Zeitschrift: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Luzern
Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft Luzern
Band: 30 (1988)

Artikel: Ozon-Immissionen an der Rigi
Autor: Janach, Walter / Joller, Thomas
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-523497

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 11.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Ozon-Immissionen an der Rigi

WALTER JANACH und THOMAS JOLLER

Zusammenfassung

Durch Ozonmessungen auf der Staffelhöhe sowie aus der Seilbahn Weggis–Rigi Kaltbad wurde die Bildung von Sommersmog in den Voralpen untersucht. Diese Messungen und ihr Vergleich mit Daten von anderen Standorten zeigen, wie die Ozonkonzentration vom Wetter, der Topographie und der Tageszeit abhängig ist und auch in den Voralpen zu einer beträchtlichen Umweltbelastung führt.

Résumé

La formation de smog photochimique dans les Préalpes a été etudiée par des mesures d'ozone sur la Staffelhöhe et depuis le téléférique Weggis–Rigi Kaltbad. Ces mesures et leur comparaison avec des données d'autres stations démontrent que la concentration de l'ozone dépend du temps, de la topographie et de l'heure du jour et constitue une source de pollution considérable aussi dans les Préalpes.

Abstract

Ozone measurements at Staffelhöhe and from the cable car between Weggis and Rigi Kaltbad led to a better unterstanding of the formation of photochemical smog in the Prealps. These measurements and their comparison with data from other stations show how the ozone concentration depends upon the weather, the topography and the time of the day, and leads to a considerable environmental pollution also in the Prealps.

Einleitung

Am Zentralschweizerischen Technikum Luzern lernen angehende Maschineningenieure neben vielem anderen auch, wie der Verbrennungsprozess in Benzin- und Dieselmotoren abläuft. Dazu gehört die Frage, wie die Schadstoffe entstehen, mit welchen technischen Mitteln sie beeinflusst und damit vermindert werden können. Im Labor für thermische Maschinen werden Versuche an solchen Verbrennungsmotoren durchgeführt und die Schadstoffkonzentrationen in den Abgasen bei der Emission gemessen. Es wird immer dringlicher, dass sich der Ingenieur auch dafür verantwortlich fühlt, was mit den Schadstoffen nach deren Emission geschieht, wenn sie als Immissionen in unse-

Bild 1: Dunst als sichtbares Zeichen von «Sommersmog» mit der Rigi in Bildmitte, dahinter Buochserhorn, rechts Stanserhorn und dahinter am Horizont die Berner Alpen.

re Umwelt verteilt werden. Daher wurden im Sommerhalbjahr 1987 als Erweiterung des Laborbetriebs die Immission von Stickoxiden und Ozon gemessen, zuerst am Technikum und im nahen Schulhaus Spitz, dann von Mitte August bis Ende September nur das Ozon auf der Rigi. Im Rahmen einer Semesterarbeit wurden die Rigi-Daten interpretiert und mit Messungen an anderen Standorten verglichen. Im Juni 1988 wurde in einer Diplomarbeit das Ozon aus der fahrenden Kabine der Seilbahn Weggis–Rigi Kaltbad gemessen.

Ozon entsteht nicht direkt bei der Verbrennung, sondern ist ein Sekundärschadstoff, der unter Sonneneinstrahlung in einem photochemischen Prozess gebildet wird. Dies geschieht beim Abbau von Kohlenwasserstoffen in Gegenwart von Stickoxiden als Katalysator, beides Primärschadstoffe (DÜTSCH 1980). In der Schweiz stammen die Stickoxide zum grössten Teil aus dem Strassenverkehr, die Kohlenwasserstoffe vorwiegend aus Industrie und Gewerbe (BUNDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ 1987). Die Höhe der Ozonimmissionen hängt einerseits

