

**MESSUNG DER OZONKONZENTRATION
AUF DEM GAISBERG (SALZBURG)**



Messung der Ozonkonzentration
auf dem Gaisberg (Salzburg)

BE-136

Wien, Oktober 1998

Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie



Autoren:

Wolfgang SPANGL

Daten:

Umweltbundesamt

Amt der Salzburger Landesregierung

Danksagung

Der Autor dank dem Amt der Salzburger Landesregierung, Abteilung 16 – Umweltschutz, für das Zurverfügungstellen der Ozonmeßdaten der Meßstellen Salzburg Lehen, Salzburg Mirabellplatz, Haunsberg und Gaisberg-Zistelalm, der Wind- und Temperaturdaten der Meßstellen Gaisberg-Gipfel, Gaisberg-Zistelalm, Gaisberg-Judenbergalm, Salzburg Freisaalweg, Haunsberg und Untersberg, sowie der Unterstützung bei der Organisation der Auswahl des Meßplatzes auf dem Gaisberg-Gipfel.

Impressum:

Medieninhaber und Herausgeber: Umweltbundesamt, Spittelauer Lände 5, A-1090 Wien
Eigenvervielfältigung

© Umweltbundesamt, Wien, 1998
Alle Rechte vorbehalten (all rights reserved)

ISBN 3-85457-476-2

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	2
2	MEßSTELLENBESCHREIBUNG	2
3	MEßERGEBNISSE	4
3.1	Mittlere Tagesgänge	4
3.2	Vertikalverteilung der Ozonkonzentration	5
3.2.1	Vertikalverteilung der Ozonkonzentration in Abhängigkeit vom Temperaturgradienten	6
3.2.2	Vertikalverteilung der Ozonkonzentration in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit	9
3.3	Überschreitungen der Schwellenwerte der EU-Ozon-Richtlinie und Immissionsschutzgesetz-Luft ...	10
3.4	Kumulative Ozonbelastung (AOT40)	11
4	EPISODEN	13
4.1	10. bis 15. Juli 1997	13
4.2	13. bis 16. August 1997	15
4.3	1. bis 3. September 1997	17
5	EMPFEHLUNGEN	19

1 Einleitung

Das Umweltbundesamt führte im Sommer 1997 (11. März bis 26. September) auf dem Gipfel des Gaisberges bei Salzburg kontinuierliche Messungen der Ozonkonzentration durch.

Zielsetzung der Messung war die Untersuchung der vertikalen Verteilung der Ozonkonzentration im Raum Salzburg. Zum Vergleich mit der auf dem exponierten Berggipfel erfaßten Ozonkonzentration werden die vom Amt der Salzburger Landesregierung an den Meßstellen Salzburg (Stadt)-Lehen und -Mirabellplatz, Gaisberg Zistelalm und Haunsberg im Flachgau, sowie vom Umweltbundesamt in St. Koloman südöstlich von Hallein und in Hochburg-Ach im westlichen Innviertel durchgeführten Ozonmessungen herangezogen.

2 Meßstellenbeschreibung

Die Ozonmessung durch das Umweltbundesamt erfolgte auf dem Gipfel des Gaisberges (Seehöhe 1287 m) auf dem Gebäude der Richtfunkstation, welcher als isolierter Berg östlich der Stadt Salzburg liegt. Das Meßgerät war hier in einem Raum auf dem Gebäudedach ca. 15 m über Boden untergebracht; die Ansaugung der Probeluft erfolgte über einen Teflonschlauch in Dachhöhe des Raumes in ca. 2 m Horizontalabstand von der Wand.

Die folgende Tabelle 1 stellt die Lagebeschreibungen der in den Konzentrationsvergleich einbezogenen Meßstellen zusammen:

Meßstelle	Seehöhe ¹	Lage	Nutzung der Umgebung
Gaisberg Gipfel	1287 m (15 m über Boden)	Gebäude auf Gipfel	Wiese, Wald
Gaisberg Zistelalm	1010 m	Hang	Wiese, Wald
Salzburg Lehen	425 m (30 m über Boden)	Ebene	Städtisches Wohngebiet
Salzburg Mirabellplatz	430 m	Ebene	Städtisches Wohngebiet, verkehrsnah
Haunsberg	755 m	Hügelland	Wiese, Wald, Dorf
St. Koloman	1020 m	Komplex strukturiertes Bergland	Wiese, Wald, Dorf
Hochburg-Ach	463 m	Ebene	Wiese, Ackerland, Dorf

Abbildung 1 zeigt die Lage der Meßstellen.

¹ Angegeben ist jeweils das Bodenniveau. Sofern nichts anderes vermerkt ist, erfolgt die Ansaugung der Probeluft über dem Dach des Meßcontainers in 3 bis 4 m Höhe über Boden.

Abbildung 1: Ozon- und meteorologische Meßstellen im Raum Salzburg

Tabelle 2 gibt die an den Ozonmeßstellen eingesetzten Meßgeräte an:

Gaisberg Gipfel	ML 8810
Gaisberg-Zistelalm	TECO 49
Salzburg Lehen	ML 8810
Salzburg Mirabellplatz	Horiba APOA 350E
Haunsberg	TECO 49
St. Koloman	Horiba APOA 350E
Hochburg-Ach	Horiba APOA 350E

Es wurden an allen Meßstellen Kalibratoren der Type TECO 49 PS eingesetzt.

Die Ozonmessung erfolgt mittels UV-Absorption. Die untere Nachweisgrenze liegt bei 2 ppb ($4 \mu\text{g}/\text{m}^3$), die Präzision bei ± 2 ppb.

3 Meßergebnisse

Die monatliche Verfügbarkeit der HMW der Ozonkonzentration an der Station Gaisberg-Gipfel ist in Tabelle 3 in Prozent angegeben.

März	April	Mai	Juni	Juli	August	Sept.
63	16 ²	55	97	97	97	83 ³

3.1 Mittlere Tagesgänge

Die mittleren Tagesgänge der Ozonkonzentration an den Meßstellen Gaisberg-Gipfel, Gaisberg-Zistelalm, St. Koloman, Haunsberg, Hochburg-Ach, Salzburg Mirabellplatz und Salzburg Lehen über den Zeitraum März bis September 1997 sind in Abbildung 2 dargestellt.

Der mittlere Tagesgang wird wesentlich von der topographischen Situation der Meßstelle beeinflusst.

Stationen in exponierter Lage auf Berg- oder Hügelgipfeln – Gaisberg-Gipfel, Haunsberg und St. Koloman – zeigen bei im Mittel hohen Werten einen relativ flachen Tagesgang mit leichtem Absinken der Konzentration in der Nacht und einem Minimum am Morgen. An diesen Meßstellen spielen sowohl Ozonbildung wie –abbau eine relativ geringe Rolle, der Konzentrationsverlauf wird wesentlich von Transportprozessen bestimmt, die den nachts auftretenden Ozonabbau kompensieren. Die drei Meßstellen liegen zumeist oberhalb der stabilen nächtlichen Inversion, in welcher in den Tälern und Ebenen starker Ozonabbau durch trockene Deposition (im Stadtgebiet zusätzlich auch durch Reaktion mit NO) stattfindet, und sind dem Austausch mit der Reservoirschicht, in welcher sich die tagsüber aufgebaute Ozonkonzentration auch nachts hält, ausgesetzt. Die Konzentration erreicht im Mittel an den drei Meßstellen am frühen Nachmittag ein sehr ähnliches Niveau (ca. $0,10 \text{ mg}/\text{m}^3$), nachts bildet sich ein Konzentrationsgradient in Abhängigkeit von der Seehöhe aus (mittleres Minimum am Haunsberg $0,068 \text{ mg}/\text{m}^3$, in St. Koloman $0,078 \text{ mg}/\text{m}^3$, am Gaisberg-Gipfel $0,86$

² Ausfall des Meßgerätes vom 5. April bis 13. Mai

³ Ende der Messung am 26. September

mg/m³), da mit zunehmender Seehöhe die Wahrscheinlichkeit, daß die Meßstelle in der nächtlichen Inversionsschicht liegt (und damit das Ausmaß des nächtlichen Ozonabbaus) abnimmt. Das morgendliche Konzentrationsminimum ist – zusätzlich zum lokalen Ozonabbau – durch Advektion ozonarmer Luftmassen aus den angrenzenden Tälern bestimmt, wo nachts stärkerer Ozonabbau stattfindet, und tritt um so später auf, je höher die Meßstelle liegt.

Die am Südwesthang des Gaisberges gelegene Meßstelle Zistelalm weist einen ähnlichen Ozonkonzentrationsverlauf auf wie am Gipfel, bei allerdings niedrigerem Konzentrationsniveau (Maximum 0,088 mg/m³, Minimum 0,072 mg/m³). Dies dürfte – trotz guter vertikaler Durchmischung tagsüber – eine Folge stärkeren Ozonabbaus am bewaldeten Hang unmittelbar unterhalb der Meßstelle sein, den die Luft bei Hangaufwind nachmittags über- bzw. durchströmt.

Hochburg-Ach weist den typischen Tagesgang einer Flachland-Station auf. Am frühen Nachmittag wird – als Folge turbulenter vertikaler Durchmischung – im Mittel jenes Konzentrationsniveau erreicht, das auch die exponiert gelegenen Meßstellen erreichen. Nachts hingegen findet in der seichten, stabil geschichteten Mischungsschicht Ozonabbau statt, der bereits abends einsetzt.

Vergleichbare mittlere Tagesgänge, die für Flachlandverhältnisse typisch sind, auf allerdings niedrigerem Niveau zeigen die städtischen Meßstellen Salzburg Lehen und Mirabellplatz. Verstärkter Ozonabbau (trockene Deposition) in der Stadt und die Titration von Ozon mit dem primär vom Kfz-Verkehr emittierten NO haben zur Folge, daß tagsüber die Ozonkonzentration im Mittel (Maximum in Lehen 0,097 mg/m³) deutlich hinter jener an den anderen betrachteten Meßstellen zurückbleibt.

3.2 Vertikalverteilung der Ozonkonzentration

In diesem und dem folgenden Kapitel wird die vertikale Ozonkonzentrationsverteilung an den Meßstellen in unterschiedlicher Höhe untersucht. Der Konzentrationsunterschied zwischen Meßstellen in unterschiedlicher Höhenlage ist bei guter vertikaler Durchmischung niedrig, wohingegen sich bei geringem vertikalem Austausch in der Regel ein großer Konzentrationsunterschied zwischen niedrigen Ozonkonzentrationen im Tal bzw. in der Ebene und hohen Konzentrationen im Gebirge ausbildet, wofür im wesentlichen der stärkere Ozonabbau im Tal bzw. in der Ebene verantwortlich ist.

Gute vertikale Durchmischung ist eine Folge thermischer oder mechanischer Turbulenz und tritt bei

- neutralem oder labilem Temperaturgradienten und
- hoher Windgeschwindigkeit

auf.

Als „Bezugspunkt“ in der Höhe wird die Station Gaisberg-Gipfel angesehen, welche die höchstgelegene im Raum Salzburg ist und sich durch freie Amströmbarkeit und Emittentenferne auszeichnen. In den Auswertungen wird die Konzentrationsdifferenz gegenüber dieser Meßstelle betrachtet.

Daneben treten zwischen den einzelnen Meßstellen auch Konzentrationsunterschiede auf, die durch die horizontale Distanz der Meßstellen bedingt sind. Da das Ausmaß lokaler photochemischer Ozonbildung in Salzburg jedoch im Mittel sehr gering ist und an den Meßstellen – ausgenommen Salzburg Mirabellplatz – lokaler Ozonabbau

durch hohe NO-Belastung gering ist, kann angenommen werden, daß die vertikalen Konzentrationsdifferenzen im Mittel wesentlich größer sind als die horizontalen.

3.2.1 Vertikalverteilung der Ozonkonzentration in Abhängigkeit vom Temperaturgradienten

Entscheidendes Kriterium für die vertikale Durchmischung stellt die thermische Schichtung der Atmosphäre dar. Der vertikale Austausch ist bei neutraler und labiler Schichtung gut und wird bei zunehmender Stabilität unterdrückt. Neutrale Schichtung entspricht einem feuchtadiabatischen Temperaturgradienten von ca. 0,7 °C/100m (trockenadiabatische Verhältnisse treten im Alpenraum eher selten auf, in diesem Fall wäre der neutrale Temperaturgradient ca. 1 °C/100m); stärkere Temperaturabnahme mit der Höhe bedeutet labile Verhältnisse, geringere Temperaturabnahme stabile Verhältnisse.

Zur Beurteilung des Temperaturgradienten werden die Temperaturmessungen der Stationen Gaisberg-Gipfel, Gaisberg-Judenbergalm (Seehöhe 800 m, Südwesthang des Gaisberges) und Salzburg-Freisaalweg (430 m, südlich des Stadtzentrums von Salzburg) herangezogen.

Tabelle 4 und Abbildung 3 zeigen die mittlere Abhängigkeit der Ozonkonzentrationsdifferenzen gegenüber Gaisberg-Gipfel von der Temperaturdifferenz zwischen Salzburg-Freisaalweg und Gaisberg-Gipfel (die Klassen schließen jeweils die obere Grenze ein).

Temperaturdifferenz °C	Häufigkeit	Ozonkonzentrationsgradient mg/m ³		
		Gaisberg Zistelalm	Haunsberg	Salzburg Lehen
<-6	6	0,005	0,016	0,060
-6 bis -4	30	0,029	0,027	0,080
-4 bis -2	108	0,025	0,026	0,075
-2 bis 0	230	0,016	0,024	0,073
0 bis 2	412	0,014	0,022	0,074
2 bis 4	897	0,015	0,018	0,061
4 bis 6	1732	0,015	0,012	0,042
6 bis 8	1973	0,015	0,005	0,024
8 bis 10	652	0,015	0,001	0,012
10 bis 12	123	0,010	-0,001	0,010
>12	7	0,007	0,005	0,021

Bei einer Höhendifferenz zwischen Salzburg-Freisaalweg und Gaisberg-Gipfel von 857 m entspricht eine Temperaturdifferenz von 6°C neutraler Schichtung.

Die Konzentrationsgradienten sind allgemein bei stabilen Verhältnissen höher als bei labiler Schichtung. Diese Abhängigkeit ist für Salzburg Lehen bei stabilen Verhältnissen deutlich stärker als bei Zistelalm oder Haunsberg. Die größten Ozonkonzentrationsdifferenzen treten bei allen Meßstellen bei Inversionen (Temperaturgradienten kleiner null) auf. Bei labilen Verhältnissen sind die Konzentrationsdifferenzen zwischen Gipfel und Haunsberg deutlich geringer als gegenüber Zistelalm und Lehen

(die hier vergleichbare Differenzen aufweisen). Daß bei labiler Schichtung – verglichen mit Haunsberg – auf der Zistelalm relativ hohe Konzentrationsdifferenzen gegenüber dem Gipfel auftreten, könnte auf lokal verstärkten Ozonabbau (infolge des unterhalb gelegenen Waldes) zurückzuführen sein.

Tabelle 5 und Abbildung 4 zeigen die mittlere Abhängigkeit der Ozonkonzentrationsdifferenz gegenüber Gaisberg-Gipfel vom Temperaturgradienten zwischen Salzburg-Freisaalweg und Gaisberg-Judenbergalm, d.h. dem unteren Teil des Temperaturprofils Gaisberg (die Klassen schließen jeweils die obere Grenze ein).

Temperaturdifferenz °C	Häufigkeit	Ozonkonzentrationsdifferenz mg/m ³		
		Gaisberg Zistelalm	Haunsberg	Salzburg Lehen
<-6	28	0,024	0,026	0,076
-6 bis -4	127	0,023	0,023	0,075
-4 bis -2	440	0,012	0,022	0,077
-2 bis 0	790	0,013	0,022	0,074
0 bis 2	1454	0,015	0,014	0,052
2 bis 4	3052	0,015	0,004	0,021
4 bis 6	301	0,017	-0,002	0,006
6 bis 8	0			
8 bis 10	0			
10 bis 12	0			
>12	0			

Bei einem Höhenunterschied zwischen Gaisberg-Judenbergalm und Salzburg-Freisaalweg von 370 m entspricht eine Temperaturdifferenz von 2,6 °C neutraler Schichtung.

Die vertikale Konzentrationsdifferenz ist für Salzburg Lehen und Haunsberg bei stabiler Schichtung wesentlich größer als bei neutraler oder labiler, wobei dieser Unterschied – analog zum Temperaturgradienten Freisaalweg – Gaisberg-Gipfel – bei Salzburg Lehen bei weitem am deutlichsten ausfällt.

Demgegenüber zeigt die Konzentrationsdifferenz zwischen Gipfel und Zistelalm eine relativ geringe Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz Freisaalweg – Judenbergalp, da letztere für die Austauschprozesse im oberen Bereich des Gaisberges nicht von Relevanz ist.

Tabelle 6 und Abbildung 5 zeigen die mittlere Abhängigkeit der Ozonkonzentrationsdifferenz gegenüber Gaisberg-Gipfel vom Temperaturgradienten zwischen Gaisberg-Judenbergalm und Gaisberg-Gipfel (die Klassen schließen jeweils die obere Grenze ein).

