

# Schwankungen der natürlichen Radioaktivität der Luft, Messungen in 2600 m Seehöhe in den Nordalpen\*

Von REINHOLD REITER

München \*\*

(Z. Naturforsch. 11 a, 411—418 [1956]; eingegangen am 29. März 1956)

Experimentelle Untersuchungen zwischen 15. August und 21. September 1955 auf dem Zugspitzplatt in 2600 m Seehöhe über die zeitlichen Schwankungen des Gehalts der Luft an radioaktiven Stoffen natürlichen Ursprungs (Rn, RaA, RaB, RaC) während niederschlagsfreier Zeitabschnitte erbrachten folgende Ergebnisse:

Bei Windrichtungen zwischen SE und SW steigt die Radioaktivität der Luft im Mittel um den Faktor 4,3, im Extremfall um den Faktor 9,5 an. Es besteht eine eindeutige Beziehung zwischen Radioaktivität der Luft einerseits und geologischer Struktur der Erdoberfläche im Herkunftsgebiet der herangeführten Luft andererseits. Diese Beziehung gilt für einen Umkreis von 100—200 km um den Meßort, falls in diesem Gebiet nacktes Gestein zutage tritt. Die ergiebigsten Quellgebiete stellen Tiefengesteine (Granite) und bestimmte metamorphe Gesteine (Orthogneise) dar.

Die Folgeprodukte des Radons sind an die in der Luft schwebenden Kerne angelagert. Die vertikale Verteilung dieses natürlichen radioaktiven Aerosols wird durch die Mächtigkeit der atmosphärischen Konvektion bestimmt. Im Niveau des gewählten Beobachtungsortes besteht keine Beziehung zwischen atmosphärischer Drucktendenz und Luftradioaktivität. Ähnliches gilt für die relative Feuchte. Extrem hohe Radioaktivität wird sehr oft auch bei einer Feuchtigkeit von über 80% gefunden.

An Hand von gleichzeitig ausgeführten Messungen der elektrischen Leitfähigkeit der Luft und der Zahl der Kondensationskerne pro Volumen wird gezeigt, daß unter dem Einfluß der geologisch bedingten vermehrten Radioaktivität der Luft auch bei großer Kernzahl die elektrische Leitfähigkeit der Luft stark erhöht sein kann. Bei luftelektrischen Austauschuntersuchungen sollte deshalb diesem Umstand Rechnung getragen werden.

Auf die mögliche Bedeutung der schwankenden Radioaktivität der Luft im Alpenbereich für die Biologie und für die Bildung von Niederschlägen wird hingewiesen.

Die Steigerung der Häufigkeit und Heftigkeit von Atomexplosionen gab Anlaß zu zahlreichen Untersuchungen über den Gehalt der Luft und der Niederschläge an radioaktiven Substanzen<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup>. Zur Abschätzung der Schädlichkeit der in Frage kommenden radioaktiven Verseuchung dürfte die Kenntnis der in der Natur vorkommenden Radioaktivität der Luft und der Niederschläge sowie ihrer Variationen einen wichtigen Beitrag liefern. Obwohl ältere Ergebnisse über die Radioaktivität der Luft vorliegen<sup>6, 7, 8, 9, 10, 11 u. a.</sup>, besteht die Notwendigkeit neuerer Bestimmungen, z. Tl. unter anderen Gesichtspunkten und unter Verwendung anderer Versuchsanordnungen. Es haben sich in neuester Zeit

vor allem SITTKUS, GANZ und REMY<sup>12</sup> mit der natürlichen Radioaktivität von Niederschlägen befaßt. Sie fanden, daß Niederschläge stark schwankenden Gehalt an Folgeprodukten von Rn aufweisen und daß dieser von der Verweildauer der jeweiligen Luftmasse über dem Kontinent abhängt.

Von Fragen der Luftverseuchung abgesehen, ist die Kenntnis der ionisierenden Vorgänge in der Atmosphäre für luftelektrische Fragen von hoher Bedeutung<sup>8, 11, 13, 14, 15 u. a.</sup>. Während die durch *Höhenstrahlung* bewirkte Ionisation als zeitlich konstant angesehen werden kann, schwankt bereits die Ionisation, bewirkt durch die Strahlungen aus dem Boden, bedeutend: die Niederschläge führen dem

\* Part of the research, reported in this article has been sponsored by the Geophysics Research Directorate of the Air Force Cambridge Research Center, ARDC, US Air Force, under contract AF 61 (514)-732-C through the European Office, ARDC.

\*\* z. Z. Farchant (Obb.), Partenkirchner Str. 7 a.

<sup>1</sup> O. HAXEL u. G. SCHUMANN, Naturwiss. 40, 458 [1953].

<sup>2</sup> W. HERBST, R. NEUWIRTH u. K. PHILIPP, Naturwiss. 41, 156 [1954].

<sup>3</sup> H. GARRIGUE, C. R. Acad. Sci. Paris 238, 2074 [1954].

<sup>4</sup> A. SITTKUS, Naturwiss. 42, 478 [1955].

<sup>5</sup> R. MÜGGE u. G. JACOBI, Phys. Bl. 11, 495 [1955].

<sup>6</sup> H. GEITEL, Handbuch der Radiologie, Bd. I, Leipzig 1920.

<sup>7</sup> F. BECKER, Gerl. Beitr. Geophys. 42, 365 [1934].

<sup>8</sup> V. F. HESS, Kosmische Physik, Akadem. Verlagsges., Leipzig 1934.

<sup>9</sup> O. MACEK u. W. ILLING, Gerl. Beitr. Geophys. 43, 388 [1935].

<sup>10</sup> E. BLANCK, Handbuch der Bodenlehre, Erg.-Bd. I, Berlin 1939.

<sup>11</sup> H. LETTAU, Gerl. Beitr. Geophys. 57, 365 [1941].

<sup>12</sup> A. SITTKUS, D. GANZ u. E. REMY, Z. Naturforsch. 8a, 317 [1953].

<sup>13</sup> H. ISRAEL, Comp. Meteorol. Amer. Met. Soc. 1951.

<sup>14</sup> J. A. CHALMERS, Rep. Phys. Soc. Progr. Phys., London 1954.

<sup>15</sup> R. GUNN, J. Coll. Sci. 10, 107 [1955].



