

Nachdruck mit Quellenangabe gestattet.

Mitteilungen

des

Deutschen Wetterdienstes

Nummer 3

Bad Kissingen

September 1953

DK 551.510.41

Vergleichsmessungen des Ozongehalts in Oberstdorf und auf dem Nebelhorn

von

Dipl.-Ing. E. O b e n l a n d, Oberstdorf/Allg.



Aus bisherigen Untersuchungen (1—7) kann die Bedeutung des vertikalen Luftaustausches für die Ozonverhältnisse im bodennahen Raum als erwiesen gelten. Angesichts dieses Zusammenhangs, der zunächst aus theoretischen Überlegungen erschlossen und durch Messungen an Bodenstationen weitgehend bestätigt wurde, gewinnt die Untersuchung der vertikalen Verteilung des Ozongehalts durch Messungen in verschiedenen Höhen der unteren Troposphäre besonderes Interesse. In Analogie zur aerologischen Methodik bieten Sondierungen mit Flugzeug oder Ballon den Vorteil kontinuierlicher Erfassung eines größeren Höhenintervalls unter Beschränkung auf die verhältnismäßig kurze Aufstiegszeit, während Bergbeobachtungen besseren Einblick in den zeitlichen Ablauf an festem Raumpunkt geben und damit der Untersuchung stark veränderlicher Elemente besser angepaßt erscheinen.

Flugzeugmessungen des Ozongehaltes in einer winterlichen Hochdrucklage wurden von E h m e r t 1940 in Oberbayern angestellt (4). Aus den Ergebnissen konnte auf eine große Mannigfaltigkeit möglicher Höhenverteilungen der Ozonkonzentration in der Troposphäre in Abhängigkeit von den Austauschbedingungen geschlossen werden. Vergleichsmessungen in Friedrichshafen und in freier Gipfelage auf dem Pfänder (1064 m NN) am östlichen Ende des Bodensees wurden ebenfalls von E h m e r t (3) während einer zehntägigen Periode im September 1940 durchgeführt und die Ergebnisse aus dem Zusammenhang mit dem atmosphärischen Turbulenzzustand gedeutet. Neuerdings sind aus dem Hochgebirge die Ergebnisse von Ozonmessungen in Arosa von G ö t z und V o l z (5) unter besonderer Berücksichtigung des Verlaufs in typischen Wetterlagen und des Jahresgangs veröffentlicht worden.

Im folgenden soll über Vergleichsmessungen des Ozongehalts in Oberstdorf und auf dem Nebelhorn berichtet werden, die an verschiedenen Auswahltagen in der Zeit von Juli bis September 1951 durchgeführt wurden. Die Basisstation befindet sich in 810 m NN inmitten der Talsohle der oberen Iller; die Bergstation liegt in 1932 m NN an dem nach SW gerichteten Abhang des Gipfelmassivs, etwa 300 m unterhalb des 2224 m hohen Nebelhorngipfels. Die Meßwerte können als weitgehend angenähert an die Verhältnisse der freien Atmosphäre betrachtet werden. Den Vergleichsmessungen kommt der Umstand zustatten, daß bei einer Höhendifferenz von 1120 m zwischen Tal- und Bergstation die horizontale Entfernung nur $5\frac{1}{2}$ km beträgt. Das noch geringe Beobachtungsmaterial mahnt vorläufig zur Vorsicht hinsichtlich der Deutung, die der Bestätigung durch weitere Untersuchungen bedarf, läßt jedoch Gesetzmäßigkeiten erkennen, die eine kurze Darstellung der Ergebnisse rechtfertigen.

Meßmethode

Die Messungen wurden mit zwei Handmeßgeräten des von der Bioklimatischen Forschungsstelle Bad Tölz entwickelten Typs (8) durchgeführt, denen eine in γ/cbm geeichte Vergleichsskala beigegeben war. Die Jodkaliumlösung wurde an den Meßtagen jeweils frisch bereitet; gemäß Vorschrift wurden 0,46 gr KJ in 4 ccm Phosphatpufferlösung aufgelöst. Die Gesamtmenge wurde so bemessen, daß die Testlösung für beide Meßreihen dem gleichen Vorrat entnommen werden konnte. Um eine möglichst gleichmäßige Befeuchtung der Meßfelder zu erzielen, wurde eine graduierte Pipette verwendet; die aufgetropfte Menge wurde nach Vorversuchen so dosiert, daß das ganze Meßfeld gut befeuchtet wurde. Nach jeder Verwendung wurde die Pipette mit dest. Wasser durchgespült und mit reinem Alkohol und Äther getrocknet. Auf genaue Einhaltung der Belüftungsdauer, die einheitlich 8 Minuten betrug, wurde

geachtet. Da die Laufzeit des Aspirator-Uhrwerks in der Regel 4 Minuten betrug, wurde, um konstanten Ventilationsstrom zu erhalten, jeweils zur Mitte des Meßvorgangs die Uhr erneut aufgezogen.

Zu jeder Einzelmessung wurden die Hüttenwerte der Temperatur und der rel. Feuchte (einem Hygrographen entnommen) vermerkt. Ferner wurden Angaben über Bewölkungsmenge und Wolkenart, Sicht und Windverhältnisse in das Meßprotokoll eingetragen.

Die Meßfelder wurden im Anschluß an die Messung zwischen Fließpapier unter Luft- und Lichtabschluß verwahrt. Die Auswertung beider Meßfeldreihen wurde gleichzeitig bei natürlicher Beleuchtung im diffusen Tageslicht am Fenster vorgenommen. Die geeichte Vergleichsskala weist z. T. eine verhältnismäßig grobe Abstufung der Skalenwerte auf. Um die Genauigkeit der Auswertung nicht durch unsichere Interpolation zu beeinträchtigen, wurde daher eine ebenfalls von der Bioklimatischen Forschungsstelle Bad Tölz gefertigte, bisher von uns benutzte relative Vergleichsskala zugrundegelegt, die durch eine große Zahl von Parallel-Auswertungen an die absolute Skala angeschlossen wurde. An Hand der Eichkurve konnten daher die zunächst ermittelten Relativwerte auf absolutes Maß umgerechnet werden.

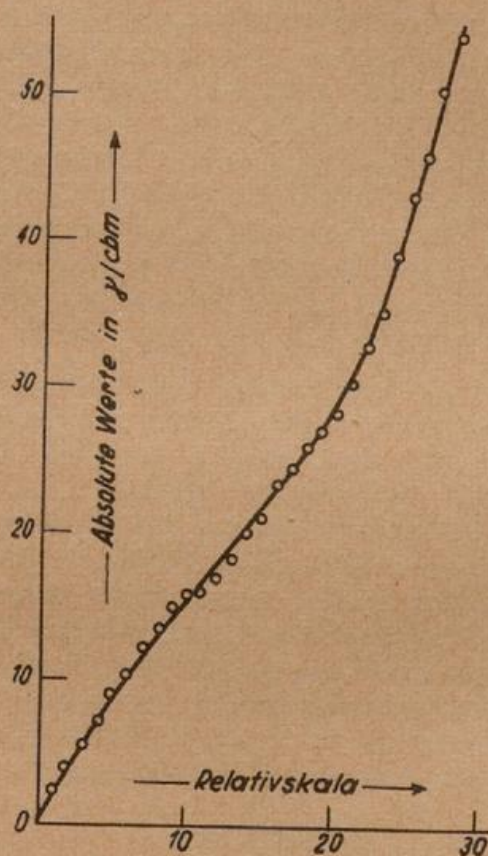


Abb. 1

Reduktionskurve zur Umrechnung von Einheiten der Relativskala in absolute Werte (γ/cbm).

