

Ueber die Entstehung radioaktiver Quellen.

Von **Heinrich Mache.**

(Aus dem Physikalischen Institut der Technischen Hochschule Wien.)

Mit 1 Textfigur.

Seit langem weiß man, daß Radium und seine Zerfallsprodukte, vor allem die aus ihm unmittelbar entstehende gasförmige Emanation, in größeren Mengen nur in Uranmineralen enthalten sind, daß es aber andererseits hoch radioaktive Quellen gibt, in deren Umgebung keine Uranminerale gefunden werden. Das hat man zuerst an der Therme von Badgastein bemerkt. Wie kommt es dann doch zu der ganz überraschend hohen Konzentration von Radiumemanation im Gasteiner Thermalwasser?

Natürlich werden wir uns bei der Beantwortung dieser Frage nicht auf Gastein beschränken; wir werden vielmehr hiebei auf die Ergebnisse einer vieljährigen Versuchstätigkeit zurückgreifen können, die sich auf fast alle bedeutenden Heilquellen der einstigen österreichisch-ungarischen Monarchie erstreckt hat und an der auch der frühere Leiter des Wiener Radiuminstitutes, Prof. Stefan Meyer, besonders beteiligt war.

Bei Quellen, wie denen von St. Joachimstal, die in einem Uranbergwerk entspringen, oder bei den ebenfalls kalten Quellen von Oberschlema und von Brambach, die in der Gegend des böhmisch-sächsischen Uranvorkommens zutage treten, wird ein Reichtum an Radiumemanation nicht überraschen. Diese kalten Quellen nehmen ihren Lauf durch Uranerz führendes Gestein. Aber die Gasteiner Therme entspringt im ausgedehnten Massiv eines hellen, quarzreichen Granits, der keine Uranminerale enthält. Zwar ist bekanntlich Radium (und ähnlich Thorium) in allerdings unvorstellbar geringen Quantitäten im Boden und Gestein überall vorhanden; auch gehört gerade Granit zu den gebirgsbildenden Gesteinen, die, relativ genommen, an Radium reicher sind als die anderen, z. B. als Kalke oder Basalte. Doch beträgt dieser Gehalt auch im Granit nur einige Billionstel der ganzen Masse; er ist im Uranpecherz rund 100.000mal so groß! Auch gibt es Granite, die den von Gastein an Radiumgehalt erreichen, ohne daß die

ihnen entspringenden warmen Quellen den hohen Emanationsgehalt der Gasteiner Therme aufweisen würden. So drängt sich die Frage auf, warum gerade die Gasteiner Therme in dieser Hinsicht so bevorzugt erscheint — und damit überhaupt die Frage nach der Entstehung radioaktiver Quellen.

Es gibt drei Wege, auf denen sich stark radioaktive Quellen aus schwach radiumhaltigem Gestein zu entwickeln vermögen. Wir können diese drei Wege am kürzesten durch die Bemerkung kennzeichnen, daß im ersten Fall die Emanation schon beim Einsickern des Wassers in den Boden Zutritt, im zweiten Fall beim Stehen oder Fließen in den Felsspalten, im dritten Fall erst knapp vor dem Austritt der Quelle.

Zur ersten Gruppe gehören z. B. die Quellen — mehr als 300 an der Zahl — die im Tauerntunnel aus demselben Granitmassiv ausbrechen, wie die 200 m tiefer gelegene Gasteiner Therme. Es besteht kein Zweifel, daß diese Tunnelquellen durch die Gebirgsspalten von oben her eindringende Tagwässer sind, die großenteils erst zu fließen begannen, als der in das Gebirge geschlagene Tunnel das nötige Druckgefälle herstellte. Da zeigte sich nun nach den Messungen von Prof. M. Bamberger und mir der Emanationsgehalt im Mittel um so höher, je ergiebiger, je kühler und je ärmer an festen Bestandteilen die betreffende Quelle war. Es sei dies nur am Zusammenhang zwischen Ergiebigkeit und Emanationsgehalt nachgewiesen.

