



**Abschätzung des Schadstoffimportes im Sommer
in ein Alpental am Beispiel des Klöntals
(Kanton Glarus)**

Projekt der Ostluft, genehmigt an der Geschäftskommissionssitzung vom 3. März 2005

**Kant. Amt für Umweltschutz, Glarus
Dezember 2004**

Veronika Gmür
Dr. Jakob Marti (Projektleitung)

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Übersicht Messstandort Klöntal	2
2. Aufgabenstellung	3
3. Einleitung	5
4. Auswertung der Ozon- und Winddaten von Ende Mai – Anfang August 2003	7
4.1. Absolute Ozonkonzentrationen	7
4.2. Berücksichtigung der Einflussfaktoren	9
4.2.1 Einflussfaktor: Sonnenaufgang	9
4.2.2 Einflussfaktor: Wind	10
4.2.3 Regionale Luftbewegungen	10
4.3. Ozonkonzentrationen im Frühling	14
4.3. Ozonverfrachtungen	15
4.5. NO ₂ -Messungen	16
5. Diskussion	16
6. Schlussfolgerungen	17
7. Weitere Untersuchungen	17
8. Literaturverzeichnis	18

1. Übersicht Messstandort Klöntal



2. Aufgabenstellung

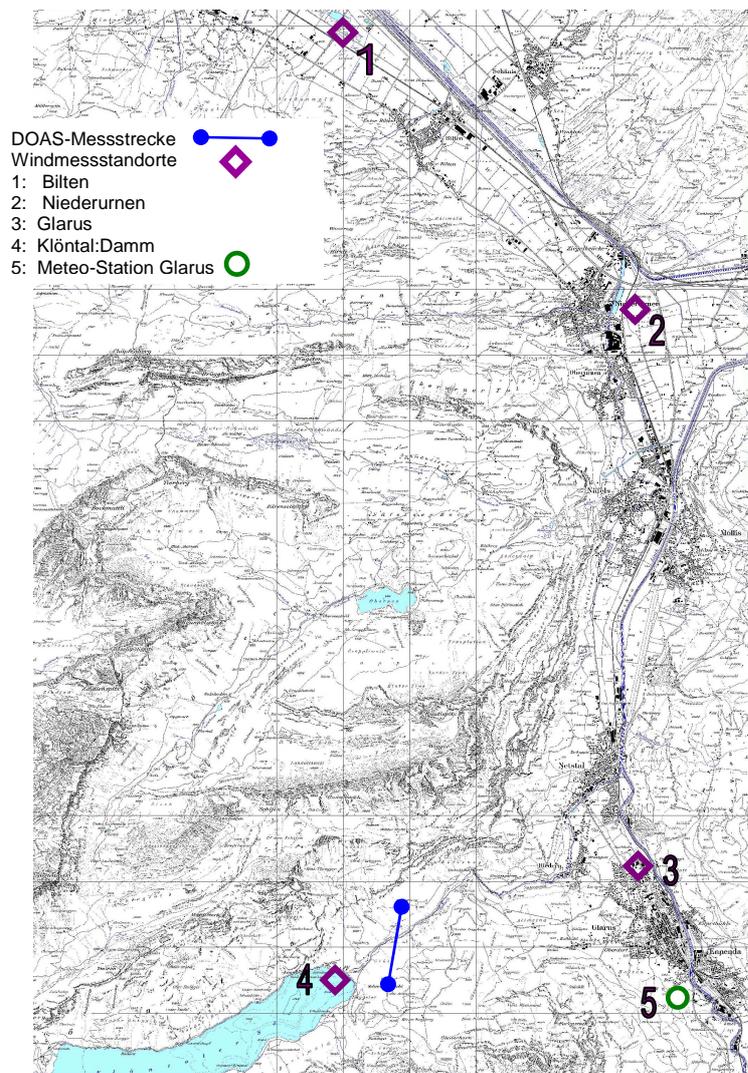
Das Klöntal ist ein ruhiges Seitental des Glarnerlands, und wird vor allem im Sommer als beliebter Bade- und Erholungsraum genutzt. Die talinternen Schadstoffemissionen sind gering und aus früheren Messungen (AfU Glarus, 1992) geht hervor, dass Anzeichen für Schadstoffimporte mit dem Wind bestehen. Diese Einträge, insbesondere des Ozons und seiner Vorläufer, sollen nun analysiert werden.

Das Amt für Umweltschutz des Kantons Glarus betrieb im Sommer 2003 in Zusammenarbeit mit OSTLUFT eine Windmessanlage auf dem Damm / Überlauf des Klöntalersees und eine DOAS-Linienmessung von Luftschadstoffen quer über den Eingang des Tales. Die dabei produzierten Daten sollen die Wind- und Luftqualitätsverhältnisse im Klöntal darstellen. Zur gleichen Zeit wurden bei Bilten und Niederurnen Windmessungen im Zusammenhang mit Vorabklärungen für eine Windturbine durchgeführt.

Mit Hilfe der Winddaten und der Ozonmessungen soll abgeklärt werden, ob, wenn und woher Schadstoffe ins Tal gelangen, insbesondere werden die Windverhältnisse in Hinblick auf Ozonverfrachtungen aus dem Haupttal oder von noch weiter entfernt geprüft.



Messstation Schwammhöhe



Daten der Ozonmessstationen:

	Glarus	Klöntal
Höhenlage m ü.M.	488	850 - 1100
Umgebung	Rand des Siedlungsbereiches	Wald, Wiesen
Messgerät	ML 9810	DOAS
Höhe über Boden	12 m	5 - 220 m

3. Einleitung

Besonders hohe Ozonkonzentrationen werden in Sommersmogsituationen gemessen. An solchen Tagen herrschen hohe Temperaturen und hohe Sonneneinstrahlung. Das Ozon wird mit Hilfe von Sonneneinstrahlung aus Vorläufersubstanzen (lokale oder regionale Emission) gebildet, die aus dem Verkehr, der Industrie und anderen Verbrennungsprozessen stammen. Je höher die Temperatur, desto schneller läuft diese Reaktion ab. Weitere Einflussfaktoren für hohe Ozonkonzentrationen sind die Konzentration am Vortag, die nächtlichen Mischungsverhältnisse und die Windgeschwindigkeiten (Künzle und Neu 1994).

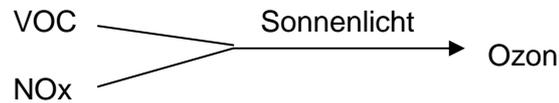


Abbildung 1: Ozon entsteht aus den primären Schadstoffen Stickoxid (NO_x) und flüchtigen Kohlenwasserstoffen (VOC) unter Einwirkung von Sonnenlicht.

Der Tagesgang des Ozons in Reinluftverhältnissen – ein Minimum in der Nacht und ein Maximum am Nachmittag - kann durch das Zusammenwirken des turbulenten Transports mit der Ozonzerstörung am Boden erklärt werden (Broder 1983).

Künzle und Neu (1994) untersuchten unter anderem verschiedene Transport- und Ausbildungsprozesse von Ozon und Stickstoffoxiden während Sommersmogeperioden über dem Schweizer Mittelland.

Jeden Tag bildet sich ein Teil des Ozons chemisch neu, nur 50-70% des täglichen Maximums stammen vom Vortag. 20-50% des Ozons der atmosphärischen Grenzschicht inklusive der Reservoirschicht werden abgebaut. An diesem Abbau sind chemische Prozesse, vertikale Mischung und nachfolgende Deposition am Boden beteiligt (Künzle und Neu 1994).

Künzle und Neu (1994) diskutieren den Einflussbereich von Quellgebieten (z.B. städtische Agglomerationen) bezüglich Ozon und nennen ca. 15 bis höchstens 100 km, die das Ozon überwinden. Nicht mehr als 30 km werden von hohen Schadstoffkonzentrationen in horizontaler Richtung zurückgelegt, wenn eine Sommersmogsituation vorhanden ist, weil häufig während diesen Hochdrucklagen nur schwache Winde auftreten. Hingegen werden mehrere 10 km vor allem abends überwunden, wenn thermisch bedingt stärkere Winde herrschen. Sehr hohe Konzentrationen (>160 µg/m³) werden in der Nähe von grossflächigen Quellgebieten wie zum Beispiel Zürich, Luzern oder dem Jurasüdfuss 2-5 mal häufiger gemessen als in anderen Regionen des Schweizer Mittellandes (Künzle und Neu 1994).

Schadstoffe aus grossen Quellgebieten beeinflussen die regionale Belastung. Um Zürich wird eine Abluftfahne vor allem bei Westwindlagen beobachtet. Diese Westwindlagen könnten massgebend sein für erhöhte Ozonkonzentrationen im Glarnerland. Grundsätzlich herrschen jedoch nicht nur überregionale Winde, sondern in den meisten Fällen auch kleinräumige Bodenwinde. Mit diesen Bodenwinden können lokale Abweichungen innerhalb einer Region erklärt werden (Künzle und Neu 1994).

Nicht nur die Windrichtung, sondern auch die Windgeschwindigkeit beeinflussen die Ozonkonzentrationen in der Nähe von Quellgebieten. Wird eine Luftmasse mit hoher Geschwindigkeit über eine Quelle getrieben, so nimmt sie pro Volumeneinheit weniger Schadstoffe auf als bei langsamer Überströmung, das heisst die Schadstoffe werden auf eine deutlich grössere Luftmasse verteilt (Künzle und Neu 1994).