Temperaturdifferenz °C	Häufigkeit	Ozonkonzentrationsdifferenz mg/m ³		
		Gaisberg Zistelalm	Haunsberg	Salzburg Lehen
<-6	0			
-6 bis -4	0			
-4 bis -2	4	0,034	0,034	0,063
-2 bis 0	79	0,021	0,021	0,050
0 bis 2	660	0,019	0,017	0,047
2 bis 4	3090	0,015	0,010	0,039
4 bis 6	1922	0,014	0,008	0,036
6 bis 8	383	0,013	0,012	0,046
8 bis 10	30	0,009	0,005	0,031
10 bis 12	1	0,006	0,018	0,022
>12	0			

Der Temperaturgradient zwischen Gaisberg-Judenbergalm und -Gipfel repräsentiert die obere Hälfte des betrachteten Vertikalprofils. Er ist – wie auch die Fallstudien zeigen – nur geringen tageszeitlichen Variationen unterworfen und zeigt eine starke Häufung bei leicht stabiler bis neutraler Schichtung; diese entspricht bei einer Höhendifferenz von 487 m ungefähr 4,3°C Temperaturunterschied.

Die Ozonkonzentrationsdifferenz zwischen Gaisberg-Gipfel und Salzburg Lehen zeigt keine sehr ausgeprägte Abhängigkeit vom Temperaturgradienten Judenbergaln – Gipfel. Die Konzentrationsunterschiede bezüglich Haunsberg und Zistelalm sind dagegen stärker vom Temperaturgradienten Judenbergaln – Gipfel abhängig.

3.2.2 Vertikalverteilung der Ozonkonzentration in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit

Tabelle 7 und Abbildung 6 geben die Konzentrationsdifferenz der Station Gaisberg-Gipfel gegenüber Gaisberg-Zistelalm, Haunsberg und Salzburg Lehen in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit am Gipfel an (die Geschwindigkeitsklassen schließen jeweils die untere Grenze ein).

Wige Gaisberg-Gipfel	Häufigkeit	Gaisberg Zistelalm	Haunsberg	Salzburg Lehen
m/s		mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³
0-1	597	0,017	0,013	0,052
1-2	1952	0,016	0,009	0,036
2-3	1225	0,017	0,012	0,042
3-4	794	0,014	0,011	0,041
4-5	575	0,013	0,010	0,040
5-6	476	0,013	0,009	0,039
6-7	306	0,012	0,010	0,037
7-8	162	0,010	0,007	0,025
8-9	53	0,005	0,006	0,020
9-10	15	0,003	0,003	0,020

Bei allen Meßstellen nimmt die Konzentrationsdifferenz gegenüber Gaisberg-Gipfel mit zunehmender Windgeschwindigkeit ab.

Die exponiert gelegenen Meßstellen Zistelalm und Haunsberg zeigen gegenüber dem Gipfel auch bei niedrigen Windgeschwindigkeiten nur geringe Konzentrationsunterschiede, die bei hohen Windgeschwindigkeiten nahe null liegen. Die Konzentrationsdifferenzen gegenüber Salzburg Lehen sind wesentlich höher; an dieser Meßstelle tritt auch bei hoher Windgeschwindigkeit starker Ozonabbau auf, der durch den vertikalen Austausch nicht kompensiert wird.

Daß bei Windgeschwindigkeiten von 1 bis 2 m/s die Konzentrationsdifferenz zwischen Salzburg Lehen und Gipfel geringer ist als bei Windgeschwindigkeiten von 2 bis 7 m/s, könnte daran liegen, daß diese schwachwindigen Situationen mit Schönewettertagen mit starker thermischer Turbulenz zusammenfallen.

3.3 Überschreitungen der Schwellenwerte der EU-Ozon-Richtlinie und Immissionsschutzgesetz-Luft

Die EU-Richtlinie 92/72/EG betreffend die Luftverschmutzung durch Ozon gibt folgende Schwellenwerte an:

Schutzziel	Schwellenwert	Bezugszeitraum
Menschliche Gesundheit	110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	8 Stunden: 0 – 8, 8 – 16, 16 – 24; 12 – 20 Uhr
Information	180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Nicht gleitende Einstundenmittelwerte
Alarm	360 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Nicht gleitende Einstundenmittelwerte
Vegetation	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Nicht gleitende Einstundenmittelwerte
Vegetation	65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Tagesmittelwerte

Der über vier achtstündige Perioden pro Tag definierte Schwellenwert zum langfristigen Schutz der menschlichen Gesundheit von 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ist ident mit dem Zielwert für Ozon laut Immissionsschutzgesetz-Luft, BGBl. 97/II/115, Anlage 3.

Tabelle 8 gibt die Anzahl der Tage mit Überschreitung des MW8a (Achtstundenmittelwerte von 0 bis 8 Uhr, von 8 bis 16 Uhr und von 16 bis 24 Uhr) und MW8b (Achtstundenmittelwert von 12 bis 20 Uhr) von 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und des TMW von 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ an den Meßstellen im Raum Salzburg im Zeitraum März bis September 1997 (insgesamt 214 Tage) an.

	MW8a (110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MW8b (110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	TMW (65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Gaisberg-Gipfel	63	48	150
Gaisberg Zistelalm	35	31	157
St. Koloman	54	48	198
Haunsberg	44	57	182
Hochburg-Ach	28	43	112
Salzburg Lehen	11	30	65 ⁴
Salzburg Mirabellplatz	5	15	53

Der MW1 von 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ wurde an der Station Gaisberg-Gipfel an 2 Tagen, dem 14. und 15. August, überschritten, an den anderen Meßstellen nicht.

Einstundenmittelwerte über 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ bzw. 360 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ traten nicht auf.

An den im Mittel hochbelasteten Meßstellen Gaisberg-Gipfel, Gaisberg-Zistelalm, St. Koloman und Haunsberg, die sich durch geringe tägliche Variation der Ozonkonzentration auszeichnen, ist die Überschreitungshäufigkeit des TMW von 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ deutlich höher als an der in der Ebene gelegenen Meßstelle Hochburg-Ach, wo infolge ausgeprägter Tagesgänge hohe TMW seltener auftreten. Noch seltener werden Überschreitungen an den innerstädtischen Meßstellen Salzburg-Lehen und Mirabell-

⁴ Vegetationsrelevante Schwellenwerte sind an den innerstädtischen Meßstellen Salzburg Lehen und Mirabellplatz nicht anzuwenden, zu Vergleichszwecken werden diese Meßstellen aber auch angeführt.

platz beobachtet, die ähnliche Tagesgänge wie Hochburg-Ach bei im Mittel niedrigerem Konzentrationsniveau aufweisen.

Auch die Überschreitungen der MW8 sind an den exponiert gelegenen Meßstellen deutlich häufiger als im Stadtzentrum von Salzburg, was ebenfalls als Folge der unterschiedlich ausgeprägten Tagesgänge interpretiert werden kann. Hierbei fällt auf, daß an den Meßstellen in der Ebene der MW8b (nachmittags) von $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ häufiger überschritten wird als die MW8a, weil hier das Konzentrationsmaximum regelmäßig in den Nachmittag fällt. Demgegenüber werden infolge des flachen mittleren Tagesganges an den hoch gelegenen Meßstellen Gaisberg-Gipfel, Zistelalm und St. Koloman die MW8a häufiger überschritten als der MW8b; am Gaisberg-Gipfel beeinflußt das vormittägliche Konzentrationsminimum häufig noch den MW8b von 12 bis 20 Uhr, so daß die MW8a von $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hier deutlich häufiger überschritten werden als der MW8b.

3.4 Kumulative Ozonbelastung (AOT40)

Im Rahmen der Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung wurden von der UN/ECE „kritische Belastungsgrenzen“ (Critical Levels) für Ozon ausgearbeitet, bei deren Einhaltung langfristige Schäden an Pflanzen nicht zu erwarten sind.

Diese Critical Levels werden als kumulative Ozonbelastungen definiert; als Maßzahl wird die Summe der Konzentrationswerte (MW1) über 40 ppb herangezogen, welche als „Accumulated Exposure over a Threshold of 40 ppb“ (AOT40) bezeichnet wird. MW1 unter 40 ppb werden nicht berücksichtigt, bei MW1 über 40 ppb wird der Threshold von 40 ppb subtrahiert und die Werte dann über den Bezugszeitraum summiert.

Der Bezugszeitraum wurde für Wald auf April bis September festgelegt, für landwirtschaftliche Nutzpflanzen, bewirtschaftete Weiden und natürliche Vegetation (ausgenommen Wald) auf Juni bis August. In jedem Fall werden nur die Tageslichtstunden, d.h. die photosynthetisch aktive Zeit, berücksichtigt; als Kriterium dafür wird eine Globalstrahlung von $50 \text{ W}/\text{m}^2$ definiert (unabhängig allerdings von den aktuellen Lichtverhältnissen).

Der Critical Level („Grenzwert“) beträgt für Wald $10 \text{ ppm}\cdot\text{h}$, für landwirtschaftliche Nutzpflanzen $3 \text{ ppm}\cdot\text{h}$.

Tabelle 9 gibt für die Meßstellen im Raum Salzburg die kumulative Ozonbelastung (AOT40) sowie die Überschreitung der Critical Levels in ppm*h an. Die kumulativen Ozonbelastungen sind bei Verfügbarkeiten unter 100% auf den Gesamtzeitraum extrapoliert.

	Landw. Nutzpflanzen		Wald	
	AOT40	Überschr.	AOT40	Überschr.
Gaisberg-Gipfel	13,5	10,5	24,6 ⁵	14,6
Gaisberg Zistelalm	6,9	3,9	12,2	2,2
St. Koloman	12,1	9,1	20,0	10,0
Haunsberg	10,5	7,5	17,8	7,8
Hochburg-Ach	9,3	6,3	16,2	6,2
Salzburg Mirabellplatz ⁶	6,9 ⁷	3,9	9,6	0
Salzburg Lehen	6,9	3,9	11,0	1,0

Die AOT40-Werte werden entscheidend vom zeitlichen Verlauf der Ozonbelastung, wie er u.a. im mittleren Tagesgang zum Ausdruck kommt, bestimmt. Sie sind an den exponierten, hoch gelegenen Meßstellen Gaisberg-Gipfel und St. Koloman dementsprechend am höchsten; trotz Beschränkung des Summationszeitraumes auf die Tageslichtstunden bedingen die vergleichsweise flachen Tagesgänge auf hohem Konzentrationsniveau hohe AOT40-Werte. Die AOT40-Werte sind an den im Flachland gelegenen Meßstellen tendenziell geringer.

Daß auf der Zistelalm niedrigere AOT40-Werte als z.B. in Hochburg-Ach registriert werden, könnte am lokal verstärkten Ozonabbau im Bereich der Zistelalm liegen.

⁵ An der Meßstelle Gaisberg-Gipfel liegt für den Zeitraum April bis September die Verfügbarkeit unter 80%, daher sind die angegebenen Werte mit erheblicher Unsicherheit behaftet.

⁶ Vegetationsrelevante Critical Levels sind an den innerstädtischen Meßstellen Salzburg Lehen und Mirabellplatz nicht anzuwenden, zu Vergleichszwecken werden diese Meßstellen aber auch angeführt.

⁷ An der Meßstelle Salzburg Mirabellplatz für den Zeitraum Juni bis August die Verfügbarkeit unter 80%, daher sind die angegebenen Werte mit erheblicher Unsicherheit behaftet.

4 Episoden

Im folgenden werden drei Fallstudien präsentiert, in denen Episoden mit außergewöhnlich hoher Ozonkonzentration bzw. rascher Zu- oder Abnahme der Ozonkonzentration analysiert werden.

4.1 10. bis 15. Juli 1997

4.1.1.1.1 Großwetterlage

Ab dem 10. Juli herrschte über Mitteleuropa am Boden eine sehr flache Luftdruckverteilung. Die sehr intensiven Niederschläge, die in den Vortagen über Ostösterreich, Tschechien und angrenzenden Gebieten Polens verheerende Hochwasser verursacht hatten, und die durch ein Höhentief bedingt gewesen waren, hörten auf. Allerdings drang an der Ostseite eines Hochdruckkeils mit Kern über den Britischen Inseln am 10. und 12.7. feuchte Luft nach Mitteleuropa – wobei sich ein kleines Höhentief bildete – und verursachte hier u.a. an der Alpennordseite teilweise ergiebige Regenschauer. Im Alpenvorland und am Alpennordrand wehte überwiegend nordwestlicher, schwacher Wind.

Bis zum 13.7. verlagerte sich der Hochdruckkeil nach Osten, wobei sich ein mächtiges Bodenhoch über Skandinavien ausbildete. Relativ kühle Luft strömte von Nordosten nach Mitteleuropa, wo es vereinzelt Regenschauer gab. Diese Situation hielt auch am 14.7. an, allerdings erreichte – verbunden mit einer von Island bis Spanien reichenden Frontalzone – feuchte, warme Luft bereits den Westen Österreichs. Diese Frontalzone überquerte am 15.7. Österreich, im Raum Salzburg läßt sich der Durchzug am 14.7. 19:00 identifizieren. Der Wind drehte allgemein auf West.

4.1.1.1.2 Lokale meteorologische Situation

Der Verlauf der Temperatur an den Meßstellen Gaisberg-Zistelalm, Gaisberg-Gipfel, Gaisberg-Judenbergalm, Salzburg Freisaalweg, Hochburg-Ach, St. Koloman und Untersberg (1800 m) ist in Abbildung 7 und Abbildung 8 dargestellt; Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen die vertikale Temperaturdifferenz zwischen den Stationen Salzburg Freisaalweg, Gaisberg-Judenbergalm und Gaisberg Gipfel.

Die Temperatur erreichte am 10.7. im Raum Salzburg 23°C, schwankte infolge von Bewölkung und Regen aber stark; um 15:00 fiel sie infolge eines Gewitters auf 16°C. Am Gaisberg und Haunsberg wehte zunächst südöstlicher, schwacher Wind, ab 15:00 überwiegend östlicher Wind mit Spitzen (HMW) um 8 m/s am Gaisberg-Gipfel und Haunsberg. Am Untersberg (1800 m) wurde Südostwind registriert, der um 21:00 auf West drehte. Beständiger Westwind wehte an dieser Station dann bis zum 15.7.

Die von Regenschauern bestimmte Witterung hielt auch am 11.7. an, über Salzburg gab es um 12:00 ein starkes Gewitter, die Temperatur sank von 20°C auf 16°C und erreichte nachmittags wieder 23°C. Die Windgeschwindigkeit am Haunsberg erreichte nur 4 m/s. Der Wind war relativ uneinheitlich.

Der 12., 14. und 15.7. waren weitgehend sonnig mit einer Maximaltemperatur in Hochburg-Ach von 24,5°C an allen Tagen. Bei Windgeschwindigkeiten von 2 bis 3 m/s wehte am 12. und 13.7. zumeist westlicher Wind. Ein Gewitter brachte am 13.7. ab 17:00 einen Temperatursturz, wobei der Wind von West auf Süd drehte.

Am 14.7. begann ab 14:00 die Temperatur rasch zu sinken, erreichte in Hochburg-Ach um 18:00 21°C und fiel bis 20:00 auf 15°C – auf diesem Niveau blieb sie konstant bis 15.7. 10:00. Die Windgeschwindigkeit erreichte ab 18:00 kurzzeitig in Hoch-

burg-Ach und am Haunsberg über 5 m/s, so daß der o.g. Frontdurchgang damit identifiziert werden kann. Ab 21:00 ging die Windgeschwindigkeit überall auf unter 2 m/s zurück und stieg ab 24:00 allgemein über 4 m/s. Der 15.7. war dann ein außerordentlich windiger Tag. Ab 14.7. 18:00 wehte ziemlich beständiger West- bis Nordwestwind. Am 15.7. nahm die Temperatur bis mittags an den meisten Stationen weiter ab und stieg ab 12:00 kurzzeitig an – auf maximal 19°C in Hochburg-Ach.

Die Temperaturgradienten zwischen Salzburg Freisaalweg und Gaisberg-Gipfel (Höhendifferenz 824 m) bzw. Judenbergalm zeigen generell stabile Schichtung in der Nacht – wobei sich zwischen Freisaalweg und Judenbergalm (Höhendifferenz 337 m) zumeist eine Inversion ausbildete – und (feucht-) labile Verhältnisse tagsüber. Die nachmittägliche Labilisierung ist ganz überwiegend dem Temperaturverlauf im unteren Teil des Profils, zwischen Freisaalweg und Gaisberg-Judenbergalm, zuzuordnen, während sich zwischen Gaisberg-Judenbergalm und Gipfel (Höhendifferenz 487 m) stets ein ungefähr neutraler Temperaturgradient hielt.

Die unregelmäßigen Verläufe des Temperaturgradienten gegenüber Salzburg Freisaalweg am 9., 10. und 13.7. sind eine Folge der Temperaturschwankungen im Raum Salzburg als Folge der Gewitter bzw. deren zeitlich versetztem Auftreten an den verschiedenen Meßstellen. Ansonsten bildete sich zwischen Freisaalweg und Gaisberg-Gipfel an diesen Tagen sowie am 12. und 14.7. nachmittags ein labiler Temperaturgradient aus. Am 14./15.7. bildete sich, anders als an den Vortagen, keine bodennahe Inversion aus. Den ganzen 15.7. über herrschte ein ungefähr neutraler Temperaturgradient vor.

4.1.1.1.3 Ozon

Der Verlauf der Ozonkonzentration vom 10. bis 15.7. an den Meßstellen Gaisberg-Zistelalm, Gaisberg-Gipfel, Salzburg Lehen, Haunsberg, Hochburg-Ach und St. Koloman ist in Abbildung 11 und Abbildung 12 dargestellt.

Die Ozonkonzentration stieg am 10.7. ab 10:00 – mit Auflösung der nächtlichen bodennahen Inversion – am Haunsberg und in Hochburg-Ach von einem morgendlichen Minimum (ca. 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) rasch auf 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, etwa eine Stunde später auch auf der Zistelalm und in Salzburg Lehen, auf dem Gipfel des Gaisberges erst später und langsamer.