Dieses Werk wurde im Jahr 2013 vom Verlag Zeitschrift für Naturforschung in Zusammenarbeit mit der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. digitalisiert und unter folgender Lizenz veröffentlicht: Creative Commons Namensnennung-Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland Lizenz.

Zum 01.01.2015 ist eine Anpassung der Lizenzbedingungen (Entfall der Creative Commons Lizenzbedingung „Keine Bearbeitung“) beabsichtigt, um eine Nachnutzung auch im Rahmen zukünftiger wissenschaftlicher Nutzungsformen zu ermöglichen.

This work has been digitized and published in 2013 by Verlag Zeitschrift für Naturforschung in cooperation with the Max Planck Society for the Advancement of Science under a Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Germany License.

On 01.01.2015 it is planned to change the License Conditions (the removal of the Creative Commons License condition "no derivative works"). This is to allow reuse in the area of future scientific usage.

Boden vorübergehend Aktivität aus der Luft zu<sup>12, 16</sup> und durch Schnee- und Eisschichten erfolgt eine variierende Filterung und Schwächung der Bodenstrahlung<sup>16, 17 u. a.</sup>. Noch erheblicheren Schwankungen aber unterliegt die Ionisation, welche durch den Gehalt der *Luft* an Emanationen und ihren Folgeprodukten hervorgerufen wird. Sieht man von der extrem bodennahen Luftsicht ab (etwa 0 bis 1 m), so ist es die Radioaktivität der Luft, welche den zeitlich am stärksten schwankenden Anteil zur Ionisation der Luft liefert. Um hierüber zu genaueren Kenntnissen zu kommen, wurden während einer umfangreichen luftelektrischen Exkursion im Sommer 1955 Relativmessungen des Gehalts der Luft an natürlichen radioaktiven Bestandteilen ausgeführt und diese Ergebnisse zu gemessenen Leitfähigkeitswerten und Kernzahlen (Kondensationskerne) sowie zur Geologie der Alpen in Beziehung gesetzt. Über diese Ergebnisse sei kurz berichtet.

### 1. Meßmethoden

Als Meßverfahren zur Bestimmung der Radioaktivität der Luft kam nur ein solches in Betracht, welches im unwegsamen Gelände leicht angewandt werden konnte und mit dem die geringe Normalradioaktivität der Luft mit Sicherheit zu erfassen war. Zwar gibt es Emanometer, die der letzteren Bedingung genügen<sup>18, 19</sup>, doch kamen diese mit Rücksicht auf die Hochgebirgsverhältnisse kaum in Frage. Wir verwendeten deshalb unter Verzicht auf Absolutbestimmungen und bei Beschränkung auf eine geringere Genauigkeit das Prinzip der von ELSTER und GEITEL<sup>20</sup> angegebenen, klassischen „Anreicherungsmethode“: ein 10 m langer, 1,5 mm dicker Kupferdraht wurde in 80 cm Höhe über dem Boden (Kalkschutt) ausgespannt. Mit Hilfe von Kontaktuhr und Hochspannungsbatterie (Pertrix) wurde der Draht zur gewünschten Uhrzeit auf ein Potential von -1200 V gegen Erde gebracht. Unter Berücksichtigung der (gemessenen) mittleren luftelektrischen Feldstärke besaß der Draht ein Potential von etwa -1300 Volt gegenüber der ihn umgebenden Luft. Die vorkommenden Schwankungen des elektrischen Erdfeldes von  $\pm 50\%$  (die Radioaktivitätsbestimmungen wurden nur bei niederschlagsfreiem Wetter ausgeführt) spielen im Hinblick auf die Meßgenauigkeit keine nennenswerte Rolle. Die Expositionsduer betrug in jedem Fall genau 4 Stunden. Nach Ende derselben wurde die Oxydschicht des Drahtes als Träger der „induzierten Aktivität“ mittels

Ammoniaklösung abpräpariert. Die Messung der Aktivität des gewonnenen Präparates erfolgt mit Hilfe eines Glimmerfenster-Stirnzählrohres<sup>21</sup> und nicht mit einer Ionisationskammer. Das Verfahren gewann dadurch wesentlich an Einfachheit und Genauigkeit. Zahlreiche Vorversuche ergaben unter normalen Versuchsbedingungen eine relative Genauigkeit dieses Verfahren von etwa  $\pm 10\%$ . Angesichts der sehr großen beobachteten Schwankungen der Meßwerte während der eigentlichen Versuchsperiode darf diese Genauigkeit als hinreichend angesehen werden.

Die Aktivitätsmessungen nahmen wir jeweils im gleichen zeitlichen Abstand vom Ende der Exposition vor (1 Stunde). Die Zerfallskurven der gewonnenen Präparate, welche wir einige Male aufgenommen haben, stimmten mit den von SITTKUS<sup>12</sup> an Niederschlagsaktivitäten gefundenen gut überein. (Mit dieser Meßanordnung wird praktisch nur die Aktivität der Ra-Zerfallsreihe erfaßt, da sich die Th-Aktivität erst nach längerem Zerfall bemerkbar macht. Ihr Beitrag zur Luftionisation ist aber ohnedies zu vernachlässigen<sup>22</sup>.) Es handelt sich also in beiden Fällen ursprünglich um ein angenähertes radioaktives Gleichgewicht zwischen Rn, RaA, RaB und RaC in der Atmosphäre und eine Abtrennung der auf Rn folgenden Elemente (Auswaschen durch Niederschlag bzw. elektrostatische Abscheidung). Diese befinden sich zweifellos, an Kerne angelagert, schwebend in der Luft und bilden so ein natürliches, radioaktives Aerosol.

Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit der Luft (Summe aus beiden polaren Leitfähigkeiten) erfolgte im Prinzip nach der ebenfalls von ELSTER und GEITEL angegebenen<sup>23</sup> „Zerstreuungsmethode“: Messung der Entladungszeit eines einmal positiv, einmal negativ geladenen leitenden Körpers. Diese einfache Methode ist ganz besonders für Messungen im Gelände geeignet.

Zur Zählung der Kondensationskerne in der Luft diente ein SCHOLZScher Kernzähler<sup>24</sup> (kleine Ausführung).

