhalb der abgehobenen Inversion sehr niedrige Echointensitäten beobachtet, die auf labile Schichtung hindeuten und meist mit niedrigeren SO_2 -Konzentrationen einhergingen.

Der Vergleich der SODAR-Echointensität mit den Temperaturgradienten der Meßstellen Graz Mitte und Schloßberg zeigt nur beschränkt Übereinstimmung zwischen den SODAR-Daten und aus dem Temperaturprofil abgeleiteten Inversionen. Meist zeichnet sich zwischen Graz Mitte und Schloßberg ein labiler Temperaturgradient ab, obwohl die SODAR-Daten stabile Verhältnisse bzw. Inversion andeuten. Insbesondere während des vormittäglichen raschen Temperaturanstiegs an beiden Stationen bei labilem Temperaturgradienten zeigen die SODAR-Daten häufig bis 12 Uhr sehr hohe Echointensitäten, die in Zusammenhang mit den SO_2 -Konzentrationsverläufen mit hoher Sicherheit als Hinweis auf stabile Ausbreitungsverhältnisse gedeutet werden können.

Diese Diskrepanz kann verschiedene Ursachen haben:

- Die Station Graz Mitte liegt im Stadtzentrum im dicht verbauten Gebiet und dürfte somit infolge stadtklimatischer Einflüsse lokaler Überwärmung ausgesetzt sein. Somit ist fraglich,

ob die dortigen Temperaturwerte für das unbebaute, eher peripher gelegene Gelände des SODAR-Standortes repräsentativ sind.

- Weiters besteht die Möglichkeit, daß die Temperaturwerte am Schloßberg für die freie Atmosphäre nicht repräsentativ sind, d.h. infolge stärkerer Ausstrahlung niedriger sind als in Luftschichten 100 m über dem Talboden. Diese Frage wäre nur mit Fesselballonmessungen zu klären.
- Flache Bodeninversionen können überhaupt nicht mit dem Temperaturgradienten zwischen Graz Mitte und Schloßberg erfaßt werden, wenn der Schloßberg oberhalb der Inversion liegt.

8.3. Bedeutung der Stabilitäts- und Windverhältnisse für das Immissionsgeschehen

Die bestimmenden Einflußgrößen für den Verlauf der SO_2 -Konzentration in Graz stellen die SO_2 -Emission und die Ausbreitungsbedingungen dar.

Der morgendliche Anstieg der SO_2 -Immissionskonzentration ist – bei gleichbleibend stabilen Ausbreitungsbedingungen – durch den Anstieg der SO_2 -Emission gesteuert; weiters tritt die Temperaturabhängigkeit der SO_2 -Emission bei den stark erhöhten SO_2 -Konzentrationen im besonders kalten Zeitraum 7.–15.1.1990 zutage.

Beide Faktoren führten zu den höchsten SO_2 -Konzentrationen, die während der Meßkampagne beobachtet wurden: 0.243 mg/m^3 (HMW) in Graz Nord (12.1.), 0.258 mg/m^3 in Graz West (10.1.), 0.151 mg/m^3 in Graz Süd (10.1.) und 0.201 mg/m^3 in Graz Mitte (10.1.).

Die untersuchten SO_2 -Episoden belegen klar den Zusammenhang von thermischer Stabilität bzw. Auftreten von Inversionen und SO_2 -Konzentration. Dabei zeigen Boden- und bodennahe Inversionen mit Untergrenzen unterhalb 200 m den größten Einfluß; höher gelegene Inversionen wirken sich – insbesondere bei höheren Windgeschwindigkeiten – bisweilen kaum auf das Immissionsgeschehen aus. Von Bedeutung ist auch die Stabilität unterhalb einer abgehobenen Inversion; herrschen unterhalb der Inversion labile Bedingungen, so ist Schadstoffverdünnung möglich, die ein Anwachsen der SO_2 -Konzentration verhindert oder verzögert; stabile Bedingungen oder das (ansatzweise) Auftreten einer Bodeninversion unter einer abgehobenen Inversion führen zu hohen SO_2 -Konzentrationen.

Aufgrund des engen Zusammenhangs von Boden- bzw. bodennahen Inversionen und hohen SO_2 -Konzentrationen treten hohe Immissionskonzentrationen primär an wolkenarmen Tagen mit starker nächtlicher Abkühlung auf; die hoch belastete Episode vom 7. bis 14.1.1990 fiel auf Gradientschwache Tage (Klassifikation nach Steinacker), an denen sich im Grazer Becken meist die ungestörte Talwindzirkulation mit geringen Windgeschwindigkeiten ausbilden konnte.

Die untersuchten Episoden zeigen, daß die Windgeschwindigkeiten gerade an wolkenarmen Tagen, an welchen Inversionen auftreten, in Bodennähe sehr gering sind und nachmittags 2 m/s , nachts 0.5 m/s nicht überschreiten. Auch in dem vom SODAR erfaßten Bereich bis ca. 300 m übersteigen die Windgeschwindigkeiten selten 5 m/s , sodaß gerade an Tagen mit durch Inversion bedingten hohen SO_2 -Konzentrationen kaum Schadstoffverdünnung durch starken Wind stattfindet.

In einzelnen Fällen kann Advektion als Ursache des Verlauf der SO_2 -Konzentration nachgewiesen werden, so vor allem bei Konzentrationsspitzen der Meßstelle Graz Nord, die bei Winddrehung von Nord auf Süd mittags auftreten und mit Sicherheit auf Transport belasteter Luft aus dem Stadtzentrum zurückzuführen sind.

In selteneren Fällen steht die Winddrehung von Nord auf Süd mit einer raschen Abnahme der SO_2 -Konzentration in Graz Mitte, was auf Advektion weniger belasteter Luft aus dem Raum südlich von Graz zurückzuführen ist.

Die Windrichtungsabhängigkeit der SO_2 -Konzentration (Schadstoffwindrose) zeigt, daß in Graz Mitte und Graz Süd das Stadtzentrum von Graz den weitaus dominierenden Anteil der SO_2 -Belastung liefert, während in Graz West und Graz Nord Advektion aus dem Norden bei Wind oberhalb ca. 150 m eine Rolle spielt.

Bei der Station Graz West fallen einzelne Konzentrationsspitzen in Zusammenhang mit Nordwind auf, deren Ursache nicht eindeutig geklärt werden kann. Als mögliche Erklärung bietet sich Transport aus dem Gratkorner Becken, das über starke SO_2 -Emissionen verfügt, an, doch würde man für diesen Fall auch ähnliche Konzentrationen in Graz Nord erwarten. Es bestünde die Möglichkeit, daß SO_2 -Transport in höheren Niveaus unter Überströmung der Hubertushöhe stattfindet; die in Graz West im Mittel erhöhten SO_2 -Konzentrationen bei Nordwind belegen, daß SO_2 -Transport aus dieser Richtung eine Rolle spielt.

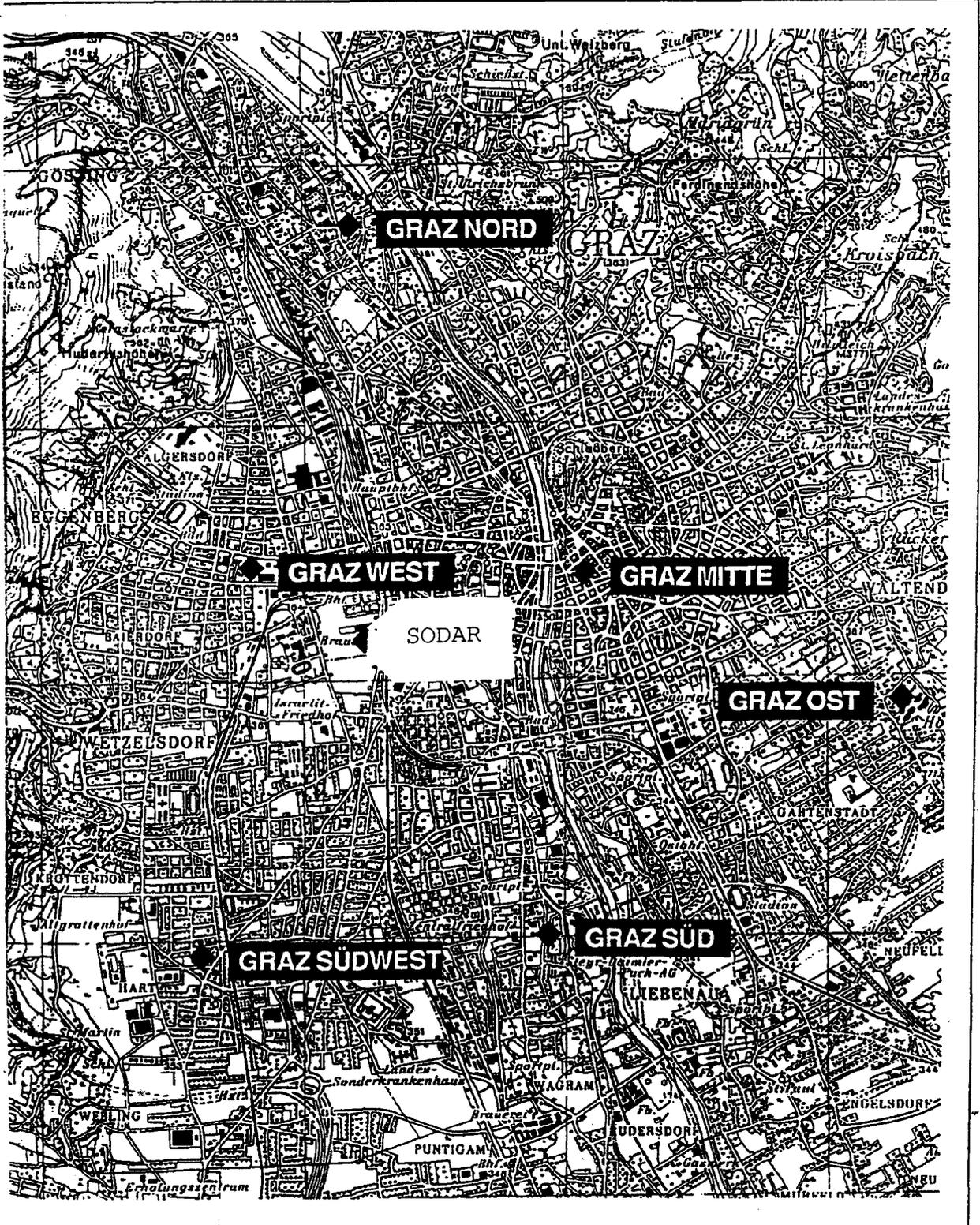
Starker Wind im Bereich unterhalb ca. 200 m, der häufig, aber nicht immer mit Kaltlufteinbrüchen einhergeht, führt stets zu deutlichem Absinken der SO_2 -Konzentration in Graz, sofern damit eine Auflösung der Inversion bzw. Labilisierung zumindest in den untersten 200 m verbunden ist.

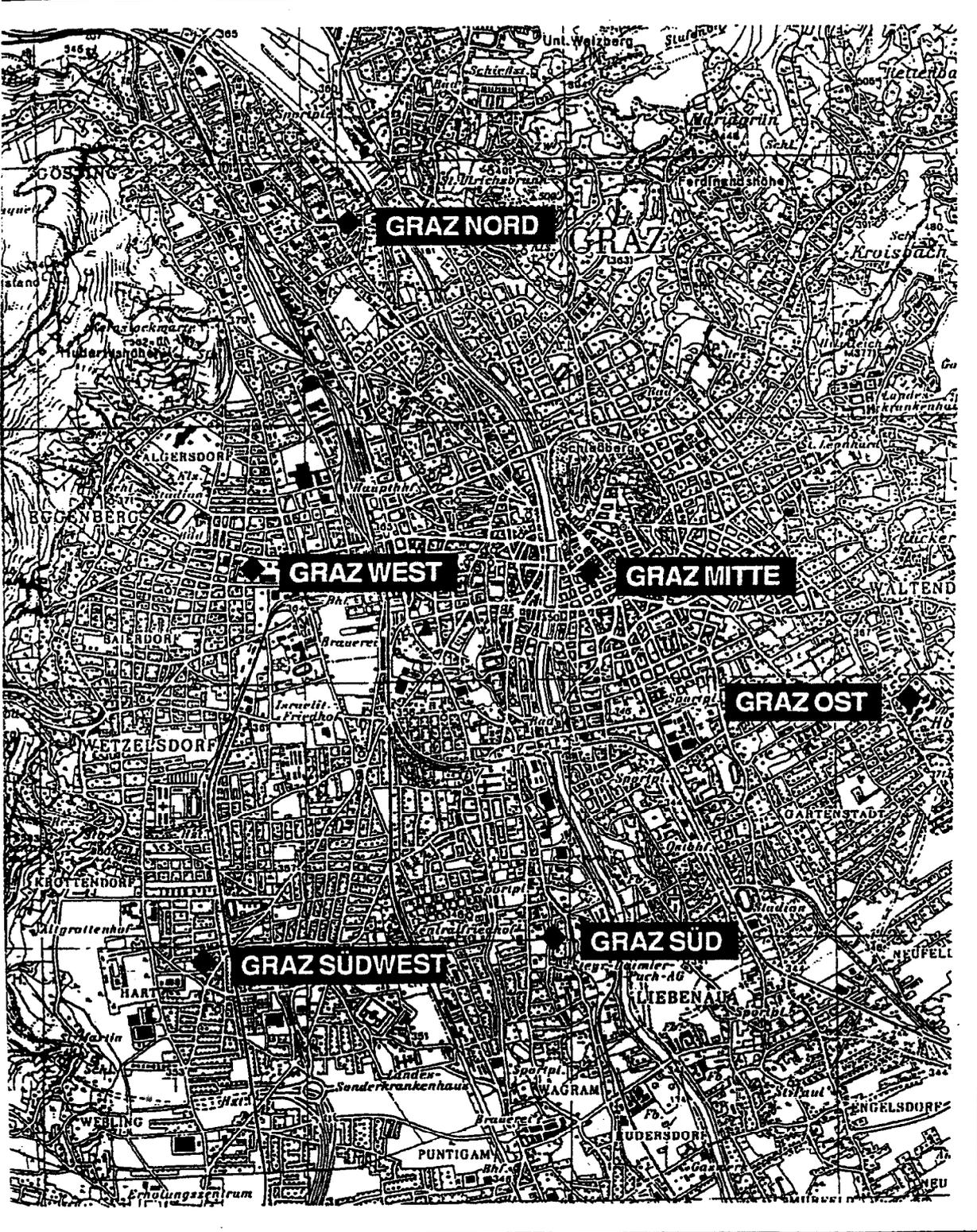
Bei Wetterlagen, an denen es infolge des Durchgreifens der synoptischen Strömung bis zum Boden – was in Graz während der Meßperiode selten der Fall war – zu einem Luftmassenwechsel im Grazer Becken kommt, sinken die SO_2 -Konzentrationen auf niedrige Werte unter 0.05 mg/m^3 .

Abbildung 1

Immissionsmeßstellen in Graz und SODAR-Standort

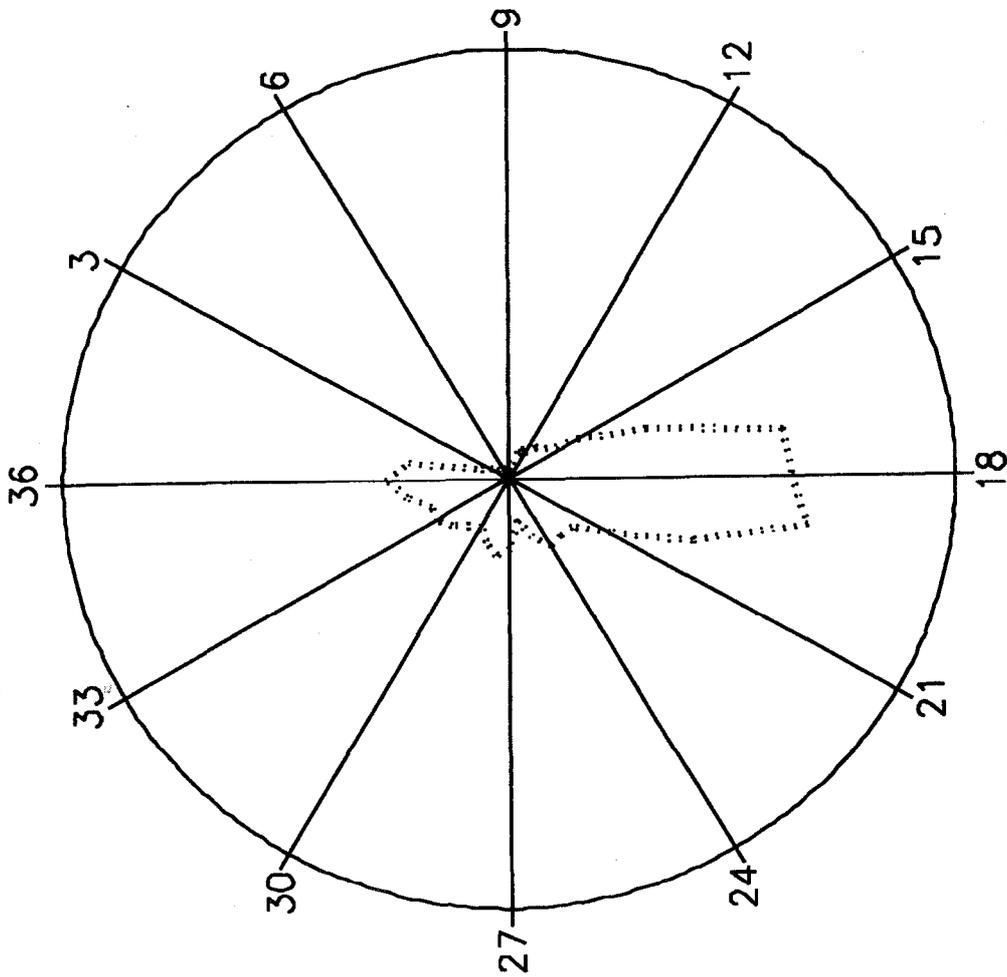
Stadt Graz





Graz Sued 14. Dezember 1989 - 4. April 1990

Windrichtung 10 m
Calme bei Windgeschwindigkeit < 0.5 m/s



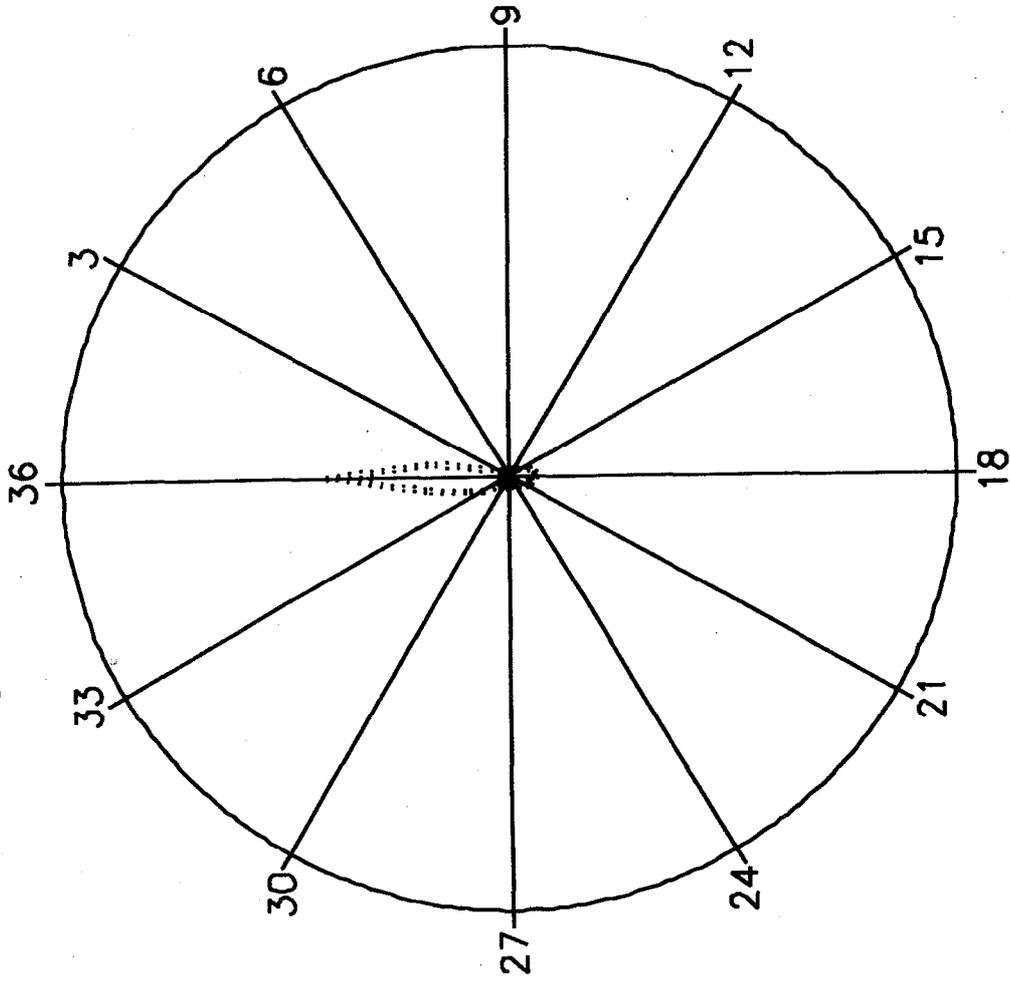
..... Windrichtungshaeufigkeit 5 %
Radius entspricht:
Windstille (< 0.5 m/s): 2506 Werte (66.9%)
Ausfall oder nicht gemessen: 1628 Werte

Klasse	Anz. Werte	%
0	2506	66.9
1	43	1.1
2	12	0.3
3	9	0.2
4	6	0.2
5	5	0.1
6	2	0.1
7	3	0.1
8	6	0.2
9	4	0.1
10	7	0.2
11	14	0.4
12	13	0.3
13	18	0.5
14	20	0.5
15	34	0.9
16	62	1.7
17	117	3.1
18	119	3.2
19	127	3.4
20	82	2.2
21	49	1.3
22	34	0.9
23	33	0.9
24	34	0.9
25	27	0.7
26	19	0.5
27	31	0.8
28	34	0.9
29	29	0.8
30	24	0.6
31	27	0.7
32	32	0.9
33	35	0.9
34	35	0.9
35	44	1.2
36	52	1.4

Abb. 2: Windrichtungsverteilung in Graz Süd

GRAZ Reininghaus SODAR 14. Dezember 1989 – 4. April 1990

Windrichtung 50 m
 Calme bei Windgeschwindigkeit < 0.5 m/s



Radius entspricht:

..... Windrichtungshäufigkeit 50 %

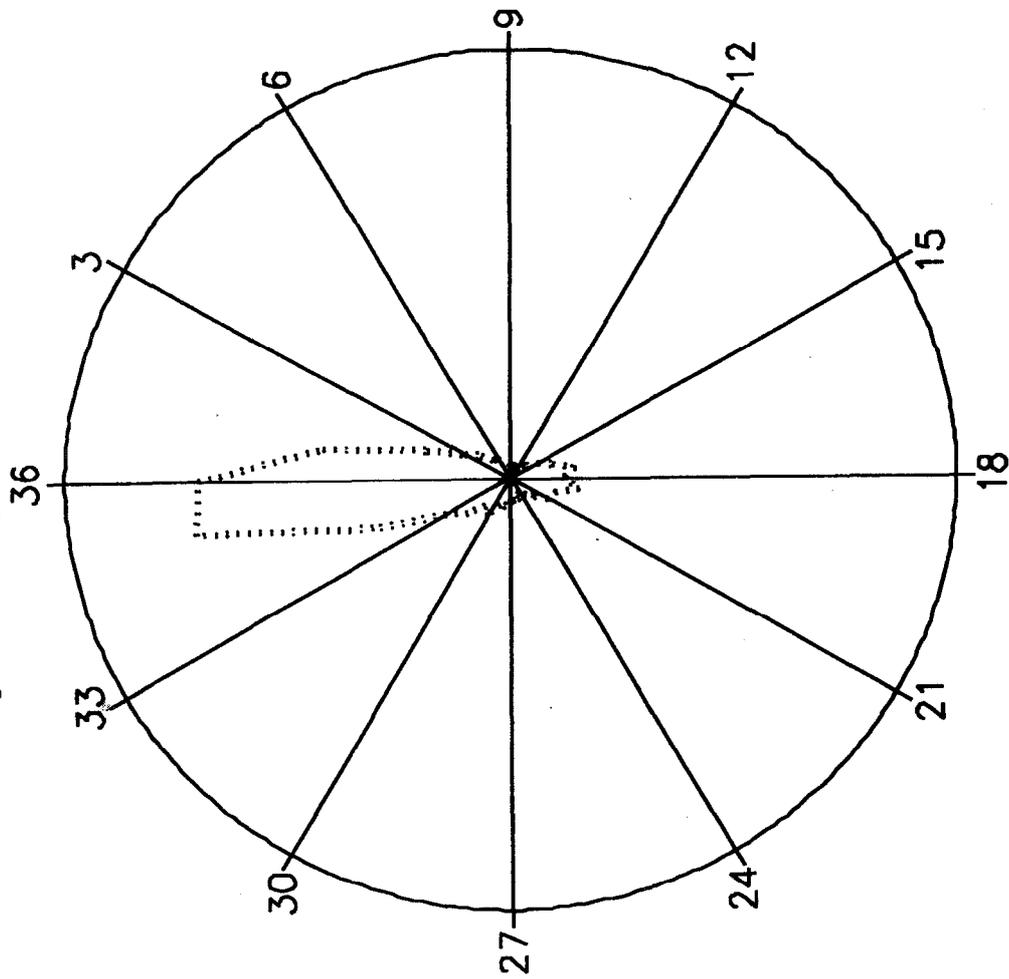
Klasse	Anz. Werte	%
0	404	8.0
1	419	8.3
2	104	2.1
3	53	1.3
4	50	1.0
5	20	0.4
6	26	0.5
7	26	0.5
8	25	0.5
9	26	0.5
10	40	0.8
11	39	0.8
12	52	1.0
13	64	1.3
14	110	2.2
15	119	2.4
16	143	2.8
17	154	3.1
18	117	2.3
19	127	2.5
20	120	2.4
21	86	1.7
22	54	1.1
23	59	1.2
24	72	1.4
25	56	1.1
26	76	1.5
27	68	1.4
28	83	1.6
29	67	1.3
30	82	1.6
31	110	2.2
32	175	3.5
33	264	5.2
34	478	9.5
35	1029	20.4
36		

Windstille (< 0.5 m/s): 404 Werte (8.0%)
 Ausfall oder nicht gemessen: 343 Werte

Abb. 3: Windrichtungsverteilung in 50 m Höhe

GRAZ Reininghaus SODAR 14. Dezember 1989 – 4. April 1990

Windrichtung 100 m
 Calme bei Windgeschwindigkeit < 0.5 m/s



Radius entspricht:

Windrichtungshäufigkeit 20 %

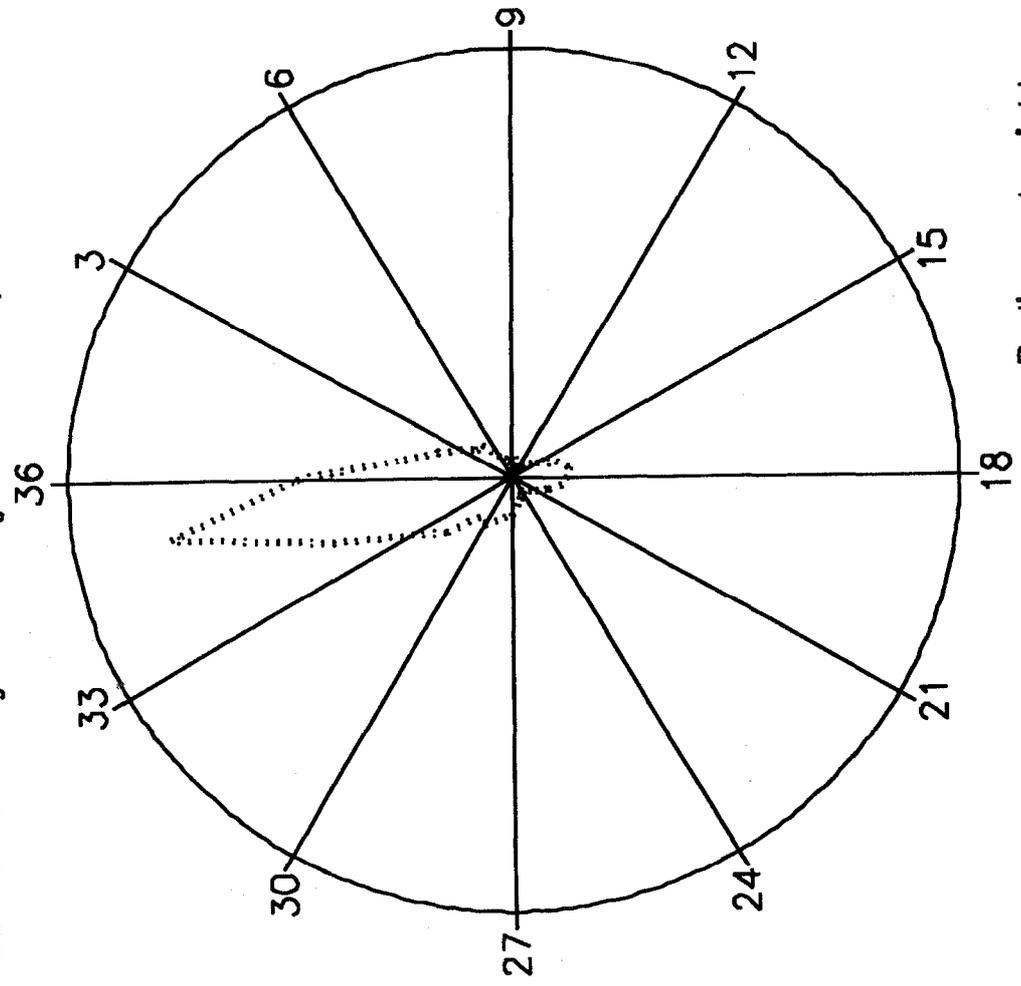
Klasse	Anz.Werte	%
0	353	7.0
1	429	8.6
2	199	4.0
3	117	2.3
4	85	1.7
5	58	1.2
6	55	1.1
7	32	0.6
8	21	0.4
9	15	0.3
10	35	0.7
11	24	0.5
12	27	0.5
13	42	0.8
14	47	0.9
15	71	1.4
16	100	2.0
17	143	2.9
18	116	2.3
19	154	3.1
20	108	2.2
21	95	1.9
22	65	1.3
23	50	1.0
24	39	0.8
25	53	1.1
26	54	1.1
27	56	1.1
28	65	1.3
29	67	1.3
30	97	1.9
31	87	1.7
32	126	2.5
33	169	3.4
34	333	6.6
35	719	14.4
36	702	14.0

Windstille (< 0.5 m/s): 353 Werte (7.0%)
 Ausfall oder nicht gemessen: 368 Werte

Abb. 4: Windrichtungsverteilung in 100 m Höhe

GRAZ Reininghaus SODAR 14. Dezember 1989 - 4. April 1990

Windrichtung 150 m
 Colme bei Windgeschwindigkeit < 0.5 m/s



..... Windrichtungshoeufigkeit 20 %
 Radius entspricht:
 Windrichtung (< 0.5 m/s): 244 Werte (5.4%)
 Ausfall oder nicht gemessen: 884 Werte

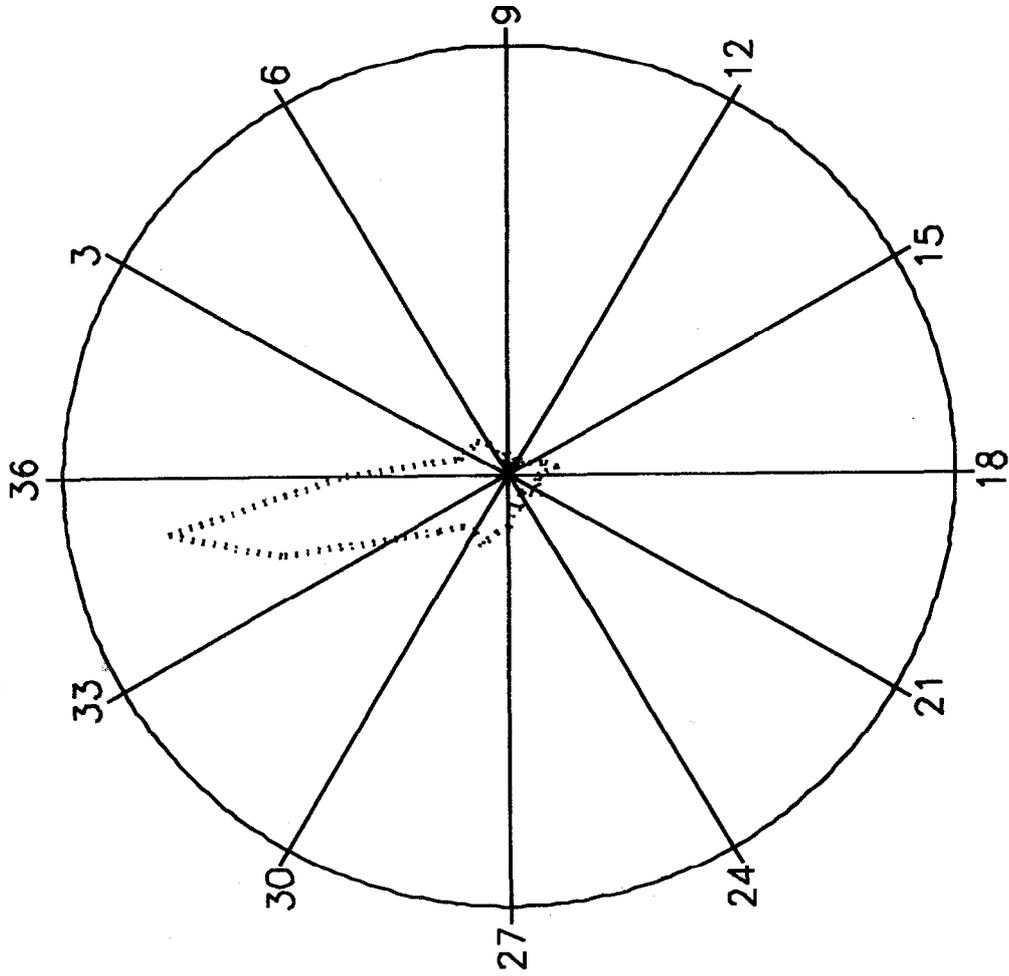
Klasse	Anz. Werte	%
0	244	5.4
1	221	4.9
2	158	3.5
3	119	2.6
4	92	2.0
5	90	2.0
6	53	1.2
7	42	0.9
8	34	0.8
9	31	0.7
10	43	1.0
11	28	0.6
12	24	0.5
13	34	0.8
14	46	1.0
15	57	1.3
16	95	2.1
17	118	2.6
18	110	2.4
19	99	2.2
20	73	1.6
21	59	1.3
22	46	1.0
23	36	0.8
24	36	0.8
25	46	1.0
26	58	1.3
27	78	1.7
28	84	1.9
29	96	2.1
30	110	2.4
31	105	2.3
32	176	3.9
33	233	5.2
34	363	8.5
35	701	15.6
36	434	9.7

Abb. 5: Windrichtungsverteilung in 150 m Höhe

GRAZ Reininghaus SODAR 14. Dezember 1989 - 4. April 1990

Windrichtung 200 m

Calme bei Windgeschwindigkeit < 0.5 m/s



Radius entspricht:

..... Windrichtungshäufigkeit 20 %

Klasse	Anz.Werte	%
0	129	3.8
1	117	3.4
2	78	2.3
3	80	2.3
4	71	2.1
5	72	2.1
6	58	1.7
7	21	0.6
8	33	1.0
9	37	1.1
10	17	0.5
11	25	0.7
12	32	0.9
13	22	0.6
14	27	0.8
15	37	1.1
16	60	1.8
17	76	2.2
18	49	1.4
19	45	1.3
20	48	1.4
21	58	1.7
22	47	1.4
23	34	1.0
24	37	1.1
25	58	1.7
26	49	1.4
27	86	2.5
28	93	2.7
29	117	3.4
30	103	3.0
31	108	3.2
32	140	4.1
33	199	5.8
34	372	10.9
35	528	15.5
36	247	7.2

Windstille (< 0.5 m/s): 129 Werte (3.8%)

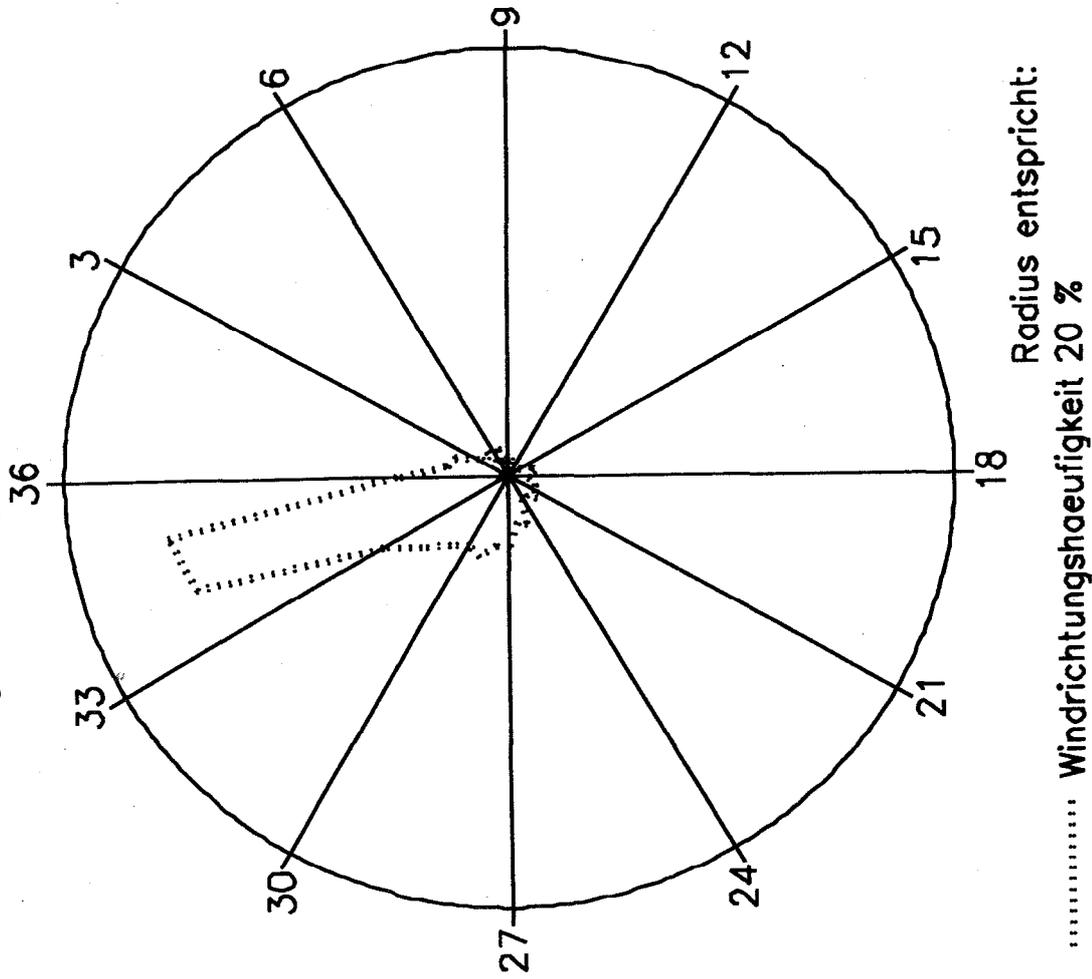
Ausfall oder nicht gemessen: 1966 Werte

Abb. 6: Windrichtungsverteilung in 200 m Höhe

GRAZ Reininghaus SODAR 14. Dezember 1989 – 4. April 1990

Windrichtung 250 m

Calme bei Windgeschwindigkeit < 0.5 m/s



Klasse	Anz.Werte	%
0	49	2.3
1	58	2.8
2	53	2.5
3	33	1.6
4	27	1.3
5	31	1.5
6	16	0.8
7	29	1.4
8	16	0.8
9	15	0.7
10	17	0.8
11	14	0.7
12	8	0.4
13	8	0.4
14	5	0.2
15	12	0.6
16	23	1.1
17	25	1.2
18	19	0.9
19	20	1.0
20	28	1.3
21	30	1.4
22	35	1.7
23	26	1.2
24	28	1.3
25	50	2.4
26	47	2.2
27	73	3.5
28	70	3.3
29	84	4.0
30	77	3.7
31	87	4.1
32	108	5.1
33	139	6.6
34	315	15.0
35	328	15.6
36	102	4.8

