

# Untersuchung über die Ursachen von Radonkonzentrationsschwankungen in Quellwässern unter besonderer Berücksichtigung der Seismizität

Von HARRY FRIEDMANN

(Vorgelegt in der Sitzung der mathem.-naturw. Klasse am 13. Jänner 89 durch das w. M.  
PETER STEINHAUSER

Institut für Radiumforschung und Kernphysik der Universität Wien, A-1090 Wien,  
Boltzmannngasse 3

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
  2. Stand der Forschung
    - 2.1. Zur seismischen Beeinflussung der Radonkonzentration von Quellwässern
    - 2.2. Geophysikalische Überlegungen zur Entstehung von Erdbebenvorläufereffekten
    - 2.3. Radon und dessen Verhalten in der Erdkruste
  3. Methodik der Erfassung von Radonkonzentrationen in Quellwässern
    - 3.1. Ein kontinuierliches Verfahren zur Messung von Radon mittels Ionisationskammer
    - 3.2. Anomaliedefinition
    - 3.3. Zur Klassifizierung von Radonanomalien
  4. Anwendung der vorgestellten Methode an zwei ausgewählten Bebenzonen
    - 4.1. Untersuchungen an der Periadriatischen Störungszone
      - 4.1.1. Die Freibadquelle von Warmbad Villach
      - 4.1.2. Empirische Betrachtungen
    - 4.2. Untersuchungen im Bereich der Nordanatolischen Störungszone
  5. Ergebnisse und Zusammenfassung
- Literaturverzeichnis

## 1. Einleitung

Untersuchungen der Radonkonzentration ( $^{222}\text{Rn}$ ) in Quell- und Grundwässern zeigen einerseits von Quelle zu Quelle große Unterschiede, andererseits haben längerfristige Beobachtungen einzelner Quellen oft sehr unterschiedliches Verhalten aufgezeigt. So gibt es Quellen, die über Jahre hinaus keine Radonschwankungen von mehr als ca. 5 % aufweisen, was meist innerhalb der Meßgenauigkeit liegt, andere Quellen zeigen jedoch oft Radonkonzentrationsschwankungen um mehr als 100 %. Diese großen Schwankungen sind zumeist meteorologisch bedingt, jedoch haben Beobachtungen in der UdSSR, China, Japan und USA gezeigt, daß manchmal ein Zusammenhang zwischen dem zeitlichen Eintreffen von Erdbeben und speziellen Anomalien im Radongehalt von

Quell- und Grundwässern, als auch in Bodengasen, bestehen dürfte. Das Wissen um physikalische Zusammenhänge ist derzeit noch verhältnismäßig gering, so daß auch nur die Zuordnung von Anomalien zu bestimmten Erdbeben zumeist problematisch, wenn nicht fragwürdig erscheint.

In dieser Arbeit wird mittels einer vom Autor entwickelten Meßapparatur die Radonkonzentration in zwei an verschiedenen Störungszonen liegenden Quellen untersucht. Die Beobachtung der Radonkonzentration wurde in Warmbad Villach (Kärnten) im Jahre 1977 insbesondere im Hinblick auf die Nachbebenetätigkeit in Friaul aufgenommen. Aufbauend auf den Erfahrungen, die bei diesen Messungen gewonnen wurden, sind ab 1983 die Untersuchungen auf einen Abschnitt der Nordanatolischen Störungzone (Türkei) erweitert worden. Um nicht subjektiven Einflüssen ausgesetzt zu sein, mußte eine mathematisch exakte Definition sowie eine Klassifikation von Radonanomalien erarbeitet werden. Auf der Suche nach den Ursachen der beobachteten Anomalien können durch systematische Untersuchungen verschiedene Möglichkeiten ausgeschieden werden. Die Arbeit konzentriert sich daher in der Folge auf den Einfluß seismischer Effekte auf den Radongehalt der Quellen, insbesondere darauf, ob solche Effekte Ursache der beobachteten Anomalien sein können. Diese Untersuchungen werden sodann auch auf Zeiten mit normalem Radongehalt ausgedehnt, wobei insbesondere versucht wird, kurzfristige Radonkonzentrationsschwankungen mit seismischen Ereignissen zu korrelieren. Bevor die Untersuchungsmethoden genauer erläutert werden, muß kurz auf den derzeitigen Wissensstand eingegangen werden.

## 2. Stand der Forschung

### 2.1. Zur seismischen Beeinflussung der Radonkonzentration von Quellwässern

Es sind bis jetzt kaum mehr als 100 Radonanomalien in Quell- und Grundwässern beobachtet worden, die mit seismischen Ereignissen in Zusammenhang gebracht wurden (verschiedene Zusammenfassungen siehe z. B. Seismological Society of Japan, 1978, H. WAKITA, 1978, T. TENG, 1980, E. HAUSSON, 1981). Bei manchen dieser Daten erscheint eine gewisse Skepsis angebracht, da in diesen Fällen nur kurze Ausschnitte aus den Radonaufzeichnungen veröffentlicht wurden, so daß keine Rückschlüsse auf das „Normalverhalten“ dieser Quellen möglich sind. Anomalieerscheinungen wurden jedoch meist nicht im Epizentralgebiet, bzw. in dessen unmittelbarer Umgebung festgestellt, sondern oft in einiger Entfernung. Bei Starkbeben wurden Anomalien sogar in einigen hundert km Entfernung vom Epizentrum beobachtet. Das bedeutet, daß vor Starkbeben die Spannungszunahme im Epizentralgebiet Einfluß auf die Spannungsfelder noch in großer Entfernung hat. Vermutlich ist aber dieser langreichweitige Einfluß auf Gebiete beschränkt, die entlang großer Störungszonen liegen.

Die meisten Daten bezüglich der Radonkonzentration in Quell- und Grundwässern wurden durch Messungen in mehr oder weniger großen Intervallen erhalten. Es gibt nur relativ wenig kontinuierlich arbeitende Meßapparaturen, obwohl gerade eine kontinuierliche Messung wichtige Zusatzinformation liefern könnte. So zeigen etwa quasikontinuierliche Messungen, d. h. Messungen mit relativ kurzen zeitlichen Intervallen zwischen den Meßpunkten, manchmal tags- bzw. halbtagsperiodische Schwankungen. Solche Oszillationen wurden auch von anderen Autoren beschrieben (z. B. A. N. SULTANKHODZHAYEV et al., 1976).

Fragt man nach der Reichweite der Beeinflussung von Quellwässern durch Erdbeben, könnte man davon ausgehen, daß diese proportional dem Volumen der verspannten Lithosphäre bzw. der Energie des späteren Bebens ist. Ab einer bestimmten Entfernung  $D$  sollten für Beben mit einer Magnitude kleiner als eine bestimmte Grenzmagnitude  $M$  keine Anomalien beobachtbar sein. Mit diesen Voraussetzungen ergibt sich für den Zusammenhang von  $D$  und  $M$

$$M = a \lg D + b \quad a, b \quad \text{Konstanten} \quad (2.1)$$

Aus bekannten Beziehungen zwischen Magnitude und Herdvolumen (z. B. T. DAHAMBRA, 1966) kann man  $a$  zu ungefähr 2 abschätzen (wegen  $E \propto V \propto R^3$  folgt  $M = 1.96 \lg R + 4.45$  – Konstanten nach Dahambra – und der Annahme  $E \propto D^3$  ergibt sich  $M = 1.96 \lg D + \text{const.}$ ). Genauere theoretische Überlegungen gehen von einer weitreichenden Deformation aufgrund epizentraler Spannungen aus, kommen jedoch ebenfalls auf Zusammenhänge der Form (2.1). Fleischer (R. L. FLEISCHER, 1981) nimmt einen Abfall der Deformation mit  $D^3$  an und benutzt zur Festlegung der Konstanten  $a$  und  $b$  Daten von Radonanomalien und Erdbeben, ohne jedoch eine Anomaliedefinition zu geben oder zumindest eine Klassifikation der verwendeten Anomalien vorzunehmen. Er erhält für  $M \geq 3$