Die in Abb. 1 wiedergegebene Kurve zeigt, daß die Zuordnung der Absolutwerte zu den Werten der Relativskala kein lineares Gesetz befolgt, d. h. daß der Umrechnungsfaktor nicht über den gesamten Meßbereich konstant ist. Der Umrechnungsfaktor, der bei geringen Skalenwerten (0 bis 5 rel. Einheiten) etwa 2 beträgt, nimmt im mittleren Skalenbereich (8 bis 18 relative Einheiten) auf 1,5 ab, um gegen höhere Werte wieder auf 2 anzusteigen.

Die Genauigkeit der Angaben des Curry-Dirnagl'schen Registriergeräts wird auf etwa $\pm 15\%$ geschätzt; sie dürfte auch für das Handmeßgerät erfüllt sein, wenn auf einheitliche Handhabung des Meßvorgangs bei allen Einzelmessungen geachtet wird.

Beobachtungsmaterial

In den Monaten Juli bis September 1951 wurden an insgesamt 11 Tagen vergleichende Meßreihen in Oberstdorf und auf dem Nebelhorn durchgeführt; davon entfallen auf August 6, auf September 4 Tage, während im Juli 1 Meßtag wahrgenommen wurde. Die Einzelmessungen, die sich jeweils über den Zeitraum von 8 bis 18 Uhr, im September von 9 bis 17 Uhr MEZ erstreckten, wurden in Zeitabständen von 30 Minuten, zur vollen Stunde und zur Stundenmitte, vorgenommen; des öfteren wurde durch Einschaltung von Zwischenterminen eine dichtere Meßfolge erreicht. Für die vergleichende Betrachtung der Ergebnisse wurden nur gleichzeitige Meßwerte beider Stationen herangezogen. In der Mehrzahl der Fälle lag die tatsächliche zeitliche Abweichung in der Größenordnung von 0 bis 5 Minuten. Nur in einzelnen Fällen wurde eine Zeitdifferenz von 10 bis 15 Minuten noch in Kauf genommen; dies geschah besonders dann, wenn die Forderung strenger Gleichzeitigkeit zum Ausschluß von Werten geführt hätte, die zur Beurteilung des Tagesgangs wichtig erschienen.

Die ermittelten Werte des Ozongehalts beziehen sich auf die Volumeinheit Luft. Da im Hinblick auf die Höhendifferenz der beiden Stationen die Ergebnisse unter erheblich verschiedenem Luftdruck gewonnen wurden, ist für den Vergleich die Berücksichtigung des Luftdruckunterschieds zwischen Tal- und Bergstation erforderlich. Sämtliche Nebelhornwerte wurden daher auf den mittleren Luftdruck der Basisstation reduziert; als mittlerer Luftdruck wurde dabei für die Bergstation 600 mm Hg, für das Talniveau 692 mm Hg zugrundegelegt. Diese auf Taldruck reduzierten Werte wurden bei den folgenden Untersuchungen verwendet.

Ergebnisse

Aus dem gesamten Vergleichsmaterial wurden nunmehr Meßtage ausgewählt, an denen Luftmassenwechsel nicht beobachtet wurde, an denen daher der advektive Einfluß gegenüber den konvektiven Vorgängen zurücktrat. Es handelt sich demnach um Tage, an denen die aus Reibungs- und Konvektionsraum sich aufbauende Grundschicht (15, 16) in guter Ausprägung bei wechselnder vertikaler Ausdehnung entwickelt war, wobei eine Störung durch frontale Vorgänge oder Umlagerungen nicht erfolgte. Insgesamt ergaben sich so sieben Auswahlstage, auf die sich die folgende Bearbeitung beschränkt.

Tab. 1

Übersicht über Ozonwerte und meteorologisch-aerologische Bedingungen der einzelnen Meßtage.

P_o = Ozonwerte Nebelhorn, P_u = Ozonwerte Oberstdorf.

		3. Juli 9—18 h	17. Aug. 8—18 h	24. Aug. 8—18 h	29. Aug. 7—18 h	6. Sept. 8—17 h	10. Sept. 9—16 h	13. Sept. 9—17 h
Mittelwert	P_o	51,2	27,7	24,0	57,3	35,3	37,7	40,6
	P_u	42,2	20,6	19,0	21,2	18,7	5,1	18,0
	$P_o - P_u$	9,0	7,1	5,0	36,1	16,6	32,6	22,6
	P_u/P_o	0,82	0,74	0,79	0,37	0,53	0,14	0,45
Zahl der Einzelmessungen		11	22	21	21	18	14	16

		3. Juli 9—18 h	17. Aug. 8—18 h	24. Aug. 8—18 h	29. Aug. 7—18 h	6. Sept. 8—17 h	10. Sept. 9—16 h	13. Sept. 9—17 h
Mittl. Veränderl. der Einzelmessungs- werte in % d. Mittels	Ne	±12,3	±11,9	±36,3	±13,3	±27,9	±35,6	±30,5
	Ob	± 8,8	±36,9	±21,0	±17,9	±25,7	±94,2	±31,7
Temp.-Gradient	9h	0,98	0,72	0,63	0,75	0,59	0,55	0,45
Oberstd.-Nebelhorn	15h	0,96	0,95	0,99	0,91	0,79	0,79	0,84
Temp.-Gradient	9h	0,47	0,45	0,45	0,51	0,55	0,60	0,75
2000—4000 m	15h	0,60	0,57	0,40	0,55	0,60	0,72	0,75
Bewölk.-Menge	Ne	3,5	6,9	5,5	1,3	1,1	4,4	0,8
(Cu hum, Cu con)	Ob	1,0	5,0	2,3	0,5	0,6	2,0	0,7
Cu-Kond.-Niveau Hc (m NN)	15h	2500	1700	1900	3000	2400	1900	2800
Temp.-Gradient Hc bis 4000 m	15h	0,60	0,59	0,40	0,55	0,59	0,74	0,73
Sonnenscheindauer Oberstdorf in Std.		12,9	8,1	9,1	11,0	10,5	7,4	9,2
Sonnenscheindauer Oberstdorf in % d. mögl.		98	67	81	100	100	72	91