Windstille (< 0.5 m/s): 49 Werte (2.3%)
Ausfall oder nicht gemessen: 3271 Werte

Abb. 7: Windrichtungsverteilung in 250 m Höhe

Graz SODAR

Windrichtung, Mittlerer Tagesgang

14.12. 1989 - 4.4. 1990

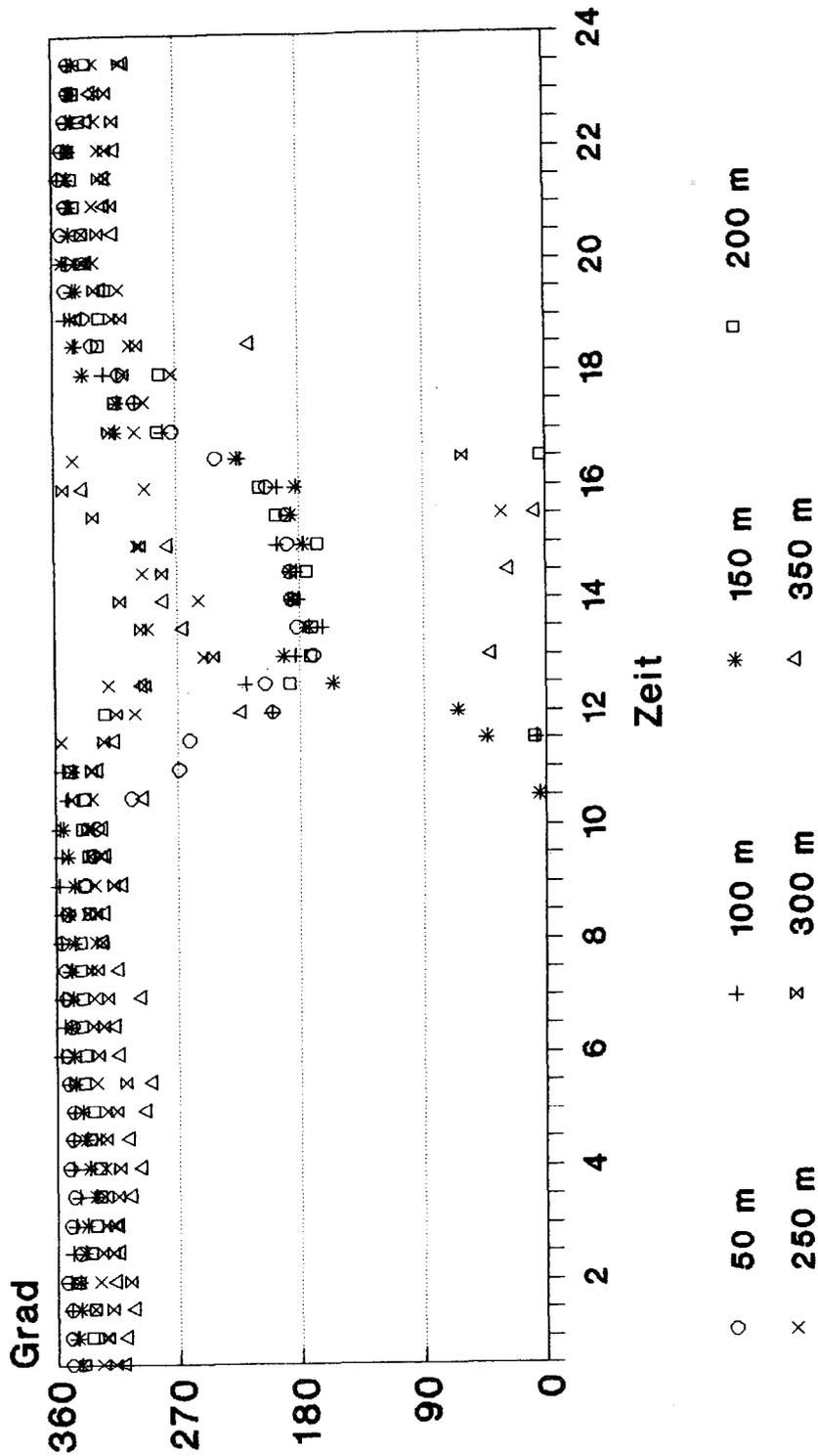


Abb. 8

Graz SODAR

Windrichtung, Mittlerer Tagesgang Gradientenstärke Lagen

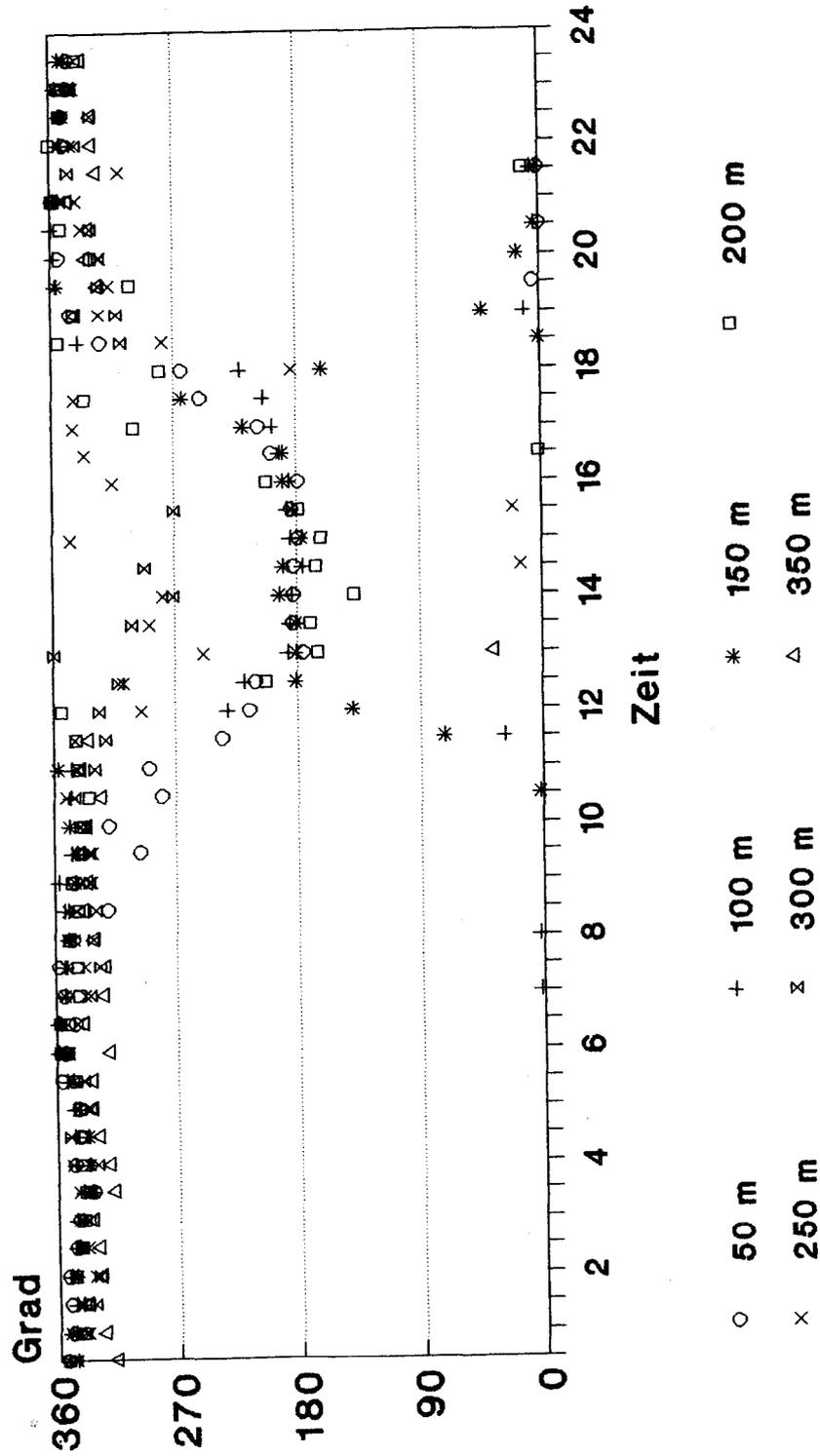


Abb. 9

Graz SODAR

Windrichtung, Mittlerer Tagesgang Nordostlagen

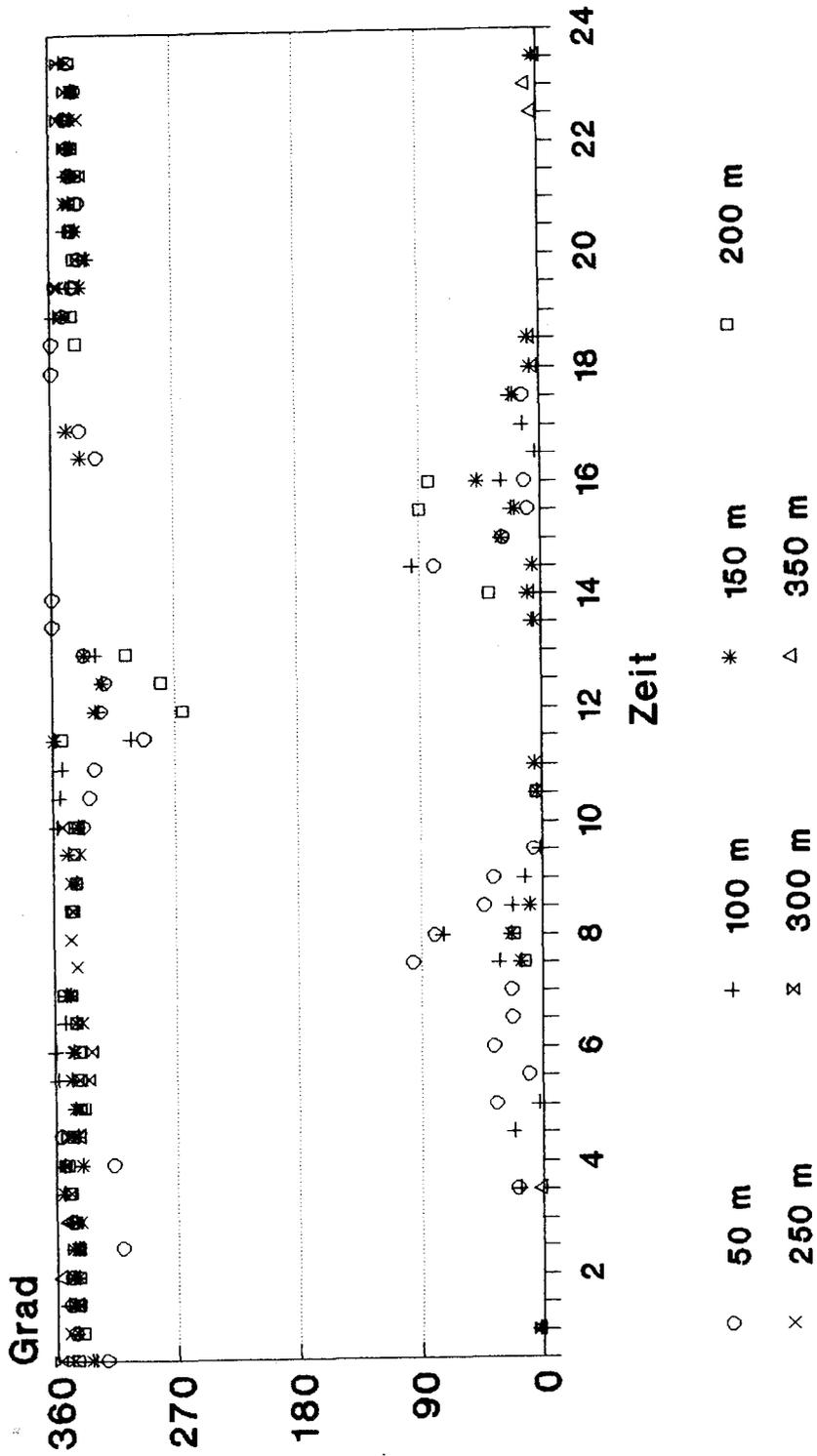


Abb. 10

Graz SODAR Windrichtung, Mittlerer Tagesgang Ostlagen

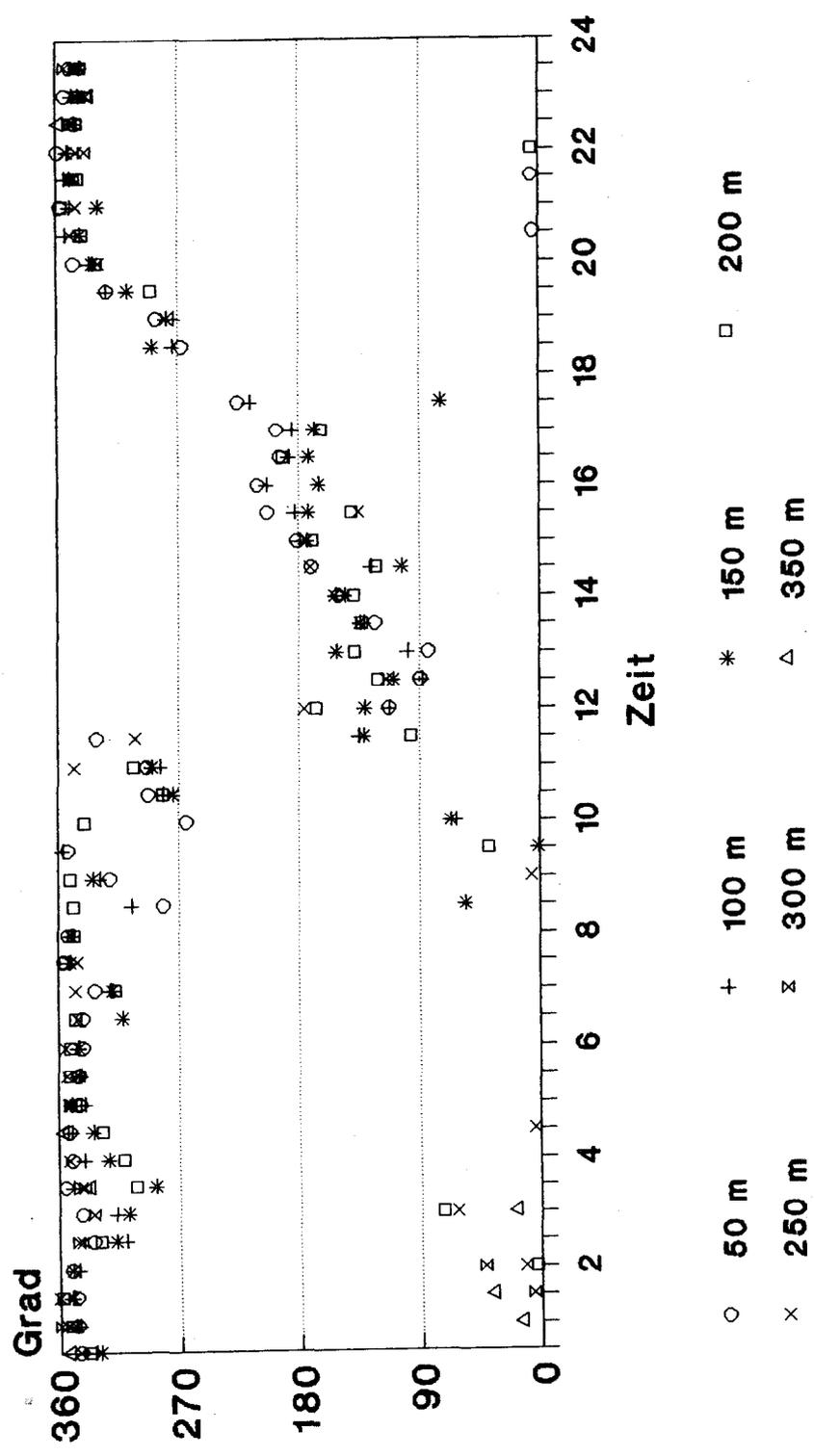


Abb. 11

Graz SODAR

Windrichtung, Mittlerer Tagesgang Südstlagen

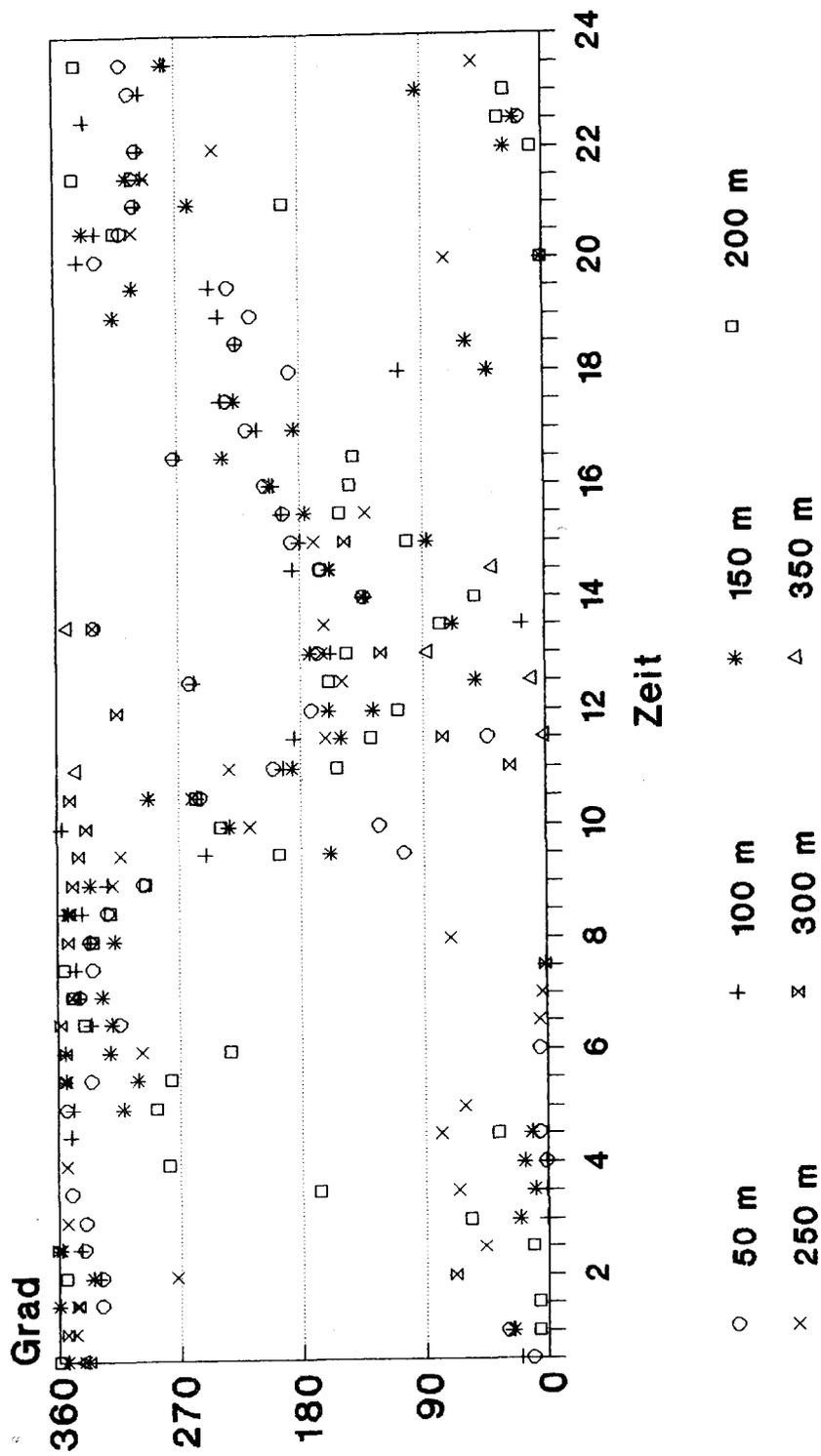


Abb. 12

Graz SODAR Windrichtung, Mittlerer Tagesgang Südlagen

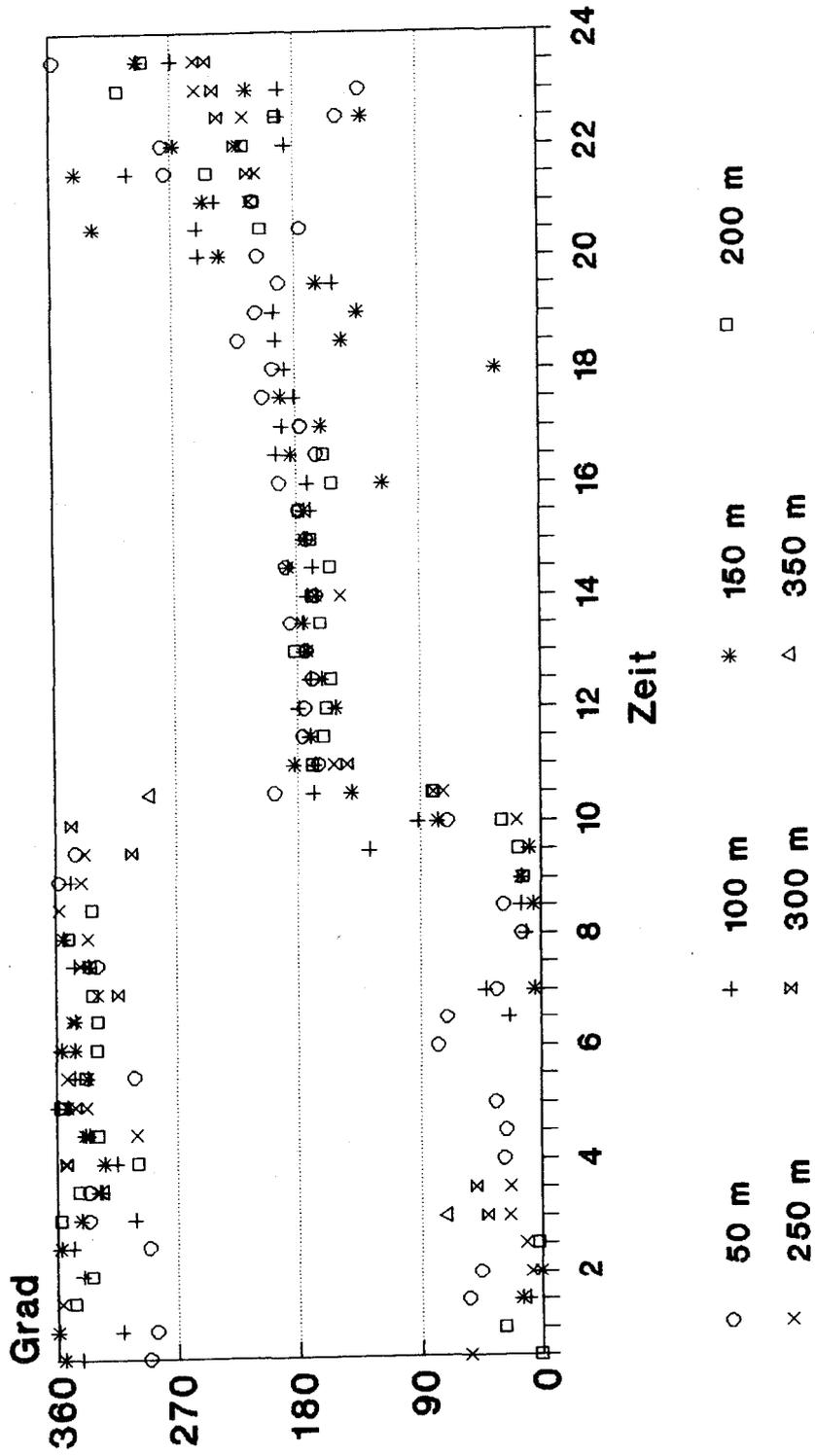


Abb. 13

Graz SODAR

Windrichtung, Mittlerer Tagesgang Südwestlagen

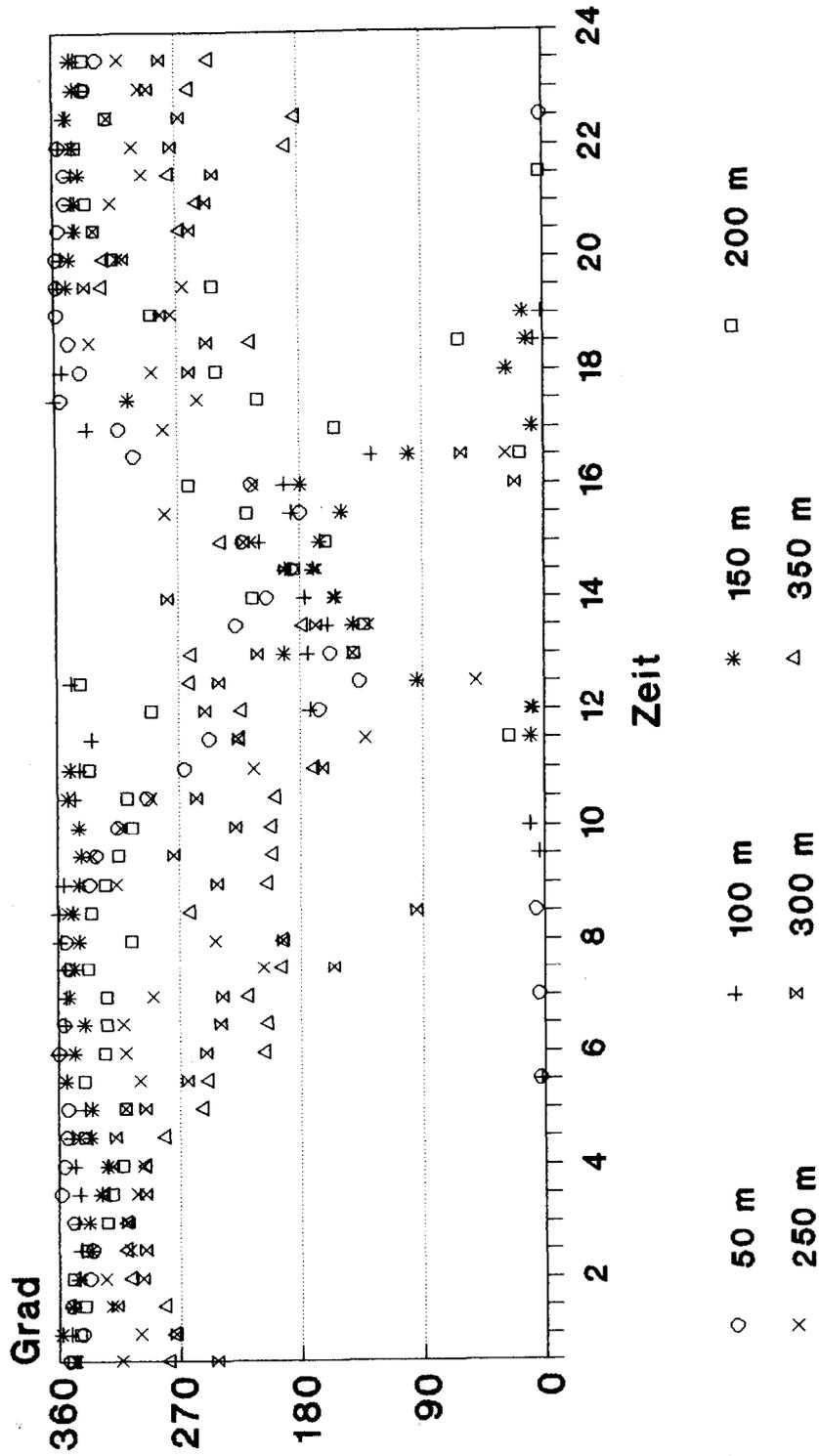


Abb. 14

Graz SODAR

Windrichtung, Mittlerer Tagesgang Westlagen

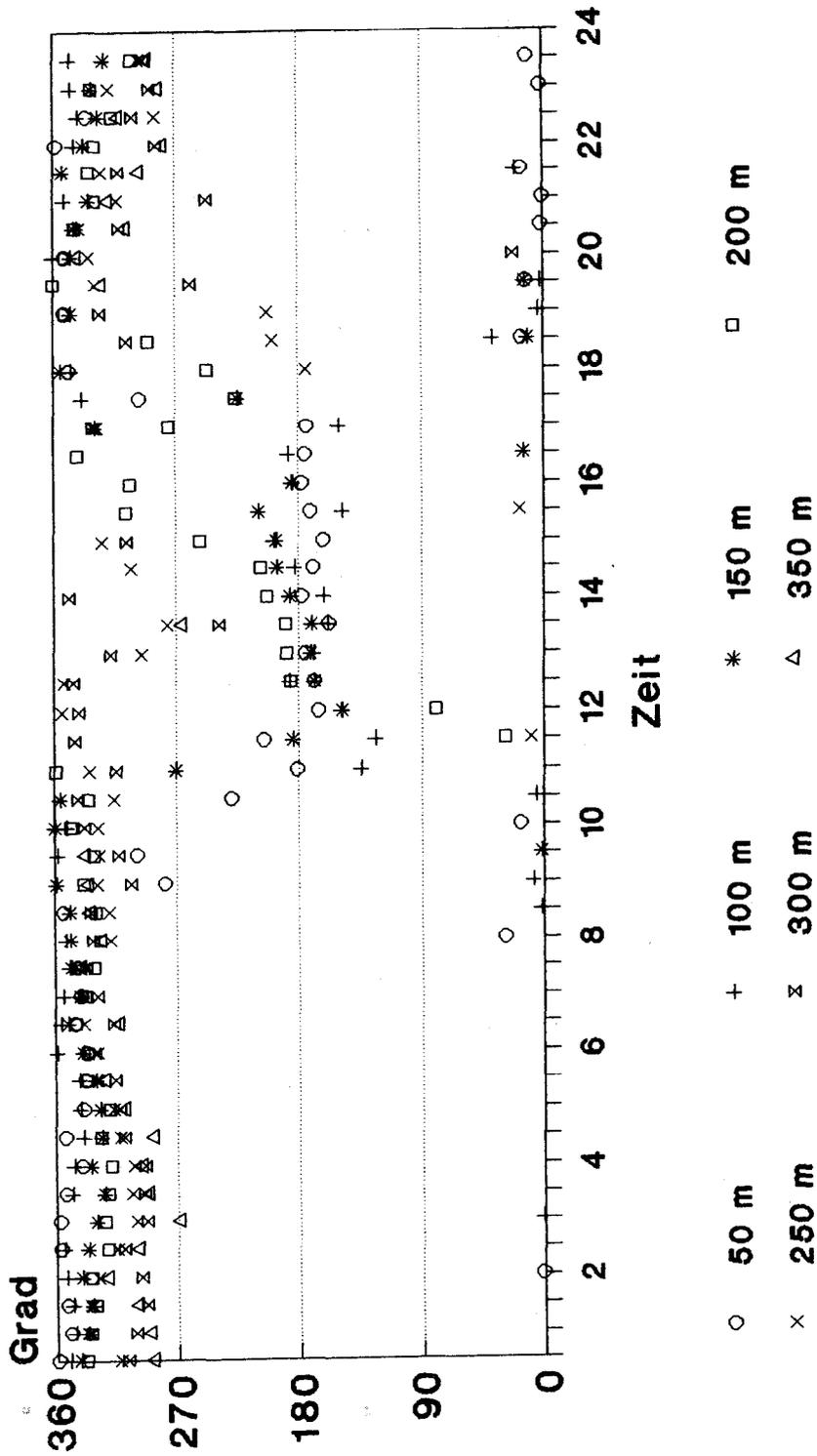


Abb. 15

Graz SODAR

Windrichtung, Mittlerer Tagesgang Nordwestlagen

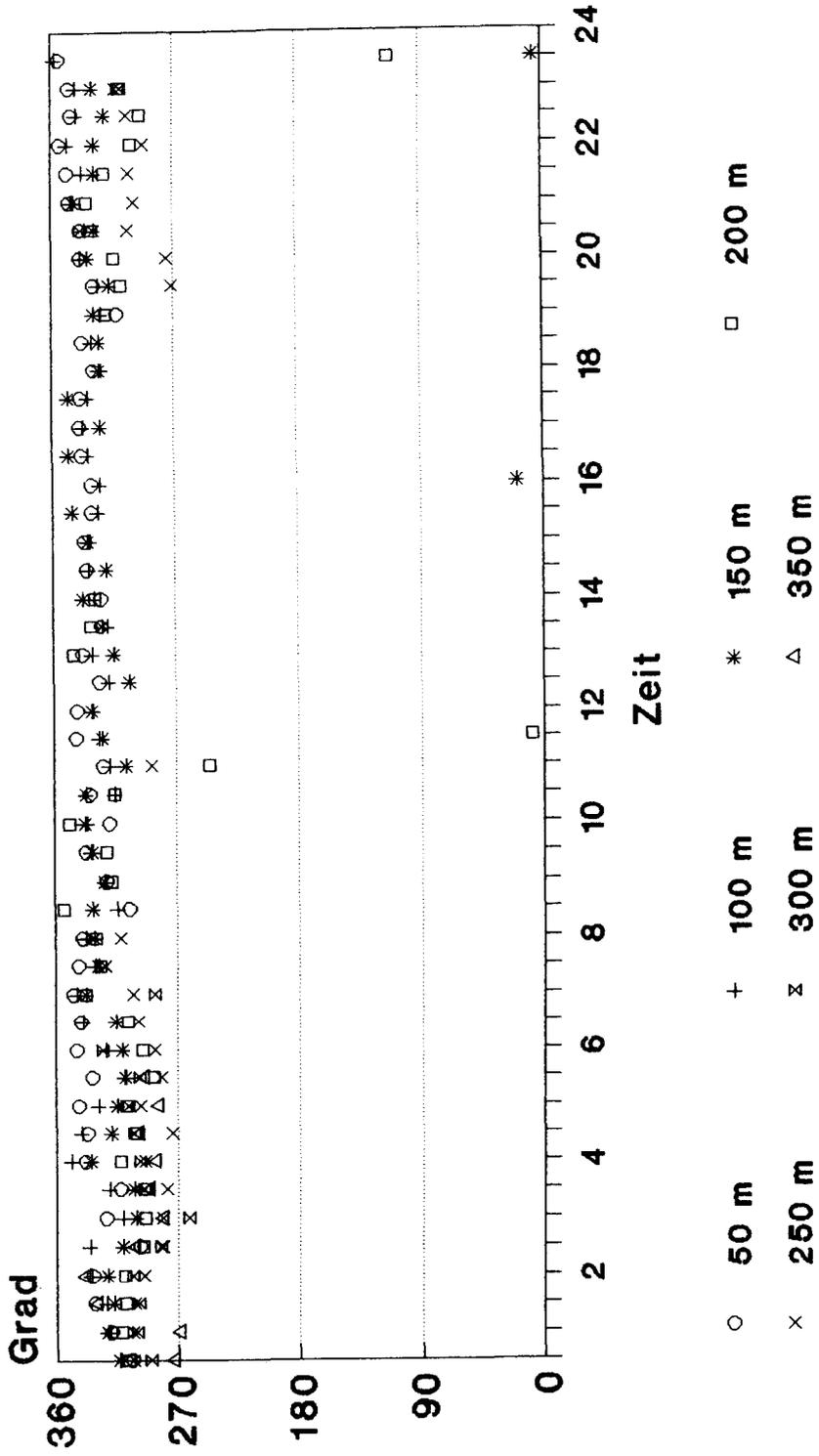


Abb. 16

Graz SODAR

Windrichtung, Mittlerer Tagesgang Variable Lagen

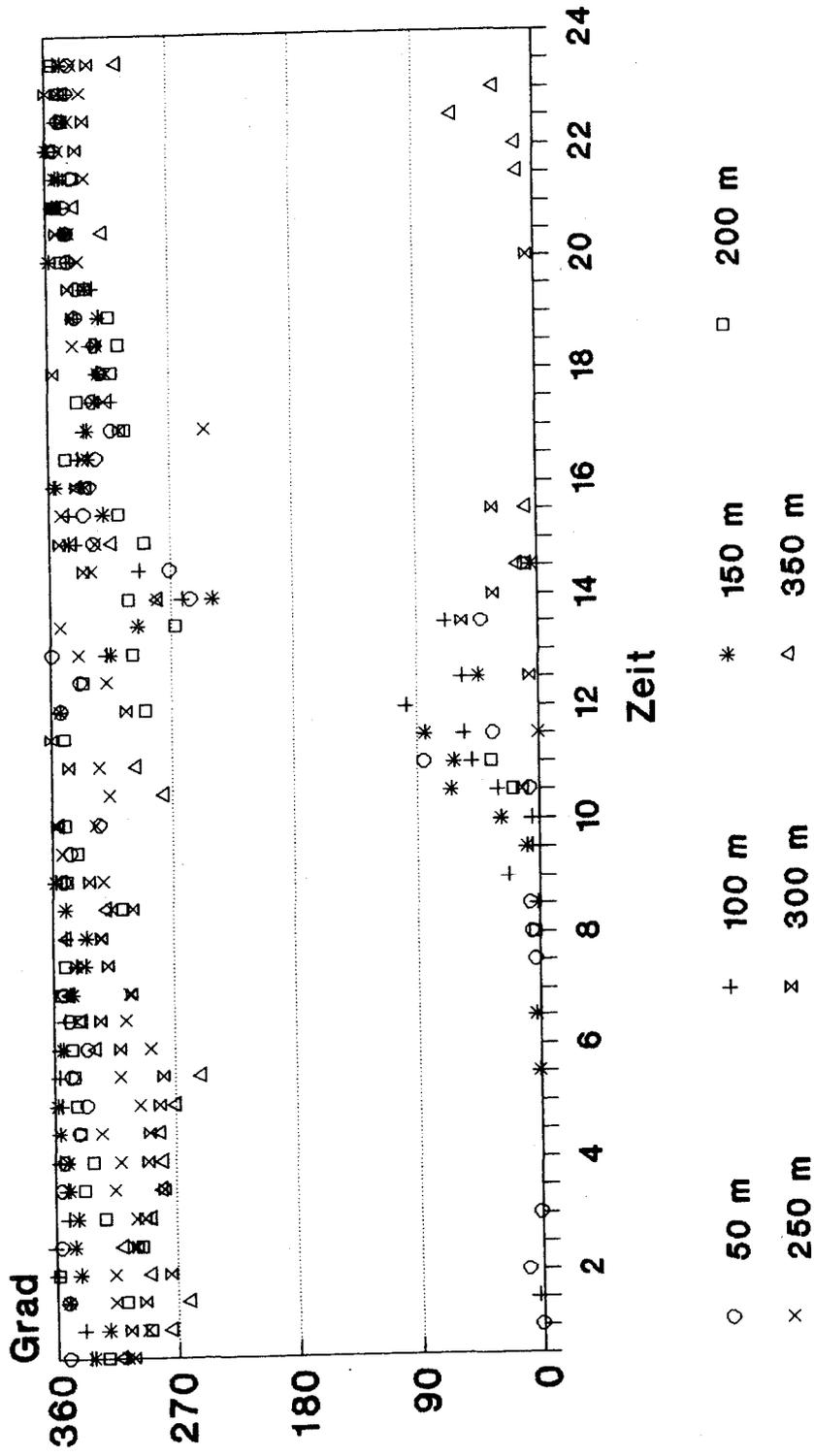


Abb. 17

Graz Süd
Windrichtung, Mittlerer Tagesgang
14.12. 1989 - 4.4. 1990

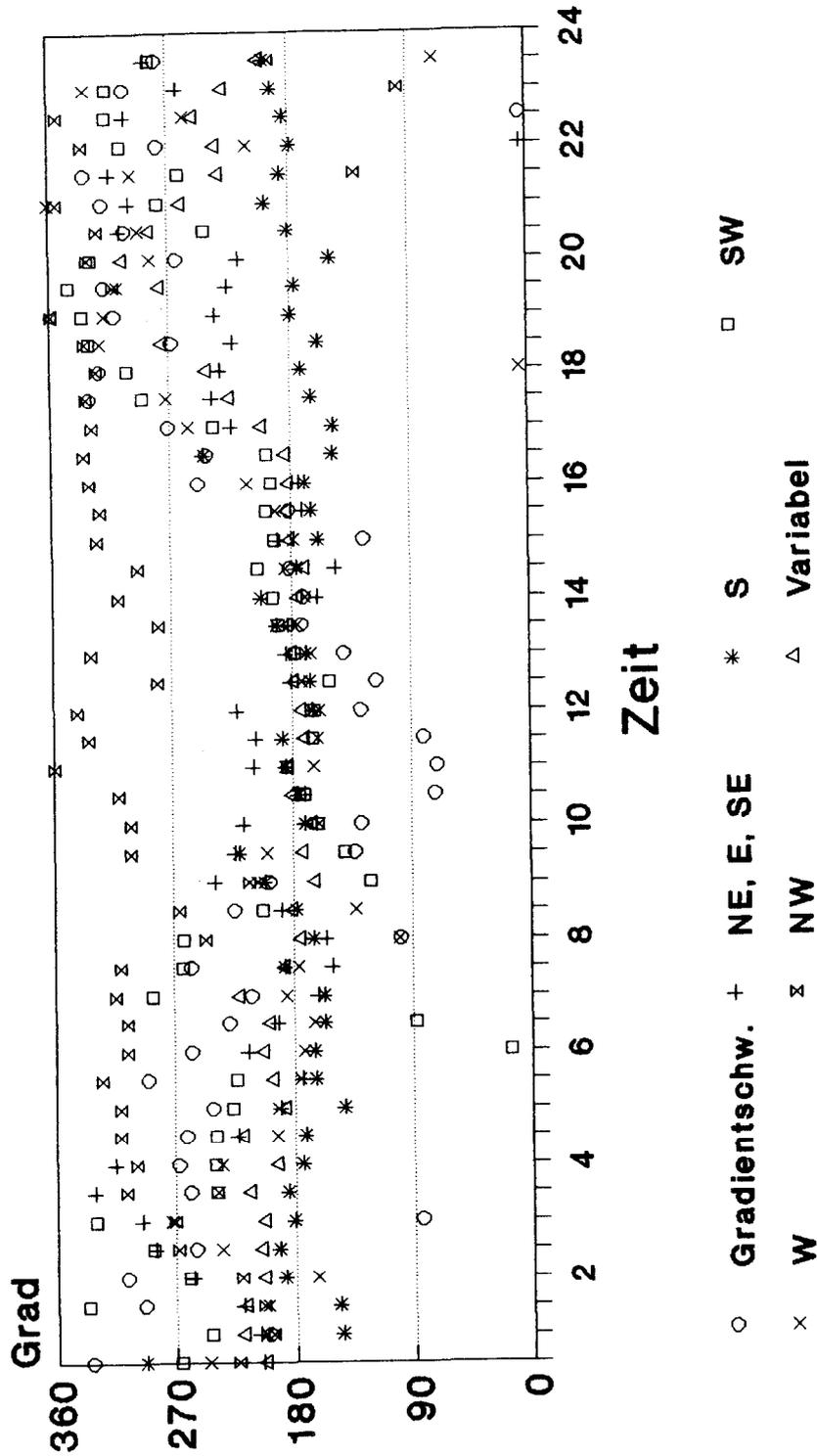


Abb. 18

Graz SODAR
Windgeschwindigkeit, Mittlerer Tagesgang
14.12. 1989 - 4.4. 1990

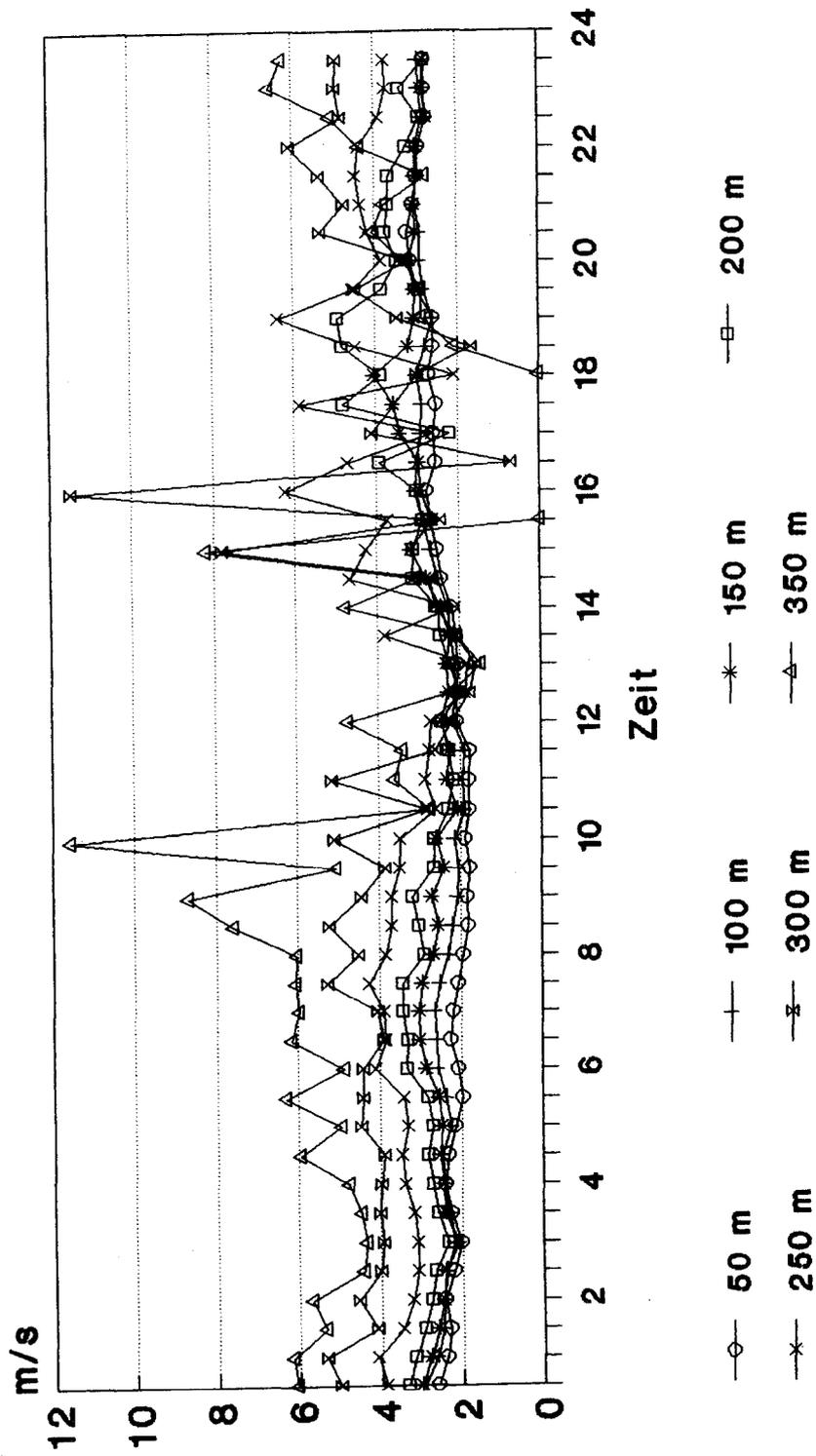


Abb. 19

Graz SODAR
Windgeschwindigkeit, Mittl. Tagesgang
Gradientenschwache Lagen

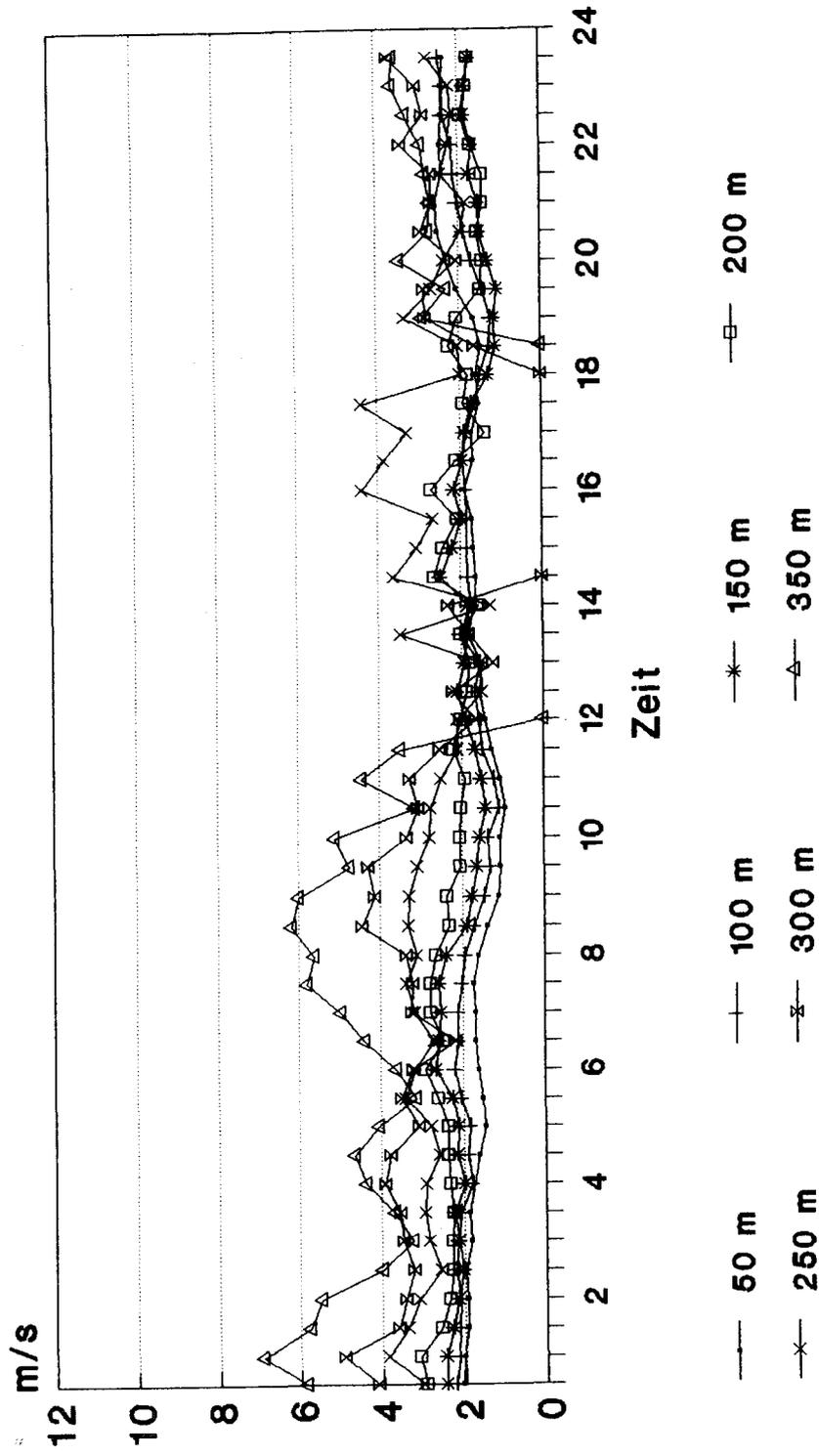


Abb. 20

Graz SODAR
Windgeschwindigkeit, Mittl. Tagesgang
Südwestlagen

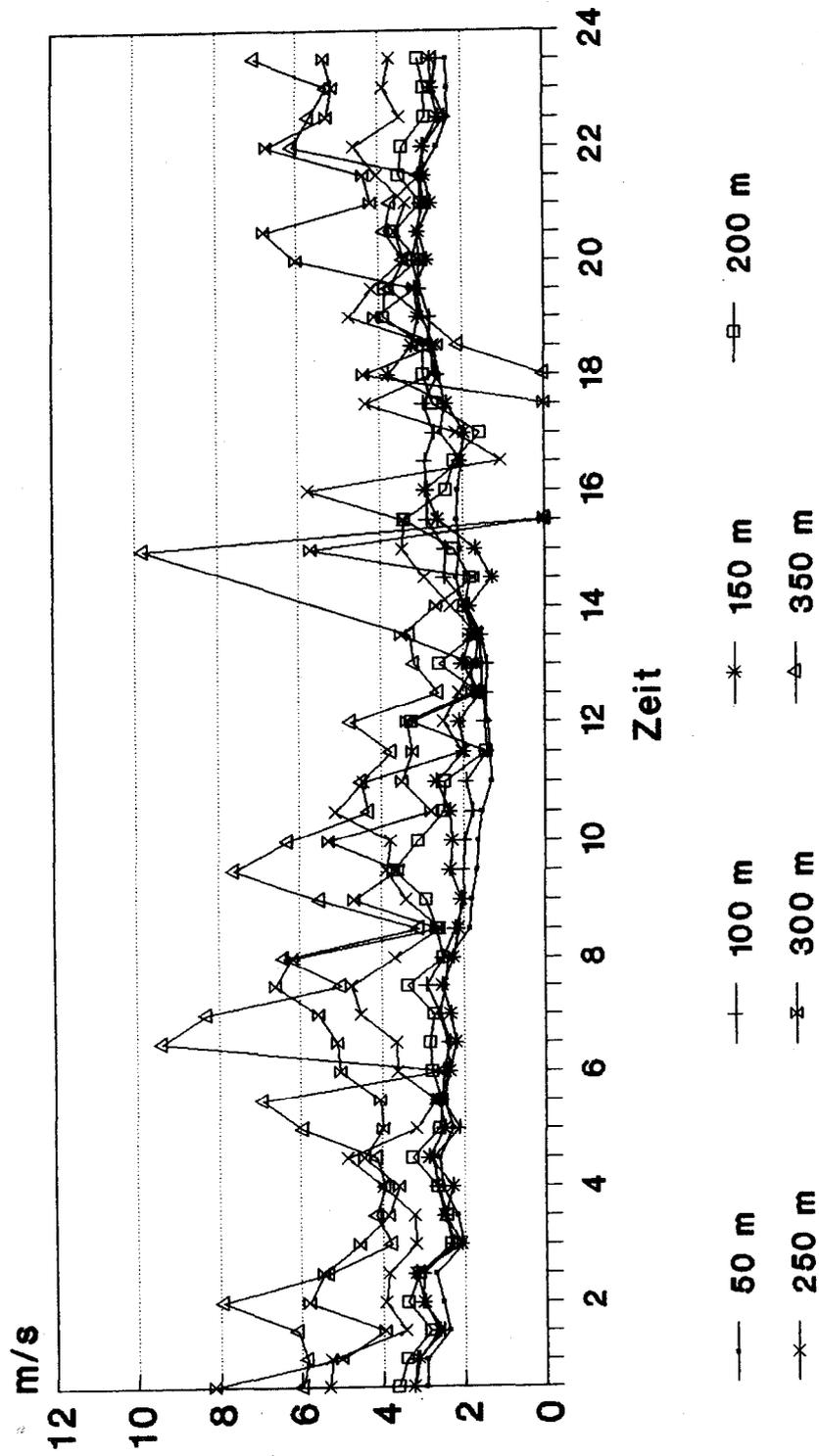


Abb. 21

Graz SODAR
Windgeschwindigkeit, Mittl. Tagesgang
Westlagen

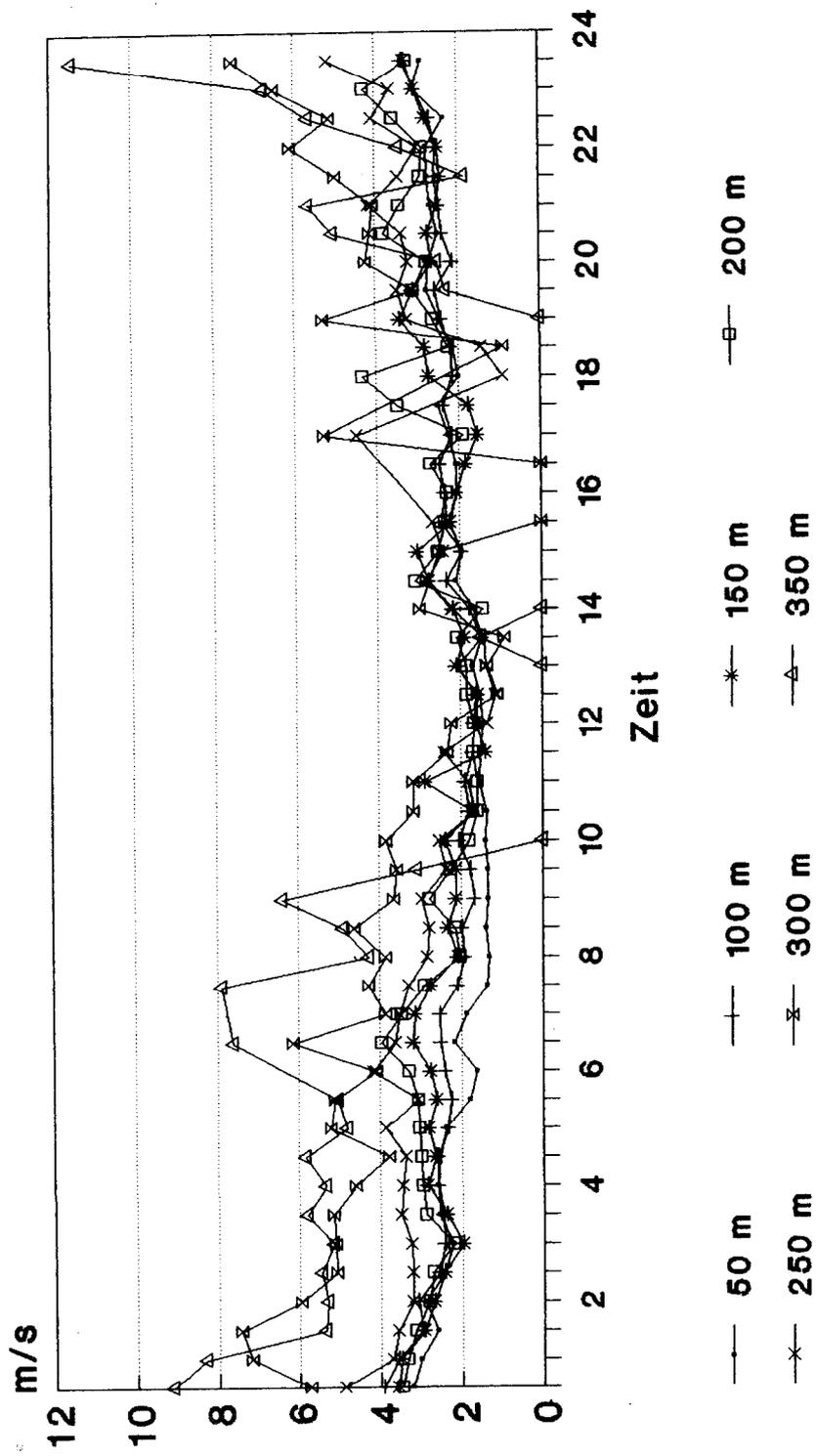


Abb. 22

Graz SODAR
Windgeschwindigkeit, Mittl. Tagesgang
Variable Lagen

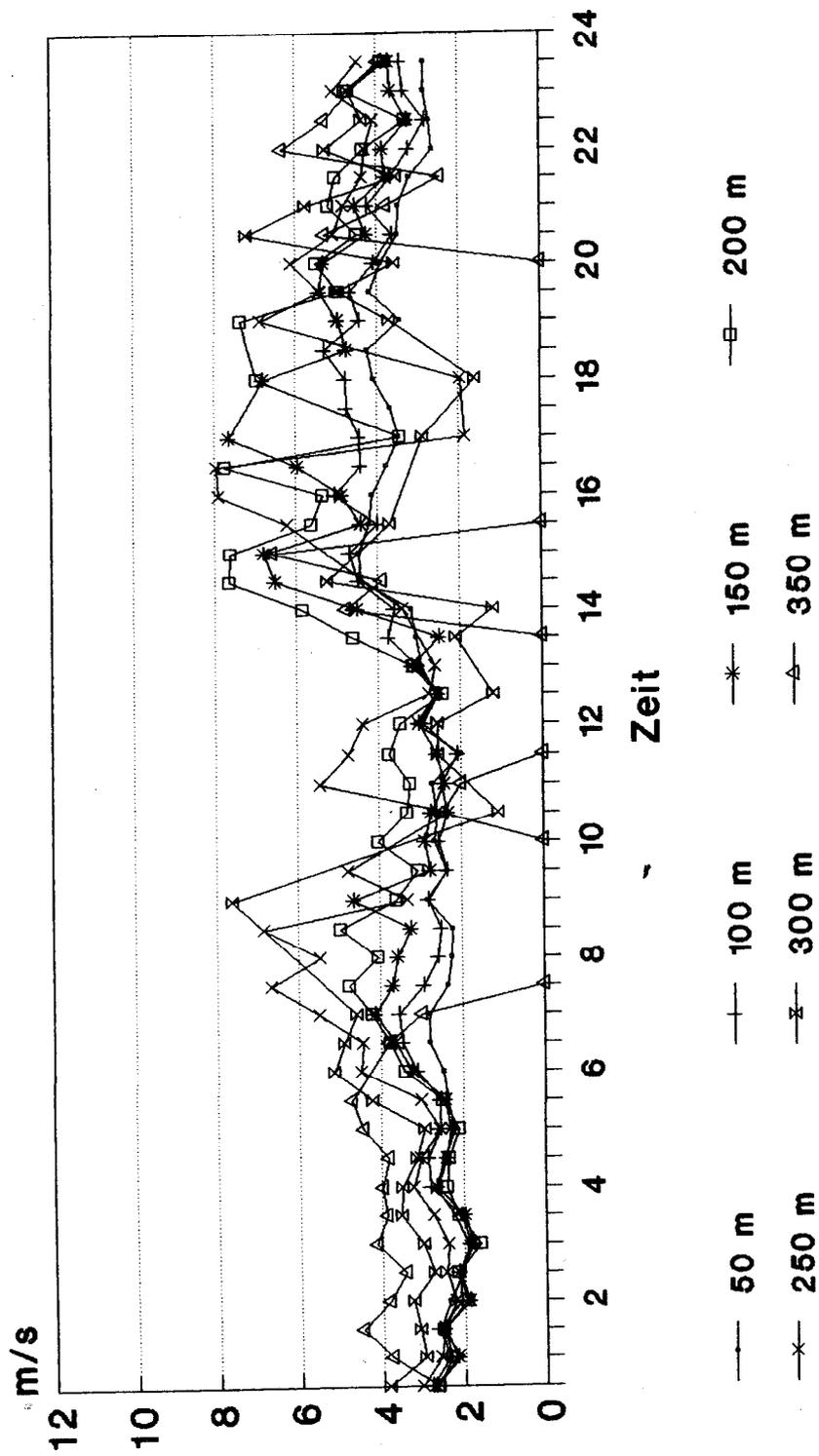


Abb. 23

Graz Süd
 Windgeschwindigkeit, Mittlerer Tagesgang
 14.12. 1989 - 4.4. 1990

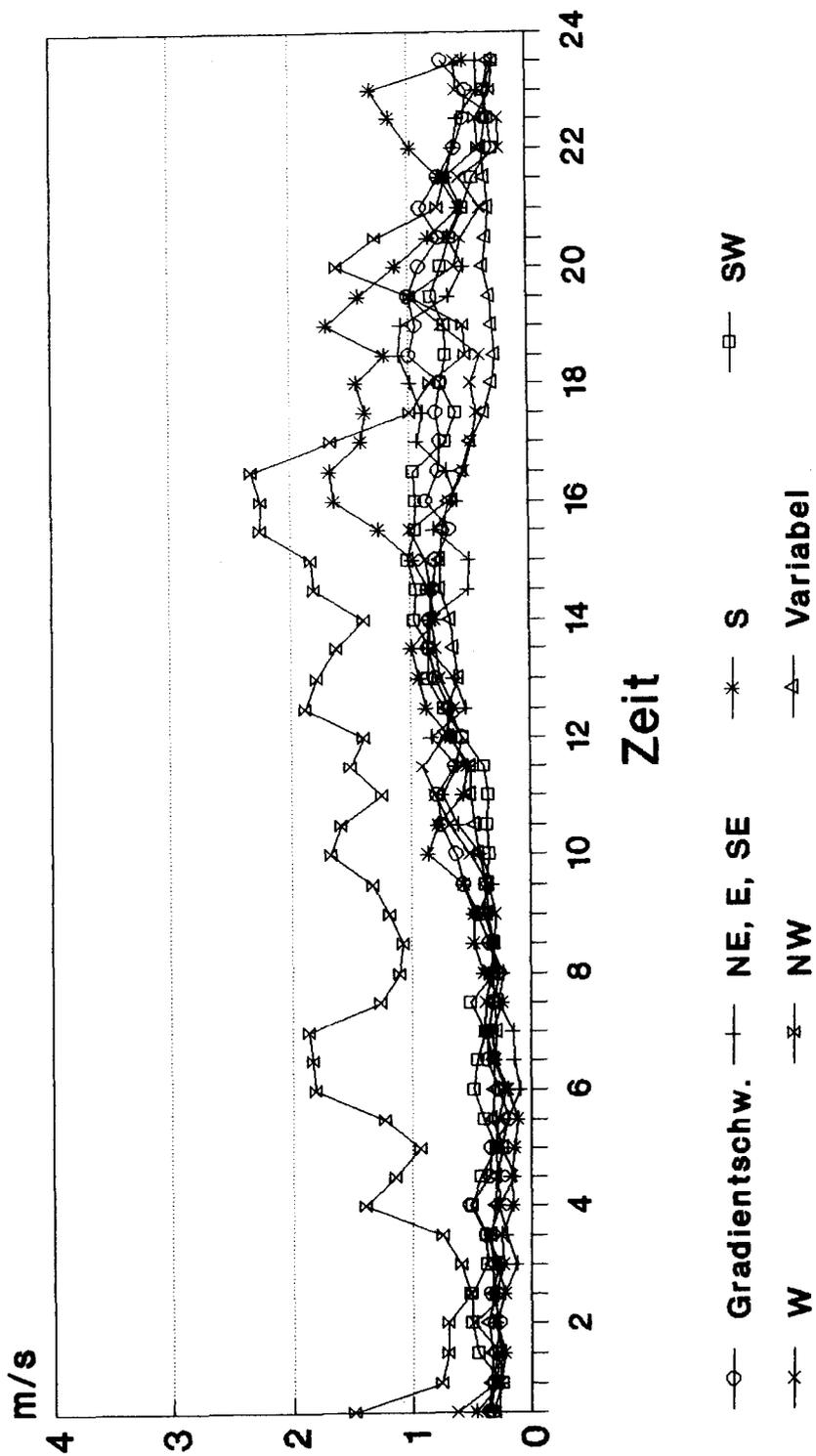
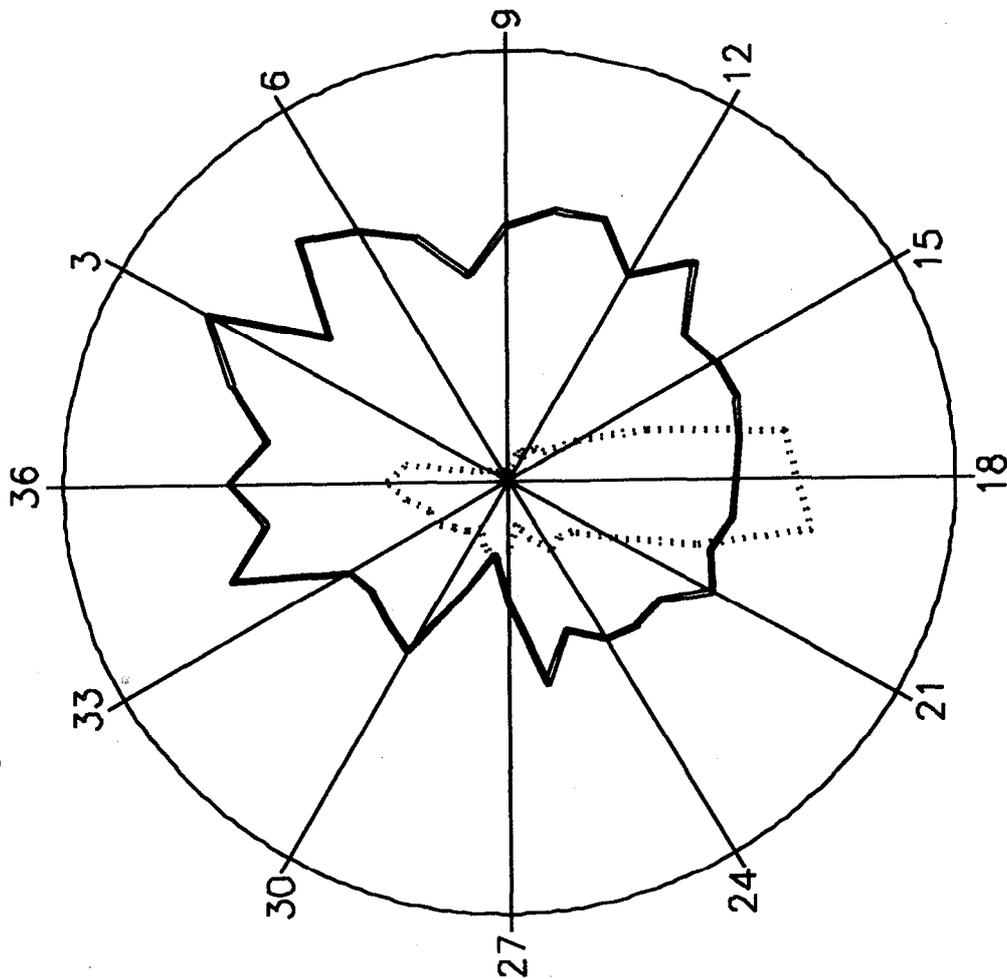