$$M = 2.08 \lg D - 0.46 \quad (2.1a)$$

Dobrovolsky (I. P. DOBROVOLSKY et al., 1979) geht von einem wohldefinierten Erdbebenmodell (soft inclusion) mit elliptischem Herdvolumen aus. Unter Verwendung typischer Gesteinsparameter erhält er

$$M = 2.31 \lg (D \cdot \varepsilon^{1/2}) + 6.30 \quad \text{für } M \geq 5 \quad (2.1b)$$

$$M = 2.00 \lg (D \cdot \varepsilon^{1/2}) + 6.12 \quad \text{für } M < 5 \quad (2.1b)$$

mit  $\varepsilon$  der Deformation in der Entfernung  $D$  vom Epizentrum. In der Arbeit von DOBROVOLSKY et al. werden nun die verschiedensten Anomalieeffekte vor und nach Erdbeben in ein Diagramm Entfernung gegen Magnitude aufgetragen, wobei sich zeigt, daß nur wenige Anomalien über einer Linie, die  $\varepsilon = 10^{-8}$  entspricht, liegen. Daher ergibt sich nach DOBROVOLSKY et al.

$$M = 2.33 \lg D \quad (2.1c)$$

Rein empirisch finden Hauksson und Goddard (E. HAUSSON et al., 1981)

$$M = 2.4 \lg D - 0.43 \quad (2.1d)$$

jedoch haben sie in willkürlicher Weise nur einige wenige Radonanomalien unterschiedlicher Art zur Ableitung von (2.1d) herangezogen, so daß man berechtigte Zweifel an der Gültigkeit ihrer Formel haben muß.

So problematisch die Herleitungen der Parameter a und b für (2.1) auch sind, so überraschend ist ihre Übereinstimmung. Für  $M \geq 4$  unterscheiden sich die Angaben nach (2.1a), (2.1c) und (2.1d) nur um weniger als 30 %. Dies liegt sicher zum Teil auch daran, daß in jeder dieser Ableitungen gewisse Anpassungen an in der Literatur veröffentlichte Daten vorgenommen wurden. Betrachtet man jedoch diese Literaturdaten genauer, so werden oft zu wenig Informationen über normale Hintergrundschwankungen angegeben. Außerdem wurden Anomalien unterschiedlichster Form, ohne Rücksichtnahme auf möglicherweise verschiedene Entstehungsmechanismen, gemeinsam ausgewertet. Von dieser wenig zufriedenstellenden Vorgangsweise kann nur dadurch abgegangen werden, indem man eine Anomalie mathematisch exakt definiert sowie eine Klassifikation von Anomalien nach ihrem Erscheinungsbild vornimmt. Dies wird in den Kapiteln 3.2 und 3.3 erläutert.

## 2.2. Geophysikalische Überlegungen zur Entstehung von Erdbebenvorläufereffekten

Um den Zusammenhang zwischen Radonanomalien und seismischen Ereignissen verstehen zu können, ist zumindest die Kenntnis des Ablaufs des Herdvorganges notwendig. Die theoretische Grundlage hierzu bildet die Dilatanztheorie (A. NUR, 1972; Y. P. AGGARWAL et al., 1973; C. H. SCHOLZ et al., 1973; B. T. BRADY, 1974, 1975; V. I. MJACHKIN et al., 1975; A. NUR, 1975):

Diese Theorie beruht vor allem auf Beobachtungen des Bruchverhaltens von Gestein in Laborversuchen. Bevor die Bruchgrenze des Gesteins unter Belastung erreicht wird, kommt es in der Probe zu Mikrorissen. Steigt die Spannung weiter, so werden diese Risse vorwiegend etwa parallel zur Hauptspannungsrichtung vergrößert, wobei sich das Gestein normal zu dieser Richtung ausdehnt. In weiterer Folge bilden sich Scharen von Scherbrüchen, etwa unter  $45^\circ$  zur Hauptspannungsrichtung und schließlich kommt es zur Ausbildung einer bevorzugten Scherbruchrichtung. Diese inelastische Volumszunahme durch Scherspannungen bezeichnet man als Dilatanz. Das Vorhandensein von Rissen im Gestein führt zu Änderungen verschiedener Gesteinseigenschaften. So ist u. a. eine bessere Entgasung des Gesteins möglich, was z. B. mittels Radonmessungen an der Erdoberfläche feststellbar sein sollte. Andere

Effekte sind ebenfalls zu erwarten bzw. sind auch vor Erdbeben beobachtet worden, wie z. B. Änderungen in den Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Bebenwellen, geoelektrisch, magnetisch, gravimetrische Effekte usw. (siehe u. a. F. PRESS, 1975; T. RIKITAKE, 1976; H. FRIEDMANN, 1977a; G. ZHANG et al., 1980; C.-Y. KING, 1986; usw.).

Für den weiteren Verlauf des Herdvorganges existieren im wesentlichen zwei Theorien. Die eine, auch Dilatanz – Diffusions Modell genannt, nimmt das Eindringen von Wasser in die gebildeten Risse an, während die andere, auch als Dilatanz – Instabilitäts-Theorie bezeichnet, keinen Wasserzutritt ins Herdvolumen vorsieht.

Die Entwicklung dieser beiden Theorien führte zu einer Reihe von Laborversuchen, um zu prüfen, ob die vorhergesagten Zustandsänderungen der Gesteine unter Druck tatsächlich, zumindest im Labor, beobachtbar sind (siehe u. a. T. KUO et al., 1974; J. R. BOOKER, 1975; W. F. BRACE, 1975; H. WAKITA, 1975; K. HADLEY, 1975; J. R. RICE et al., 1979, usw.). Diese Versuche haben die vorhergesagten Phänomene i. a. bestätigt.

Bezüglich der Exhalation von im Gestein okkludierten Gasen wurden ebenfalls an verschiedenen Stellen Untersuchungen vorgenommen (A. A. GIANDINI et al., 1976; The Group of Hydrochemistry, 1978; G. LUO et al., 1980 und 1981; R. F. HOLUB et al., 1981; JIANG FONG-LIANG et al., 1981), die ergeben haben, daß i. a. bei Spannungszunahme tatsächlich eine erhöhte Exhalationsrate feststellbar ist.

Da sich die aus den Dilatanztheorien abgeleiteten Erdbebenvorläufereffekte auf das Herdgebiet bzw. dessen nähere Umgebung beziehen kann aus diesen Theorien nicht unmittelbar auf Erdbebenvorläufereffekte (vor allem Radonanomalien) geschlossen werden, die oft mehrere hundert km vom Epizentrum des Bebens entfernt beobachtet werden konnten (Zusammenfassungen siehe z. B. H. WAKITA, 1978; T. TENG, 1980; E. HAUSSON, 1981; usw.).

Nach diesen den Herdvorgang betreffenden Überlegungen muß auf die Eigenschaften und das Verhalten von Radon genauer eingegangen werden.