Broder und Gygax (1985) untersuchten den Effekt der Struktur des Bodens auf die täglichen Ozon-, Temperatur- und Wasserdampfschwankungen im oberen Bereich der atmosphärischen Grenzschicht über hügeligem Relief. Sie zeigten, dass der nächtliche Ozonabbau lediglich zu 20% durch die Reaktion von Stickstoffoxiden mit Ozon verursacht wird. Der verbleibende Rest der Ozonreduktion ist auf die Trockendeposition auf der Oberfläche zurückzuführen. Dieser Effekt ist über hügeligem Relief viel effizienter als über horizontal homogenem Relief und wird oft als Selbstreinigung bezeichnet. Diese höhere Effizienz ist in einem lokalen talquerenden Windsystem begründet und hängt von der Ozonkonzentration in Bodennähe und den Eigenschaften der Bodenoberfläche ab. Bewachsene Oberflächen absorbieren mehr Ozon, weil die Pflanzen durch die Stomata Ozon aufnehmen, das im Inneren der Zelle zerstört wird. Trockendeposition ist vor allem in Regionen mit nächtlichem Bergwind zu beobachten. Die Luft, die den Talboden erreicht, ist sehr ozonarm. Folglich führt der mit diesem lokalen Windsystem assoziierte Talwind zu der beobachteten kontinuierlichen Ozonabnahme innerhalb der unteren Region der atmosphärischen Grenzschicht. Dieser durch das lokale Windsystem hervorgerufene Selbstreinigungsmechanismus hat den Effekt, dass die Gebiete an den Hängen auch während der Nacht eine relativ hohe Immissionsbelastung bezüglich Ozon aufweisen, was das Auftreten einer möglicherweise wesentlichen Erholungsphase für die Vegetation verhindert und damit biologische Implikationen haben könnte (Broder 1983).

Broder (1983) untersuchte die Ozonkonzentrationen an einer Hangstation (Schüren) und zeigte, dass die Ozonwerte in der Nacht relativ hoch bleiben und erst am Morgen beim Umschlagen des Windsystems auf Talwind auf die tiefsten Werte absinken. Grundsätzlich konnten an dieser Hangstation morgendliche und abendliche Wechsel zwischen hangaufwärts und hangabwärts gerichteten Winde beobachtet werden.

Broder (1981) untersuchte das Ozonmaximum, das am späten Abend zu beobachten ist. Er kam zum Schluss, dass eine Interaktion von vertikalem und horizontalem Transport verantwortlich ist für dieses Phänomen. Luftmassen von ozonreichen Schichten dringen in die untere Troposphäre ein. Bergwinde und talquerende Winde über der nächtlichen Inversion, die mit dem lokal geschlossenen talquerenden System assoziiert sind, sind verantwortlich für das Auftreten dieses Eindringungsprozesses. Der morgendliche Anstieg des Ozons wird dadurch erklärt, dass sich ozonreiche Luft aus höheren Schichten mit tieferen Schichten mischt und damit die Inversion aufgelöst wird (Galbally, 1968 in Broder 1981).

Im Kanton Graubünden wurden im Jahre 1991 verschiedene Ozonprofile gemessen. Die Messungen zeigten einen klaren von der Sonneneinstrahlung beeinflussten Tagesgang und eine sehr gute Durchmischung zur Zeit des Ozonmaximums über den ganzen Talquerschnitt (Ökoscience, 1992)

Auf einem Treffen von den Umweltministern der Länder Frankreich, Italien und der Schweiz im Jahre 1992 entstand die Studie Air Espace Mont-Blanc 2003 mit dem Ziel, die Luftqualität des Raumes Mont-Blanc als Schlüsselgebiet für die Alpen zu untersuchen. Diese Studie führt zu folgenden Resultaten:

Mit der Thermik werden grosse Mengen an Primärschadstoffen in die Alpentäler gebracht, welche ein Mehrfaches der lokalen Emission umfassen können (z.B. Aostatal Faktor 3-10). Die Thermik transportiert an sonnigen Tagen auch grosse Mengen an Ozon, die bis zu 100 x grösser sind als die NO_x-Frachten (z.B. Martigny 8'500 kg Ozon/h). An Tagen mit Thermik ist die Luft in Alpentälern bis auf 2'000 m über Grund sehr gut durchmischt. Oberhalb von etwa 4'000 m.ü.M liegt eine Schicht mit sehr hohen Ozonkonzentrationen (Espace Mont-Blanc, 2003).

Fallot et al. (1990) fassen die Ergebnisse von meteorologischen und lufthygienischen Messungen, die zwischen 1980 und 1989 realisiert wurden zusammen. Bodenmessungen und dreidimensionale Wind-Modellierungen führten zu einem besseren Verständnis der regionalen Strömungen, die den Schadstofftransport über komplexem Gelände beeinflussen.

4. Auswertung der Ozon- und Winddaten von Ende Mai – Anfang August 2003

Da für die Beurteilung von Ozonbelastungen nur sonnige Tage relevant sind, wurden in einem ersten Schritt mit Hilfe der Daten der Meteostation Glarus die sonnigen Tage herausgefiltert (Kriterien: mehr als vier Stunden Sonnenschein). Die Messperiode lag zwischen dem 27. Mai und dem 17. August.

4.1. Absolute Ozonkonzentrationen

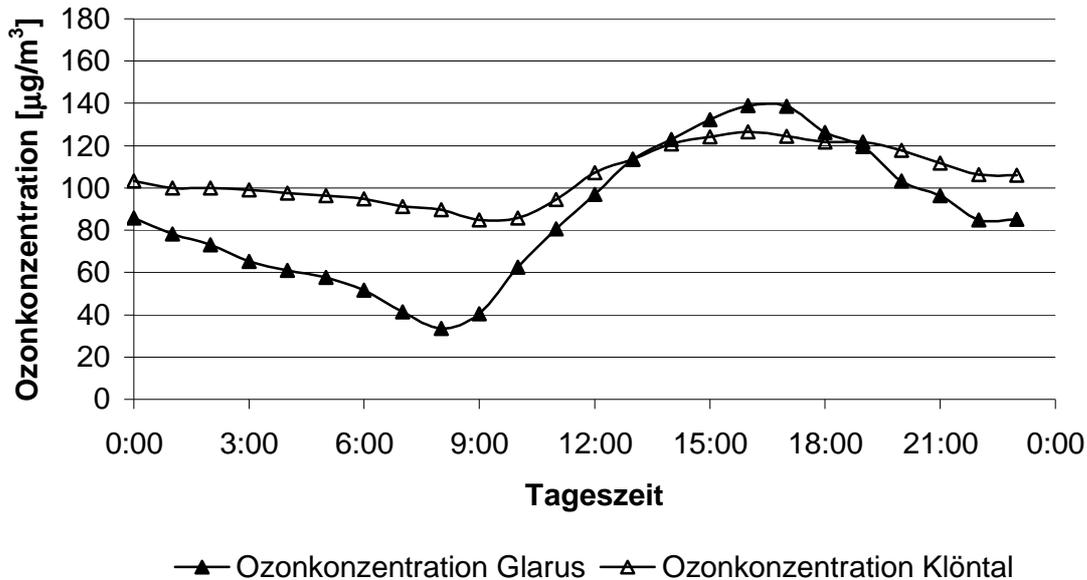


Abbildung 2: Vergleich der absoluten Ozonkonzentrationsmittelwerte der Woche 24 in Glarus und im Klöntal im Tagesverlauf.

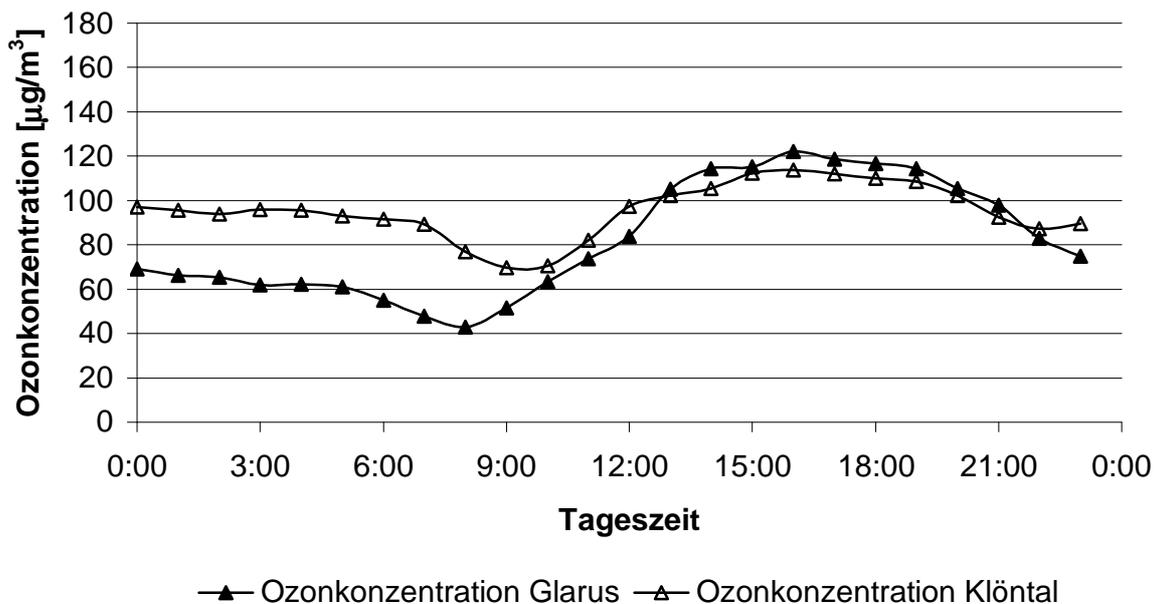


Abbildung 3: Vergleich der absoluten Ozonkonzentrationsmittelwerte der Woche 25 in Glarus und im Klöntal im Tagesverlauf.