Ordnet man nämlich die Quellen nach ihrer Ergiebigkeit in Klassen, so zeigt die folgende Zusammenstellung, wie sehr die mittlere Konzentration der Emanation im Quellwasser mit der Ergiebigkeit der Quellen abnimmt. Die in den Klammern beigetzten Zahlen bedeuten hierbei die Anzahl der untersuchten Quellen der betreffenden Klasse.

Ergiebigkeit in Sekundenlitern	> 1,00 (8)	0,10—1,00 (28)	0,01—0,10 (46)
Emanationsgehalt in Tausendstel stat. Einh. je Liter	17,9	10,7	6,2

Diese scharf ausgeprägten Gesetzmäßigkeiten beweisen wohl überzeugend, daß die Tunnelquellen ihren Emanationsgehalt der Hauptsache nach nicht in den Bergspalten aufnehmen, durch die sie in den Tunnel herabkommen, daß vielmehr die Emanation dem Wasser schon auf der Gebirgsoberfläche aus dem Geröll, dem verwitterten Gestein und der zwischen ihm enthaltenen emanationsreichen Luft zugeführt wird. Je rascher es von dort in den Tunnel kommt, je wasserreicher

also die Quellader ist und je größer die Temperaturdifferenz gegen das Gestein bleibt, aus dem es im Tunnel austritt, desto weniger ist von der Emanation durch ihren spontanen Zerfall und durch den Kontakt mit in den Klüften enthaltener, weniger aktiver Luft verloren gegangen.

Wie sehr die Verwitterung die Abgabe von Emanation aus dem im Gestein enthaltenen Radium zu fördern vermag, zeigten eigene Versuche, welche nachwiesen, daß auch nur ganz leicht verwitterter Tauerngranit an Luft oder Wasser je Flächeneinheit 400- bis 500mal soviel Emanation abgibt, als das gesunde, frisch gebrochene Gestein. So sind die Berghalden und Kare Stellen, von denen einerseits unter dem Einfluß der Sonnenstrahlung beträchtliche Mengen Emanation im aufsteigenden Luftstrom in die Atmosphäre gelangen, andererseits aber auch mit dem Schmelz- und Regenwasser zur Tiefe sinken können. Tritt dieses mit Emanation beladene Wasser nach kurzem Lauf zutage, so kann eine radioaktive Quelle entstehen, die im allgemeinen große Ergiebigkeit und niedrige Temperatur aufweisen wird. Wir nennen sie eine Quelle erster Art. Bei einer solchen Quelle sind große Schwankungen der Ergiebigkeit und des Emanationsgehaltes mit den meteorologischen Faktoren zu erwarten, wobei eine Zunahme der Ergiebigkeit eher eine Zu- als Abnahme in der Emanationskonzentration voraussehen läßt.

Ganz anders ist aber der Vorgang der Emanationszufuhr aus den mit Wasser gefüllten Bergspalten. Es kann da nur auf langen Wegen und in längeren Zeiten zu einer größeren Anreicherung des Wassers mit Emanation kommen. Hierbei spielen das Okklusionsvermögen des Gesteins und das Absorptionsvermögen des Wassers für Radiumemanation die maßgebende Rolle; und zwar haben die Gesteine wie für alle Edelgase so auch für Emanation ein ungemein geringes Speicherungs- oder Okklusionsvermögen, während Flüssigkeiten, und im besonderen auch das Wasser, sehr viel größere Mengen dieser Gase aufzunehmen, oder, wie man da sagt, zu absorbieren vermögen. Infolgedessen steht die geringste im Gestein entwickelte Emanationsmenge unter einem ungleich höheren Druck, als jede im Wasser gelöste noch so große Menge. Und daraus kann man folgern und konnte man auch experimentell beweisen, daß die aus der Einheit der Gesteinsfläche in der Zeiteinheit in das Wasser eintretende Emanationsmenge überhaupt gar nicht davon abhängt, wieviel Emanation im Wasser schon gelöst ist. Auch ein emanationsreiches Wasser kann noch immer unter günstigen Verhältnissen aus dem radiumärmsten Ge-

stein weiter Emanation aufnehmen; oder, anders gesagt, auch aus dem radiumärmsten Gestein kann eine emanationsreiche Quelle entspringen, falls nur entsprechend große Berührungsflächen zwischen Gestein und Wasser vorhanden sind.