### 2.3. Radon und dessen Verhalten in der Erdkruste

Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) ist ein radioaktives Edelgas (Halbwertszeit  $T_{1/2} = 3.824$  Tage), das aus dem Zerfall von Radium ( $^{226}\text{Ra}$ ) entsteht.  $^{226}\text{Ra}$  bzw.  $^{222}\text{Rn}$  sind Elemente aus der natürlichen Zerfallskette (Abb. 1), deren Muttersubstanz  $^{238}\text{U}$  ist (Uran-Radium-Reihe). Da praktisch alle Gesteine Spuren von Uran enthalten, wird auch nahezu in allen Gesteinen Radon in geringsten Mengen gebildet. Dieses kann in wasserführende Horizonte gelangen oder wird auch in wasserführenden Horizonten gebildet, von wo es im Wasser gelöst an die Erdoberfläche gebracht werden kann. Kommt es vor einem Erdbeben zu einer Spannungszunahme im Gestein, so wird i. a. durch Rißbildung die Gesteinsoberfläche vergrößert (vgl. Kap. 2.2.),

URAN - RADIUM REIHE										$^{234}\text{Th}$ 24.1d $\gamma$	$\alpha$	$^{238}\text{U}$ 4.5E9a
											$^{234}\text{Pa}$ 1.2m $\beta\gamma$	
		$^{214}\text{Pb}$ 26.8m $\gamma$	$\alpha$ 99.98%	$^{218}\text{Po}$ 3.05m $\gamma$	$\alpha$	$^{222}\text{Rn}$ 3.8d	$\alpha$	$^{226}\text{Ra}$ 1600a	$\alpha$	$^{230}\text{Th}$ 8E4a	$\alpha$	$^{234}\text{U}$ 2.5E5a
	$^{210}\text{Tl}$ 1.3m $\gamma$	$\alpha$ 0.4%	$^{214}\text{Bi}$ 19.8m $\gamma$	$\alpha$	$^{218}\text{At}$ 2s							
$^{206}\text{Hg}$ 8.1m $\gamma$	$\alpha$ 75E-6%	$^{210}\text{Pb}$	$\alpha$ 22a $\gamma$	$^{214}\text{Po}$ 0.16ms								
	$^{206}\text{Tl}$ 4.3m $\gamma$	$\alpha$ 5E-5%	$^{210}\text{Bi}$ 5.0d $\gamma$									
		$^{206}\text{Pb}$ stabil	$\alpha$	$^{210}\text{Po}$ 138.4d								

Abb. 1: Uran-Radium Reihe

so daß die Radongabe aus dem Gestein wesentlich verstärkt wird. (Es kann aber auch durch eine Änderung der Hauptspannungsrichtung zum Schließen vorhandener Risse kommen und somit der gegenteilige Effekt eintreten.) Neben der Beobachtung des Radongehaltes von Quellwässern scheint auch die Untersuchung der Radonkonzentration in Bodengasen in Zusammenhang mit Erdbeben von Bedeutung zu sein. Ähnlich wie bei der Radonkonzentrationsmessung in Quell- und Grundwässern ist auch bei Bodengasmessungen oft vor Erdbeben ein erhöhter Radongehalt feststellbar (S. OKABE, 1956; A. I. TUGARINOV et al., 1977; K. KATOH et al., 1980; C.-Y. KING, 1978, 1980a, b; A. MOGRO-CAMPERO et al., 1980; G. F. BIRCHARD et al., 1980). Die beobachteten Effekte der Radonkonzentration in Bodengasen können aber nicht direkt auf eine erhöhte Radonabgabe des Gesteins in der Tiefe zurückgeführt werden. Nimmt man nämlich einen reinen Diffusionsvorgang an, würde die Konzentrationsabnahme von der Radonquelle gemäß einem Diffusionsgesetz erfolgen

$$c = (a/\lambda) \cdot \exp \{-\sqrt{(\lambda/D)} \cdot x\} \quad (2.2)$$

$c$  = Radonkonzentration

$D$  = Diffusionskonstante

$x$  = Entfernung von der punktförmig angenommenen Quelle

$\lambda$  = Zerfallskonstante

$a$  = Radonabgabe in den Porenraum des Bodens

und zu einer schnellen Abnahme der Radonkonzentration mit der Entfernung zur Radonquelle, d. h. zu den tieferen Gesteinsschichten, führen (Abfall auf die Hälfte innerhalb von etwa 80 cm unter der Annahme einer Diffusionskonstante  $D = 0.03 \text{ cm}^2/\text{s}$ ). Um das seismisch relevante Verhalten der Radonkonzentration in Bodengasen zu erklären, muß man einen zusätzlichen Transportterm annehmen, was soviel bedeutet, daß eine Trägergasströmung vorhanden sein muß, die Radon aus tieferen Schichten an die Erdoberfläche bringt (R. L. FLEISCHER et al., 1978, 1979; A. MOGRO-CAMPERO et al., 1977; A. B. TANNER, 1964, 1980). Änderungen der Trägergasgeschwindigkeit können etwa durch Pegelstandsänderungen des Grundwassers o. ä., eventuell hervorgerufen durch Spannungsänderungen, auftreten (W. E. CLEMENTS, 1974; R. W. KLUSMAN et al., 1981; E. STRANDEN et al., 1984). Es muß daher die Formel (2.2) erweitert werden:

$$c = (a/\lambda) \cdot \exp \left\{ \left( \frac{v}{2D\varepsilon} - \sqrt{\left( \frac{v}{4D^2\varepsilon^2} \right) + (\lambda/D)} \right) \cdot x \right\} \quad (2.3)$$

$v$  = Geschwindigkeit des Trägergases

$\varepsilon$  = Bodenporosität

Betrachtet man das Verhalten der Radonkonzentration in Bodengasen nahe der Erdoberfläche und nimmt eine Radonkonzentration in der Außenluft von 0 an, was insofern gerechtfertigt ist, als die Außenkonzentration in der Größenordnung von  $\leq 0,1 \text{ pCi/l}$  ( $\cong 4 \text{ Bq/m}^3$ ) viel kleiner als

$c_0$  (die Radonkonzentration in der Tiefe) ist, so erhält man (G. L. SCHRÖDER et al., 1965; A. MOGRO-CAMPERO et al., 1980)

$$c = (a/\lambda) \cdot \{1 - \exp(\{(v/2D_\epsilon) - \sqrt{(v^2/4D^2\epsilon^2) + (\lambda/D)}\} \cdot h)\} \quad (2.4)$$

$h$  = Tiefe (von der Oberfläche aus gemessen) in m

Aus Abb. 2 ist nun ersichtlich, daß bei Bodengasmessungen nicht eigentlich die Radonexhalationsrate aus den tieferen Gesteinsschichten gemessen wird, sondern die Änderung der Geschwindigkeit des Trärgases. Gemäß der Dilatanztheorie kommt es vor Erdbeben zu inelastischen Volumsänderungen der Gesteine, die bewirken, daß auch verschiedene in der Erdkruste eingeschlossene Gase bewegt werden. Diese Bewegung kann Auswirkungen bis an die Erdoberfläche haben, wobei Radon als Indikator für die Geschwindigkeit des Bodengases verwendet wird.

Das Problem bei Bodengasmessungen liegt vor allem in der starken Beeinflussung der Meßwerte durch meteorologische Faktoren, d. h.

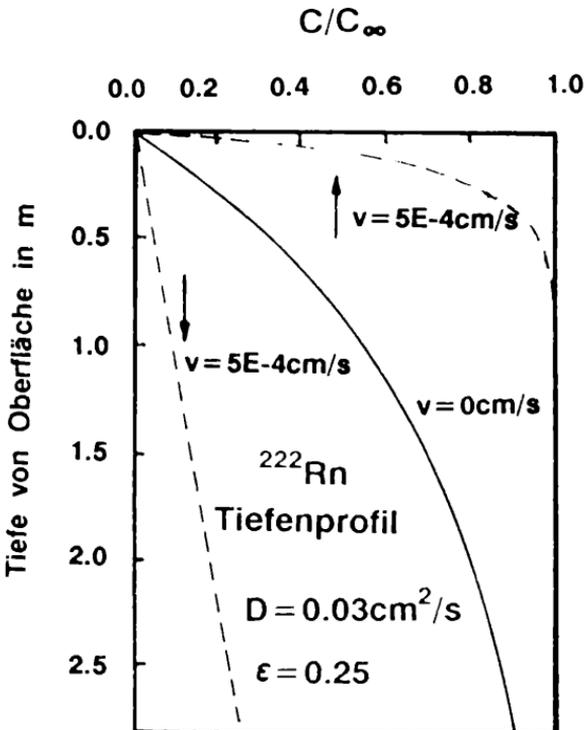


Abb. 2: Radonkonzentration im Bodengas als Funktion der Tiefe, wobei die Transportgeschwindigkeit  $v$  als Parameter verwendet wird (G. L. SCHROEDER, H. W. KRANER, R. D. EVANS, 1965).

einerseits durch Luftdruckschwankungen, die zu einer Art Pumpeffekt führen, andererseits durch die Bodenfeuchte, die die Radondurchlässigkeit (vgl.  $\epsilon$  in 2.3 und 2.4) des Bodens stark variieren läßt (E. STRANDEN et al., 1984). Aus diesen Gründen erscheinen Bodengasmessungen nahe der Erdoberfläche nur in Form von integrierenden Messungen, d. h. durch Mittelung über große Zeiträume (etwa 1 Monat) z. B. mittels „Track Etch Methode“ sinnvoll.