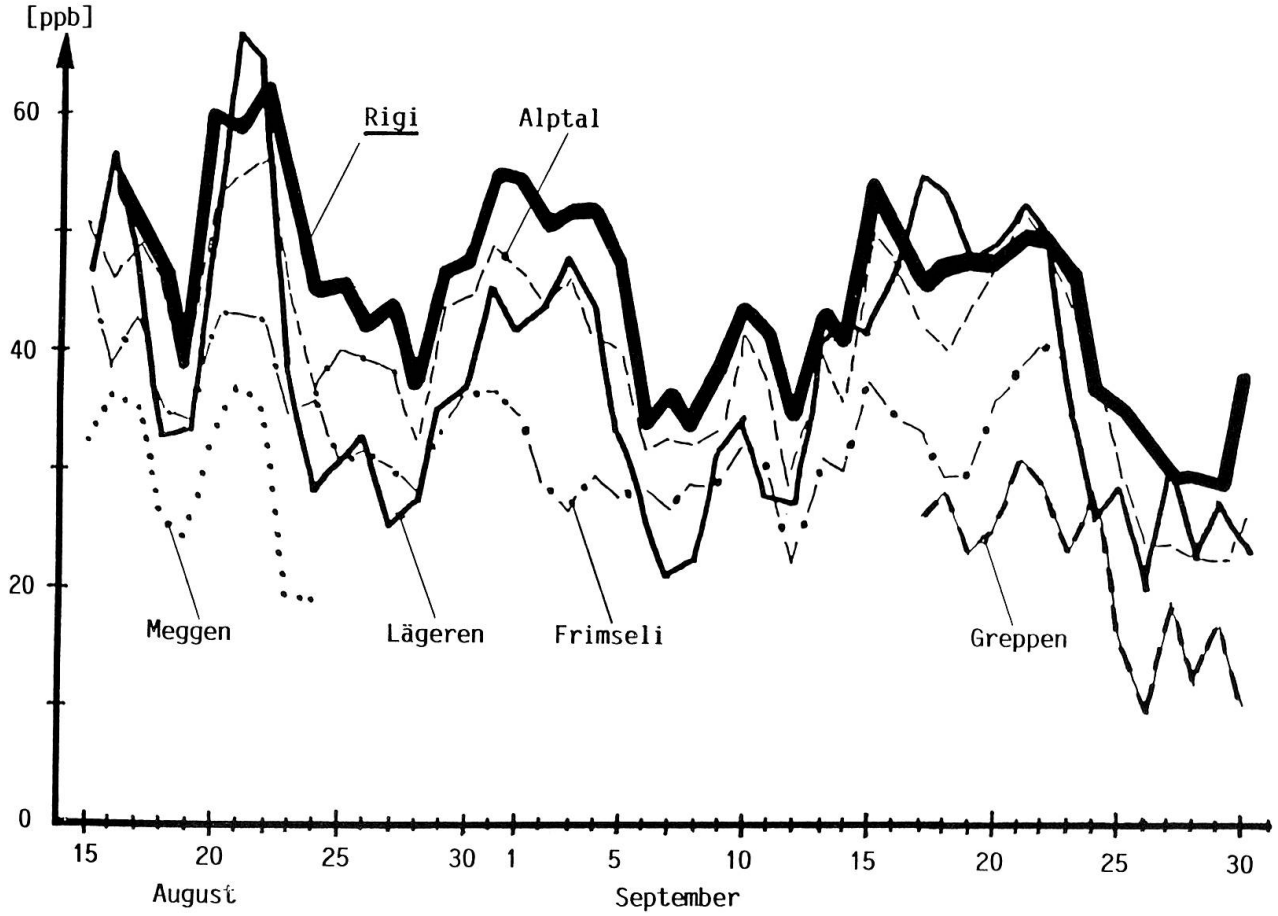

Bild 2: Verlauf der Tagesmittelwerte der Ozonkonzentration auf der Staffelhöhe und zum Vergleich an anderen Orten im Spätsommer 1987.

von der Emission dieser Vorläufersubstanzen, andererseits von ihrer Verfrachtung und Umwandlung in der Atmosphäre ab. Dabei spielen die Topographie und das Wetter eine entscheidende Rolle (DÜTSCH & GRABER 1986, GASSMANN 1987, FILLIGER & RICKLI 1988). Die freie Troposphäre enthält bereits eine Hintergrundkonzentration an Ozon, das aus der Stratosphäre stammt und zudem dauernd neu gebildet wird (DÜTSCH 1980, CRUTZEN 1988).

Ozon kann in höheren Konzentrationen, wie sie bei schönem Wetter im Sommerhalbjahr auch in der Schweiz regelmässig auftreten, sowohl für den Menschen als auch für die Vegetation schädlich sein. Die Schädlichkeitsgrenze liegt etwa beim Grenzwert der Luftreinhalteverordnung (LRV) von 120 $\mu g/m^3$ (Mikrogramm pro Kubikmeter). Das photochemisch gebildete, zusätzliche Ozon entsteht zusammen mit dem Dunst in der untersten Schicht der Troposphäre (planetare Grenzschicht) über dem Mittelland und in den Alpentälern. Bild 1 zeigt eine typische Situation von solchem «Sommersmog», wobei der Gipfel der Rigi über den Dunst hinausragt, Buochser- und Stanserhorn hingegen ganz damit bedeckt sind. Bild 1 macht auch deutlich, dass sich der Sommersmog über ganze Regionen gleichmässig ausbreitet. Unsere Messungen an der Rigi sind also für das Voralpengebiet recht gut repräsentativ.

Messungen auf der Staffelhöhe im Spätsommer 1987

Das Ozonmessgerät, ein Dasibi 1003 AH, konnte im alten «Gärtnerhaus» neben dem Hotel Edelweiss in Kretenhöhe auf 1560 m aufgestellt werden (Koordinaten: 677 920 /

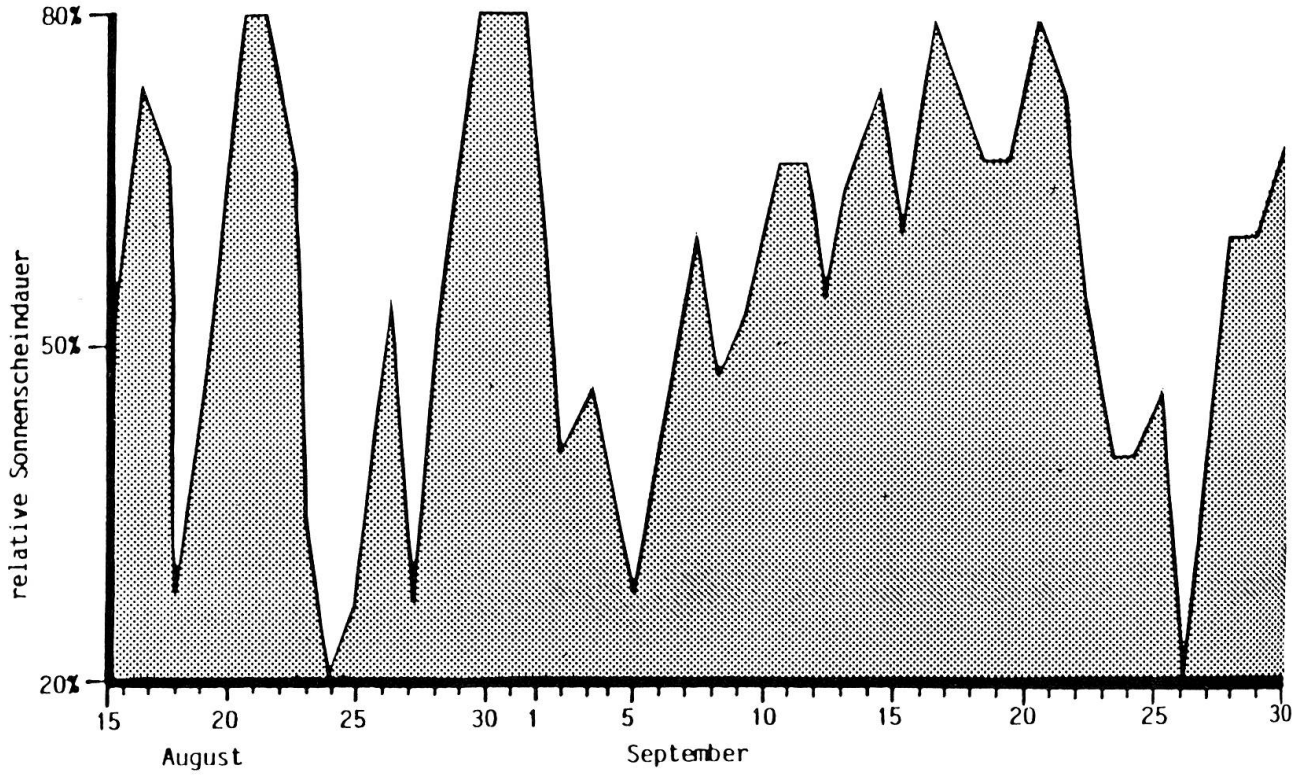

Bild 3: Relative Sonnenscheindauer während der Messperiode.