Das folgende, wenn auch in einem wesentlichen Punkte etwas hinkende Gleichnis illustriert noch weiter die in diesen Quellen der zweiten Art vorhandenen Verhältnisse:

Auch in einem Kohlenflöz findet innerhalb der Kohle eine ständige Gasentwicklung statt, ähnlich der Entwicklung von Emanation innerhalb eines radiumhaltigen Gesteins. Dieses Gas, das hauptsächlich aus Methan besteht, sammelt sich in der Kohle an, wobei nun freilich ein wesentlicher Unterschied vorhanden ist: die Emanation entsteht nicht nur im Gestein, sondern sie verschwindet auch wieder in einem ganz bestimmten Tempo, so daß sich innerhalb des Gesteins verhältnismäßig rasch eine gewisse Emanationsmenge einstellt, die nicht weiter wächst: das in der Kohle entwickelte, unbegrenzt haltbare Methan kann sich hingegen über Jahrtausende addieren. Andererseits entwickelt sich aber die Radiumemanation aus mikroskopischen Kernen, die als „Verunreinigungen“ in kleinen Kristallen verschiedener Minerale, z. B. von Zirkon oder Rutil, im Gestein enthalten sind. Das dichte Gefüge dieser Kriställchen bringt es mit sich, daß die absolut genommen minimalen Mengen an Emanation, die sich in ihnen sammeln, durch das Kristallgitter nicht weniger heftig nach außen drängen, als die großen Mengen von Methan aus der porösen Kohle. Man schätzt den Druck, unter dem sich das Methan in den Poren der Kohle eingeschlossen findet, nach Hunderten von Atmosphären! Wird das Kohlenflöz angefahren, so entweicht das Methan in die durch Ventilatoren bewegte Grubenluft. Die Konzentration an Methan, zu der hiebei die Grubenluft ansteigt, wird um so größer sein, je langsamer die Luft an der Kohle vorbeistreicht und je größer die freie Fläche des Flözes ist. Aber die vom Quadratmeter des Flözes etwa stündlich abgegebene Methanmenge wird immer die gleiche sein, wie die Luft auch strömt und wieviel Prozent Methan in ihr auch schon enthalten sind. Ebenso ist auch die vom Gestein an das fließende Wasser abgegebene Emanationsmenge immer dieselbe, gleichgültig, ob das Wasser rasch oder langsam strömt und wieviel Emanation es schon enthält.

Natürlich läßt sich dieser Gedanke auch in eine Formel kleiden:

Denken wir uns der Einfachheit halber den Quellgang als ein kalibrisches Rohr von beliebig geformtem Querschnitt und bedeutet a die Emanationsmenge, welche in der Zeiteinheit aus der Flächen-

einheit des Gesteins in das Wasser eintritt, so findet man die Emanationskonzentration an der Mündung

$$= \frac{O}{V} \frac{\alpha}{\lambda} \left[1 - e^{-\lambda \frac{V}{\Phi}} \right].$$

Hierin bezeichnet O die gesamte Oberfläche, V das gesamte Volumen des Quellganges, Φ die Fördermenge der Quelle und λ die Wandlungskonstante der Emanation. Hiernach ist also außer der Größe α , die mit dem Radiumgehalt des Gesteines zusammenhängt, und der Zeit $\tau = \frac{V}{\Phi}$ die das Wasser zum Durchlaufen des Quell-