Im Gegensatz dazu kann man erwarten, daß Messungen der Radonkonzentration in Quellwässern i. a. keine so starke Beeinflussung durch meteorologische Faktoren aufweisen. Die Störungen beschränken sich in diesen Fällen auf Niederschläge und Änderungen des Grundwasserpegels und auch das nur, wenn die untersuchten Quellen durch Oberflächenwasser beeinflusst sind. Daher erscheinen bei Radonmessungen in Quellwässern auch nichtintegrierende Methoden, die den genauen zeitlichen Verlauf der Radonkonzentration im Wasser messen können, zweckmäßiger.

Neben dem Isotop  $^{222}\text{Rn}$  existieren noch das Radonisotop  $^{220}\text{Rn}$  (Thoron) als Folgeprodukt des  $^{224}\text{Ra}$  aus der Thorium Zerfallsreihe und das Radonisotop  $^{219}\text{Rn}$  (Actinon) aus der Actinium Zerfallsreihe. Diese beiden Isotope werden ebenfalls im Gestein gebildet, haben jedoch eine so kleine Halbwertszeit ( $^{220}\text{Rn}$ :55,3 sec;  $^{219}\text{Rn}$ :3,96 sec), daß man nicht erwarten kann, daß Änderungen der Konzentration in einiger Tiefe noch an der Erdoberfläche festzustellen sind.

### 3. Methodik der Radonbestimmung in Quellwässern

Die Untersuchung des Radongehaltes von Quellwässern erfolgt nach dem Schema: Messung, Erkennen von Anomalien, Einteilung von Anomalien, Untersuchung von Zusammenhängen sowohl während als auch außerhalb von Anomalieperioden. Dementsprechend soll die Erfassung der Daten in einen apparativen Teil, einen Teil, in welchem definiert wird, was unter einer Anomalie zu verstehen ist, und einen Teil, der eine Klassifizierung von Anomalien vornimmt, unterteilt werden.

#### 3.1. Ein kontinuierliches Verfahren zur Messung von Radon mittels Ionisationskammer

Jedes Verfahren zur kontinuierlichen Messung der Radonkonzentration im Wasser besteht zumindest aus zwei wesentlichen Teilen: Im ersten Schritt muß das Radon kontinuierlich aus dem Wasser extrahiert werden, was mit konstanter Ausbeute zu erfolgen hat. Im zweiten Schritt ist sodann die Aktivität des extrahierten Radons zu messen. Bei dem am Institut für Radiumforschung und Kernphysik in Wien entwickelten Gerät (H. FRIEDMANN et al., 1978, H. FRIEDMANN, 1983) erfolgt die Entemanierung mittels Durchblasens von Luft durch das Wasser, was mit Hilfe einer Art Wasserstrahlpumpe mit nachgeschaltetem Gas-Wasser

Separator erfolgt. Eine Weiterentwicklung der Entemaniereinheit verwendet eine kleine Pumpe mit der Luft durch das zu entemanierende Wasser gepumpt wird. Es konnte gezeigt werden, daß die Entemanierungsrate bei konstantem Wasserdurchfluß auch über lange Zeiten unverändert bleibt, sofern nicht Kalkablagerungen oder dergleichen die Durchflußquerschnitte wesentlich verkleinern.

Zur Bestimmung der Radonaktivität wird die Trägerluft kontinuierlich durch eine Ionisationskammer geleitet. Die Kammeraußenwand liegt an etwa +300 V Spannung und von der 5 mm dicken Mittelelektrode wird der Ionisationsstrom gegen Masse gemessen. Dazu wurde ein Elektrometerverstärker entwickelt (H. FRIEDMANN, 1983), dessen Eingangsstufe als Varaktorbrückenverstärker ausgelegt ist. Da die zu messende Radonkonzentration in Quellwässern (H. FRIEDMANN, 1980, 1984) im Bereich von einigen kBq/m<sup>3</sup> und darunter liegt, müssen Ionisationsströme von weniger als 10<sup>-12</sup> A noch meßbar sein. Um diese Ströme auch unter Bedingungen messen zu können, wie sie etwa in Quellstuben usw. herrschen, waren besondere Entwicklungsarbeiten notwendig. Das Gerät erlaubt prinzipiell Ströme von weniger als 10<sup>-14</sup> A zu messen, so daß seitens der Empfindlichkeit keinerlei Probleme bestehen. Wird das Gerät nicht im empfindlichsten Bereich betrieben (die Zeitkonstanten müssen in diesem Bereich sehr groß gewählt werden), so läßt sich prinzipiell eine Recheneinheit dazuschalten (K. JANKA et al., 1982), die die Zeitkonstanten der Radonfolgeprodukte berücksichtigt und eine Echtwertberechnung der reinen Radonkonzentration vornimmt. Damit kann man erreichen, daß die Ansprechzeit für Radontransienten in der Größenordnung von wenigen Minuten liegt.

Eine wesentliche Gefahr bezüglich Fehlmessungen stellen Kriechströme zwischen Kammeraußenwand und Mittelelektrode dar. Dieses Problem konnte durch die Entwicklung einer speziellen Elektrodenisoliationskonstruktion sowie eines ausgewählten Isolationsmaterials (Teflon), welches zusätzlich beheizt wird, gelöst werden.

Bei Ionisationskammermessungen ist zudem zu beachten, daß sich die Bestimmung der Radonmenge stets auf ein bestimmtes Gasvolumen bezieht, dessen Masse von Druck und Temperatur abhängt. Die Temperaturabhängigkeit ist in erster Näherung zu vernachlässigen, da bei der gewählten Konstruktion der Apparatur die Trägerluft durch den engen Kontakt zum Quellwasser, welches bei den untersuchten Quellen nahezu konstante Temperatur aufweist, auch ein relativ gleichmäßiges Temperaturverhalten zeigt. Da die Entemanierung im wesentlichen ein Volumeneffekt ist (Mischungsverhältnis Wasser zu Trägerluft) (H. FRIEDMANN, 1977b), ergibt sich die Druckabhängigkeit der Meßergebnisse vor allem aus der Druckabhängigkeit der Eichung. Diese wird durch die Reichweitenveränderung der  $\alpha$ -Strahlung und Rekombinationseffekte der Ionen in der Kammer hervorgerufen. Durch geeignete Konstruktion und einer der Ionisationsdichte angepaßten Kammeranspannung können diese Einflüsse jedoch sehr klein gehalten werden, so daß sie i. a. vernachlässigt werden können.