Abbildungen 2 und 3 zeigen den Vergleich der absoluten Ozonkonzentrationsmittelwerte von Glarus und dem Klöntal für die Woche 24 und 25 (Mitte Juni).

Folgendes fällt auf:

- Tagesschwankungen: in Glarus deutlich, im Klöntal weniger ausgeprägt;
- Höchstwerte: in Glarus und im Klöntal fast gleich
- Anstieg am Morgen: zeitversoben, im Klöntal später

Die Ozonkonzentrationen liegen demnach in der Nacht und am Morgen im Klöntal höher als in Glarus. Am Mittag und am frühen Nachmittag erreichen die Werte ein Maximum, das in Glarus und im Klöntal im ähnlichen Bereich liegt. Der Ozonkonzentrationsanstieg am Vormittag verläuft im Klöntal und in Glarus sehr ähnlich jedoch zeitlich verschoben.

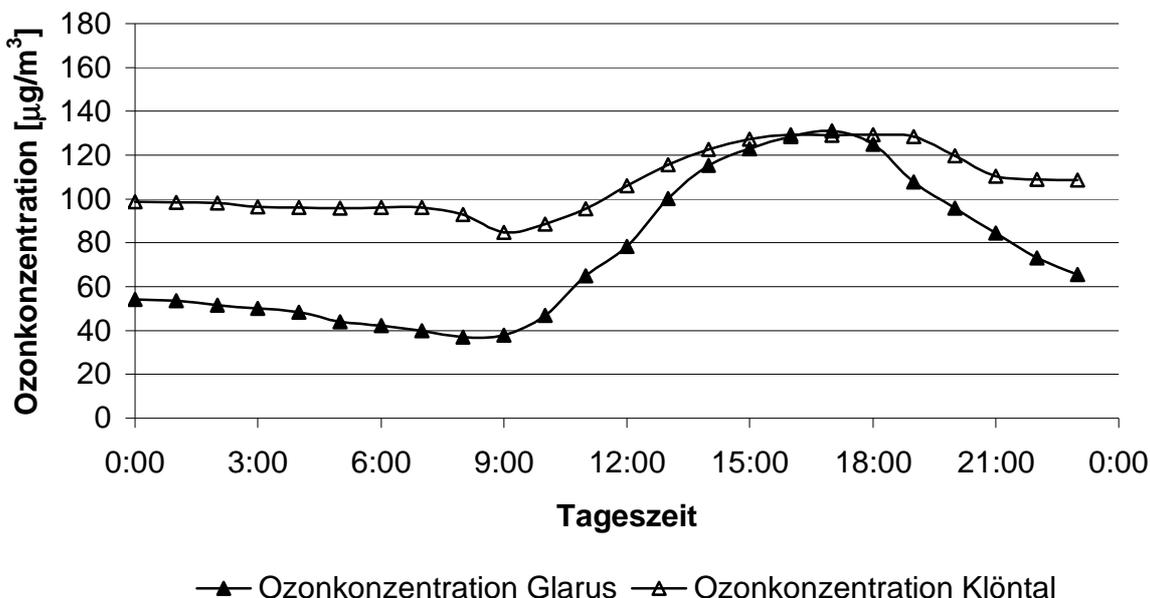


Abbildung 4: Vergleich der absoluten Ozonkonzentrationsmittelwerte der Woche 31 in Glarus und im Klöntal im Tagesverlauf.

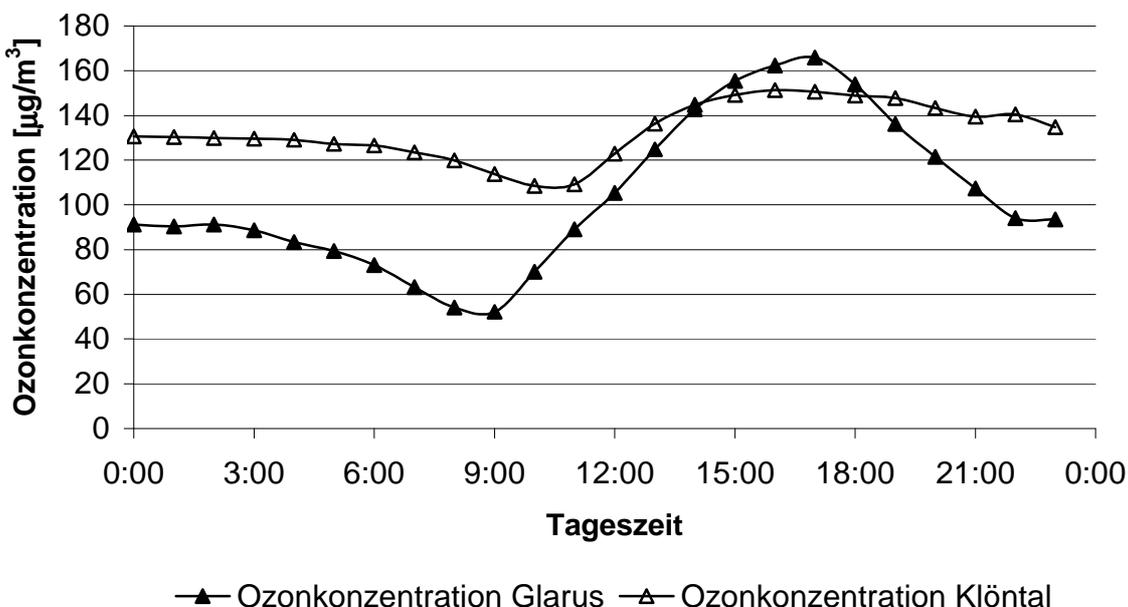


Abbildung 5: Vergleich der absoluten Ozonkonzentrationsmittelwerte der Woche 32 in Glarus und im Klöntal im Tagesverlauf.

Abbildungen 4 und 5 zeigen dasselbe wie Abbildung 2, allerdings für die Wochen 31/32 (Ende Juli). Das Muster des Tagesganges der Ozonkonzentration ist sehr ähnlich, jedoch auf einem

höheren Niveau. Bemerkenswert ist, dass im Klöntal der Grenzwert für Ozon ($120 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sogar in der Nacht überschritten wird, was Mitte Juni noch nicht der Fall ist. Die in der Nacht aus höheren Luftschichten ins Klöntal gebrachte Luft enthielt in diesen Sommertagen immer noch $90\text{-}120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Ozon. Die Verläufe in den anderen untersuchten Wochen waren ähnlich den beiden hier dargestellten. Unterschiede gab es vor allem dann, wenn sich im Klöntal schon ab dem Mittag Wolken bildeten. Dann lagen die Nachmittagsspitzen im Klöntal deutlich unter den Werten von Glarus.

4.2 Berücksichtigung der Einflussfaktoren

Die Ozonkonzentration an einem Standort wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. So ist nicht nur die Konzentration von Vorläufersubstanzen dafür verantwortlich, dass die Ozonkonzentration zu- oder abnimmt, sondern auch die Besonnung, die Temperatur oder der Wind. Auf welche Art diese Faktoren die Ozonkonzentration in Glarus und im Klöntal (Schwammhöhe) beeinflussen, wird nachfolgend untersucht.

4.2.1 Einflussfaktor: Sonnenaufgang

Welchen Einfluss der Sonnenaufgang auf die Ozonkonzentration hat, ist in Abbildung 6 dargestellt. Sie zeigen den Verlauf des Ozonanstiegs während eines Tages. Es ist zu beachten, dass es sich hier nicht um absolute Werte handelt. Die Kreise stellen den Zeitpunkt des Sonnenaufganges dar. Die Auswirkungen des Sonnenaufganges auf die Ozonveränderung sind sehr unterschiedlich. In Glarus steigt die Ozonkonzentration markant an, sobald die Sonne aufgeht. Im Klöntal verstreicht hingegen eine gewisse Zeit nach Sonnenaufgang bis eine Zunahme der Konzentration zu beobachten ist.

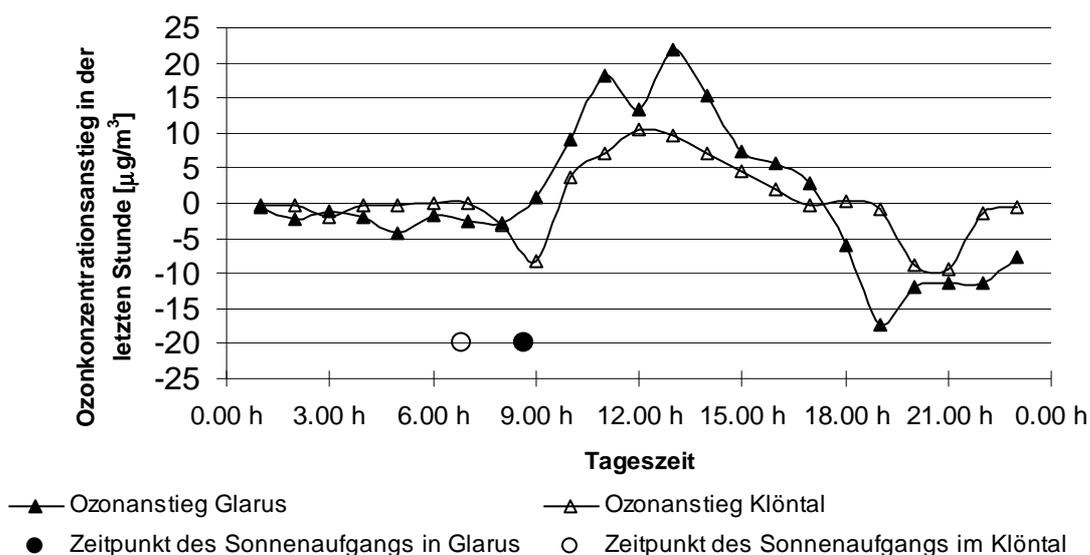


Abbildung 6: Ozonanstieg und Sonnenaufgang während eines Tages (Ende Juli) im Klöntal und in Glarus.