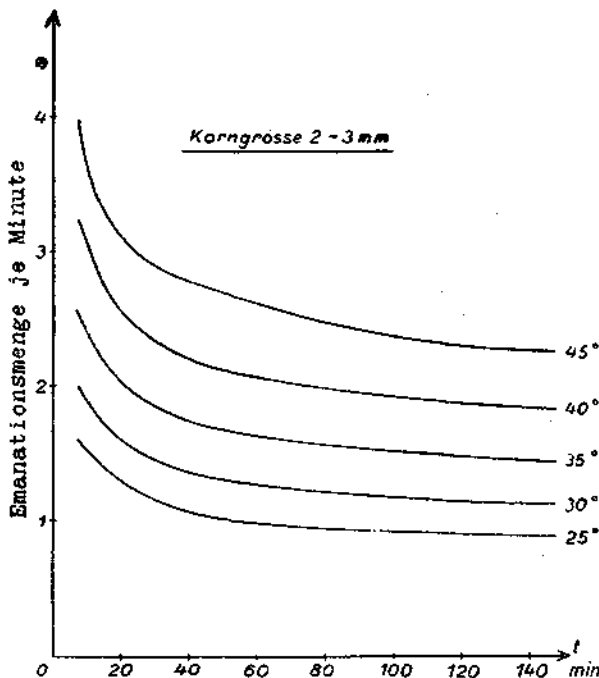
ganges braucht, auch noch der Quotient $\frac{O}{V}$ für die Emanationsführung einer Quelle von maßgebender Bedeutung. Es ist also, wie schon oben bemerkt wurde, leicht möglich, daß, wofern die Bedingungen in dieser Richtung günstig sind, aus radiumarmen Boden eine Quelle strömt, welche Quellen aus radiumreichen Boden an Emanationsgehalt übertrifft. Da Thermen gewöhnlich auf tektonischen Dislokationen aufsteigen, also durch mechanisch bis in die Tiefen zerspaltene Gesteine strömen, liegen für sie die Verhältnisse besonders günstig.

Hier muß auch noch kurz die Rolle besprochen werden, welche bei diesen Vorgängen der Temperatur zukommt. Wie ein jedes Gas wird auch die Emanation von warmem Wasser an sich schwerer aufgenommen als von kaltem; aber für die Aufnahme von Emanation in den Bergspalten spielt auch die Temperatur des Wassers eine untergeordnete Rolle. Kann die Emanation durch Diffusion aus den Kriställchen die Kontaktfläche zwischen Gestein und Wasser erreichen, so tritt sie unter allen Umständen in das Wasser ein, gleichviel, ob es kalt oder warm ist; denn auch bei Siedetemperatur ist das Absorptionsvermögen des Wassers noch immer vielmal größer als das Okklusionsvermögen des Gesteins. Dagegen kann die Steigerung der Temperatur des Gesteins sehr wohl einen, und zwar fördernden Einfluß auf die Emanationsführung einer Quelle ausüben, da die thermische Ausdehnung des Gesteins und aller seiner Poren den Austritt der Emanation aus dem Gestein erleichtert, die an das Wasser abgegebene Emanationsmenge erhöht. Auch das konnte in Laboratoriumsversuchen nachgewiesen werden:

Wir bedienen uns hiezu einer künstlichen radioaktiven „Quelle“, die aus einem mit Uranpecherz-Körnern von 2 bis 3 mm Größe ge-

fülltem Glasrohr von 1 m Länge bestand. Durch dieses Rohr ließ man Wasser aus einem Heißwasserapparat strömen. Das Ende des Rohrs tauchte in eine Schale mit Ueberlauf, aus der mit einer Pipette die Wasserproben entnommen wurden, deren Emanationsgehalt zu bestimmen war.

Es zeigte sich zunächst — wie wir das nach unseren Ausführungen erwarten müssen — die in bestimmter Zeit an das Wasser abgegebene gesamte Emanationsmenge von der Strömungsgeschwindigkeit, also der „Ergiebigkeit“ unserer künstlichen Quelle ganz unabhängig. Bringt man weiters die Quelle, nachdem sie längere Zeit trocken gestanden hatte, mit Wasser von verschiedener Temperatur wieder zum Fließen, so ist die abgegebene Emanationsmenge zu Anfang am größten. Sie sinkt aber dann, wie das nebenstehende Bild erkennen läßt, während der ersten 30 bis 40 Minuten rasch ab, und zwar um so stärker, je höher die Temperatur ist. Später erfolgt dieses Absinken immer langsamer, bis nach etwa drei Stunden ein stationärer Endwert erreicht wird. Aber auch dieser Endwert ist noch immer ganz wesentlich von der Temperatur abhängig.