Das Gewitter am Nachmittag brachte einen Einbruch der Ozonkonzentration an den meisten betrachteten Stationen auf ca. 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, nicht jedoch am Gaisberg-Gipfel, wo die Konzentration bis 23:00 über 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ blieb.

Auf dem Gaisberg-Gipfel stieg am 11.7. zwischen 5:00 und 6:30 die Ozonkonzentration von 88 auf 126 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Dabei handelte es sich um Advektion ozonreicher – und etwas kühlerer – Luft in der freien Troposphäre, deren Ursache anhand der Bodenmeßdaten nicht erklärt werden kann. Auch in der folgenden Nacht blieb die Ozonkonzentration am Gipfel auf diesem Niveau. Sie sank bis 13:00 ab, beim vormittäglichen Gewitter auf ca. 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, schwankte im Lauf des Nachmittags stark, pendelte sich aber ab 20:30 wieder um 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ein.

An den Stationen Zistelalm, St. Koloman und Haunsberg blieb die Ozonkonzentration die Nacht (11./12.7.) über bei ca. 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Am Vormittag des 12.7. stieg – dank photochemischer Ozonbildung – die Ozonkonzentration im Raum Salzburg, ungefähr temperaturparallel, über 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ hinaus an, wobei in Hochburg-Ach 137 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ erreicht wurden; lediglich auf der Zistelalm stieg die Konzentration nur langsam und nicht temperaturparallel an.

Am Gipfel pendelte sie sich in der folgenden Nacht bei ca. $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ein.

Am 13.7. stieg vormittags an allen Meßstellen (außer Zistelalm) die Ozonkonzentration einheitlich auf ca. $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Um ca. 18:00 brachte ein Gewitter im Raum Salzburg einen Temperatursturz in allen Höhen; der Wind drehte am Gaisberg-Gipfel von Nord auf Süd. Während an den in der Niederung gelegenen Meßstellen die Ozonkonzentration abzusinken begann, stieg sie am Gipfel auf $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$; Zistelalm und St. Koloman folgten diesem Verlauf teilweise. Am 14.7. um 1:00 wurde es am Gaisberg-Gipfel kühler, der Wind drehte hier von Süd auf Nordwest und wurde stärker. Die Ozonkonzentration sank abrupt auf unter $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Am Morgen des 14.7. sank die Ozonkonzentration an den hoch gelegenen Stationen infolge früh einsetzender Labilisierung und Luftmassenaustauschs mit dem Tal kurz auf unter $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, anschließend folgte sie dem Konzentrationsverlauf aller Stationen im Raum Salzburg auf ca. $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

An den einzelnen Stationen begann die Ozonkonzentration im Zuge des Kaltlufteinbruchs zwischen 16:00 und 18:00 rapid zu fallen, doch sank sie nicht so tief wie in den vorangegangenen Nächten, da bei der deutlichen Abkühlung in der Höhe, beim starken Wind und der entsprechend guten Durchmischung sich keine bodennahe Inversion bildete. Zwischen den Stationen bildete sich aber ein höhenabhängiger Vertikalgradient aus: die höchste Ozonkonzentration trat mit ca. $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in St. Koloman und am Gaisberg-Gipfel auf, wohingegen sie in Salzburg Lehen zwischen 25 und $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ variierte.

4.2 13. bis 16. August 1997

4.2.1.1.1 Großwetterlage

Am 13. und 14. August 1997 erstreckte sich ein Hochdruck-Keil vom Mittelmeer über Mitteleuropa bis Island. Über Mitteleuropa herrschte am Boden relativ flache Druckverteilung, es war warm und zumeist wolkenlos. Sowohl in der mittleren Troposphäre als auch in Bodennähe wehte meist nördlicher Wind; bis zum 16. August drehte die Höhenströmung mehr auf West.

Am 14.8. bildeten sich im Alpenraum Quellwolken, am 15. und 16. 8. drang vom Westen her sehr feuchte Luft, gesteuert von einem kleinräumigen Höhentief über Norddeutschland, bis in den Ostalpenraum vor. Es kam hier zu intensiver konvektiver Bewölkung und einigen Regenschauern.

4.2.1.1.2 Lokale meteorologische Situation

Der Verlauf der Temperatur an den Meßstellen Gaisberg-Zistelalm, Gaisberg-Gipfel, Gaisberg-Judenbergalm, Salzburg Freisaalweg, Hochburg-Ach, St. Koloman und Untersberg ist in Abbildung 13 und Abbildung 14 dargestellt; Abbildung 15 und Abbildung 16 zeigen die vertikale Temperaturdifferenz zwischen den Stationen Salzburg Freisaalweg, Gaisberg-Judenbergalm und Gaisberg Gipfel, Abbildung 17 und Abbildung 18 die Windrichtung am Haunsberg, am Gaisberg-Gipfel, in Hochburg-Ach und am Untersberg.

Der 13. und 14.8. waren sonnige Tage; in Hochburg-Ach erreichte die Temperatur jeweils 27°C , wobei am 13.8. der Temperaturanstieg verzögert erfolgte.

Am 15.8. wurde der Raum Salzburg mittags von einem Gewitter heimgesucht, welches ab 11:00 einen markanten Temperaturrückgang (am Freisaalweg von 25,5 auf

20°C) brachte; in Hochburg-Ach hingegen blieb es bis zum Abend sonnig. Der 16.8. war dann wieder ein weitgehend wolkenloser Tag.

Das Temperaturprofil zeigt jeweils tagsüber Labilisierung und nachts die Ausbildung einer ausgeprägten Bodeninversion zwischen Salzburg Freisaalweg und Gaisberg Judenbergalm. Im oberen Bereich des Temperaturprofils Gaisberg trat hingegen meistens leicht labile Schichtung auf. In der Nacht vom 13. zum 14.8. fand zwischen Gaisberg-Judenbergalm (der wärmsten Station des Profils) und Gipfel sogar deutliche Labilisierung (Temperaturdifferenz maximal 7,5 °C) statt.

In den frühen Morgenstunden des 15.8. fiel die Temperatur an den höher gelegenen Meßstellen rasch ab (Minimum am Gipfel 10,5 °C gegenüber 12°C in den vorangegangenen Nächten), vermutlich im Zuge eines Gewitters.

Die Temperaturschichtung war zwischen Gaisberg-Gipfel und Untersberg in der Nacht immer stabil. Am 15. und 16.8. labilisierte sich diese Luftschicht auch tagsüber nicht, es bildete sich kurzzeitig mittags gerade ein neutraler Temperaturgradient aus.

Am Untersberg wehte vom 13. bis 15.8. morgens beständig Westwind. Am 15.8. drehte er zeitweise auf Nord, am 16.8. wurde bis zum Abend wieder Westwind registriert. Ab dem 13.8. morgens wehte am Gaisberg-Gipfel durchwegs Nordwestwind mit 1 bis 2 m/s. Am Haunsberg und in Hochburg-Ach wurde nachts häufig südlicher Wind registriert, wahrscheinlich die talauswärtige Strömung des Salzachtales. Die Windgeschwindigkeit nahm am 15.8. zeitweise auf bis 4 m/s zu. Am Abend des 15.8. drehte der Wind am Gipfel zeitweise auf Ost, am Abend des 16.8. erfolgte an allen Stationen im Raum Salzburg eine Winddrehung auf Ost – verbunden mit kleinräumiger Tiefbildung über den Ostalpen –, wobei die Geschwindigkeit bis auf 4 m/s anstieg.

4.2.1.1.3 Ozon

Der Verlauf der Ozonkonzentration vom 13. bis 16.7. an den Meßstellen Gaisberg-Zistelalm, Gaisberg-Gipfel, Salzburg Lehen, Haunsberg, Hochburg-Ach und St. Koloman ist in Abbildung 19 und Abbildung 20 dargestellt.

Der Ozonkonzentrationsverlauf wurde am 13.8. im Raum Salzburg primär von vertikalen Austauschprozessen und Ozonabbau und kaum von photochemischer Ozonbildung bestimmt. Nachts bildete sich ein höhenabhängiger Konzentrationsgradient aus. Mit Aufbrechen der Bodeninversion stieg die Ozonkonzentration ab 10:00 (Gaisberg-Gipfel 70 µg/m³, Salzburg Lehen 22 µg/m³) sprunghaft an und hielt sich tagsüber auf einem einheitlichen und konstanten Niveau von 115 bis 130 µg/m³. Etwas höher mit bis 140 µg/m³ war die Ozonkonzentration in Hochburg-Ach.

In der Nacht vom 13. auf den 14.8. - in welcher sich zwischen Salzburg und Judenbergalm eine starke Inversion ausbildete, hingegen zwischen Judenbergalm und Gipfel labile Schichtung und zwischen Gaisberg-Gipfel und Untersberg wieder eine stabile Schichtung bestand - blieb die Ozonkonzentration am Gipfel, in St. Koloman, auf der Zistelalm und am Haunsberg bei 110 bis 130 µg/m³ und sank an den tief gelegenen Meßstellen abends sofort auf 20 bis 40 µg/m³ ab.

Am Vormittag des 14.8. bildete sich ab ca. 10:00 wieder ein vertikal einheitliches Konzentrationsniveau aus. Es setzte photochemische Ozonbildung ein, nachmittags wurden relativ einheitlich 160 µg/m³ erreicht.

Während aber Abends an den tief gelegenen Meßstellen die Konzentration wieder abfiel, stieg sie an den Stationen Gaisberg-Gipfel, St. Koloman, Zistelalm und Haunsberg weiter an, nach 20:00 bei Drehung des Windes am Gipfel von Nordwest

auf Süd bis auf $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$. In der Nacht wurden die höchsten Ozonkonzentrationen des Jahres 1997 im Raum Salzburg erreicht, wobei der 14. und 15.8. jene Tage waren, an denen Gaisberg-Gipfel den Schwellenwert der EU-Ozon-Richtlinie zur Information der Bevölkerung – $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ als Einstundenmittelwert – überschritt. Gaisberg-Gipfel war die deutlich höchstbelastete Station im Raum Salzburg. Der Konzentrationsanstieg kann nur als Folge von Advektion mit südlichem Wind erklärt werden.

Der relativ starke Wind unterband ein starkes Absinken der Ozonkonzentration an den niedrig gelegenen Meßstellen, deren Konzentration sich auf ca. $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ einpendelte.

Bereits ab dem 15.8. 2:00 fiel an den exponierten Meßstellen die Ozonkonzentration wieder auf 140 bis $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ab, verbunden mit einer raschen Abkühlung und deutlicher Zunahme der Windgeschwindigkeit (bis 5 m/s am Haunsberg), vermutlich infolge eines Gewitters.

Am Vormittag des 15.8. bildete sich dann wieder ein vertikal einheitliches Konzentrationsniveau um $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aus; lediglich am Gaisberg-Gipfel war die Konzentration viel höher, sie stieg kurzzeitig auf $163 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Im Tagesverlauf wurde es an den höher gelegenen Stationen, v.a. Untersberg und Gaisberg-Gipfel, kontinuierlich kühler. Der relativ starke Wind stand in Zusammenhang mit dem Eindringen feuchter, kalter Luft von Westen. Während das nachmittägliche Gewitter und die nachfolgende Abkühlung die Ozonbelastung am Gipfel nur wenig beeinflusste – sie blieb hier bei 140 bis $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ –, sank die Konzentration sonst überall rasch, aber unregelmäßig ab. Der relativ starke Wind führte in der Nacht zu einem weiteren nur langsamen und unregelmäßigen Konzentrationsrückgang. Ab 22:00, bei Südwind am Gaisberg-Gipfel, aber Westwind am Untersberg, wurde es in der Höhe kälter, und die Ozonkonzentration fiel auf ca. $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$; auf diesem Niveau verblieb sie am 16.8.

Am Vormittag dieses Tages stieg an den tiefer gelegenen Meßstellen die Konzentration auf genau dieses Niveau an, photochemische Ozonbildung fand kaum statt. In der folgenden Nacht bildete sich wieder ein höhenabhängige Konzentrationsgefälle aus.

4.3 1. bis 3. September 1997

4.3.1.1.1 Großwetterlage

Ein flaches Hochdruckgebiet lag am 1.9. über Mitteleuropa; im 500 hPa -Niveau erstreckte sich ein Hochdruckkeil vom Mittelmeer über Mitteleuropa bis Nordskandinavien. Über den Britischen Inseln lag ein Tiefdruckgebiet mit einer weit nach Südwesteuropa reichenden Frontalzone, an deren Vorderseite warme Luft nach Mitteleuropa geführt wurde. Es war hier meist wolkenlos und ungewöhnlich warm.

Die genannte Frontalzone erreichte am 2.9. mittags Deutschland, brachte aber trotz starker Bewölkung nur wenig Niederschlag. Der Wind drehte bereits in der Nacht von Südost auf West. Mit weiteren Frontalزونen kam am 3.9. etwas kühlere Luft nach Mitteleuropa, wobei es relativ wenig regnete.

4.3.1.1.2 Lokale meteorologische Situation

Der Verlauf der Temperatur an den Meßstellen Gaisberg-Zistelalm, Gaisberg-Gipfel, Gaisberg-Judenbergalm, Salzburg Freisaalweg, Hochburg-Ach, St. Koloman und

Untersberg ist in Abbildung 21 dargestellt; Abbildung 22 zeigt die vertikale Temperaturdifferenz zwischen den Stationen Salzburg Freisaalweg, Gaisberg-Judenbergalm und Gaisberg Gipfel, Abbildung 23 die Windrichtung und Abbildung 24 die Windgeschwindigkeit am Haunsberg, in Hochburg-Ach, am Gaisberg-Gipfel und am Untersberg.

Der 1.9. war ein sonniger, warmer Tag (Maximaltemperatur von 24,5 °C in Hochburg-Ach). Bei starker Erwärmung in allen Höhenlagen (Maximum am Gaisberg-Gipfel 21,5 °C) kam es zu keiner Labilisierung der Atmosphäre im Bereich des Profils Gaisberg.

Am Untersberg drehte der starke Westwind (über 5 m/s) vormittags auf unbeständigen nordwestlichen Wind (am Gaisberg bei 1 bis 2 m/s). Um 18:00 kam starker Südostwind auf, wobei am Haunsberg bis 6 m/s gemessen wurden; am Gaisberg-Gipfel stieg die Windgeschwindigkeit erst spät in der Nacht auf über 5 m/s. In der Nacht bildete sich eine starke Inversion aus, da oberhalb der Judenbergalm die Temperatur bei Südostwind kaum absank (sie lag auf der Judenbergalm bis 3:00 bei ca. 19°C) und am Untersberg noch deutlich anstieg, während in der Ebene die Temperatur stark fiel (Minimum in Hochburg-Ach 11°C).

Mit der Winddrehung von Südost auf West in allen Höhenlagen - bei immer noch hohen Geschwindigkeiten von 3 bis 5 m/s - fiel an den höheren Stationen die Temperatur nach 2:00 abrupt auf ca. 16°C, wobei die Inversion unterhalb der Judenbergalm aber noch bestehen blieb.

Es blieb auch am 2.9. sonnig, die Temperatur stieg in Hochburg-Ach auf 24°C. Tagsüber bildete sich ein labiler Temperaturgradient zwischen Salzburg-Freisaalweg und Judenbergalm bzw. Gipfel aus. Besonders labil war die Schichtung zwischen Gaisberg-Gipfel und Untersberg.

In der folgenden Nacht sank die Temperatur überall gleichmäßig ab, es bildete sich eine leichte Inversion zwischen Freisaalweg und Judenbergalm.

Der 3.9. war teilweise bewölkt, die Temperatur stieg in Hochburg-Ach auf maximal 24°C, erreichte aber an den höher gelegenen Meßstellen nur ein deutlich geringeres Niveau als an den Vortagen, was Labilisierung im oberen Teil des Temperaturprofils bis zum Untersberg zur Folge hatte.

Der Wind wehte ab dem 2.9. 22:00 auf dem Untersberg von Südosten, am Haunsberg und in Salzburg hingegen zumeist von Westen, am Gaisberg-Gipfel wehte unregelmäßiger Wind, wobei die Geschwindigkeiten zwischen 1 und 3 m/s stark variierten.

4.3.1.1.3 Ozon

Der Verlauf der Ozonkonzentration vom 1. bis 3.9. an den Meßstellen Gaisberg-Zistelalm, Gaisberg-Gipfel, Salzburg Lehen, Haunsberg, Hochburg-Ach und St. Koloman ist in Abbildung 25 dargestellt.

Die Ozonkonzentration war am Beginn des 1.9. am Gaisberg-Gipfel mit 80 µg/m³ vergleichsweise niedrig und erreichte an diesem Tag nachmittags auch nur maximal 95 µg/m³. Nachmittags fand gute vertikale Durchmischung statt.

In der folgenden windigen und von einer sehr starken bodennahen Inversion bestimmten Nacht blieb am Gaisberg-Gipfel, in St. Koloman, am Haunsberg und auf der Zistelalm, aber zunächst auch in Hochburg-Ach die Ozonkonzentration hoch (Mi-

nimum am Gipfel $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$), sie sank aber an den Meßstellen in Salzburg-Stadt unter $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ab.

Die Winddrehung auf West und die plötzliche Abkühlung um ca. 3:00 führten zu einem Anstieg der Ozonkonzentration am Gaisberg-Gipfel und auf der Zistelalm auf 80 bis $85 \mu\text{g}/\text{m}^3$, wohingegen sie in St. Koloman und am Haunsberg leicht und in Hochburg-Ach stark (auf $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) abfiel.