Die Messungen wurden in der Zeit vom 15. August 1955 bis 21. September 1955 auf dem Zugspitzplatt in 2580 m Seehöhe ausgeführt. Über die verschiedenen luftelektrischen Messungen, welche wir in diesem Zusammenhang ausgeführt haben, und über weitere Einzelheiten wird an anderer Stelle eingehend berichtet<sup>25</sup>.

### 2. Einfluß der Windrichtung auf den Gehalt der Luft an radioaktiven Stoffen unter Berücksichtigung der geologischen Verhältnisse

Abb. 1 zeigt die Abhängigkeit der relativen Radioaktivität der Luft (Impulse/min) von der Windrichtung<sup>26</sup>, welche jeweils während der Expositionszeit

dankenswerter Weise von der Firma Leybold - Köln leihweise zur Verfügung gestellt.

<sup>22</sup> H. ISRAEL, Gerl. Beitr. Geophys. **42**, 385 [1934].

<sup>23</sup> J. ELSTER u. H. GEITEL, Ann. Phys., Lpz. **2**, 425 [1900].

<sup>24</sup> E. KLEINSCHMIDT, Meteorologische Instrumente.

<sup>25</sup> R. REITER, Geofis. Pura Appl. **33**, im Druck.

<sup>26</sup> R. REITER, Naturwiss. **42**, 622 [1955].

<sup>16</sup> V. F. HESS, W. D. PARKINGSON u. H. A. MIRANDA, Beta Ray Ionisation from the Ground, Fordham University Dep. Phys. Rep. No. 4, 1953.

<sup>17</sup> H. LOSSENZER, Bad. Landeswetterd.. Jahresber. 1951/52.

<sup>18</sup> H. ISRAEL, Radioaktivität, Leipzig 1940.

<sup>19</sup> E. POHL, Mitt. Forsch.-Inst. Badgastein Nr. 88, 1953.

<sup>20</sup> J. ELSTER u. H. GEITEL, Phys. Z. **3**, 305 [1902].

<sup>21</sup> Fabrikat „Tracerlab“ Typ 200 NB. Das Rohr wurde in

auf dem Zugspitzgipfel registriert worden war (die Windrichtung am Meßort der Radioaktivität ist aus orographischen Gründen nicht repräsentativ). Es

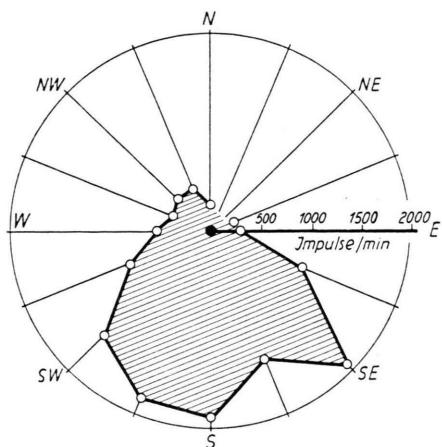


Abb. 1. Abhängigkeit der Radioaktivität der Luft an der Meßstation Zugspitzplatt in relativen Einheiten (Impulse pro min) als Funktion der Windrichtung auf der Zugspitze. Die Darstellung enthält Mittelwerte der insgesamt 70 Messungen von je 4 Stunden Expositionsdauer.

handelt sich um die Auswertung (arithmetische Mittel) aller 70 Messungen zu je 4 Stunden Expositionsdauer. Man erkennt unschwer, daß überraschend hohe Radioaktivitätswerte bei Luftströmungen aus

S bis SW und aus SE auftreten. Im Mittel ist die Aktivität bei Windrichtungen zwischen SW und SE über S um den Faktor 4,3-mal größer als bei Windrichtungen zwischen W über N nach E.

Die Beziehung zwischen Gehalt der Luft an natürlichen radioaktiven Stoffen und geologischer Struktur der Alpen in der Umgebung unseres Meßpunktes wird aus Abb. 2 deutlich. Diese Karte<sup>27</sup> enthält schematisiert und vereinfacht die wichtigsten geologischen Formationen mit angenäherten Angaben der Gehalte an Uran und Thorium<sup>28</sup>. Als die wichtigsten Quellgebiete erhöhter Radioaktivität der Luft erkennen wir: a) eine ausgedehnte Orthogneiszone (mit Einlagerungen von Sedimentgneis) im SSW unseres Beobachtungsgebietes (Strahl I in Abb. 2) und b) den massiven Orthogneisrücken der Tauern im SE und ESE (Strahl II in Abb. 2). In beiden Fällen handelt es sich um metamorphe Tiefengesteine, wobei sich besonders der Tauerngneis durch relativ hohen Urangehalt auszeichnet. Das gesamte Quellgebiet merklich erhöhter Radioaktivität wird in guter Übereinstimmung zwischen unseren Messungen und der geologischen Struktur der Alpen von dem gestrichelten, stumpfen Winkel (Pfeil) in Abb. 2 eingeschlossen.

Zur Beantwortung der Frage nach der Geschwindigkeit, mit welcher die radioaktiven Aerosole aus

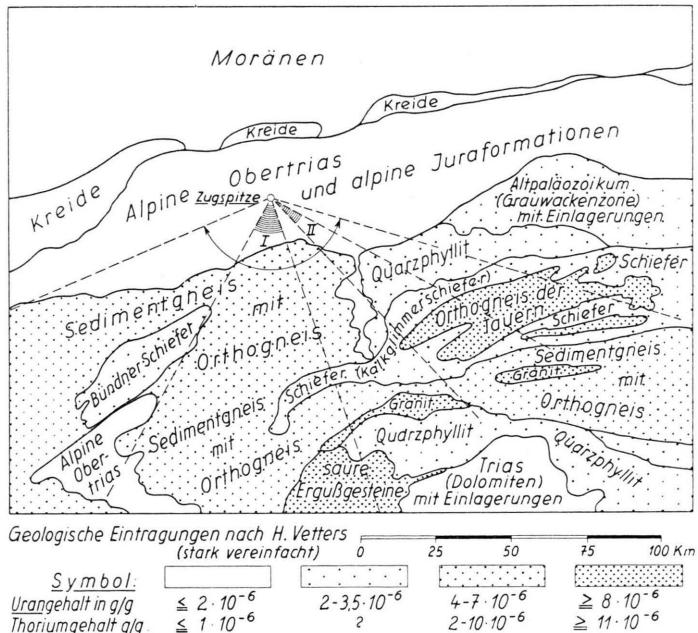


Abb. 2. Übersicht über die geologische Struktur der Alpen in der weiteren Umgebung der Zugspitze. Vereinfachte Darstellung nach einer Karte von VETTERS<sup>27</sup>. Die angegebenen Uran- und Thorium-Gehalte stellen nur angenäherte Werte dar. I und II sind die beiden Hauptrichtungen, aus welchen wiederholt Luft mit dem stärksten Gehalt an radioaktiven Stoffen festgestellt worden ist.