Die Ergebnisse sind für die einzelnen Meßtage in Tab. 1 wiedergegeben. In der ersten und fünften Zeile ist neben dem Mittelwert des Ozongehalts für das Tagesintervall die mittlere Veränderlichkeit aufeinanderfolgender Einzelwerte in % des Mittelwertes vermerkt. In den beiden folgenden Zeilen ist die Ozonschichtung durch die Differenz Bergwert — Talwert ($P_o - P_u$) bzw. durch das Verhältnis Talwert : Gipfelwert (P_u/P_o) gekennzeichnet. Die anschließenden Zeilen geben Aufschluß über das Temperaturgefälle, wobei sich die Angaben auf die Termine 9 Uhr und 15 Uhr GMT beziehen. Für die Luftschicht zwischen Berg- und Talstation sind die Temperaturgradienten aus den Thermographenregistrierungen abgeleitet; für die Schicht zwischen 2000 und 4000 m NN wurden die Gradientenwerte aus den Aufstiegsergebnissen der Aerologischen Station München ermittelt. Eine weitere Zeile enthält Angaben über die mittlere Menge der während des Beobachtungsintervalls auftretenden Konvektionsbewölkung (Cu hum, Cu con), bezogen auf den Standort der beiden Stationen. Anschließend ist die Höhe des Cumulus-Kondensationsniveaus in m NN und der Temperaturgradient für die darüberliegende Schicht bis zum 4000 m-Niveau angegeben. Schließlich ist in der letzten Zeile die in Oberstdorf registrierte Sonnenscheindauer in Stunden und in % des geographisch möglichen Höchstwerts eingetragen.

In graphischer Darstellung sind die Ergebnisse in der Abb. 2 enthalten. Neben dem beobachteten Ozonverlauf ist jeweils der Gang der rel. Feuchte für beide Stationen wiedergegeben. Um Anhalt über den konvektionsbedingten vertikalen Wasserdampfaustausch zu gewinnen, ist der Tagesverlauf des Mischungsverhältnisses (in gr Wasserdampf pro kg trockener Luft) beigelegt. Schließlich wird noch der Gang des Temperaturgradienten Oberstdorf — Nebelhorn in °C pro 100 m ersichtlich.

Betrachten wir zunächst die Kurven des Ozongehalts beider Stationen, so lassen sich folgende charakteristische Merkmale feststellen. Der für die Tallage typische Tagesverlauf in Oberstdorf zeigt, wie sich dies bereits aus der Bearbeitung von Registrierungen im Sommer 1949 ergab, ein Minimum in der zweiten Nachthälfte, das sich als Folge der Ozonzerstörung in der stagnierenden bodennahen Luftschicht

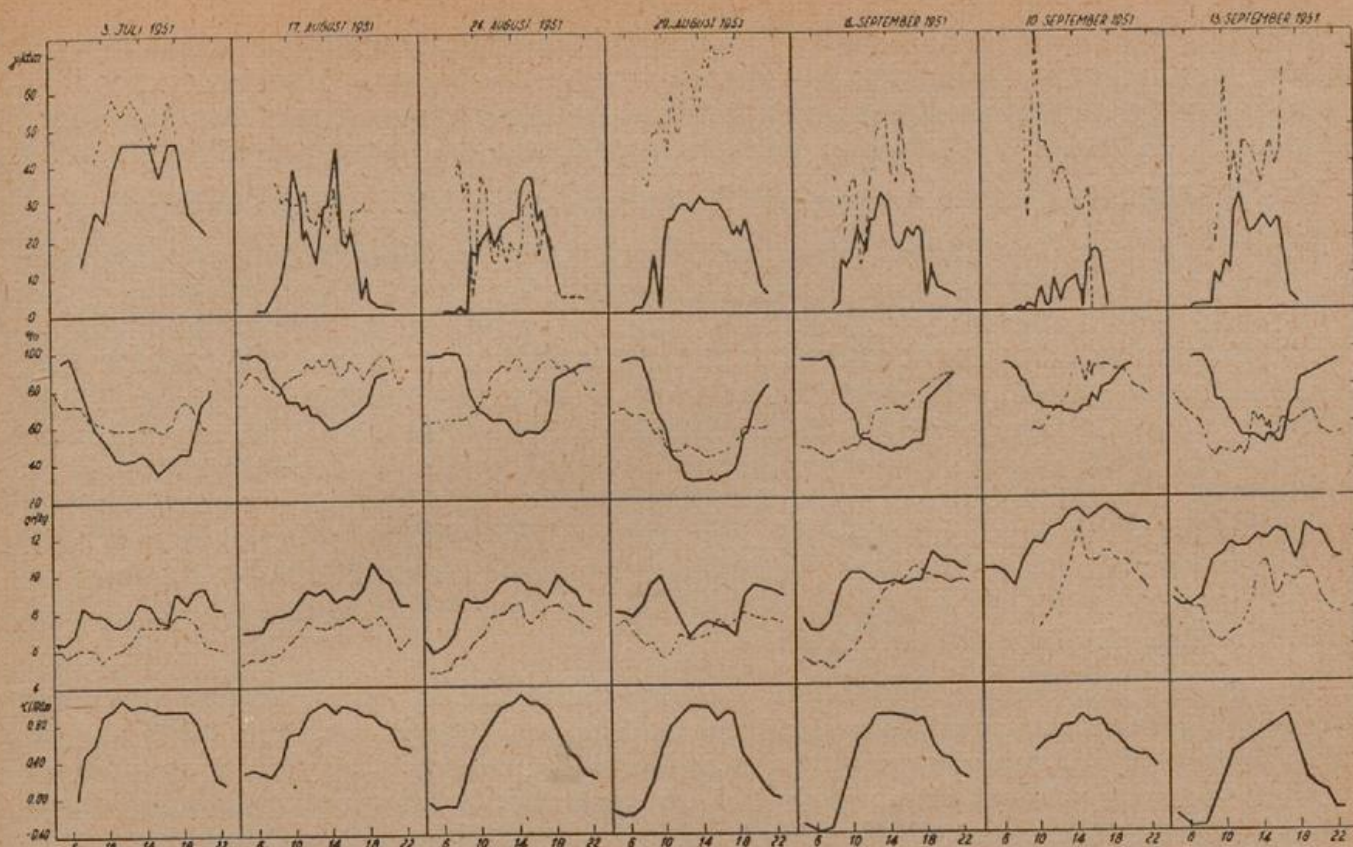


Abb. 2

Tagesgang des Ozongehalts in Oberstdorf (—) und auf dem Nebelhorn (---).