Abb. 24

Graz Sued 14. Dezember 1989 - 4. April 1990

HMW: Schwefeldioxid [mg/m³]
Windrichtung 10 m



..... Windrichtungshoefueigkeit 5 %
 — Messkomponente 0.05 [mg/m³]
 Radius entspricht: 0.05 [mg/m³]

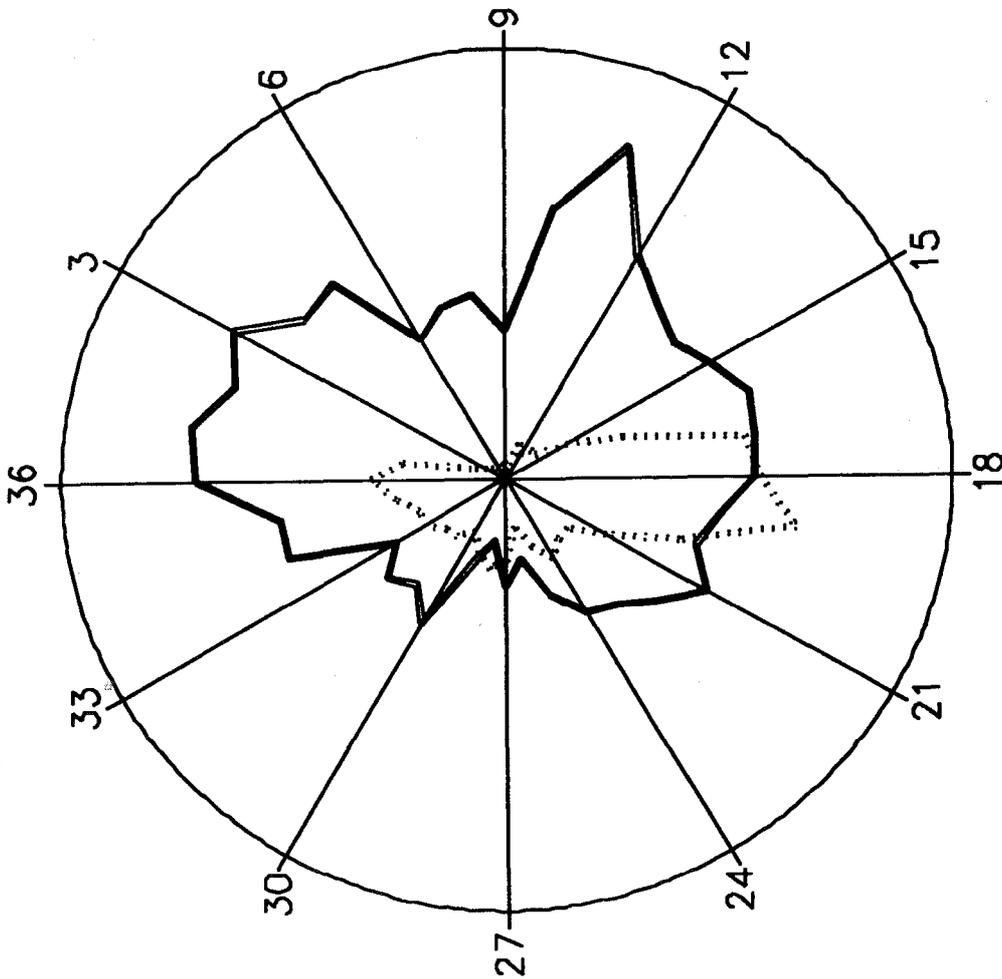
Klasse	Anz.Werte	%	mittl.Konz.
0	2461	66.7	0.0448
1	43	1.2	0.0275
2	12	0.3	0.0331
3	9	0.2	0.0389
4	6	0.2	0.0260
5	5	0.1	0.0366
6	2	0.1	0.0335
7	3	0.1	0.0300
8	6	0.2	0.0242
9	4	0.1	0.0295
10	7	0.2	0.0316
11	14	0.4	0.0321
12	12	0.3	0.0272
13	18	0.5	0.0327
14	19	0.5	0.0258
15	34	0.9	0.0269
16	62	1.7	0.0272
17	116	3.1	0.0262
18	119	3.2	0.0255
19	127	3.4	0.0254
20	82	2.2	0.0240
21	49	1.3	0.0264
22	34	0.9	0.0220
23	32	0.9	0.0222
24	34	0.9	0.0216
25	26	0.7	0.0186
26	19	0.5	0.0242
27	30	0.8	0.0142
28	34	0.9	0.0086
29	29	0.8	0.0132
30	23	0.6	0.0229
31	27	0.7	0.0214
32	30	0.8	0.0200
33	35	0.9	0.0209
34	35	0.9	0.0333
35	43	1.2	0.0277
36	50	1.4	0.0315

Windstille (< 0.5 m/s): 2461 Werte (66.7%)
 Ausfall oder nicht gemessen: 1685 Werte

Abb. 25: SO₂-Konzentrations-Windrose.
 Wind: Graz Süd, SO₂: Graz Süd

Graz Sued 14. Dezember 1989 - 4. April 1990

HMW: Schwefeldioxid [mg/m³]
Windrichtung 10 m



..... Windrichtungshaeufigkeit 5 %
 — Messkomponente 0.05 [mg/m³]
 Radius entspricht: 0.05 [mg/m³]

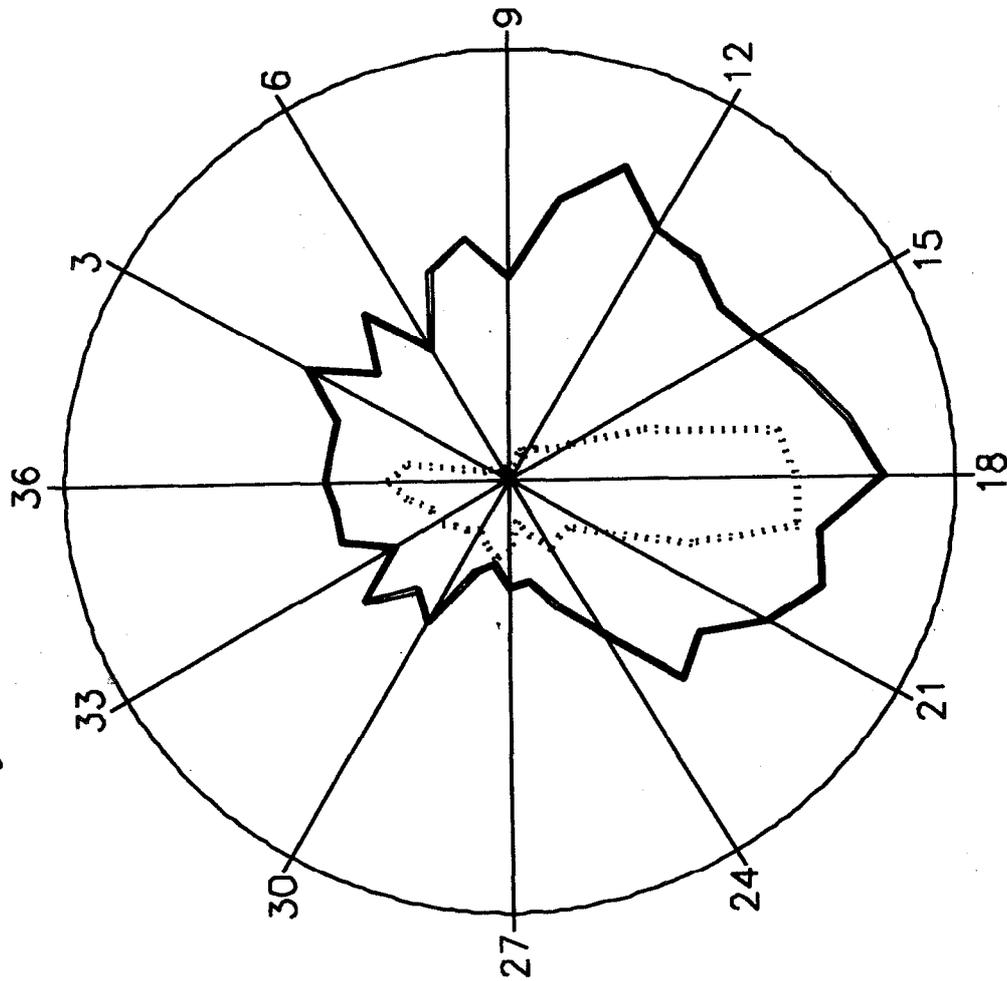
Klasse	Anz.Werte	%	mittl. Konz.
0	2129	66.8	0.0486
1	37	1.2	0.0360
2	11	0.3	0.0324
3	8	0.3	0.0354
4	6	0.2	0.0295
5	5	0.2	0.0302
6	2	0.1	0.0190
7	3	0.1	0.0213
8	6	0.2	0.0220
9	4	0.1	0.0175
10	6	0.2	0.0322
11	14	0.4	0.0411
12	11	0.3	0.0300
13	14	0.4	0.0267
14	14	0.4	0.0248
15	25	0.8	0.0267
16	45	1.4	0.0292
17	87	2.7	0.0284
18	91	2.9	0.0280
19	105	3.3	0.0244
20	66	2.1	0.0226
21	41	1.3	0.0261
22	28	0.9	0.0220
23	29	0.9	0.0191
24	33	1.0	0.0179
25	26	0.8	0.0141
26	18	0.6	0.0093
27	30	0.9	0.0124
28	33	1.0	0.0072
29	28	0.9	0.0099
30	22	0.7	0.0190
31	27	0.8	0.0155
32	28	0.9	0.0174
33	33	1.0	0.0142
34	33	1.0	0.0259
35	40	1.3	0.0258
36	48	1.5	0.0349

Windstille (< 0.5 m/s): 2129 Werte (66.8%)
 Ausfall oder nicht gemessen: 2190 Werte

Abb. 26: SO₂-Konzentrations-Windrose.
 Wind: Graz Süd, SO₂: Graz West

Graz Sued 14. Dezember 1989 - 4. April 1990

HMW: Schwefeldioxid [mg/m³]
Windrichtung 10 m



..... Windrichtungshaeufigkeit 5 %
 — Messkomponente 0.05 [mg/m³]
 Radius entspricht: 5 %

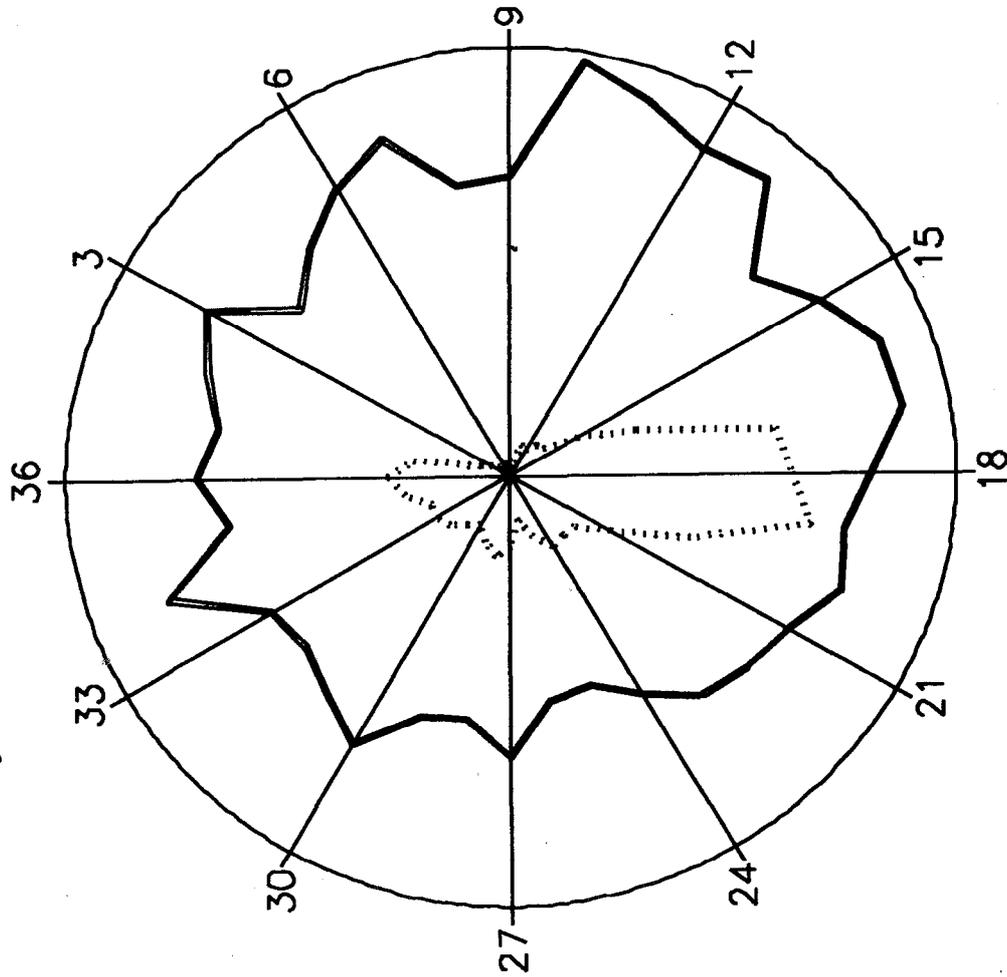
Klasse	Anz.Werte	%	mittl.Konz.
0	2436	67.2	0.0446
1	42	1.2	0.0204
2	11	0.3	0.0206
3	9	0.2	0.0262
4	5	0.1	0.0194
5	5	0.1	0.0254
6	2	0.1	0.0175
7	3	0.1	0.0285
8	6	0.2	0.0235
9	4	0.1	0.0331
10	7	0.2	0.0387
11	14	0.4	0.0387
12	12	0.3	0.0334
13	17	0.5	0.0332
14	20	0.6	0.0310
15	30	0.8	0.0323
16	59	1.6	0.0351
17	111	3.1	0.0387
18	117	3.2	0.0421
19	119	3.3	0.0353
20	79	2.2	0.0372
21	46	1.3	0.0334
22	31	0.9	0.0278
23	31	0.9	0.0303
24	33	0.9	0.0207
25	25	0.7	0.0157
26	18	0.5	0.0120
27	30	0.8	0.0125
28	33	0.9	0.0098
29	28	0.8	0.0111
30	24	0.7	0.0189
31	27	0.7	0.0184
32	29	0.8	0.0216
33	35	1.0	0.0150
34	34	0.9	0.0202
35	43	1.2	0.0199
36	50	1.4	0.0209

Windstille (< 0.5 m/s): 2436 Werte (67.2%)
 Ausfall oder nicht gemessen: 1751 Werte

Abb. 27: SO₂-Konzentrations-Windrose.
 Wind: Graz Süd, SO₂: Graz Nord

Graz Sued 14. Dezember 1989 - 4. April 1990

HMW: Schwefeldioxid [mg/m³]
Windrichtung 10 m



Radius entspricht:
Windrichtungshaeufigkeit 5 %
Messkomponente 0.05 [mg/m³]

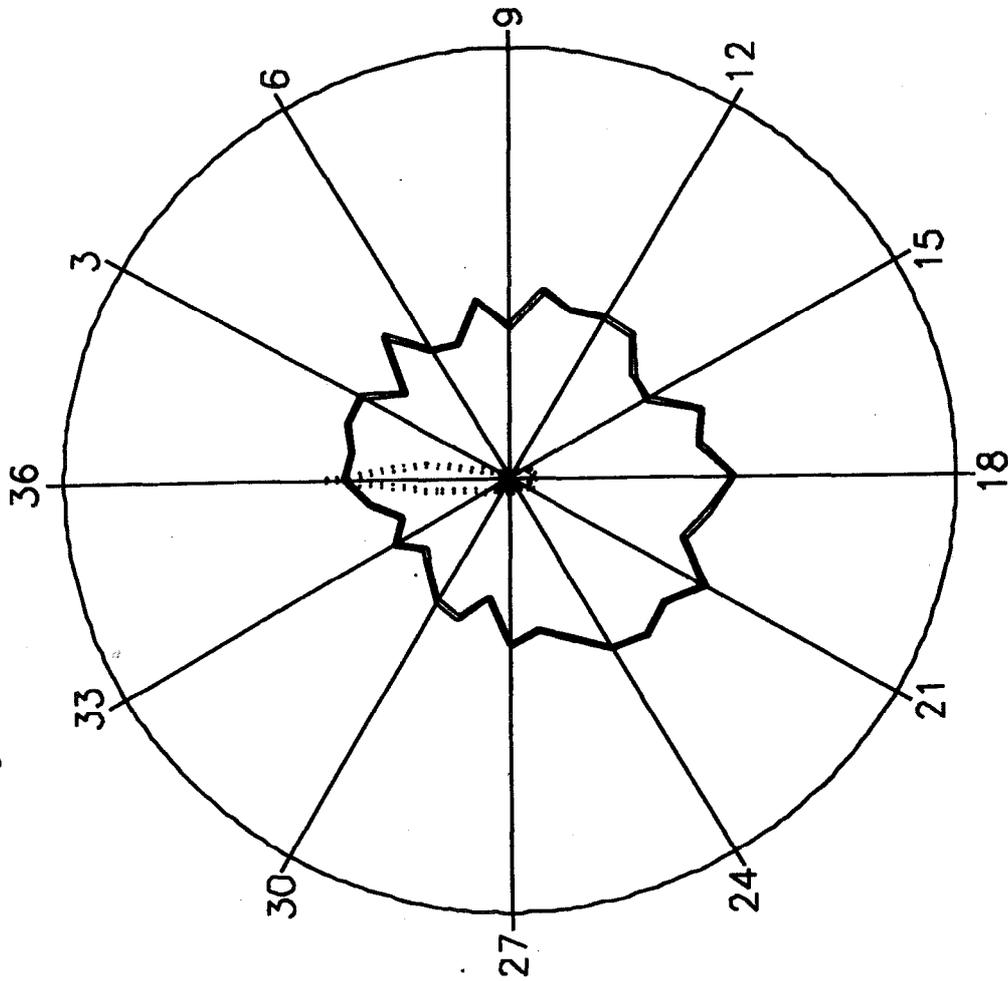
Klasse	Anz.Werte	%	mittl.Konz.
0	2425	66.9	0.0539
1	40	1.1	0.0334
2	12	0.3	0.0362
3	9	0.2	0.0393
4	6	0.2	0.0308
5	5	0.1	0.0350
6	1	0.0	0.0390
7	3	0.1	0.0420
8	6	0.2	0.0345
9	4	0.1	0.0350
10	6	0.2	0.0488
11	14	0.4	0.0464
12	13	0.4	0.0438
13	17	0.5	0.0450
14	18	0.5	0.0357
15	32	0.9	0.0403
16	55	1.5	0.0444
17	110	3.0	0.0448
18	115	3.2	0.0406
19	124	3.4	0.0380
20	78	2.2	0.0395
21	47	1.3	0.0380
22	34	0.9	0.0348
23	33	0.9	0.0335
24	34	0.9	0.0293
25	27	0.7	0.0260
26	19	0.5	0.0264
27	30	0.8	0.0327
28	34	0.9	0.0286
29	29	0.8	0.0296
30	24	0.7	0.0357
31	27	0.7	0.0324
32	32	0.9	0.0302
33	35	1.0	0.0310
34	34	0.9	0.0410
35	44	1.2	0.0321
36	50	1.4	0.0354

Windstille (< 0.5 m/s): 2425 Werte (66.9%)
Ausfall oder nicht gemessen: 1750 Werte

Abb. 28: SO₂-Konzentrations-Windrose.
Wind: Graz Süd, SO₂: Graz Mitte

GRAZ Reininghaus SODAR 14. Dezember 1989 - 4. April 1990

HMW: Schwefeldioxid [mg/m³]
Windrichtung 50 m



Radius entspricht:
Windrichtungshoefigkeit 50 %
Messkomponente 0.1 [mg/m³]

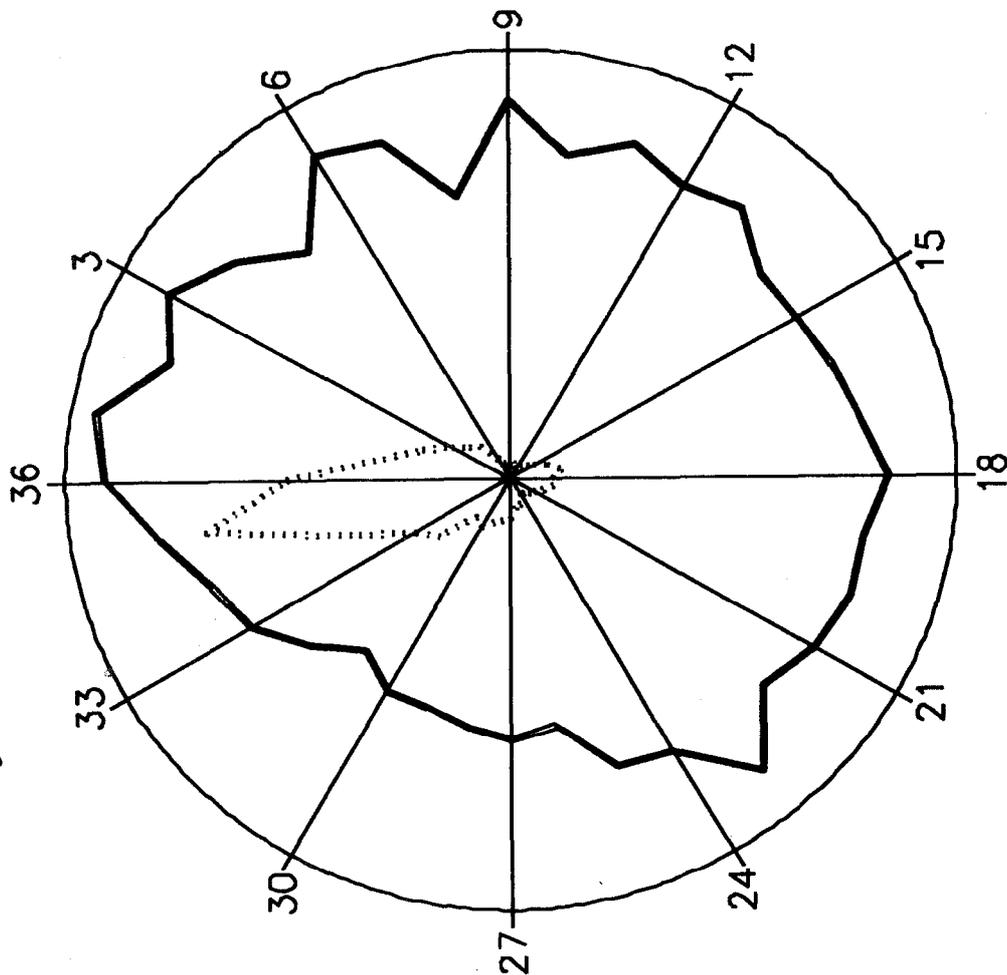
Klasse	Anz.Werte	%	mittl.Konz.
0	318	9.3	0.061
1	325	9.5	0.036
2	77	2.2	0.039
3	44	1.3	0.038
4	34	1.0	0.031
5	8	0.2	0.043
6	16	0.5	0.035
7	17	0.5	0.033
8	11	0.3	0.042
9	12	0.3	0.035
10	17	0.5	0.044
11	26	0.8	0.041
12	24	0.7	0.043
13	32	0.9	0.043
14	39	1.1	0.036
15	72	2.1	0.036
16	82	2.4	0.046
17	90	2.6	0.043
18	100	2.9	0.050
19	75	2.2	0.045
20	93	2.7	0.041
21	84	2.4	0.051
22	59	1.7	0.045
23	37	1.1	0.048
24	48	1.4	0.045
25	61	1.8	0.039
26	43	1.3	0.036
27	63	1.8	0.038
28	55	1.6	0.028
29	59	1.7	0.034
30	47	1.4	0.033
31	63	1.8	0.028
32	70	2.0	0.025
33	107	3.1	0.030
34	136	4.0	0.026
35	283	8.2	0.032
36	707	20.6	0.037

Windstille (< 0.5 m/s): 318 Werte (9.3%)
Ausfall oder nicht gemessen: 1942 Werte

Abb. 29: SO₂-Konzentrations-Windrose
Wind: SODAR 50 m, SO₂: Graz Nord

GRAZ Reininghaus SODAR 14. Dezember 1989 - 4. April 1990

HMW: Schwefeldioxid [mg/m³]
Windrichtung 150 m



..... Windrichtungshäufigkeit 20 %
 — Messkomponente 0.05 [mg/m³]
 Radius entspricht:
 Windrichtungshäufigkeit 20 %

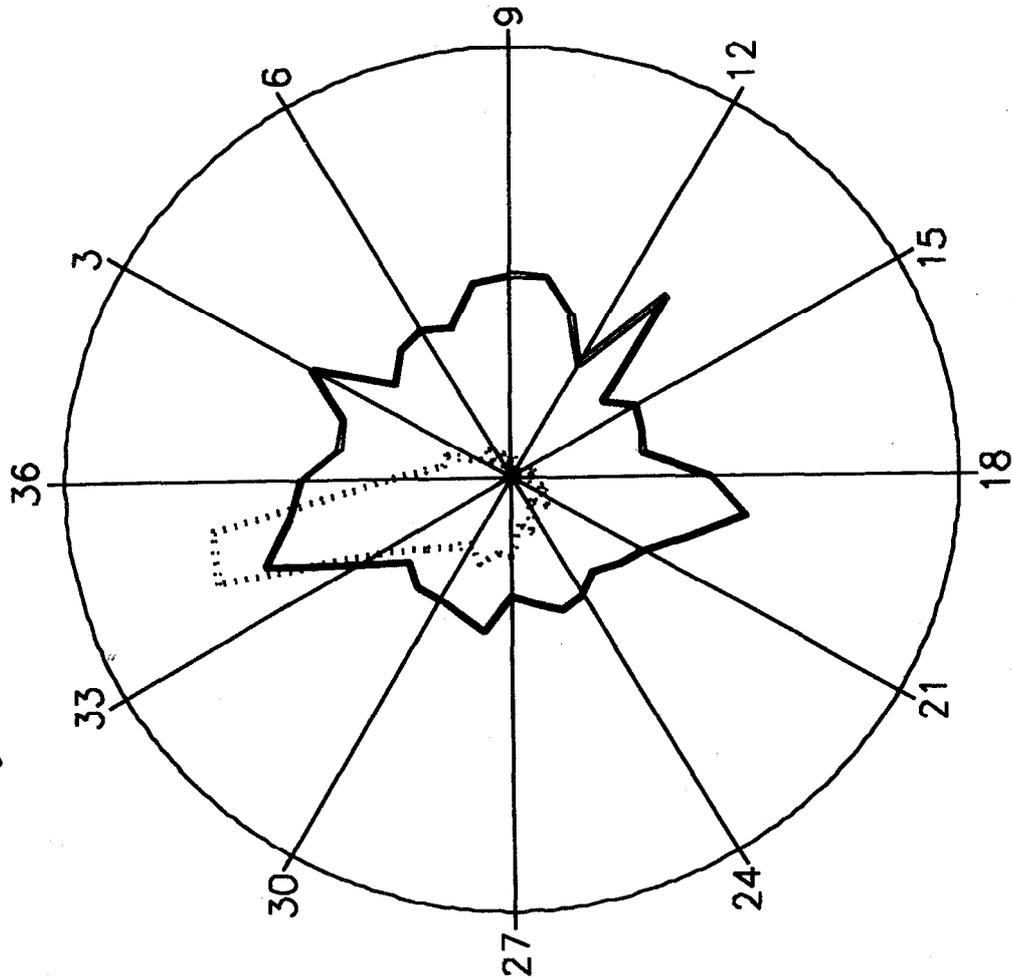
Klasse	Anz.Werte	%	mittl.Konz.
0	196	6.4	0.0583
1	177	5.7	0.0472
2	128	4.2	0.0406
3	92	3.0	0.0442
4	72	2.3	0.0400
5	62	2.0	0.0348
6	34	1.1	0.0437
7	25	0.8	0.0418
8	22	0.7	0.0335
9	17	0.6	0.0440
10	25	0.8	0.0381
11	19	0.6	0.0414
12	16	0.5	0.0392
13	22	0.7	0.0407
14	31	1.0	0.0367
15	38	1.2	0.0372
16	56	1.8	0.0384
17	72	2.3	0.0399
18	59	1.9	0.0425
19	61	2.0	0.0402
20	49	1.6	0.0405
21	40	1.3	0.0393
22	35	1.1	0.0371
23	29	0.9	0.0442
24	28	0.9	0.0364
25	40	1.3	0.0355
26	43	1.4	0.0289
27	58	1.9	0.0301
28	63	2.0	0.0290
29	68	2.2	0.0278
30	79	2.6	0.0280
31	72	2.3	0.0256
32	128	4.2	0.0296
33	152	4.9	0.0337
34	235	7.6	0.0358
35	428	13.9	0.0400
36	309	10.0	0.0454

Windstille (< 0.5 m/s): 196 Werte (6.4%)
 Ausfall oder nicht gemessen: 2296 Werte

Abb. 30: SO₂-Konzentrations-Windrose
 Wind: SODAR 150 m, SO₂: Graz Nord

GRAZ Reininghaus SODAR 14. Dezember 1989 – 4. April 1990

HMW: Schwefeldioxid [mg/m³]
Windrichtung 250 m



Radius entspricht:

..... Windrichtungshäufigkeit 20 %

— Messkomponente

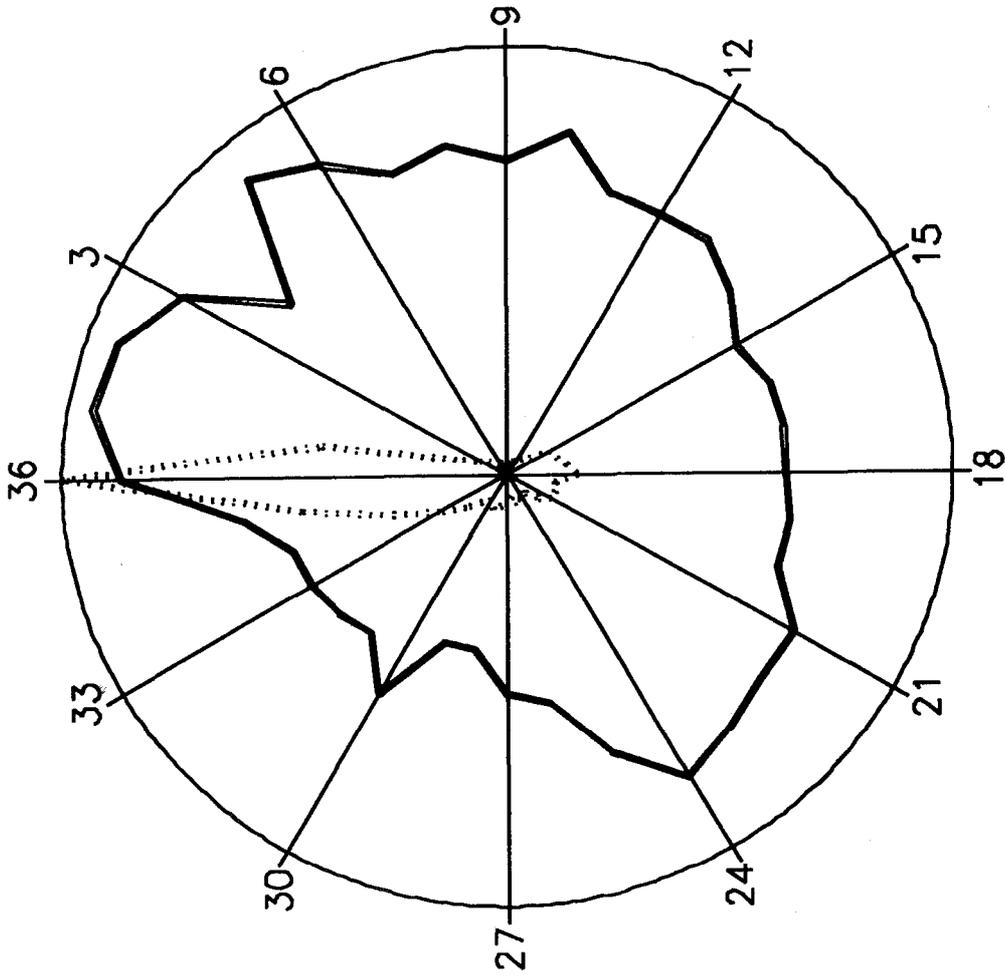
Windstille (< 0.5 m/s): 40 Werte (2.6%)
Ausfall oder nicht gemessen: 3847 Werte

Klasse	Anz.Werte	%	mittl.Konz.
0	40	2.6	0.044
1	47	3.1	0.039
2	46	3.0	0.040
3	24	1.6	0.034
4	17	1.1	0.031
5	29	1.6	0.039
6	9	0.6	0.040
7	18	1.2	0.037
8	13	0.9	0.046
9	12	0.8	0.047
10	14	0.9	0.047
11	8	0.5	0.040
12	6	0.4	0.030
13	8	0.5	0.055
14	2	0.1	0.027
15	6	0.4	0.033
16	16	1.0	0.031
17	14	0.9	0.030
18	14	0.9	0.045
19	13	0.9	0.053
20	24	1.6	0.042
21	24	1.6	0.034
22	31	2.0	0.031
23	21	1.4	0.028
24	24	1.6	0.032
25	42	2.7	0.033
26	34	2.2	0.030
27	56	3.7	0.028
28	54	3.5	0.036
29	65	4.3	0.034
30	54	3.5	0.032
31	64	4.2	0.033
32	77	5.0	0.030
33	106	6.9	0.040
34	214	14.0	0.058
35	207	13.5	0.050
36	81	5.3	0.047

Abb. 31: SO₂-Konzentrations-Windrose
Wind: SODAR 250 m, SO₂: Graz Nord

GRAZ Reininghaus SODAR 14. Dezember 1989 – 4. April 1990

HMW: Schwefeldioxid [mg/m³]
Windrichtung 50 m



..... Windrichtungshäufigkeit 20 %
 — Messkomponente
 Radius entspricht:
 0.05 [mg/m³]

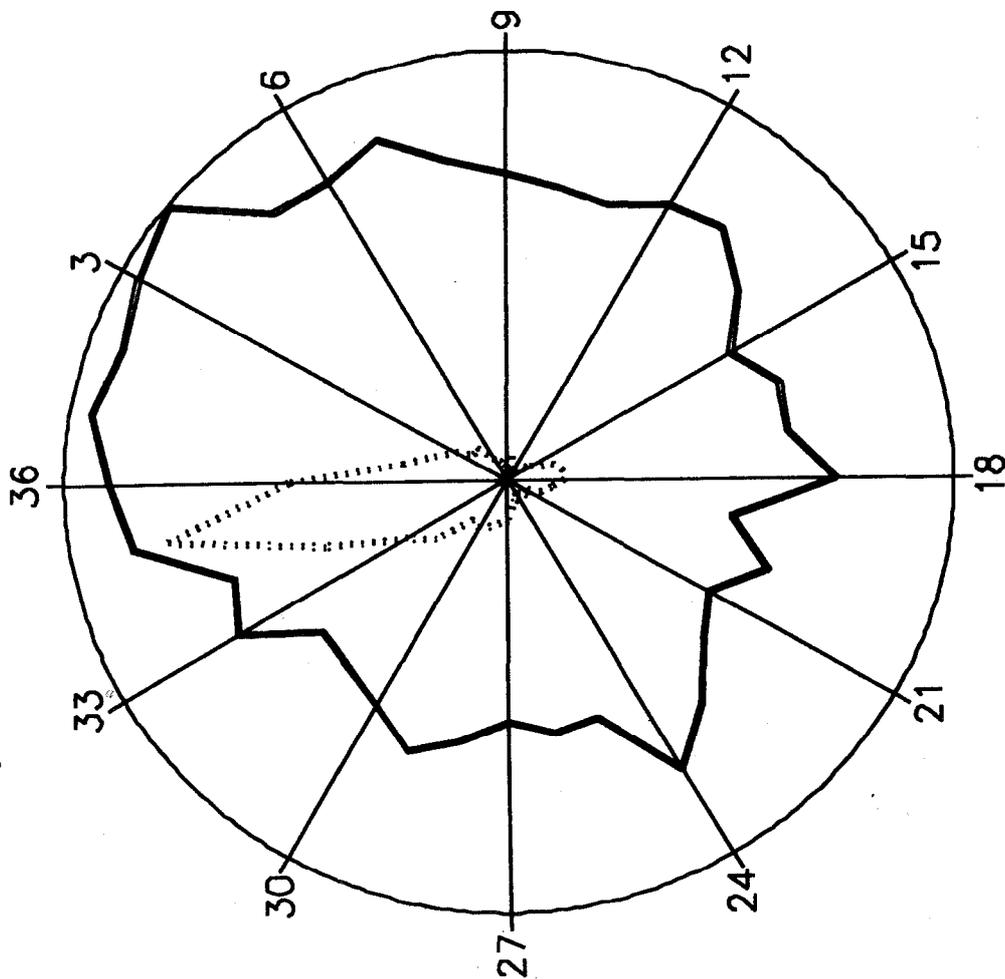
Klasse	Anz.Werte	%	mittl. Konz.
0	352	8.0	0.0579
1	370	8.4	0.0472
2	90	2.0	0.0466
3	59	1.3	0.0422
4	46	1.0	0.0315
5	20	0.5	0.0452
6	25	0.6	0.0418
7	25	0.6	0.0374
8	25	0.6	0.0388
9	23	0.5	0.0364
10	25	0.6	0.0404
11	36	0.8	0.0345
12	31	0.7	0.0346
13	41	0.9	0.0351
14	57	1.3	0.0328
15	97	2.2	0.0296
16	104	2.4	0.0312
17	120	2.7	0.0315
18	137	3.1	0.0313
19	97	2.2	0.0321
20	100	2.3	0.0323
21	99	2.3	0.0371
22	75	1.7	0.0371
23	45	1.0	0.0385
24	54	1.2	0.0405
25	62	1.4	0.0342
26	49	1.1	0.0268
27	63	1.4	0.0255
28	65	1.5	0.0207
29	75	1.7	0.0208
30	63	1.4	0.0290
31	76	1.7	0.0239
32	105	2.4	0.0249
33	154	3.5	0.0255
34	240	5.5	0.0256
35	415	9.4	0.0302
36	879	20.0	0.0435

Windstille (< 0.5 m/s): 352 Werte (8.0%)
 Ausfall oder nicht gemessen: 976 Werte

Abb. 32: SO₂-Konzentrations-Windrose
 Wind: SODAR 50 m, SO₂: Graz West

GRAZ Reininghaus SODAR 14. Dezember 1989 - 4. April 1990

HMW: Schwefeldioxid [mg/m³]
Windrichtung 150 m



..... Windrichtungshaeufigkeit 20 %
 — Messkomponente 0.05 [mg/m³]
 Radius entspricht:

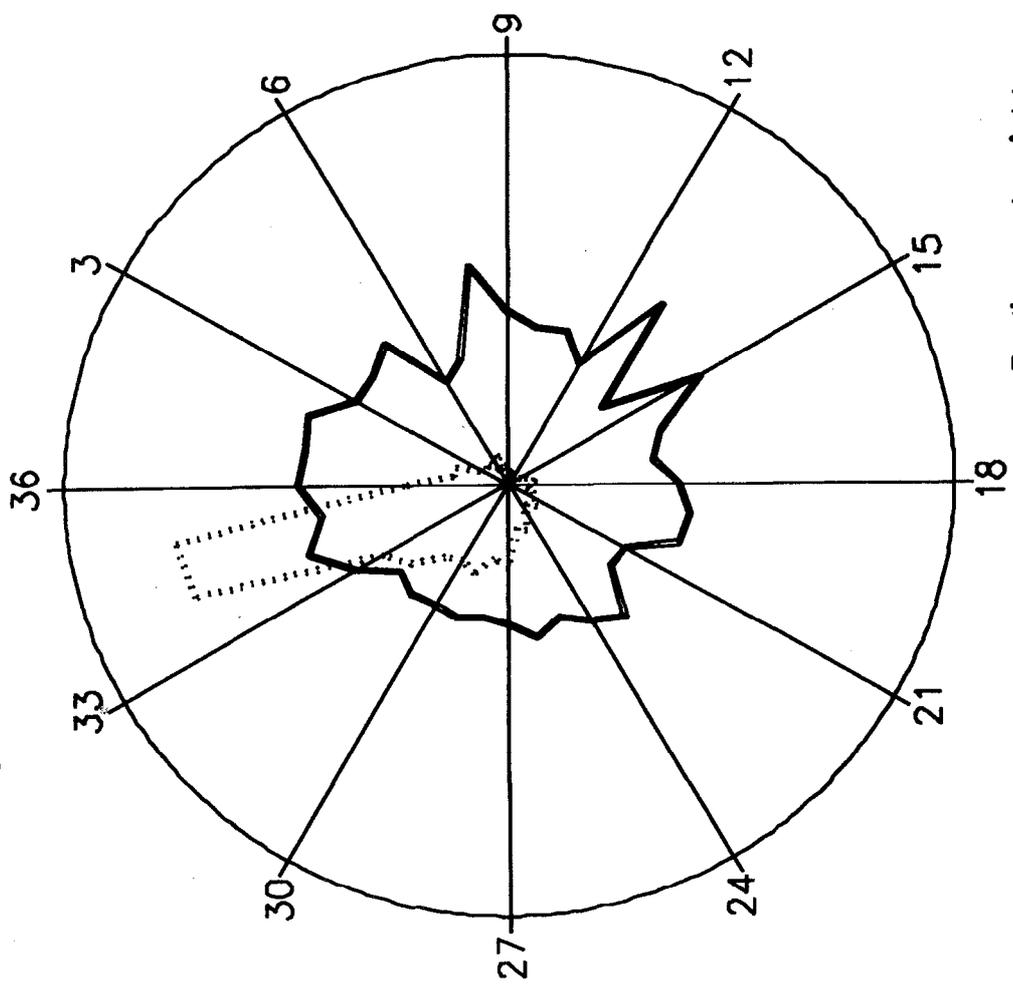
Klasse	Anz.Werte	%	mittl. Konz.
0	214	5.4	0.0455
1	185	4.7	0.0475
2	135	3.4	0.0461
3	102	2.6	0.0479
4	76	1.9	0.0497
5	79	2.0	0.0408
6	45	1.1	0.0402
7	37	0.9	0.0423
8	30	0.8	0.0377
9	27	0.7	0.0357
10	43	1.1	0.0344
11	23	0.6	0.0339
12	22	0.6	0.0367
13	25	0.6	0.0379
14	39	1.0	0.0340
15	48	1.2	0.0291
16	85	2.2	0.0325
17	99	2.5	0.0319
18	100	2.5	0.0369
19	78	2.0	0.0256
20	62	1.6	0.0310
21	39	1.0	0.0260
22	43	1.1	0.0287
23	34	0.9	0.0338
24	30	0.8	0.0388
25	40	1.0	0.0293
26	51	1.3	0.0297
27	74	1.9	0.0279
28	78	2.0	0.0305
29	89	2.3	0.0332
30	100	2.5	0.0298
31	94	2.4	0.0279
32	164	4.2	0.0271
33	206	5.2	0.0351
34	344	8.7	0.0327
35	613	15.6	0.0429
36	383	9.7	0.0449

Windstille (< 0.5 m/s): 214 Werte (5.4%)
 Ausfall oder nicht gemessen: 1440 Werte

Abb. 33: SO₂-Konzentrations-Windrose
 Wind: SODAR 150 m, SO₂: Graz West

GRAZ Reininghaus SODAR 14. Dezember 1989 - 4. April 1990

HMW: Schwefeldioxid [mg/m³]
Windrichtung 250 m



..... Windrichtungshoefigkeit 20 %
 — Messkomponente 0.1 [mg/m³]
 Radius entspricht:

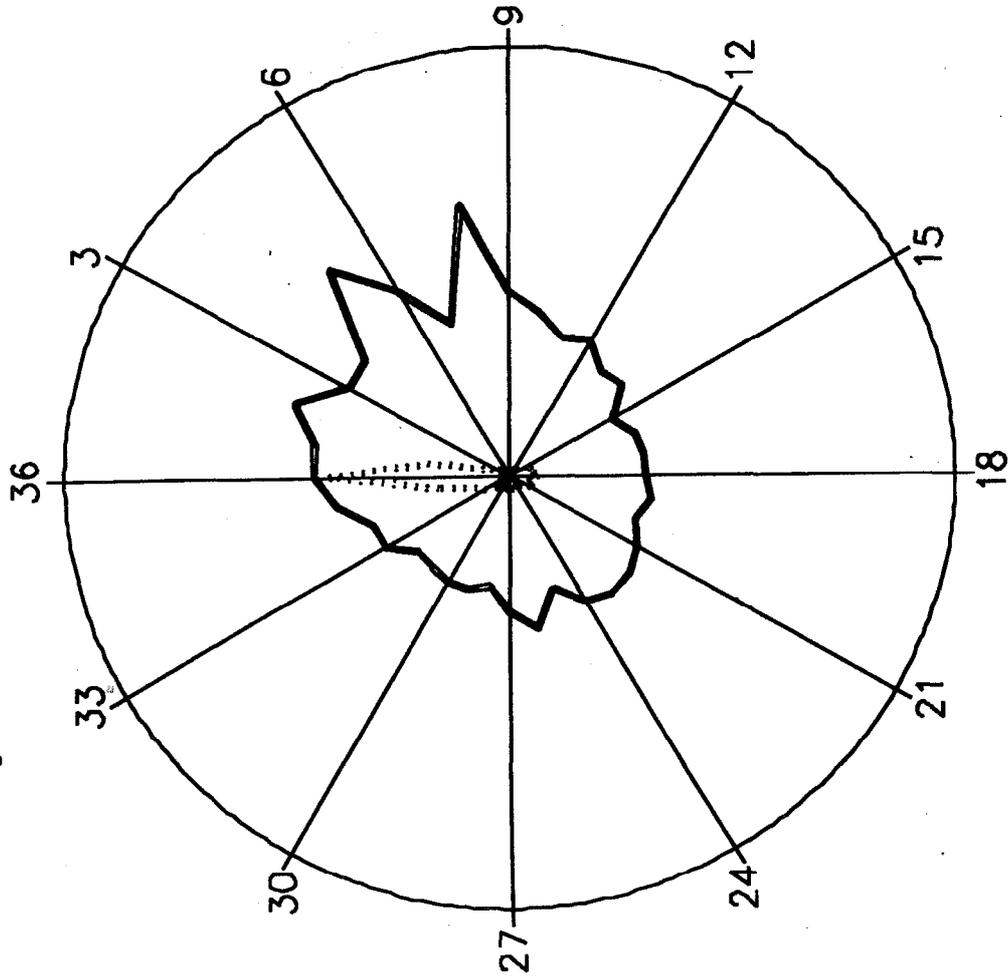
Klasse	Anz.Werte	%	mittl.Konz.
0	40	2.2	0.039
1	45	2.5	0.046
2	45	2.5	0.048
3	24	1.3	0.040
4	23	1.3	0.040
5	24	1.3	0.043
6	15	0.8	0.028
7	27	1.5	0.031
8	15	0.8	0.040
9	11	0.6	0.037
10	11	0.6	0.040
11	12	0.7	0.038
12	7	0.4	0.032
13	2	0.1	0.035
14	4	0.2	0.028
15	10	0.5	0.050
16	15	0.8	0.037
17	22	1.2	0.033
18	18	1.0	0.039
19	17	0.9	0.041
20	21	1.1	0.041
21	26	1.4	0.030
22	30	1.6	0.030
23	23	1.3	0.041
24	28	1.5	0.037
25	42	2.3	0.035
26	39	2.1	0.036
27	71	3.9	0.033
28	65	3.6	0.032
29	81	4.4	0.033
30	75	4.1	0.033
31	81	4.4	0.034
32	104	5.7	0.031
33	119	6.5	0.040
34	275	15.0	0.048
35	278	15.2	0.043
36	83	4.5	0.047

Windstille (< 0.5 m/s): 40 Werte (2.2%)
 Ausfall oder nicht gemessen: 3548 Werte

Abb. 34: SO₂-Konzentrations-Windrose
 Wind: SODAR 250 m, SO₂: Graz West

GRAZ Reininghaus SODAR 14. Dezember 1989 - 4. April 1990

HMW: Schwefeldioxid [mg/m³]
Windrichtung 50 m



..... Windrichtungshaeufigkeit 50 %
 Radius entspricht: 0.1 [mg/m³]
 — Messkomponente