Abbildung 6 ist repräsentativ für die meisten Sonnentage im Sommer 2003. Daraus ist Folgendes ersichtlich:

- Der Anstieg der Ozonkonzentration in Glarus fällt praktisch mit dem Sonnenaufgang zusammen,
- im Klöntal sinkt die Ozonkonzentration nach Sonnenaufgang und steigt erst nach 09.00 Uhr an.

Generell kann aus Abbildung 6 gefolgert werden, dass in Glarus nach Sonnenaufgang die Ozonkonzentration stark ansteigt. Verantwortlich für diesen Anstieg sind Vorläufersubstanzen, die in grossen Mengen in Glarus vorhanden sind. Mit Sonnenlicht reagieren diese zu Ozon. Die in Glarus bereits vorhandene erhöhte Temperatur hat hier sicherlich auch einen Einfluss. Das Klöntal ist kaum besiedeltes Gebiet ohne Industrie und wenig Verkehr. Die Menge an reaktionsfähigen Vorläufer-

substanzen am frühen Morgen dürfte gering sein. Die Temperatur bei Sonnenaufgang ist noch deutlich tiefer als zum Zeitpunkt des Ozonanstieges um 09.00 Uhr.

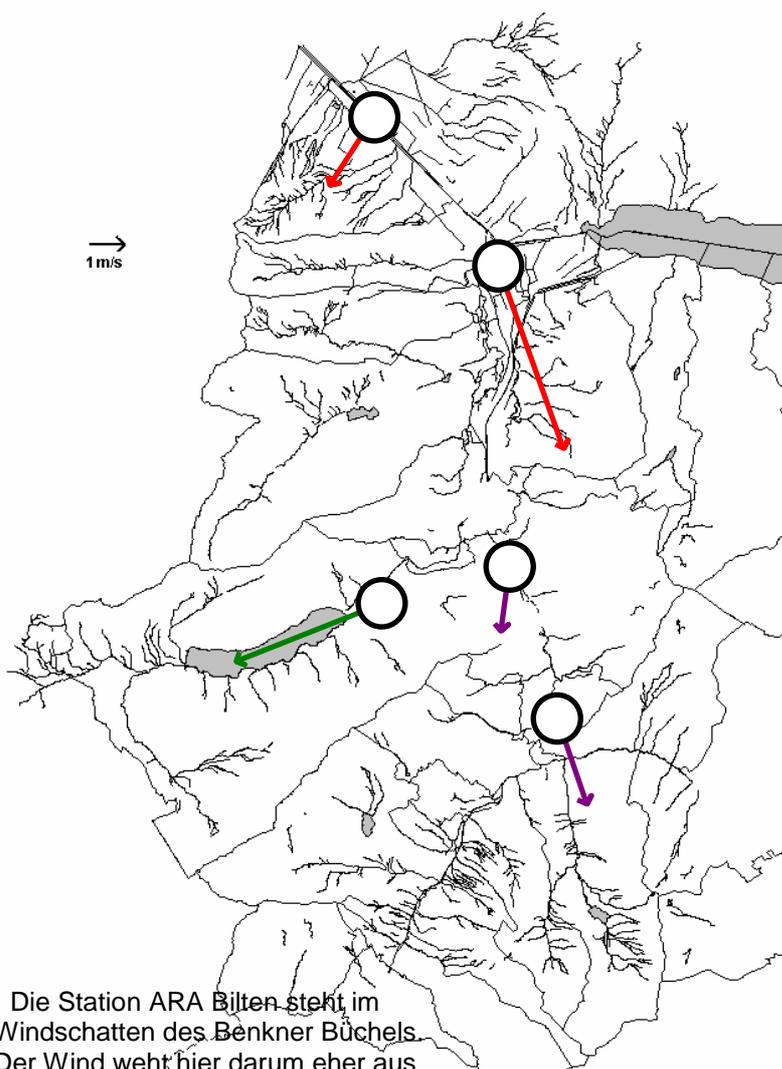
An dieser Stelle darf nicht vernachlässigt werden, dass der Sonnenaufgang nicht nur einen direkten Einfluss aufgrund der auftretenden Sonneneinstrahlung auf die Ozonbildung hat, sondern auch weitere Prozesse - Konvektion, Temperatur etc. - antreibt, die eine Erhöhung der Ozonkonzentrationen verursachen.

Für das Klöntal liegen keine Temperaturmessungen vor. Jedoch sind in der Literatur Angaben zu diesem Thema zu finden. So fanden Broder und Gyax (1985) durch Messungen über Boden, dass das tägliche Temperaturmaximum sehr gut mit dem Ozonmischverhältnis korreliert.

4.2.2 Einflussfaktor: Wind

Nach wie vor konnte nicht gezeigt werden, weshalb die Ozonkonzentration im Klöntal erst lange nach dem Sonnenaufgang ansteigt. Neben den oben diskutierten Einflussfaktoren ist der Wind eine denkbare Grösse, welche die Ozonkonzentrationen in einem von Vorläufersubstanzen unbelasteten Gebiet - hier das Klöntal - beeinflussen kann. Im Folgenden wird beschrieben, ob der Import von Luftpaketen zu einer Erhöhung der Ozonkonzentration im Klöntal führt. Als erstes wird untersucht, aus welcher Richtung der Wind bei den höchsten Ozonkonzentrationsanstiegen weht. Als nächstes wird eruiert, wann diese Windrichtungen im Klöntal vorherrschen, um - verglichen mit der Veränderung der Ozonkonzentration im Verlaufe des Tages - entscheiden zu können, ob der Ozonanstieg mit dem Wind korreliert.

4.2.3 Regionale Luftbewegungen



Anhand der Windmessungen von Bilten, Niederurnen, Glarus, Klöntal und Sool können die Windverhältnisse im nördlichen Kantonsteil dargestellt werden. Dabei wird das dominierende Thermik-System mit dem Tal/Bergwind gut ersichtlich. Im Juni beginnt der Talwind zwischen 8 und 10 Uhr je nach Ort und ist zwischen 13 und 16 Uhr am intensivsten. In Abbildung 7 sind die Windrichtungen und -stärken um 12 Uhr im Juni dargestellt.

Bei den dabei herrschenden Windgeschwindigkeiten dauert es die folgende Zeit, bis die Luftpakete ins Klöntal gelangen:

Glarus / Netstal	15 min
Niederurnen	45 min
Bilten	60 min

Aus Abbildung 7 wird ersichtlich, dass zur Mittagszeit der Wind mit hoher Geschwindigkeit talaufwärts weht.¹

¹ Die Station ARA Bilten steht im Windschatten des Benkner Büchels. Der Wind weht hier darum eher aus Nordnordost.

Abbildung 7: Windverhältnisse um 12 Uhr im Kanton Glarus

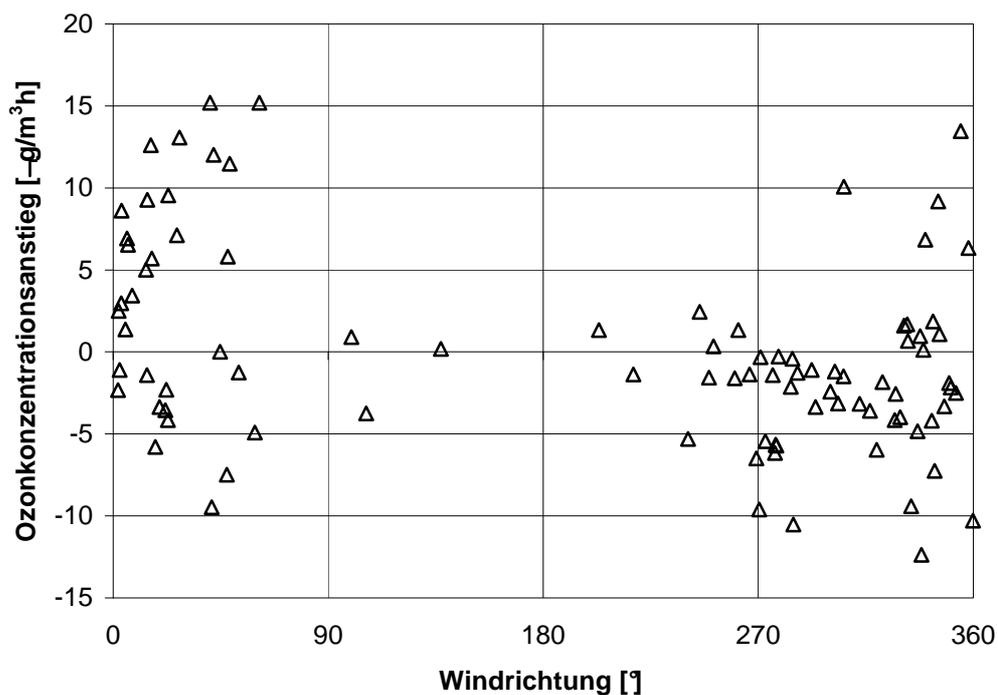


Abbildung 8: Ozonkonzentrationen bei bestimmten Windrichtungen im Klöntal, Juni 2003. Hier handelt es sich um Stundenmittelwerte, die noch einmal über eine Woche gemittelt wurden.