1. Reihe: Ozongehalt (γ/cbm).
2. Reihe: Rel. Feuchtigkeit (%).
3. Reihe: Mischungsverhältnis (gr/kg trockener Luft).
4. Reihe: Temperaturgradient Oberstdorf-Nebelhorn ($^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$).

ausbildet. Mit der Beseitigung der Bodeninversion setzt bei zunehmendem konvektiven Austausch innerhalb der Grundsicht der vormittägliche Anstieg ein, dem der abendliche Abfall mit Erlahmen der Konvektion und Bildung der Bodeninversion gegenübersteht, während das Maximum im allgemeinen in den frühen Nachmittagsstunden eintritt. Für die Bergstation liegen Meßwerte nur für begrenzte Tagesabschnitte vor, aus denen ein sicherer Aufschluß über Vorhandensein und Art einer Tagesperiodik nicht ermittelt werden kann. Insbesondere läßt sich nicht beurteilen, inwieweit aus der Lage am Berghang ein geringer orographischer Einfluß resultiert, der sich der Höhenabhängigkeit des Ozongehalts unter besonderen Bedingungen überlagert. Im einzelnen bieten die Ozonkurven der Bergstation mit dem Auftreten häufiger Schwankungen das Bild einer gewissen Unruhe. Auffällig sind einzelne schroffe Änderungen, an deren Realität selbst bei Erwägung meßtechnisch bedingter Fehlermöglichkeit zunächst nicht gezweifelt werden kann. Der von Ehmert auf dem Pfänder ermittelte Gang der Ozonwerte läßt ebenfalls unregelmäßige Schwankungen von z. T. beträchtlicher Amplitude erkennen. Ehmert schließt aus seinen Messungen, daß in genügender Höhe über der Bodenstörungsschicht in freier Lage ein regelmäßiger Tagesgang des Ozons nicht mehr besteht. Die beobachteten unregelmäßigen Änderungen werden als eine Folge des wechselnden Turbulenzzustandes gedeutet, durch den bald ozonreichere Luft aus höheren Schichten herangeführt, bald Luftquanten aus der Hangatmosphäre abgelöst werden. Beim Vergleich der Ozonkurven von Oberstdorf und Nebelhorn treten einzelne Fälle fast gleichzeitigen Vorkommens markanter, gleichsinniger Ozon-Änderungen besonders zutage, so an den Nachmittagen des 24. August und des 6. September. Ein Fall gleichzeitiger gegen-

sinniger Änderung wird am Diagramm des 13. September mittags ersichtlich. Die genaue Kenntnis der Phasendifferenz derartiger Ozonsprünge verspricht einen Einblick in den zeitlichen Ablauf der vertikalen Austauschströme. Aus diesen Beispielen erhellt die Bedeutung synchroner Parallelregistrierungen in verschiedenen Höhen.

Für die Wetterlage an den einzelnen Meßtagen ergibt sich folgendes Bild:

Am 3. Juli 1951 liegt Mitteleuropa im Bereich eines zonalen Hochdruckausläufers, der sich von der Biskaya zum Balkan erstreckt; über dem Alpengebiet liegt ein Hochdruckkern. Antizyklonale Absinkvorgänge verursachen in Höhen über 2000 m starke Austrocknung. Innerhalb der Grundschicht ist bei trockenadiabatischen Temperaturgradienten lebhafter konvektiver Austausch besonders in den Nachmittagsstunden anzunehmen (s. Kurven des Mischungsverhältnisses). Dennoch kommt es nur zur Entwicklung geringer flacher Haufenbewölkung mit Untergrenze in 2500 m NN, da oberhalb des Kondensationsniveaus bei feuchtindifferenter Temperaturschichtung hohe Lufttrockenheit herrscht. Das Talmittel des Ozons erreicht 82% des Bergwerts, wobei die mittlere Veränderlichkeit aufeinanderfolgender Einzelwerte im Tal 8,8%, an der Bergstation 12,3% beträgt. Als Tageshöchstwert wird am Nebelhorn 58 γ /cbm, in Oberstdorf 46 γ /cbm erreicht.

Am 17. August 1951 befindet sich das Beobachtungsgebiet innerhalb einer am Vortag eingeflossenen maritimen Luftmasse. Ein von Westen nachfolgendes flaches Zwischenhoch zieht mit seinem Kern nordwärts der Alpen nach Osten, so daß ein schwacher Druckgradient gegen das Gebirge und damit eine geringe Stauwirkung in den unteren Schichten erhalten bleibt. Die kräftige Konvektion führt bereits am Vormittag zur Bildung von Quellbewölkung, die bei feuchtlabiler Schichtung oberhalb des Kondensationsniveaus starke Vertikalentwicklung aufweist. Die Bewölkungsmenge beträgt für den Talbeobachter nachmittags meist 6/10 bis 7/10 und steigt zeitweise auf 9/10 an. Die Bergstation ist bei der niedrigen Lage des Cumulus-Kondensationsniveaus in 1700 m NN erstmals gegen Mittag und nachmittags häufig in Wolken eingehüllt. Daß die konvektive Durchmischung nicht in stärkerer Annäherung der Kurven des Mischungsverhältnisses zutage tritt, ist in der bereits unterhalb der Bergstation einsetzenden Kondensation begründet. Die Ozonwerte der Bergstation sind stark gemindert und den Talwerten während der Tagesstunden weitgehend angeglichen, wobei letztere zeitweise sogar unterschritten werden. Während der Höchstwert am Nebelhorn 36 γ /cbm beträgt, wird im Tal ein Maximum von 46 γ /cbm erreicht. Die mittlere Veränderlichkeit der Einzelwerte ist an der Bergstation 11,9%, an der Basisstation 36,9%. Ob im weitgehenden Ausgleich der Ozonunterschiede beider Stationen lediglich die Wirkung intensiver Durchmischung zu erblicken ist oder ob im Wolkenniveau zusätzlich ein ozonmindernder Einfluß der Kondensationselemente angenommen werden muß, bleibt dahingestellt.

Am 24. August 1951 liegt über Süddeutschland ein Zwischenhochkern. Der Konvektionsraum wird durch eine Absinkinversion in 2800 m NN begrenzt, die als Sperrschicht für den vertikalen Luftaustausch wirkt und die Entwicklung hochreichender Quellungen verhindert. Bei am frühen Vormittag einsetzender Cu-Bildung bleibt die Bewölkungsmenge zunächst gering und steigt erst am späten Nachmittag vorübergehend auf 6/10 an. Das Kondensationsniveau liegt nachmittags bei 1900 m NN; die Bergstation ist daher ab 12 Uhr vielfach eingehüllt oder in der Nähe der Wolkenuntergrenze. In den unteren Schichten wird gegen Mittag der trockenadiabatische Temperaturgradient erreicht. Wieder zeigt sich, ähnlich wie am 17. August, die Abnahme der Ozonwerte im Bergniveau, die zeitweise unter die Talwerte absinken. Bemerkenswert ist eine in der Ozonkurve beider Stationen fast gleichzeitig auftretende vorübergehende Ozonzunahme zwischen 14½ und 15½ Uhr, die mit einer Senke des Mischungsverhältnisses und der rel. Feuchte zeitlich zusammenfällt. Man kann darin die Wirkung des absteigenden Teils der Konvektionsströmung erblicken, mit dem vorübergehend ozonreichere Luft herantransportiert wird. Als Höchstwert

des Ozongehalts wird am Nebelhorn 42 γ/cbm , in Oberstdorf 36 γ/cbm erreicht. Die mittlere Veränderlichkeit der Einzelwerte beträgt im Tal 21%, an der Bergstation 36,3%. Der mittlere Ozonwert des Beobachtungsintervalls beträgt im Tal 19 γ/cbm und entspricht damit 79% des Bergwerts.