Der zu erwartende Ionisationsstrom  $I$  in einer zylindrischen Ionisationskammer ergibt sich für  $\alpha$ -Strahler zu (R. D. EVANS, 1935)

$$I = \alpha A \{ \beta - \gamma \mu / h - \delta \mu / d + \varepsilon \mu^2 / (hd) \} \quad (3.1)$$

mit  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\varepsilon$  Konstante, die sich aus der Reichweite der  $\alpha$ -Teilchen und dem Gas und dessen Zustand (Temperatur, Dichte) in der Ionisationskammer ergeben,  $1/\mu$  ist die „stopping power“ und  $d$  und  $h$  sind Durchmesser und Höhe der Kammer. Für die Zerfallsreihe Radon und Folgeprodukte ergibt sich im radioaktivem Gleichgewicht

$$I = 0.0005928A \{ 3.57 - 5.00\mu/h - 3.47\mu/d + 5.48\mu^2/(hd) \} \quad (3.2)$$

mit  $I$  in Ampere,  $A$  in Curie und  $h$  und  $d$  in cm. Da sich jedoch im Durchströmverfahren das radioaktive Gleichgewicht nicht vollständig einstellt, hat es sich günstiger erwiesen, die Eichung experimentell durchzuführen. Zu diesem Zweck wird die Radonkonzentration des Quellwassers mittels einer gegen eine Eichlösung kalibrierten zweiten Meßapparatur bestimmt. Wiederholte Eichungen haben eine hervorragende Konstanz des Eichfaktors gezeigt.

Natürlich weist auch die Luft, wie sie zur Messung angesaugt wird, eine bestimmte Radonkonzentration auf. Diese Konzentration liegt aber i. a. in der Größenordnung von einigen Bq/m<sup>3</sup>, ist also gegenüber der zu messenden Konzentration von kBq/m<sup>3</sup> praktisch vernachlässigbar. In bestimmten Fällen kann jedoch die Außenluft auch eine höhere Radonkonzentration aufweisen, etwa in Bergwerken u. ä. In diesen Fällen ist eine differentielle Messung notwendig, welche durch eine Doppelkammerordnung erfolgen kann (Details z. B.: G. HALLEDAUER, 1925; H. PERTZ, 1937; H. FRIEDMANN, 1983).

### 3.2. Anomalie definition

Mehrere Vorgangsweisen zur Definition einer Anomalie sind möglich, wobei diese jedoch nicht notwendigerweise zu gleichen Ergebnissen führen. Hier sollen folgende Definitionskriterien postuliert werden:

– den Absolutwert der Radonkonzentration betreffend:

a) Eine Anomalie liegt vor, wenn die Radonkonzentration eine statisch signifikante Abweichung vom Normalwert (Mittelwert aufweist).

Statisch signifikant bedeutet hier, daß eine Meßreihe vorliegen muß, bei der nach Reduzierung aller bekannter Einflüsse eine sinnvolle Angabe einer Verteilungsfunktion und einer Standardabweichung  $\sigma_R$  möglich ist. Sei  $P(x)$  die Verteilungsfunktion der Meßreihe (d. h.  $P(x)$  ist die Wahrscheinlichkeit für einen Meßwert  $\leq x$ ), so liegt genau dann eine Anomalie vor, wenn im Zeitbereich, der auf Anomalie getestet wird, die gemittelte Abweichung vom Mittelwert größer ist als es mit dem entsprechenden Konfidenzniveau vereinbar ist, wenn also gilt:

$$(t_2 - t_1)/T > 1 - P(R_0 + A) \quad \text{bzw.} \quad P(R_0 + A) > 1 - (t_2 - t_1)/T \quad (3.3)$$

mit A der gemittelten Abweichung vom Mittelwert (z. B. in Bq/m<sup>3</sup>)

$$A = 1/(t_2 - t_1) \int_{t_1}^{t_2} (R(t) - R_0) dt \quad (3.3a)$$

T = gesamter Beobachtungszeitraum (z. B. in Tagen)

t<sub>2</sub>-t<sub>1</sub> = Zeitintervall, das auf Anomalie untersucht wird

R(t) = Radonmeßwert (z. B. Bq/m<sup>3</sup>)

R<sub>0</sub> = Mittelwert der Radonkonzentration im gesamten Beobachtungszeitraum (z. B. in Bq/m<sup>3</sup>)

Diese Anomaliedefinition würde jedoch spike-artige Störungen i. a. nicht erfassen, daher wird in einer Zusatzdefinition noch eine feste Schwelle für Anomalien definiert:

b) Eine Anomalie liegt vor, wenn die Radonkonzentration um mehr als die dreifache Standardabweichung vom Normalwert (Mittelwert) abweicht, d. h.

$$|R - R_0| > 3\sigma_R \quad (3.4)$$

- Fluktuationen des Radonwertes betreffend:

Um auch rasche Radonkonzentrationsänderungen (Sprungstellen) als Anomalien interpretieren zu können (z. B. Izu-Oshima Beben, H. WAKITA et al., 1980), wird folgende Anomaliedefinition vorge schlagen (Schwankungsanomalie):

c) Die Schwankung der Radonkonzentration soll mittels der Funktion F<sub>H</sub>

$$F_H(j) = \langle (C - \langle C \rangle_H)^2 \rangle = (1/2H) \sum_{i=j-H}^{j+H} \{ C - (1/2H) \sum_{k=j-H}^{j+H} C_k \}^2 \quad (3.4)$$

C = Radonkonzentration

$\langle \rangle_H$  = laufendes Mittel im Zeitintervall 2H

charakterisiert werden. Sie wird hier in Fluktuationseinheiten (1 FE = 3 [kBq/m<sup>3</sup>]<sup>2</sup>) gemessen. Kann für F<sub>H</sub> eine Varianz angegeben werden, so soll eine Abweichung in F<sub>H</sub> vom Mittel um mehr als der dreifachen Wurzel der Varianz als Anomalie definiert werden.

$$|F_H - \langle F_H \rangle| > 3\sigma_F \quad (3.5)$$

Alternativ hiezu könnte man die kurzfristigen Radonschwankungen auch durch Kennziffern, ähnlich jenen der Bartelsschen magnetischen Kennziffern charakterisieren, wobei Anomalien durch die Angabe einer Grenzkennziffer definiert wären.

Es ist anzunehmen, sofern nicht alle 3 angeführten Definitionen (a, b, c) koinzident erfüllt sind, daß es unterschiedliche Ursachen oder zumindest unterschiedliche Abläufe sind, die zu den verschiedenen definierten Anomalien führen.

### 3.3. Zur Klassifizierung von Radonanomalien

Man kann die bis jetzt mit einigermaßen guter Zeitauflösung beobachteten Radonanomalien im wesentlichen in 2 Hauptgruppen einteilen.

Die erste Gruppe, im folgenden mit Typ A bezeichnet, zeichnet sich durch eine relativ langsame Änderung der Radonkonzentration, welche meist ein Anstieg ist, aus. Die typische Geschwindigkeit der Radonkonzentrationsänderung beträgt deutlich weniger als 0,1 %/h (z. B. A. N. SULTANKHODZHIEV et al., 1979).

Die zweite Gruppe, im folgenden mit Typ B bezeichnet, weist im ersten Stadium der Anomalie eine relativ rasche Änderung der Radonkonzentration auf (>1 %/h). Bei dieser Gruppe lassen sich mehrere Untergruppen unterscheiden. Der häufigste Typ zeigt nach einem raschen Anstieg der Radonkonzentration einen eher konstanten Verlauf und soll hier als Typ B1 bezeichnet werden.

Schließlich sollen mit B2 spikeartige Anomalien bezeichnet werden. Einer solchen spikeartigen Anomalie folgt oft innerhalb von weniger als 10 Tagen ein seismisches Ergebnis. Die Spikes können positiv (Typ B2+) oder negativ (Typ B2-) sein.