Zur Kennzeichnung dieser zweiten Art radioaktiver Quellen — zu denen wohl die meisten Tiefquellen gehören — wäre anzuführen, daß

sie dieselbe oder höhere Temperatur aufweisen müssen, als das Gestein besitzt, aus dem sie austreten. Auch wird eine weitgehende Unabhängigkeit von den meteorologischen Einflüssen zu erwarten sein.

Was schließlich die Gasteiner Therme anlangt, so gehört sie gewiß nicht zur ersten Art radioaktiver Quellen; aber auch nicht zur zweiten Art, obwohl sie deren eben erst erwähnten Merkmale besitzt. Es kann vielmehr als erwiesen gelten, daß sie ihren überraschend großen Gehalt an Emanation, wenn auch vielleicht nicht ganz, so doch gewiß größtenteils merkwürdigen physikalisch-chemischen Prozessen verdankt, die sich kurz vor dem Austritt der Quellen in den Felspalten des Berghanges vollziehen, auf dem Badgastein gelegen ist.

Das heiße Wasser der Therme löst nämlich aus dem im Glimmer reichlich eingesprengten Schwefelkies Eisen und Mangan. Es korrodiert aber auch die Kriställchen, in denen die radioaktiven Substanzen als mikroskopische Kerne enthalten sind, so daß sich im Gasteiner Thermalwasser auch Radium selbst spurenweise in Lösung vorfindet. Das ist sogar in höherem Maße der Fall, als in anderen aus Granit ausbrechenden Thermen, da hier vornehmlich die Titanminerale (Rutil, Titanit) als Träger der radioaktiven Stoffe auftreten, während in anderen Graniten diese Rolle hauptsächlich dem schwerer angreifbaren Zirkon zufällt. Immerhin ist der Radiumgehalt der Karlsbader oder Budapester Thermen von etwa gleicher Größenordnung. Das allein gibt also Badgastein in bezug auf Radioaktivität noch nicht seine bevorzugte Stellung. Was aber Gastein besonders auszeichnet, ist der Umstand, daß dieses in der Therme spurenweise enthaltene Radium nicht vollständig mit dem Wasser abfließt, sondern zum Teil in den Quellgängen zurückgehalten wird und sich so mit der Zeit dort konzentriert hat.

Schon im Frühsommer 1904 erhielt ich von dem mit einer Neuanalyse des Gasteiner Thermalwassers beschäftigten Chemiker Prof. Ernst Ludwig einige mit einer schwarzbraunen Kruste bedeckte Geröllstückchen, welche die photographische Platte schwärzten und welche auf Zinkblende die bekannten Szintillationen hervorriefen, die das Vorhandensein einer α -strahlenden Substanz verraten. In Badgastein konnte ich dann feststellen, daß diese in Salzsäure löslichen, eisen- und manganhaltigen Krusten mit einem Schlammineral identisch sind, das der bekannte Mineraloge Haidinger schon im Jahre 1856 der Naturforscherversammlung in Wien unter dem Namen „Reissacherit“ vorgelegt hatte. Der um Gastein verdiente Bergmann und Geologe Reissacher, der um diese Zeit den Aufschleißbau der Franz-Josephs-Quellen leitete, war in einer Spalte auf größere Mengen solchen

Schlammes gestoßen. Doch findet er sich in allen Gasteiner Quellstollen; ja es setzt sich derartiger, allerdings weit weniger radiumhaltiger Schlamm ständig in allen Thermalwasserbehältern des Kurortes ab.

Hiebei fällt das Mangan in einer besonders lockeren kolloidalen Form aus — vermutlich als Manganoxydhydrat —, in der es nach anderweitigen Untersuchungen die bemerkenswerte Eigenschaft besitzt, aus Radiumlösungen, und mögen sie noch so verdünnt sein, das Radium an sich zu ziehen, oder, wie man auch sagt, zu adsorbieren. So nimmt der Schlamm aus dem Wasser, das ständig über ihn fließt, spurenweise Radium auf, und da sich dieser Vorgang seit langen Zeiten abspielt, ist es in den Spalten, aus denen die Quellen austreten, zu einer beträchtlichen Anhäufung hochaktiver Substanz gekommen. Konnte doch im Stollen der heißesten Quelle Reissacherit gefunden werden, der das Joachimstaler Pecherz an Radiumgehalt übertrifft, und hat Prof. Bamberger in einer sehr sorgfältigen Analyse dieser Probe, die unten nochmals mitgeteilt wird, ein anderes radioaktives Element, nämlich Thorium, sogar quantitativ zu bestimmen vermocht.