211 440). Dieser Messort liegt genau 12 km östlich der Stadt Luzern. Gemessen und aufgezeichnet wurde kontinuierlich vom 15. August bis am 30. September 1987. Bild 2 stellt die ausgewerteten Tagesmittelwerte über die ganze Messperiode dar, zusammen mit Werten von anderen Standorten. Als Einheit werden ppb (parts per billion) benutzt, weil die Konzentration dabei ein Mischungsverhältnis ist (Teilchen Ozon zu Luftteilchen) und somit unabhängig vom Luftdruck in verschiedenen Höhen. Der Faktor für die Umrechnung in $\mu g/m^3$ beträgt für das Ozon 1,94 bei einer mittleren Temperatur von 9° C und einem mittleren Luftdruck von 950 mbar (BUCHER, LANDOLT & BLEULER 1986). Der Grenzwert der LRV beträgt 62 ppb.

Auf Bild 3 ist die relative Sonnenscheindauer während der gleichen Periode aufgetragen. Für jeden Tag wurde von 9 Stationen der Schweiz. Meteorolog. Anstalt der Mittelwert gebildet. Wie zu erwarten, stimmen die Tage mit hoher Ozonkonzentration recht gut mit den Schönwettertagen überein. Der Verlauf der Ozonkurve ist manchmal bis zu einem Tag gegenüber dem der Sonnenscheindauer verspätet, da der Auf- und Abbau einer Smogschicht mehrere Tage brauchen kann.

Da die Luftreinhalteverordnung vorschreibt, dass die Ozonkonzentration im Mittel während einer Stunde 62 ppb nicht übersteigen sollte, ist es zweckmässig, für jeden Tag den höchsten Stundenmittelwert zu berechnen. Diese Werte sind auf Bild 4 dargestellt. Auch diese täglichen Höchstwerte korrelieren recht gut mit der relativen Sonnenscheindauer (Bild 3).

Der Tagesgang des Ozons – die Änderung seiner Konzentration mit der Zeit – wird durch die photochemische Erzeugung bei Sonnenstrahlung, die Verfrachtung mit den Winden und durch Abbauprozesse gesteuert. Das Wetter hat dabei den dominierenden Einfluss. In den Bildern 5 und 6 ist die Ozonkonzentration während 24 Stunden für einen typischen Schönwettertag (20. Au-