Am Vormittag des 2.9. stieg die Ozonkonzentration ab 11:00 an allen Meßstellen im Raum Salzburg sprunghaft an auf ca. 135 bis $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Bedingt durch den verzögerten Temperaturanstieg an den höher gelegenen Stationen fand starke Labilisierung im gesamten erfaßten Temperaturprofil statt, ganz besonders, nachdem am Untersberg um 12:00 die Temperatur deutlich abfiel. Dieser Konzentrationsanstieg weit über das am Gaisberg-Gipfel beobachtete nächtliche Niveau hinaus deutet Einmischung ozonreicher Luft aus einer noch höher gelegenen Reservoirschicht hin.

Bis zum folgenden Morgen blieb an den höher gelegenen Meßstellen Gaisberg-Gipfel, Zistelalm, St. Koloman und Haunsberg die Ozonkonzentration – auch unbeeinflusst von der Winddrehung von West auf Südost – auf diesem hohen Niveau, wobei Konzentrationsschwankungen zwischen ca. 120 und $145 \mu\text{g}/\text{m}^3$ auftraten. In Salzburg und in Hochburg-Ach fiel die Konzentration abends hingegen rasch ab, zwischen 19:00 und 3:00 allerdings verzögert durch offensichtlich turbulenten Austausch mit höheren Schichten, der sich auch an leicht erhöhten Temperaturen am Gaisberg erkennen läßt.

Der Wind wurde in der Nacht schwächer, um ca. 22:00 drehte er am Untersberg von West auf Südost, blieb im Tiefland hingegen bei West; diese Situation hielt den ganzen 3.9. über an. Die Winddrehung in der Höhe beeinflusste die Ozonverteilung zunächst nicht. Ab 2:00 am 3.9. begann am Haunsberg die Ozonkonzentration zu sinken, als die Station bereits unter der Inversion lag; an den anderen exponierten Meßstellen sank sie ab ca. 5:00 auf das Niveau am Haunsberg von ca. $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Zwischen Freisaalweg und Judenbergalm bildete sich nachts eine schwache Inversion aus, wohingegen zwischen Judenbergalm und Gaisberg-Gipfel noch bis in die Nacht hinein labile Schichtung bestand, ehe die Abkühlung auf der Judenbergalm zu Stabilisierung führte. Gegenüber den vorangegangenen Nächten blieb es in den Niederungen wegen stärkerer Bewölkung aber vergleichsweise warm (Minimum in Hochburg-Ach 14°C).

Der 3.9. war vergleichsweise kühl und teilweise war es bewölkt. Ab 10:00 stieg die Ozonkonzentration an den höher gelegenen Meßstellen sowie in Hochburg-Ach wieder rasch an, am stärksten am Gaisberg-Gipfel (auf maximal $123 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Kurzzeitig – parallel zu einem Temperaturanstieg auf 24°C – wurde in Hochburg-Ach eine höhere Konzentration von $134 \mu\text{g}/\text{m}^3$ registriert.

5 Empfehlungen

Die Ozonmessung auf dem Gaisberg-Gipfel zeigt, daß sich dieser Standort sehr gut zur Untersuchung der Vertikalverteilung der Ozonkonzentration im Raum Salzburg eignet. Allerdings werden gerade die höchsten Ozonkonzentrationen – sowohl am Gaisberg-Gipfel selbst, als auch, infolge weiterer vertikaler Durchmischung, an den Meßstellen in der Ebene – von atmosphärischen Transportvorgängen bestimmt, die auch in der Höhe des Gaisberges nicht erfaßt werden können.

Es wird angeregt, im Rahmen einer weiteren Meßkampagne auf dem Untersberg (1800 m) Ozon zu messen, welcher als exponiertester und höchster Standort für derartige Untersuchungen im Raum Salzburg zur Verfügung steht.

Ozon: Mittlerer Tagesgang, März bis September 1997

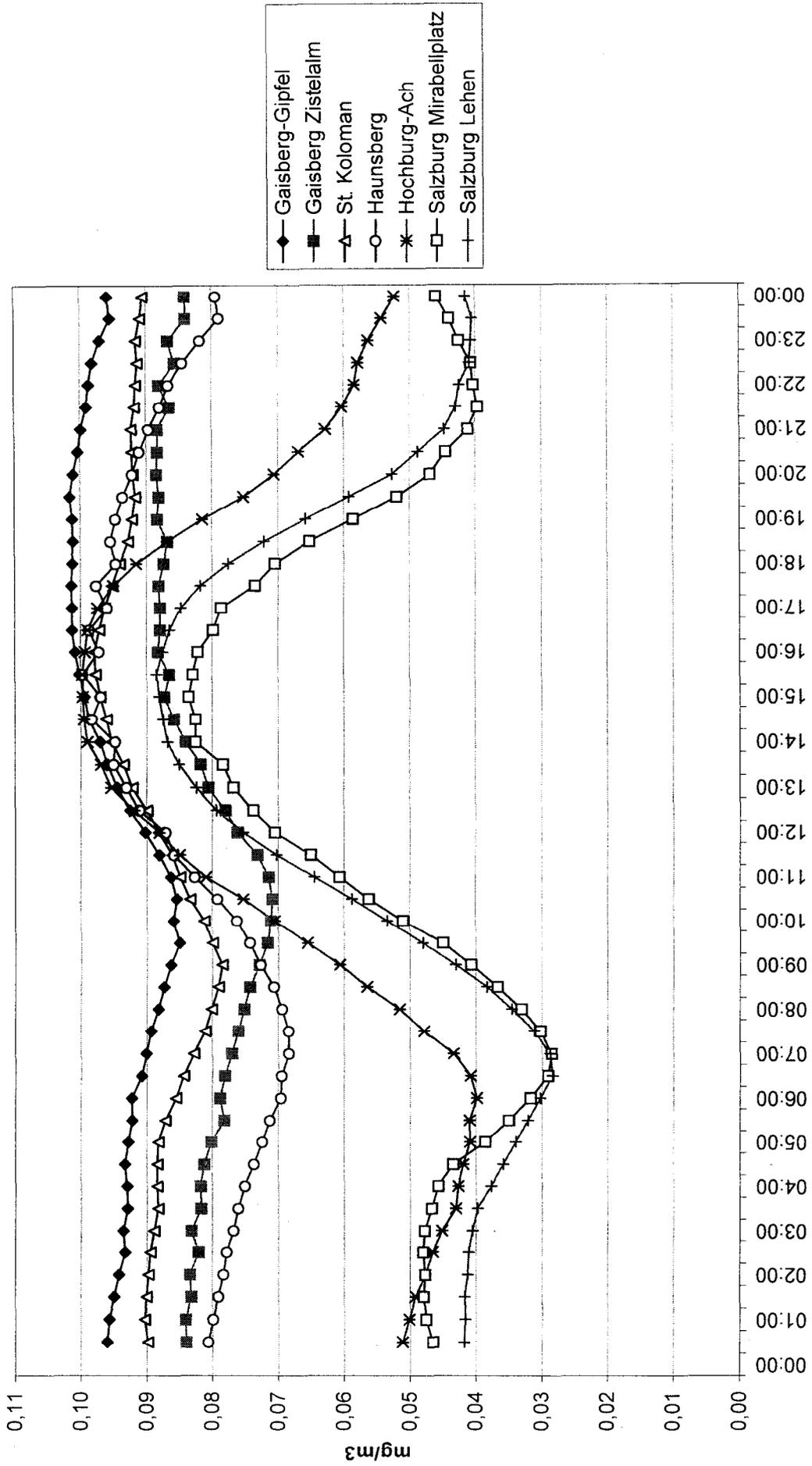


Abbildung 2

Ozonkonzentrationsdifferenz gegenüber Gaisberg-Gipfel in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz
 Salzburg-Freisaalweg - Gaisberg-Gipfel

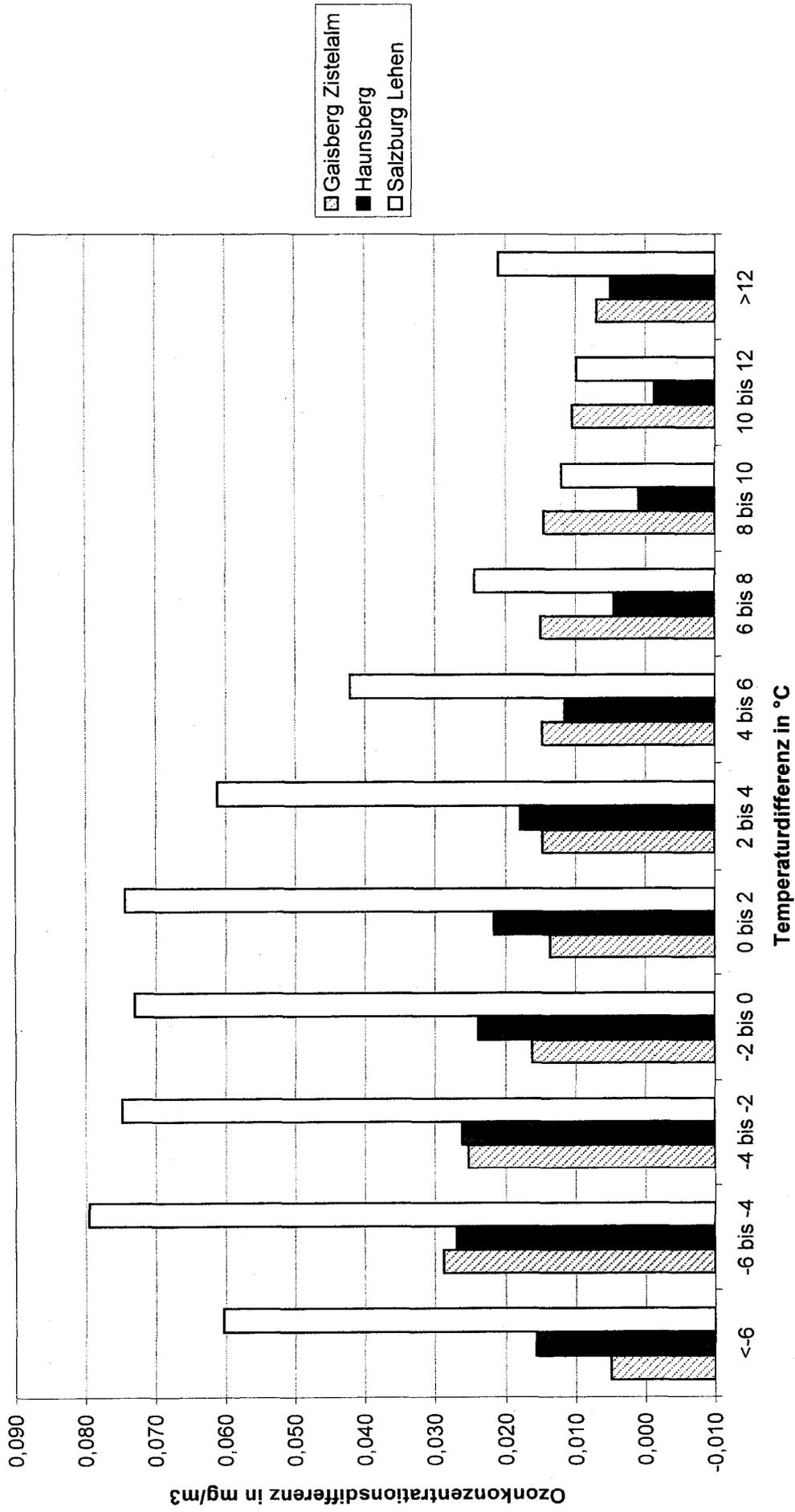


Abbildung 3

Ozonkonzentrationsdifferenz gegenüber Gaisberg-Gipfel in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen Salzburg-Freisaalweg und Gaisberg-Judenbergalm

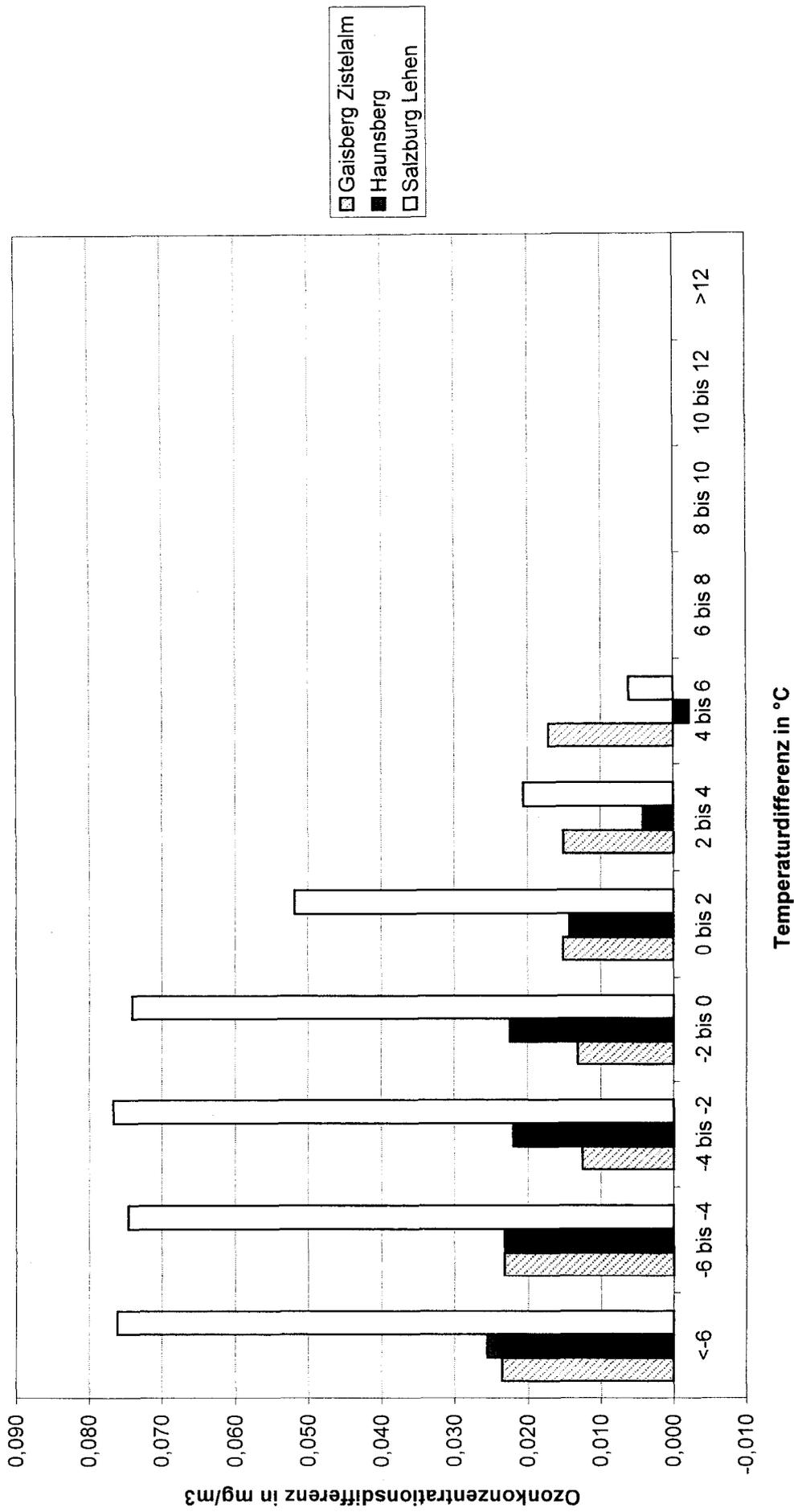


Abbildung 4

Ozonkonzentrationsdifferenz gegenüber Gaisberg-Gipfel in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz
 zwischen Gaisberg-Judenbergalm und Gaisberg-Gipfel