Reissacherit.

(Analyse nach Bamberger.)

SiO ₂	14.21 %
Mn ₃ O ₄	22.81 %
CaO	6.55 %
Fe ₂ O ₃	6.04 %
CuO	0.65 %
Al ₂ O ₃	0.64 %
ThO ₂	0.14 %
Glühverlust	48.98 %
	<hr/> 100.02 %

Desgleichen hat Bamberger bemerkt, daß ein Auslaugen von gepulvertem Tauerngranit mit kohlensäurehaltigem Wasser, aber unter Ausschluß von Sauerstoff, wohl einen ähnlichen Sinter ergibt, daß aber dieser künstliche Sinter durchaus nicht den hohen Radium- oder Thoriumgehalt des natürlichen Produktes aufweist. Dieses letztere entsteht eben unter dem Einfluß des Sauerstoffes der zutretenden Luft, der Abkühlung und der Druckverminderung erst auf dem letzten Wegstück, welches das Wasser im Berge kurz vor seinem Austritt zurücklegt. Für den Emanationsgehalt der Thermen ist es aber vor allem von Bedeutung, daß der Schlamm wegen seines äußerst lockeren Gefüges die Emanation, die das in ihm adsorbierte Radium entwickelt, ganz besonders leicht und fast vollständig abzugeben vermag.

Indem also der Schlamm einerseits dem Thermalwasser, das über ihn strömt, jeweils nur einen Teil des spurenweise gelösten Radiums entzieht, gibt er gleichzeitig an dasselbe Wasser die Emanation aus dem ganzen Radium ab, das sich hier vor dem Auslauf der Quelle im Laufe der Jahrhunderte in den Spalten gesammelt hat. So gehört die Gasteiner Therme zur dritten Art radioaktiver Quellen; sie erhält den Hauptteil ihres Emanationsgehaltes erst kurz vor dem Austritt.

Damit ist nun auch erklärt, daß trotz der hohen Radioaktivität der Therme die Muttersubstanz des Radiums, das Uran, im Granitmassiv Gasteins weder mineralogisch, noch mit den gewöhnlichen Methoden der chemischen Analyse nachzuweisen ist. Es ist eben der Radiumgehalt des Tauerngranits, wenn auch gegenüber anderen Graniten hoch, doch, absolut genommen, so klein, daß die diesem Gehalt entsprechende Uranmenge — die wohl sicher vorhanden ist — der üblichen Analyse entgeht. Aber ihren Reichtum an Emanation verdankt die Therme vor allem der eben geschilderten Bildung eines lockeren, hochaktiven Schlammes in den Spalten, aus denen sie austritt.

Zur Illustration des Gesagten mögen noch die zwei folgenden Tabellen dienen. Sie geben in der ersten Spalte den Radiumgehalt der wichtigsten Quellen von Badgastein und von Karlsbad, und zwar in Billionstel Gramm je Liter. In der zweiten und dritten Spalte finden sich weiters für jede Quelle der Emanationsgehalt in Tausendstel stat. Einheiten je Liter und die Temperatur in Graden Celsius verzeichnet.

Bad g a s t e i n.

	Ra	Em	C°
Franz-Josephs-Quelle	25.6	77	40.8
Rudolfsquelle, links	154	68	47.3
rechts	10.7	44	47.1
Wasserfallquelle	0.2	117	37.0
Lainerquelle, links	21.0	95	47.0
rechts	5.7	93	47.3
Doktorquelle	8.6	132	44.4
Elisabethstollen:			
Hauptquelle	6.3	187	46.7
Nordquelle	142	28	44.3
Südquelle	5.0	204	46.1
Reissacherquelle	0.8	259	40.1
Grabenbäckerquelle	1.2	195	36.2

Karlsbad.