<sup>27</sup> nach H. VETTERS, Geologische Karte der Alpen, Geolog. Bundesanstalt, Wien 1937.

<sup>28</sup> Die Daten wurden liebenswürdigerweise von Herrn Prof. Dr. FISCHER, München, und Herrn Prof. Dr. SCHEMINZKY, Innsbruck, zur Verfügung gestellt.

den Zentralalpen an unsere Meßstation gelangen, wollen wir Abb. 3 heranziehen. Es handelt sich hier um den bei bestimmten Schönwetterlagen auftretenden Fall, daß die Windrichtung über den Nordalpen innerhalb 24 Stunden hintereinander sämtliche Himmelsrichtungen bestreicht („umlaufender Wind“). Jeweils 2 bis spätestens 4 Stunden nach Einsetzen südlicher Strömungen steigt die Aktivität der Luft erheblich und reproduzierbar an. Ein Blick auf die Karte Abb. 2 sagt uns, daß bei einer Südströmung von 10 km/h in der Tat radioaktives Aerosol deutlich erhöhte Konzentration in etwa 2–4 Stunden den Meßort erreichen muß, denn der Luftlinienabstand zwischen unserem Meßort und dem Nordrand der Gesteinszone vorwiegend eruptiver Herkunft beträgt rund 20 km.

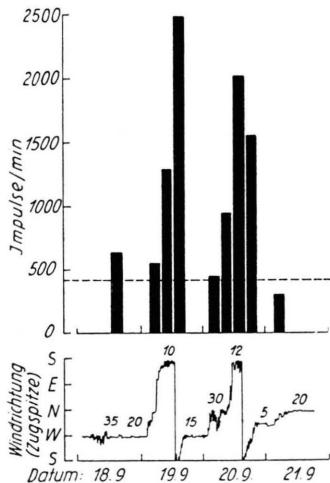


Abb. 3. Verhalten der Luftradioaktivität bei zweimaligem Umlauf der Windrichtungen um  $360^\circ$  während zweier aufeinanderfolgender Tage. Säulenhöhe: relative Aktivität in Imp/min; Säulenbreite: Expositionsduer; Abszisse: zeitlicher Ablauf; gestricheltes Niveau: Mittelwert bei Wind aus W über N bis E; untere Kurve: Windrichtung nach Registrierung auf der Zugspitze; Zahlen über der Richtungskurve: Windgeschwindigkeit in km/h.

Der geringe, rein geographisch bedingte Zeitverzug zwischen Windrichtungsänderung und steilem Anstieg der Radioaktivität der Luft, sowie die relativ schnelle Regenerierung des Rn-Vorrates der Luft (z. B. in Abb. 3 über Nacht) können nur da auftreten, wo nacktes Eruptivgestein, also blanker Fels zutage tritt. Bei bewachsenem Gestein (z. B. der Mittelgebirge) würde sich die Diffusion durch Humus und die Adsorption des Rn an den Pflanzen hindernd und verzögernd auswirken.

Abb. 4 veranschaulicht – als Gegenstück zum umlaufenden Wind – die Verhältnisse bei *anhaltendem* kräftigem Südwind. Während die Hauptmasse des radioaktiven Aerosols als „Schwall“ wenige Stunden nach dem Windsprung am Meßort eintrifft, nimmt der Gehalt der Luft an radioaktiven Stoffen anschließend wieder ab, und zwar etwa nach einer *e*-Potenz. Diese ist so zu verstehen: in der überwiegend westlichen Strömung vor dem Windsprung auf S bleiben zahlreiche, N – S-orientierte Täler der Zentralalpen nur schwach ventilirt. Dort kann sich die Luft weiter mit Radon anreichern<sup>29</sup>. Nach Winddrehung werden aber diese Täler kräftig „ausgewaschen“ und es verbleibt in dieser anhaltenden Strömung *quer* zu den Alpen für eine Regenerierung des Rn-Gehaltes keine ausreichende Zeit. Die Rn-Werte sinken also ab, und zwar nach dem Verdünnungsgesetz, was in der *e*-Potenz zum Ausdruck kommt. Abb. 4 stellt außerdem den Einzelfall mit der stärksten, gemessenen Aktivitätserhöhung (Faktor 9,5) dar.

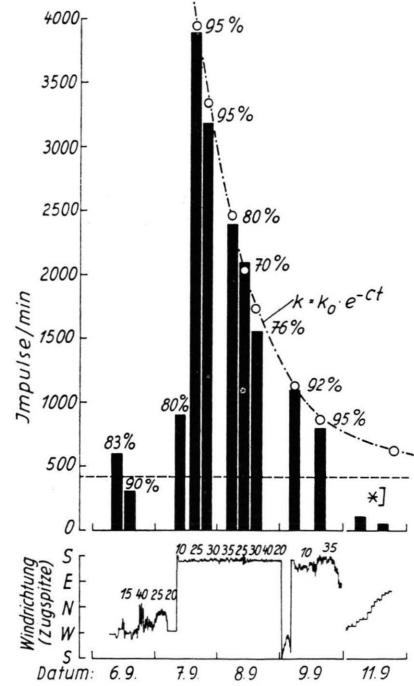


Abb. 4. Verhalten der Luftradioaktivität nach scharfem Windsprung auf SSE und anschließender Richtungskonstanz über  $2\frac{1}{2}$  Tage. Erklärungen siehe Abb. 3. Die Werte über den Säulen bedeuten die relative Feuchte in % während der Exposition (Mittelwerte). Die strichpunktierte Kurve stellt eine angeschierte *e*-Potenz dar. Sie ist Ausdruck des Auswaschvorganges (s. Text).