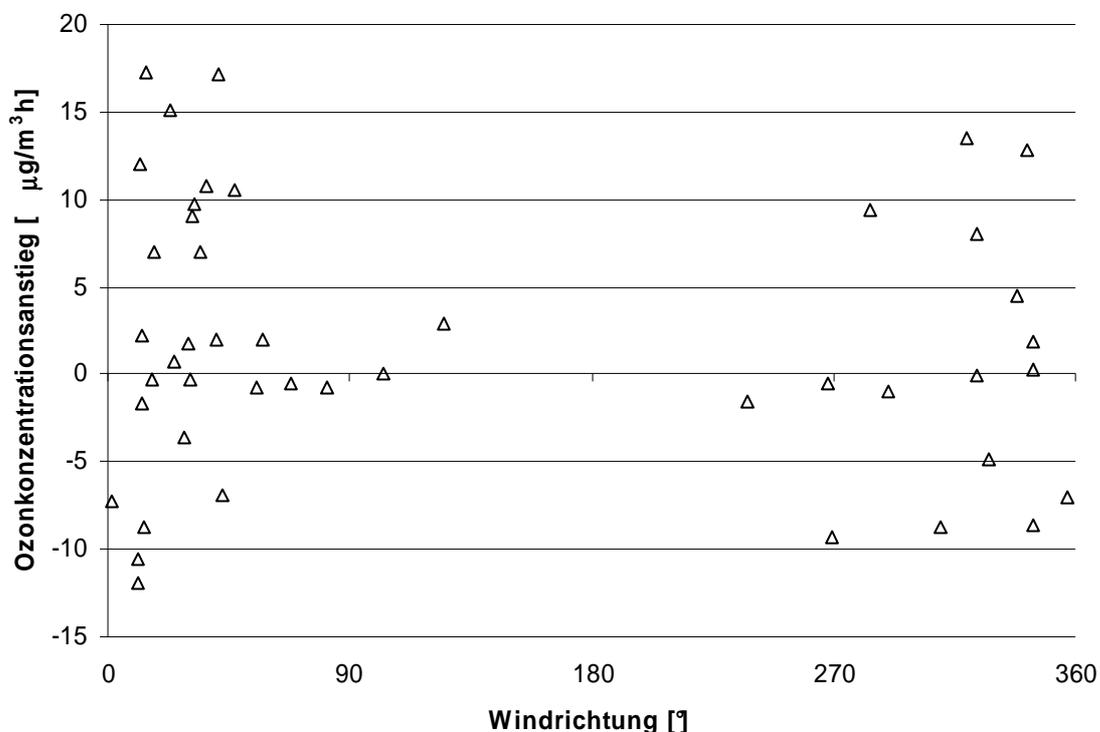
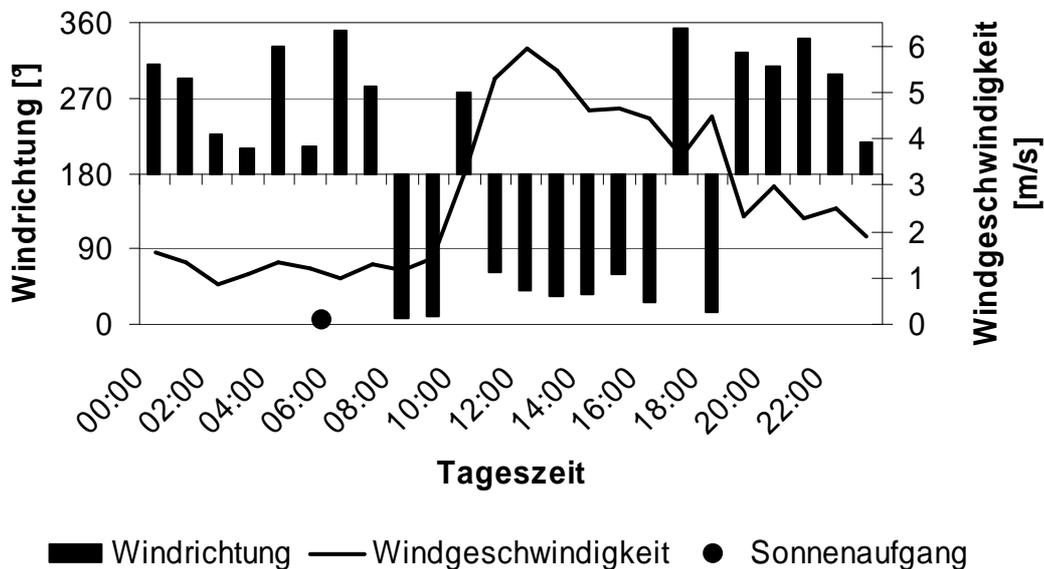


Abbildung 9: Ozonkonzentrationen bei bestimmten Windrichtungen im Klöntal, Juli 2003. Hier handelt es sich um Stundenmittelwerte, die noch einmal über eine Woche gemittelt wurden. Es wurden nur Ozonkonzentrationsanstiege betrachtet, die oberhalb von $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ liegen (korrespondierende absolute Ozonkonzentrationen). Ausreisser wurden eliminiert.

In den Abbildungen 8 und 9 wird die Änderung der Ozonkonzentration im Klöntal in Abhängigkeit zur Windrichtung dargestellt. Es wird deutlich, dass die grössten Zunahmen bei einem Wind aus Nord bis Ost auftreten. Im Juli kommt dies noch deutlicher zum Ausdruck als im Juni. Der Wind weht dann nicht direkt aus dem Haupttal sondern wird anscheinend leicht nach Norden abgelenkt. Auffallend ist ein deutlicher Ozonanstieg (zwischen 10 und 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ innerhalb einer Stunde) bei einer Windrichtung von 330-50°.

Im Weiteren wird dargestellt, wie sich der Ozonanstieg und die Windrichtung im Laufe des Tages



verändern. In Abbildung 10 und Abbildung 11 sind die Windrichtungen mit den entsprechenden Windgeschwindigkeiten im Tagesverlauf dargestellt.

Abbildung 10: Windrichtung und Windgeschwindigkeit in der Woche 22 im Klöntal.

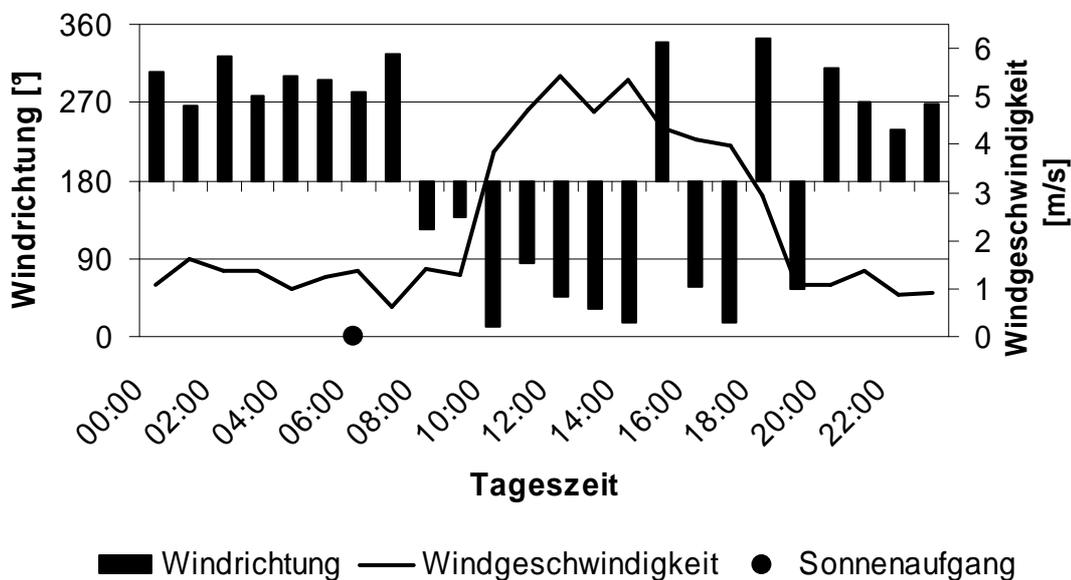


Abbildung 11: Windrichtung und Windgeschwindigkeit in der Woche 31 im Klöntal.