Die hier vorgeschlagene Einteilung ist rein empirisch und ist nicht auf dilatanztheoretischen Überlegungen begründet. Nichtsdestoweniger scheint der geophysikalische Vorgang, der zum Anomaliotypus A führt, ein anderer zu sein als jener, der einen Typus B hervorruft. Ob sich jedoch der Typ B1 vom Typ B2 qualitativ oder nur quantitativ unterscheidet, ist hingegen nicht ohne weiteres zu entscheiden.

Aus der Analyse von Radondaten des Typus B, die in der Literatur als Erdbebenvorläufer bezeichnet wurden und deren zeitliche Verläufe genügend gut durch Meßdaten dokumentiert sind, ergibt sich noch ein interessanter Aspekt (H. FRIEDMANN, 1985):

Berechnet man die normierte maximale Anstiegsgeschwindigkeit der Anomalien vom Typ B und bezeichnet diesen Formparameter mit

$$P_{\max} = 1/(\Delta C) \cdot (dC/dt)_{\max} \cong 1/\delta \quad (3.6)$$

C = Radonkonzentration

$\Delta C$  = Änderung der Radonkonzentration vom Normalwert zu Wert nach „rascher“ Änderung

$\delta$  = Zeit der „raschen“ Änderung

so scheint eine Korrelation zwischen diesem Parameter und der Entfernung D zum Epizentrum zu bestehen, sofern D größer als 70 km

ist. Es ergibt sich in doppelt logarithmischer Darstellung für eine Ausgleichsgerade

$$\lg P_{\max} = -2 \lg D + 4 \text{ od. } P_{\max} = 10000 \cdot D^{-2} \text{ od. } D = 100 \cdot P_{\max}^{-0.5} \quad (3.7)$$

wobei jedoch mit einer relativen Ungenauigkeit von 50 % für D gerechnet werden muß. Diese Aussage umfaßt sowohl Anomalien des Typs B1 als auch des Typs B2. Es hat sich nämlich gezeigt, daß Spitzen in den Radonkonzentrationen von Quellwässern bei besserer Zeitauflösung wieder das zeitliche Verhalten von Anomalien des Typs B1 besitzen.

#### 4. Anwendung der vorgestellten Methode an zwei ausgewählten Bebenzonen

##### 4.1. Untersuchungen an der Periadriatischen Störungszone

###### 4.1.1. Die Freibadquelle von Warmbad Villach

Die kontinuierliche Überwachung des Radongehaltes in Quellwässern ist 1977, insbesondere im Hinblick auf die Nachbeben­tätigkeit in Friaul, aufgenommen worden. Ausgehend von dem Wissen über den Radongehalt von etwa 100 Quellen in Österreich und deren Verhalten bezüglich Schüttung, Oberflächenwassereinfluß, Quellgaskonzentration, Chemismus und Geologie, wurden insgesamt 5 Quellen über längere Zeiträume kontinuierlich untersucht (Warmbad Villach Freibadquelle, Bad Kleinkirchheim, Bad Bleiberg Thermalquelle, Hüttenberg MS20A, Sieldorf Josefsquelle), wobei sich schließlich nur die Freibadquelle in Warmbad Villach als für die Untersuchungen geeignet erwiesen hat (K. ARIC et al., 1980). Alle anderen Quellen zeigten entweder völlig konstanten Radongehalt oder waren durch andere Einflüsse so gestört, daß eine weitere Beobachtung nicht erfolversprechend erschien. Alle daher im folgenden angeführten Daten beziehen sich auf die Freibadquelle von Warmbad Villach (46,6 N/13,8 E).

Die Freibadquelle entspringt aus dem Ostrandabbruch des Dobratsch Massivs, der das Abtauchen des Wettersteinkalks unter die jungen Anlandungen des Villacher Beckens darstellt. Von besonderer Wichtigkeit ist in diesem Bereich eine SE-NW gerichtete tektonische Linie, die dem weiteren Bereich der periadriatischen Naht zugehörig interpretiert werden kann. Zusätzliche Angaben bezüglich der örtlichen Geologie sind u. a. aus J. STINY, 1937; N. ANDERLE, 1950; H. HOLLER, 1976 und F. KAHLER et al., 1983 zu entnehmen.

Die Quelle ist eine Thermalquelle (25–27 °C) und hat eine Schüttung im Bereich von etwa 10 l/s bis 50 l/s. Hydrogeologische Untersuchungen unter Zuhilfenahme von Isotopenuntersuchungen (vor allem Tritiummessungen) haben ergeben, daß die Freibadquelle einer schwachen

Beeinflussung durch Oberflächenwasser ausgesetzt ist (H. ZOJER, 1980). Die Lage der Quellen ist Abb. 3 zu entnehmen.

Abb. 4 zeigt den Radongehalt der Freibadquelle in Warmbad Villach von Ende 1977 bis Anfang 1984 (punktierte Linien bedeuten interpolierte Werte) (H. FRIEDMANN, F. HERNEGGER, 1985).

Im ersten Schritt zur Datenanalyse wurde versucht einen „Normalwert“ der Radonkonzentration zu bestimmen. Zu diesem Zweck sind die Häufigkeitsverteilungen (Verteilungsfunktion) der Radonkonzentrationswerte der Jahre 1978–1983 bestimmt worden (siehe Abb. 5). Man erkennt daraus, das i. a. die Radonkonzentration um einen mittleren Wert von etwa  $0,7 \text{ nCi}$  ( $= 26 \text{ kBq/m}^3$ ) schwankt, mit einer mittleren Schwankungsbreite (einfache Standardabweichung) von  $0,16 \text{ nCi/l}$  ( $= 6 \text{ kBq/m}^3$ ).

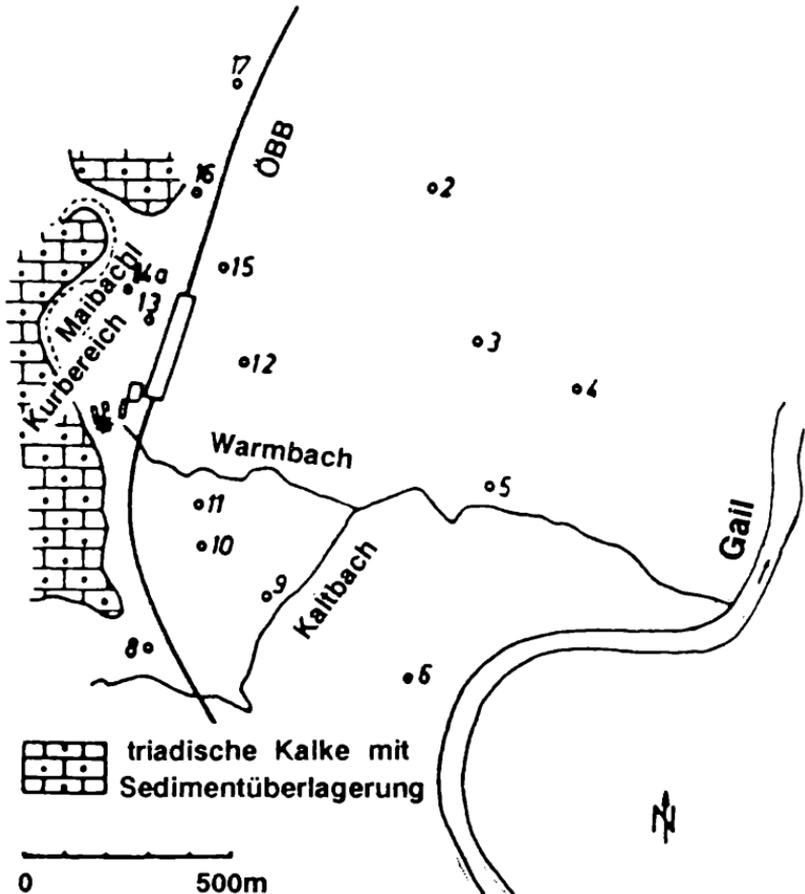


Abb. 3: Die Lage der Quellen von Warmbad Villach (\* Freibadquelle, O Grundwassermeßstellen).