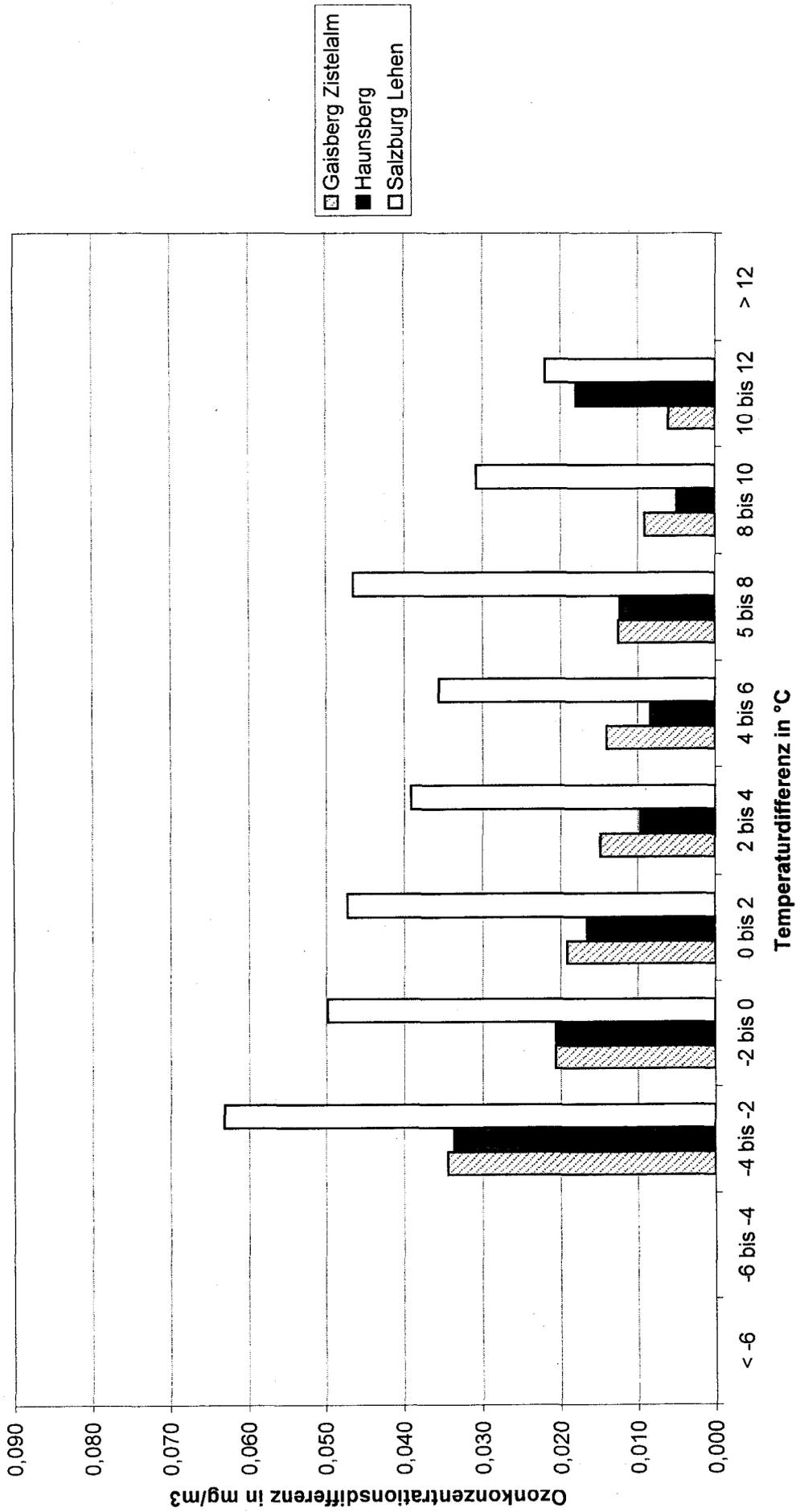


Abbildung 5

Differenz der Ozonkonzentration gegenüber Gaisberg-Gipfel

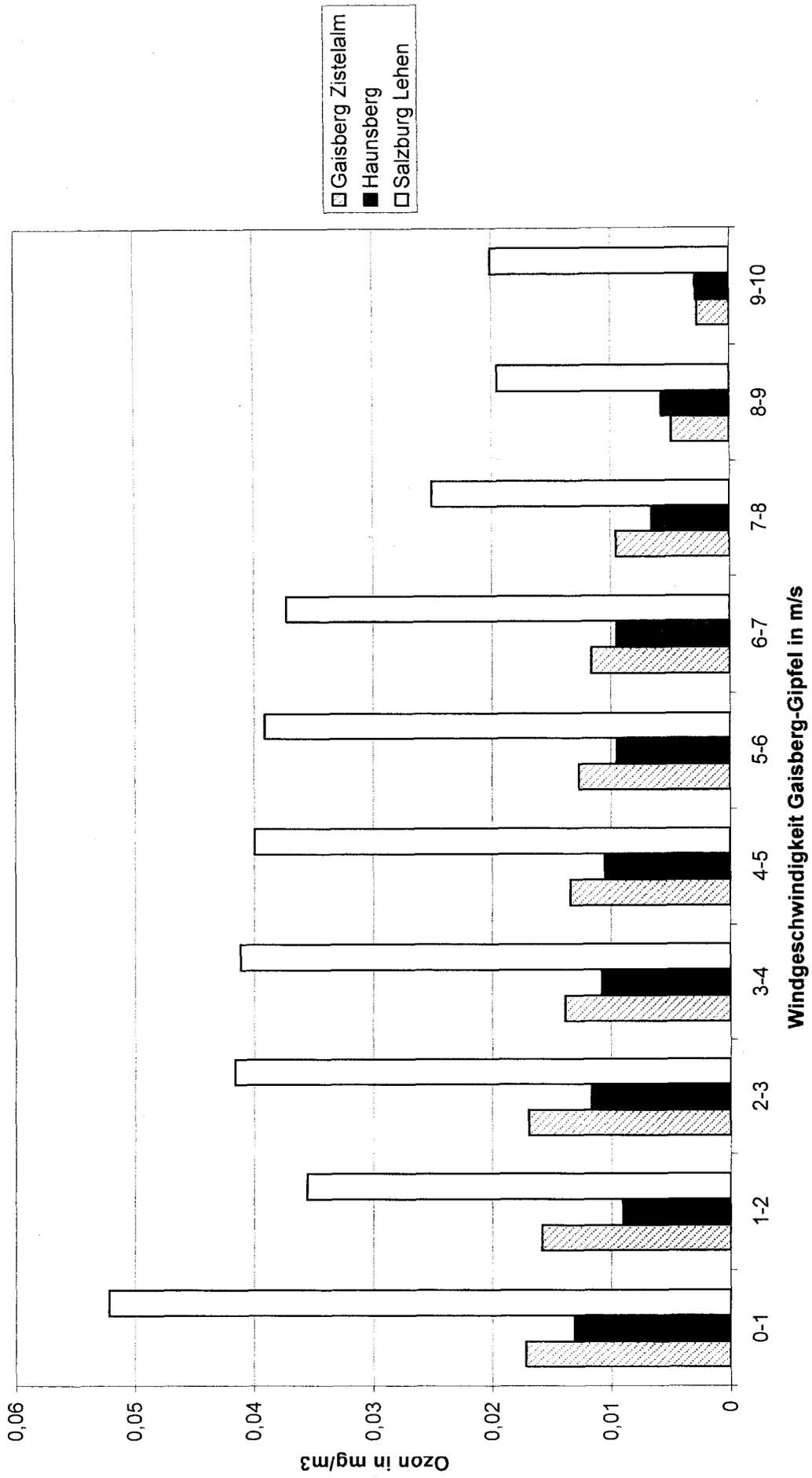


Abbildung 6

Ozon, 10. bis 12. Juli 1997

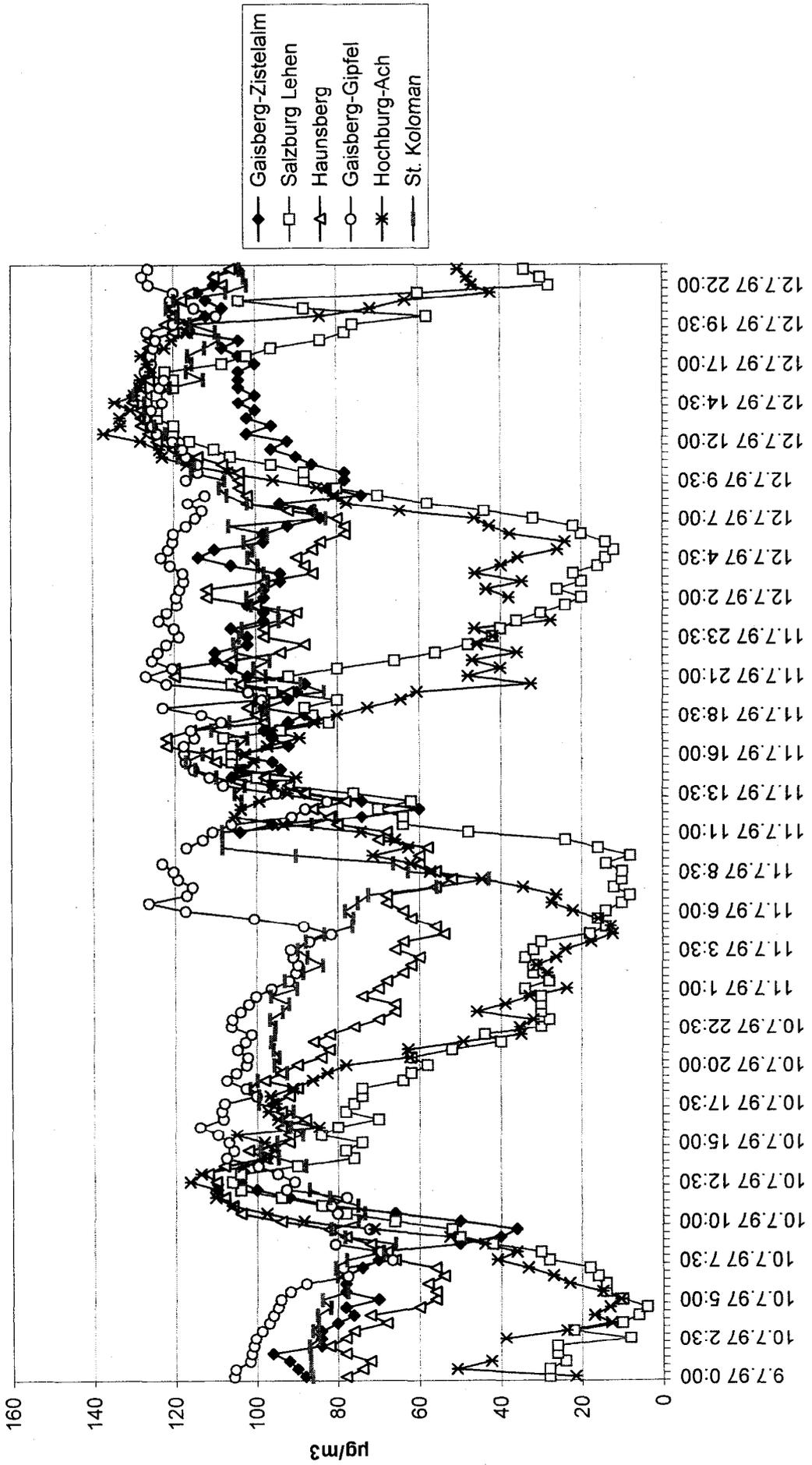


Abbildung 7

Ozon, 13. - 15.7. 1997

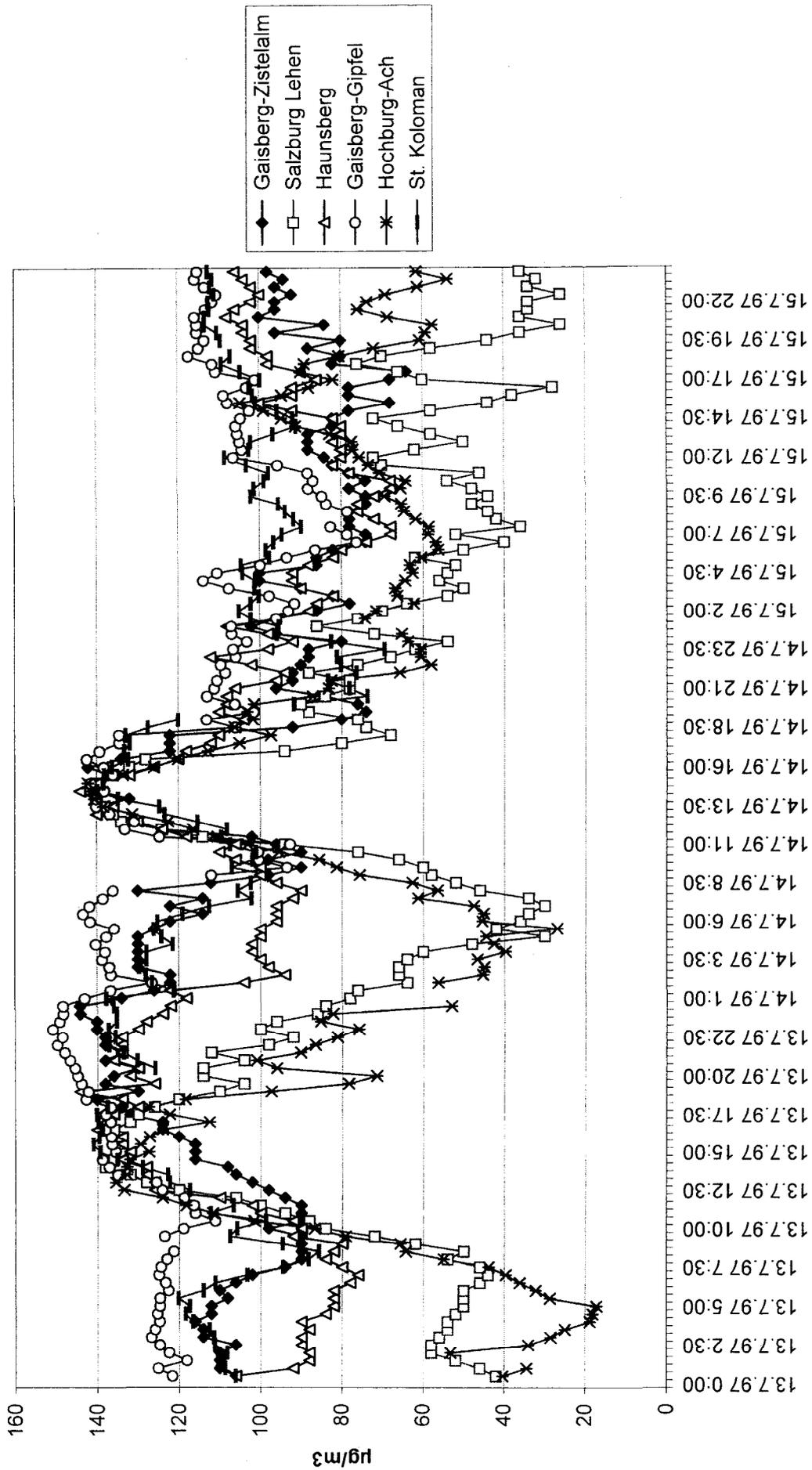


Abbildung 8

Temperatur, 10.-12.7. 1997

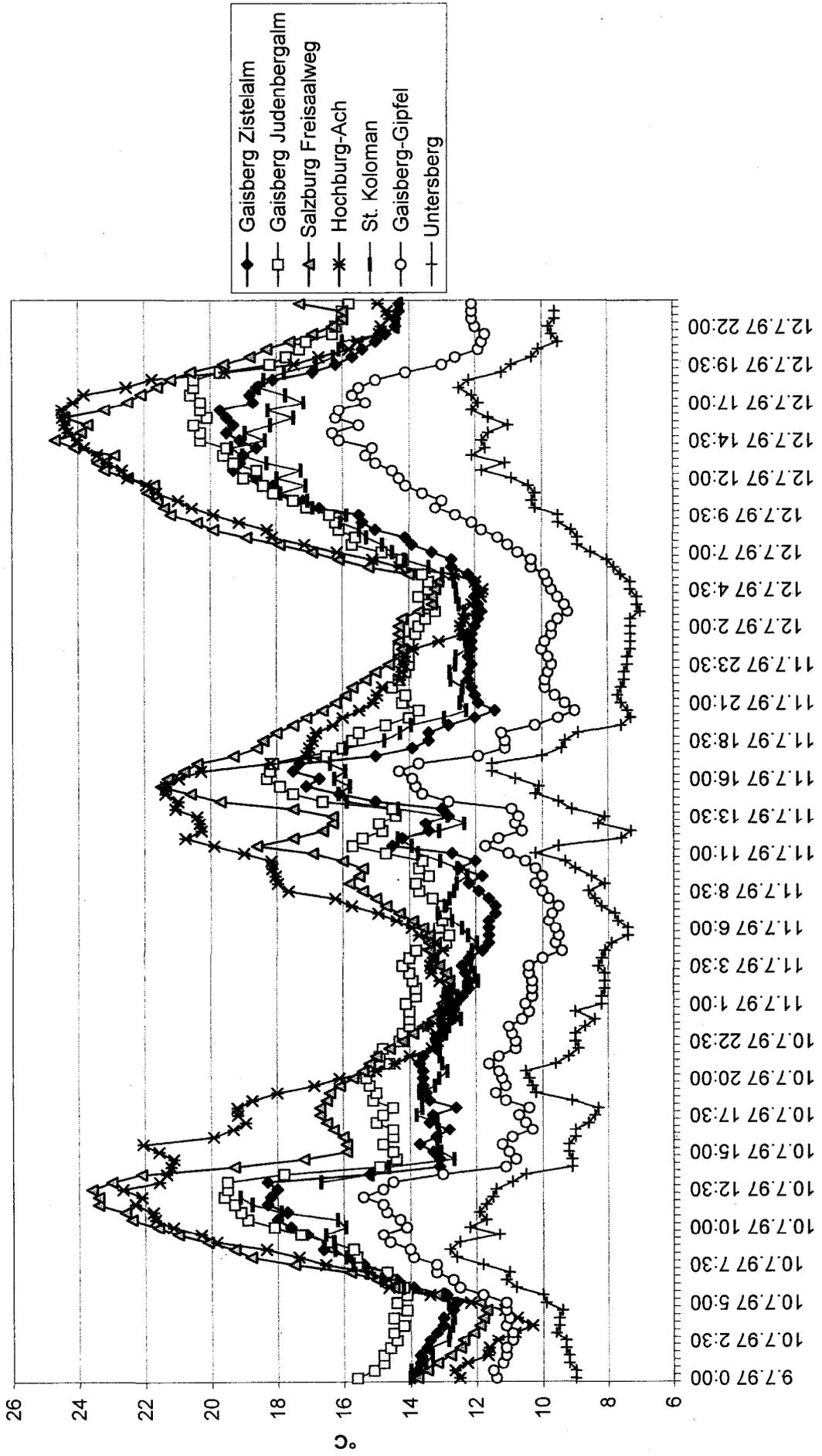