Abweichend von den bisher besprochenen Beispielen liegen die Verhältnisse am 29. August 1951. Beherrschend ist eine antizyklonale SW-Lage. An der Ostseite eines Zentraltiefs über den Britischen Inseln liegt Mitteleuropa im Zustrom atlantischer Tropikluftmassen, die föhnige Erwärmung und Austrocknung zeigen. Der 15 Uhr-Aufstieg München läßt gegenüber den Vormittagswerten in der Schicht zwischen 2000 und 3300 m weitere Erwärmung und Austrocknung erkennen. Dabei bildet sich zwischen 2000 und 2600 m NN eine Schicht schwachen Temperaturgefälles mit starkem Feuchterückgang, die als Sperrschicht für den konvektiven Austausch wirksam wird. Der Gang des Mischungsverhältnisses ist zunächst an der Talstation bis zur Beseitigung der Bodeninversion durch vormittäglichen Anstieg gekennzeichnet. Anschließend sinkt die Kurve in markantem Abfall zum mittäglichen Minimum auf die niedrigen Werte des Bergniveaus ab. Der schwach entwickelte Talwind wird um 10½ Uhr durch eine schwache Südströmung unterdrückt, um sich erst gegen Mittag wieder durchzusetzen. Bei sehr hohem Cumulus-Kondensationsniveau in 3000 m NN kommt es nur über den südlichen Gipfeln zur Bildung geringer flacher Haufenbewölkung. Die Konvektion, die bei dem herrschenden Temperaturgradienten in den unteren Schichten — gegen Mittag wurden zwischen Talstation und Bergniveau nahezu trockenadiabatische Werte festgestellt — angenommen werden muß, wird demnach in ihrer Entwicklung und vertikalen Ausdehnung durch antizyklonale Absinkvorgänge beeinträchtigt. Betrachtet man die Ozonkurven, so fällt auf, daß eine deutliche Ozonschichtung bestehen bleibt, eine stärkere Durchmischung nicht einzutreten scheint. Einem Mittelwert von 57 γ/cbm an der Bergstation steht ein Talwert von nur 21 γ/cbm gegenüber. Die Höchstwerte sind 74 γ/cbm und 31 γ/cbm .

Am 6. September 1951 befindet sich das Beobachtungsgebiet am Westrand einer ostwärts abziehenden Hochdruckzelle. Die Konvektion führt erst gegen Mittag zur Bildung geringer Haufenbewölkung mit Untergrenze in 2400 m NN; die Bewölkungsmenge steigt auch nachmittags nicht über 2/10 an. Trotz labiler Schichtung oberhalb des Kondensationsniveaus bleibt bei geringen Feuchtwerten stärkere Cu-Entwicklung aus, wie dies den Vorstellungen über die Verdunstungsstabilität nach F a u s t (13, 14) entspricht. Dem konvektionsbedingten Tagesgang des Mischungsverhältnisses an der Talstation erscheint eine allgemeine Zunahme überlagert, die auf advektive Einflüsse hinweist. In stärkerem Maß dürfte das advektive Moment im Feuchtegang der Nebelhornstation maßgebend sein, das am Folgetag in rasch zunehmender Labilisierung in Erscheinung trat. Die Ozonkurven beider Stationen bleiben mit Ausnahme einzelner Meßpunkte deutlich gegeneinander abgesetzt. Am Nebelhorn wird ein Höchstwert von 53 γ/cbm , in Oberstdorf von 33 γ/cbm gemessen. Das von oben nach unten gerichtete Ozongefälle kommt in der Differenz von 16,6 γ/cbm zwischen den Mittelwerten beider Stationen zum Ausdruck. Der um 11 Uhr im Bergniveau einsetzende Anstieg der Ozonwerte, dem mit geringer Verzögerung eine ebenfalls markante Zunahme der Talwerte entspricht, kann als eine Folge der in mittelhohen Schichten beginnenden Labilisierung betrachtet werden, die aerologisch im Temperaturrückgang oberhalb 3700 m NN erkennbar wird.

Am 10. September 1951 liegt der Beobachtungsort am SW-Rand eines Ostseehochs im Bereich einer feuchten, dunsthaltigen Luftmasse, in der sich während der Nacht lockerer Hochnebel gebildet hatte. Nach seiner Auflösung ist es zunächst wolkenlos. Während sich am späten Vormittag nur zögernd geringe flache Haufenbewölkung entwickelt, deren Untergrenze in 1900 m NN liegt, setzt um 12 Uhr fast schlagartig die Bildung von Quellwolken ein, die bei feuchtlabiler Schichtung oberhalb des Kondensationsniveaus sich rasch in die Vertikale entwickeln. Der Gang des Mischungs-

verhältnisses zeigt an der Bergstation kräftigen Anstieg zu einem Höchstwert um 14 Uhr, an den sich bei verstärkten Kondensationsvorgängen ein Rückgang auf das nachmittägliche Wertenniveau anschließt. Ab 14 Uhr ist die Bergstation meist in Wolken gehüllt. Der Temperaturgradient Oberstdorf — Nebelhorn bleibt mit einem Höchstwert von $0,82^{\circ}$ pro 100 m merklich hinter dem trockenadiabatischen Gefälle zurück. Während in dieser Schicht ein kräftiger Austausch nicht zustandekommt, bringt die Intensivierung des Vertikalaustausches über dem Gebirgsmassiv nachmittags eine rasche Erweiterung des Konvektionsraums. Um 19 Uhr wird über den südlichen und südöstlichen Bergketten ein schwaches Ferngewitter beobachtet, wobei Zenithimmel und Nordhalbraum über dem Tal wolkenfrei sind. Betrachtet man die Ozonverhältnisse, so fallen besonders die niedrigen Talwerte auf. Bei einem Maximum von $17 \gamma/\text{cbm}$ beträgt der Mittelwert über das Beobachtungsintervall nur $5,1 \gamma/\text{cbm}$.

In der Kurve der Bergwerte zeichnet sich eindrucksvoll ein stetiger Abfall gegen Nachmittag und Abend ab. Während des ganzen Tages bleibt, wenn man vom letzten Meßwert absieht, eine ausgeprägte Ozonschichtung bestehen. Das Fehlen eines Ausgleichs der Ozonunterschiede zwischen Basis- und Bergstation läßt darauf schließen, daß eine stärkere Durchmischung in dieser Schicht nicht eintrat. Der am Nebelhorn beobachtete nachmittägliche Abfall legt daher die Annahme einer ozonmindernden Wirkung der entstehenden Wolken nahe, da die Vermischung mit ozonarmer Talluft zur Erklärung kaum ausreichen dürfte. Das Verhältnis der Ozonmittelwerte beider Stationen, das 0.14 beträgt, bringt die ausgesprochene Schichtung des Ozons zum Ausdruck.