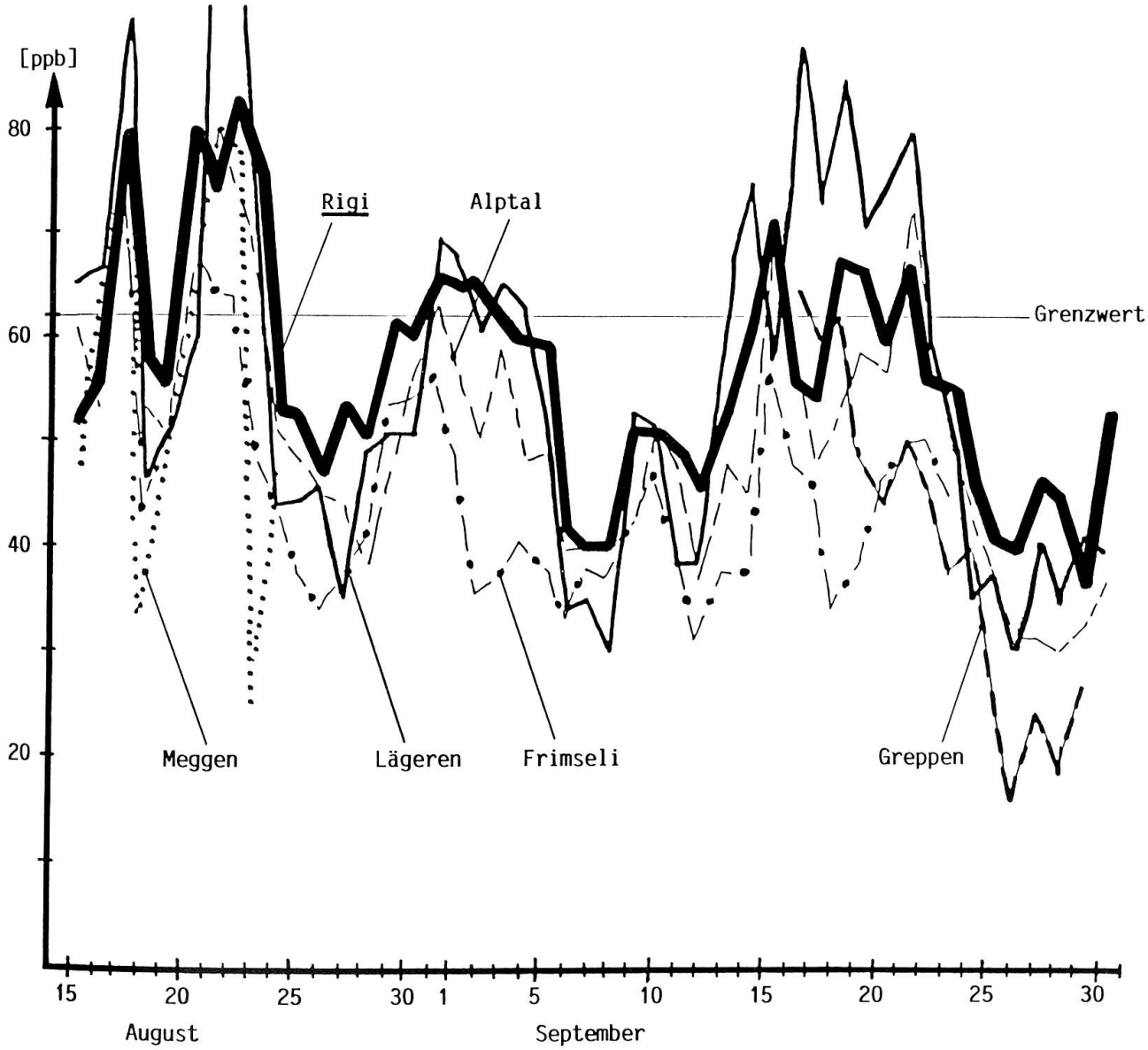

Bild 4: Höchster täglicher Stundenmittelwert der Ozonkonzentration auf der Staffelhöhe und zum Vergleich an anderen Orten.

gust 1987) und einen Schlechtwettertag (23. August 1987) aufgetragen. Auf der Rigi, in 1560 m Höhe, ist am 20. August die Ozonkonzentration gegen 10 Uhr morgens am tiefsten (etwas unter 50 ppb), steigt dann im Verlauf des Nachmittags an und erreicht gegen 21 Uhr eine Spitze von 85 ppb. Der 23. August war der erste darauffolgende Schlechtwettertag (Bild 6). Hier bleibt das Ozon bis 6 Uhr morgens noch auf dem vom Vortag stammenden, hohen Niveau von über 70 ppb, sinkt dann bis gegen Mittag und bleibt während der zweiten Tageshälfte konstant auf rund 50 ppb. In den folgenden beiden Tagen ging das Unwetter über den Kanton Uri nieder und das Ozon sank noch etwas tiefer, bis auf 40 ppb.

Messungen aus der Seilbahn Weggis–Rigi Kaltbad

Da die photochemische Bildung von Ozon vom Vorhandensein der Stickoxide und Kohlenwasserstoffe abhängt, müssen sich diese zuerst von ihrer Quelle ausbreiten. Die

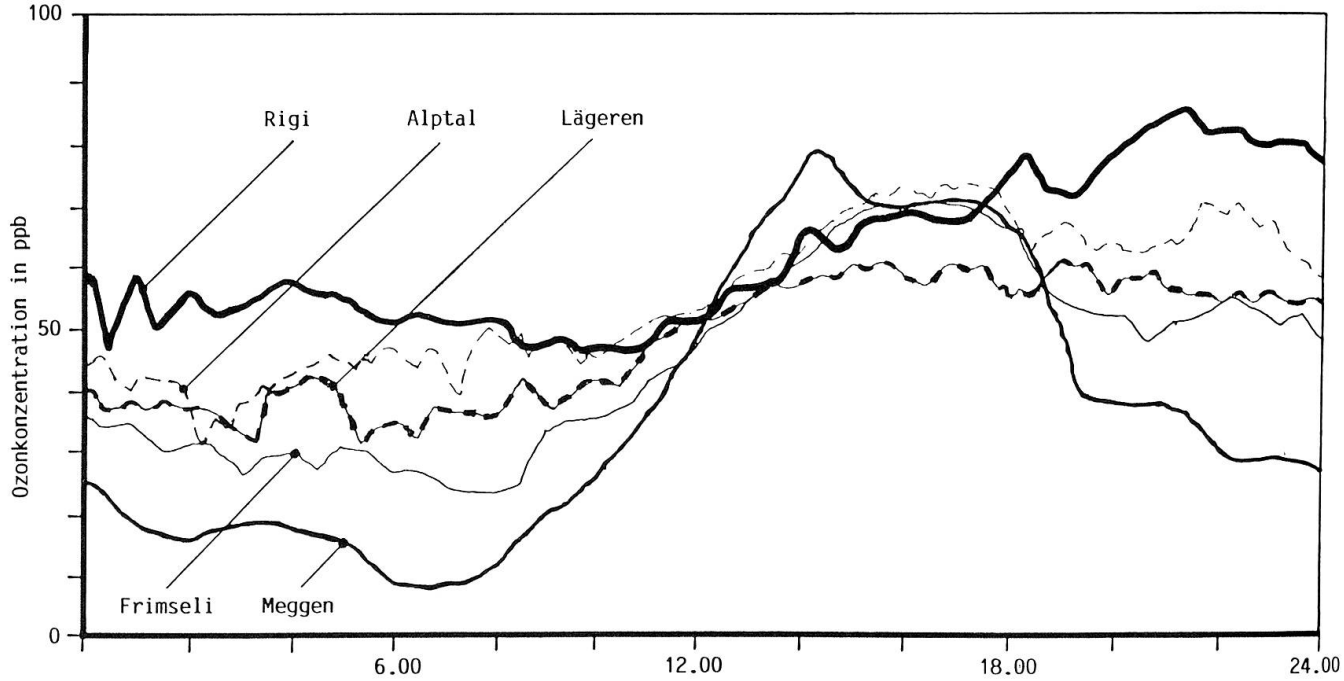

Bild 5: Tagesverlauf der Ozonkonzentration auf der Staffelhöhe und zum Vergleich an anderen Orten bei schönem Wetter am 20. August 1987.