Abbildung 9

Temperaturdifferenz, 10.-12.7.1997

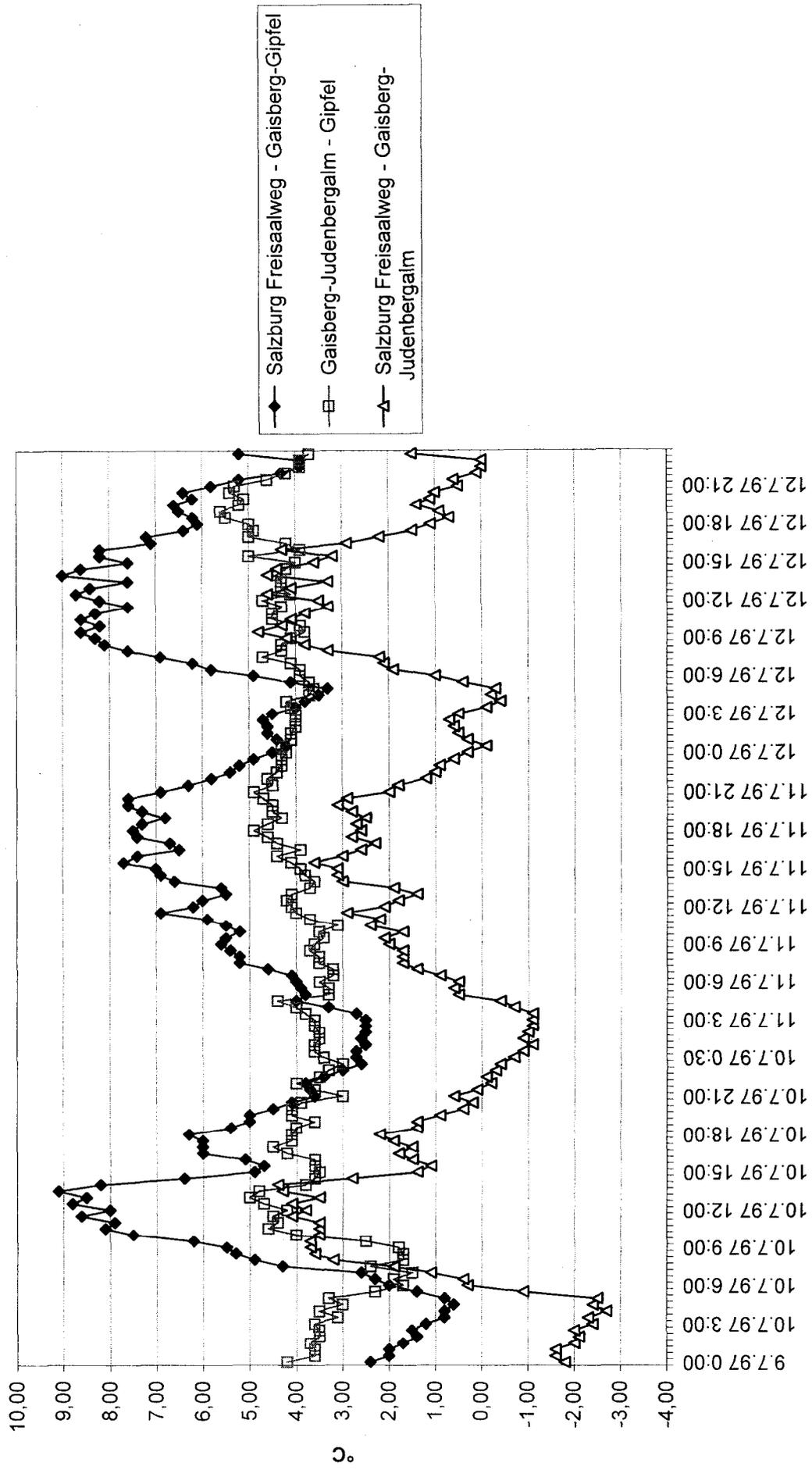


Abbildung 11

Ozon, 13. - 14. 8. 1997

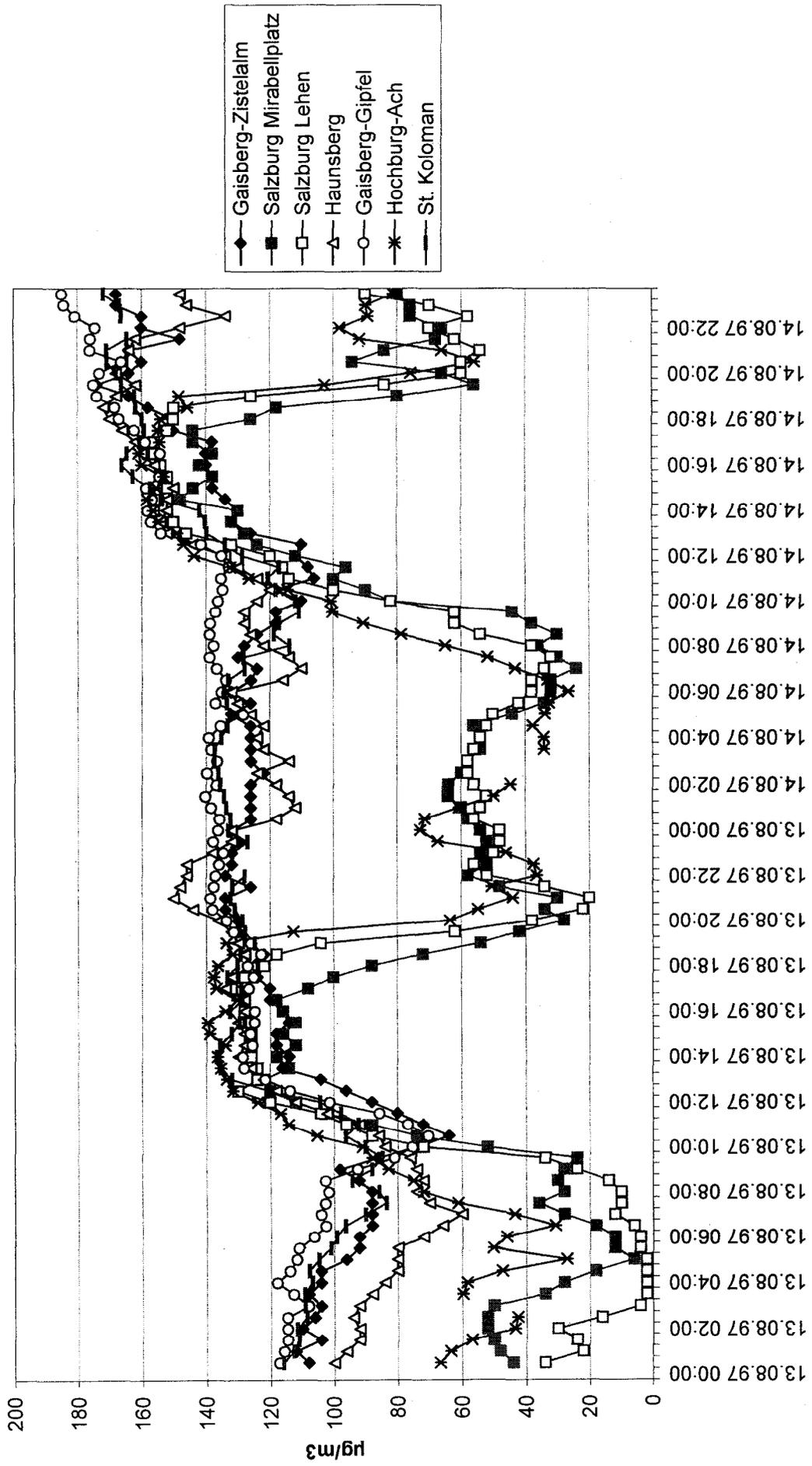


Abbildung 13

Ozon, 15.-16.8. 1997

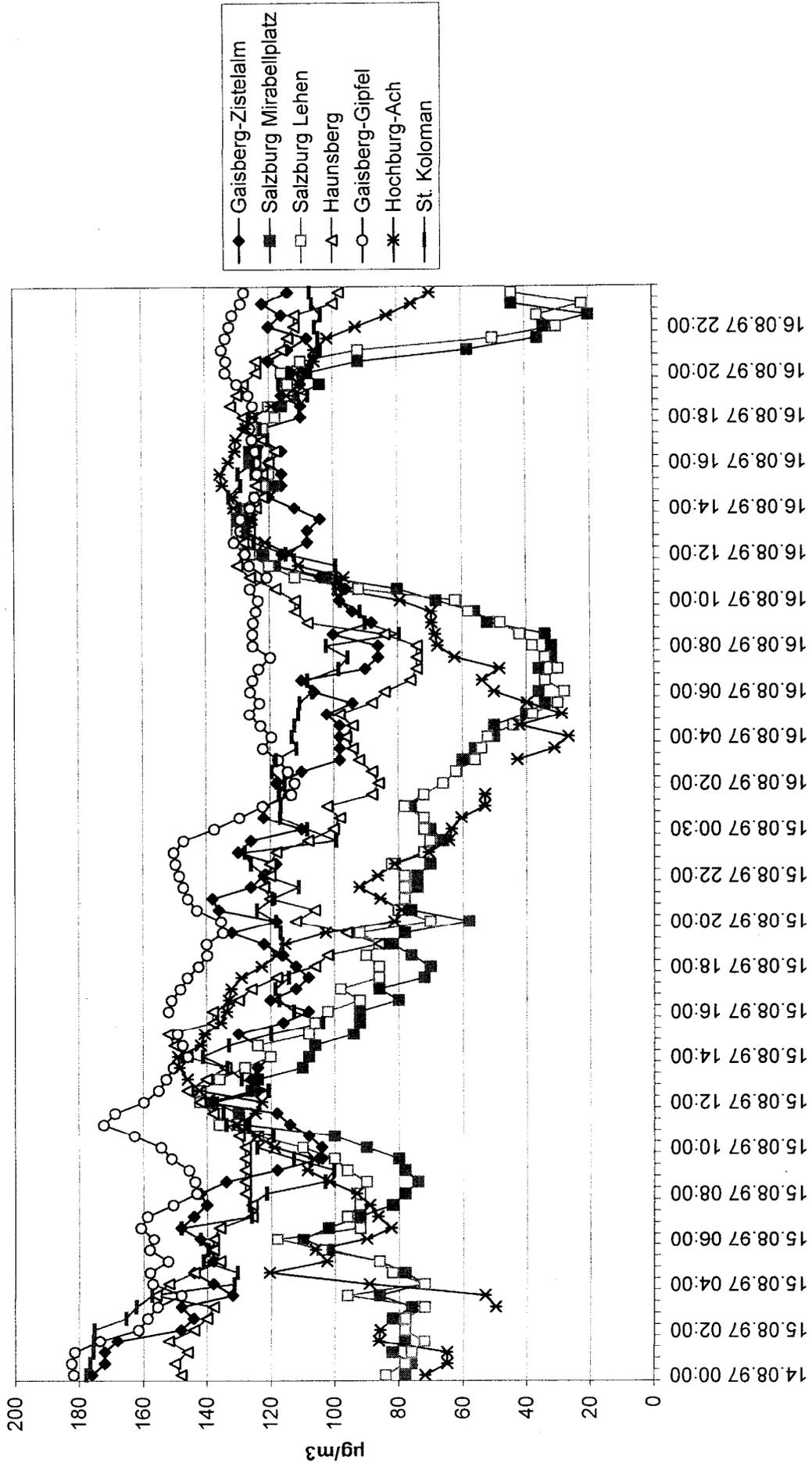


Abbildung 14

Temperatur, 13.-14.8. 1997

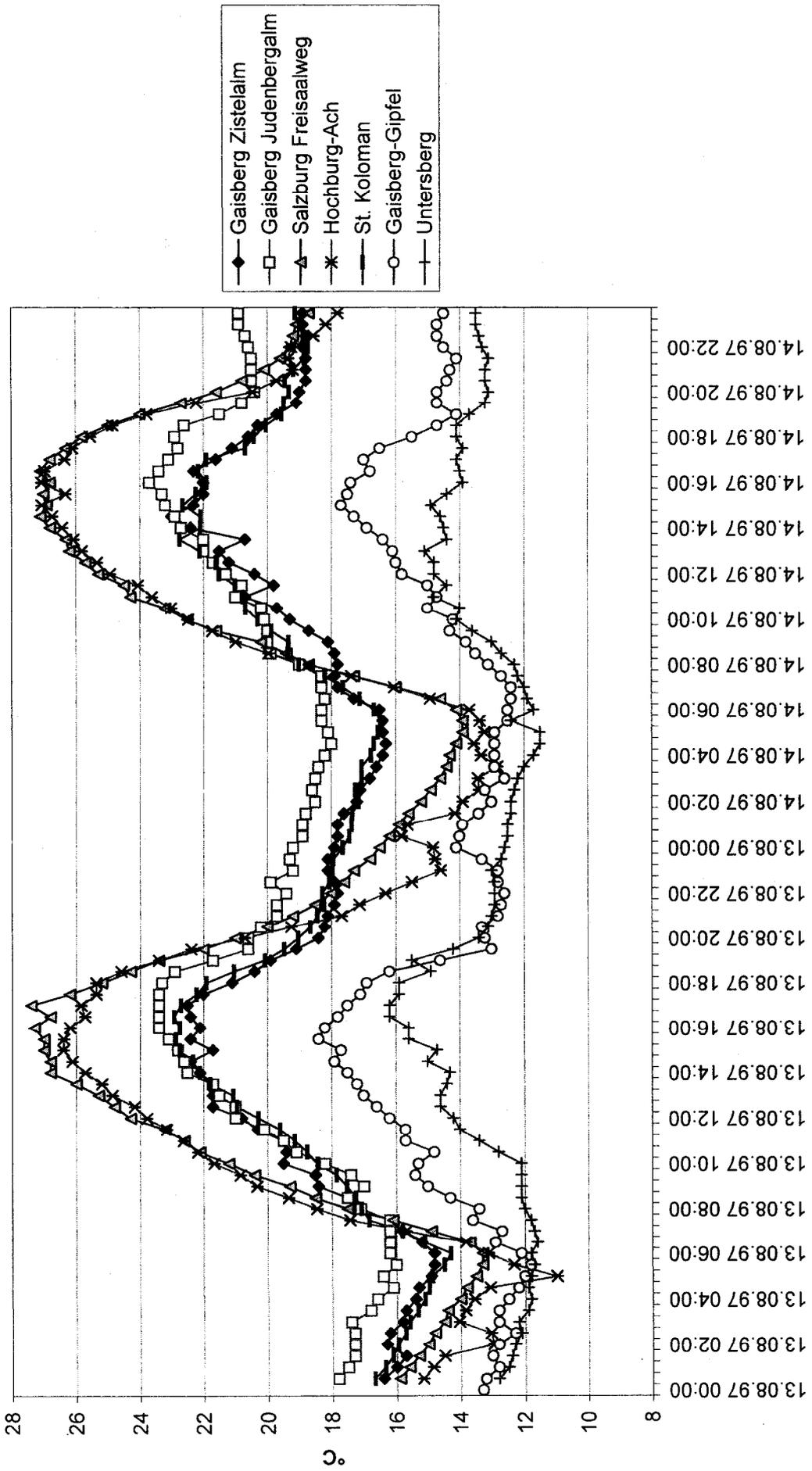


Abbildung 15

Temperatur, 15. bis 16. 8. 1997

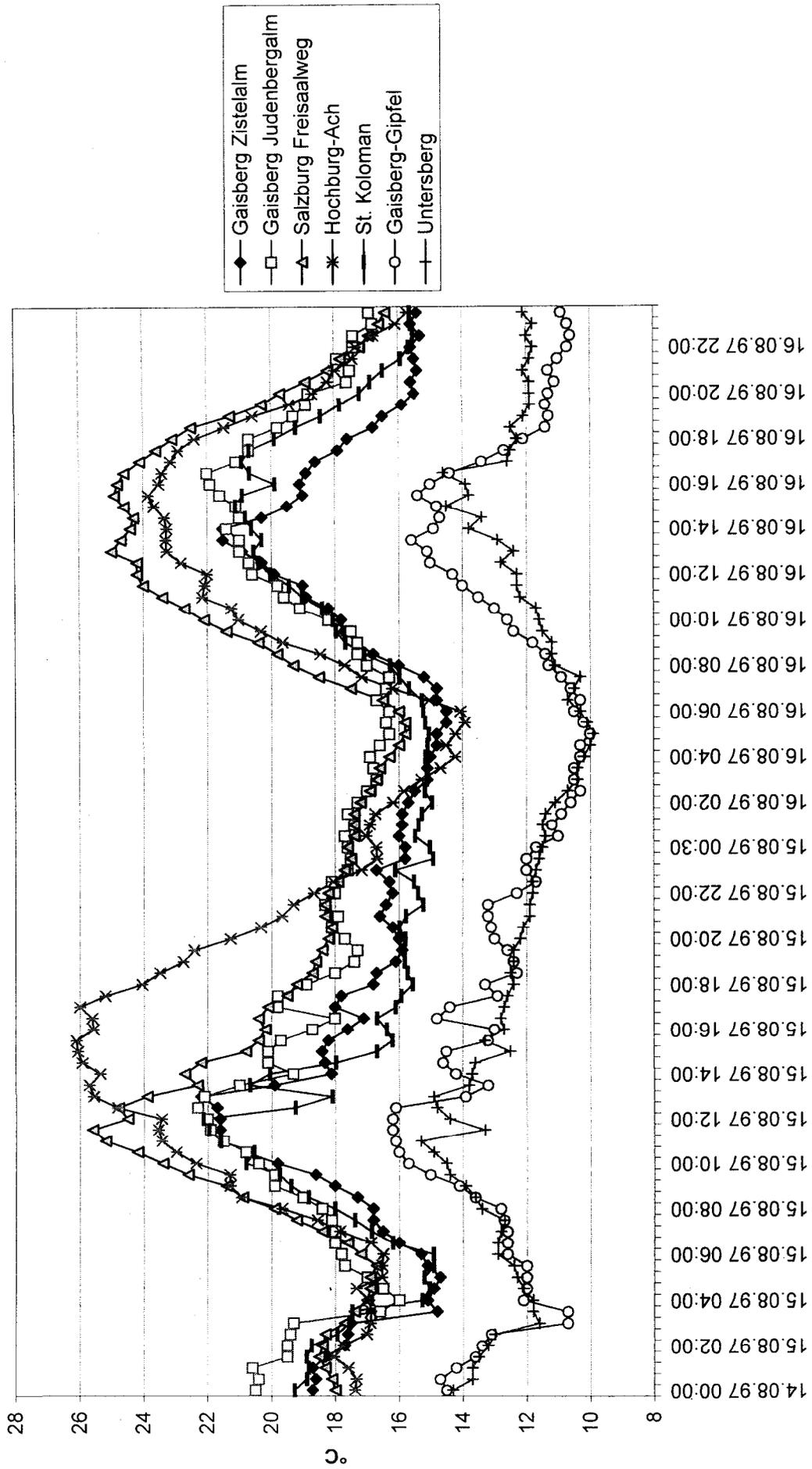