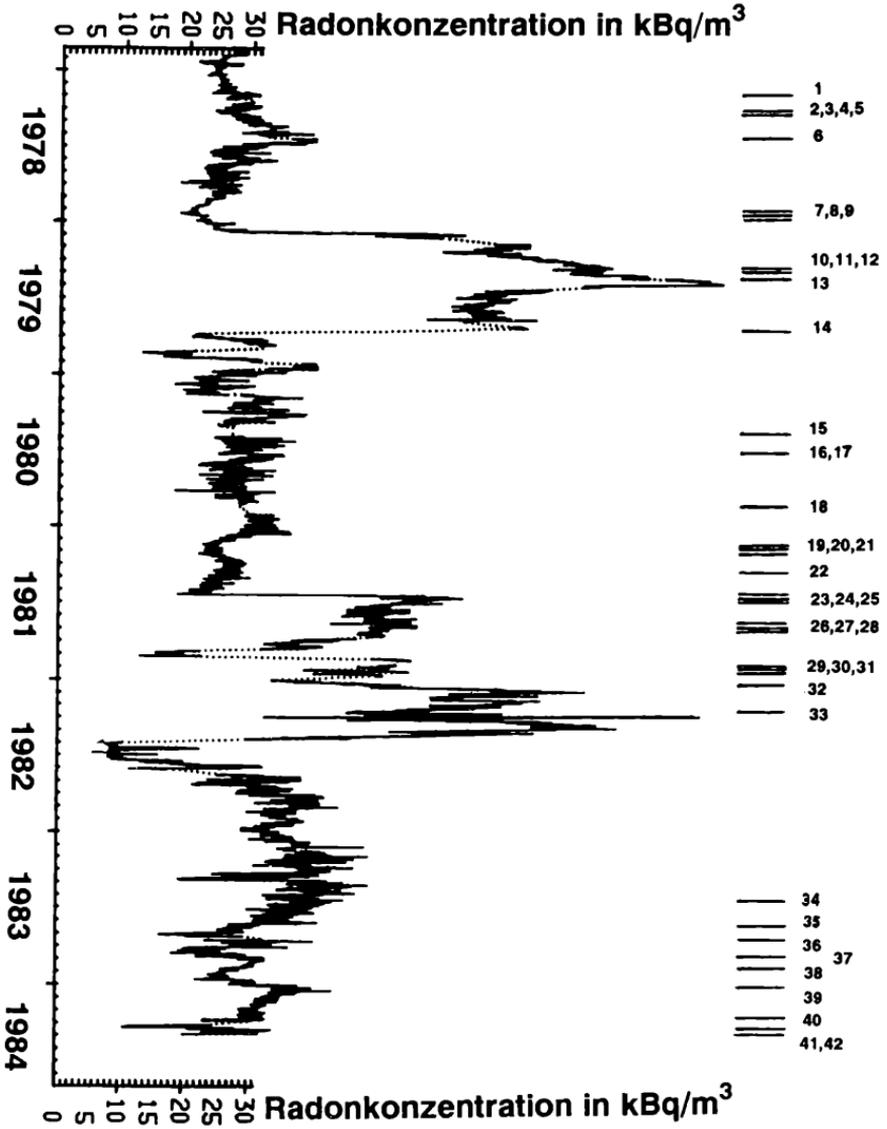


Abb. 4: Radonkonzentration in der Freibadquelle von Warmbad Villach, sowie alle Beben, die Relation (4.1) erfüllen.

Gemäß Definition b) aus Kap. 3.2 sind daher die Zeiträume mit einer Radonkonzentration von mehr als  $1,2 \text{ nCi/l}$  ( $= 44 \text{ kBq/m}^3$ ) und weniger als  $0,2 \text{ nCi/l}$  ( $= 8 \text{ kBq/m}^3$ ) als Anomalien anzusehen. Zeitbereiche in denen dies erfüllt ist sind Februar 1979–September 1979, Juni 1981–September 1981, November 1981–Mai 1982, einige Tage im Juni 1982 und in der 1. Hälfte 1983.

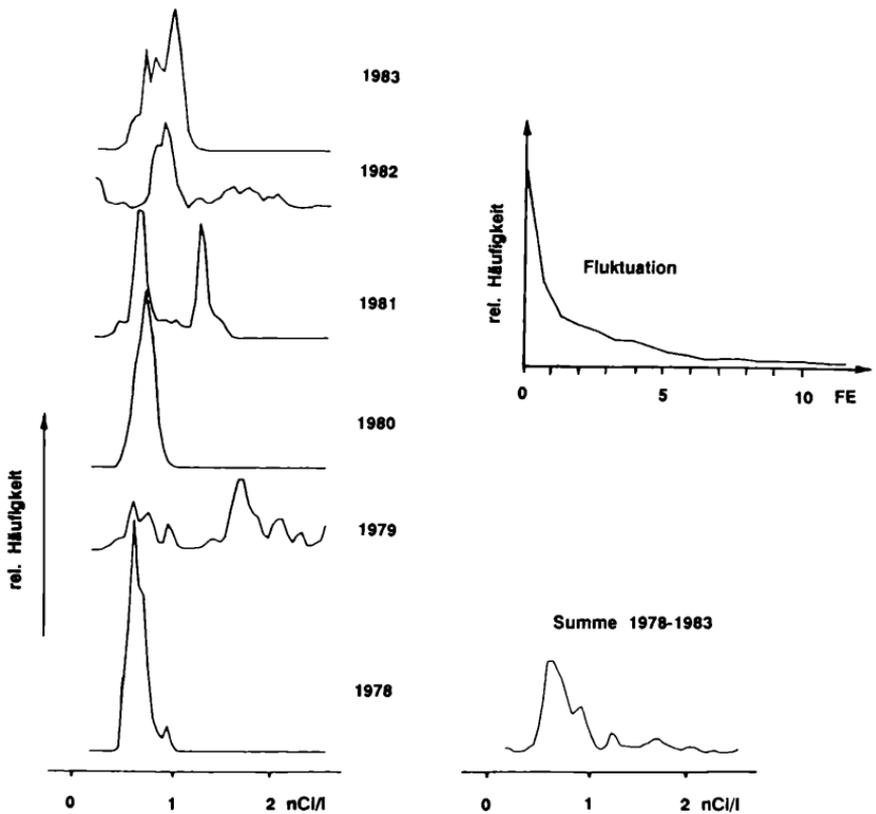


Abb. 5: Verteilungsfunktionen der Radonkonzentration in den Jahren 1978–1983 sowie Verteilungsfunktion über den gesamten Zeitbereich.  
 Rechts oben: Verteilungsfunktion der Fluktuationsfunktion  $F_H$  für den Zeitbereich 1978–1983.

Der gesamte Analysezeitraum beträgt 2367 Tage, daher würde eine mittlere Abweichung des Radongehaltes vom Mittelwert um eine Standardabweichung erst nach einer Dauer von 376 Tagen, als Anomalie nach Definition a) von Kap. 3.2, akzeptiert werden. Werden die Abweichungen größer, so wird die zur Definition der Anomalie notwendige Zeit kleiner. Die Radonkonzentrationen in den Jahren 1979 und 1981/82 erfüllen diese Bedingungen und sind daher nach Definition a) (Kap. 3.2) als Anomalien anzusehen (Abb. 4).

Untersucht man die Häufigkeitsverteilung der Fluktuationsfunktion  $F_H$  (z. B. für  $H = 40\text{h}$ , siehe Abb. 5), so erhält man einen etwa exponentiell abfallenden Verlauf mit einer Halbwertshäufigkeit von ca. 3,2 FE (Fluktuationseinheiten). Als Grenzgröße gemäß Definition c) ergibt sich etwa 26 FE. Damit erfüllt nur die Spitze in  $F_H$  im April 1982 dieses Definitionskriterium (Abb. 9). Dieser Zeitbereich gilt aber bereits nach a) und b) als Anomalie. Würde man das Definitionskriterium c) nicht

so streng fassen, sondern nur etwa 5 FE als Grenzwert annehmen, ergäben sich auch keine weiteren Anomaliebereiche als sie schon nach den anderen Definitionen erhalten wurden.