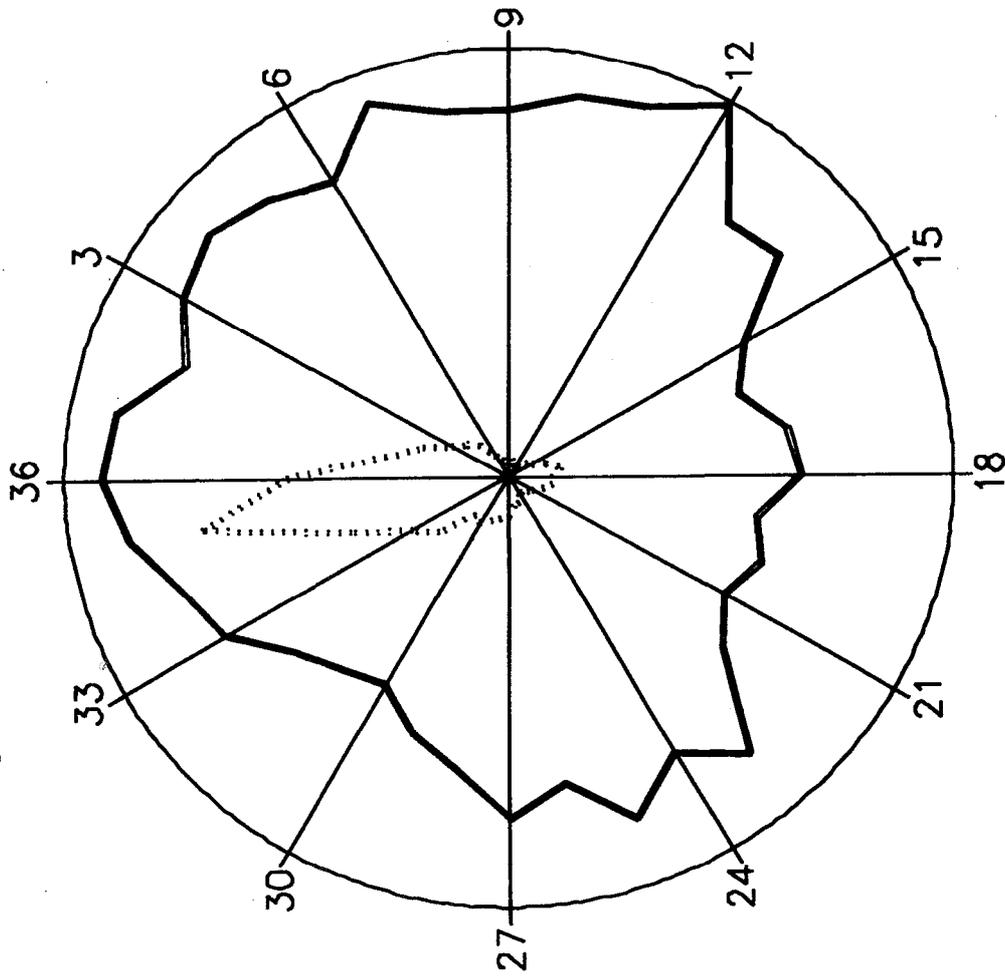
Klasse	Anz.Werte	%	mittl.Konz.
0	320	9.2	0.049
1	327	9.4	0.045
2	76	2.2	0.051
3	45	1.3	0.042
4	36	1.0	0.042
5	8	0.2	0.063
6	16	0.5	0.050
7	17	0.5	0.038
8	12	0.3	0.064
9	12	0.3	0.043
10	17	0.5	0.039
11	26	0.7	0.034
12	27	0.8	0.037
13	30	0.9	0.032
14	39	1.1	0.033
15	76	2.2	0.027
16	85	2.4	0.030
17	93	2.7	0.031
18	108	3.1	0.031
19	78	2.2	0.032
20	93	2.7	0.030
21	88	2.5	0.033
22	60	1.7	0.035
23	39	1.1	0.036
24	48	1.4	0.034
25	62	1.8	0.028
26	45	1.3	0.036
27	63	1.8	0.032
28	55	1.6	0.026
29	64	1.8	0.028
30	49	1.4	0.028
31	63	1.8	0.027
32	70	2.0	0.027
33	107	3.1	0.033
34	140	4.0	0.033
35	286	8.2	0.040
36	709	20.3	0.044

Windstille (< 0.5 m/s): 320 Werte (9.2%)
 Ausfall oder nicht gemessen: 1887 Werte

Abb. 35: SO₂-Konzentrations-Windrose
 Wind: SODAR 50 m, SO₂: Graz Süd

GRAZ Reininghaus SODAR 14. Dezember 1989 - 4. April 1990

HMW: Schwefeldioxid [mg/m³]
Windrichtung 150 m



..... Windrichtungshäufigkeit 20 %
 — Messkomponente 0.05 [mg/m³]
 Radius entspricht: 20 %

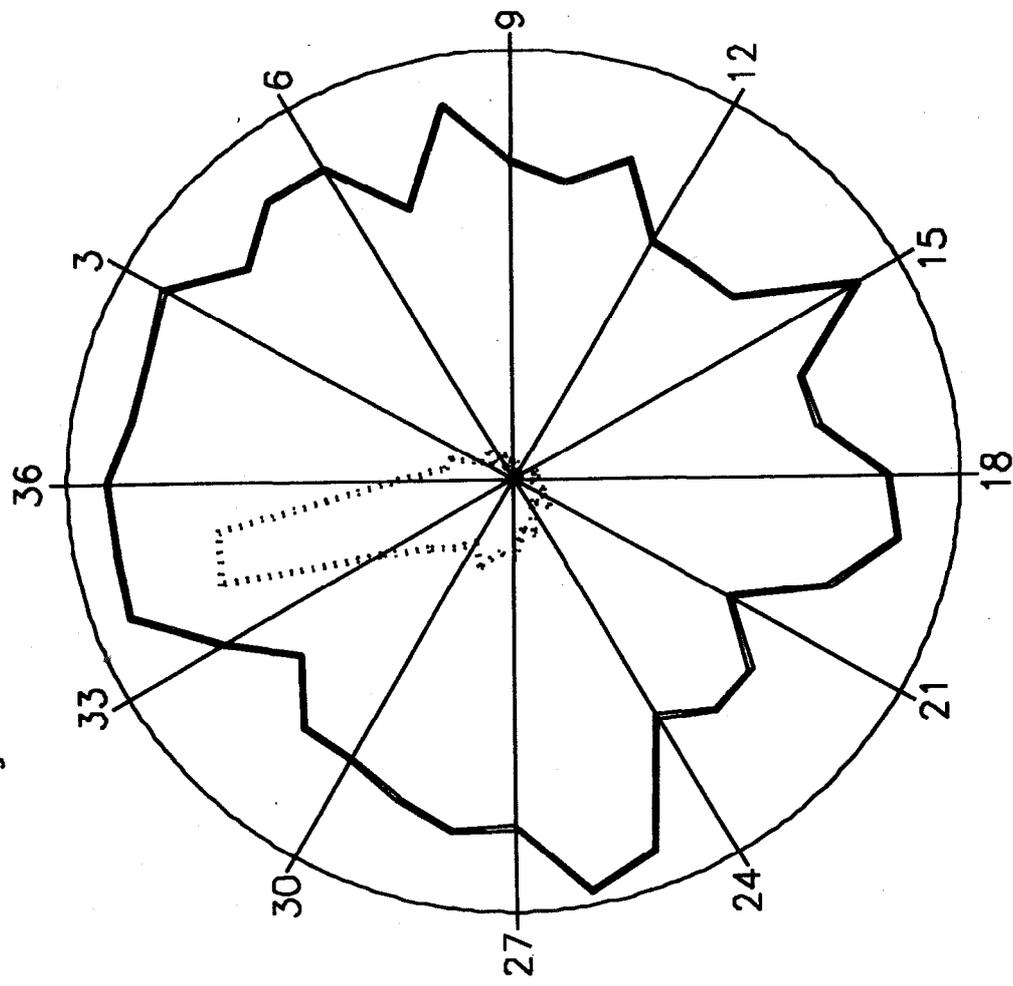
Klasse	Anz.Werte	%	mittl. Konz.
0	201	6.4	0.0405
1	176	5.6	0.0448
2	128	4.1	0.0386
3	91	2.9	0.0422
4	75	2.4	0.0441
5	62	2.0	0.0422
6	35	1.1	0.0397
7	26	0.8	0.0463
8	22	0.7	0.0431
9	18	0.6	0.0426
10	27	0.9	0.0449
11	19	0.6	0.0456
12	17	0.5	0.0496
13	21	0.7	0.0382
14	30	1.0	0.0397
15	38	1.2	0.0306
16	56	1.8	0.0276
17	73	2.3	0.0319
18	63	2.0	0.0330
19	62	2.0	0.0284
20	52	1.7	0.0302
21	40	1.3	0.0280
22	35	1.1	0.0315
23	29	0.9	0.0422
24	31	1.0	0.0372
25	41	1.3	0.0422
26	44	1.4	0.0361
27	60	1.9	0.0396
28	64	2.0	0.0345
29	68	2.2	0.0316
30	79	2.5	0.0279
31	73	2.3	0.0292
32	127	4.1	0.0315
33	158	5.0	0.0369
34	237	7.6	0.0391
35	438	14.0	0.0432
36	313	10.0	0.0457

Windstille (< 0.5 m/s): 201 Werte (6.4%)
 Ausfall oder nicht gemessen: 2247 Werte

Abb. 36: SO₂-Konzentrations-Windrose
 Wind: SODAR 150 m, SO₂: Graz Süd

GRAZ Reininghaus SODAR 14. Dezember 1989 - 4. April 1990

HMW: Schwefeldioxid [mg/m³]
Windrichtung 250 m



Klasse	Anz.Werte	%	mittl.Konz.
0	40	2.6	0.0387
1	48	3.1	0.0433
2	46	3.0	0.0434
3	25	1.6	0.0450
4	19	1.2	0.0385
5	26	1.7	0.0423
6	10	0.6	0.0420
7	19	1.2	0.0333
8	14	0.9	0.0441
9	13	0.8	0.0368
10	13	0.8	0.0349
11	8	0.5	0.0394
12	6	0.4	0.0317
13	8	0.5	0.0318
14	2	0.1	0.0325
15	6	0.4	0.0448
16	16	1.0	0.0343
17	17	1.1	0.0348
18	14	0.9	0.0421
19	13	0.8	0.0437
20	22	1.4	0.0377
21	24	1.5	0.0279
22	31	2.0	0.0347
23	21	1.4	0.0352
24	24	1.5	0.0319
25	43	2.8	0.0458
26	37	2.4	0.0484
27	58	3.7	0.0402
28	54	3.5	0.0411
29	67	4.3	0.0391
30	53	3.4	0.0371
31	64	4.1	0.0370
32	78	5.0	0.0312
33	108	6.9	0.0378
34	217	14.0	0.0459
35	209	13.4	0.0452
36	81	5.2	0.0456

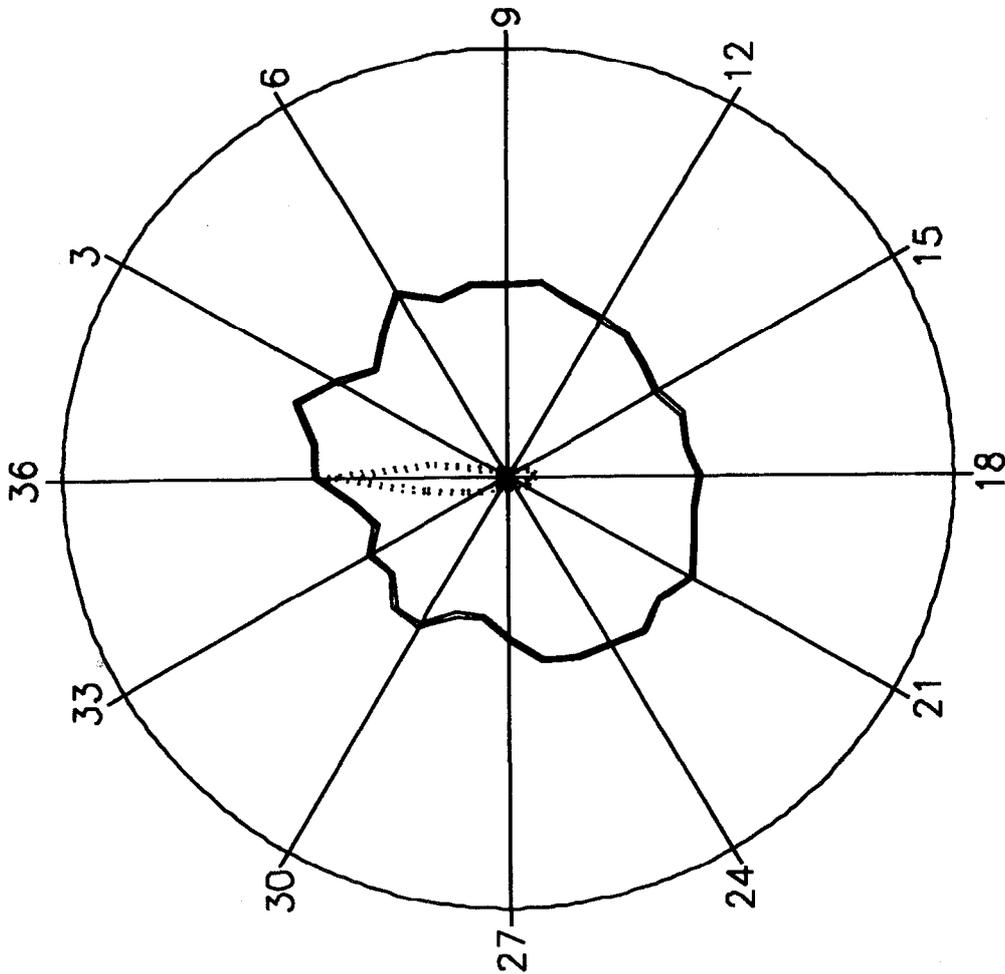
Windstille (< 0.5 m/s): 40 Werte (2.6%)
Ausfall oder nicht gemessen: 3822 Werte

..... Windrichtungshaeufigkeit 20 %
— Messkomponente 0.05 [mg/m³]
Radius entspricht:

Abb. 37: SO₂-Konzentrations-Windrose
Wind: SODAR 250 m, SO₂: Graz Süd

GRAZ Reininghaus SODAR 14. Dezember 1989 - 4. April 1990

HMW: Schwefeldioxid [mg/m³]
Windrichtung 50 m



..... Windrichtungshaeufigkeit 50 %
 — Messkomponente 0.1 [mg/m³]
 Radius entspricht: 396 Werte

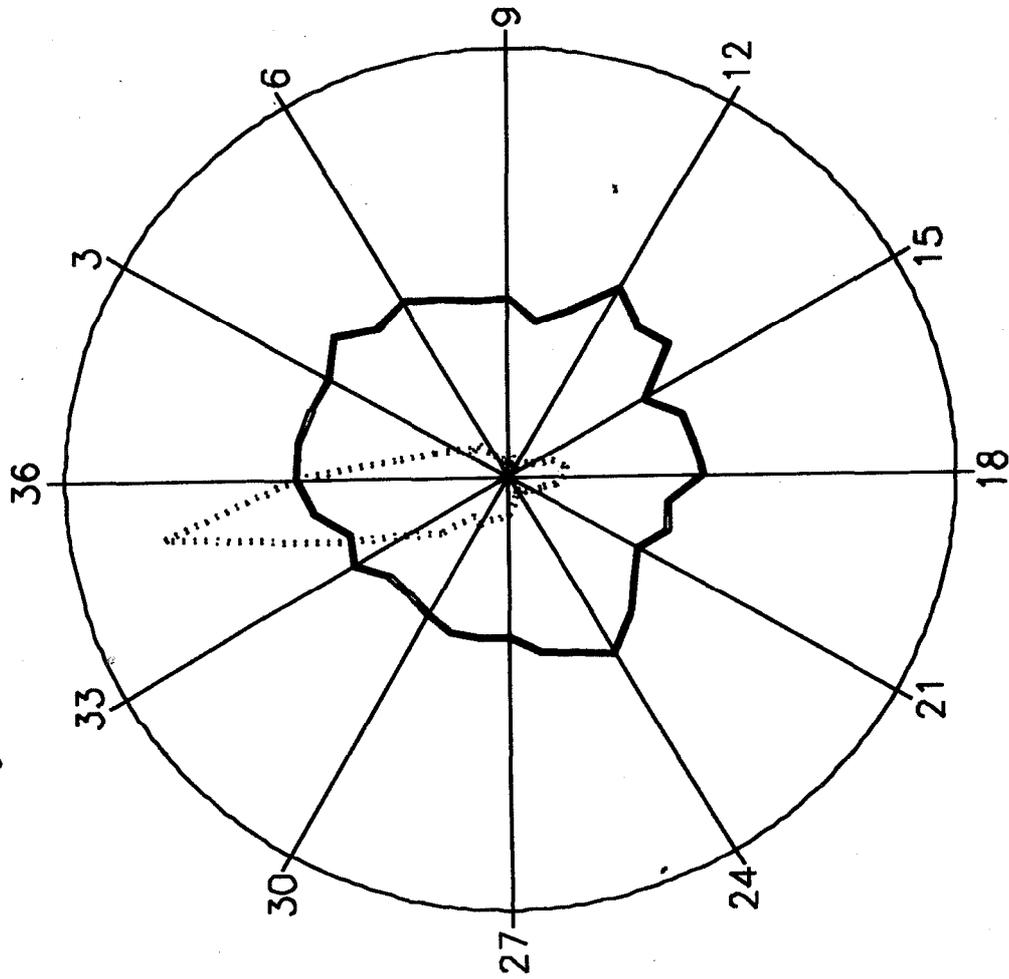
Klasse	Anz.Werte	%	mittl. Konz.
0	396	8.2	0.066
1	398	8.2	0.044
2	103	2.1	0.051
3	62	1.3	0.044
4	48	1.0	0.039
5	20	0.4	0.043
6	25	0.5	0.050
7	24	0.5	0.044
8	26	0.5	0.045
9	23	0.5	0.045
10	25	0.5	0.045
11	36	0.7	0.043
12	35	0.7	0.042
13	49	1.0	0.042
14	57	1.2	0.040
15	106	2.2	0.039
16	111	2.3	0.042
17	137	2.8	0.041
18	147	3.0	0.043
19	112	2.3	0.042
20	117	2.4	0.044
21	115	2.4	0.048
22	82	1.7	0.045
23	48	1.0	0.047
24	58	1.2	0.045
25	71	1.5	0.045
26	55	1.1	0.044
27	75	1.6	0.038
28	68	1.4	0.033
29	80	1.7	0.034
30	64	1.3	0.040
31	80	1.7	0.040
32	109	2.3	0.034
33	174	3.6	0.036
34	258	5.3	0.032
35	458	9.5	0.035
36	974	20.2	0.043

Windstille (< 0.5 m/s): 396 Werte (8.2%)
 Ausfall oder nicht gemessen: 550 Werte

Abb. 38: SO₂-Konzentrations-Windrose
 Wind: SODAR 50 m, SO₂: Graz Mitte

GRAZ Reininghaus SODAR 14. Dezember 1989 - 4. April 1990

HMW: Schwefeldioxid [mg/m³]
Windrichtung 150 m



..... Windrichtungshaeufigkeit 20 %
 — Messkomponente 0.1 [mg/m³]
 Radius entspricht:

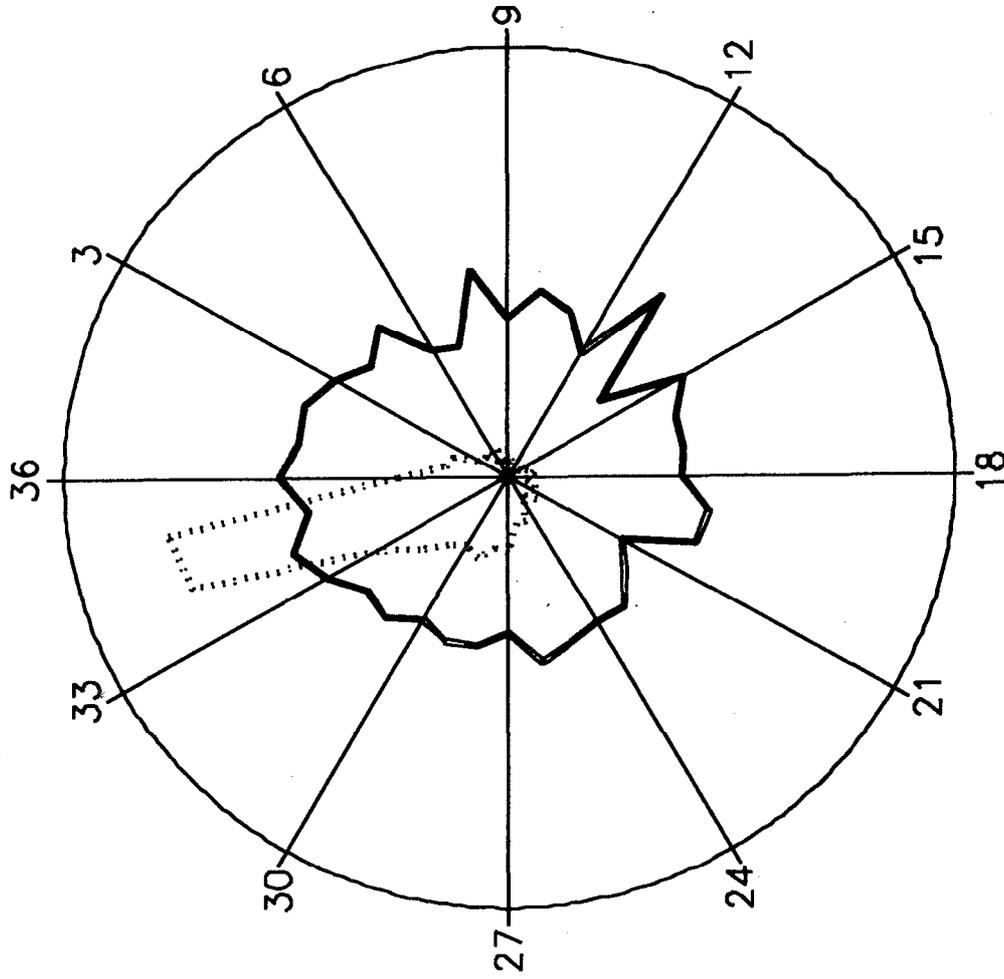
Klasse	Anz.Werte	%	mittl.Konz.
0	238	5.5	0.055
1	212	4.9	0.048
2	148	3.4	0.047
3	112	2.6	0.047
4	85	2.0	0.051
5	85	2.0	0.045
6	49	1.1	0.047
7	38	0.9	0.044
8	33	0.8	0.042
9	30	0.7	0.042
10	43	1.0	0.037
11	26	0.6	0.041
12	22	0.5	0.051
13	28	0.7	0.046
14	42	1.0	0.048
15	52	1.2	0.036
16	90	2.1	0.042
17	113	2.6	0.043
18	107	2.5	0.044
19	92	2.1	0.037
20	66	1.5	0.038
21	51	1.2	0.034
22	45	1.0	0.036
23	35	0.8	0.042
24	35	0.8	0.047
25	43	1.0	0.043
26	56	1.3	0.041
27	77	1.8	0.037
28	82	1.9	0.038
29	92	2.1	0.038
30	108	2.5	0.036
31	102	2.4	0.035
32	171	4.0	0.035
33	230	5.3	0.041
34	372	8.7	0.038
35	676	15.7	0.045
36	414	9.6	0.048

Windstille (< 0.5 m/s): 238 Werte (5.5%)
 Ausfall oder nicht gemessen: 1076 Werte

Abb. 39: SO₂-Konzentrations-Windrose
 Wind: SODAR 150 m, SO₂: Graz Mitte

GRAZ Reininghaus SODAR 14. Dezember 1989 - 4. April 1990

HMW: Schwefeldioxid [mg/m³]
Windrichtung 250 m



Radius entspricht:

..... Windrichtungshäufigkeit 20 %

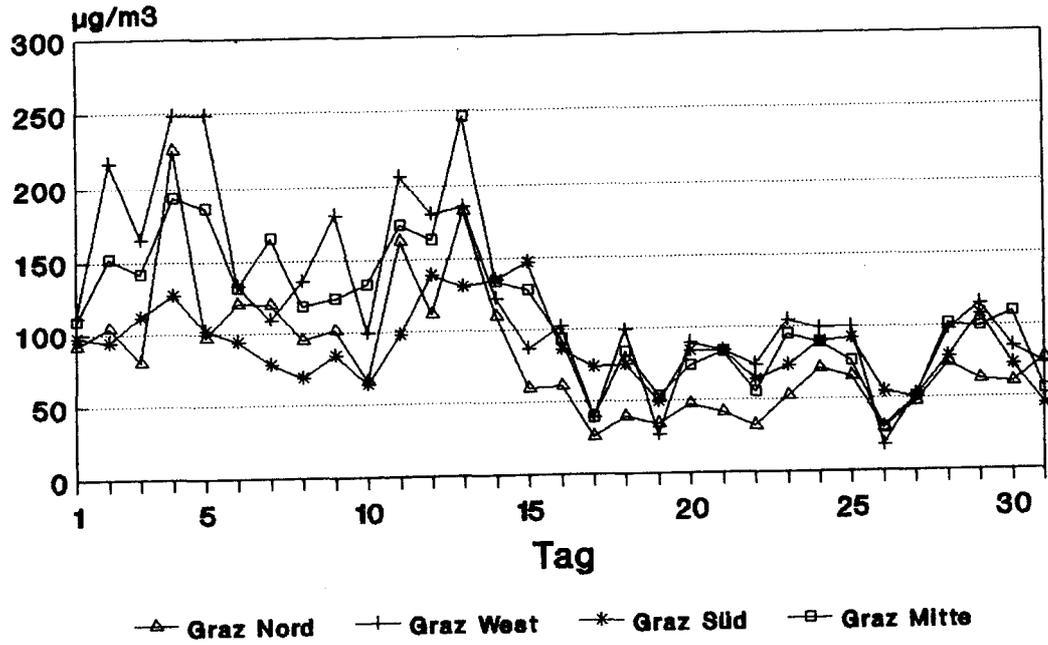
— Messkomponente 0.1 [mg/m³]

Klasse	Anz.Werte	%	mittl.Konz.
0	47	2.3	0.040
1	57	2.8	0.048
2	52	2.6	0.049
3	30	1.5	0.045
4	27	1.3	0.040
5	27	1.3	0.045
6	16	0.8	0.034
7	27	1.3	0.032
8	16	0.8	0.049
9	15	0.7	0.037
10	16	0.8	0.044
11	13	0.6	0.041
12	8	0.4	0.033
13	6	0.3	0.054
14	4	0.2	0.027
15	11	0.5	0.045
16	17	0.8	0.040
17	23	1.1	0.040
18	18	0.9	0.039
19	18	0.9	0.046
20	26	1.3	0.045
21	28	1.4	0.030
22	33	1.6	0.034
23	23	1.1	0.040
24	28	1.4	0.040
25	45	2.2	0.042
26	45	2.2	0.044
27	71	3.5	0.037
28	68	3.4	0.040
29	81	4.0	0.041
30	75	3.7	0.038
31	84	4.2	0.043
32	105	5.2	0.041
33	137	6.8	0.047
34	304	15.1	0.052
35	312	15.5	0.046
36	99	4.9	0.052

Windstille (< 0.5 m/s): 47 Werte (2.3%)
Ausfall oder nicht gemessen: 3364 Werte

Abb. 40: SO₂-Konzentrations-Windrose
Wind: SODAR 250 m, SO₂: Graz Mitte

Graz SO₂ - HMWmax Dezember 1989



Graz SO₂ - TMW Dezember 1989

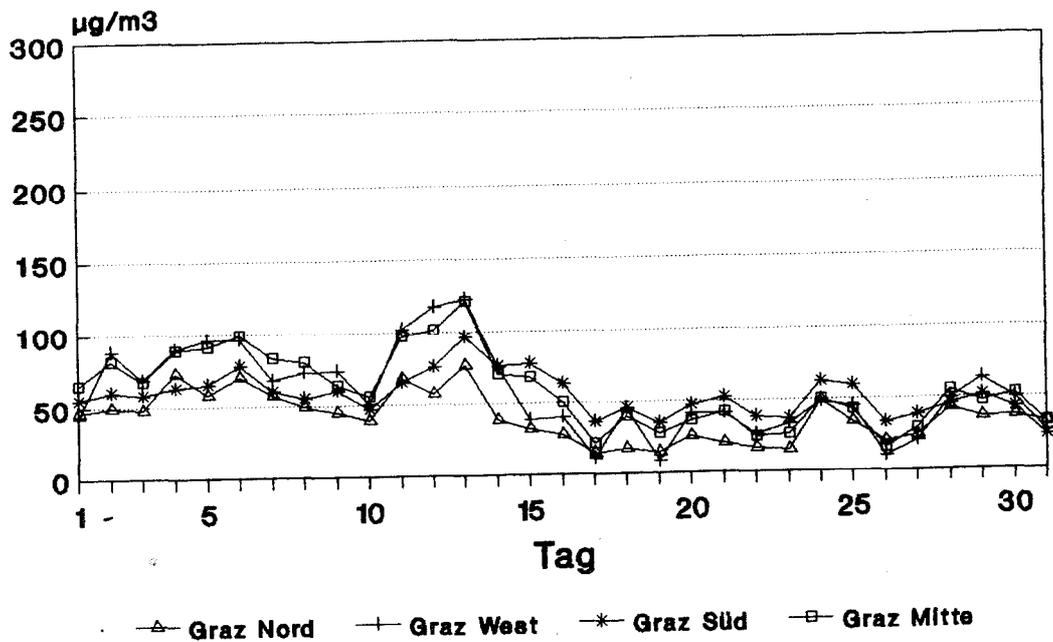
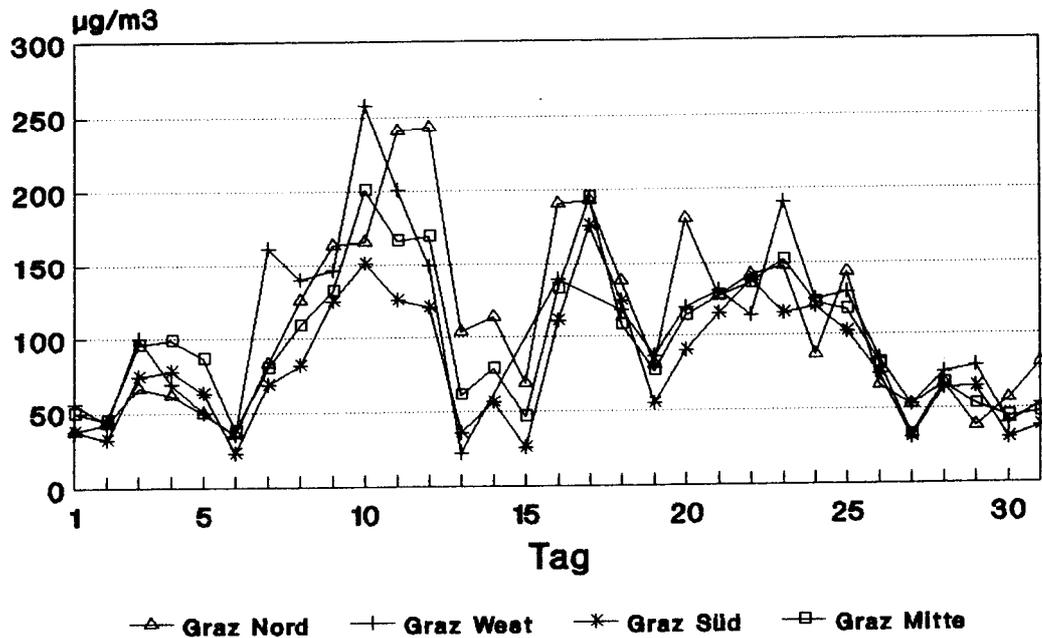


Abb. 41

Graz SO₂ - HMWmax Jänner 1990



Graz SO₂ - TMW Jänner 1990

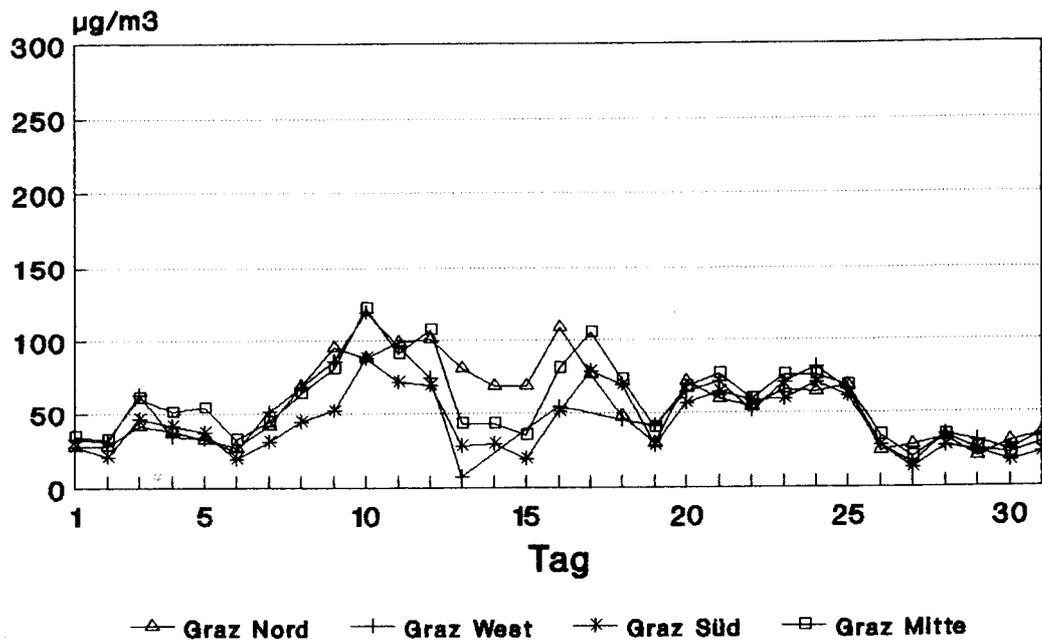
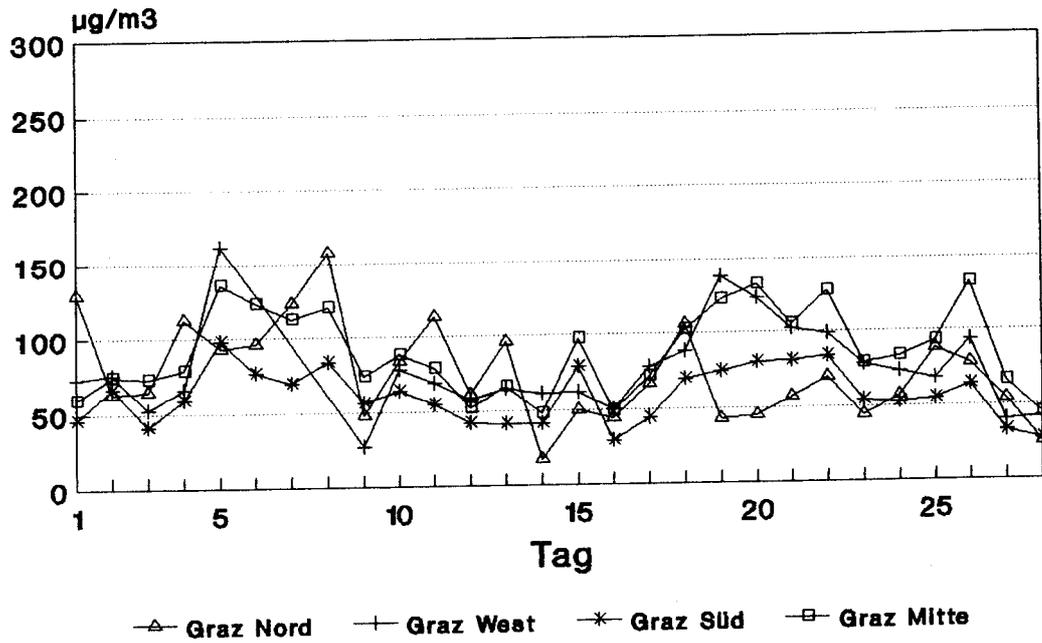


Abb. 42

Graz SO₂ - HMWmax Februar 1990



Graz SO₂ - TMW Februar 1990

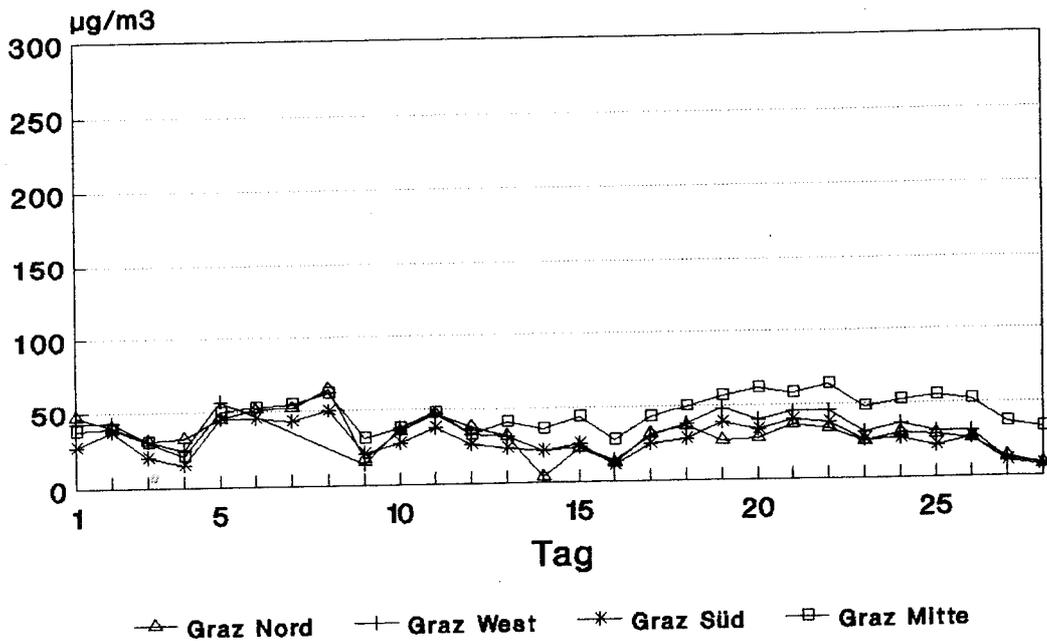
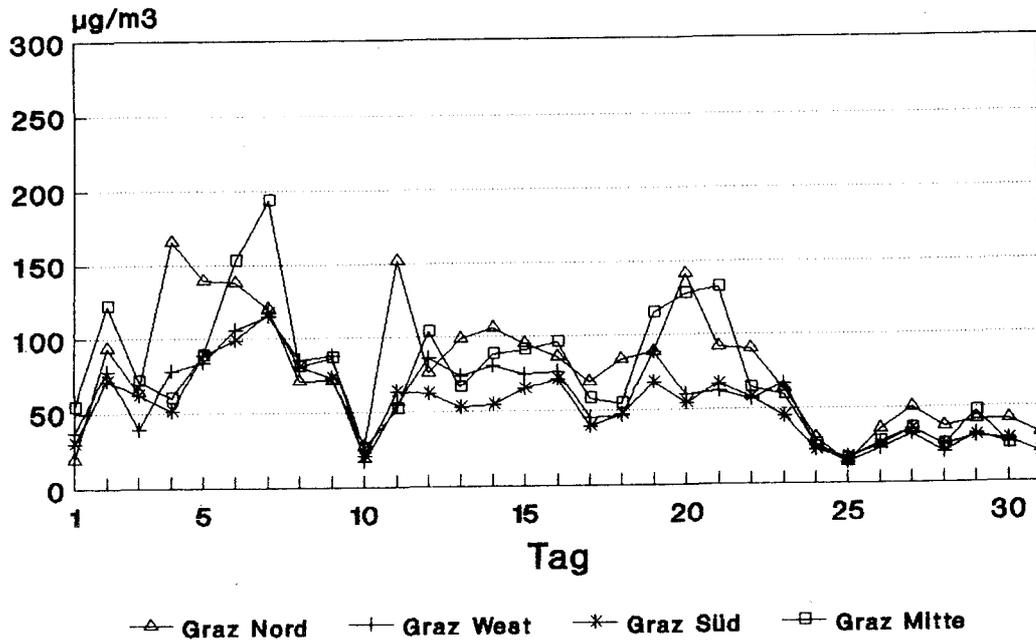


Abb. 43

Graz SO₂ - HMWmax
März 1990



Graz SO₂ - TMW
März 1990

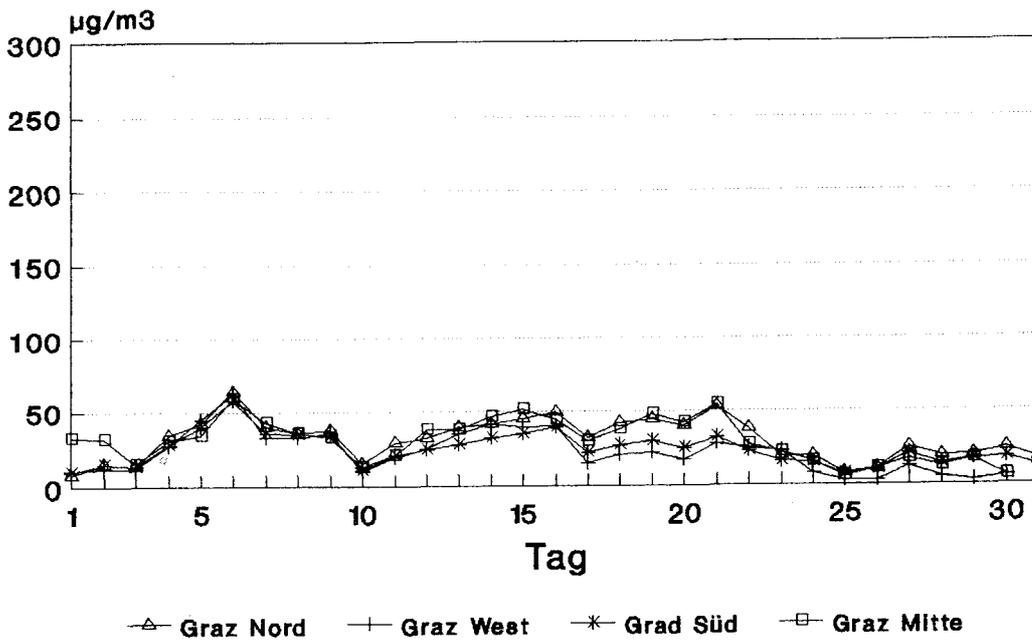


Abb. 44

Graz Wetter

6. - 15. 1. 1990

Termine 7, 13 und 19 Uhr MEZ

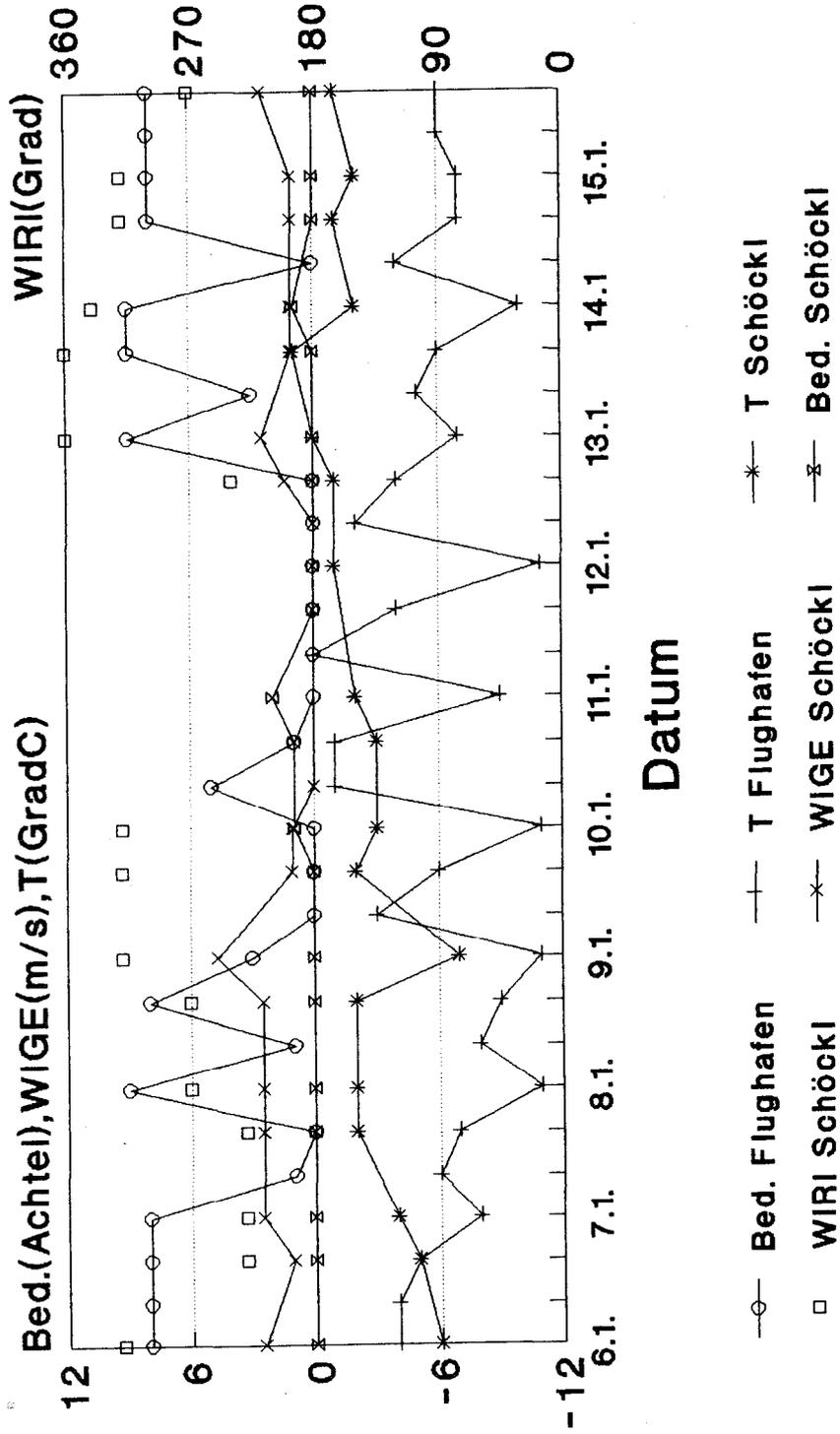


Abb. 45

Graz

6. bis 8. Jänner 1990

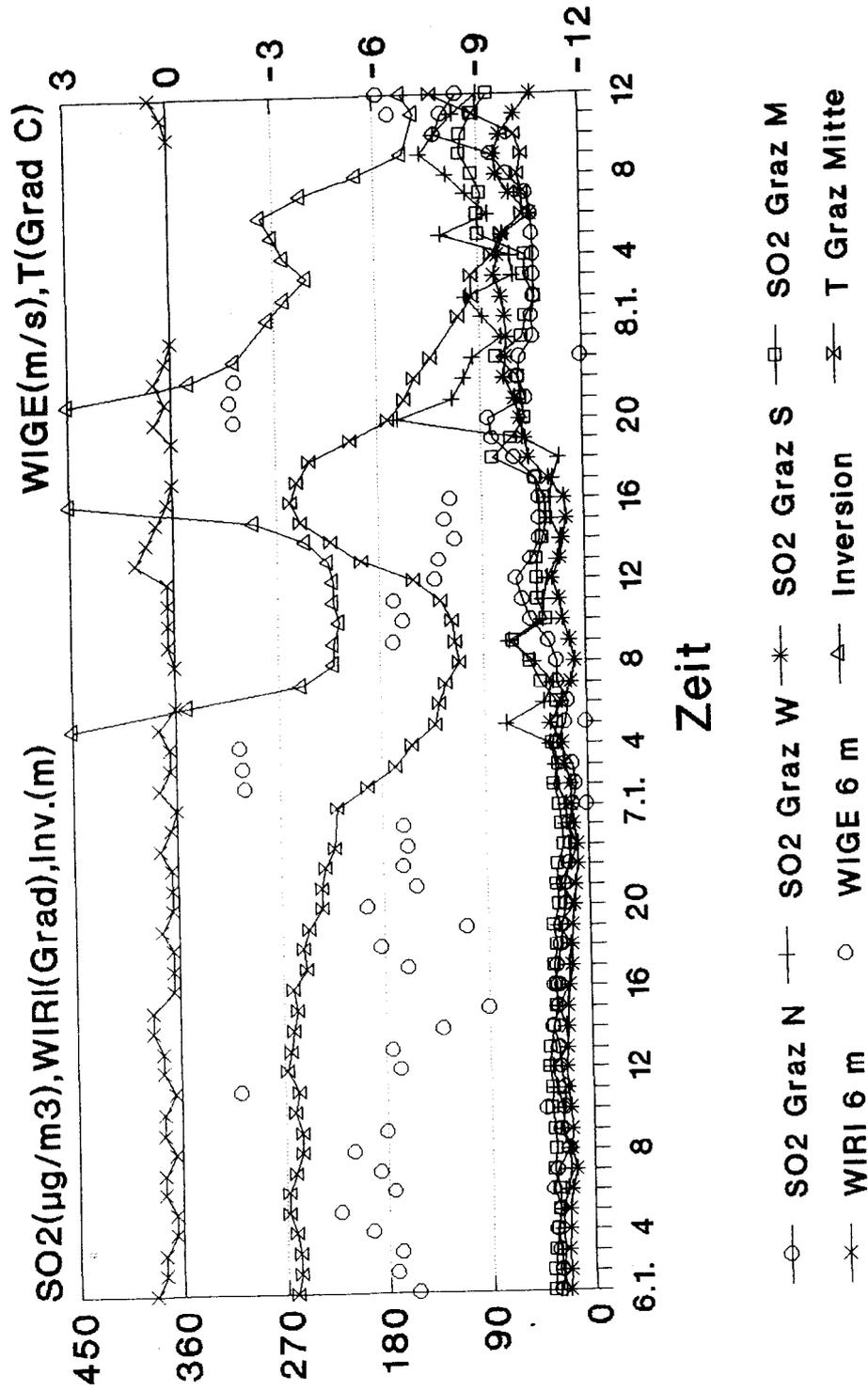


Abb. 46

Graz
8. bis 10. Jänner 1990

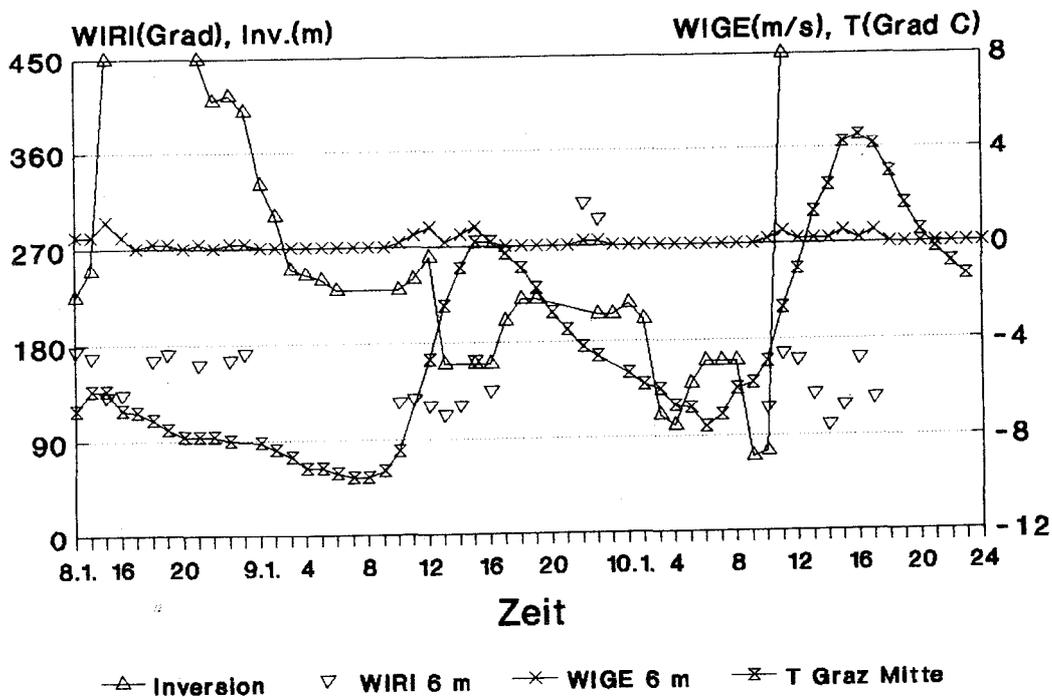
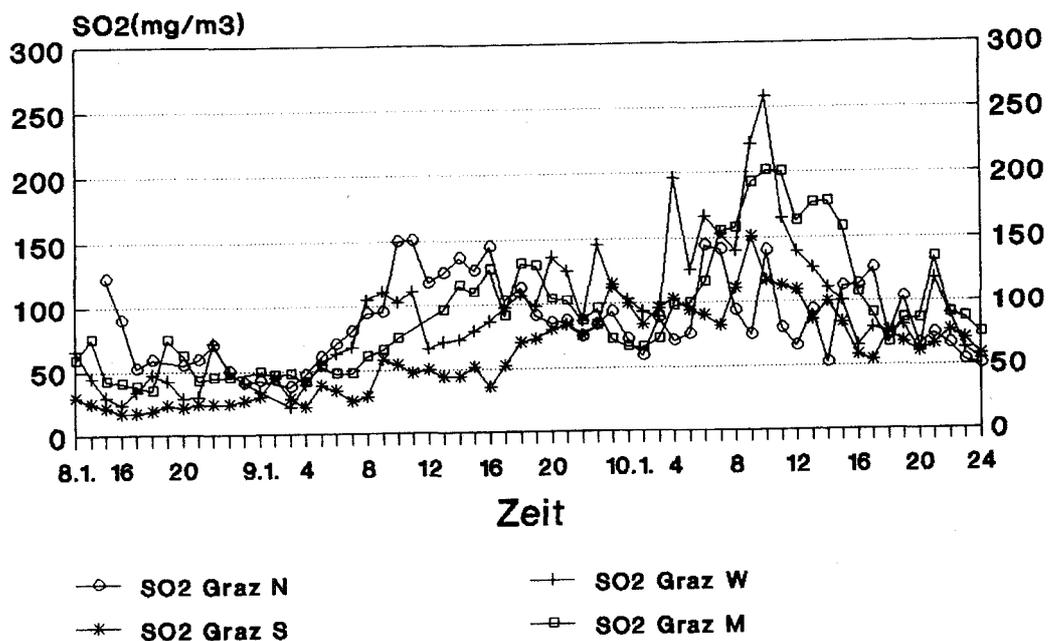