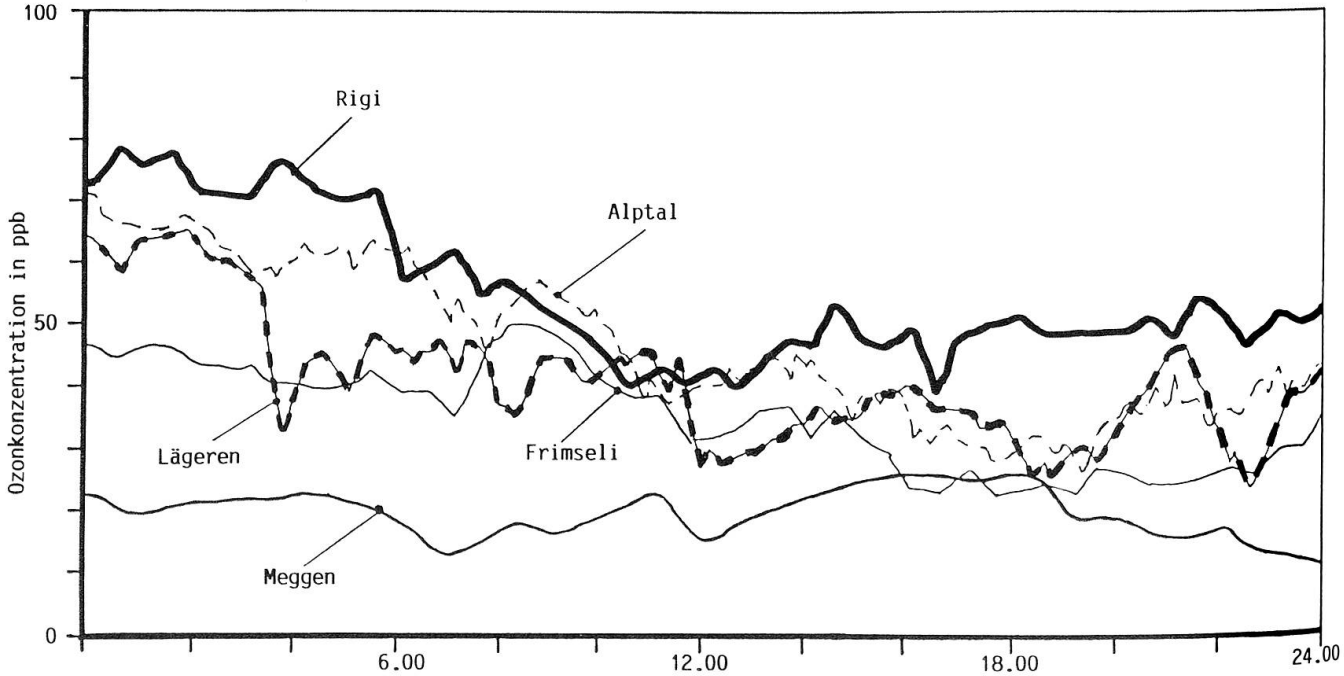

Bild 6: Tagesverlauf der Ozonkonzentration auf der Staffelhöhe bei schlechtem Wetter am 23. August 1987.

Ozonbildung beginnt bereits während dieser Verfrachtung der Vorläufersubstanzen. Um diese Prozesse besser zu verstehen, wurde das Ozon aus der fahrenden Kabine der Seilbahn an der südwestlichen Flanke der Rigi während einiger ausgewählter Schönwettertage im Mai und Juni 1988 gemessen. Damit konnte der Höhenbereich zwischen 500 m und 1425 m ü. M. kontinuierlich erfasst werden. Die Stromversorung des Mess-

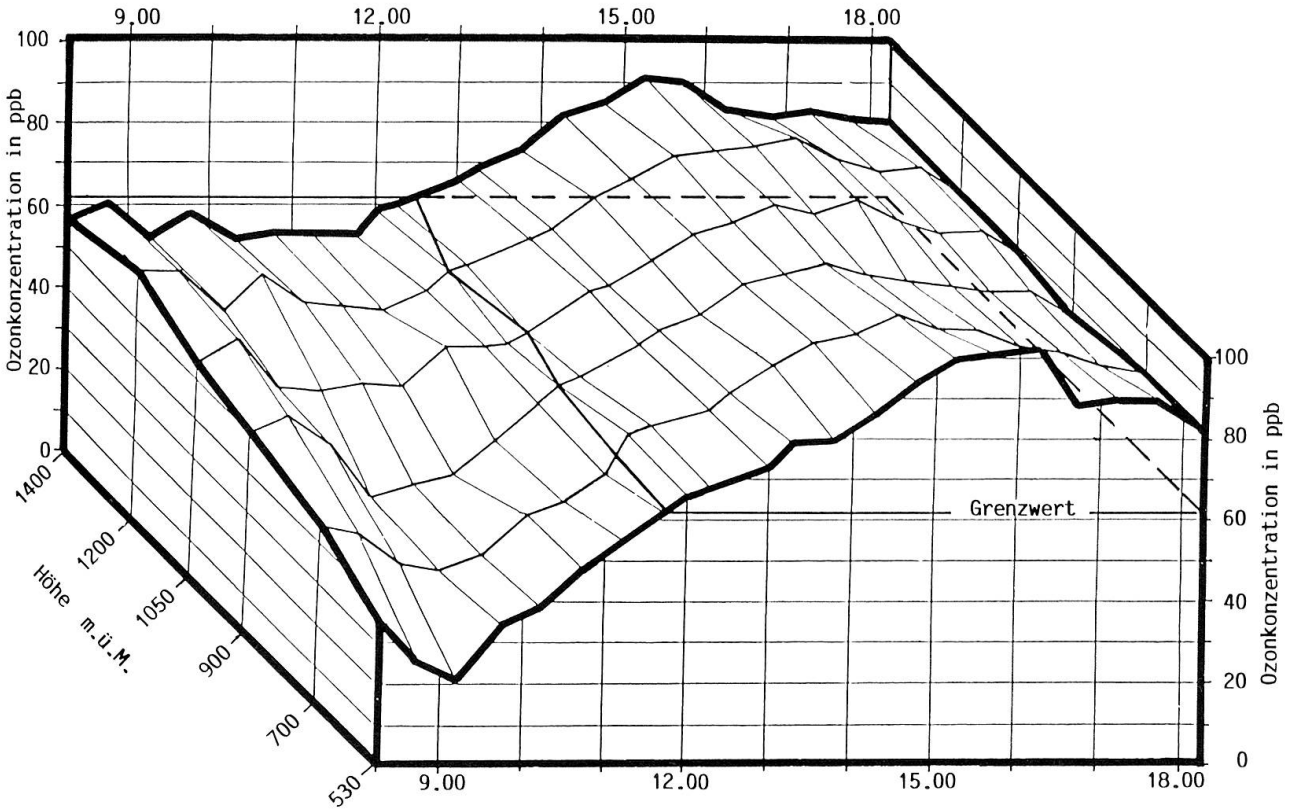

Bild 7: Tagesverlauf der Ozonkonzentration entlang der Seilbahn Weggis – Rigi Kaltbad zwischen 530 und 1400 m ü. M. bei schönem Wetter am 25. Mai 1988.