<sup>29</sup> Auch ist zu bedenken, daß bei westlichen Strömungen, vor allem aus WSW, die Luft über dem Zentralalpenkamm bereits einige hundert km über vorwiegend eruptivem Gestein zurückgelegt hat, wobei eine laufende Anreicherung mit radioaktiven Stoffen möglich war.

### 3. Zusammenhang mit atmosphärischer Schichtung, Niederschlägen, Drucktendenz und relativer Feuchtigkeit

Nachfolgende Tab. 1 gibt über die Bedeutung einiger weiterer Bedingungen Auskunft, die den Gehalt der Luft an radioaktiven Stoffen bestimmen.

| Atmosphärische Bedingung   | relative Luft-<br>Radioaktivität<br>in Imp/min<br>(arithmet.<br>Mittel) | Zahl der<br>Messungen<br>(je 4 Stunden<br>Exposition-<br>zeit) |
|--|---|--|
| Unter Temperaturinversionen<br>bei Schönwetter,<br>75% rel. Feuchte im Mittel<br>an den gleichen Tagen wie<br>oben, jedoch nach Einsetzen<br>der Konvektion, | 630   | 12   |
| 88% rel. Feuchte im Mittel<br>nach Niederschlägen  | 320   | 12   |
| während Druckfall  | 125   | 8  |
| während Druckanstieg   | 705   | 21   |
| bei Druckkonstanz  | 1190  | 26   |
| rel. Feuchte kleiner 40%   | 822   | 23   |
| rel. Feuchte 40–60%  | 540   | 6  |
| rel. Feuchte 60–80%  | 770   | 8  |
| rel. Feuchte 80–100%   | 1120  | 25   |
| rel. Feuchte 80–100%   | 990   | 29   |

Tab. 1.

Die Abnahme der Aktivität nach Einsetzen der Konvektion ist leicht auf die Verdünnung der radioaktiven Stoffe auf ein größeres Luftvolumen durch den Vertikalaustausch zurückzuführen. Eine Anreicherung von Rn an der Unterseite von Inversionen wurde früher schon von BECKER<sup>7</sup> festgestellt.

Nach Niederschlägen ist der größte Teil des radioaktiven Aerosols ausgewaschen, aber die Aktivität sinkt nicht auf Null. Die Nachproduktion der auf Rn folgenden Elemente geht nämlich fast unvermindert weiter, weil, was auch SITTKUS et al.<sup>12</sup> feststellen, das Rn als Edelgas durch Niederschläge weit weniger leicht entfernt wird als die folgenden, an Kerne angelagerten Zerfallsprodukte<sup>30</sup>. Daß diese Ergebnisse, sowie die im Abschnitt 2 dargestellten, nicht durch barometrische Effekte vorgetäuscht sein

können, zeigt ebenfalls die Tabelle. Ein Anstieg der Aktivität bei Druckfall wird also dann nicht beobachtet, wenn der Austritt von Rn direkt aus der freiliegenden Gesteinsoberfläche erfolgen kann. Auch durch Schwankungen der Windgeschwindigkeit können die in Abschnitt 2 beschriebenen Effekte nicht hervorgerufen werden, wie der ausgeführte Vergleich mit unseren Windregistrierungen zeigt (siehe<sup>25</sup>).

Frühere Messungen, z. B. die von MACEK und ILLING<sup>31</sup>, haben ergeben, daß hohe Rn-Gehalte der Luft nur bei geringer relativer Feuchte auftreten. Diese Feststellung gilt zweifellos für geringe Höhenlagen, nicht aber für größere Seehöhen im Gebirge. Würde man aus unseren Messungen allein jene auswählen, die bei normalem Strahlungswetter gewonnen wurden (rein lokale Hang-Konvektion), so käme man zwar auch auf eine Gegenläufigkeit von relativer Feuchte und Radioaktivität (siehe die ersten beiden Zeilen von Tab. 1), doch handelt es sich hier um eine Scheinkorrelation zweier tagesgangbedingter Elemente. Die Aufschlüsselung des gesamten Materials nach Feuchtigkeitsstufen (Tab. 1) zeigt, daß die höchsten Radioaktivitätswerte<sup>32</sup> gerade bei relativer Feuchte von über 60% auftreten. Diese Feststellung ist für spätere Folgerungen in bezug auf Niederschlagsbildung (Abschnitt 5) von Bedeutung. Sie steht in Einklang mit der Beobachtung von HAUER<sup>33</sup>, daß bei Südföhn an der Zugspitze eine relative Feuchte von 60–80% zu verzeichnen ist.

### 4. Beziehungen zwischen elektrischer Leitfähigkeit, Kerngehalt und Radioaktivität der Luft

Im Rahmen synoptisch-luftelektrischer Dauerregistrierungen<sup>34</sup> wurden im Wettersteingebirge in verschiedenen Höhenlagen an den Stationen unseres Beobachtungsnetzes<sup>35, 36</sup> zahlreiche Leitfähigkeitsmessungen vorgenommen. Mittelwerte aus rund 1000 Bestimmungen der totalen Leitfähigkeit enthält Abb. 5. Die dick gezeichnete Kurve gibt den Höhenverlauf der totalen Leitfähigkeit unter normalen Schönwetterverhältnissen wieder<sup>37</sup>. Betrachtet

<sup>30</sup> ISRAEL<sup>22</sup> ist allerdings der Meinung, daß auch Rn selbst fast quantitativ an Kerne und Ionen der Luft adsorbiert ist. Inwieweit im Hochgebirge eine Verstopfung der Bodenkapillaren durch den Niederschlag eine Rolle spielen kann, ist noch zu klären.

<sup>31</sup> O. MACEK u. W. ILLING, Gerl. Beitr. Geophys. **43**, 388 [1935].

<sup>32</sup> Siehe auch die in Abb. 4 neben jede Säule eingetragene relative Feuchte in %.

<sup>33</sup> H. HAUER, Ber. Dtsch. Wetterd. US-Zone, Nr. 16 [1950].

<sup>34</sup> R. REITER, Ber. Dtsch. Wetterd. US-Zone, Nr. 42 [1952].

<sup>35</sup> R. REITER, Geofis. Pura Appl. **28**, 223 [1954].

<sup>36</sup> R. REITER, Met. Rdsch. **8**, 127, 148 [1955].