Abb. 47

Graz
11. Jänner 1990

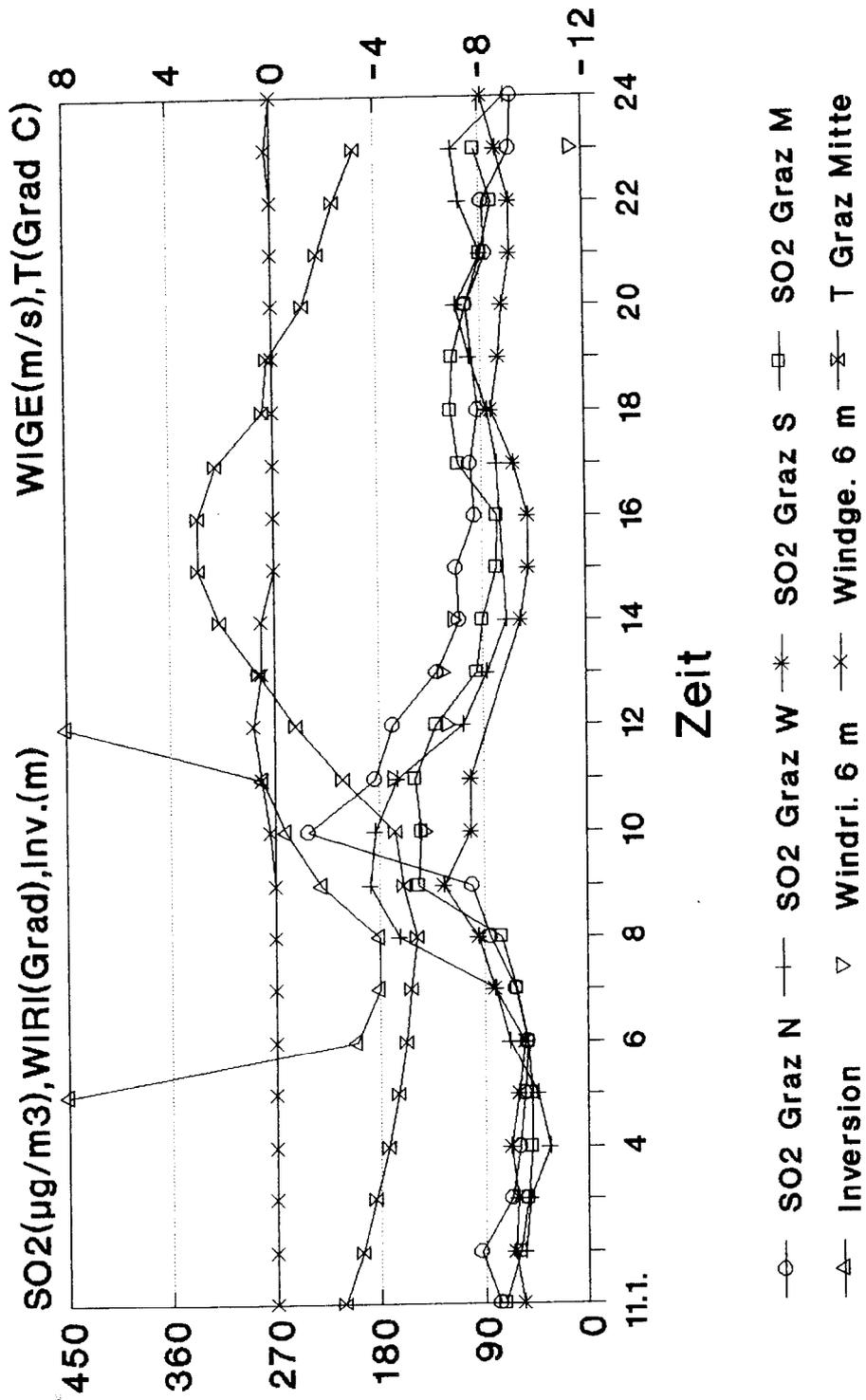


Abb. 48

Graz
12. - 13. Jänner 1990

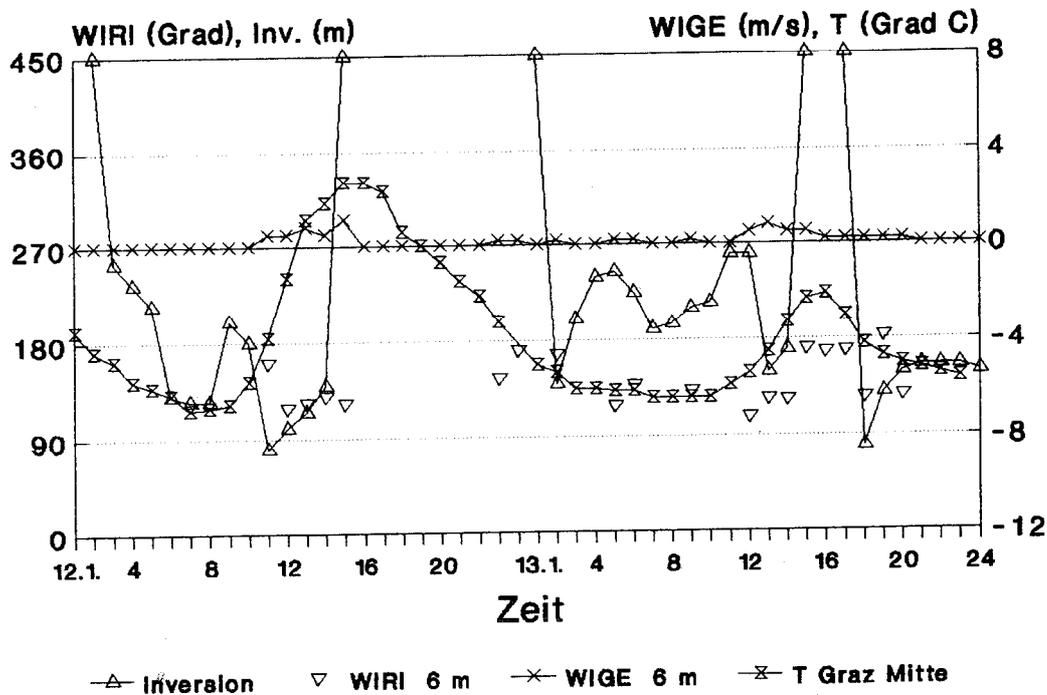
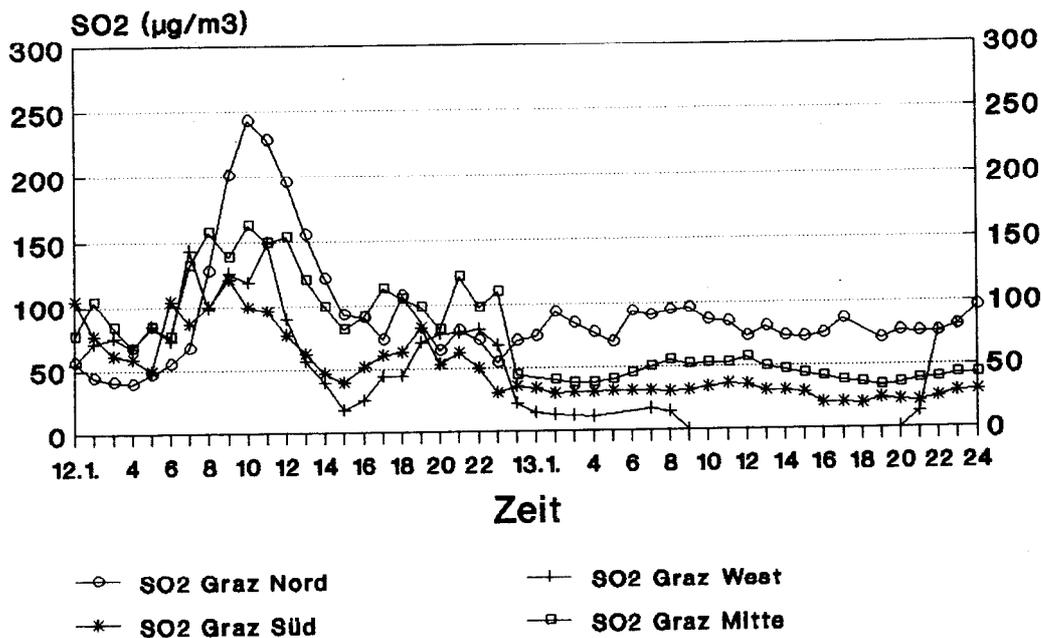


Abb. 49

Graz

14. - 15. Jänner 1990

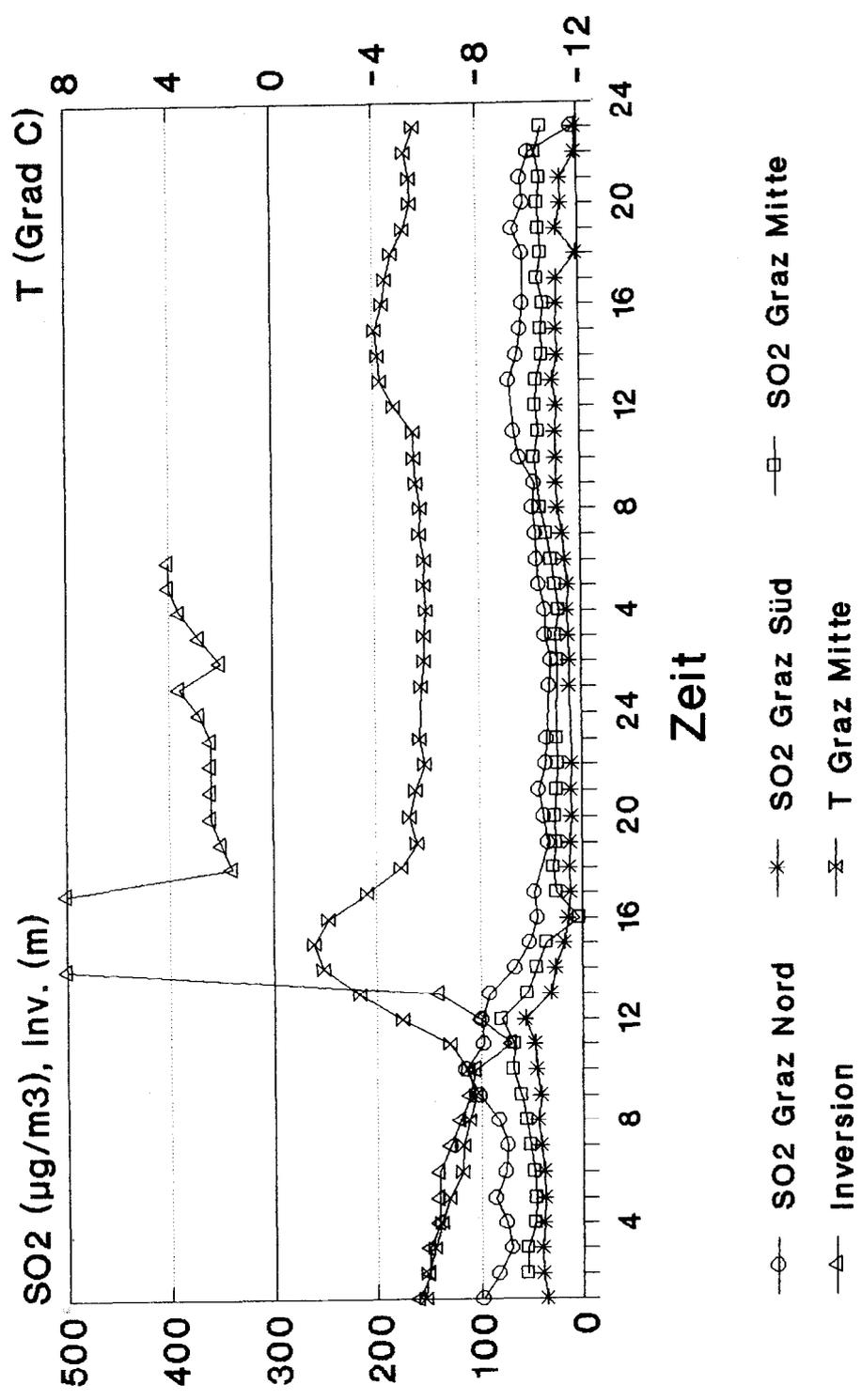


Abb. 50

Graz

Windrichtung

6. - 7.1. 1990

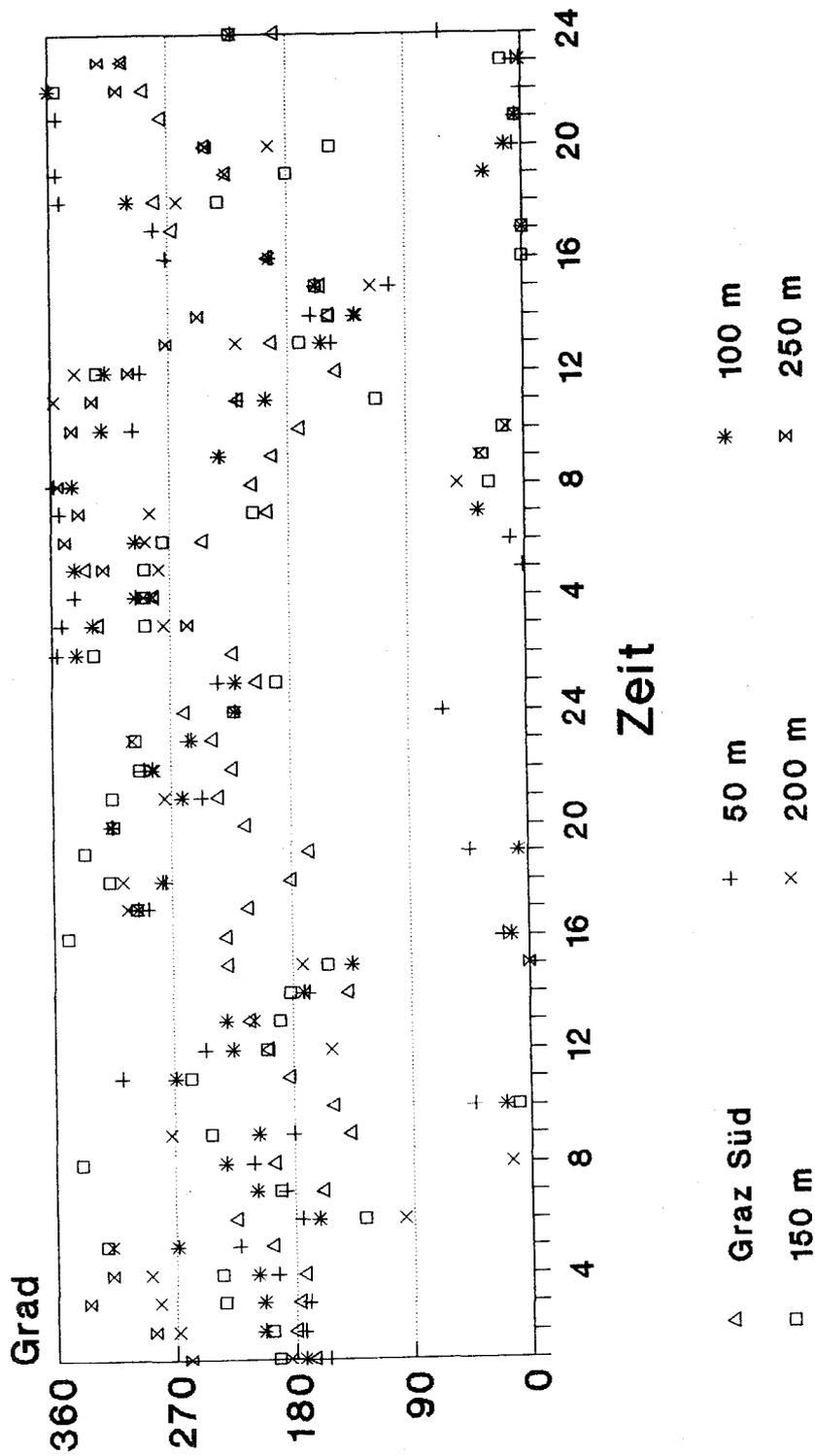


Abb. 51

Graz
Windgeschwindigkeit
6. - 7.1. 1990

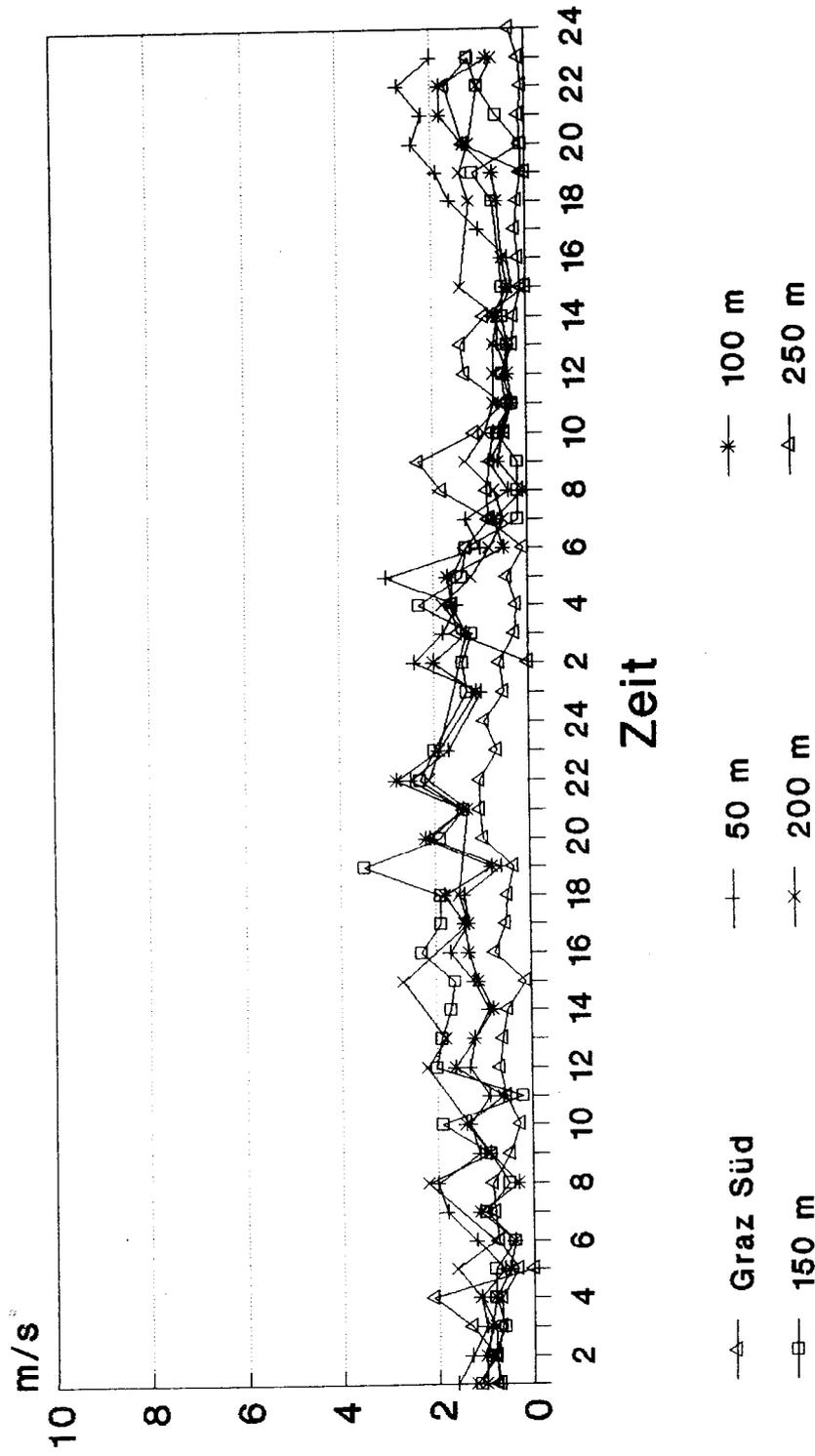


Abb. 52

Graz Windrichtung 8. - 9. 1. 1990

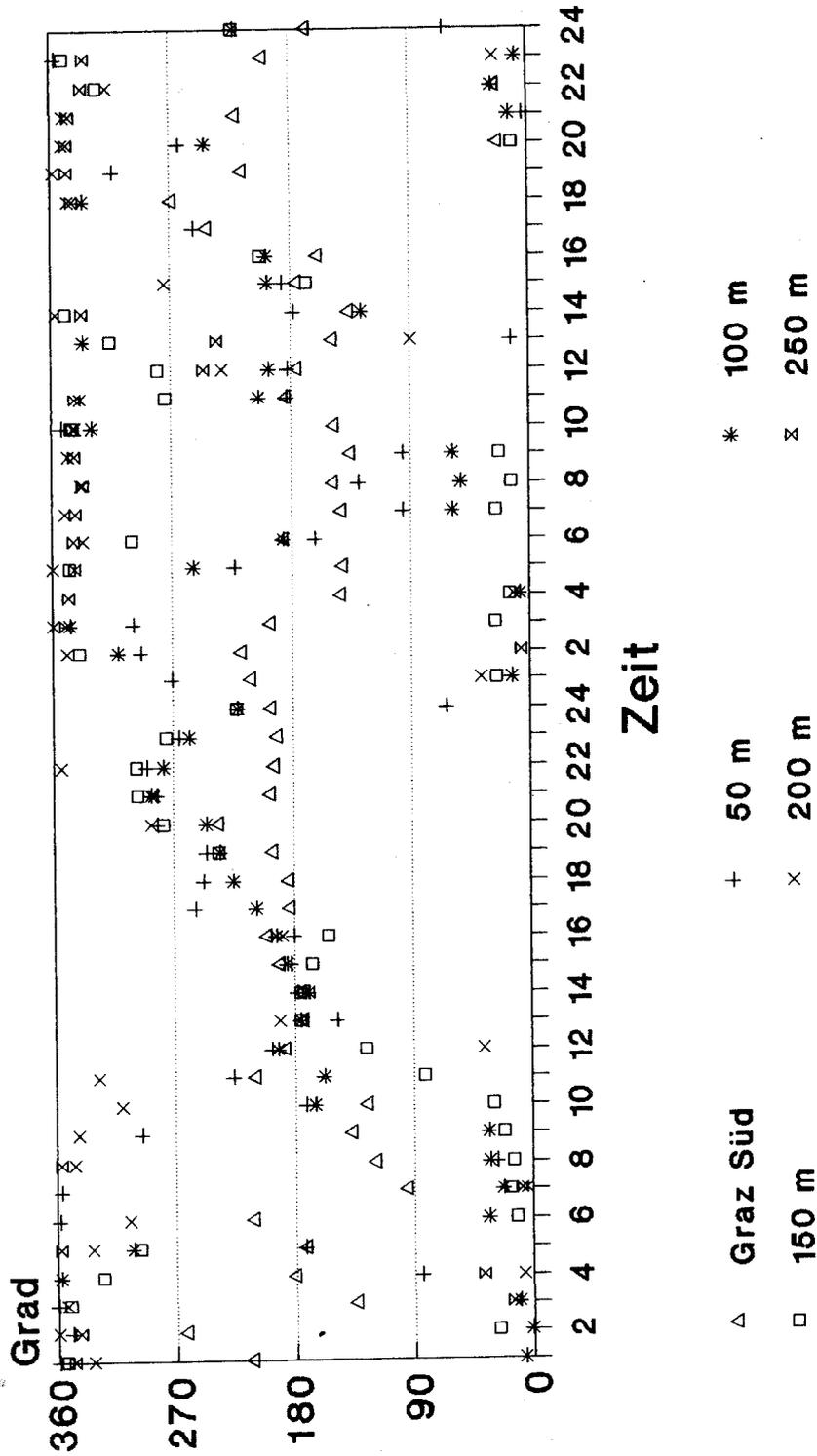


Abb. 53

Graz

Windgeschwindigkeit

8. - 9. 1. 1990

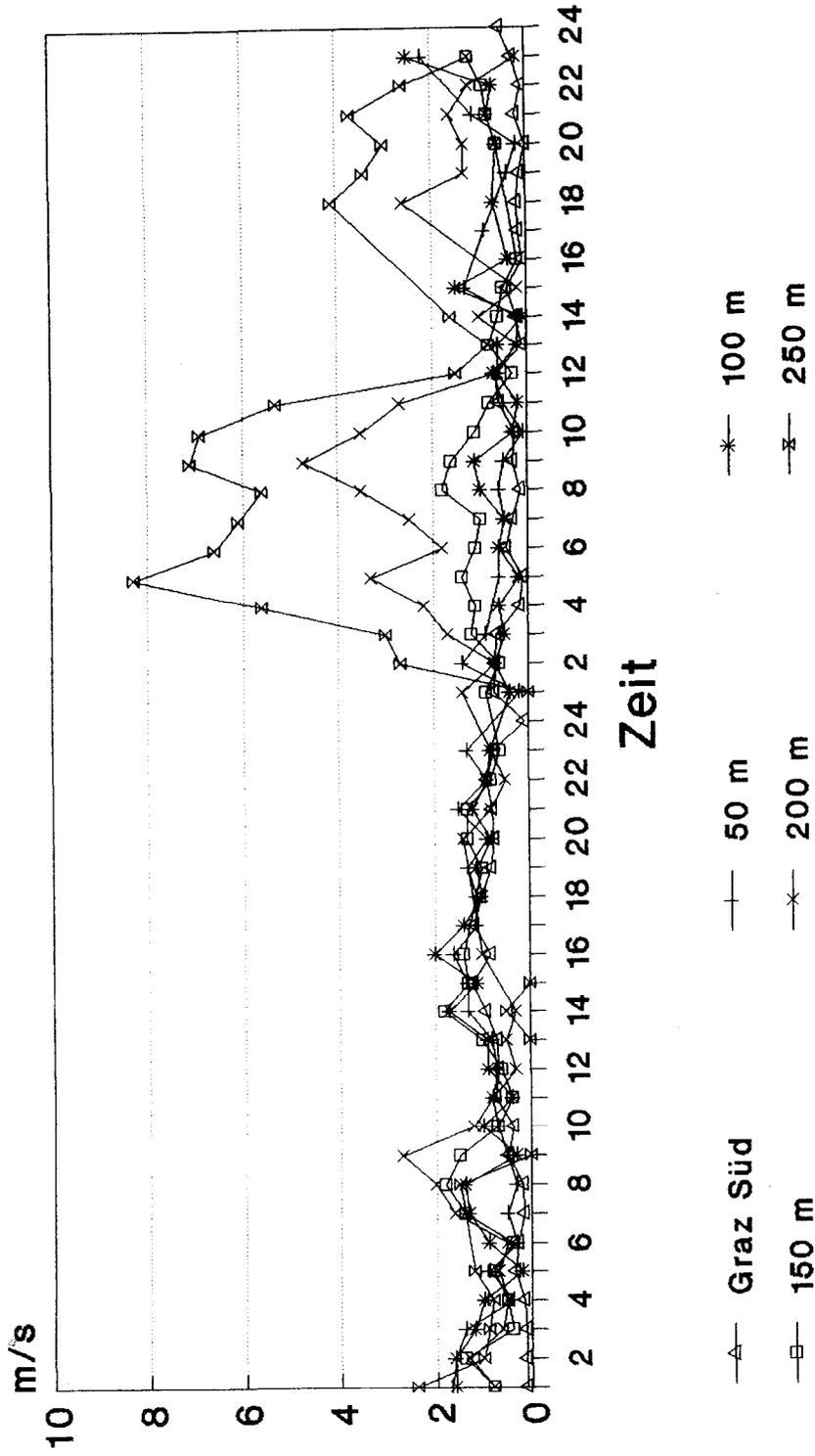


Abb. 54

Graz

Windrichtung

10. - 11. 1. 1990

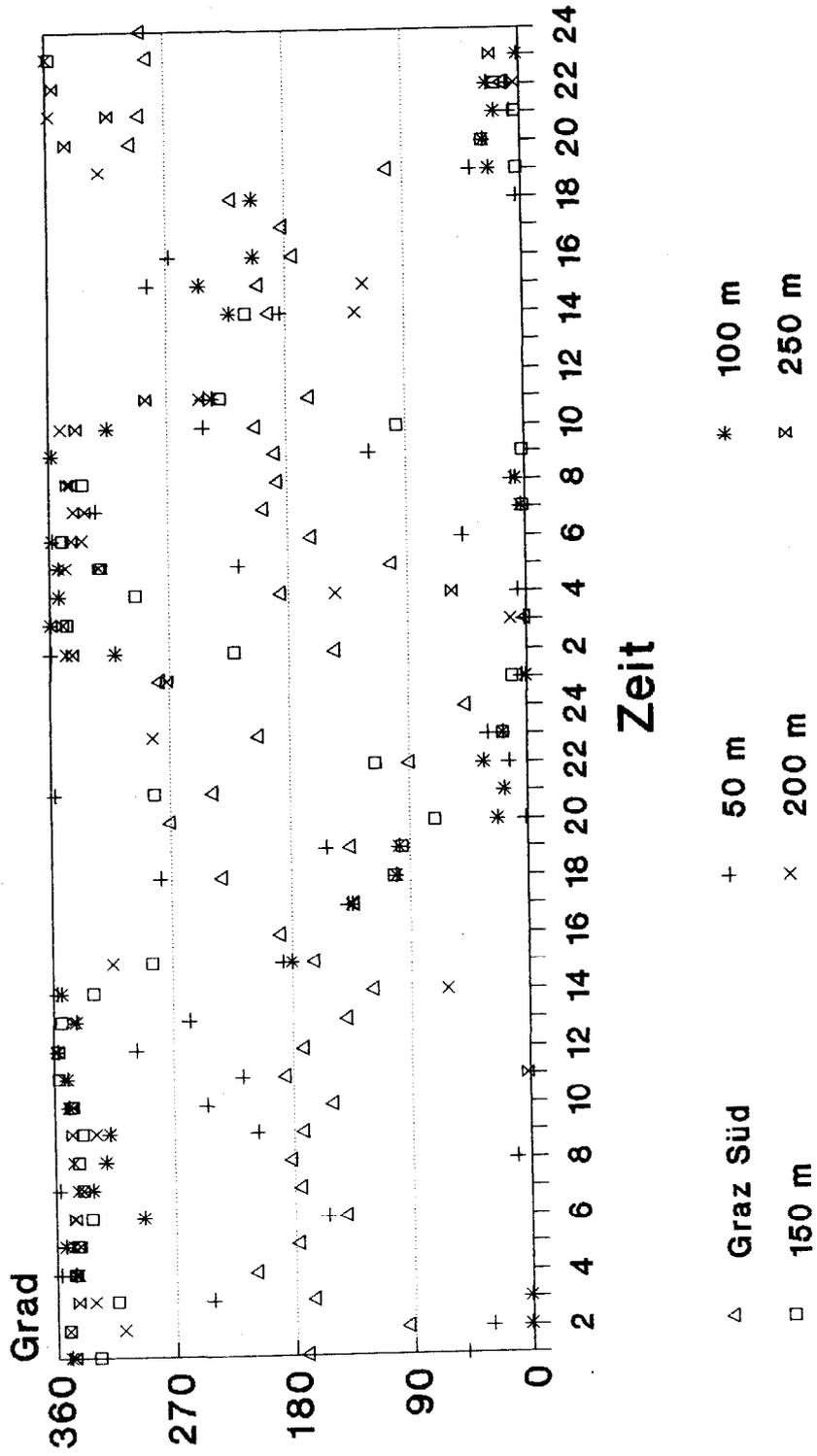


Abb. 55

Graz
Windgeschwindigkeit
10. - 11. 1. 1990

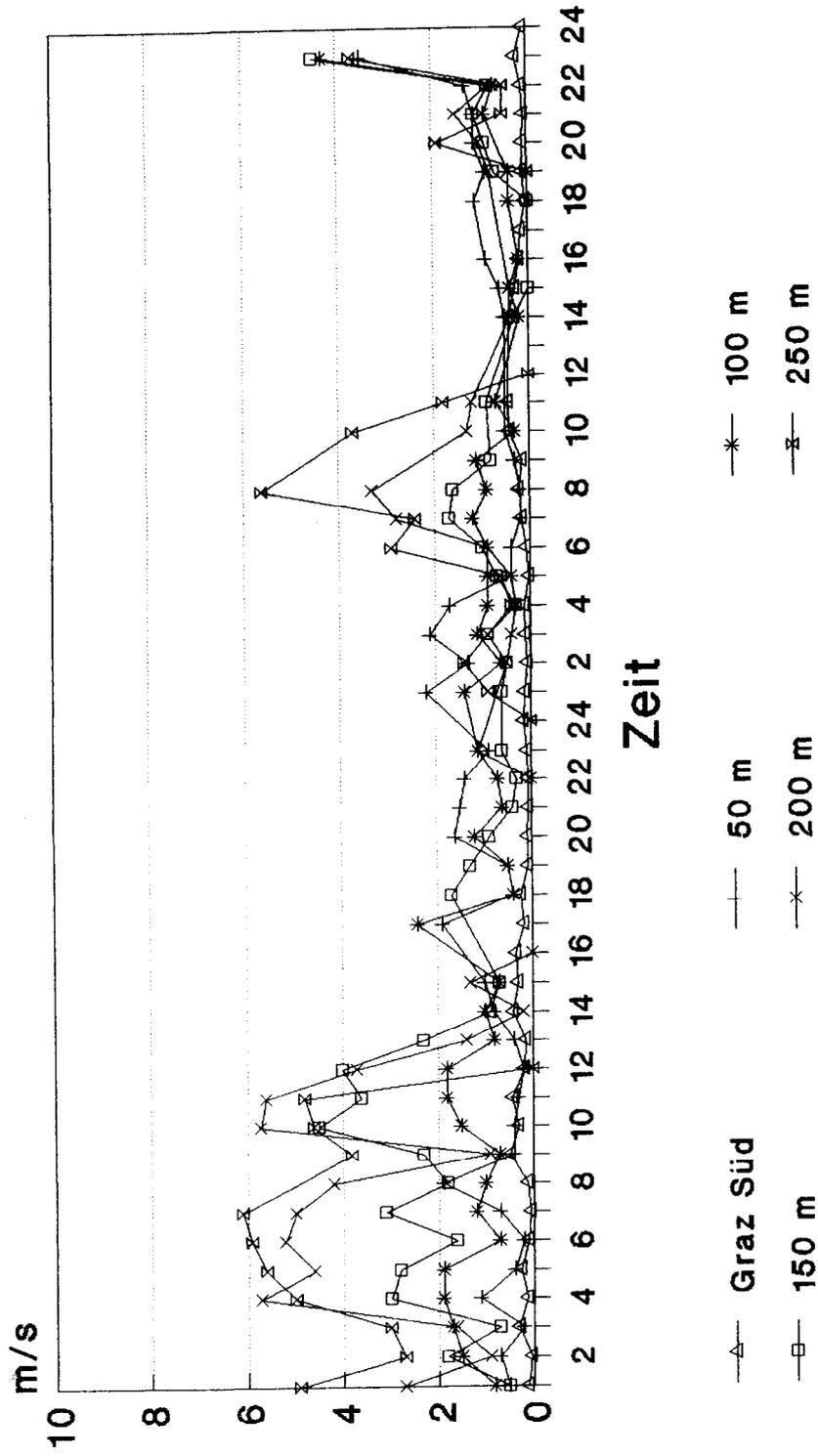


Abb. 56

Graz

Windrichtung

12. - 13. 1. 1990

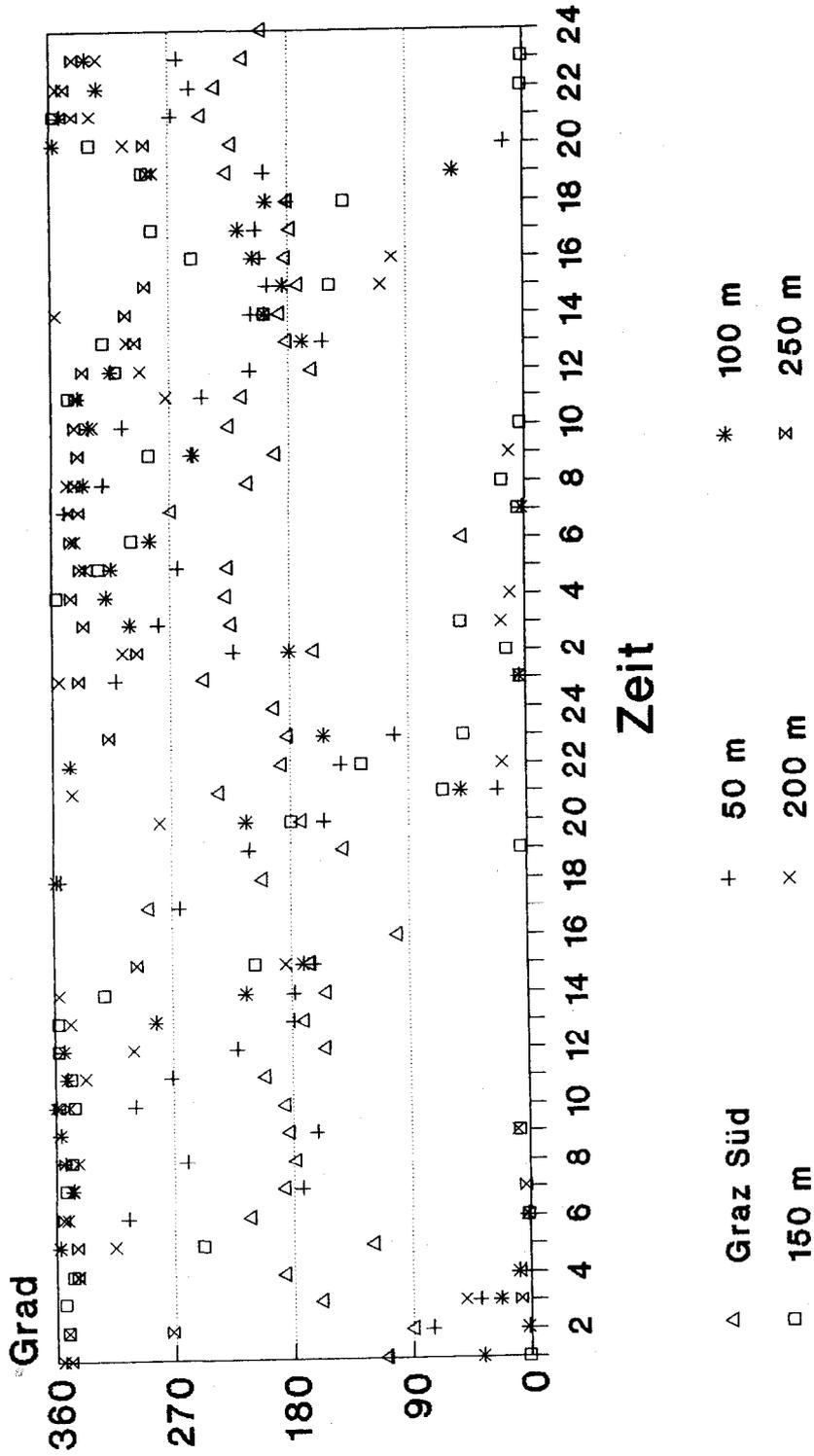


Abb. 57

Graz
Windgeschwindigkeit
12. - 13.1. 1990

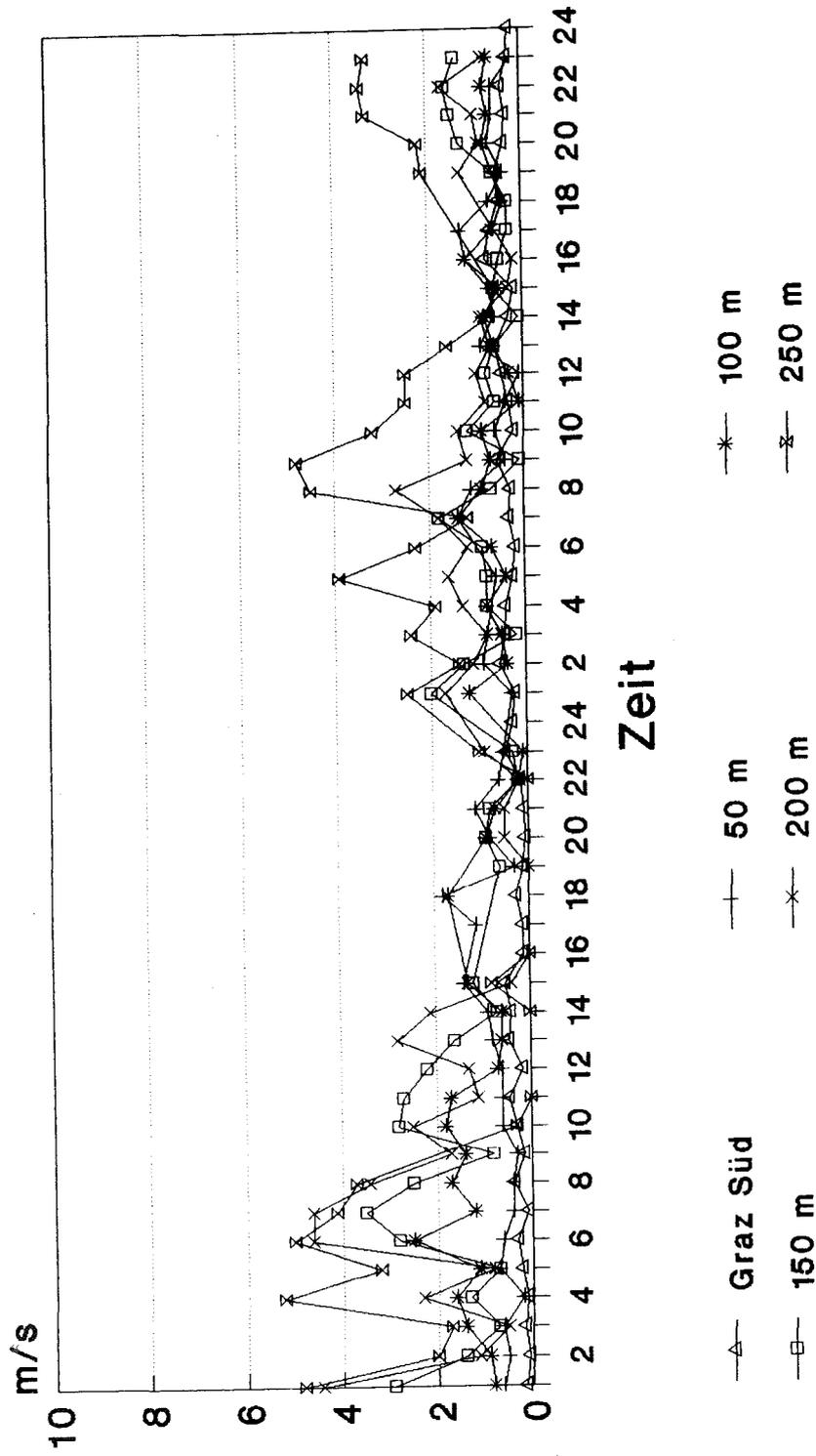


Abb. 58

Graz

Windrichtung

14. - 15. 1. 1990

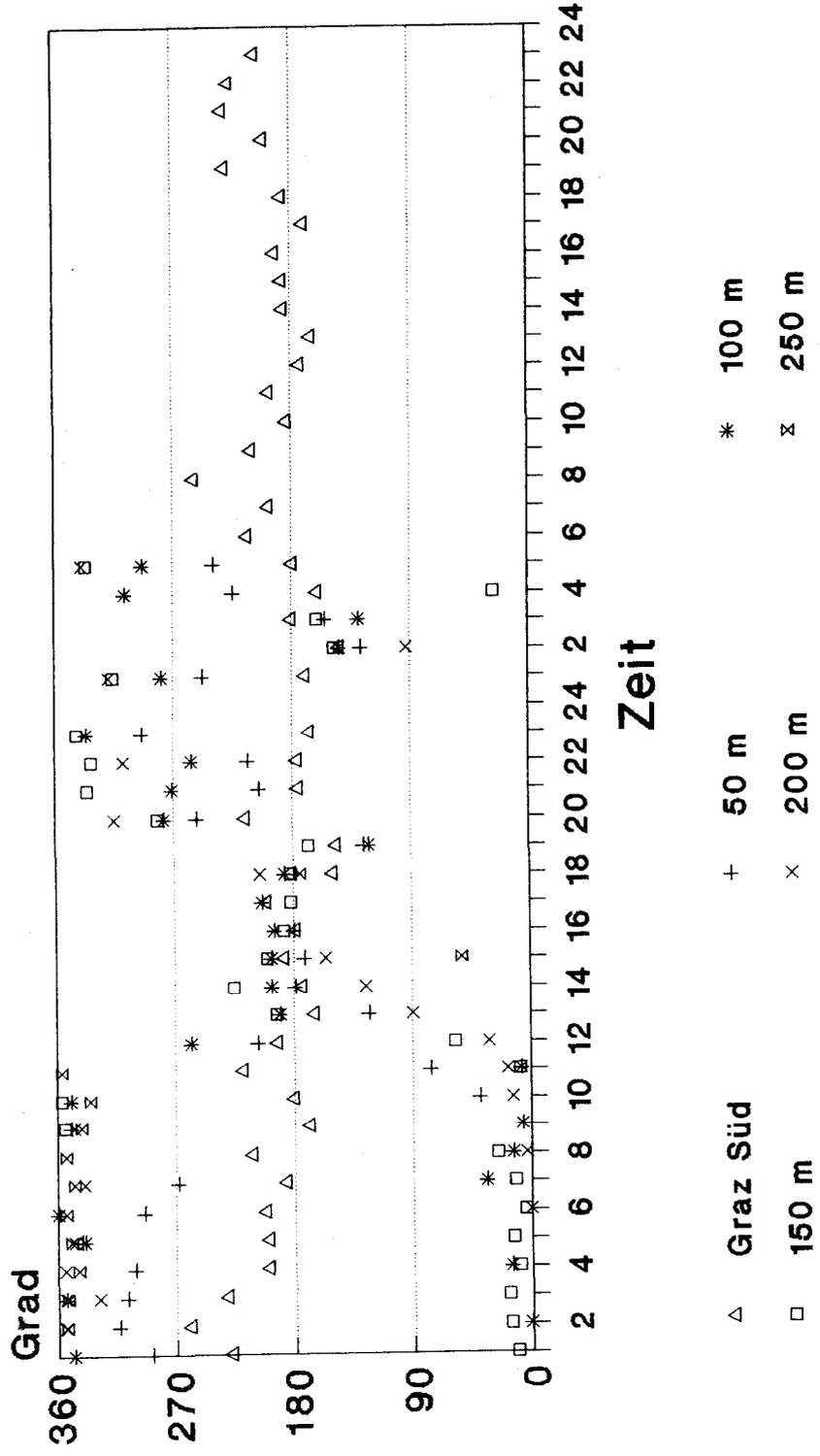


Abb. 59

Graz
Windgeschwindigkeit
14. - 15. 1. 1990

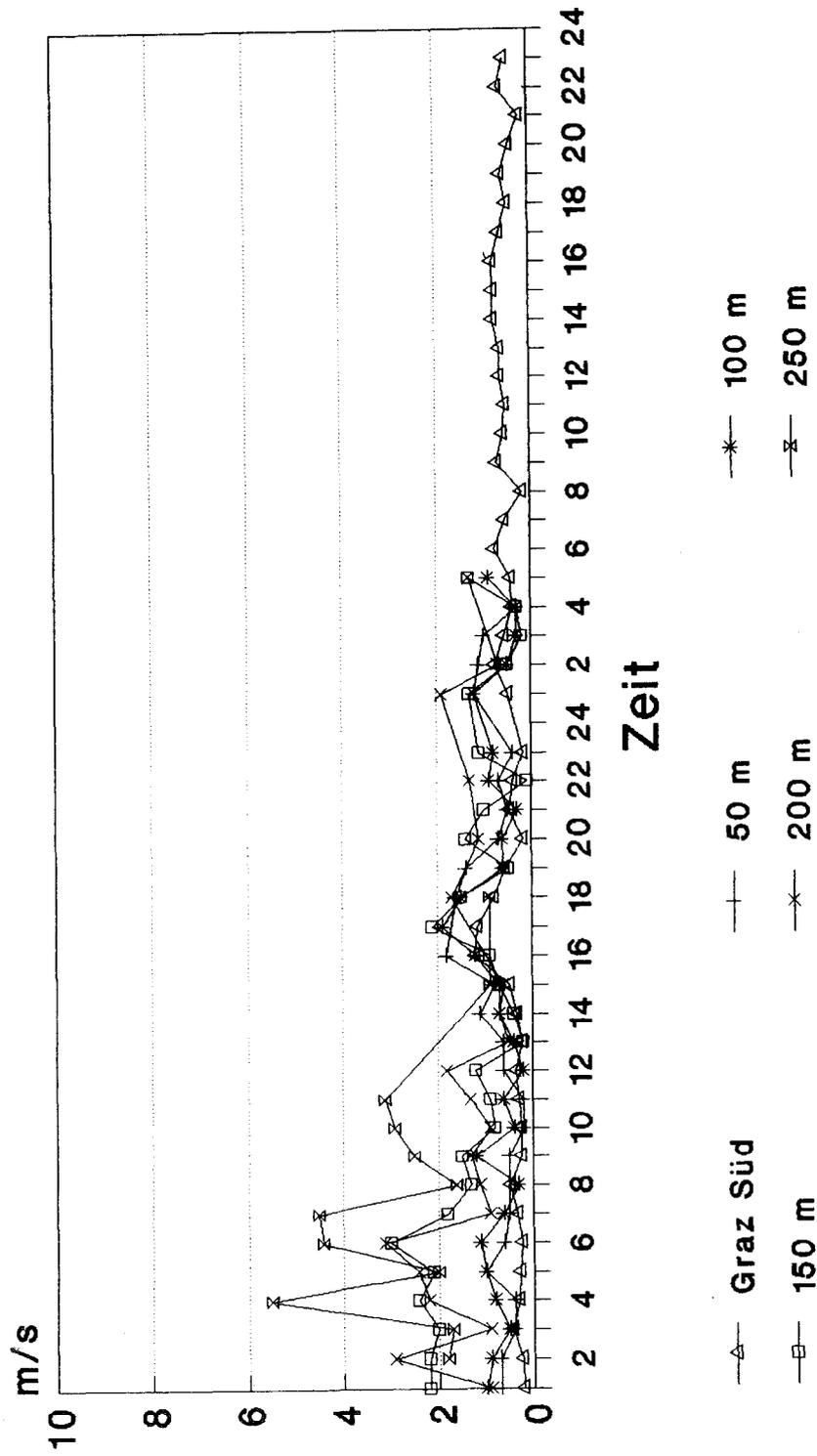
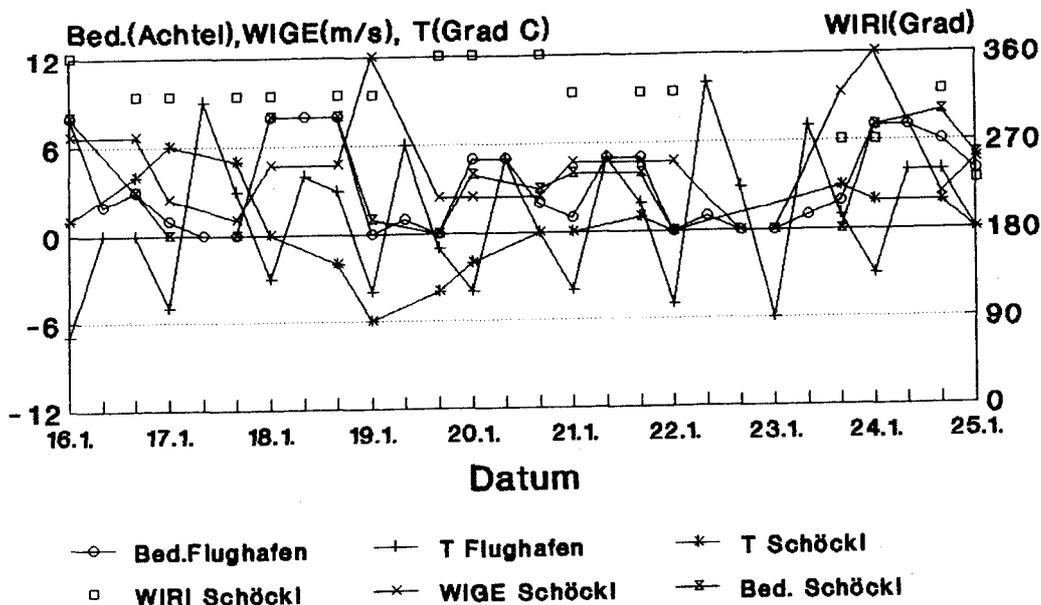