geräts erfolgte aus Batterien. Die alle 25 Sekunden neu gemessene Konzentration wurde von Hand protokolliert, insgesamt etwa 21 Werte während jeder 9minütigen Fahrt. Gleichzeitig mit jedem Ozonwert wurden auch die Höhe und die Lufttemperatur gemessen.

Auf Bild 7 sind die aufbereiteten Ozonmesswerte für den 25. Mai 1988 in Abhängigkeit von der Höhe und der Tageszeit zwischen 8 und 18 Uhr aufgetragen. Knapp oberhalb der Talstation, auf 530 m, steigt die Ozonkonzentration vom Minimum bei 20 ppb kurz nach 9 Uhr stetig bis um 15 Uhr auf 100 ppb an, um nach 16 Uhr wieder zu sinken. Auf 1400 m, kurz vor der Bergstation, bleibt das Ozon den ganzen Vormittag auf etwas über 50 ppb und beginnt erst kurz vor Mittag anzusteigen. Das Maximum von 90 ppb wird fast gleichzeitig wie unten zwischen 15 und 16 Uhr erreicht, dann erfolgt auch hier ein langsamer Abbau. Um 18 Uhr beträgt dann die Konzentration über der ganzen Höhendifferenz ziemlich konstant 80 ppb. An zwei weiteren Schönwettertagen (9. und 10. Juni) wurden ganz ähnliche Tagesgänge gemessen.

Interpretation und Vergleich mit Messungen an anderen Standorten

Der in Bild 7 dargestellte, charakteristische Tagesgang in Abhängigkeit von der Höhe zeigt, dass am Morgen die Ozonkonzentration von oben nach unten immer niedriger wird. Die Erklärung liegt beim nächtlichen Hangabwind, der ozonreiche Luft nach unten verfrachtet, wobei Ozon durch den Kontakt mit der Vegetation zerstört wird, seine Konzentration nimmt laufend ab (DÜTSCH & GRABER 1986). Das ausgeprägte Minimum nach 9 Uhr ist die Folge des abflauenden Abwindes am Morgen, die Verweilzeit der über den Wald abströmenden Luft wird dadurch verlängert und damit der Ozonab-

bau verstärkt. Dieser Abbau ist zuoberst kaum möglich, weil immer neue, ozonreiche Luft zugeführt wird. Die Lufttemperatur war anfänglich am Morgen praktisch im ganzen Höhenbereich konstant bei 14° C, was auf eine stabile Schichtung hindeutet. Mit der Besonnung der untersten, flacheren Abhänge setzte nach 9 Uhr der thermische Hangaufwind und gleichzeitig auch die photochemische Ozonerzeugung ein. Auch die Lufttemperatur begann im Tal kontinuierlich zu steigen und machte es möglich, dass der Hangaufwind sowie die thermisch angetriebene, konvektive Durchmischung der unteren Luftschichten immer weiter nach oben in die noch stabil geschichtete Luft vordringen konnte. Kurz vor 12 Uhr erreichte die von unten stammende Luft mit der stark ansteigenden Ozonkonzentration die Höhe von 1400 m. Diese betrug nun unten 62 ppb und oben 53 ppb. Dass bis zu diesem Zeitpunkt trotz intensiverer Sonneneinstrahlung der Ozongehalt oben konstant blieb, ist ein sicheres Zeichen für das Fehlen der notwendigen Vorläufersubstanzen für die photochemische Produktion. Erst durch den Transport von verschmutzter Luft aus tieferen Schichten stieg die Ozonkonzentration daraufhin regelmässig an. Die fortschreitende, vertikale Durchmischung kann sehr schön am Dunst beobachtet werden, der im Laufe eines Schönwettertags langsam in die Höhe steigt und sich immer mehr nach oben ausbreitet. Dass die Konzentration während des nachmittäglichen Anstiegs oben regelmässig 5 bis 10 ppb niedriger war als unten, deutet ebenfalls auf Verfrachtung und Verdünnung durch den Hangaufwind und die konvektive Turbulenz. Gegen 15 Uhr betrug die Temperatur unten 22° C und oben 16° C, was bei 900 m Höhenunterschied nicht ganz einem adiabatischen Temperaturverlauf entspricht, wie er über dem Flachland durch konvektive Durchmischung der planetaren Grenzschicht entstehen würde (GASSMANN 1987). Zwischen 16 und 17 Uhr nahm die Sonneneinstrahlung durch aufkommende Quellbewölkung ab, was zu einem Absinken des Ozons führte. Die Ozonverteilung über der Höhe wurde nun unregelmässiger und lässt sich kaum interpretieren.

Ein Vergleich der Ozonimmissionen an der Rigi mit anderen Standorten, erlaubt noch eine allgemeinere Beurteilung. In den Bildern 2, 4, 5 und 6 wurden daher auch die Verläufe der Ozonkonzentrationen an folgenden Orten eingetragen:

– am Südhang der *Lägeren,* 4 km östlich von Baden, auf 690 m Höhe in Zindelen (669 775 / 259 025), 48 km nördlich von unserer Messstation auf der Rigi,
– im *Alptal* südlich von Einsiedeln, 3 km südlich Alpthal oberhalb Brunni, am Westhang auf 1185 m (696 800 / 211 100), 19 km östlich der Rigi,
– über dem Urnersee auf *Frimseli,* 2,5 km nördlich von Flüelen, auf 1070 m (690 525 / 197 950), 19,5 km südöstlich der Rigi,
– in *Meggen,* auf offenem Feld in Bächtenbüel, auf 510 m (669 900 / 211 150), 8 km westlich der Rigi,
– in *Greppen,* auf offenem Feld oberhalb des Dorfes, auf 465 m (675 460 / 212 175), 2,5 km westlich der Rigi.