<sup>37</sup> Eine Berechnung des elektrischen Erdfeldes als Funktion der Höhe unter Berücksichtigung von Rn-Gehalt der Luft und Austauschkoeffizient wurde von LETTAU<sup>11</sup> ausgeführt.

man andererseits ausschließlich solche Messungen, die zur Zeit ausgeprägter Konvektion bis über das jeweilige Stationsniveau hinaus gewonnen wurden, so ergibt sich die gestrichelte Kurve: die Anlagerung der Kleinionen an in der Luftströmung hochgetragene Kerne und der damit verbundene Verlust ihrer anfangs hohen Beweglichkeit führt bekanntlich zu einer starken *Abnahme* der elektrischen Leitfähigkeit der Luft.

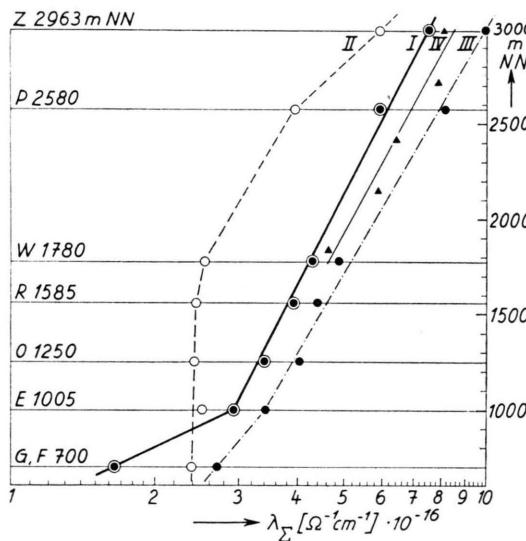


Abb. 5. Höhenabhängigkeit der totalen Leitfähigkeit der Luft  $\lambda_{\Sigma}$  (m NN) nach rund 1000 Bestimmungen im Wettersteingebirge. Stationen: Z = Zugspitze; P = Zugspitzplatt; W = Wankgipfel; R = Riffelriss; O = Obermoos; E = Eibsee; G, F = Garmisch und Farchant.

Kurve I (fett gezeichnet): normale Schönwetterwerte;  
 Kurve II (gestrichelt): bei starker Konvektion;  
 Kurve III (strichpunktiert): bei Strömung aus SE-SW;  
 Kurve IV (mager gezeichnet): in der freien Atmosphäre über der Austauschschicht mit dem Flugzeug gemessen.

Im Gegensatz dazu finden wir an *allen* Stationen, auch auf der Zugspitze, eine erhebliche Leitfähigkeitserhöhung, wenn über den Nordalpen SE- bis SW-Strömung herrscht und diese die jeweilige Meßstation erreicht. Auf Grund der oben beschriebenen Ergebnisse darf man wohl annehmen, daß diese Verschiebung – wenigstens zum großen Teil – eine Folge der erhöhten Radioaktivität der Luft ist. In die gleiche Richtung weist die Feststellung, daß diese unsere Werte (Kurve III) auch noch *über* jenen liegen, die in gleichen Höhen über Boden im Flugzeug (Kurve IV), also praktisch in freier Atmosphäre gewonnenen worden sind<sup>38</sup>.

<sup>38</sup> R. CALLAHAN SAGALYN u. G. A. FAUCHER, J. Atmos. Terr. Phys. 5, 253 [1954].

Da das Schicksal der durch die verschiedenen ionisierenden Strahlungen gebildeten Ionen hinsichtlich Wiedervereinigung, Anlagerung an ungeladene Kerne oder Molekülkomplexe und die damit verbundene Veränderung der Ionenbeweglichkeit ohne weitere eingehende experimentelle Daten nicht zu übersehen sind, so besteht zunächst keine Möglichkeit, eine *quantitative* Beziehung zwischen Radioaktivität, Kerngehalt und Leitfähigkeit der Luft abzuleiten, die den wirklichen Verhältnissen hinreichend nahe kommt. Erschwerend kommt hinzu, daß durch fortgesetzte Turbulenz- und Mischungsvorgänge die Einstellung von Gleichgewichten verhindert wird. Unter Annahme *vereinfachter* Bedingungen wurden von GUNN<sup>15</sup> Berechnungen über die Beladung von Aerosol durch Ionen auf dem Wege der Diffusion durchgeführt.

Zur *Abschätzung* des Einflusses der schwankenden Luftradioaktivität auf die Beziehung zwischen elektrischer Leitfähigkeit der Luft und Zahl der Kondensationskerne (als Indikator für den Suspensionsgehalt der Luft) wollen wir schließlich Abb. 6 betrachten. Sie enthält alle im Niveau der Station

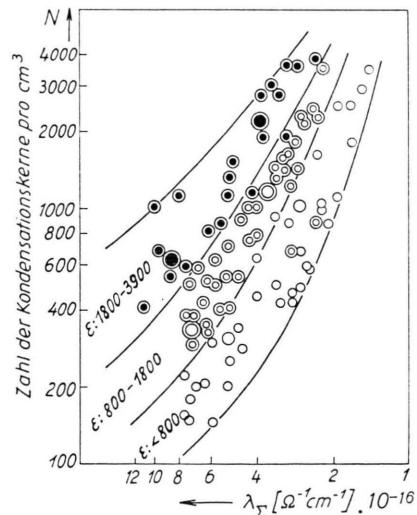


Abb. 6. Totale elektrische Leitfähigkeit der Luft  $\lambda_{\Sigma}$  als Funktion der Zahl der Kondensationskerne ( $N$ ) in der Luft nach Messungen am Zugspitzplatt (1025 Kernzählungen, 950 Leitfähigkeitsmessungen).

Parameter ist die relative Radioaktivität der Luft ( $\varepsilon$ ) in drei Stufen:

Normalwerte:  $\varepsilon < 800$  Imp./min (○);  
 mäßig erhöhte Radioaktiv.:  $\varepsilon = 800-1800$  Imp./min  
 (2 konzentrische Kreise);

stark erhöhte Radioaktiv.:  $\varepsilon = 1800-3900$  Imp./min (◎);

Jeder eingezeichnete Punkt stellt eine Gruppe von 10–20 Wertepaaren dar, die jeweils in kurzen Zeitabständen gewonnen wurden.