Abb. 60

Graz Wetter
16. - 25.1. 1990
Termine 7, 13 und 19 Uhr MEZ



Graz Wetter
25. bis 28.1. 1990
Termine 7, 13 und 19 Uhr MEZ

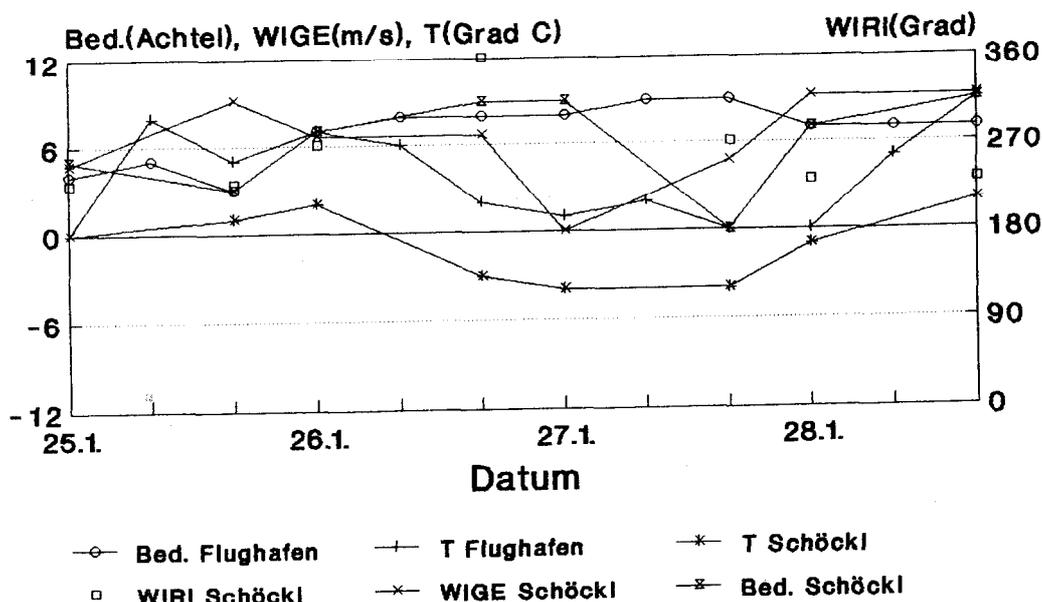


Abb. 61

Graz
17. - 18. 1. 1990

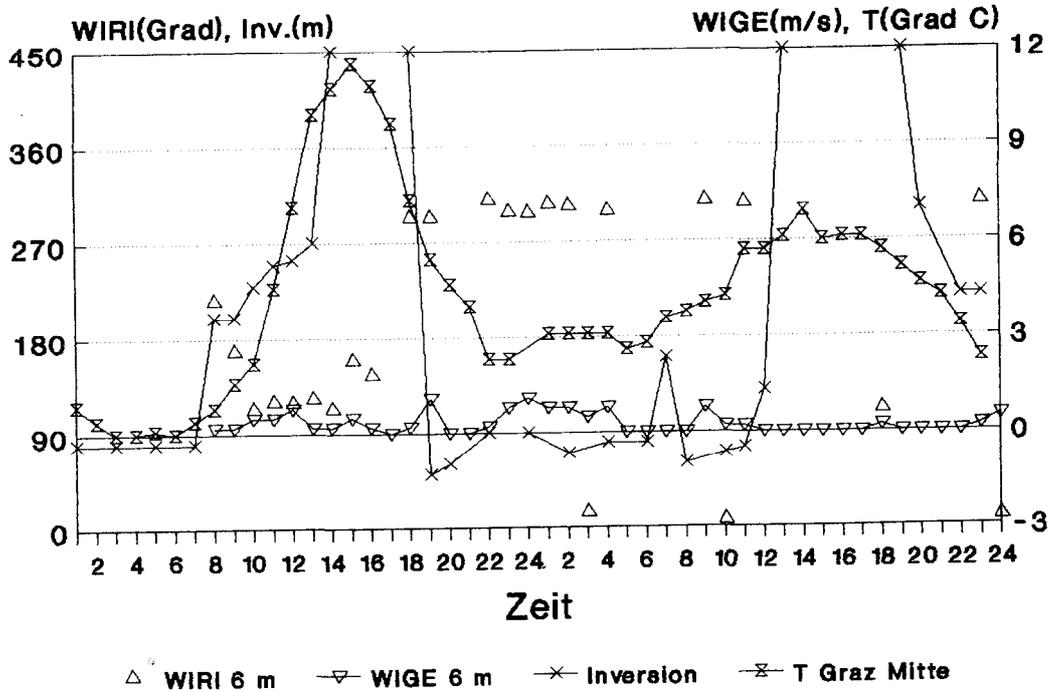
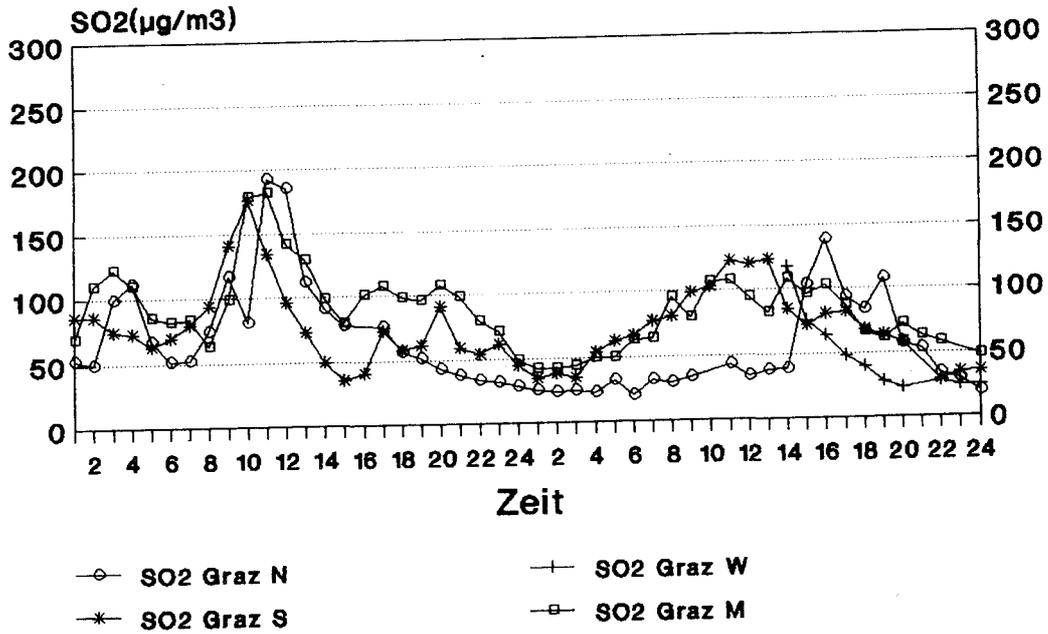


Abb. 62

Graz
19. - 20. 1. 1990

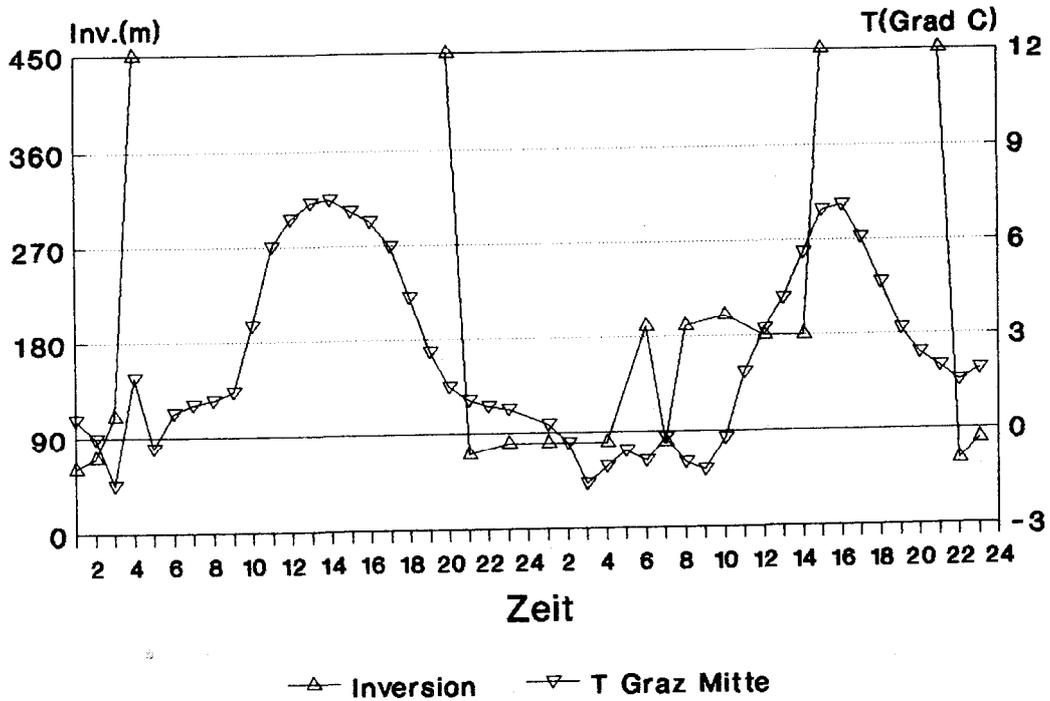
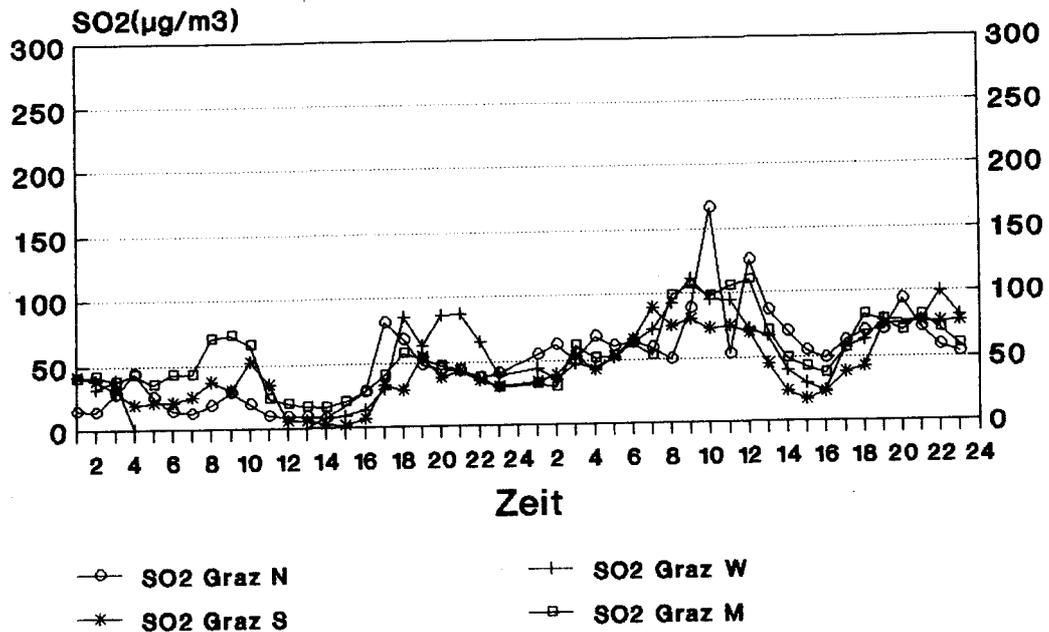


Abb. 63

Graz
21. - 22. 1. 1990

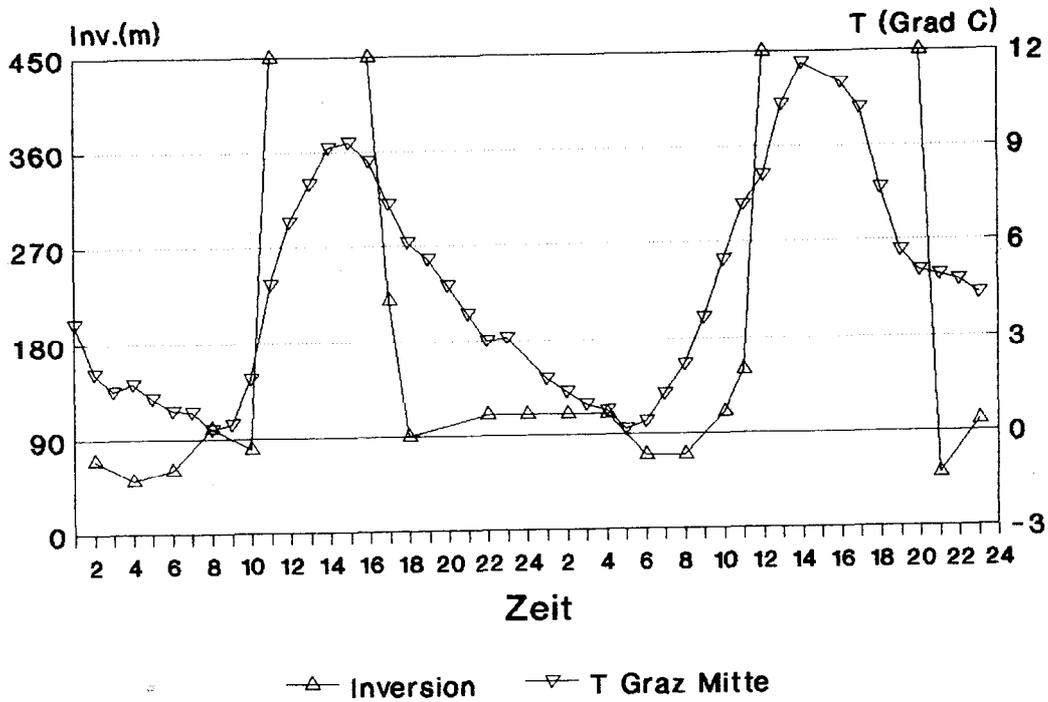
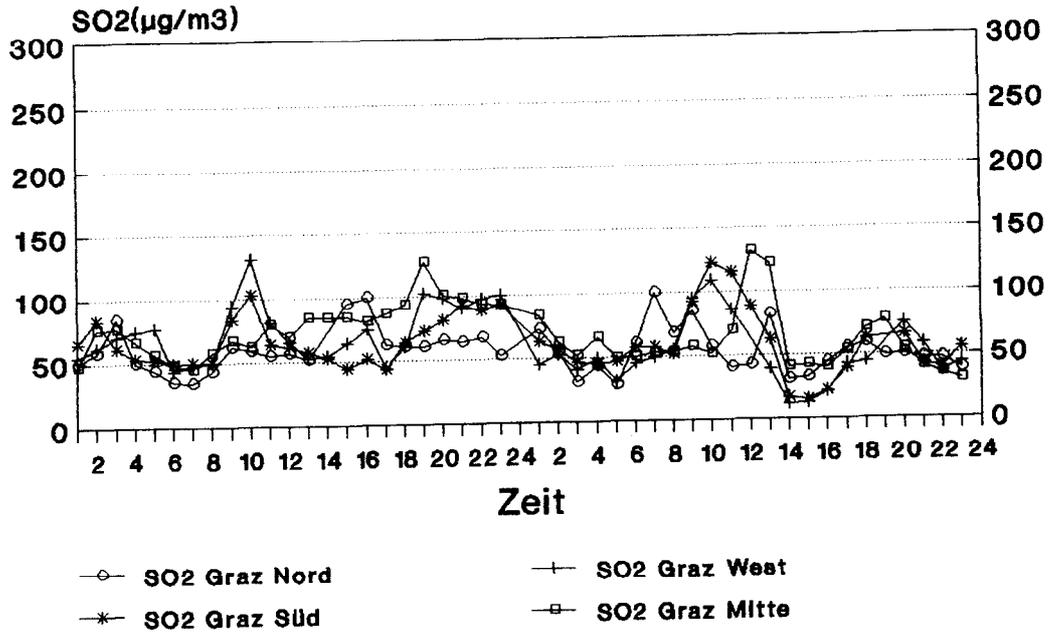


Abb. 64

Graz
23. - 24. 1. 1990

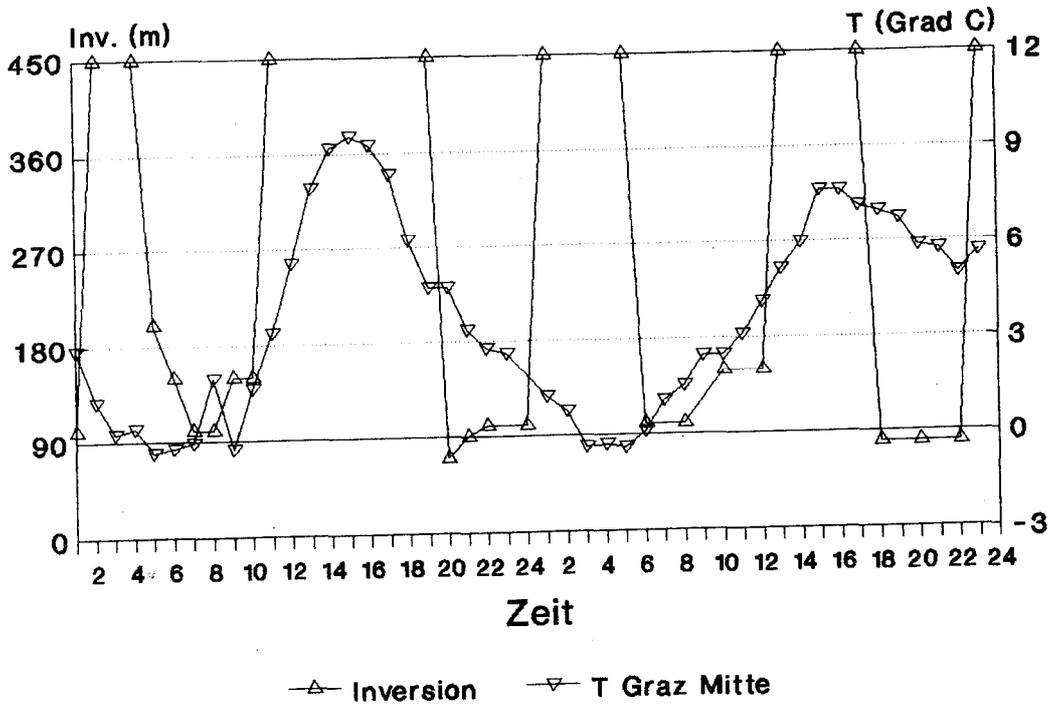
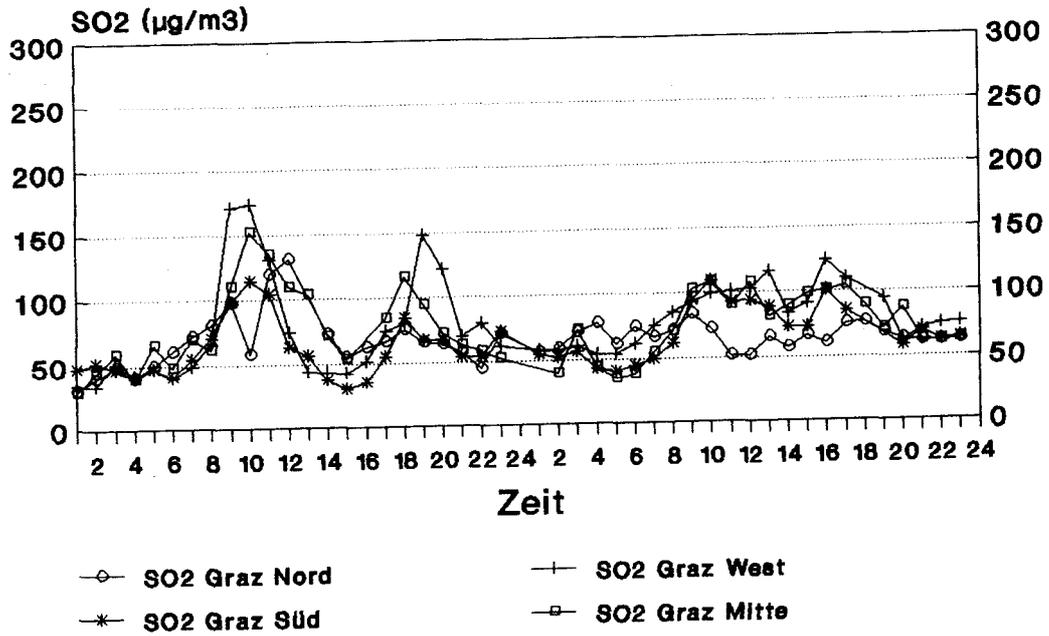


Abb. 65

Graz
25. - 26. 1. 1990

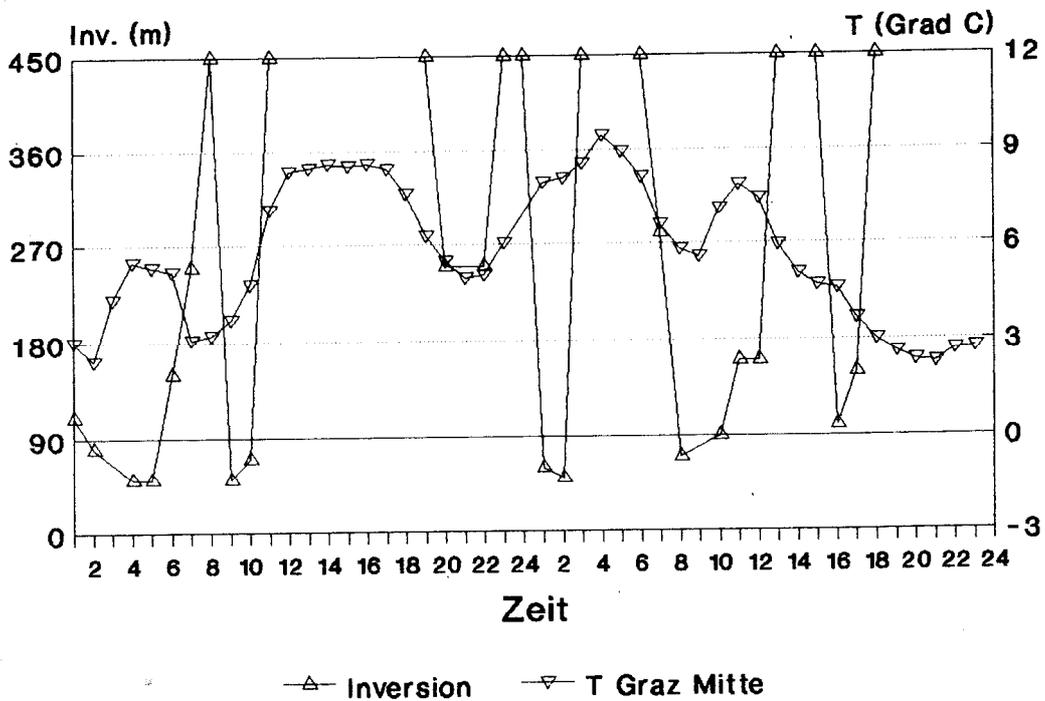
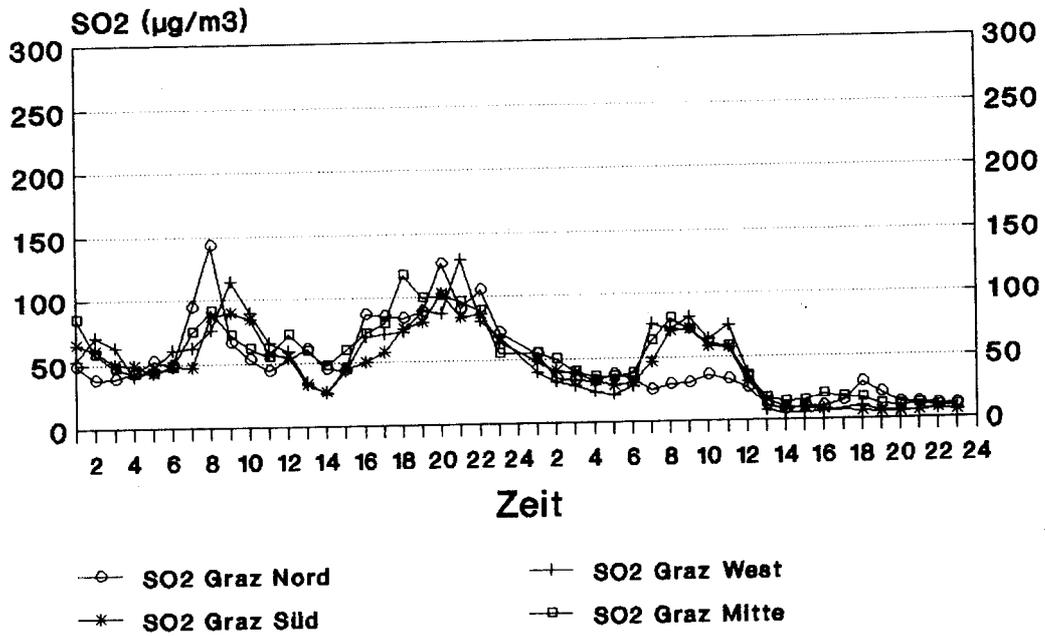


Abb. 66

Graz
27. - 28. 1. 1990

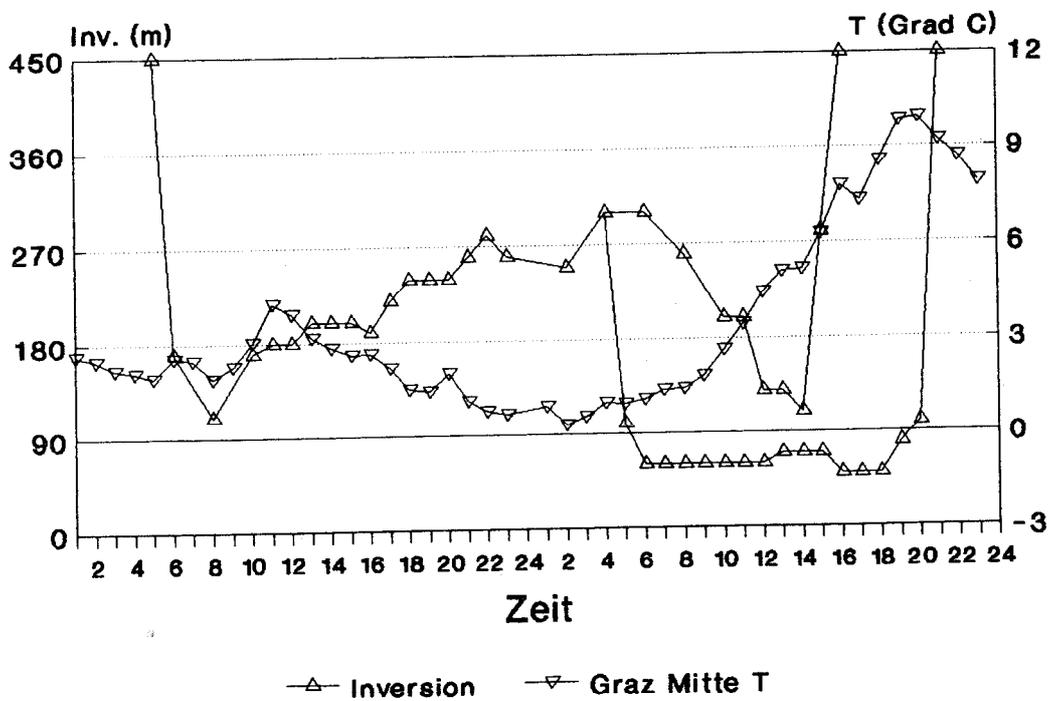
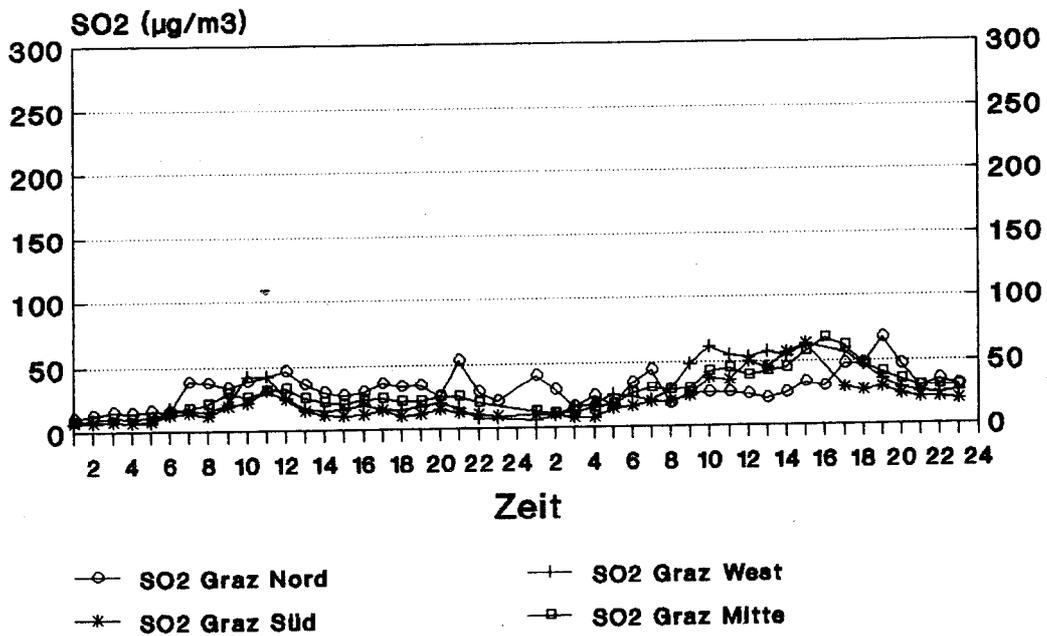