Ein Vergleich der Tagesmittelwerte der verschiedenen Stationen auf Bild 2 zeigt, dass im allgemeinen auf der Rigi die höchsten Ozonkonzentrationen aufgetreten sind, gefolgt in abnehmender Reihenfolge von Alptal, Frimseli und Meggen/Greppen. Die Werte an der Lägeren lassen sich weniger systematisch klassieren, sie sind meistens tiefer als Rigi und Alptal und durchschnittlich etwas höher als Frimseli. Die durchschnittliche Ozonkonzentration nimmt mit der Höhe zu, weil der Abbau durch Zerstörung am Boden und durch die Primärschadstoffe in den tieferen Luftschichten erfolgt. Die Höhe über Meer obiger Standorte in gleicher Reihenfolge ist systematisch abnehmend und erklärt damit die gefundenen Unterschiede. Die im Vergleich relativ höheren Werte an der Lägeren sind erklärbar durch die Nähe der grossen Schadstoffquellen im Ballungsraum Baden–Zürich, die geringere Quellbewölkung (mehr Sonne) sowie die schwächere konvektive Durchmi-

schung (weniger Verdünnung) im Mittelland gegenüber den Voralpen.

Bei schönem Wetter treten die höchsten täglichen Spitzenwerte des Ozons nicht direkt bei der Quelle der Vorläufersubstanzen auf, sondern in einiger Entfernung (BUNDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ 1987). Das Ozon wird von diesen Primärschadstoffen auch wieder zerstört. Aus dem gleichen Grund nehmen mit zunehmender Meereshöhe am Emissionsort die Ozonspitzenwerte zuerst zu und dann wieder ab. Oberhalb der planetaren Grenzschicht, in welcher die Bildung von Sommersmog stattfindet, bleibt die Ozonkonzentration während längerer Zeit konstant. Die täglichen, höchsten Stundenmittelwerte an verschiedenen Standorten (Bild 4) sind durch die Kombination von horizontaler und vertikaler Entfernung von den Hauptquellen der Primärschadstoffe zu erklären. Mit Ausnahme der Lägeren werden auf der Rigi regelmässig höhere Werte gemessen als im Alptal und auf dem Frimseli. Die Erklärung liegt in der relativen Nähe der Rigi zu den Schadstoffquellen der Agglomerationen Luzern und Zug. Auch das Alptal liegt noch stärker im Einflussbereich des Mittellandes als das Frimseli.

Auf Bild 5, mit den Tagesgängen verschiedener Stationen für den 20. August, zeigen die Verläufe auf der Rigi (Staffelhöhe) und in Meggen ein Verhalten, das den Seilbahnmessungen (Bild 7) sehr ähnlich ist. Charakteristisch ist das Ozonminimum am Morgen um 7 Uhr in Meggen (Weggis um 9 Uhr) mit dem anschliessenden, steilen Anstieg bis in den frühen Nachmittag. Auf der Rigi hingegen verharrt das Ozon bis gegen Mittag auf hohem Wert und steigt erst am Nachmittag weiter an. Hier erfolgt am Abend nochmals ein Schub ozonreicherer Luft mit einer Spitze gegen 21 Uhr, die noch höher ist als in Meggen um 14 Uhr. Dieses abendliche Ozonmaximum auf der Rigi trat auch am Vortag und an den beiden folgenden Tagen auf (Schönwetterperiode). Es muss sich um Ozon handeln, das am Nachmittag photochemisch gebildet und erst am Abend gegen die Rigi verfrachtet wird. Betrachten wir das Hangwindsystem, so erhält der Bergkamm der Rigi am Nachmittag die Luft entlang den Flanken mit dem Aufwind. In der Nacht erzeugt der Kaltluftabfluss an den Hängen eine umgekehrte Zirkulation, die in der Höhe Luft horizontal an die Bergkämme heranträgt (DÜTSCH & GRABER 1986). Am folgenden Tag übertraf das Ozonmaximum an der Lägeren die Werte aller anderen Stationen.

Schlussfolgerungen

Die Ozonmessungen an der Rigi und der Vergleich mit denjenigen an anderen Standorten haben zu einem besseren Verständnis der Bildung, Verfrachtung und des Abbaus dieses Luftschadstoffs im Voralpengebiet beigetragen. Es zeigt sich, wie stark die Ozonkonzentration vom Zusammenwirken von Wetter und Topographie des Geländes abhängig ist.

Die in Bild 7 dargestellten Messergebnisse aus der Seilbahn belegen eindeutig, dass das photochemisch gebildete Ozon aus den untersten Luftschichten stammt und durch Hangaufwinde sowie durch konvektive Durchmischung in höhere Schichten verfrachtet wird. Über dem Schweizer Mittelland entsteht bei schönem Wetter im Sommerhalbjahr ein eigentlicher «Dunstsee», der bis weit in die Voralpentäler hineinreicht. Darin bildet sich aus Primärschadstoffen Ozon, der Hauptbestandteil von «Sommersmog». Der im Laufe eines Tages aufgebaute Ozonschub verläuft auch über grössere, horizontale Distanzen weitgehend synchron. Die nur kleinen Konzentrationsunterschiede weisen auf eine ziemlich homogene Durchmischung. Abweichungen ergeben sich nur durch die lokal hohen Primärschadstoffe in den städtischen Agglomerationen und in der näheren Umgebung stark befahrener Strassen.