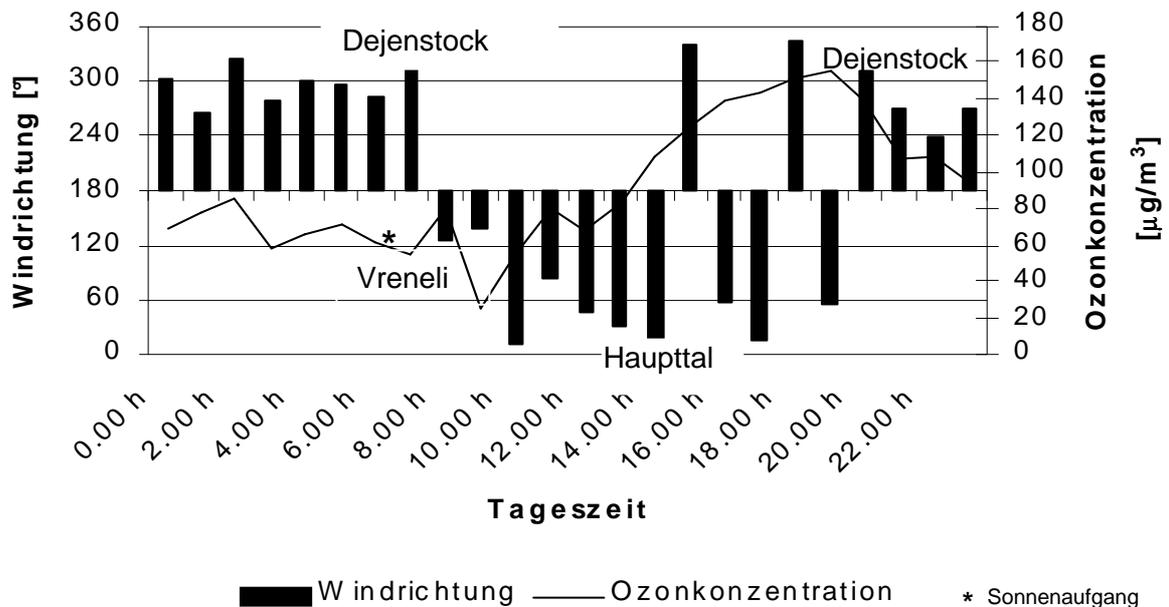


Abbildung 12: Windrichtung (Wochenmittelwert von Ende Juli 2003) und Ozonkonzentration (Tagesgang vom 11.7.03) im Verlauf eines Tages. Bei den verschiedenen Windrichtungswechseln wurde der Ort notiert, woher der Wind weht.

Aus der Abbildung 10 wird deutlich, dass im Klöntal Ende Mai Wind aus der Richtung des Haupttales (50-100°) am Nachmittag weht. Es fällt weiter auf, dass zu dieser Zeit die höchsten Windgeschwindigkeiten erreicht werden.

Auch Ende Juli werden die höchsten Windgeschwindigkeiten am Nachmittag erreicht (Abbildung 11). Die Windrichtung zeigt ein ähnliches Muster wie Ende Mai. Sowohl im Juni als auch im Juli bläst also am Nachmittag der Wind aus der Richtung Glarus – Netstal. Dies deutet daraufhin, dass um diese Zeit Luftpakete vom Haupttal ins Klöntal transportiert werden.

Abbildung 12 stellt die Windrichtung und den Verlauf der Ozonkonzentration an einem Tag dar. Kommt der Wind von der Richtung des Sees, ist die Konzentration relativ gering. Kurz nach Sonnenaufgang dreht der Wind in die Richtung des Dejenstocks, wobei die Konzentration steigt. Beim nächsten Windwechsel, also wenn der Wind vom Vrenelisgärtli weht, sinkt die Konzentration. Sie steigt erst nach und nach wieder, wenn der Wind aus der Richtung des Haupttales weht. Wechselt der Wind wieder in die Richtung des Dejenstocks, sinkt die Ozonkonzentration erneut.

Beim Windrichtungswechsel vom See zum Dejenstock ist ein geringer Ozonanstieg zu beobachten. Dieser Anstieg stimmt ziemlich genau mit dem Sonnenaufgang überein. Luft von bereits besonnten Hängen gelangt zur Messstation und bringt Ozon mit sich. Es ist auch möglich, dass das Ozon aus höheren Luftschichten der planetaren Grenzschicht stammt. Eine markante Ozonabnahme ist festzustellen, wenn die Luft vom Vrenelisgärtli stammt. Dies ist ein sehr schattiger Nordhang mit Gletscher, wo kaum Ozon gebildet wird. Weht der Wind aus der Richtung des Haupttales, steigt das Ozon nach und nach. Erst nach Sonnenuntergang sinkt die Konzentration wieder und der Wind dreht in die Richtung des Dejenstocks, um schliesslich wieder aus der Richtung des Klöntalersees zu wehen.

Gelangen tatsächlich Luftpakete, die mit Ozon angereichert sind, von Glarus ins Klöntal müssten die Ozonkonzentrationen ungefähr gleich hoch sein. Die Messstation Klöntal, Schwammhöhe und die Region zwischen Glarus und Netstal liegen 4.7 km auseinander. Diese Distanz wird bei einer Windgeschwindigkeit von 6 m/s, wie sie gemäss Abbildung 10 Ende Mai nach 12.00 Uhr herrscht, in 13 Minuten zurückgelegt. Das bedeutet, dass die Zeit, die ein Luftpaket braucht, um von Glarus ins Klöntal zu gelangen, vernachlässigbar ist und ein direkter Vergleich der Ozonkonzentrationen möglich ist. Abbildung 13 zeigt die Differenz der Ozonkonzentrationen zwischen Glarus und dem Klöntal. Sind im Klöntal und in Glarus die gleichen Luftpakete vorhanden, müsste diese Differenz nahe Null sein, das heisst, die Ozonkonzentrationen müssten im Klöntal denen von Glarus sehr ähnlich sein.

Es ist nicht zu erwarten, dass sich die Ozonkonzentrationen exakt entsprechen. Wie wir in der Einleitung gesehen haben, hängt es auch von der Windgeschwindigkeit, der Deposition und von der Grösse der Emissionsquelle ab, wieviel Ozon ein Luftpaket aufnehmen kann. In Glarus wird in Bodennähe eine Punktmessung durchgeführt, im Klöntal wurde über dem Boden eine Linienmessung gemacht. Das allein gibt schon geringe Differenzen in den Messwerten.

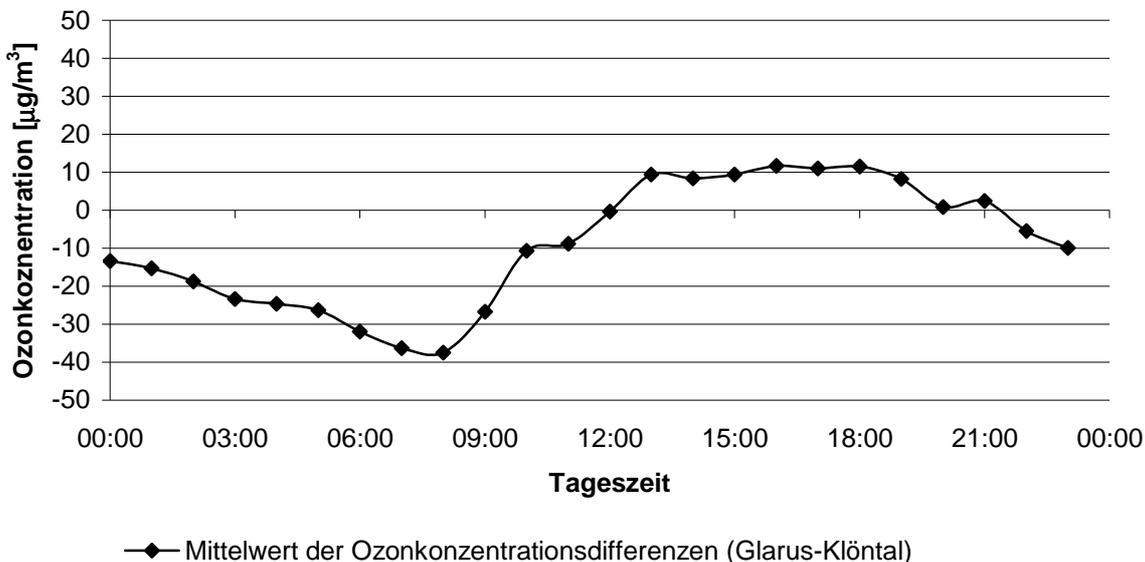


Abbildung 13: Mittelwert der Differenzen der absoluten Ozonkonzentrationen im Juni. Berechnung: Ozonkonzentration_(Glarus) – Ozonkonzentration_(Klöntal). Ein negativer Wert sagt aus, dass die Ozonkonzentration im Klöntal höher ist als in Glarus.

Liegen die Werte im negativen Bereich, werden im Klöntal höhere Ozonwerte gemessen. Im positiven Bereich, sind die Ozonkonzentrationen in Glarus höher. Somit ist im Juni die Ozonkonzentration zwischen 10 und 22 Uhr in Glarus und im Klöntal ähnlich ($\pm \mu\text{g}/\text{m}^3$). Im Juli gibt es in einer Woche deutlichere Unterschiede, in den anderen drei Wochen ist das Bild ähnlich (Abb. 13).

Am späten Abend liegen die Ozonwerte im Klöntal deshalb höher, weil dort keine Vorläufersubstanzen vorhanden ist, die das Ozon abbauen könnten. Stattdessen sammelt sich das Ozon an. In Glarus ist zu dieser Zeit die Auswirkung der Trockendeposition am grössten. Am Nachmittag übersteigen die Werte von Glarus diejenigen vom Klöntal. Es wird also nicht das gesamte Ozon, das in Glarus gemessen wird, ins Klöntal transportiert. Neben dem oben erwähnten Einfluss der Windgeschwindigkeit und der Grösse der Emissionsquelle sind auch Abbauprozesse unterwegs oder Verdünnungsprozesse denkbar. Besonders im Juni sind die Ozonkonzentrationen am Mittag und am Nachmittag derart ähnlich, dass sich vermuten lässt, dass Ozon aus Glarus in einem Luftpaket ins Klöntal transportiert wird.