Abb. 67

Graz

Windrichtung

17. - 18. 1. 1990

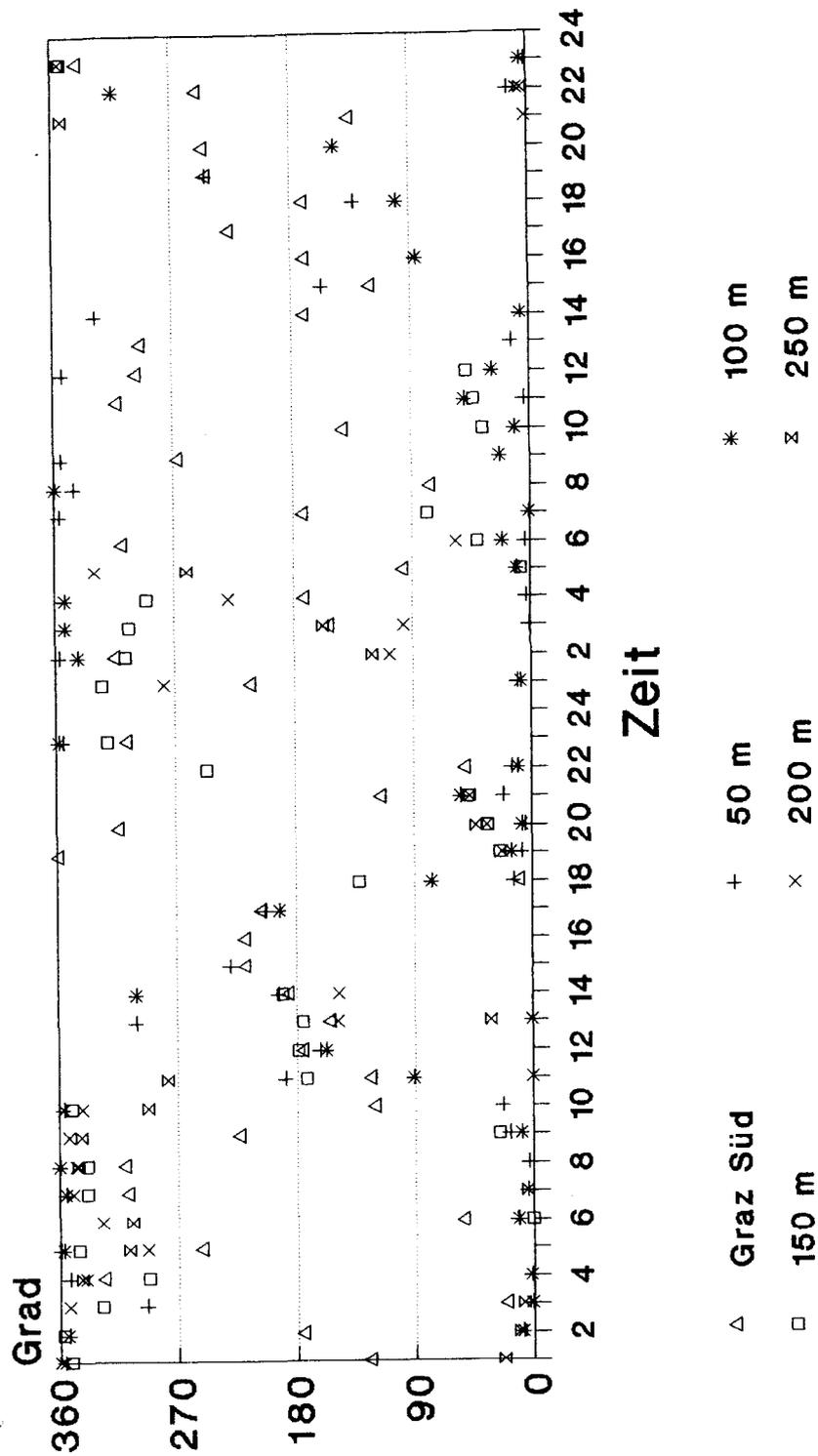


Abb. 68

Graz
Windgeschwindigkeit
17. - 18.1. 1990

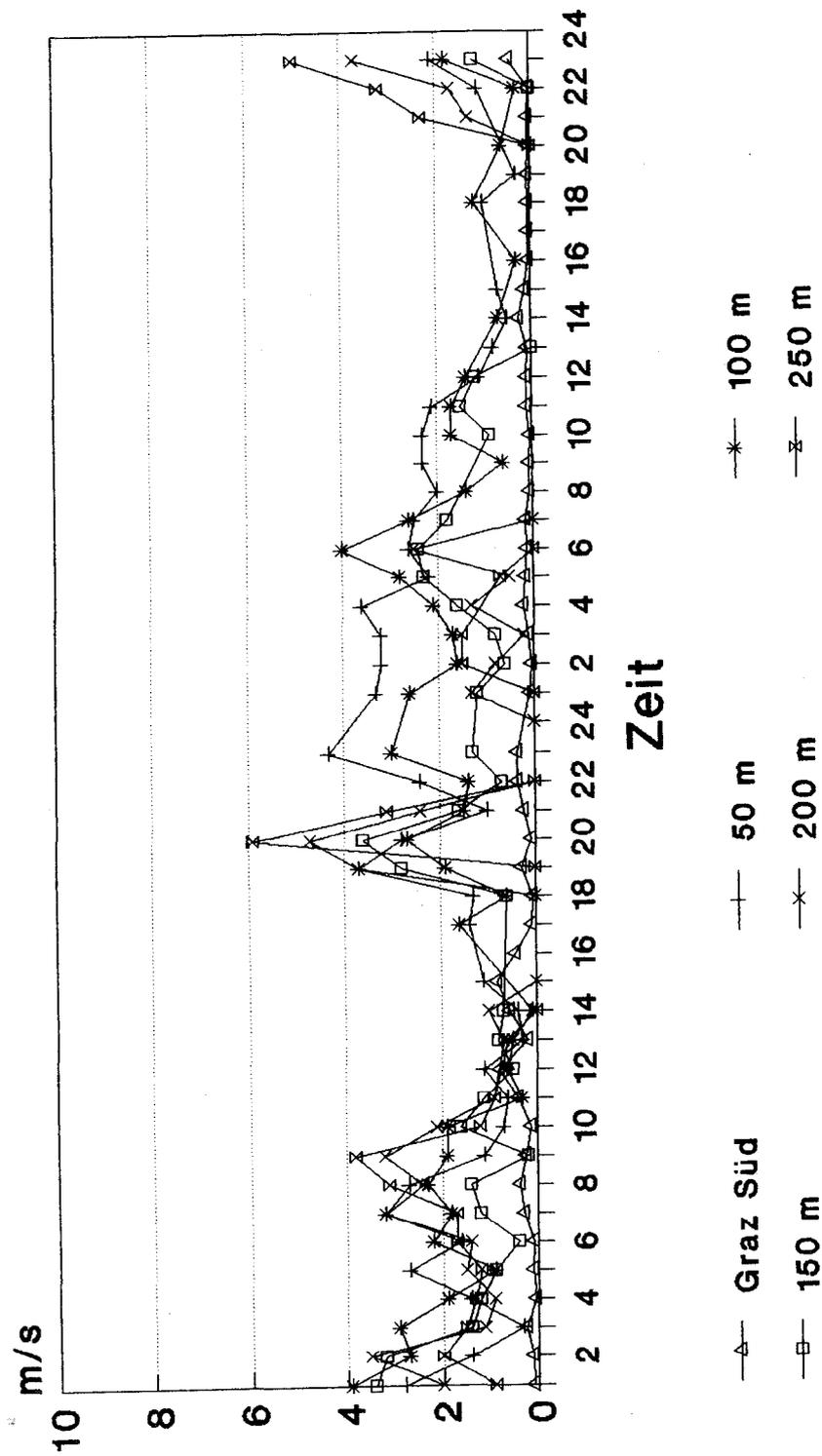


Abb. 69

Graz Windrichtung 19. - 20.1. 1990

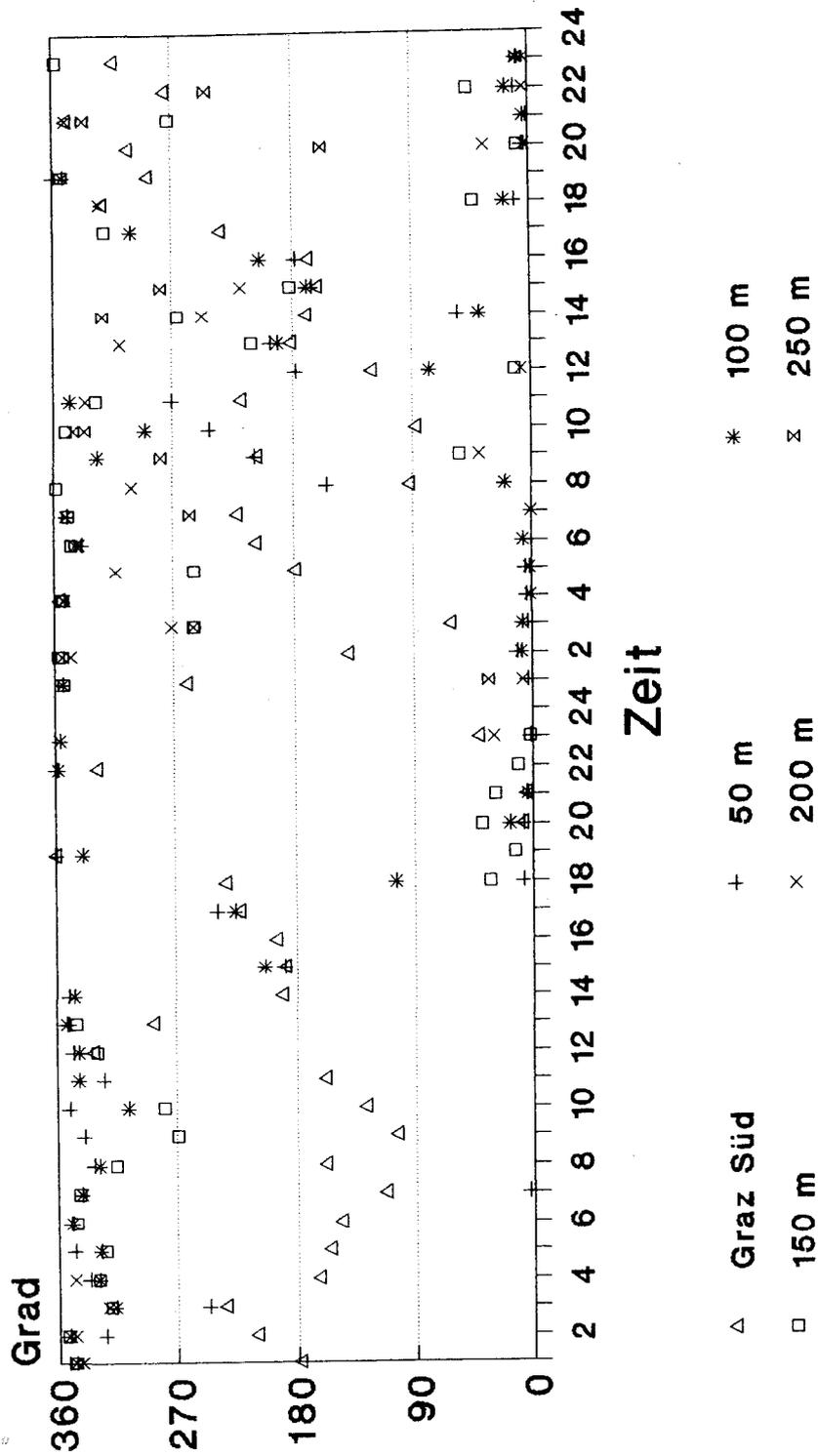


Abb. 70

Graz
Windgeschwindigkeit
19. - 20. 1. 1990

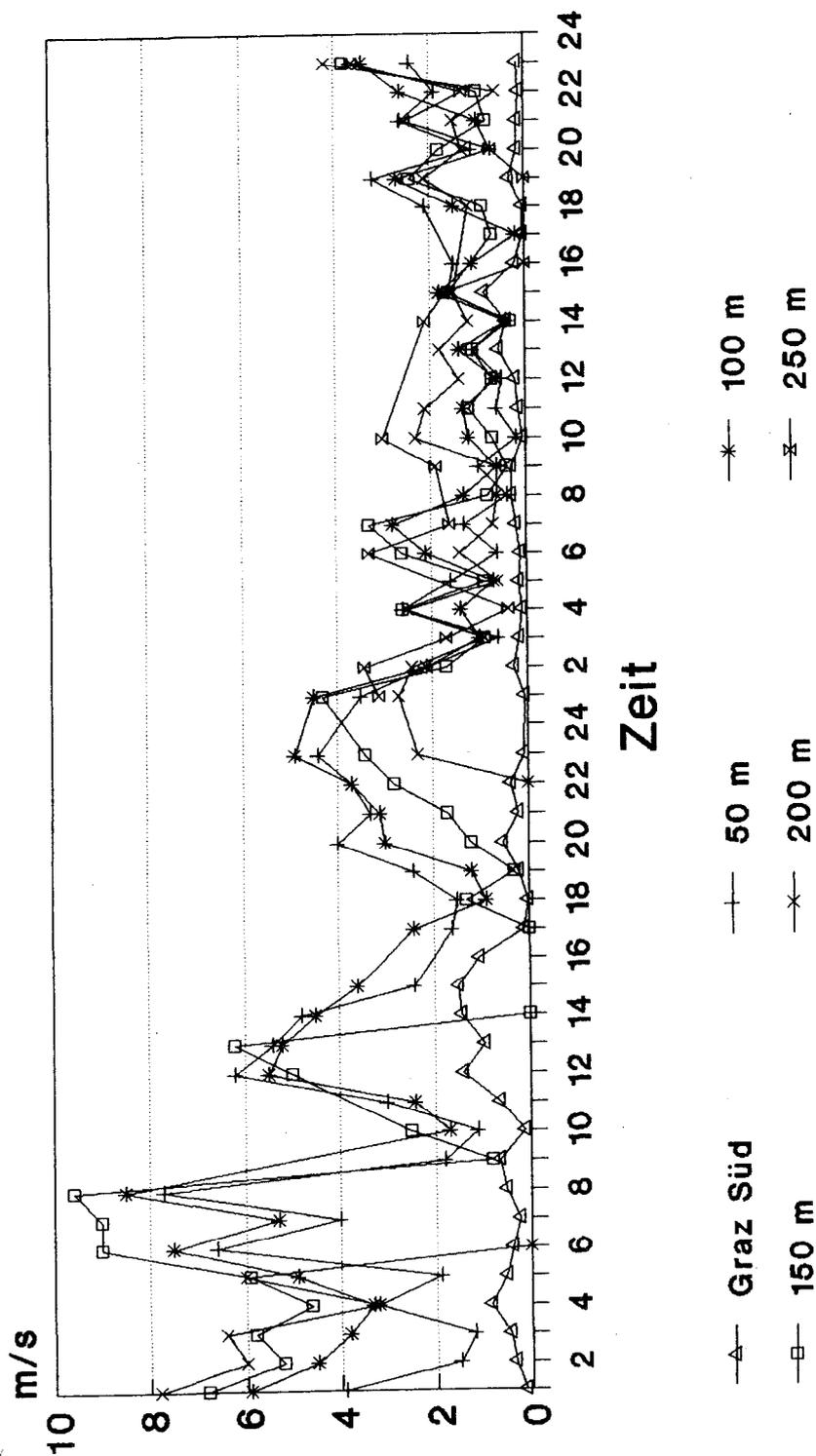


Abb. 71

Graz Windrichtung 21. - 22. 1. 1990

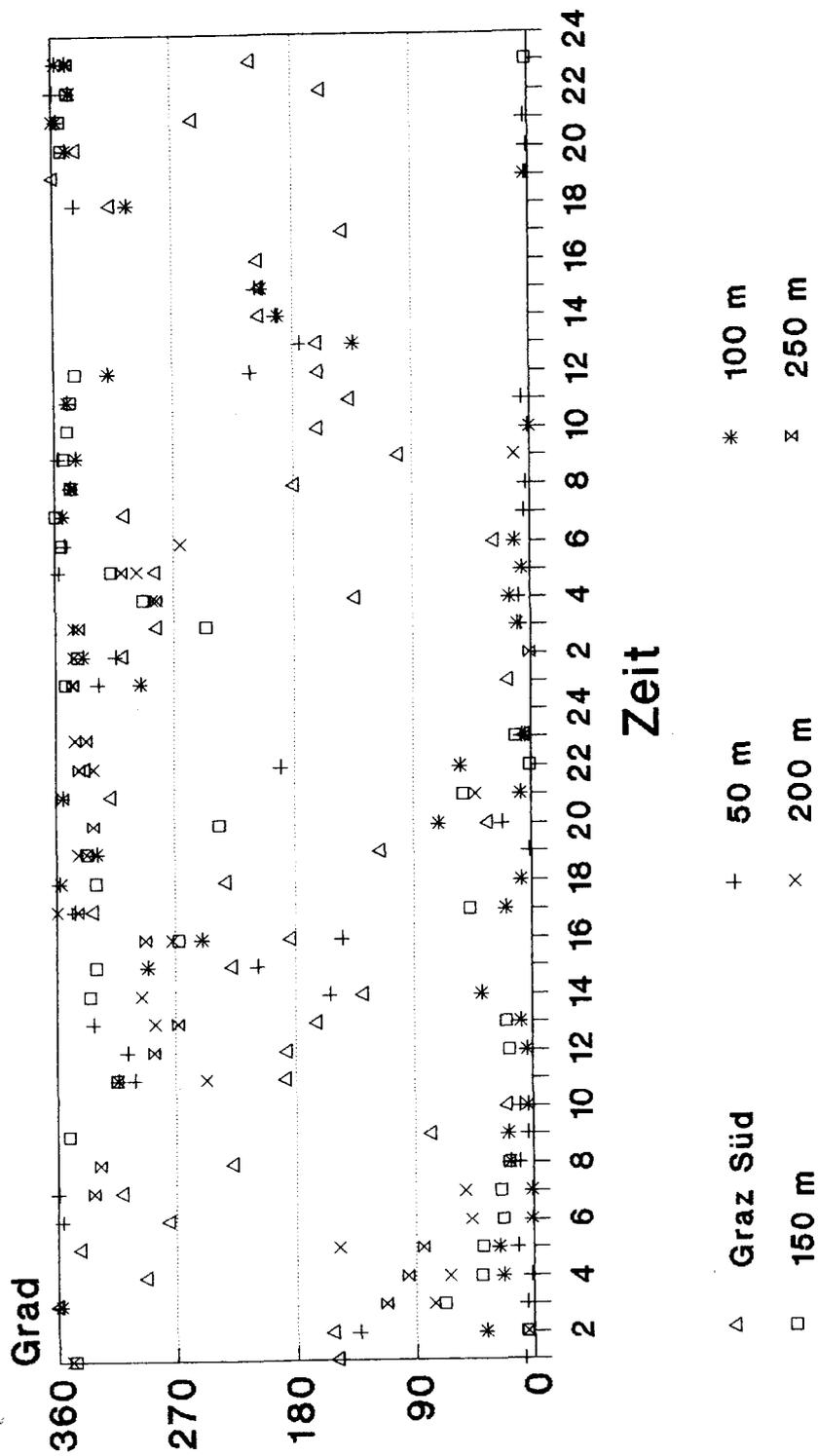


Abb. 72

Graz

Windgeschwindigkeit

21. - 22. 1. 1990

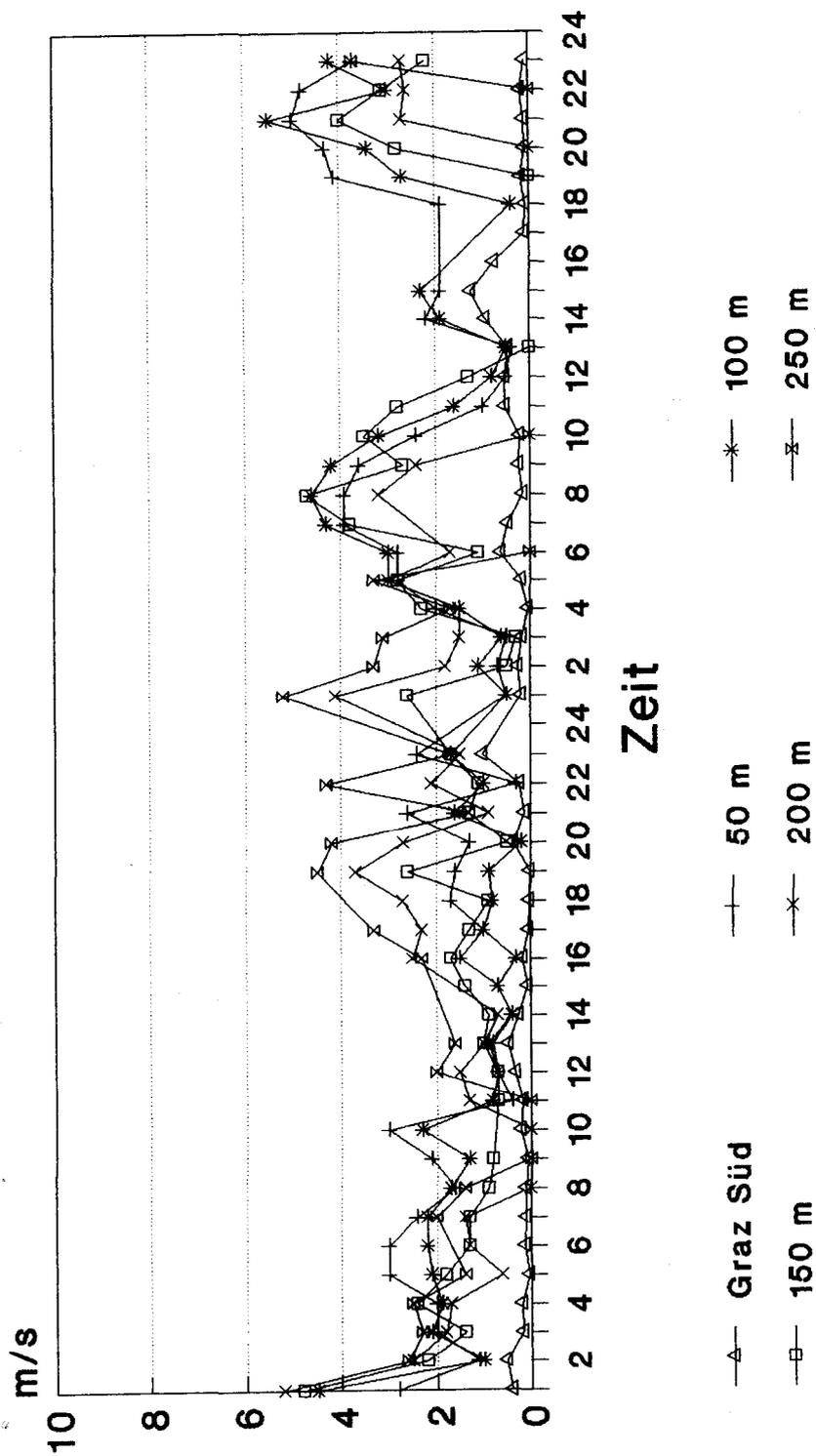


Abb. 73

Graz
Windgeschwindigkeit
23. - 24.1. 1990

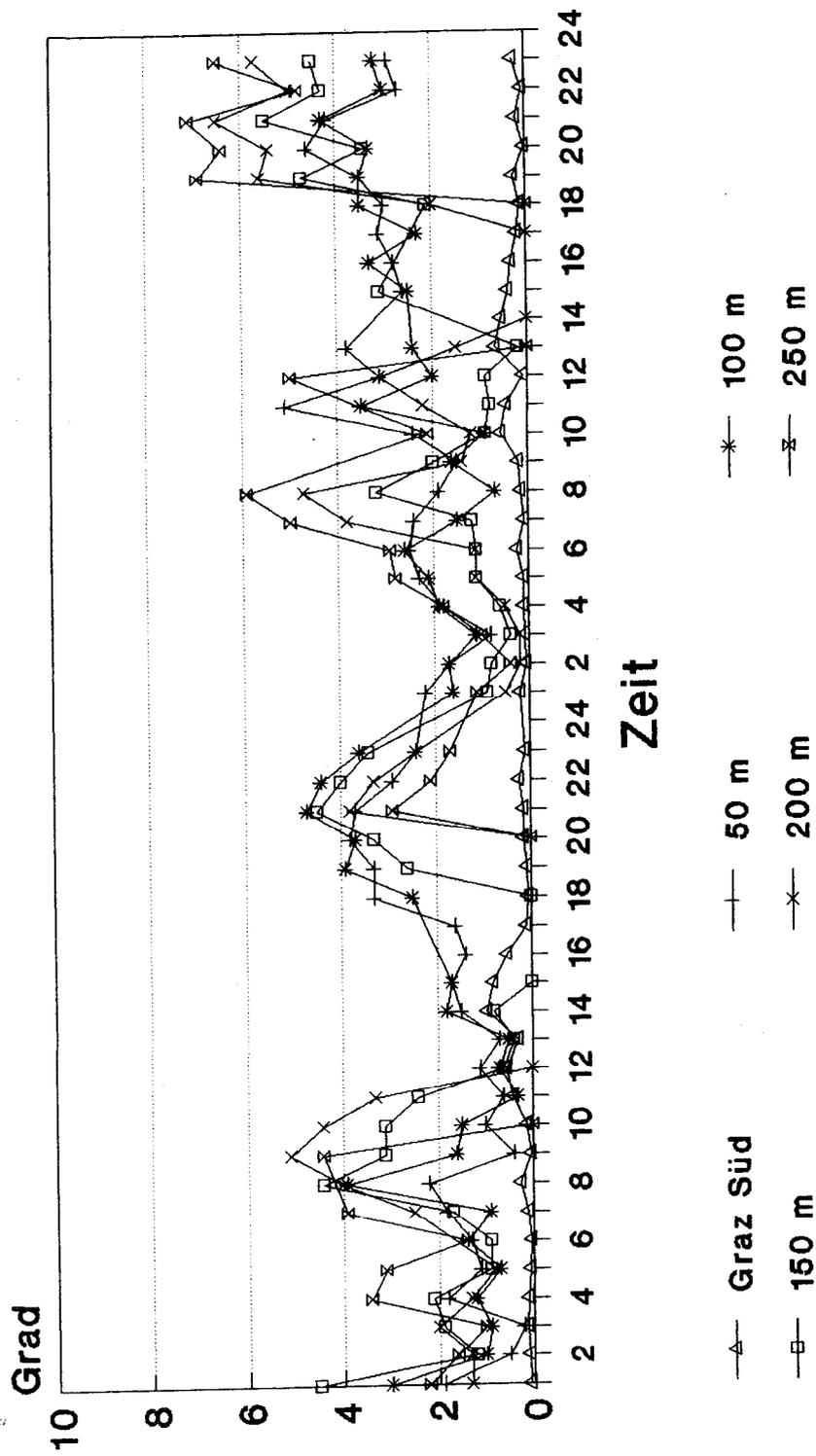


Abb. 75

Graz

Windrichtung

25. - 26.1. 1990

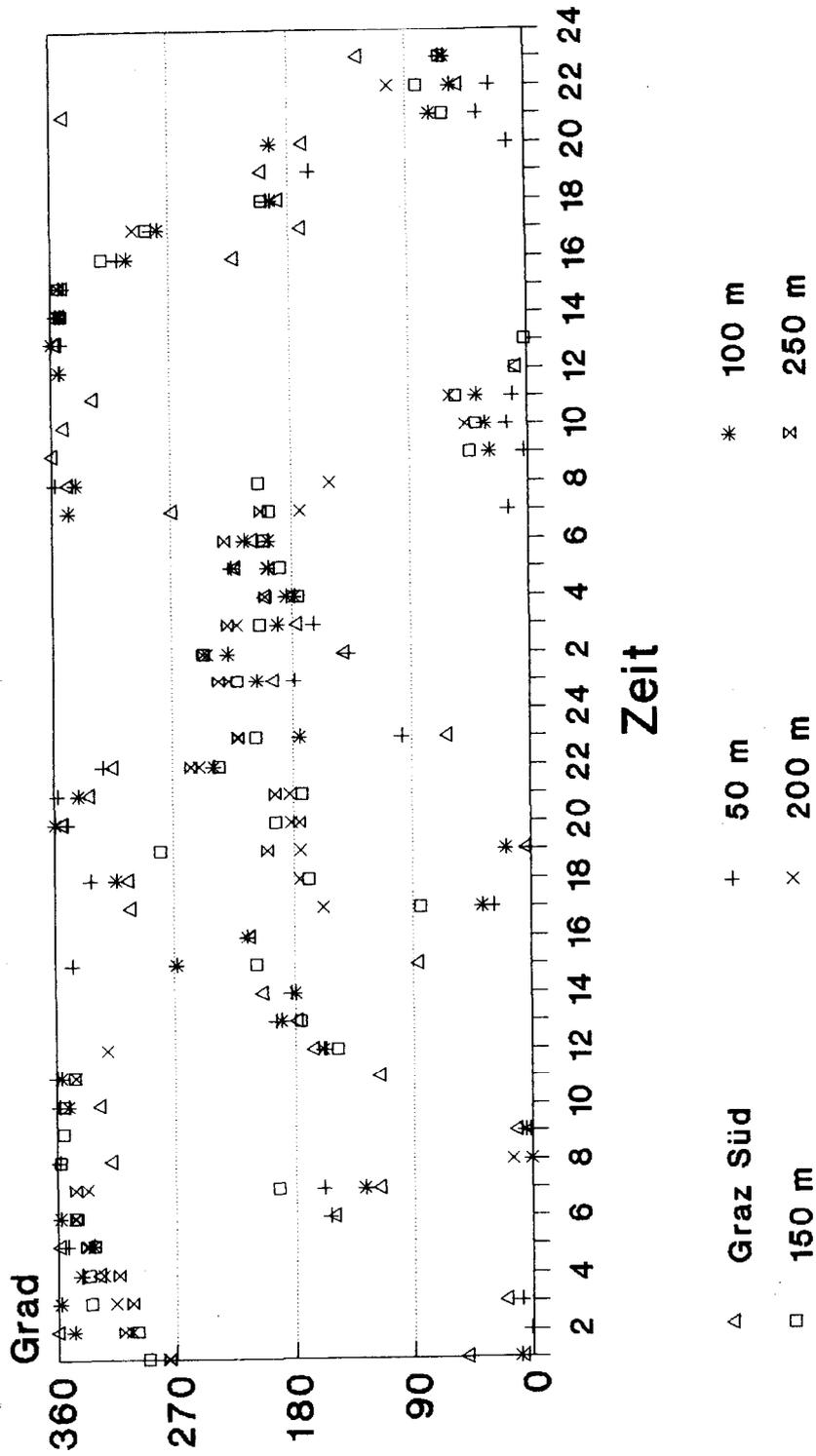


Abb. 76

Graz
Windgeschwindigkeit
25. - 26. 1. 1990

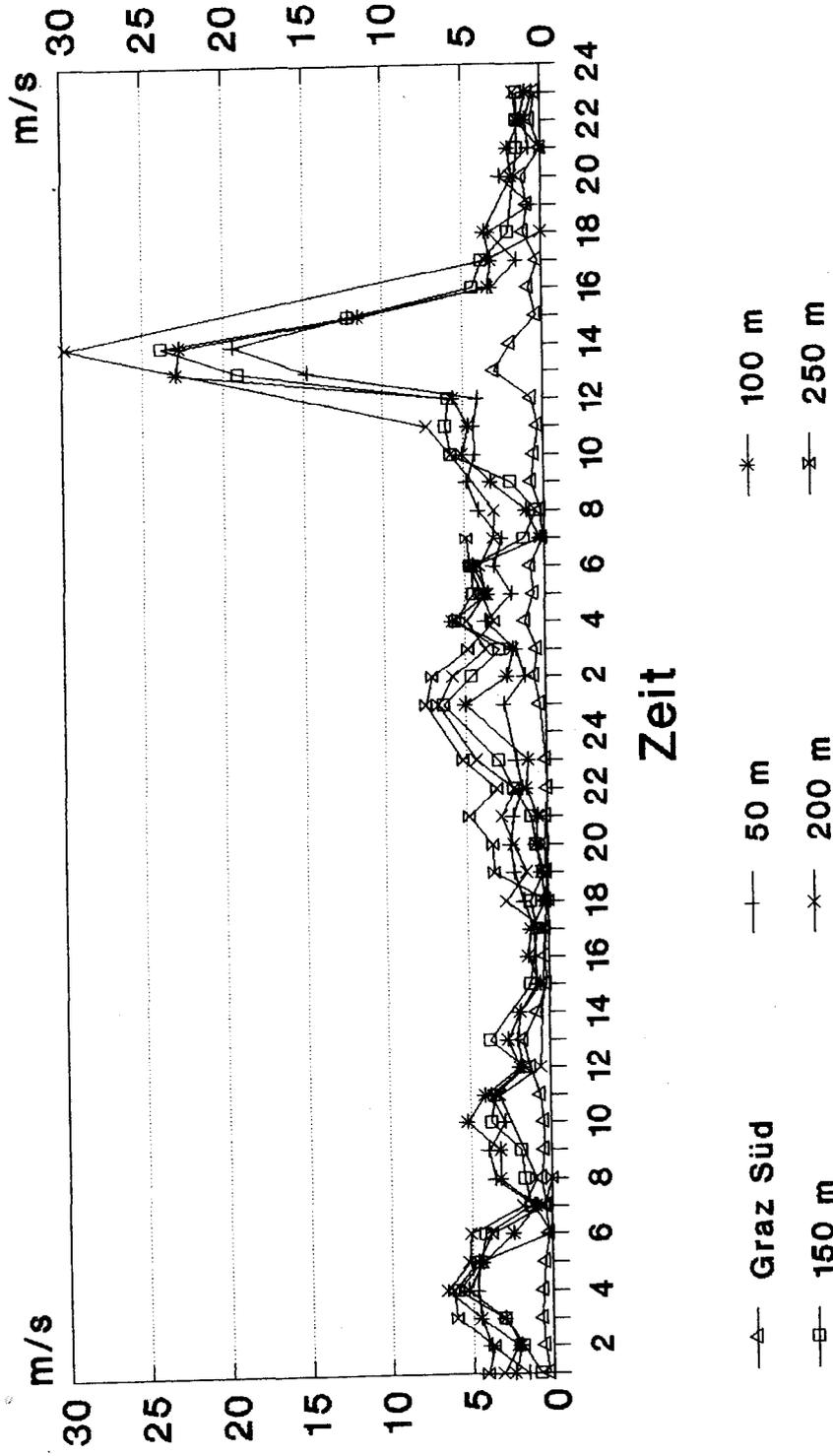


Abb. 77

Graz

Windrichtung

27. - 28. 1. 1990

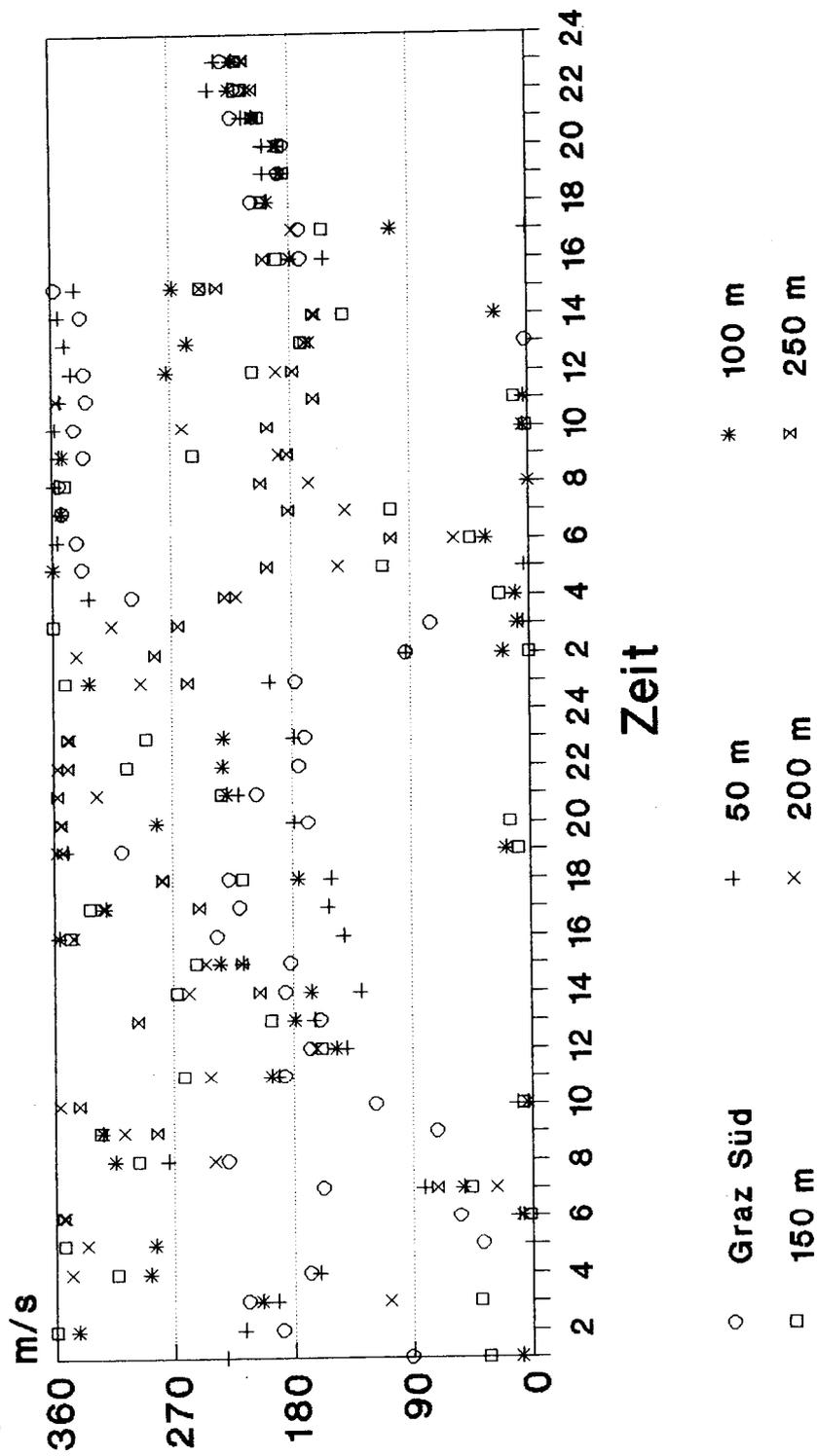


Abb. 78

Graz
Windgeschwindigkeit
27. - 28. 1. 1990

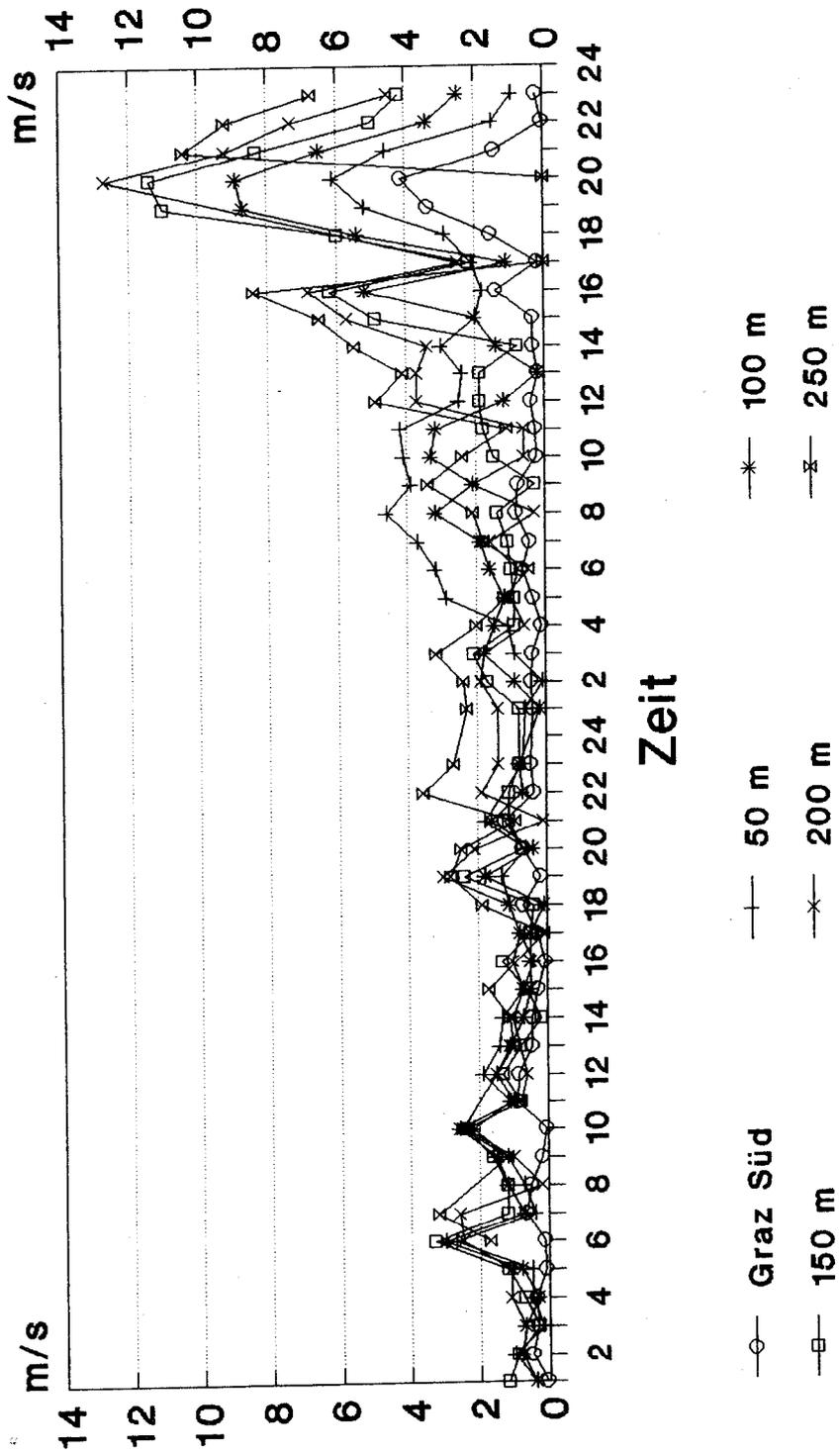


Abb. 79

Graz Wetter
3. - 12. Februar 1990
Termine 7, 13 und 19 Uhr MEZ

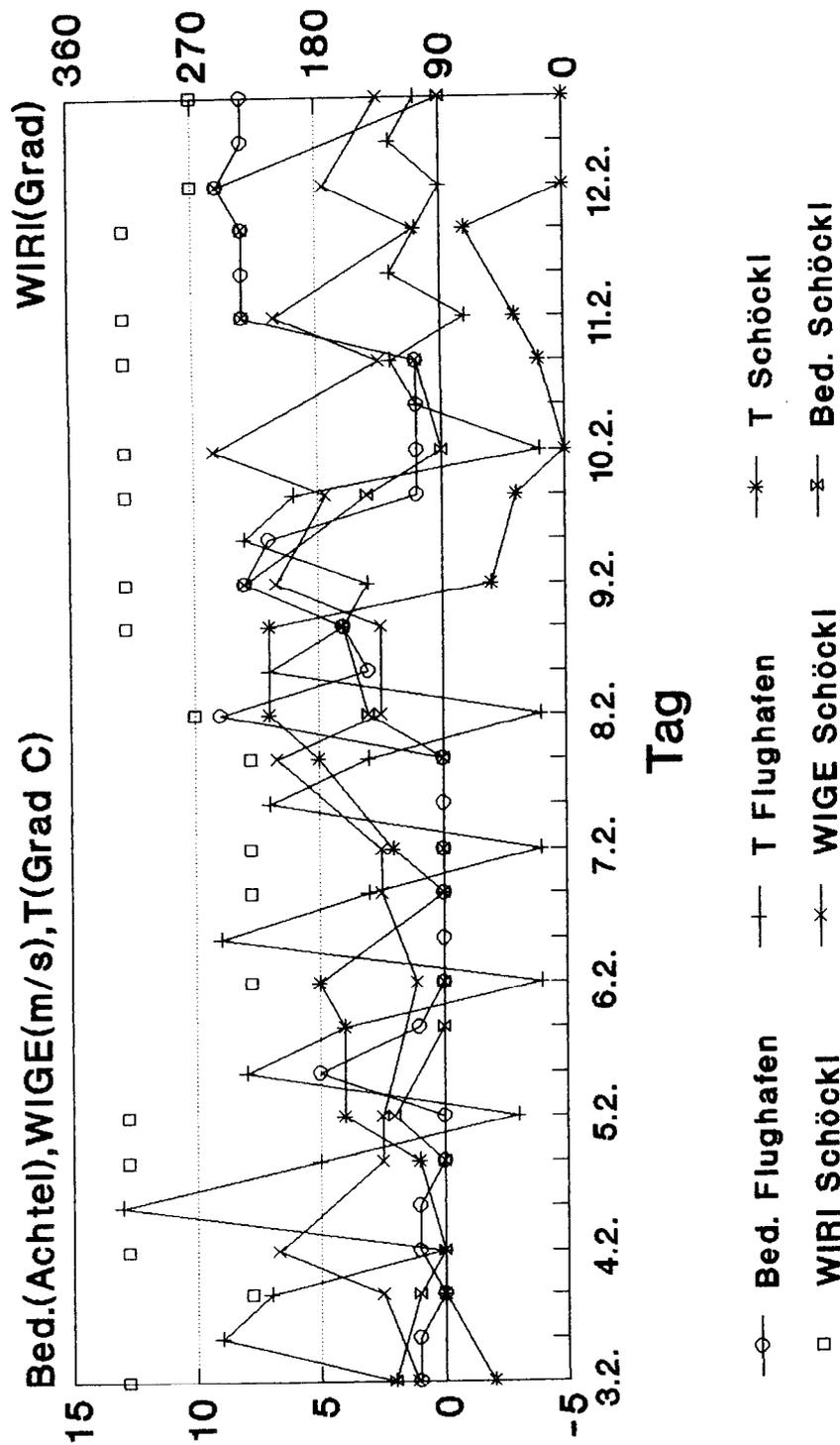


Abb. 80

Graz

4. - 5. 2. 1990

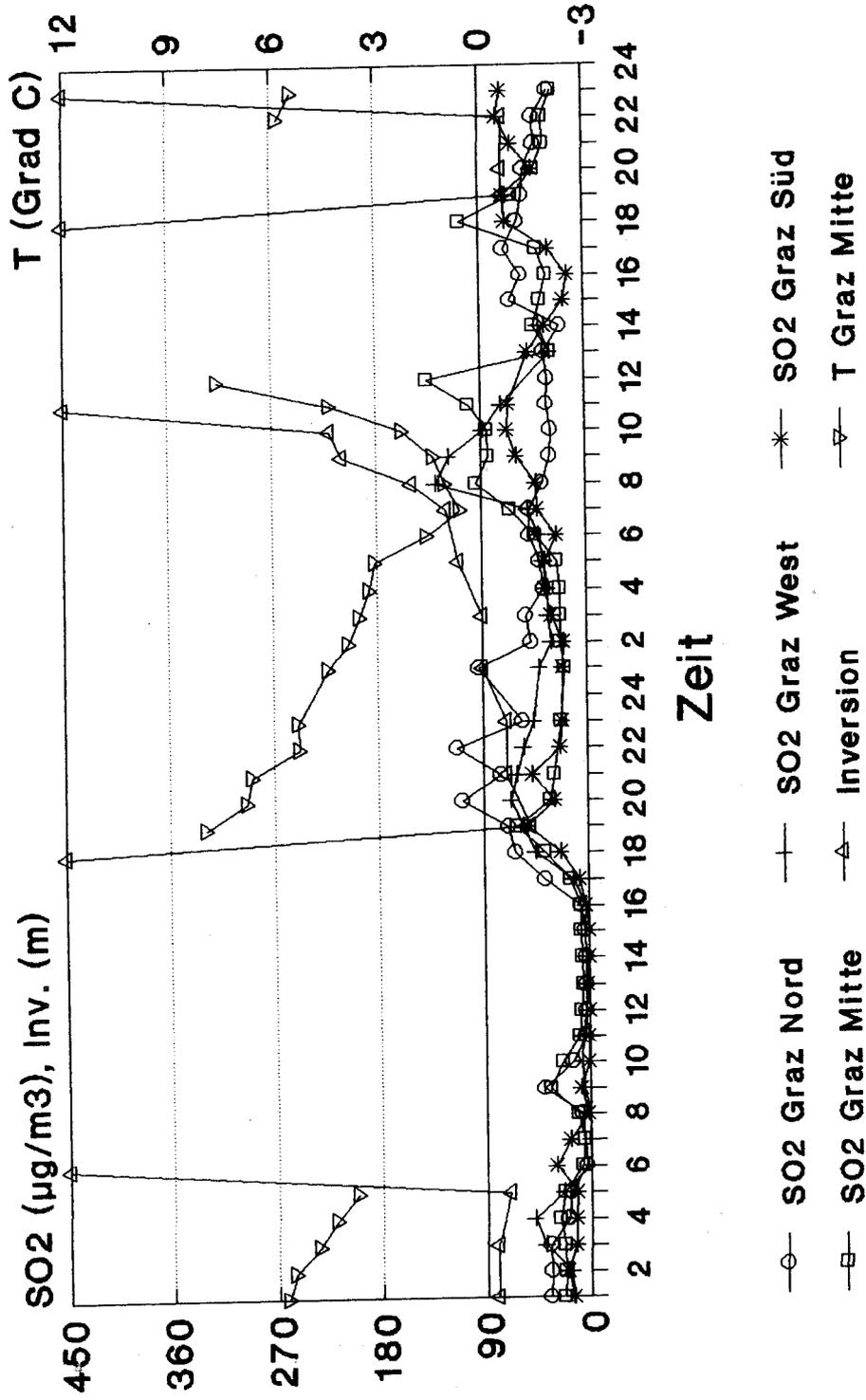


Abb. 81

Graz 6. - 7. 2. 1990

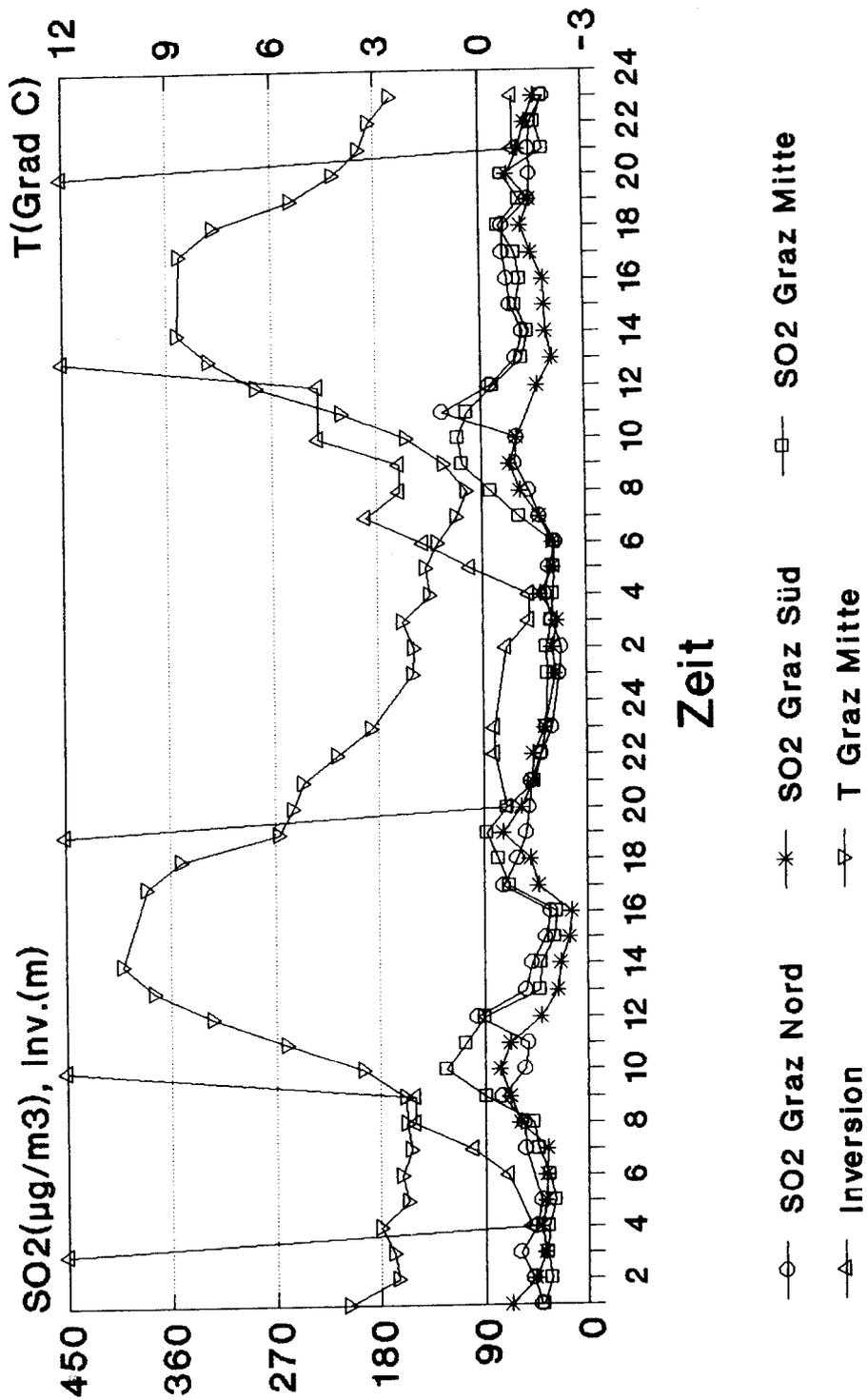


Abb. 82

Graz SO2 8. - 9. 2. 1990

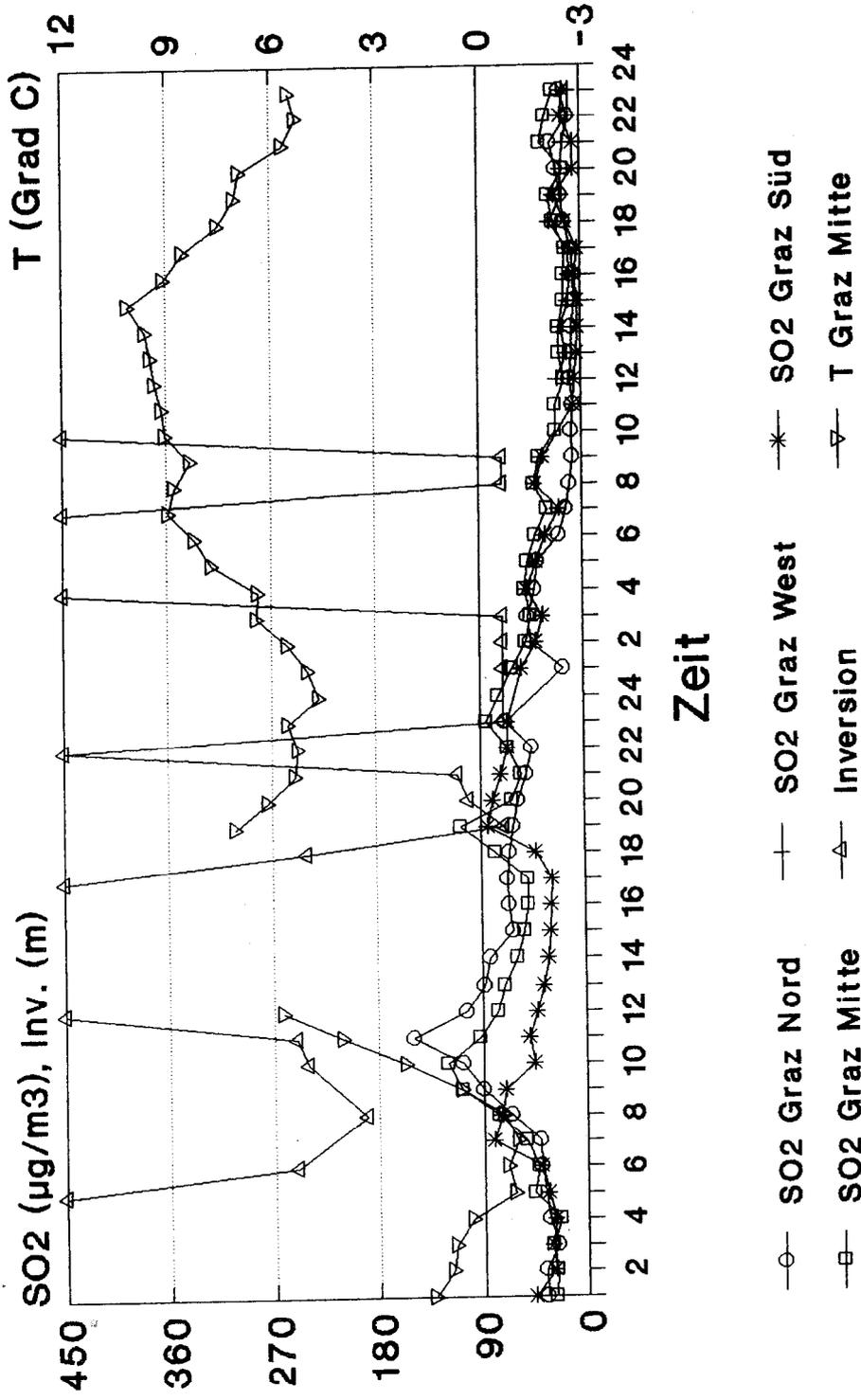


Abb. 83

Graz

Windgeschwindigkeit

4. - 5. 2. 1990

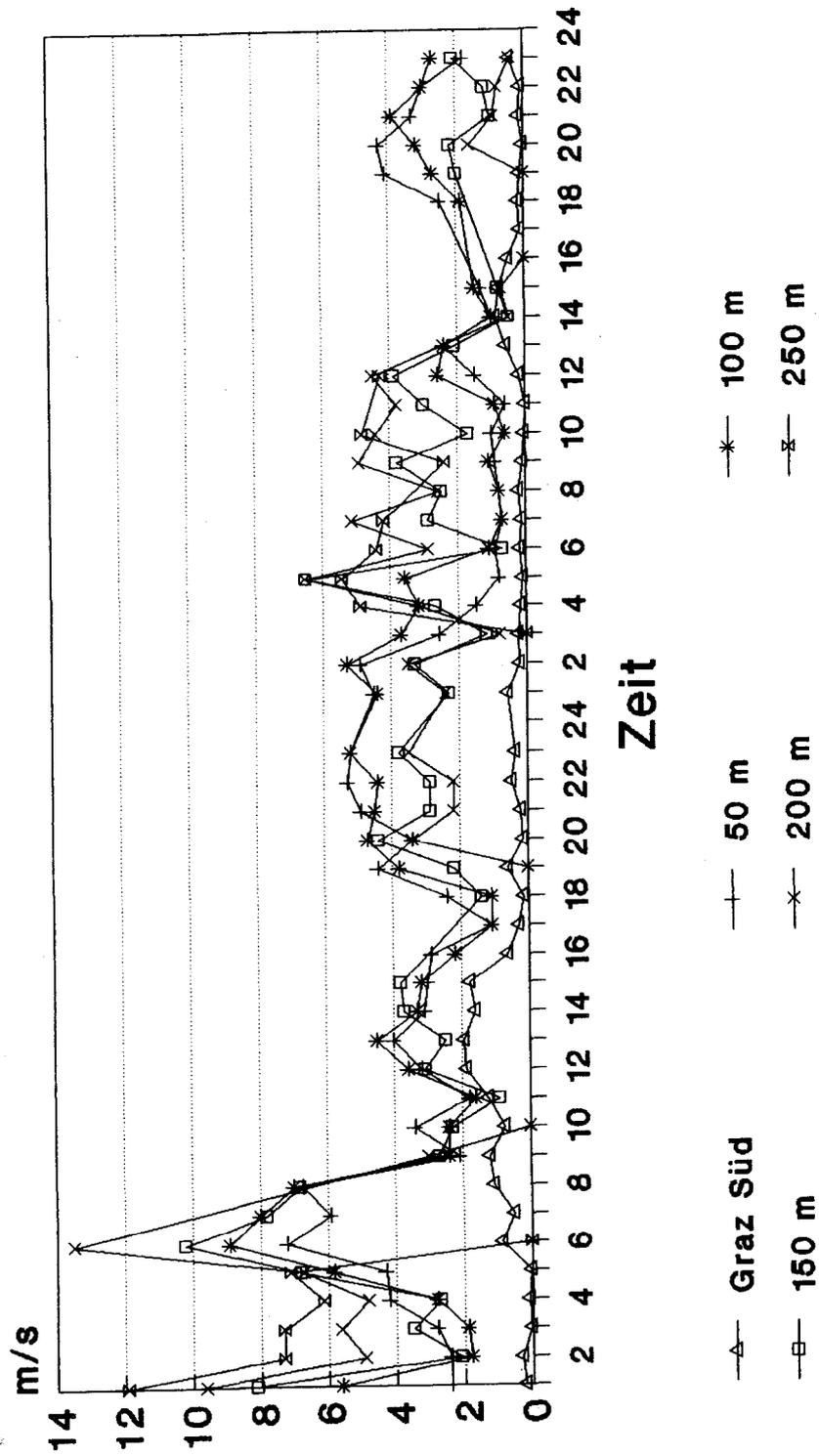


Abb. 85

Graz

Windrichtung

6. - 7. 2. 1990

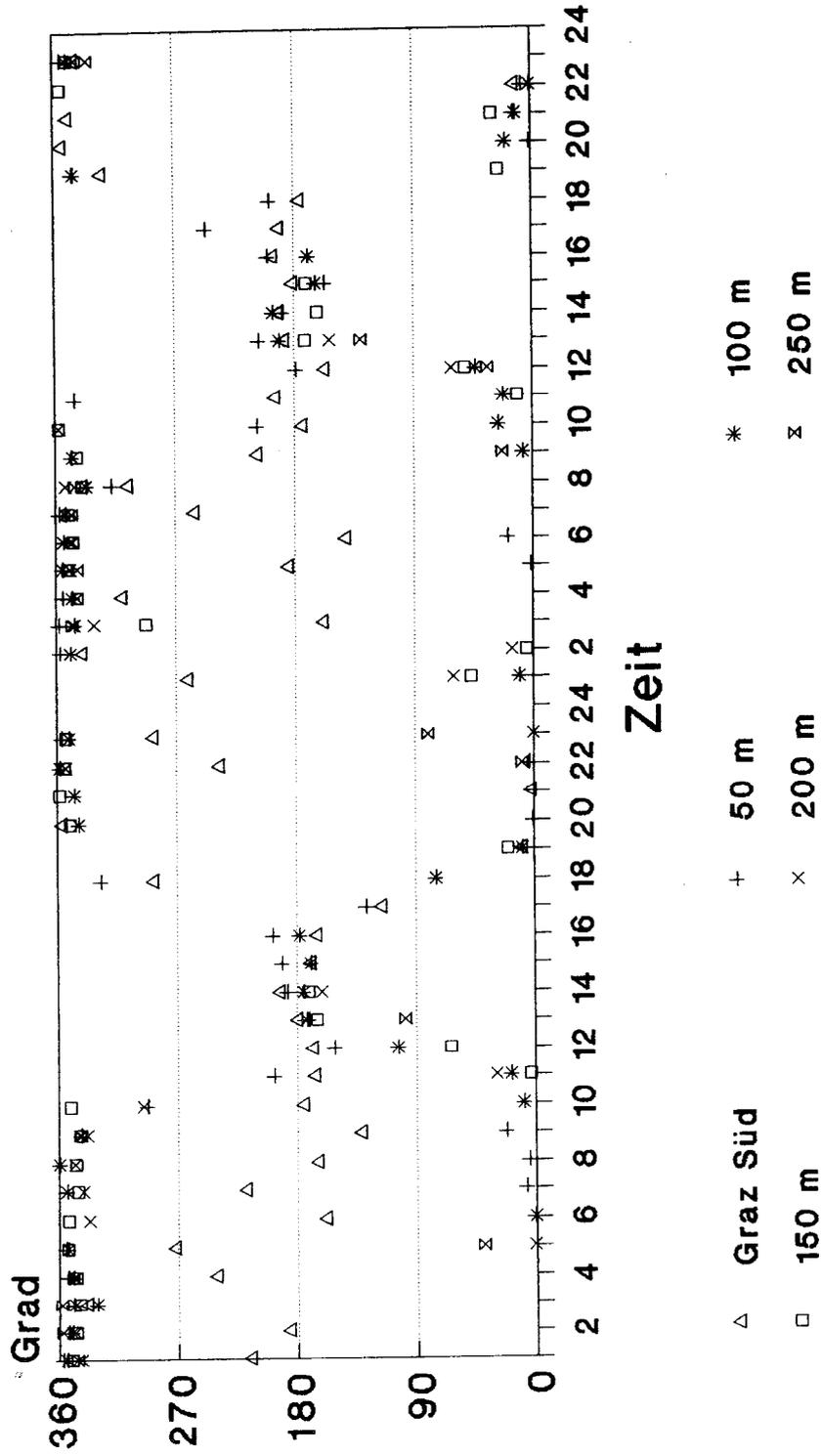


Abb. 86

Graz
Windgeschwindigkeit
6. - 7. 2. 1990

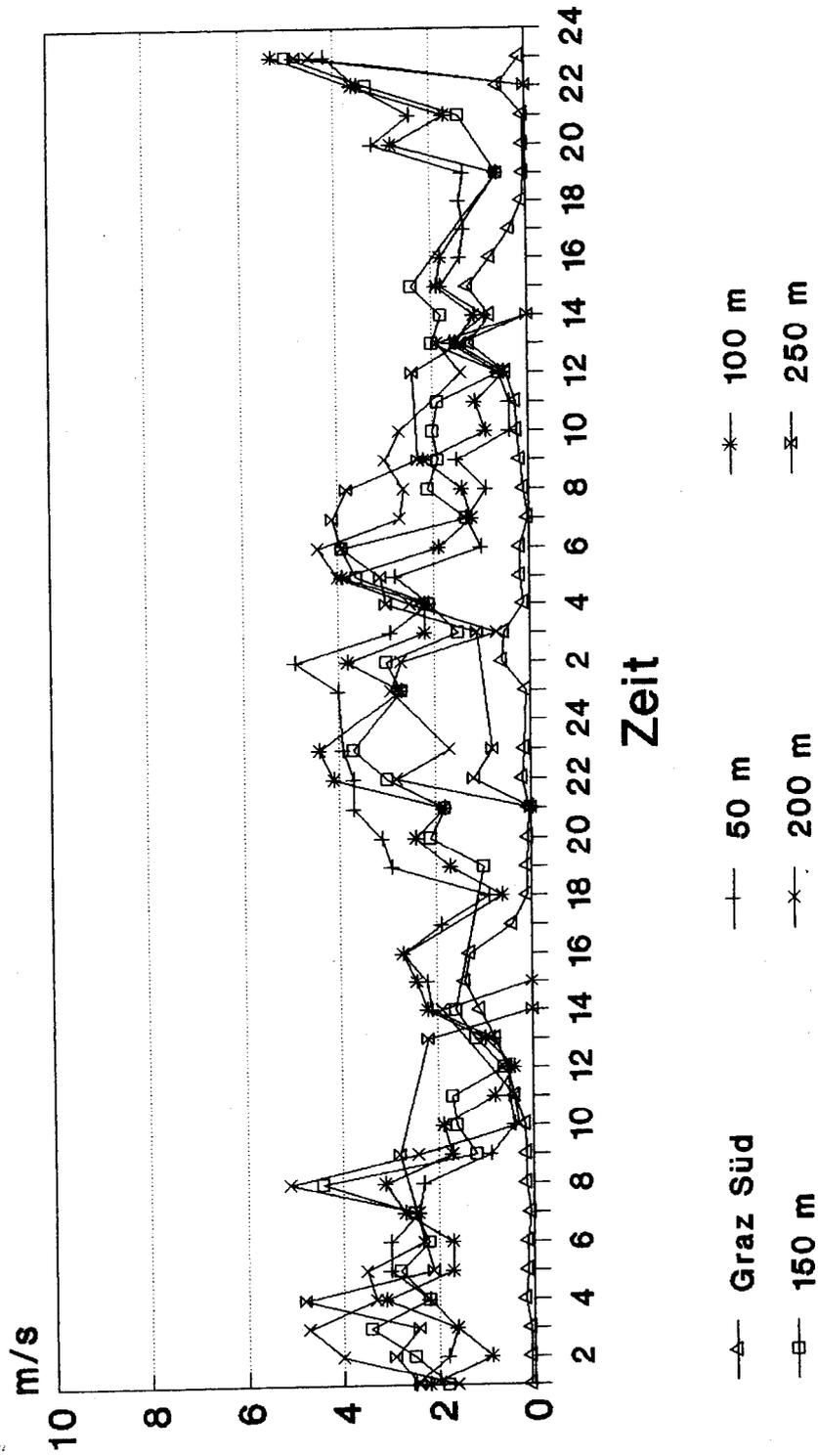


Abb. 87

Graz

Windrichtung

8. - 9. 2. 1990

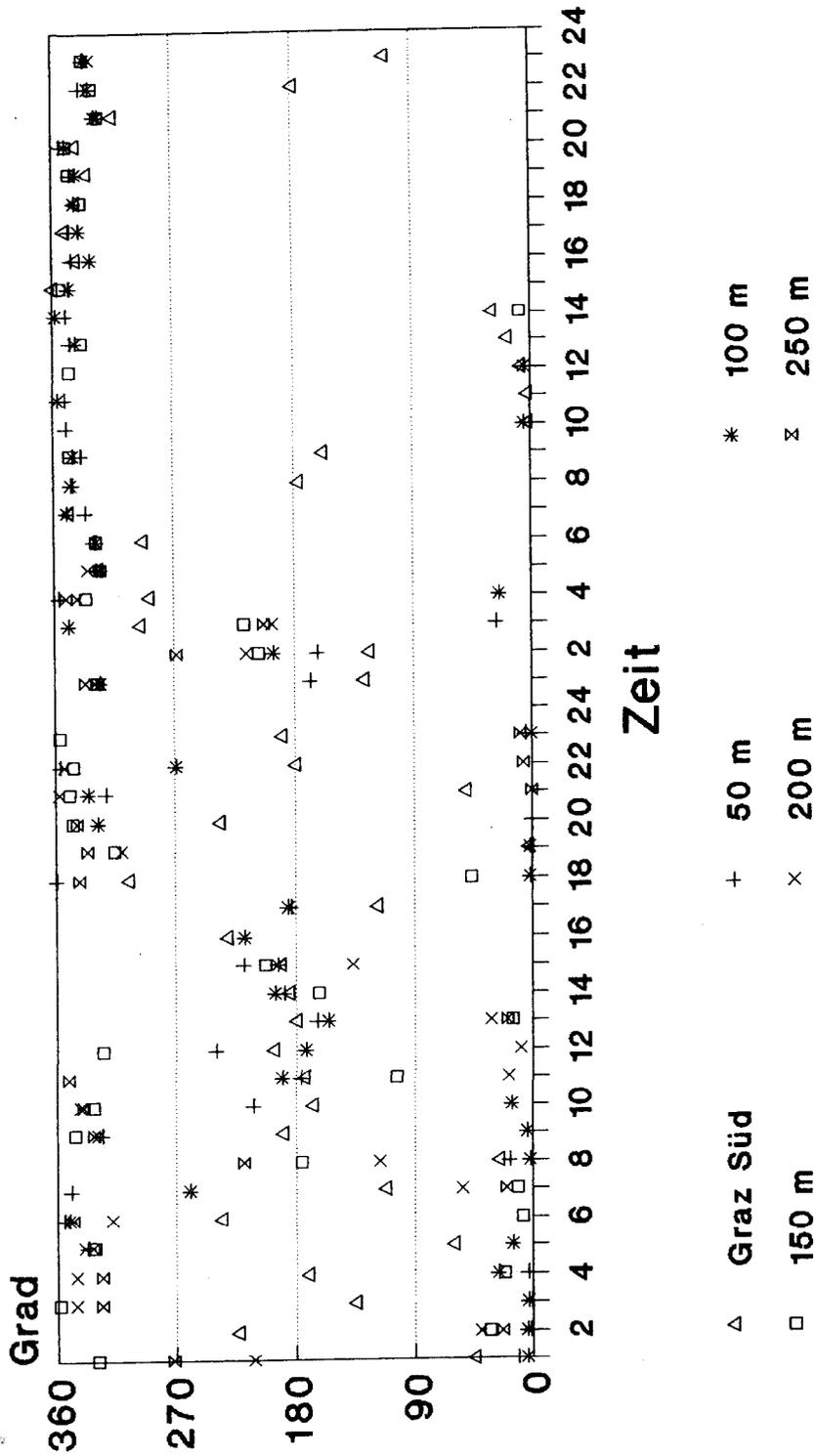


Abb. 88

Graz

Windgeschwindigkeit

8. - 9. 2. 1990

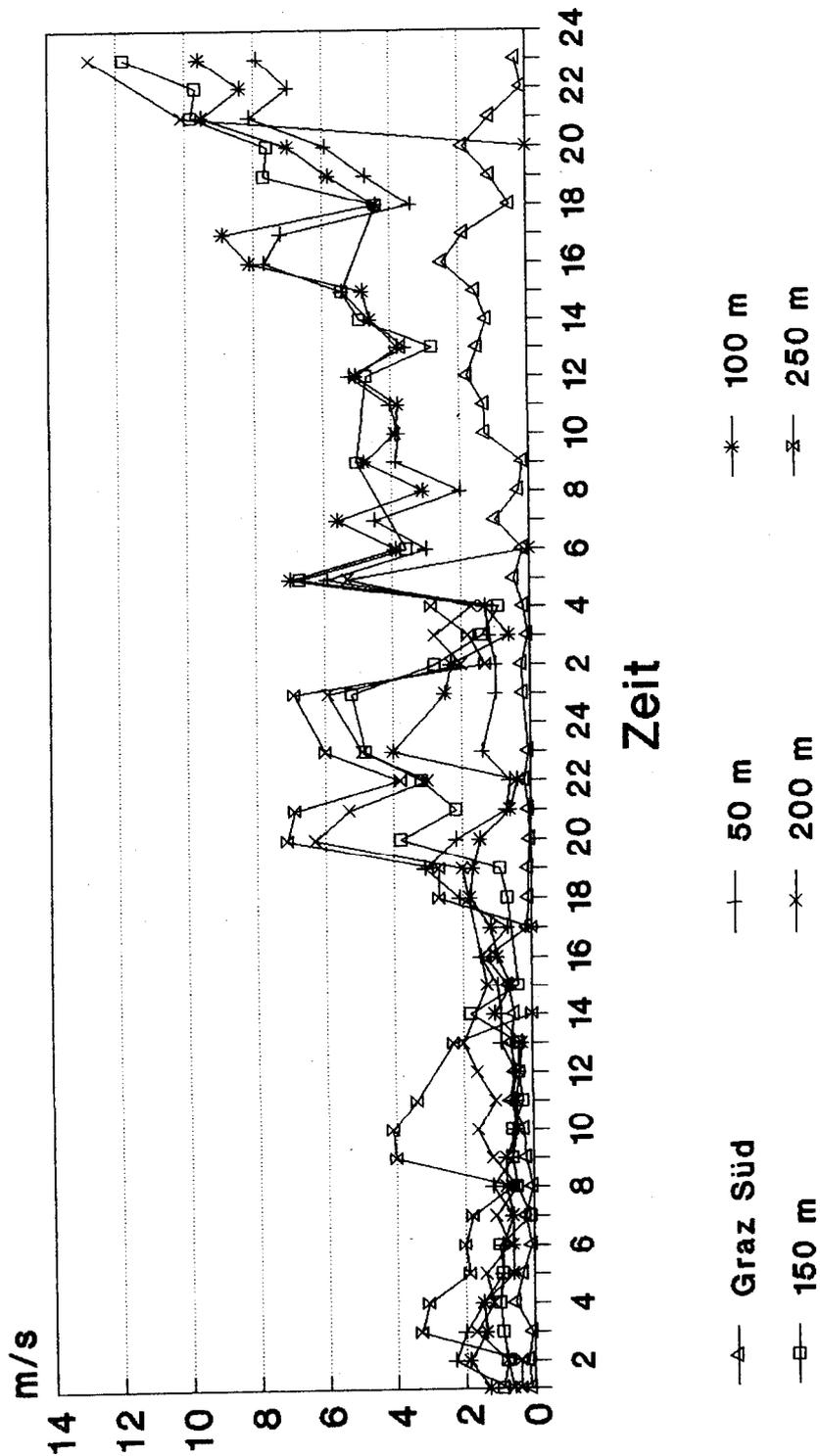


Abb. 89

Graz Wetter
1. - 12. März 1990
Termine 7, 13 und 19 Uhr MEZ

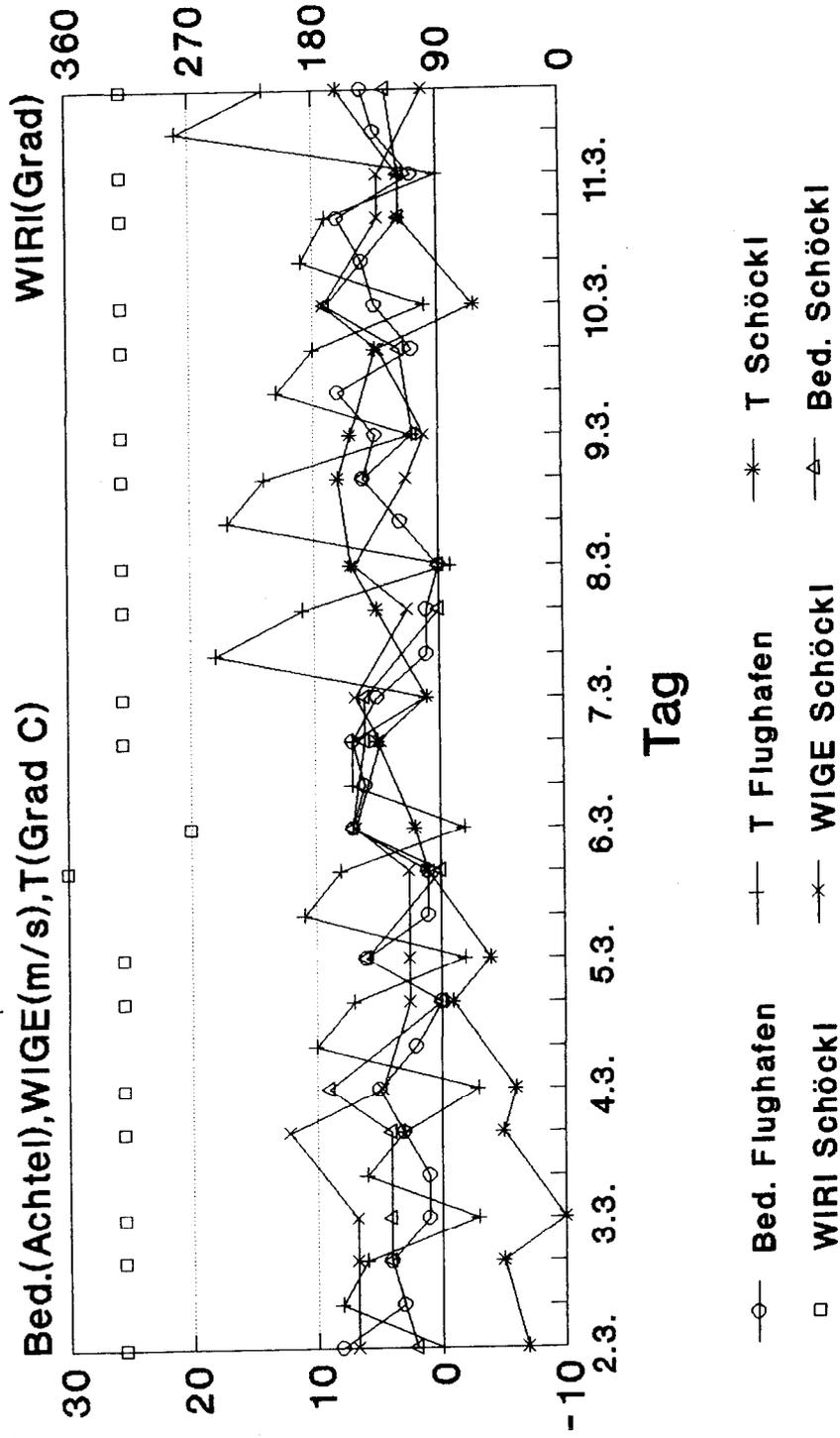
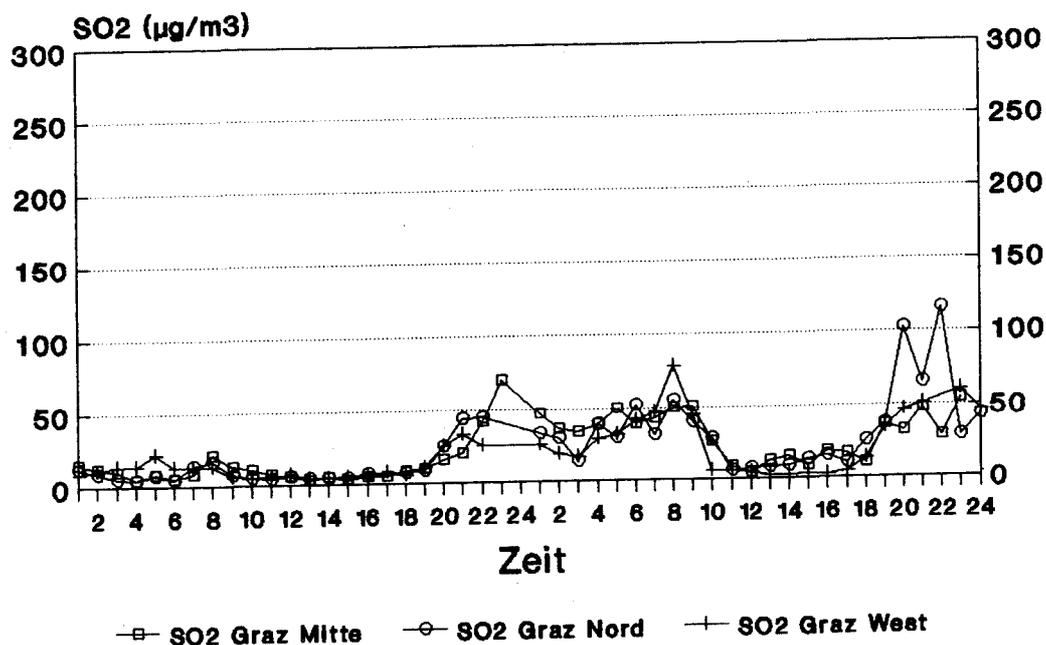