Die Wettersituation am 13. September 1951 stellt, ähnlich wie die des 6. September, eine Hochdruck-Westrandlage dar. Der Münchner Aufstieg von 15 Uhr GMT zeigt oberhalb einer Isothermie in 1300 m NN Erwärmung und Austrocknung durch Absinkvorgänge. Bei sehr hoch liegendem Cumulus-Kondensationsniveau entwickelt sich daher erst nach 13 Uhr über den Bergen geringe flache Haufenbewölkung in 2800 m NN, während in hohen Schichten stärkere Ci-Bewölkung auf Aufgleitvorgänge hinweist. Der Temperaturgradient Oberstdorf - Nebelhorn bleibt trotz starker Erwärmung der bodennahen Schichten bei einem Höchstwert von $0,84^{\circ}$ pro 100 m unterhalb des trockenadiabatischen Gefälles. Der Talwind ist während des ganzen Tages nur schwach entwickelt. Der Gang des Mischungsverhältnisses am Nebelhorn läßt mit einem Maximum zwischen 13 und $14\frac{1}{2}$ Uhr den Einfluß der Konvektion erkennen, der auch im Verlauf der Talwerte sichtbar wird. Ein von oben nach unten gerichtetes Ozongefälle bleibt während des ganzen Beobachtungsintervalls erhalten; das Verhältnis der Mittelwerte von Basis- und Bergstation beträgt 0.45. Im Werteverlauf ist die Ozonsenke an der Bergstation zwischen $12\frac{1}{2}$ und $14\frac{1}{2}$ Uhr bemerkenswert, die zeitlich mit dem konvektionsbedingten Feuchteanstieg zusammenfällt.

Folgerungen

Versucht man, die beschriebenen Ergebnisse in ihrer Mannigfaltigkeit nach typischen Merkmalen der an den Meßtagen herrschenden Wetterlagen zu ordnen, so kann man folgendes feststellen:

An frontenlosen, vorwiegend unter konvektivem Einfluß stehenden Sommertagen besteht im allgemeinen ein von oben nach unten gerichtetes Ozongefälle von wechselndem Betrag. Verstärkter konvektiver Austausch wirkt im Sinne einer Verringerung bzw. eines Ausgleichs der Ozonunterschiede zwischen Berg- und Talstation. Die zeitweilige Umkehrung des Ozongefälles, die in den Diagrammen in der Überschneidung der Tageskurven erkennbar wird, tritt an Tagen ein, an denen das Cumulus-Kondensationsniveau bereits unterhalb der Bergstation erreicht wird oder nahe der Stationshöhe liegt, an denen also die Bergstation innerhalb oder dicht an der Untergrenze der Konvektionswolken liegt. Ob die Verringerung der Gipfelwerte

dabei ausschließlich aus der Vermischung mit ozonärmerer Talluft erklärt werden kann, erscheint fraglich. Es ist vielmehr zu vermuten, daß ozonzerstörende oder ozonbindende Wirkungen im Zusammenhang mit Aerosolveränderungen und Kondensationsvorgängen (10) auftreten, wofür nicht — im Sinne der Arosen Auffassung (11) — eine oberflächenkatalytische Zerstörung an den Wolken angenommen werden muß.

Als Beispiele für lebhaften konvektiven Austausch können der 3. Juli sowie der 17. u. 24. August 1951 gelten, für welche die geschilderten Ozonverhältnisse zutreffen.

— In deutlichem Unterschied zu den genannten Fällen wird an einer Reihe anderer Meßtage die Erhaltung einer Ozonschichtung mit stärkerem vertikal abwärts gerichtetem Ozongefälle beobachtet. Der Beobachtungsort liegt dabei am Westrand einer ostwärts abziehenden Antizyklone. Der vertikale Ozonaustausch zwischen Tal und Gipfelniveau erscheint in dieser Wettersituation merklich verringert. Dies deutet darauf hin, daß der antizyklonale Absinkvorgang für den Ozontransport nach den bodennahen Schichten weniger wirksam ist als kräftiger konvektiver Austausch bei labiler Schichtung. Diese Tatsache steht in Einklang mit Ergebnissen, die aus der Bearbeitung von Ozonregistrierungen in Oberstdorf im Sommer 1949 gewonnen wurden. Während im bodennahen Milieu die stärkste Überschreitung der Normalwerte in labil geschichteten Luftmassen auftritt, läßt sich bei antizyklonalem Absinken eher eine leichte Unterschreitung der Ozon-Normalwerte feststellen. Es besteht Grund zu der Annahme, daß die oberen Ozonwerte außer im turbulenten Austausch nur im echten Föhndurchbruch ins Bodenmilieu gelangen.

In diese Gruppe von Tagen, die demnach durch mehr oder weniger ausgeprägte Ozonschichtung gekennzeichnet sind, gehören der 29. August, der 6. und 13. September 1951. Das Verhältnis der Mittelwerte von Tal- und Bergstation liegt dabei zwischen 0,37 und 0,53.

Eine Sonderstellung nimmt der 10. September 1951 ein, dessen abnorm große Ozondifferenz in den besonderen aerologischen Schichtungsverhältnissen und dadurch verursachten Austauschbedingungen begründet sein dürfte.

Beziehung des Ozongehalts zur rel. Feuchte

In der oben erwähnten Bearbeitung einer Registrierreihe aus dem Sommer 1949 konnte für die Talverhältnisse der Zusammenhang zwischen Ozongehalt und dem Gang der rel. Feuchte statistisch nachgewiesen werden *). Es lag daher nahe, das allerdings erheblich geringere Beobachtungsmaterial der Nebelhornstation auf eine entsprechende Beziehung zu überprüfen, zumal die Ergebnisse auf einen solchen Zusammenhang hinzuweisen scheinen. Zu diesem Zweck wurde aus den vorliegenden Einzelmessungen, deren Gesamtzahl 123 beträgt, die Verteilung der vorkommenden Stufenwerte des Ozongehalts (>70 , $70-61$, $60-51$, γ/cbm) auf gleichzeitig herrschende Feuchtestufen ($100-91$, $90-81$, $80-71$, %) ermittelt. Das Ergebnis ist in Tab. 2 dargestellt. Die angegebenen Werte geben jeweils die Zahl der Einzelwerte, die in eine bestimmte Ozonstufe fallen und gleichzeitig mit dem in der Kopfzeile bezeichneten Intervall der rel. Feuchte beobachtet wurden, und zwar in % der Gesamtzahl aller Einzelmessungen.

Man ersieht aus der Tabelle, daß niedrige Ozonwerte mit überwiegender Häufigkeit an hohe Feuchten gebunden sind, während umgekehrt hohe Ozonwerte meist mit niedrigen Feuchten einhergehen. Die Tabelle zeigt bei teilweise beträchtlicher Streubreite der Einzelwerte die Verlagerung des Häufigkeitsschwerpunkts im beschriebenen Sinne. Der linke obere Ausschnitt der Tabelle ist durch Werte nicht belegt; dies besagt, daß Ozonwerte $>50\gamma/\text{cbm}$ bei rel. Feuchten von mehr als 70% nicht be-

*) vgl. dazu (12).