Zugspitzplatt gewonnenen Meßdaten, die wir zu Gruppen zusammengefaßt und dann als Punkte in das doppelt logarithmische  $\lambda, N$ -Feld eingetragen haben. Parameter ist die relative Luftradioaktivität ( $\varepsilon$ ) in drei Stufen. Die Abb. 6 führt recht eindringlich vor Augen, welche erheblichen Leitfähigkeitsvariationen – bei jeweils konstant gedachter Kernzahl – allein von Schwankungen der Luftradioaktivität ausgelöst werden können. Ihr Einfluß ist selbst noch bei hohen Kernzahlen recht erheblich. Diese Feststellung erscheint wichtig, da man heute auf Grund luftelektrischer Untersuchungen Studien über den Vertikalaustausch in der Atmosphäre anstellt. Bei derartigen Untersuchungen<sup>25, 39, 40, 41</sup>, insbesondere wenn sie in Zonen von Eruptivgestein ausgeführt werden, sollte wohl die umgebungsbedingte Radioaktivität der Luft berücksichtigt werden, wenn man den Anschluß an die Verhältnisse in der „freien Atmosphäre“, also weit abseits vom Gebirge und bei wesentlich geringerer Luftradioaktivität sucht.

Es sei noch darauf hingewiesen, daß regelmäßig *dicht über* Inversionsschichten erhebliche Anstiege der elektrischen Leitfähigkeit festgestellt wurden, worauf an anderer Stelle<sup>25</sup> näher eingegangen wird.

## 5. Folgerungen

Die Ergebnisse zeigen in erster Linie, daß bereits die natürlichen radioaktiven Beimengungen der Luft Studien über die Abhängigkeit radioaktiver Aerosole von meteorologischen Zuständen, wie vor allem Strömung, atmosphärischer Schichtung und Vertikalaustausch erlauben. Diese Erfahrungen dürften – in gewissen Grenzen freilich – auch auf künstliche, z. B. durch Kernreaktionen erzeugte radioaktive Aerosole anwendbar sein.

Die am Zugspitzplatt gefundenen zeitlichen Schwankungen der natürlichen Radioaktivität der Luft sind recht erheblich, was wohl für alle vergleichbaren Punkte der Nordalpen gleichermaßen gilt. Wenn wir auch erst noch eingehendere Messungen in anderen Niveaus als in 2600 m Höhe durchführen wollen und diese Ergebnisse abgewartet werden müssen, so scheint die gefundene Schwankungsbreite doch auch von allgemeinerem klimato-

logischem Interesse (z. B. Kurortklimatologie) zu sein. Denn bei durchgreifendem Südwind (Föhn) wird auch den Talorten der Nordalpen Luft weit höherer Aktivität zugeführt, als den geologischen Bedingungen in deren nahen Umgebung entspricht (ähnliches gilt auch für die Südalpen bei „Nordföhn“), was nachfolgende Tab. 2 zeigt. Es handelt sich um Messungen der relativen Luftradioaktivität im Garmischer Talkessel während anhaltendem S – SE-Wind auf der Zugspitze und vorübergehendem Föhneinbruch in das Talbecken.

| Datum     | Uhrzeit der Exposition | Rel.-Wert der Luftradioaktiv. Imp./min | Windverhältnisse im Tal (Farchant) | Windverhältnisse auf der Zugspitze |
|-----------|------------------------|--|------------------------------------|------------------------------------|
| 20. 3. 56 | 17.00 – 21.00          | 710                                    | Nord                               |                                    |
| 21. 3. 56 | 06.00 – 10.00          | 410                                    | vorw. Nord                         |                                    |
|           | 11.00 – 15.00          | 820                                    | leichter Süd                       |                                    |
|           | 15.00 – 19.00          | 3370                                   |                                    |                                    |
| 22. 3. 56 | 04.00 – 08.00          | 2870                                   | heftiger Süd                       |                                    |
|           | 08.00 – 12.00          | 660                                    | = Talföhn                          |                                    |
|           | 12.00 – 16.00          | 620                                    | Sprung auf N                       |                                    |
|           | 16.00 – 20.00          | 510                                    | Nord                               |                                    |
| 23. 3. 56 | 04.00 – 08.00          | 530                                    | Nord                               |                                    |
|           | 08.00 – 12.00          | 640                                    | Nord                               |                                    |

Tab. 2.

In diesem Zusammenhang mag es angebracht sein, die möglichen absoluten Radon-Konzentrationen abzuschätzen, die dabei in Betracht zu ziehen sind.

Systematische Rn-Messungen im Alpenbereich liegen nur sehr spärlich vor (siehe z. B. <sup>31</sup>). Besonderes Vertrauen dürften die sehr sorgfältigen neueren Untersuchungen von POHL und POHL-RÜLING<sup>42</sup> in Badgastein genießen. Aus zahlreichen Messungen erhielten die Autoren einen Wert von  $2,1 \cdot 10^{-12}$  Curie/l für Freiluft. Diese Messungen wurden außerhalb von Badgastein (Böckstein) ausgeführt und sollten deshalb, wie die Verfasser betonen, einigermaßen unabhängig von lokalen Emanationsquellen des Badeortes sein. Der Normalwert der Rn-Konzentration über dem *Festland* liegt nach den genannten Autoren<sup>42</sup> bei  $0,13 \cdot 10^{-12}$  Curie/l. Dieser Wert dürfte der von uns bei Wind aus W über N nach E gefundenen relativen Aktivität von rund 400 Impulsen/min (radioaktives Gleichgewicht zwischen Rn und Folgeprodukten vorausgesetzt) in grober Näherung zuzuordnen sein. Im Extremfall erhielten wir

<sup>39</sup> H. ISRAEL, H. W. KASEMIR u. K. WIENERT, Arch. Met., Geophys. Bioklimatolog. A. 3, 71 [1951].

<sup>40</sup> H. ISRAEL, H. W. KASEMIR u. K. WIENERT, Arch. Met., Geophys. Bioklimatolog. A. 8, 72 [1955].

<sup>41</sup> R. REITER, Geofis. Pura Appl. 30, 155 [1955].

<sup>42</sup> E. POHL u. J. POHL-RÜLING, Radioaktive Luftmessungen im Raum von Badgastein und Böckstein, Springer, Wien 1954.