	Ra	Em	C°
Sprudel	48.6	0.4	72.0
Schloßbrunnen	46.7	2.0	60.2
Rosenquelle	34.7	—	43.5
Neubrunnen	35.3	3.7	48.7
Mühlbrunnen	43.8	3.7	50.6
Marktbrunnen	52.3	2.5	52.0
Kurhausquelle	43.6	—	63.4
Karl IV.-Quelle	52.0	3.7	53.9
Felsenquelle	43.4	4.1	55.5
Bernhardsbrunnen	53.9	1.6	57.1

Da springt nun der verschiedene Typus dieser beiden Thermen sofort ins Auge. In Karlsbad liegen die Extreme des Radiumgehaltes zwischen 35 und 54 Billionstel Gramm pro Liter, unterscheiden sich also nicht mehr als etwa die Temperaturen der verschiedenen Quellen; in Gastein hingegen finden wir, daß selbst unmittelbar nebeneinander im selben Stollen austretende Quelladern ganz verschiedene Radiumgehalte besitzen können. Aehnlich steht es auch um den Emanationsgehalt, wie die zweite Spalte zeigt. Große Unterschiede in Gastein, kleinere in Karlsbad.

Die Erklärung ist naheliegend: Es ist eben in Karlsbad und ähnlich auch z. B. in Budapest oder in Baden b. Wien die Vorgeschichte der einzelnen Quelladern in radioaktiver Hinsicht wesentlich die gleiche. Auf langem Weg durch gleiches Gestein löst das Wasser jeder Quelle bei der gleichen Temperatur ungefähr gleiche Mengen fester Stoffe — darunter auch Radium — und empfängt durch den für Quellen zweiter Art geschilderten Vorgang aus den Quellgängen auch etwa gleiche Emanationsmengen. Anders in Gastein! Da kann sich wohl auch zunächst in den Tiefen der Gebirgsspalten bei höherer Temperatur derselbe Vorgang abgespielt haben. Aber er allein vermag den hohen und vor allem den so verschiedenen Gehalt der Gasteiner Quellen: an Emanation und an Radium nicht zu erklären. Dieser Unterschied wird vielmehr in erster Linie dadurch bestimmt, wie das Wasser durch die mit Reissacherit gefüllten Quellspalten zutage tritt.

Handelt es sich um eine Quelle hoher Temperatur, so läuft das Wasser nur zum Schluß durch die mit hoch aktivem Schlamm gefüllten Spalten. Auf diesem kurzen Weg wird dem Wasser sein Radiumgehalt nur zu geringem Teil entzogen, aber auch nur wenig Emanation aus dem Schlamm zugeführt; es entsteht eine heiße,

radiumreiche, aber verhältnismäßig emanationsarme Quelle, wie etwa die beiden Quellen im Rudolfsstollen. Auch zeitweises Mitreißen von Schlamm kann hier eine Rolle spielen.

Wird anderseits das Wasser schon in den Quellspalten stärker abgekühlt, handelt es sich also um eine Quelle niedriger Temperatur, so fließt das Wasser lange durch die tief hinein verschlammten Spalten, in denen es wohl einen erheblichen Teil seines Radiumgehaltes an den Schlamm verliert, dafür aber aus eben diesem Schlamm reichlich Emanation zugeführt erhält; es tritt eine kühle, radiumarme, aber emanationsreiche Quelle zutage, wie die Reissacher-, die Grabenbäcker- oder die Wasserfallquelle.

Außer dem in den Quellmündungen abgesetzten, radioaktiven Schlamm selbst, ist es also auch diese Gegensätzlichkeit zwischen Radium- und Emanationsgehalt, die das Vorhandensein von radioaktiven Quellen dieser dritten Art erkennen läßt.

Endlich sei noch bemerkt, daß diese Dreiteilung der radioaktiven Quellen in solche, deren Emanationsgehalt entweder schon beim Einsickern in den Boden, oder beim Lauf durch die Quellspalten, oder erst aus dem Schlamm vor der Mündung zutritt, auf die Vielfältigkeit dieser Naturerscheinung gewiß nicht immer eindeutig anwendbar sein wird. Es werden nicht immer so reine Typen vorliegen, wie in den hier besprochenen Fällen. Immerhin dürfte unser Ordnungsprinzip in den meisten Fällen nicht versagen.