In vertikaler Richtung ist die Ozonverteilung innerhalb der konvektiv durchmischten Grenzschicht ausgeglichen, wobei diese Schicht im Laufe eines Schönwettertages

sich immer weiter in die Höhe ausbreitet. Während der Nacht kühlt sich die Luft an den Abhängen der Berge ab und fliesst in die Täler, Becken und das Mittelland, wo sie dann stabil geschichtet bleibt. Durch den Kontakt dieser abfliessenden Kaltluft mit der Vegetation, sowie durch die Primärschadstoffe in tieferen Lagen, wird das Ozon hier in der Nacht abgebaut, während es an den Bergkämmen zuerst sogar noch ansteigt und dann kaum mehr abnimmt (DÜTSCH & GRABER 1986).

Die Abhänge der Voralpen bewirken bei schönem Wetter während des Tages eine stärkere und weiter nach oben reichende, konvektive Durchmischung der Atmosphäre als über dem Mittelland. Dadurch werden die Luftschadstoffe schneller verdünnt, aber auch weiter verbreitet. Es ist möglich, dass die stärkere Durchmischung den photochemischen Prozess der Ozonbildung beschleunigt und damit der Verdünnung entgegenwirkt. Die Ozonbelastung der mittleren Höhenlagen in den Voralpen ist in zweifacher Hinsicht grösser als im Flachland: während des Tages werden an beiden Orten fast gleich hohe Konzentrationen aufgebaut. Bei den durchschnittlich stärkeren lokalen Winden in den Voralpen erhöht sich die Ozondeposition auf Pflanzen (JANACH & IMBODEN 1989); in der Nacht fliesst ozonreiche Luft gegen die Bergkämme und dann an den Abhängen nach unten, während im Flachland als Folge der Temperaturinversion bei stabiler Schichtung und Windstille das Ozon in Bodennähe rasch abgebaut werden kann und erst am späten Vormittag einen neuen Schub erfährt.

Hohe Ozonimmissionen sind als eine entscheidende, primäre Ursache für die Komplexkrankheit «Waldsterben» zu betrachten (GUDERIAN, TINGEY & RABE 1985). Ein monokausaler Beweis ist nicht möglich, es besteht jedoch ein logisches Netz gewichtiger Indizien. Ein erstes Indiz für das Ozon als wesentlichen Mitverursacher: auch weit von den Emissionsquellen entfernt, wird es gleichmässig ausgebreitet; zudem hat seine mittlere Konzentration in den letzten Jahrzehnten stark zugenommen (CRUTZEN 1988). Ferner nimmt die mittlere Ozonkonzentration in den Voralpen mit der Höhe über Meer zu, wie im allgemeinen auch die Waldschäden. Diese sind von der Zusammensetzung des Bodens weitgehend unabhängig. Das Ozon ist auch der einzige Luftschadstoff, der in Quellennähe der Primärschadstoffe abnimmt, in Übereinstimmung mit dem Fehlen von grösseren Schäden in diesen Gebieten. Quervergleiche mit Flechten, die auf Schwefeldioxid empfindlicher und auf Ozon weniger stark reagieren als höhere Pflanzen, deuten ebenfalls auf Ozon als eine der Ursachen für das Waldsterben (JOHN 1986, KOESTNER & LANGE 1986).

Verdankungen

Dem Hotel Edelweiss und den Rigi-Bahnen danken wir für die Ermöglichung der Messungen und das Entgegenkommen bei deren Durchführung. Dem Amt für Umweltschutz des Kantons Uri und dem Paul Scherrer-Institut in Würenlingen danken wir für die Messdaten der Stationen Frimseli, Lägeren und Alptal. Den Herren S. Brunner und U. Chastonay danken wir für die Erarbeitung der Grundlagen in einer Semester- und Diplomarbeit, Herrn P. Imboden für die sorgfältige Gestaltung der Diagramme.

LITERATURVERZEICHNIS

BUCHER, J. B., LANDOLT, W. & BLEULER, P. (1986): *Ozonmessungen auf dem Rötiboden ob Göschenen UR* – Schweiz. Z. Forstwes. 137/7,607–621.

BUNDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ (1987): *Luftbelastung 1986.*

CRUTZEN, P. J. (1988): *Tropospheric Ozone: An Overview* – In: ISAKSEN, I. S. A. (ed): *Tropospheric Ozone* – Reidel Verlag Dordrecht, 3–32.

DÜTSCH, H. U. (1980): *Ozon in der Atmosphäre* – Neujahrsblatt natf. Ges. Zürich 124/5,1–48.

DÜTSCH, H. U. & GRABER, W. (1986): *Ozon- und Spurengasverteilung unter dem Einfluss des Berg-Tal-Hangwindsystems in der Bergschale von Arosa* – Bericht 19. int. Tagung für alpine Meteorologie, Rauris – Österreich. Ges. f. Meteorologie (Hrsg), 261–266.

FILLIGER, P. & RICKLI, B. (1988): *Lufthygiene Innerschweiz: Untersuchungen zum Ausbreitungsklima* – Geograph. Inst. Univ. Bern.

GASSMANN, F.(1987): *Schadstoffausbreitung in der Atmosphäre: Neueste Untersuchungen von Transport und Diffusionsvorgängen* – Elektrotechnik, AT-Zeitschriftenverlag Aarau 11,77-82.

GUDERIAN, R., TINGEY, D. T. & RABE, R. (1985): *Effects of photochemical oxidants on plants* – In: Guderian, R. (ed): *Air pollution by photochemical oxidants* – Springer Verlag Berlin, 129–346.

JANACH, W. & IMBODEN, P. (1989): *Der Windeinfluss auf die Ozonbelastung von Pflanzen* – Staub Reinhaltung der Luft, wird publiziert.

JOHN, V. (1986): *Tote Bäume und lebende Flechten* – Allg. Forst-Z. 41/1,15–16.

KOESTNER, B. & LANGE, O. (1986): *Epiphytische Flechten in bayerischen Waldschadensgebieten des nördlichen Alpenraumes* – Ber. ANL 10,185–210.

Prof. Dr. Walter Janach
Zentralschw. Technikum
6048 Horw

Dr. Thomas Joller
Kant. Amt für Umweltschutz
6002 Luzern