4.3. Ozonkonzentrationen im Frühling

Im Frühling (April) herrscht normalerweise eine weniger intensive Thermik mit Tal- und Bergwind, weil die höheren Lagen noch schneebedeckt sind und sich im Tagesverlauf nur wenig erwärmen. In dieser Jahreszeit sind zeitweise deutliche Unterschiede in der Ozonkonzentration zwischen Glarus und dem Klöntal feststellbar. Im speziellen wurden im April im Klöntal zeitweise hohe bis sehr hohe (Maximum: $180 - 190 \mu\text{g}/\text{m}^3$) Konzentrationen gemessen. Während der Nacht sank im Klöntal die Ozonkonzentration kaum ab und verblieb auf hohen Werten. Anscheinend führte der Bergwind Luft mit relativ hohen Ozonkonzentrationen zu.

Während der Periode vom 11. - 14. April 2003 lagen die Konzentrationen im Klöntal durchwegs in einem hohen Bereich (Abb. 14). In dieser Periode lagen die Temperaturen zum Teil noch kaum über 10°C , die Thermik war noch schwach. Der Luftaustausch zwischen Haupttal und Klöntal war noch nicht intensiv.

In der nachfolgenden Periode vom 15. - 18. April 2003 lagen die Maximaltemperaturen in Glarus bei über 20 °C. Die Thermik war intensiver und der Luftaustausch zwischen Klöntal und dem Haupttal stärker. Die Ozonkonzentrationen im Klöntal lagen generell tiefer als in der Vorwoche und bewegten sich am späteren Nachmittag im gleichen Bereich wie in Glarus.

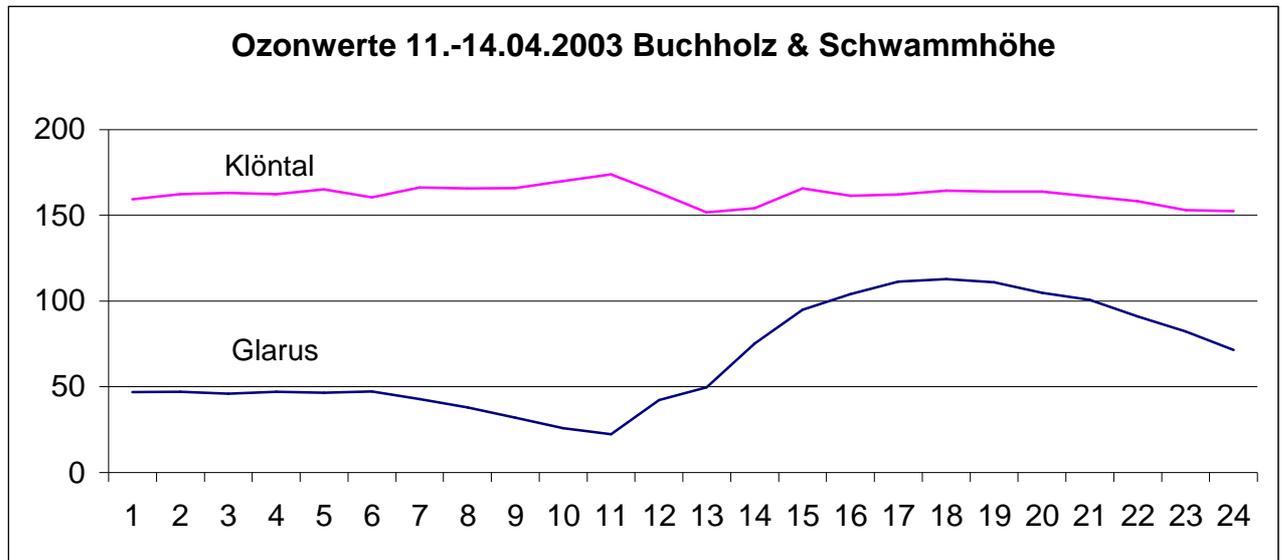


Abbildung 14: Durchschnittliche Ozonkonzentrationen in Glarus und im Buchholz im Tagesverlauf vom 11. - 14. April 2003.

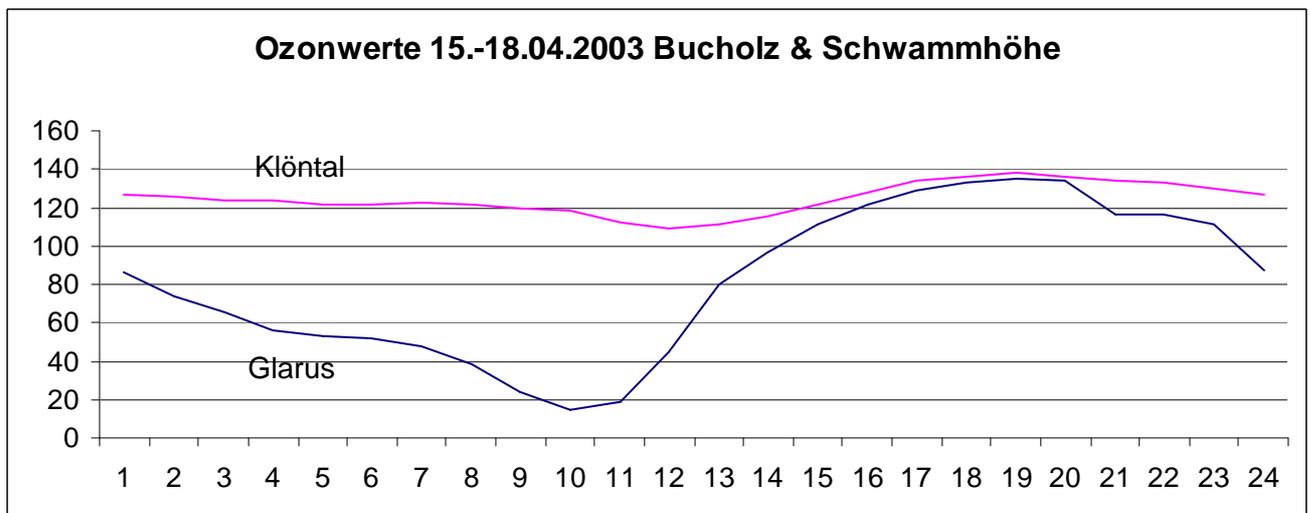


Abbildung 15: Durchschnittliche Ozonkonzentrationen in Glarus und im Buchholz im Tagesverlauf vom 15. - 18. April 2003.

4.3 Ozonverfrachtungen

In der Studie von Espace Mont Blanc (2003) wurden anhand von Messungen der Ozonkonzentration und der Windgeschwindigkeiten die Ozonfrachten im Profil bis 2000 m.ü.M. für verschiedene Täler berechnet. Dabei wurden für die Nachmittagsstunden Werte von 2'000 - 8'000 kg Ozon/h berechnet.

Eine analoge Rechnung für das Klöntal ergibt folgende Resultate:

- der Talquerschnitt im Klöntal auf der Höhe des Dammes beträgt $2,668 \text{ km}^2$ (bis 2000 m ü.M.);
- am Nachmittag herrschen Windgeschwindigkeiten von $4 - 5 \text{ m/s}$;
- bei angenommenen Ozonkonzentrationen von $120 - 160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ergeben sich daraus Frachten von $4'600 - 7'700 \text{ kg Ozon pro Stunde}$.

Diese Mengen sind vergleichbar mit denjenigen, die im Aostatal, bei Chamonix und bei Martigny gemessen wurden.

Diese zugeführte Menge an Ozon reicht somit aus, um die Verluste in der Form von Transporten in höheren Schichten und Depositionen auszugleichen. Eine grosse Neubildung von Ozon ist in den Nachmittagsstunden nicht zu erwarten.