Abbildung 16

Temperaturdifferenz, 13. - 14. 8. 1997

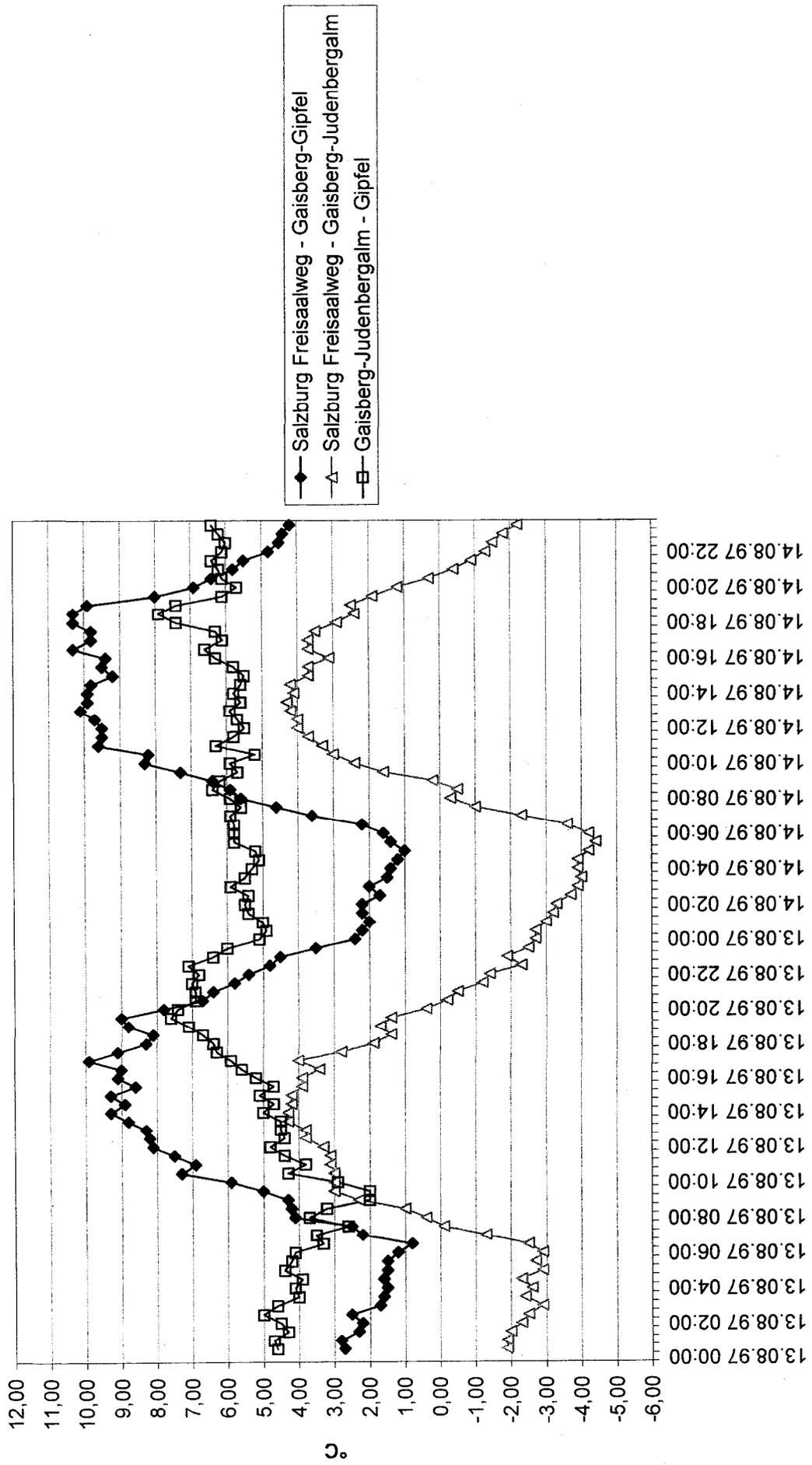


Abbildung 17

Temperaturdifferenz, 15. - 16.8. 1997

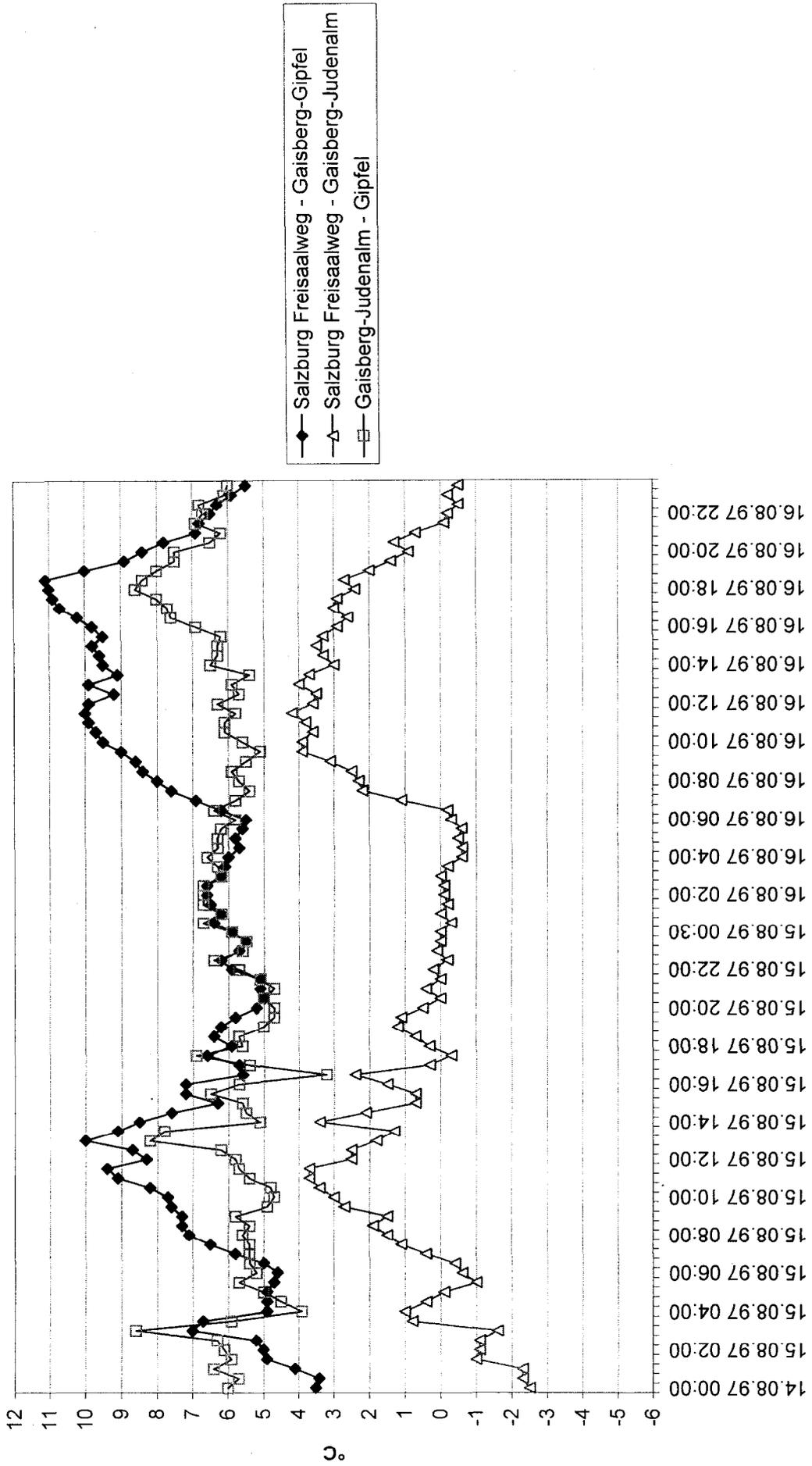


Abbildung 18

Windrichtung, 13. - 14.8. 1997

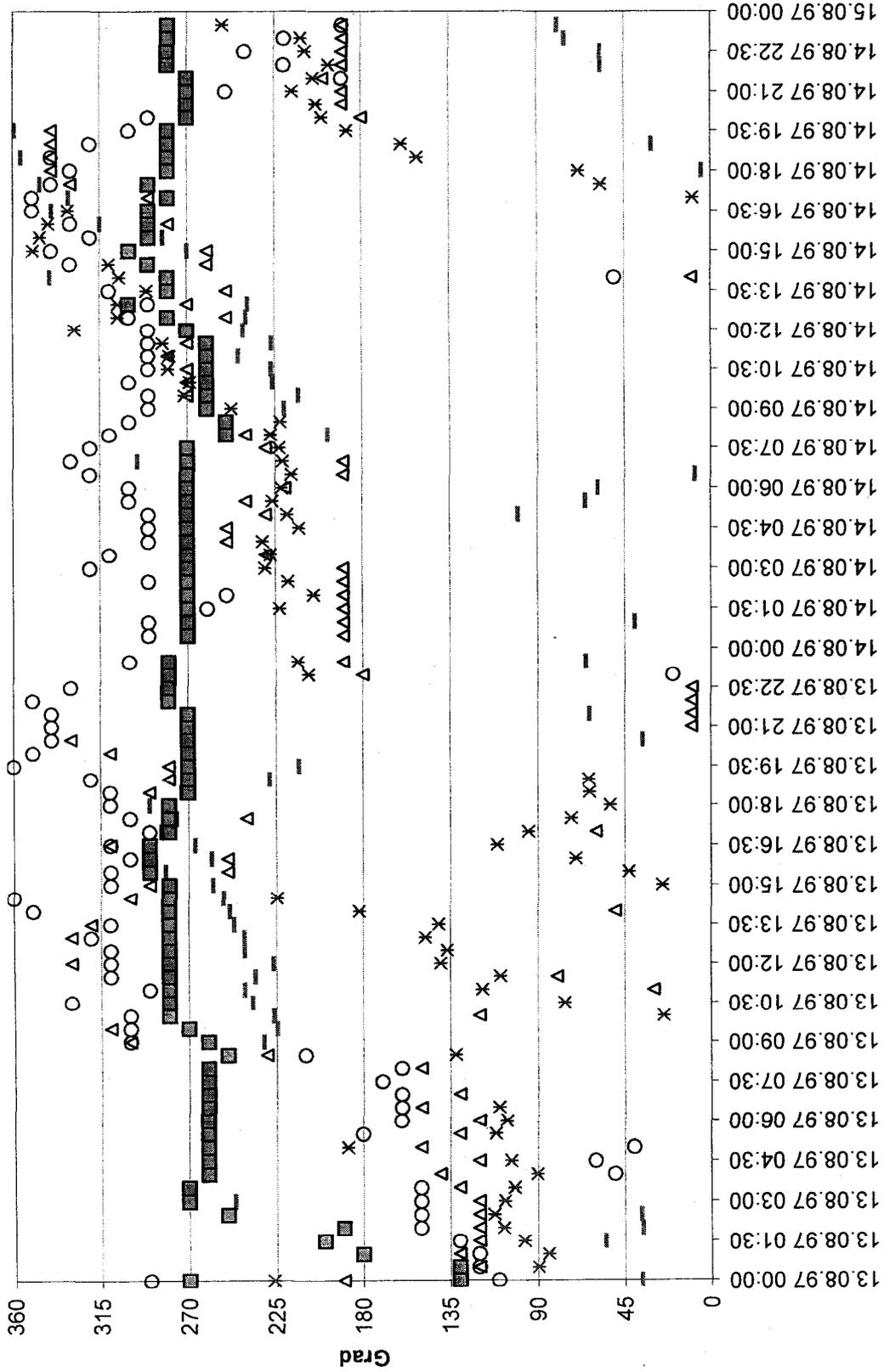


Abbildung 19

Windrichtung, 15. - 16.8. 1997

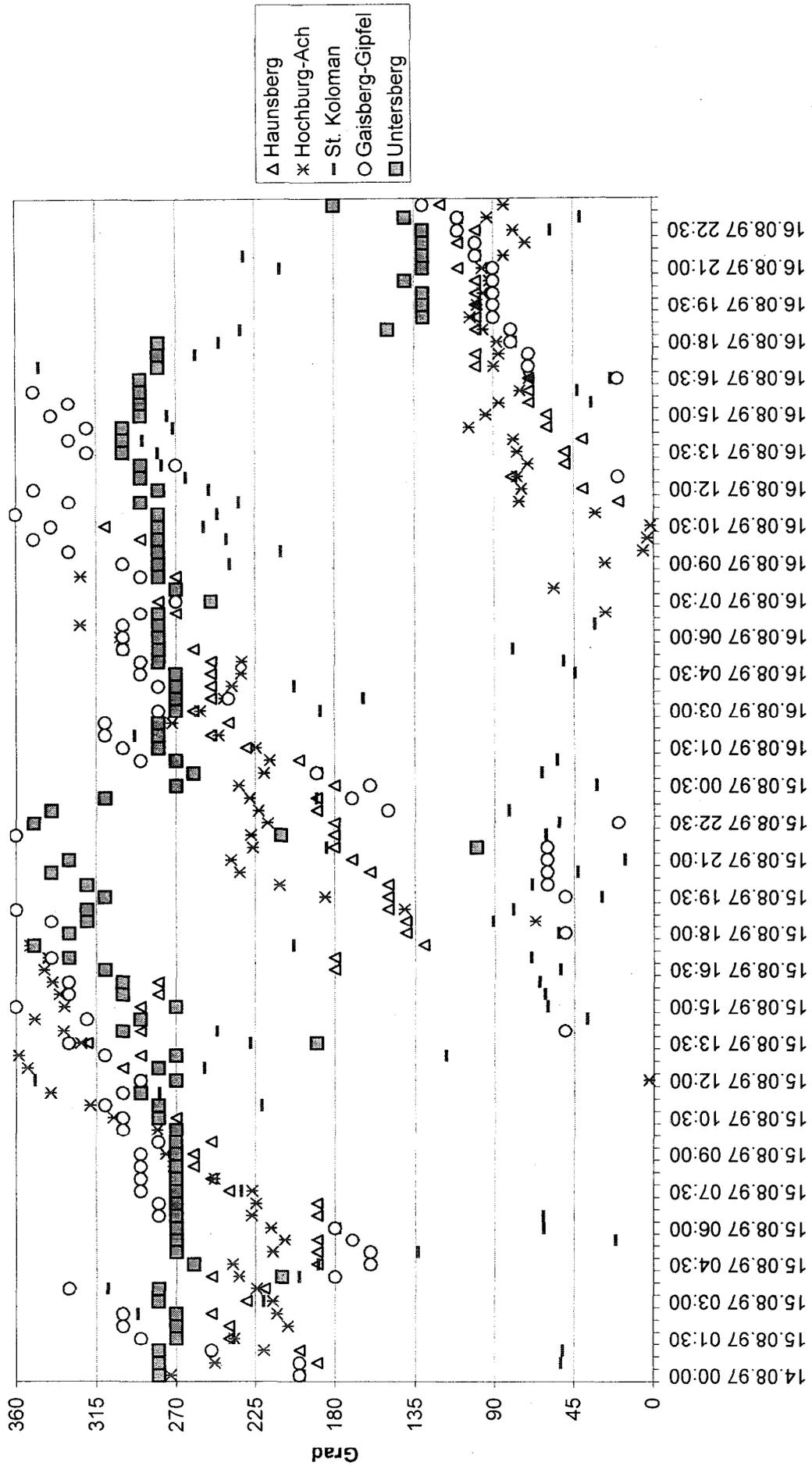


Abbildung 20

Ozon, 1.-3.9. 1997