Abb. 90

Graz
3. - 4. 3. 1990



Graz
3. - 4. 3. 1990

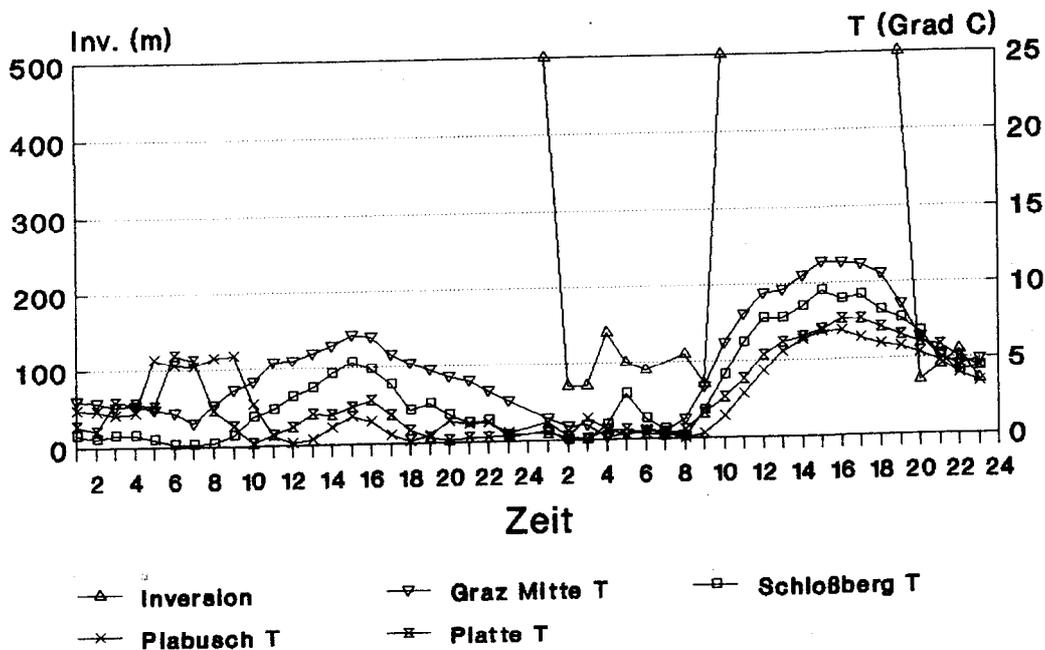
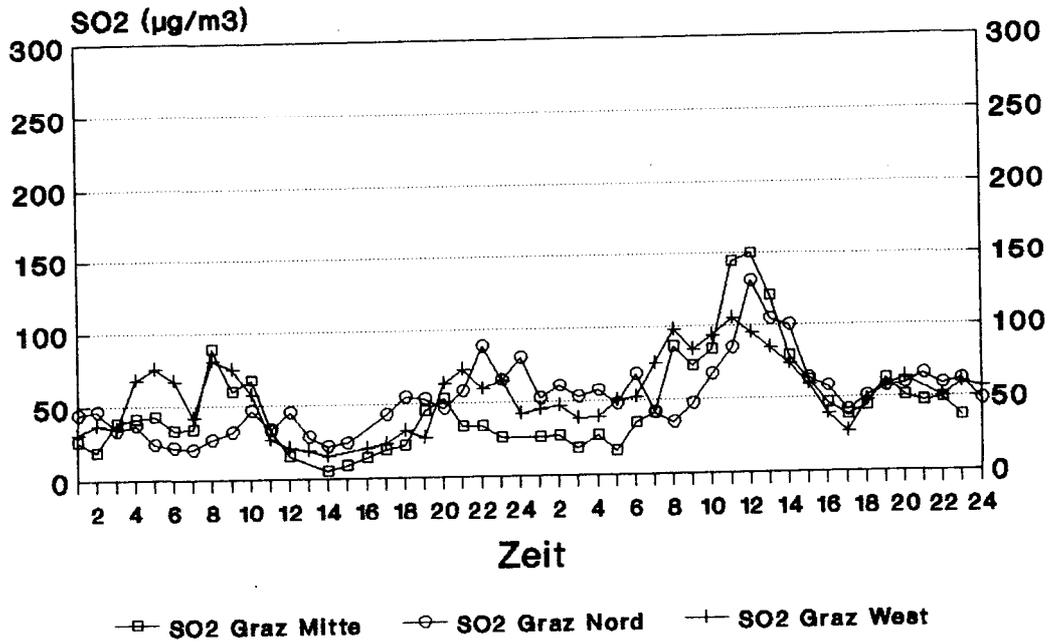


Abb. 91

Graz
5. - 6. 3. 1990



Graz
5. - 6. 3. 1990

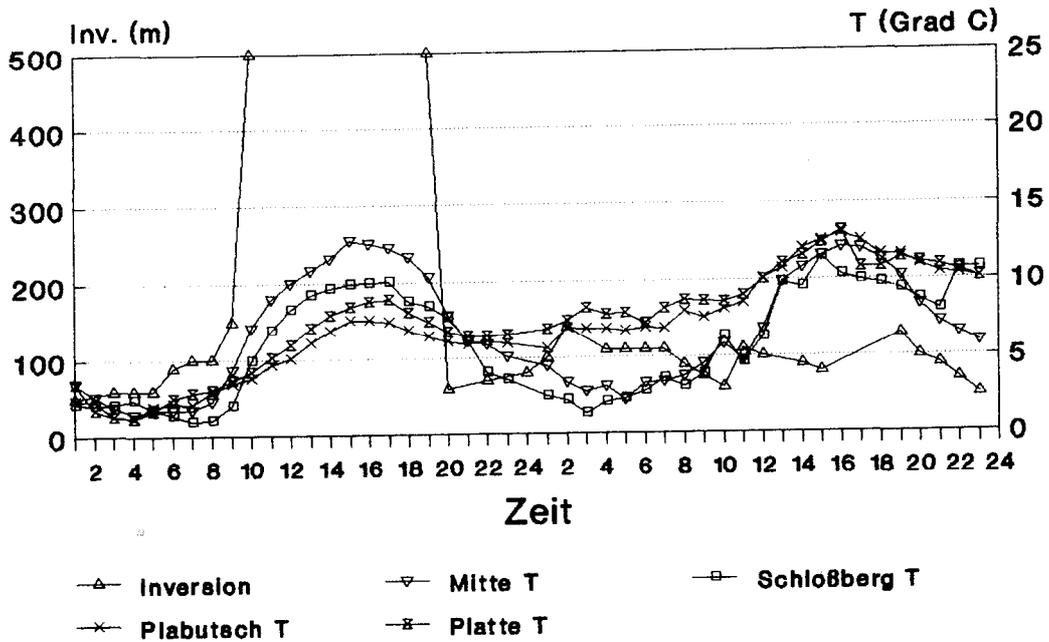
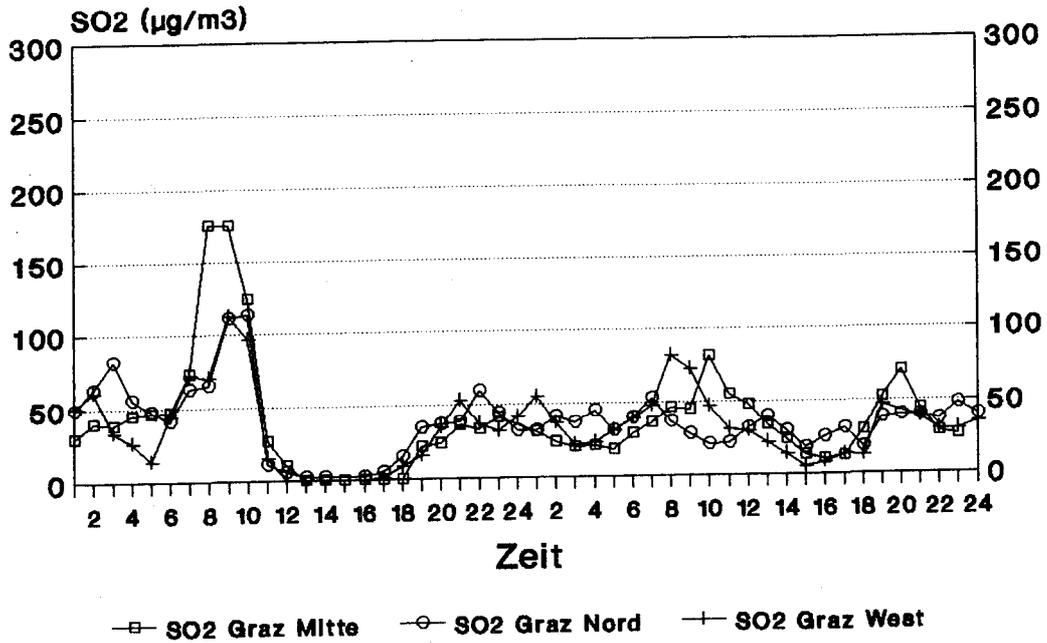


Abb. 92

Graz
7. - 8. 3. 1990



Graz
7. - 8. 3. 1990

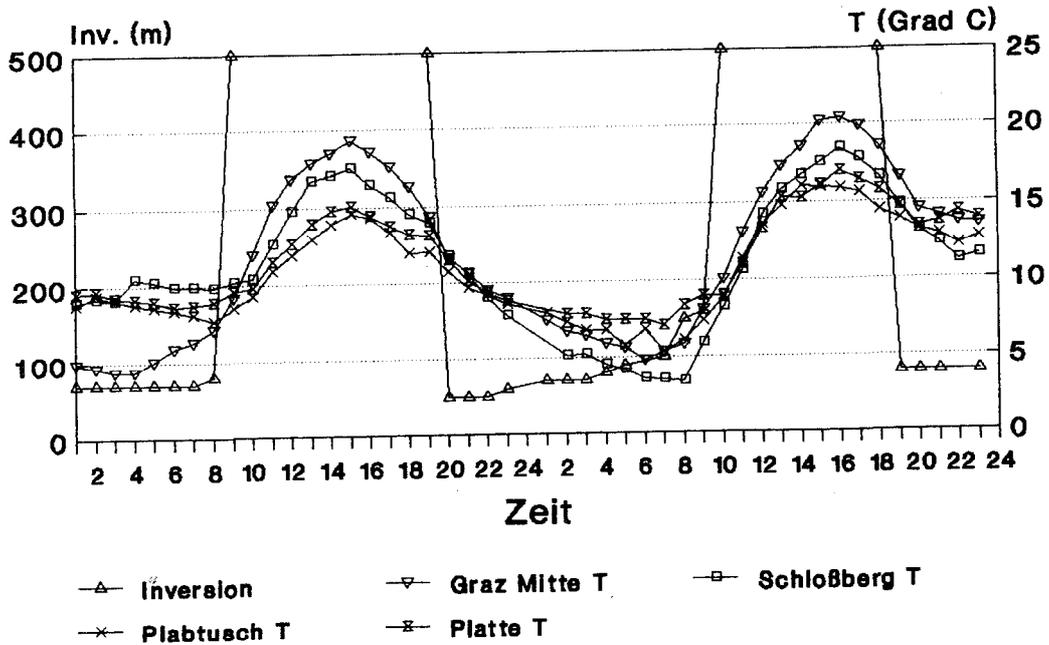
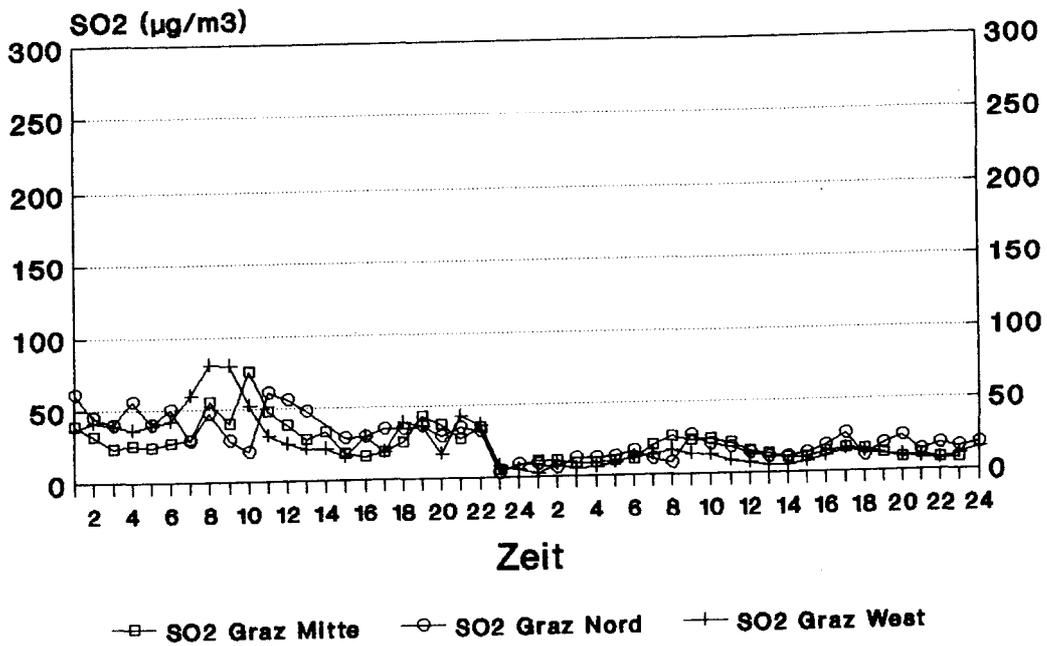


Abb. 93

Graz
9. - 10. 3. 1990



Graz
9. - 10. 3. 1990

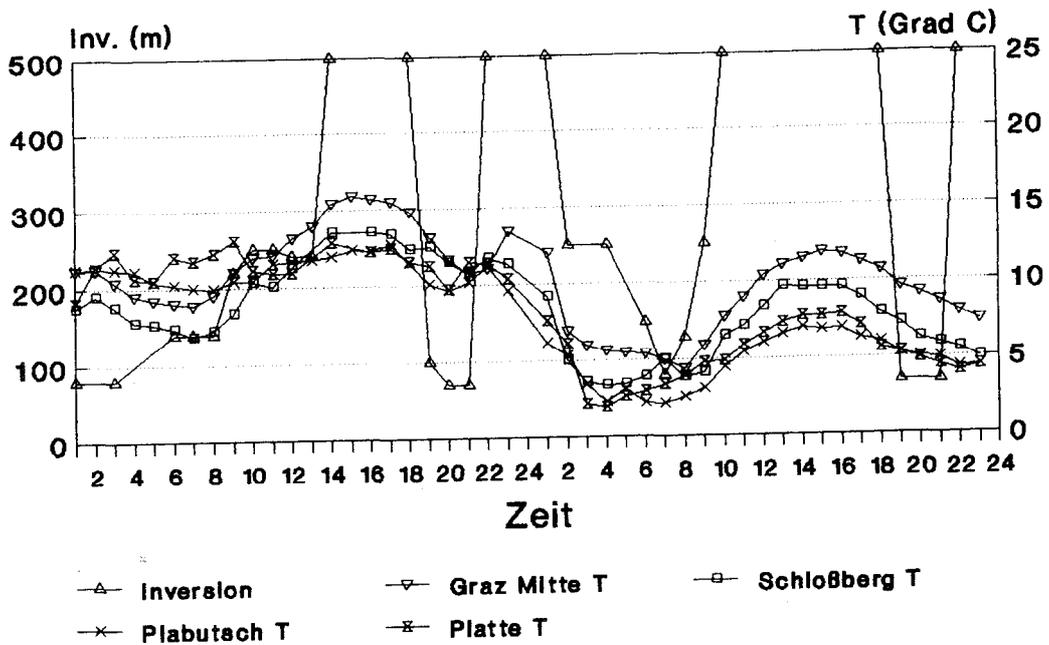


Abb. 94

Graz

Windrichtung

3. - 4. 3. 1990

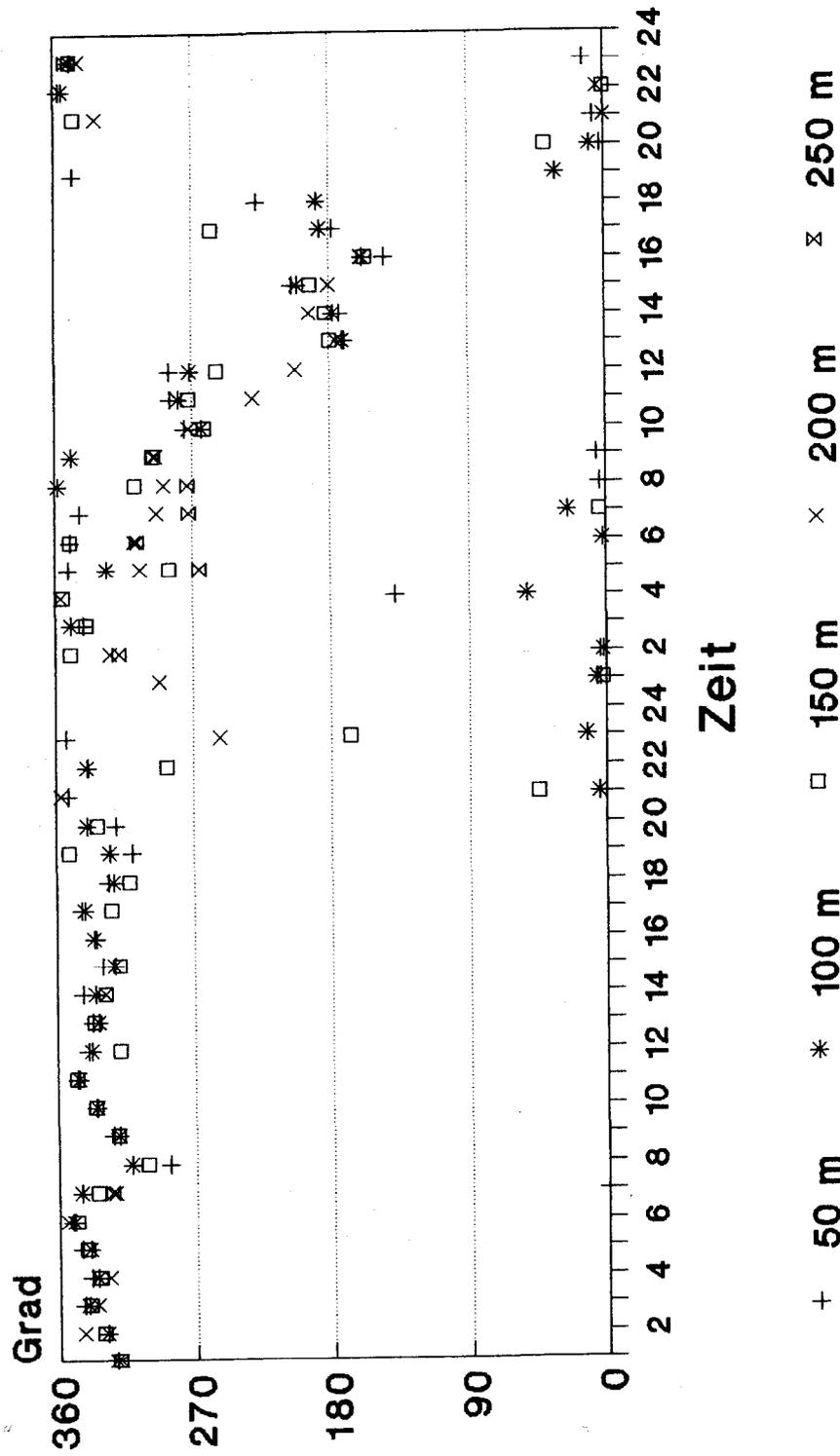


Abb. 95

Graz
Windgeschwindigkeit
3. - 4. 3. 1990

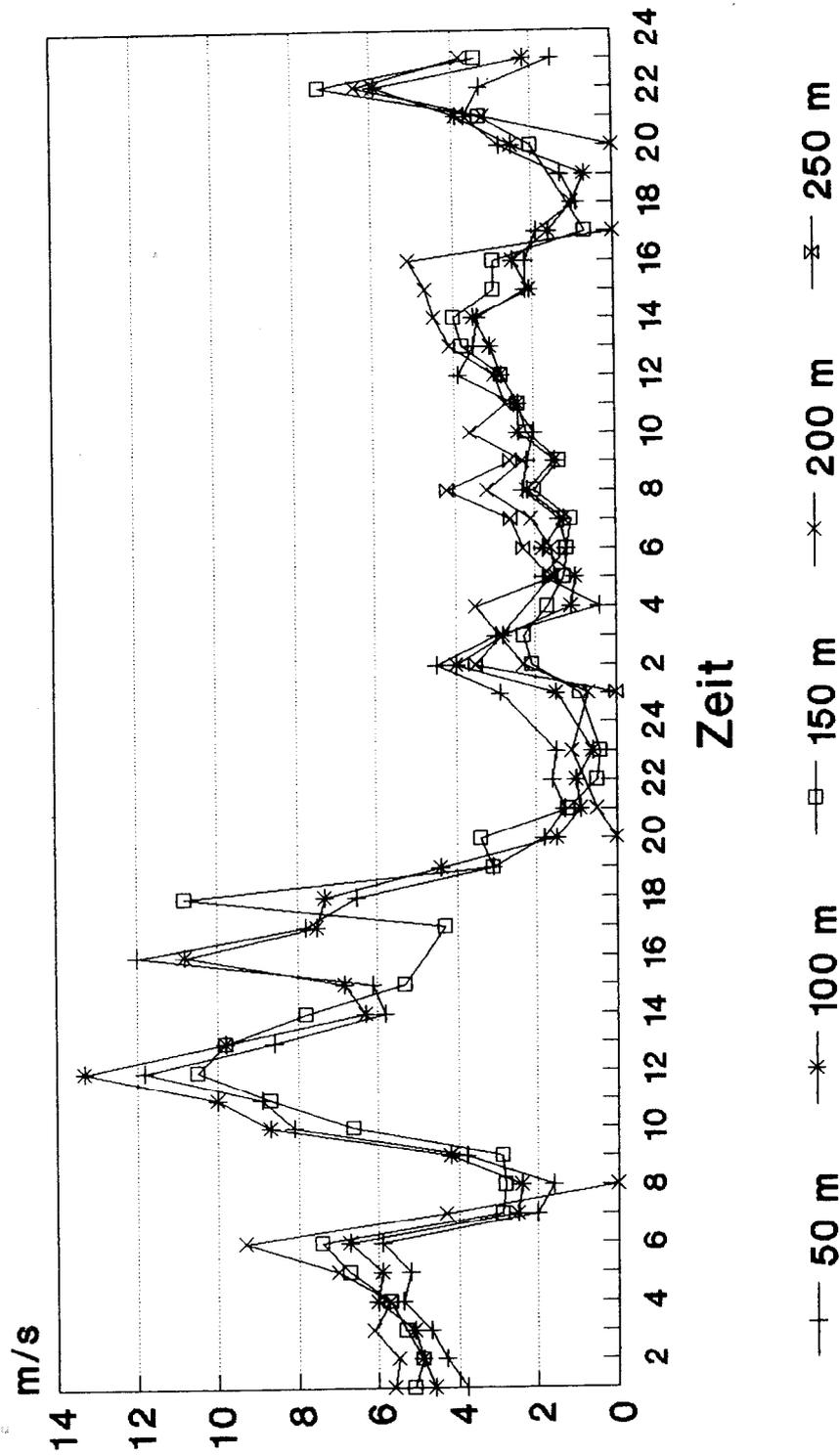


Abb. 96

Graz

Windrichtung

5. - 6. 3. 1990

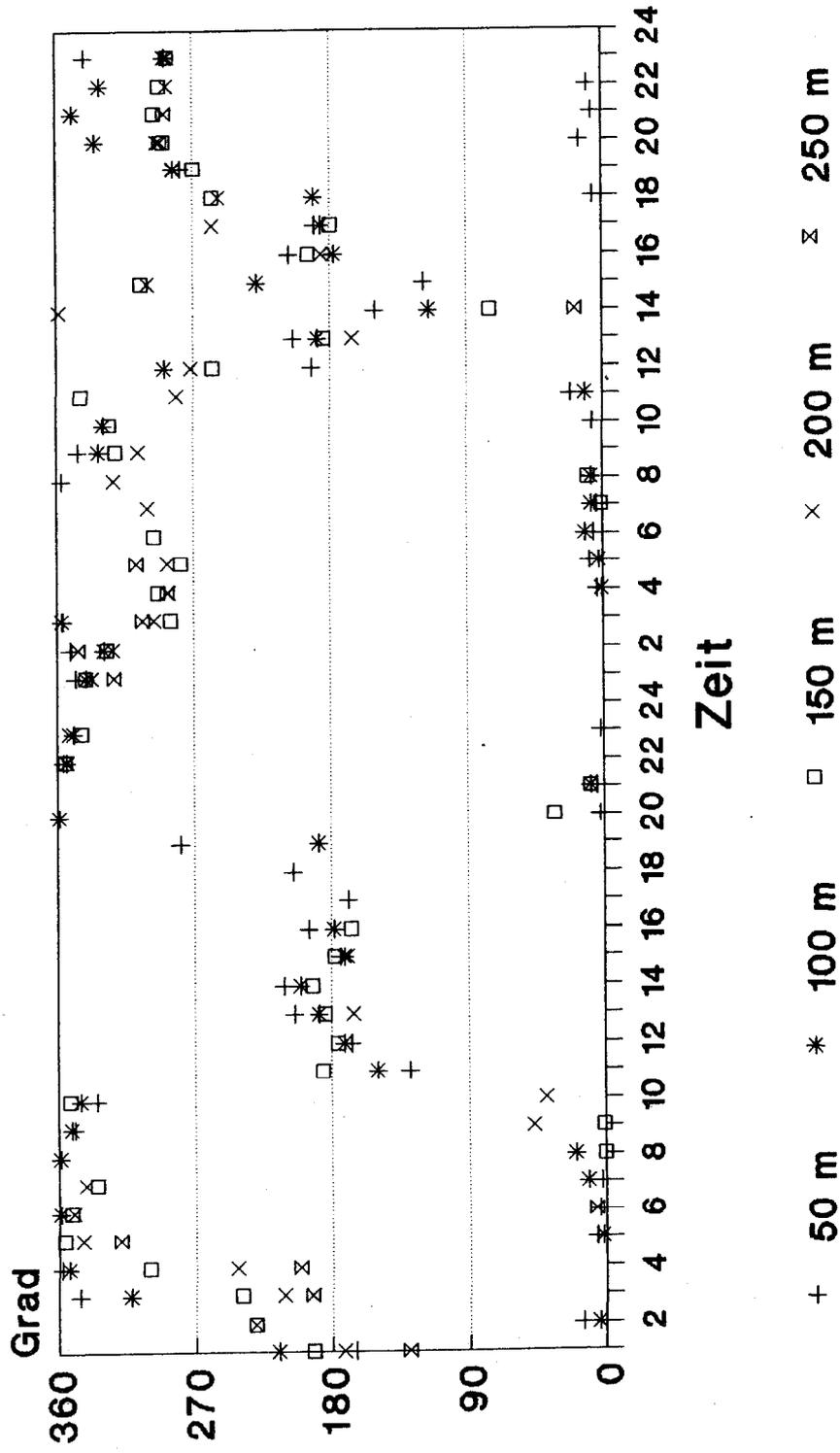


Abb. 97

Graz
Windgeschwindigkeit
5. - 6. 3. 1990

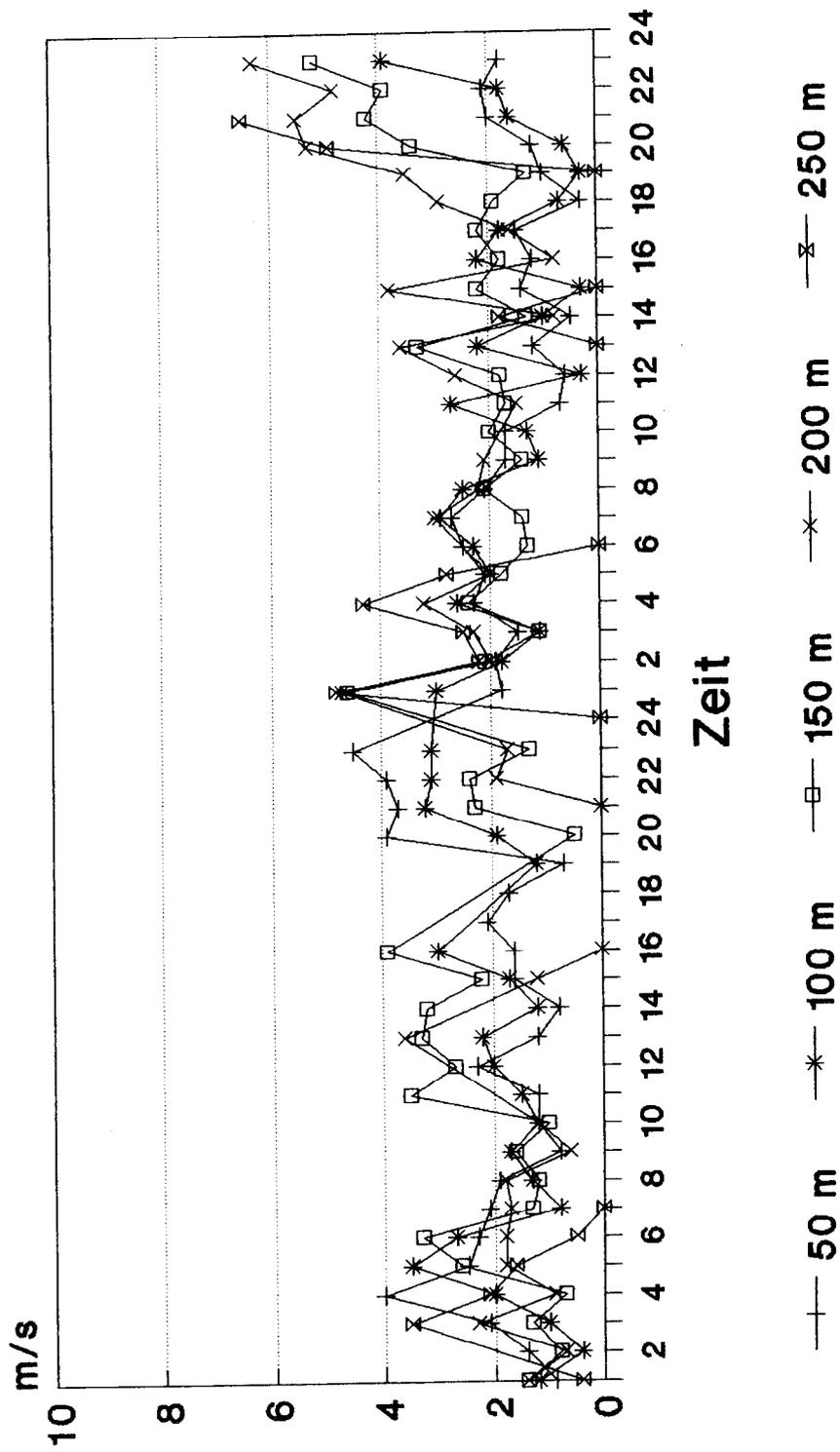


Abb. 98

Graz

Windrichtung

7. - 8. 3. 1990

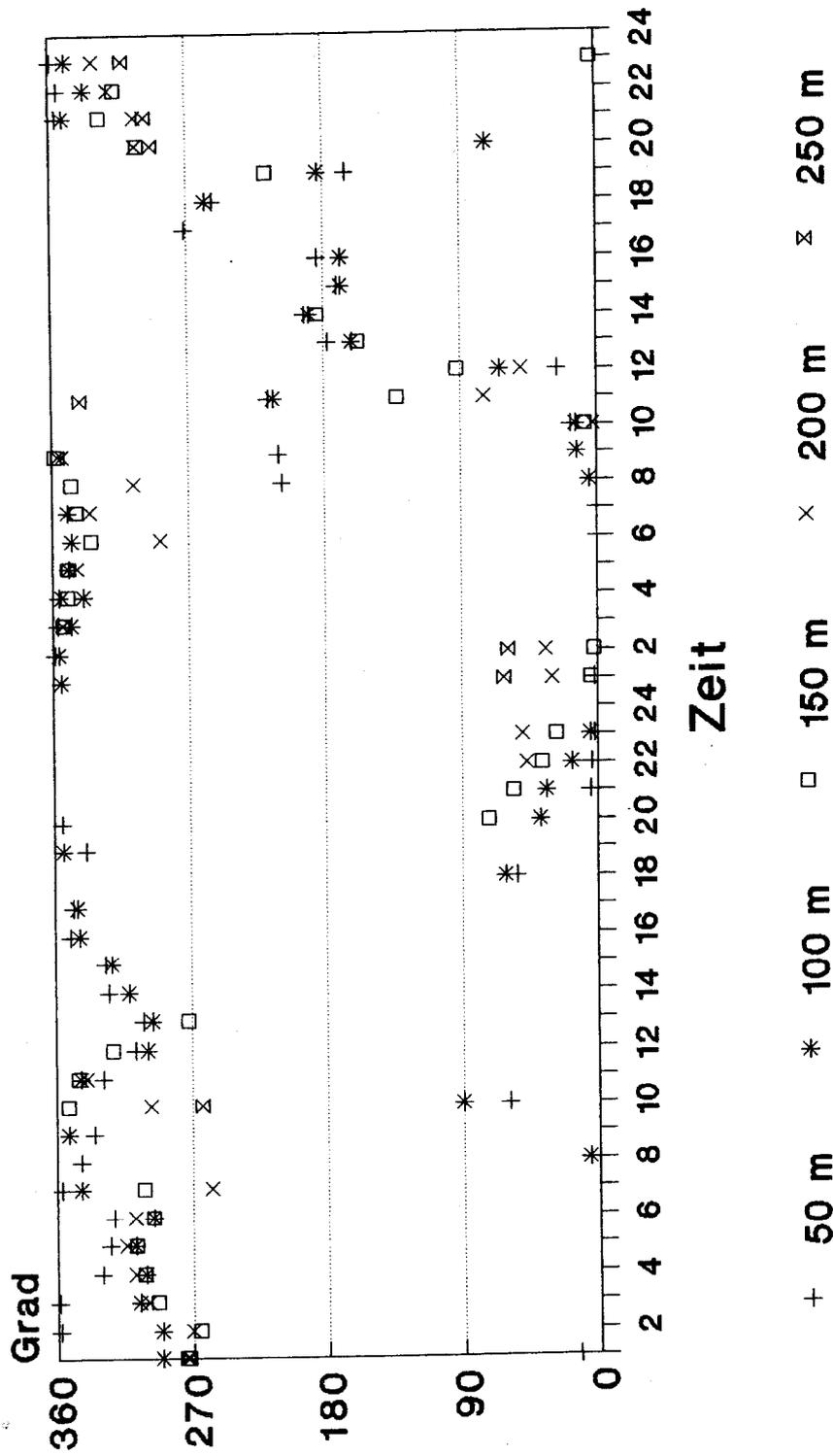


Abb. 99

Graz
Windgeschwindigkeit
7. - 8. 3. 1990

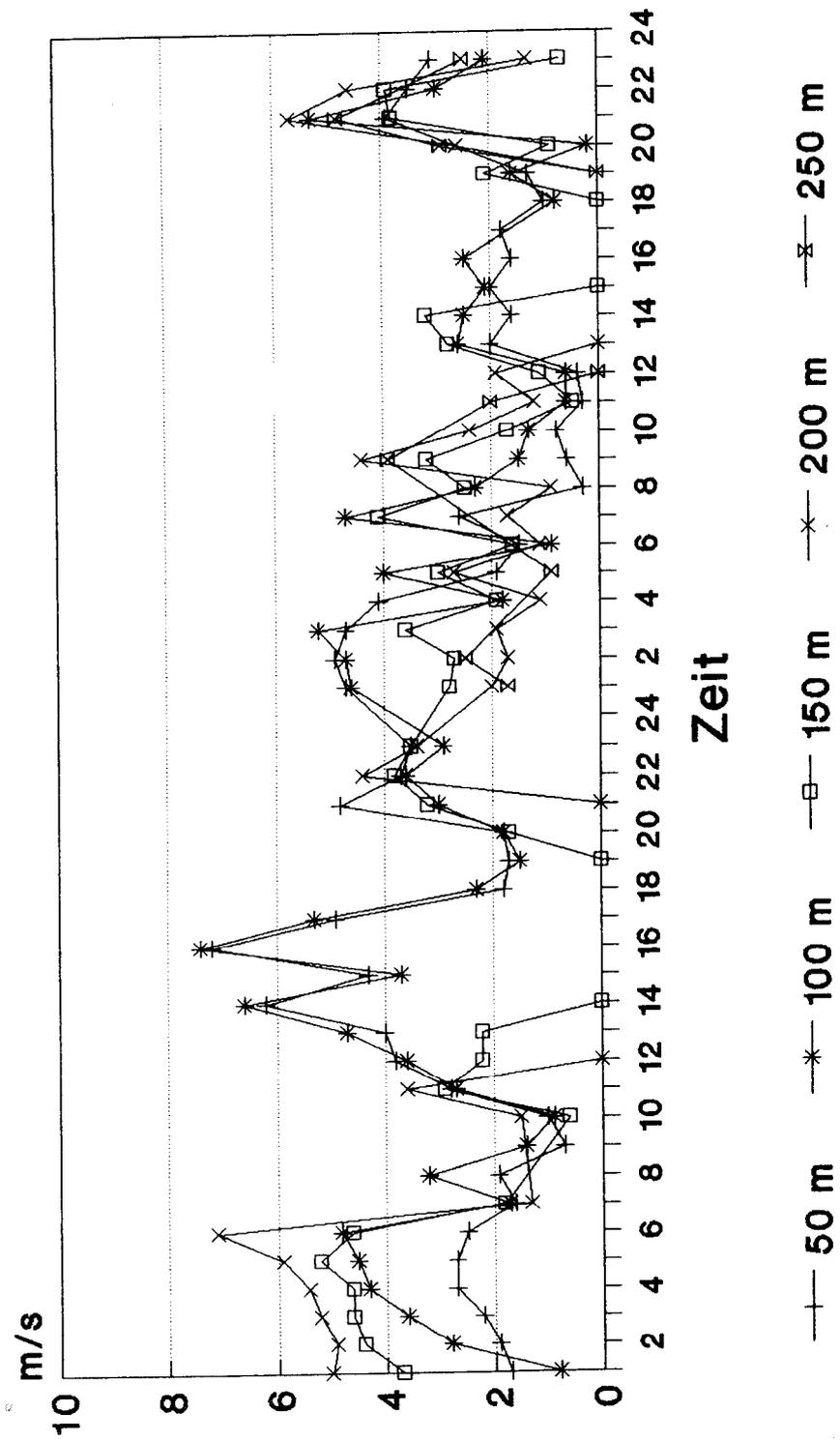


Abb. 100

Graz

Windrichtung

9. - 10.3. 1990

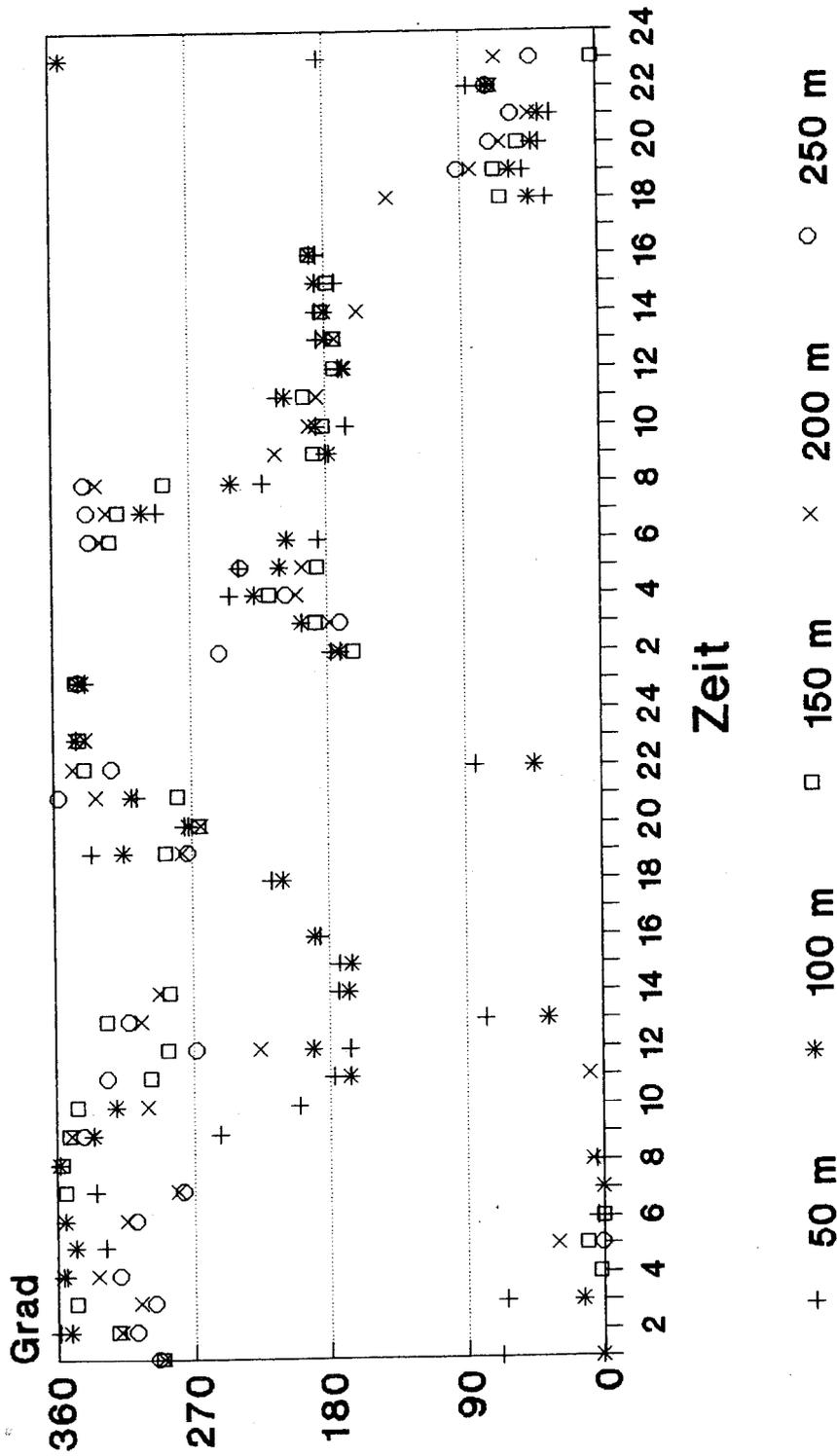


Abb. 101

Graz
Windgeschwindigkeit
9. - 10. 3. 1990

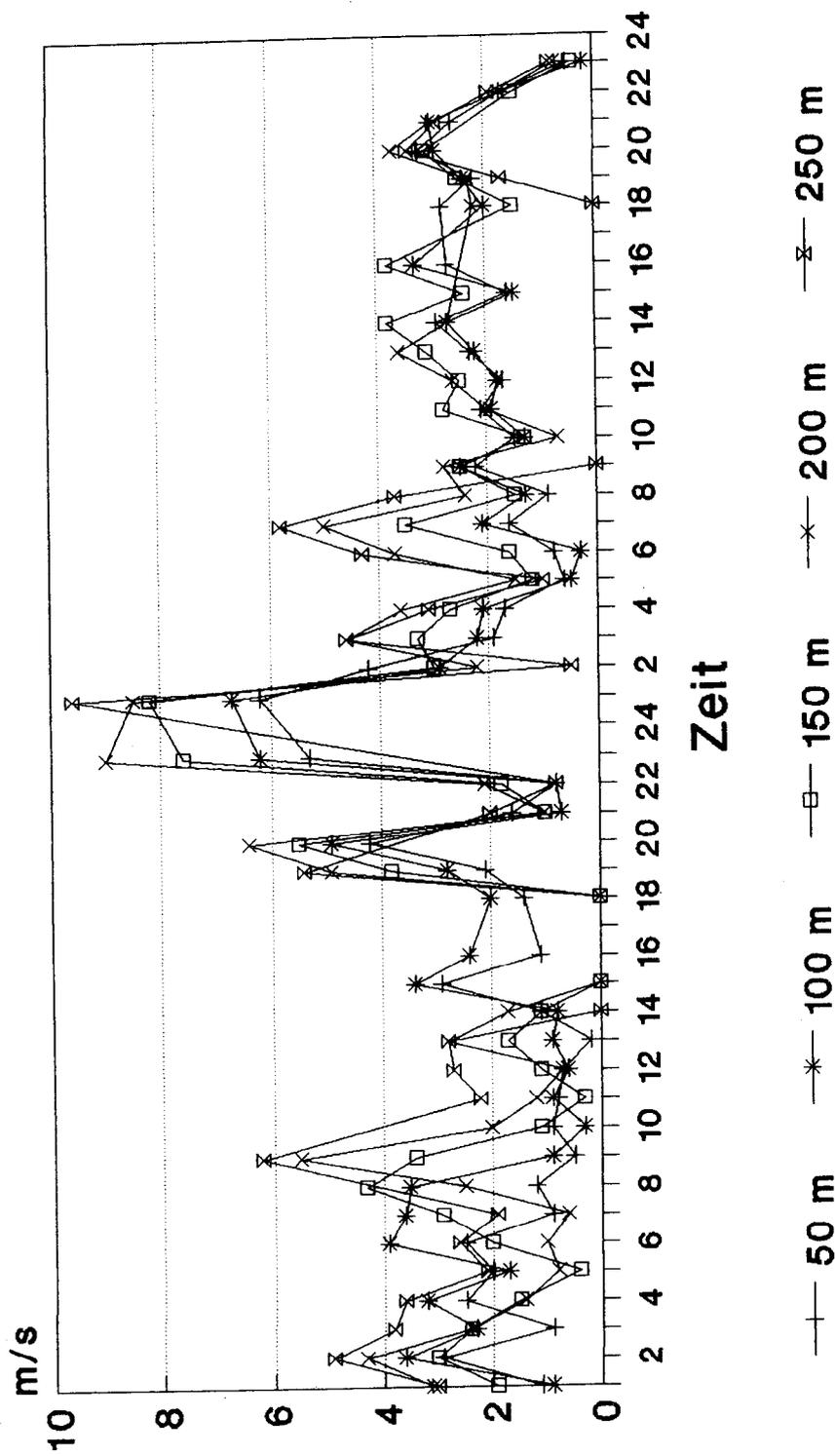


Abb. 102