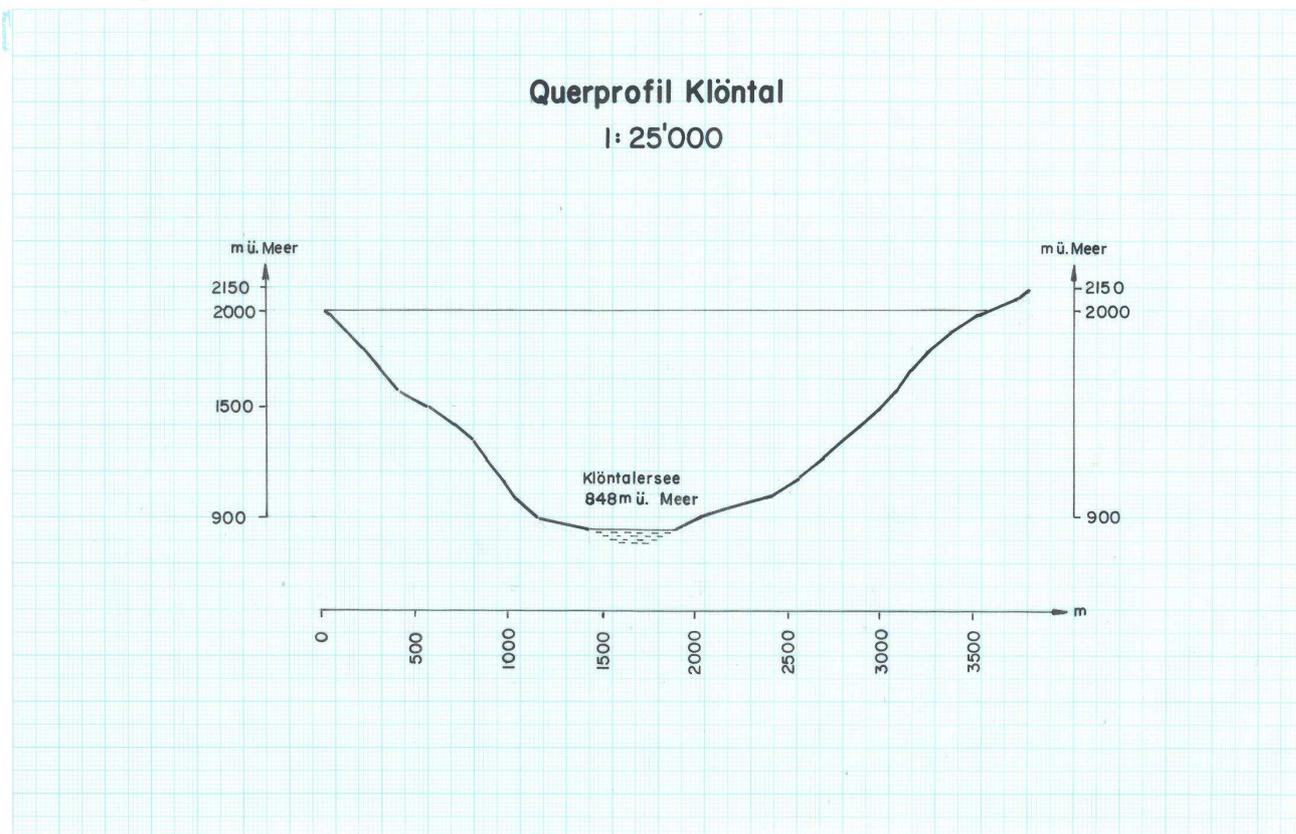


Abb. 16 Querschnitt durch Klöntal

4.5. NO₂-Messungen

Mit dem DOAS-System wurde auch NO₂ gemessen. Die Messresultate zeigen aber, dass wegen der langen Messstrecke und den tiefen Konzentrationen keine zuverlässigen Daten ermittelt werden konnten. Klar ist aber, dass zur Zeit des intensiven Talwindes nur sehr geringe NO₂-Konzentrationen von in der Regel unter $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen wurden. Nur unmittelbar vor Einsetzen des Talwindes und am Anfang der Talwindphase wurden leicht höhere Werte gemessen.

5. Diskussion

Das in den vorliegenden Untersuchungen verwendete Mess-System erlaubt keine abschliessende Beurteilung des festgestellten Phänomens, weil das Ozon nur an zwei Stellen gemessen wurde und die dritte Dimension (Vertikale) nicht berücksichtigt werden konnte.

Trotzdem konnte festgestellt werden, dass das Tal-/Bergwind-System einen entscheidenden Einfluss auf die Ozonsituation in den Alpentälern hat. Mit dem Einsetzen des Talwindes werden erhebliche Mengen an Ozon in das Bergtal befördert. Da die NO₂-Messung wegen der langen Messdis-

tanz nicht zuverlässig arbeitete, konnte der Anteil des transportierten NO₂ nicht genau bestimmt werden. Aus anderen Arbeiten (Espace Mont Blanc, 2003) ist bekannt, dass die Konzentrationen sehr klein sind, dass aber die transportierten Frachten ansehnlich sind. Es scheint, wie im Wallis festgestellt, dass überwiegend Ozon und nicht seine Vorläufersubstanz ins Tal transportiert werden.

Unklar ist der vertikale Transport von Ozon aus der Reserveschicht in etwa 4000 m Höhe. Angesichts der über 2900 m hohen Berge im Klöntal wäre es denkbar, dass mindestens der Bergwind während der Nacht Luft aus dieser Reserveschicht herbeiführt. Die gemessenen Ozonkonzentrationen können dies aber für den Sommer nicht bestätigen. Hingegen könnten anfangs April die hohen Ozonkonzentrationen auf solche Transporte zurückgeführt werden. Aber auch während des Tages könnte durch die Thermik in der komplexen Topografie eines Alpentaales eine Einmischung aus höheren Luftschichten stattfinden. Die praktisch gleich hohen Konzentrationen am Nachmittag in Glarus und im Klöntal und die Messungen im Wallis sprechen aber eher gegen einen grossen Einfluss einer vertikalen Durchmischung.

Die Herkunft des Luftpaketes, das am späten Nachmittag ins Klöntal gelangt, ist anhand der wenigen Windmessungen nicht genau beschreibbar. Die Luft dürfte aber einige Dutzend Kilometer zurückgelegt haben. Mit Hilfe zusätzlicher Windmessungen und Rückwärts-Trajektorien könnte die Herkunft genauer beschrieben werden. Mit denselben Methoden könnte auch die Frage weiterverfolgt werden, wie weit der Einfluss von Luft aus dem Voralpenraum in den Alpentälern reicht.

6. Schlussfolgerungen

Es konnte gezeigt werden, dass im Klöntal mit dem Einsetzen des Talwindes die Ozonkonzentrationen stark ansteigen. Es liegen somit ähnliche Verhältnisse vor wie in anderen Alpentälern z.B. im Urner Reusstal und im Aostatal (Geografisches Institut Bern (1989); Air Espace Mont Blanc (2003)).

Das Messverfahren für NO₂ war wegen der langen Messdistanz nicht gleich zuverlässig wie dasjenige für Ozon, darum können bezüglich NO₂ Aussagen nicht mit der gleichen Zuverlässigkeit gemacht werden. Es scheint aber, dass mit dem Talwind eher kleine Mengen an NO₂ ins Alpental transportiert werden. Anscheinend reagiert das NO₂ schon auf dem Transportweg zu Ozon.

Während dem Höhepunkt der Thermik Mitte Nachmittag herrschen im Klöntal und im Haupttal ähnliche Ozonkonzentrationen. Mit dem Talwind werden während des Nachmittages über 4'500 kg Ozon/h ins Klöntal transportiert (Schicht unter 2'000 m.ü.M.). Diese Menge ist ähnlich hoch wie diejenige die im Aostatal, bei Martigny oder bei Chamonix gemessen wurden.

Die genaue Herkunft dieser Luft kann nicht im Detail erfasst werden. Angesichts der hohen Windgeschwindigkeiten des Talwindes von 3 bis 5 m/s dürfte die Luft aus relativ weit entfernten Gebieten kommen.

Im Frühling wurden im Klöntal wie auch im Aostatal zeitweise sehr hohe Ozonkonzentrationen gemessen. Der Bergwind führte während der Nacht kaum zu einer Verminderung der Konzentrationen. Anscheinend waren im Frühling im Herkunftsgebiet des Bergwindes höhere Ozonkonzentrationen vorhanden als im Sommer. Dies könnte auf die bessere Durchmischung der Atmosphäre im Frühling zurückgeführt werden. Ähnliche Erkenntnisse konnten auch von Ozonmessungen bei Föhnepisoden im Frühling gewonnen werden.

7. Weitere Untersuchungen

Zur besseren Kenntnis der Herkunft der Luftpakete im Alpental müssten anhand einer Reihe von Windmessungen im Raum Zürichsee/Linthebene Rückwärtstrajektoren berechnet werden.

Wie im Falle der Untersuchungen im Aostatal wäre es auch für das Klöntal interessant, die Herkunft der hohen Ozonkonzentrationen im Frühling zu kennen.

8. Literaturverzeichnis

- Amt für Umweltschutz des Kantons Glarus 1994: Grundlagenbericht zur Ozonbildung im Kanton Glarus – basierend auf den Messdaten von 1988 bis 1994.
- Amt für Umweltschutz Glarus 2002: Wind- und Ozondatenauswertung der Messungen im Klöntal 2002.
- Amt für Umweltschutz Glarus, 1992: Lufthygienische Untersuchungen im Kanton Glarus im Jahre 1991
- Broder B. 1981: Late Evening Ozone Maxima. *Pageoph*, **119** 978-989.
- Broder B. 1983: Lokalzirkulation und chemische Verunreinigungen. *Jahrbuch der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft*, wissenschaftlicher Teil 1983. 120 - 124
- Broder, B. and Gygax, H.A., 1985: Terrain-induced effects on the ozone, temperature and water vapour daily variation in the upper part of the PBL over hilly terrain. *Tellus*, **37B** 259-271.
- Broder, B. and Gygax, H.A., 1985: The influence of locally induced wind systems on the effectiveness of nocturnal dry deposition of ozone. *Atmospheric Environment* **19** (10) 1627-1637.
- BUWAL, 1996: POLLUMET Luftverschmutzung und Meteorologie in der Schweiz. Umwelt-Materialien Luft **63**.
- Geographisches Institut der Uni Bern. April 1989: Das Ausbreitungsklima der Innerschweiz.
- Espace Mont-Blanc 2003: Etude Air Espace Mont-Blanc, Rapport technique, Mai 2003.
- Fallot, J.-M., Descloux, M., Baeriswyl, I., 1990 Bilan des recherches effectuées sur la ventilation et la qualité de l'air dans la région fribourgeoise de 1980 à 1989. *UKPIK Cahier de L'Institut de Géographie de Fribourg* **7** 15-29.
- Künzle, T. und Neu, U., 1994: Experimentelle Studien zur räumlichen Struktur und Dynamik des Sommersmogs über dem Schweizer Mittelland. *Geographica Bernensia* **G17**.
- Ökoscience, 1992: Ozonprofilmessungen im Kanton Graubünden, im Auftrag des Amtes für Umweltschutz, Graubünden