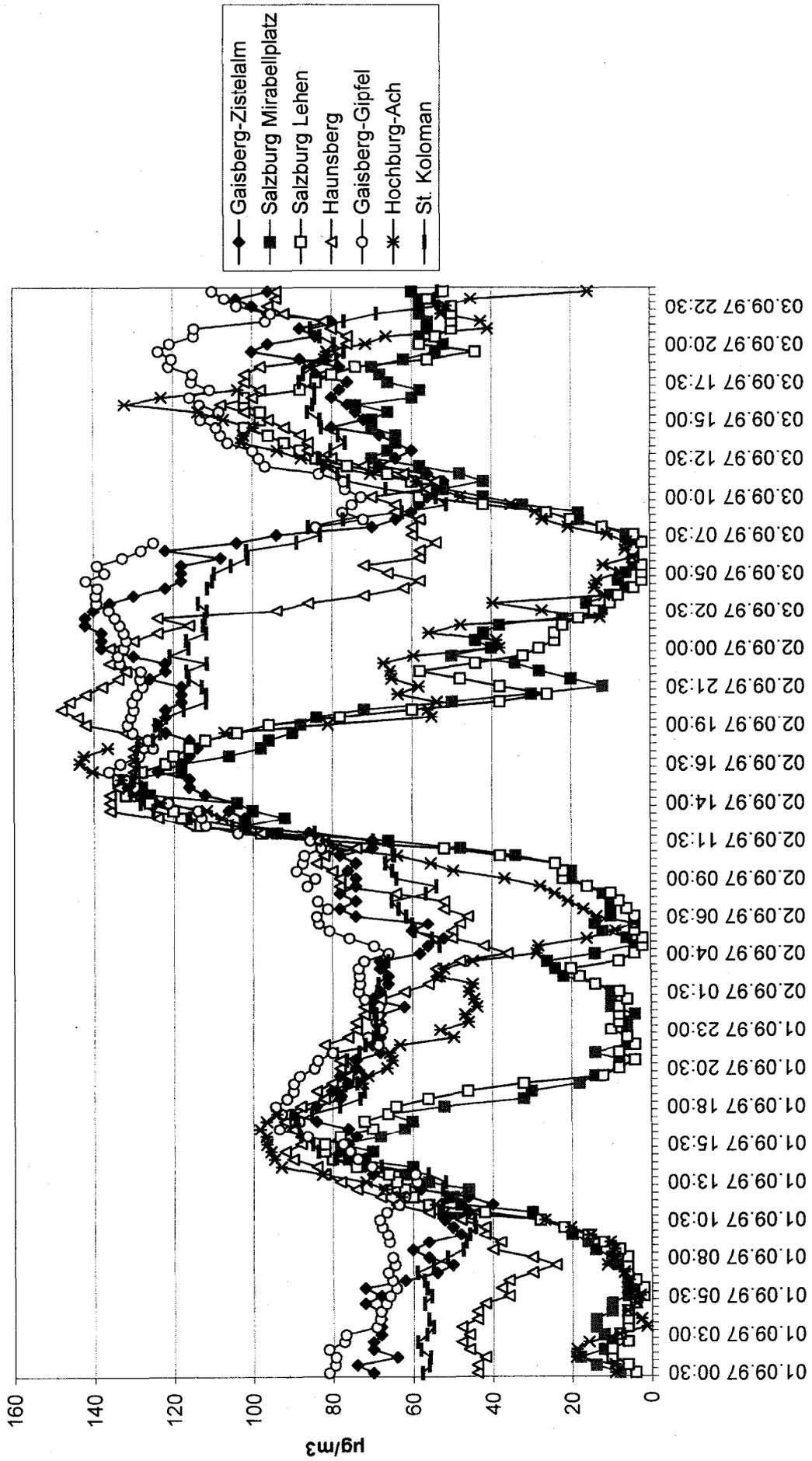


Abbildung 21

Temperatur, 1.-3.9. 1997

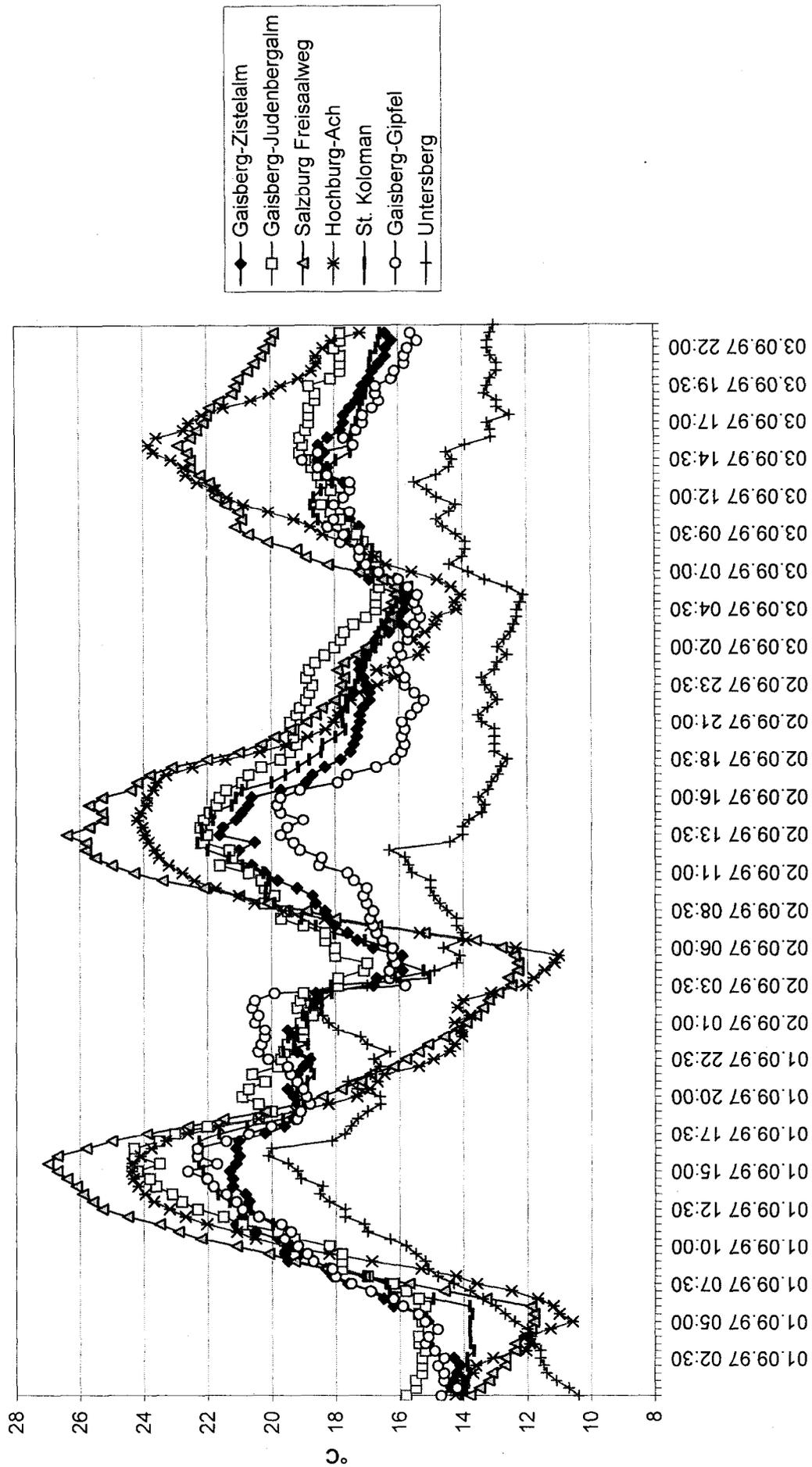


Abbildung 22

Temperaturdifferenz, 1.-3.9.1997

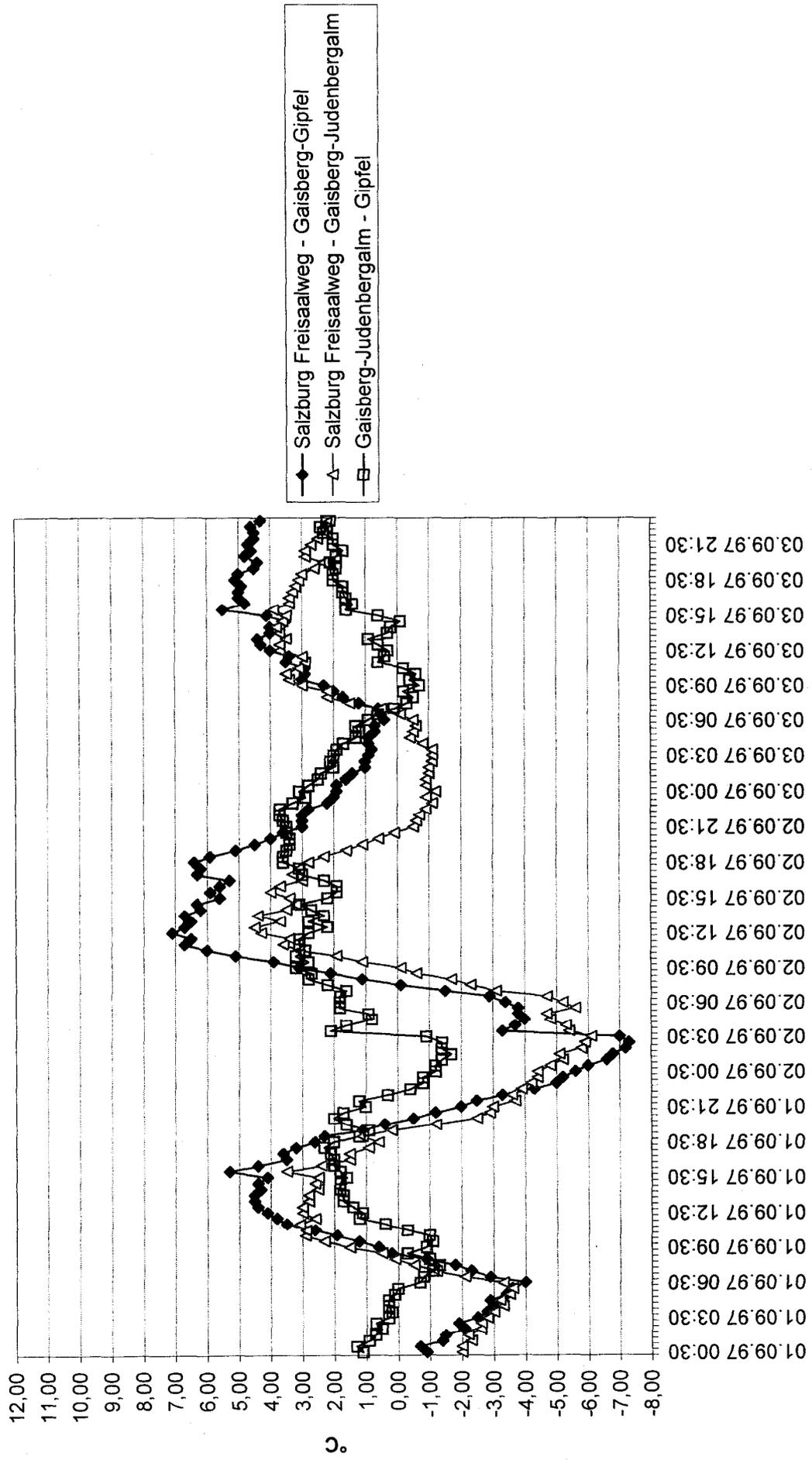


Abbildung 23

Windrichtung, 1.-3.9.1997

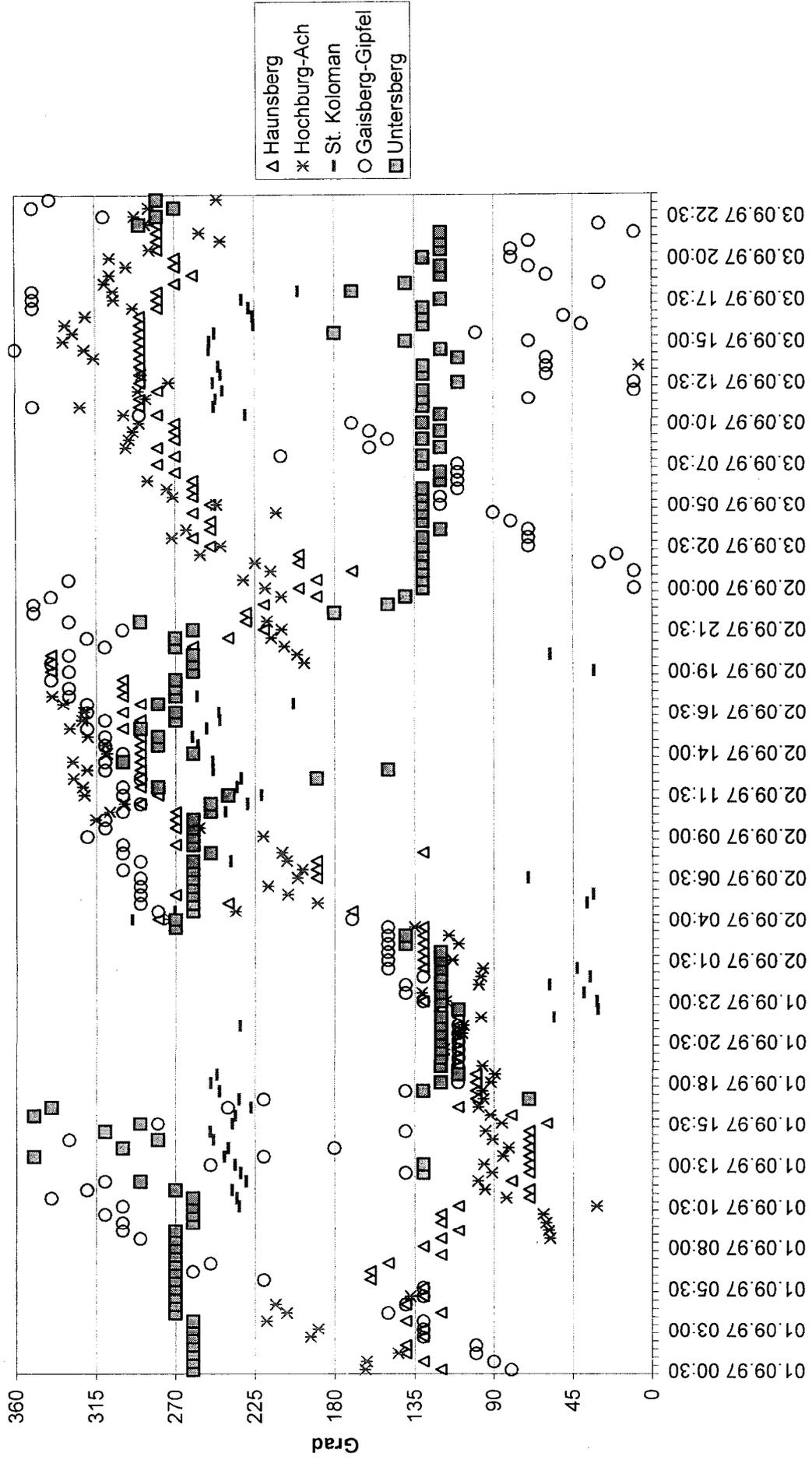


Abbildung 24

Windgeschwindigkeit, 1.-3.9.1997

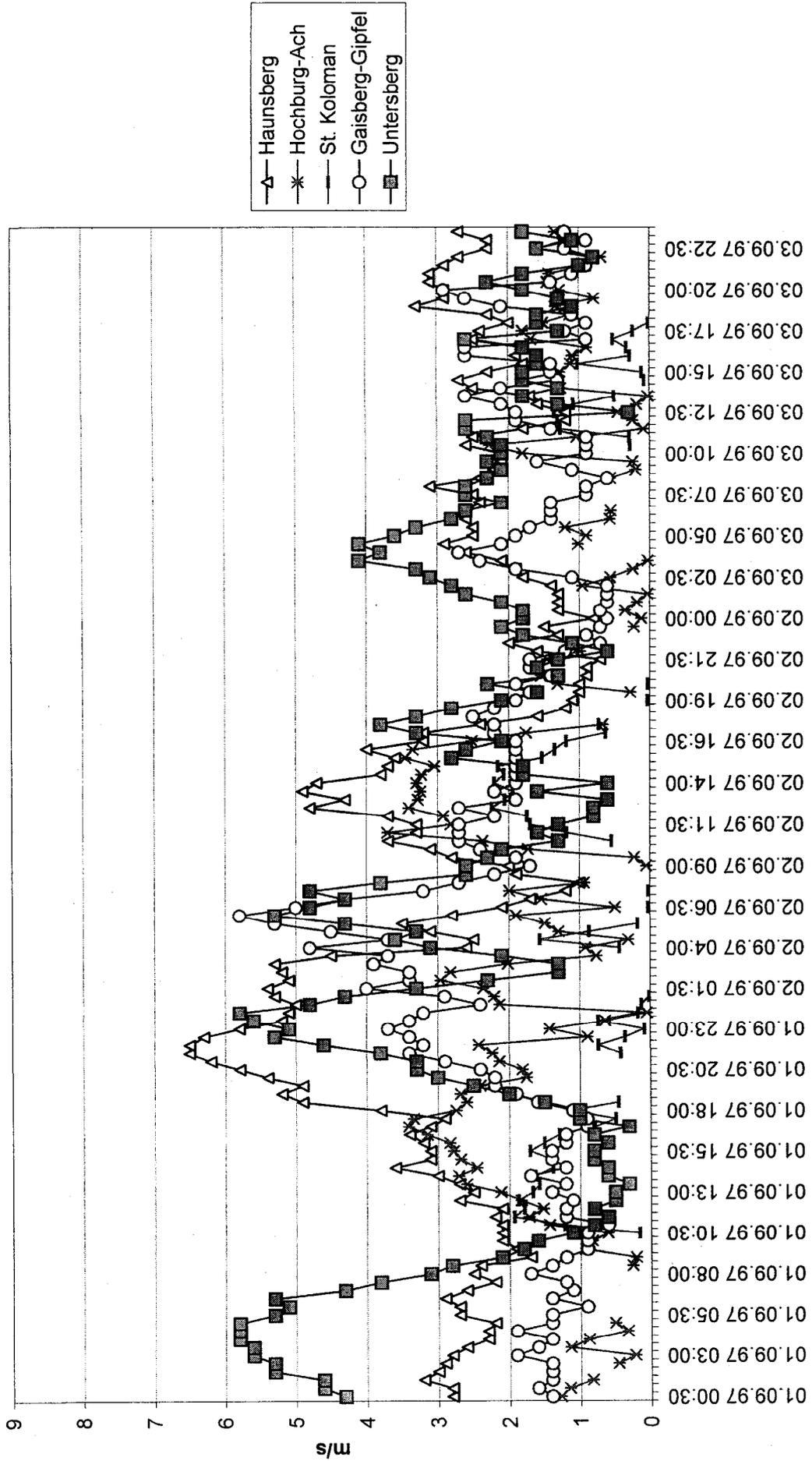


Abbildung 25