Tab. 2

**Prozentuale Häufigkeit der gemessenen Ozonwerte in verschiedenen Wertebereichen des Ozongehalts und gleichzeitiger rel. Feuchte.
Nebelhorn**

rel. Feuchte Ozongeh. %	100—91	90—81	80—71	70—61	60—51	50—41	Summen
>70	.	.	.	.	1	1	2
70—61	.	.	.	.	1	8	9
60—51	.	.	.	3	4	2	9
50—41	.	.	1	5	7	6	19
40—31	2	4	4	9	3	6	28
30—21	8	10	1	.	1	1	21
20—11	3	3	1	.	2	1	10
10—0	.	1	.	1	.	.	2
Summen	13	18	7	18	19	25	100%

obachtet wurden. Andererseits läßt sich feststellen, daß geringe Ozonwerte $< 30 \gamma/\text{cbm}$ zwar — wie erwähnt — vorherrschend bei Feuchtwerten über 80% vorkommen, doch mit schwachem Anteil auch bei geringen Feuchten $< 60\%$ vertreten sind. Geht man von den Feuchtestufen aus, so erscheint den hohen Feuchtwerten ein schmales Wertespektrum des Ozongehalts zugeordnet mit Schwerpunkt in der Wertegruppe 21 — 30 γ/cbm ; demgegenüber ordnen sich die Ozonwerte bei geringer rel. Feuchte ($< 60\%$) zu einem verhältnismäßig breiten Spektrum mit Schwerpunktsbildung bei mittleren u. hohen Werten ($> 40 \gamma/\text{cbm}$). Dabei ist zu bedenken, daß diese Befunde, die durch ein größeres Beobachtungsmaterial bestätigt werden müßten, zunächst nur für die geschilderten Auswahltag Gültigkeit haben, die vorwiegend durch konvektive Vorgänge beherrscht sind. Daß unter dieser Einschränkung die Ozon-Änderungen im Bergniveau im Bild einer Beziehung zum Gang der rel. Feuchte erscheinen, wie dies früher für die Talverhältnisse festgestellt wurde, ist ein bemerkenswertes Ergebnis. Eine plausible Deutung des zunächst rein statistischen Zusammenhangs ergibt sich aus der Tatsache, daß Feuchte-Änderungen in der freien Atmosphäre einen wichtigen Indikator für advektive Vorgänge wie insbesondere für vertikale Luftbewegungen darstellen. So wird das Auftreten geringer Feuchten vielfach mit Absinkvorgängen in Zusammenhang stehen, durch die aus höheren Schichten ozonreichere Luft herabgeführt wird. Andererseits wird der konvektiv bedingte Feuchteanstieg im Gipfelniveau mit der Heranführung ozonärmerer Luft aus tieferen Schichten einhergehen. Daß darüber hinaus an einen unmittelbar kausalen ozonmindernden Einfluß hoher Feuchten im Zusammenhang mit Aerosol-Änderungen und Kondensationsvorgängen gedacht werden muß, wurde bereits erwähnt.

Zur Ergänzung ist in Tab. 3 die entsprechende Verteilung für die Oberstdorfer Vergleichswerte dargestellt, die eine ähnliche Gesetzmäßigkeit bei niedrigerem Wertenniveau des Ozongehalts erkennen läßt. Dabei ist zu beachten, daß für die beschriebenen Auswahltag hohe Werte der rel. Feuchte an die nächtliche Bodeninversion gebunden sind, die bei stagnierender Luft in Bodennähe die Ozonzerstörung begünstigt, während der Feuchterückgang mit beginnender Einstrahlung und die weitere Abnahme gegen Mittag die Auflösung der Bodeninversion und die zunehmende konvektive Durchmischung anzeigen, durch die ozonreichere Luft in die bodennahen Schichten gelangt.

Tab. 3

**Prozentuale Häufigkeit der gemessenen Ozonwerte in verschiedenen Wertebereichen des Ozongehalts und gleichzeitiger rel. Feuchte.
Oberstdorf.**

rel. Feuchte % Ozongeh.	100—91	90—81	80—71	70—61	60—51	50—41	40—31	30—21	Summen
50—41	.	.	.	.	1	4	2	.	7
40—31	.	.	2	1	3	2	1	1	10
30—21	.	.	.	3	12	9	5	3	32
20—11	.	.	4	13	4	3	1	.	25
10—0	4	6	6	10	.	.	.	.	26
Summen	4	6	12	27	20	18	9	4	100%

Faßt man abschließend für jede der beiden Vergleichsstationen die bei verschiedenen Feuchtestufen beobachteten Ozonwerte jeweils zu Gruppenmitteln zusammen, so ergibt sich das in Tab. 4 dargestellte Bild, das graphisch in Abb. 3 wiedergegeben ist.

Tab. 4

**Mittelwerte des Ozongehalts in Abhängigkeit von den verschiedenen Wertebereichen der rel. Feuchte.
(Zahl der Einzelwerte in Klammern)**

rel. Feuchte in %	100—91	90—81	80—71	70—61	60—51	50—41	40—31
Nebelhorn	23,5 (16)	24,9 (22)	34,8 (8)	40,0 (22)	46,1 (24)	49,6 (30)	—
Oberstdorf	0,6 (5)	2,3 (7)	13,4 (15)	13,3 (33)	26,2 (25)	29,5 (22)	31,8 (11)

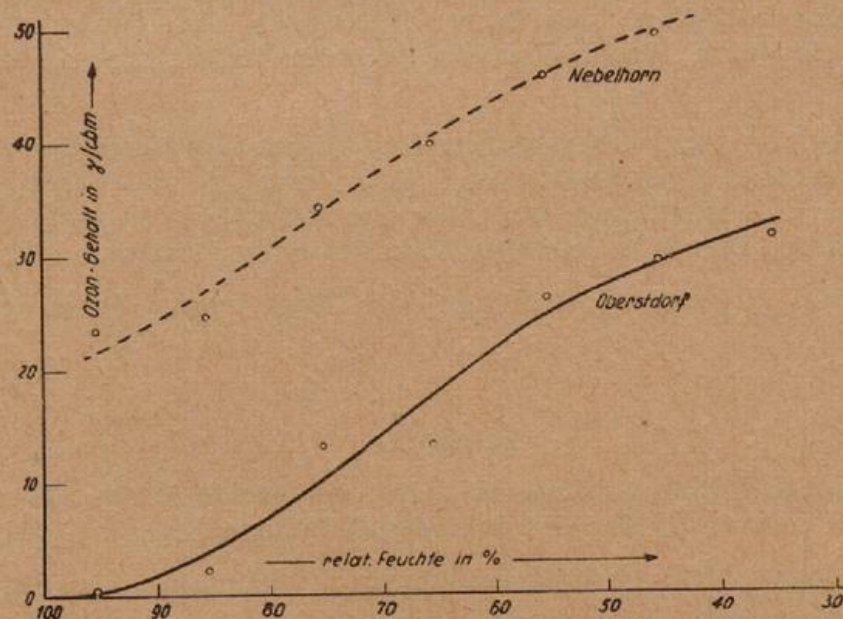


Abb. 3

Mittelwerte des Ozongehalts in Abhängigkeit von den verschiedenen Wertebereichen der relativen Feuchte.