— wie erwähnt — aus SE eine um den Faktor 9,5 erhöhte Aktivität, was dann einer Rn-Konzentration von etwa  $1,2 \cdot 10^{-12}$  Curie/l entsprechen würde. Ein Vergleich mit den bei Badgastein gefundenen Normalwerten in Freiluft zeigt, daß in der Tat gute Übereinstimmung besteht, — insbesondere wenn man eine gewisse Verdünnung der Emanation auf dem Antransport berücksichtigt und außerdem annimmt, daß in den Tauern nicht überall dieselbe hohe Rn-Konzentration auftritt wie bei Badgastein. Auch schließen sich unsere abgeschätzten Absolutkonzentrationen von Rn gut an die älteren Messungen von MACEK und ILLING<sup>31</sup> in Innsbruck an.

Luft mit stark erhöhter Aktivität wird also auch von den Bewohnern der Nordalpen, wenigstens zeitweise, eingeatmet. Da, wie man zeigen konnte<sup>43</sup>, rund 30% des aus Rn entstandenen radioaktiven Aerosols in der Lunge abgelagert werden (bei einem Teilchendurchmesser von  $0,1 \mu$ , eine in den unteren Luftsichten häufig vorkommende Größe), scheint dieser Umstand bemerkenswert<sup>44</sup>. Schließlich wollen wir noch auf den Abstand der anzunehmenden maximalen Radonkonzentrationen von der Toleranzdosis für Dauereinatmung von Rn + Folgeprodukte hinweisen. Diese wird nach neuesten Untersuchungen<sup>45</sup> mit  $10 \cdot 10^{-12}$  Curie/l angegeben. Sie ist demnach zwar 5 – 10-mal größer als die in Frage kommenden, im Bereich von Eruptivgestein gefundenen Konzentrationen, der relativ geringe Abstand ist aber doch bemerkenswert. Die bis jetzt über dem Kontinent gemessenen Werte<sup>5</sup> der durch Verseuchung bedingten Radioaktivität der Luft liegen somit um 1 – 2 Zehnerpotenzen niedriger als die im Alpenbereich vorkommenden Radioaktivitäts-Spitzen. Die mögliche selektive Anreicherung gewisser radioaktiver Isotope aus Atomexplosionen im Körper ist allerdings gesondert zu behandeln.

Zuletzt sei noch ein Hinweis auf die Zahl der in der Luft gebildeten Ionenpaare pro  $\text{cm}^3$  und pro Sekunde (J) gegeben. Dieser Wert ist als Ausgangsbasis für die Berechnung des Ionenhaushaltes der Atmosphäre von grundsätzlicher Bedeutung.

Unter Normalbedingungen, d. h. unter Ausschluß von südlichen Luftströmungen, darf für die Verhäl-

tnisse im Niveau unseres Meßpunktes am Zugspitzplatt folgendes angenommen werden:

- |   |          |
|---|----------|
| a) Ionisation durch $\beta$ - und $\gamma$ -Strahlung über Kalkgestein, 1 – 2 m über dem Boden <sup>16</sup> . . . . .                          | rund 3 J |
| b) Ionisation durch Ultrastrahlung <sup>8</sup> . . . . .   | rund 4 J |
| c) Ionisation durch Strahlung der in der Luft vorkommenden radioaktiven Stoffe bei Normalkonzentration über dem Festland <sup>8</sup> . . . . . | rund 4 J |
| Summe rund 11 J   |          |

Bei einer mittleren Erhöhung des Wertes c) in SE – SW-Strömung um den Faktor 4,3 erhält man — unter Außerachtlassung von gesonderten Gleichgewichtsbetrachtungen — den Teilbetrag von rund 17 J und eine Summe von 24 J, bei einer maximalen Erhöhung um Faktor 9,5 erhält man den Teilbetrag von rund 38 J und eine Summe von 45 J.

Es sei nochmals darauf hingewiesen, daß diese hohen Ionisationswerte auf Grund unserer Messungen durchaus *im Niveau der Kondensation* — also nicht nur etwa in geringen Höhen — und bei *hoher Wasserdampfsättigung* sowie bei *großen Kernzahlen* (Kondensationskerne) auftreten. Diese Tatsache scheint für die Anwendung einer in neuester Zeit von GUNN<sup>46</sup> gegebenen Erklärung des Tröpfchenwachstums von Interesse. GUNN geht davon aus, daß durch Ionenanlagerung<sup>15</sup> zunächst sehr viele ungleichnamig geladene Tröpfchen gebildet werden. Ein Anwachsen der Tröpfchen ist dann nach Ansicht des Autors ohne Zwischenschaltung einer festen Phase (Eiskeimtheorie von FINDEISEN) auf Grund gaskinetischer und elektrostatischer Vorgänge möglich. Als Ionenquelle nimmt GUNN die in größerer Höhe praktisch allein wirksame Ultrastrahlung an. Im Einflußbereich von ausgedehnten Gebirgen mit zutage tretendem Eruptivgestein kommt aber nach unseren Feststellungen zusätzlich die u. U. sehr starke Ionisation durch  $\alpha$ -Strahlung der natürlichen radioaktiven Elemente in der Luft in Betracht, die durch Turbulenz über das Kondensationsniveau hinausgehoben werden. Eine Beeinflussung der Niederschlagsbildung über derartigen Gebirgen scheint demnach im Bereich der Möglichkeit zu liegen.

die typische „Badereaktion“ beobachtet, wie sie an Heilungsuchenden auftritt, wenn sie sich Radonkuren unterziehen.

<sup>43</sup> K. AURAND, W. JACOBI u. A. SCHRAUB, Naturwiss. **42**, 398 [1955].

<sup>44</sup> Dies unterstreicht auch die folgende Beobachtung: nach freundlicher brieflicher Mitteilung von Herrn Prof. Dr. F. SCHEMINCKY (Direktor des Forschungsinstitutes Badgastein) wird in Badgastein auch an Besuchern des Ortes, die keine Kurmittel benutzen, nach 1 – 2 Wochen Aufenthalt häufig

<sup>45</sup> B. RAJEWSKY u. Mitarbb., Strahlendosis und Strahlenwirkung, Stuttgart 1954.

<sup>46</sup> R. GUNN, Science News Letter, Wash. D. C. **67**, 302 [1955] (Report).