In der Abbildung wird die Beziehung der Ozonwerte zur rel. Feuchte klar ersichtlich. Die Zahl der den Kurvenpunkten zugrundeliegenden Einzelwerte ist aus Tab. 4 ersichtlich. Die Streuung der Werte ist bei geringen Feuchten größer. Der in der Oberstdorfer Kurve verzögerte Anstieg der Ozonwerte im Bereich zwischen 100 und 80% spiegelt den ozonmindernden Einfluß der Bodeninversion wider. Der Vergleich beider Kurven läßt die mittlere Ozondifferenz, bezogen auf gleiche Feuchtwerte, erkennen. Zugleich wird ersichtlich, daß bei hohen Feuchten an der Bergstation, wie sie bei niedrig liegendem Kondensationsniveau auftreten, das normale Ozongefälle sich vorübergehend umkehren kann, da den gleichzeitig herrschenden geringen Feuchten in Tallage alsdann höhere Ozonwerte zugeordnet sind. Höchstwerte der Ozondifferenz zwischen Berg- und Talstation sind zu erwarten, wenn innerhalb der Bodeninversion im Tal die Ozonwerte nahezu auf Null gesunken sind und die Bergstation in eine trockene Schicht mit absinkender Luftbewegung hineinragt.

Zusammenfassung

Während des Sommers 1951 wurden an einer Reihe von Tagen Vergleichsmessungen des Ozongehalts in Oberstdorf (810 m NN) und auf dem Nebelhorn (1932 m NN) mit zwei Handmeßgeräten des Zentralamtes durchgeführt. Aus dem Beobachtungsmaterial wurden 7 Meßtage ausgewählt, an denen der Wetterablauf vorwiegend durch konvektive Vorgänge bestimmt war. Die Messungen wurden mittels einer geeichten Vergleichsskala der Bioklimatischen Forschungsstelle Bad Tölz in γ/cbm Luft ausgewertet; die Bergwerte wurden auf den mittleren Luftdruck der Basisstation reduziert.

Die Bearbeitung der Beobachtungen unter besonderer Berücksichtigung der aerologischen Verhältnisse führte zu folgenden Ergebnissen:

In der Regel herrscht ein von oben nach unten gerichtetes Ozongefälle von wechselndem Betrag. Verstärkter konvektiver Austausch wirkt in Richtung einer Verringerung der Ozonunterschiede beider Stationen. Ein völliger Ausgleich der Ozondifferenz und vorübergehende Umkehrung des Gefälles wurde beobachtet, wenn bei kräftiger Konvektion das Cumulus-Kondensationsniveau unterhalb der Bergstation erreicht wurde. Die dabei auftretende Senkung der Ozonwerte im Bergniveau legt die Vermutung nahe, daß neben der Heranführung ozonarmer Luft aus dem Talbereich ein ozonmindernder Einfluß der Kondensationsvorgänge ursächlich beteiligt ist. Dagegen bleibt in anderen Fällen, die Hochdruck-Westrandlagen angehören, eine deutliche Ozonschichtung bestehen. Dies deutet darauf hin, daß der konvektive Luftaustausch durch die für diese Wettersituation typischen Absinkvorgänge beeinträchtigt wird.

Ein bereits früher an einer Oberstdorfer Registrierreihe statistisch nachgewiesener Zusammenhang zwischen Ozongehalts und dem Gang der rel. Feuchte bestätigt sich für die untersuchten Auswahlstage auch für die Bergbeobachtungen. Demnach sind hohe Ozonwerte vorwiegend an niedrige Feuchtwerte gebunden und umgekehrt.

Die dargestellten Ergebnisse bedürfen der Bestätigung durch weitere Untersuchungen.

Literatur

- (1) Ozon. Vorträge und Diskussionen anläßlich der Sondertagung „Ozon“ am 17. und 18. IV. 1944 in Tharandt. Ber. Dt. Wetterd. US-Zone, Nr. 11 (1949).
- (2) Regener E.: Ozonschicht und atmosphärische Turbulenz. Ber. Dt. Wetterd. US-Zone, Nr. 11, 47 (1949).
- (3) Ehmert A. u. H.: Über den Tagesgang des bodennahen Ozons. Ber. Dt. Wetterd. US-Zone, Nr. 11, 58 (1949).

- (4) Ehmert A.: Über den Ozongehalt der unteren Atmosphäre bei winterlichem Hochdruckwetter nach Messungen. Ber. Dt. Wetterd. US-Zone, Nr. 11, 63 (1949).
- (5) Götz F. W. P. u. Volz Fr.: Aroser Messungen des Ozongehalts der unteren Troposphäre und sein Jahresgang. Z. Naturforsch. 6a, 634 (1951).
- (6) Ungeheuer H.: Erste Ergebnisse der Aranmessungen in Bad Tölz. Ber. Dt. Wetterd. US-Zone, Nr. 12, 221 (1950).
- (7) Ungeheuer H.: Die Beziehungen des bodennahen Ozons zu den Wetterfaktoren. Mediz.-meteor. H. Nr. 5, 53 (1951).
- (8) Heigel K.: Meßmethoden des bodennahen Ozons und ihre Verwendung in der Praxis. Mitt. Dt. Wetterd. US-Zone Nr. 14 (1952).
- (9) Effenberger E.: Messungen des Ozongehalts und Gesamtoxydationswertes der bodennahen Luftschicht auf Sylt. Meteor. Rdsch. 2, 94 (1949).
- (10) Cauer H.: Ergebnisse chemisch-meteorologischer Forschung. Arch. Meteor. Geophys. Bioklim. B 1, 221 (1949).
- (11) Volz Fr.: Über die Zerstörung des Ozons in der Troposphäre. Ber. Dt. Wetterd. US-Zone, Nr. 35, 257 (1952).
- (12) Götz F. W. P. u. Penndorf R.: Weitere Frühjahrswerte des bodennahen Ozons, Abschnitt Wetterlage und bodennahes Ozon. Meteor. Z. 58, 409 (1941).
- (13) Faust H.: Verdunstungsstabilität — ein neues Maß der atmosphärischen Labilität. Z. Meteor. 4, 97 (1950).
- (14) Faust H.: Eine einfache Methode zur Bestimmung der Verdunstungsstabilität. Z. Meteor. 5, 66 (1951).
- (15) Schneider-Carius K.: Der Aufbau der Grundsicht im mitteleuropäischen Klimagebiet. Meteor. Rdsch. 1, 228 (1947/48).
- (16) Schneider-Carius K.: Der Schichtbau d. Troposphäre. Meteor. Rdsch. 1, 79 (1947/48).