Die große erste Störung (Feb.–Sept. 1979) wird im folgenden Anomalie I genannt, der Zeitraum Juni 1981–August 1972 wird (zur Vereinfachung werden die zwei knapp hintereinanderliegenden Störungen in der Bezeichnung zusammengefaßt), Anomalie II genannt.

Als nächstliegende Ursachen dieser Anomalien kommen Grundwasserflüsse in Frage. Abb. 6 zeigt den Verlauf des gemittelten Grundwasserpegels der Brunnen Nr. 10, 12, 14 und 16, sowie die Grundwassertemperatur des Brunnens Nr. 14 (Bezeichnung der Brunnen siehe Abb. 3, Brunntiefen in der Größenordnung von einigen Metern; die Daten stellte der Hydrographische Dienst Kärnten zur Verfügung). Die Auswahl der Brunnen für die Grundwasserpegelstandsuntersuchungen erfolgt aufgrund der Vollständigkeit des Datenmaterials, wobei aus den Daten der anderen Brunnen gesichert ist, daß die ausgewählten Brunnen repräsentativ für alle dortigen Grundwassermessstellen sind. Bezüglich der Grundwassertemperatur wurde Brunnen Nr. 14 verwendet, da er einerseits für den Verlauf der Grundwassertemperatur repräsentativ ist, andererseits aber im Mittel den größten Hub zwischen Minimal- und Maximaltemperatur aufweist, somit also auf äußere Einflüsse am empfindlichsten reagieren sollte. Fourieranalysen und Autokorrelationen der Daten zeigen Jahresperioden sowohl in der Grundwassertemperatur als auch im Pegelstand. Rein qualitativ erkennt man, daß keine mit den Radondaten koinzidente oder auch zeitlich verschobene signifikanten Anomalien in den Grundwasserdaten beobachtbar sind. Führt man

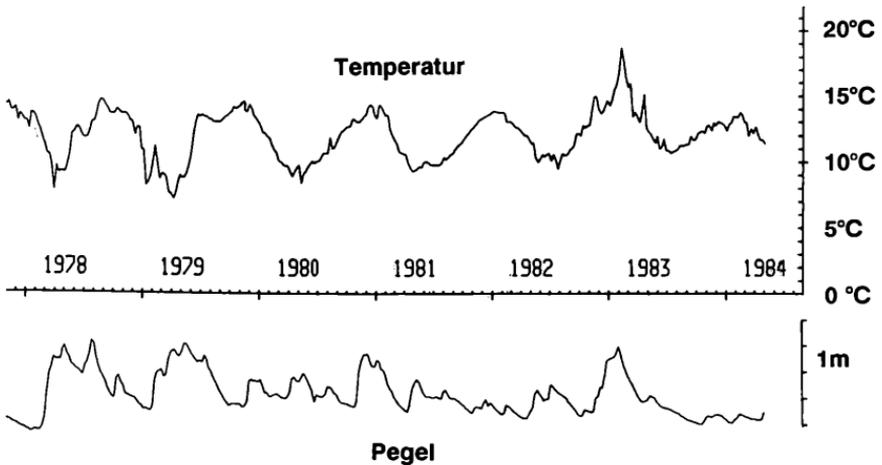


Abb. 6: Mittlerer Grundwasserstand (Brunnen 10, 12, 14, 16) und Grundwassertemperatur (Bohrloch 14) in Warmbad Villach. Die ersichtlichen Schwankungen entsprechen im wesentlichen den jahreszeitlichen Veränderungen gemäß meteorologischer Einflüsse (Schneesmelze usw.).

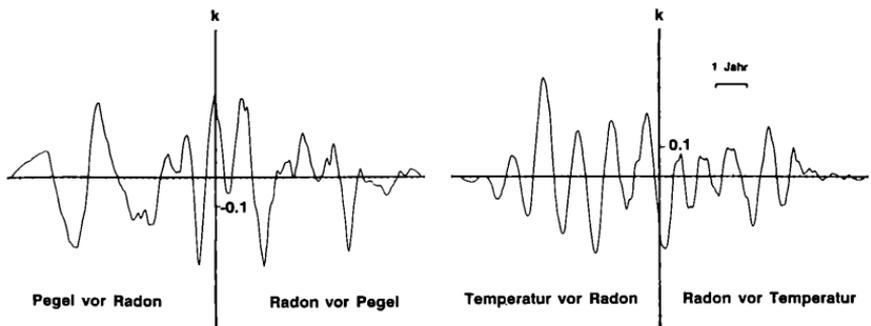


Abb. 7: Kreuzkorrelationen: Grundwassertemperatur gegen Radonkonzentration und Grundwasserpegel gegen Radonkonzentration.  
Abszisse – 1 Einheit entspricht 10 Wochen, Ordinate – Korrelationskoeffizient.

Kreuzkorrelationsrechnungen durch, so liefern diese aufgrund der Jahresperiode, vor allem der Grundwassertemperatur, Korrelationskoeffizienten, die ebenfalls Jahresperioden zeigen (Abb. 7). Die Signifikanzgrenzen für 95 % Wahrscheinlichkeit für einen Korrelationskoeffizienten ungleich Null liegen bei ca. 0,1 für zeitlich gegeneinander nicht verschobene Datenreihen. Da kein lokales Extremum der Korrelationskoeffizienten absolut wesentlich größer ist als die entsprechend um jeweils ein Jahr verschobenen Korrelationskoeffizienten, muß angenommen werden, daß keine vom Jahresgang abweichenden Daten existieren, die mit den Radonanomalien in Zusammenhang stehen. Die vorgetauschte hohe Signifikanz des Korrelationskoeffizienten ist einerseits darauf zurückzuführen, daß die verwendete Grundgesamtheit nicht weitgehend binormalverteilt ist (L. SACHS, 1969), andererseits sind die zeitlich aufeinander folgenden Grundwasserdaten stark korreliert.

Untersucht man den Zusammenhang von Radonkonzentration und Pegelstand (Abb. 7, links), erhält man wieder Korrelationskoeffizienten mit relativ hoher Signifikanz, jedoch gilt auch hier das für die Grundwassertemperatur Gesagte, so daß die berechneten Signifikanzen zu groß erscheinen. Betrachtet man gleichzeitig die Radonkonzentration (Abb. 4) und den Pegelstand (Abb. 6), so erkennt man, daß die Anomalie I mit einem hohen Pegelstand zusammenfällt. Da Anomalie II etwa zur Zeit eines mittleren (bis niedrigen) Pegelstandes auftrat, liefert sie für den Korrelationskoeffizienten nur einen geringen Beitrag, d. h. der Korrelationskoeffizient von 0,28 für unverschobene Datensätze ist im wesentlichen nur auf Anomalie I zurückzuführen. Verschiebt man die beiden Datenreihen so, daß Anomalie I dem Niedrigwasserstand entspricht, ändert sich der Beitrag von Anomalie II zum Korrelationskoeffizienten praktisch nicht, da sich die entsprechenden Pegelstandsdaten bei dieser zeitlichen Verschiebung nur wenig ändern. Das bedeutet, daß die möglicherweise relevanten Korrelationskoeffizienten bei keiner und einer Verschiebung von ca. 20–30 Wochen eigentlich nur den Beitrag der Anomalie I repräsentieren. Da also kein gleichartiges Verhalten des Pegels

vor oder während der Anomalien I und II vorliegt, kann daraus geschlossen werden, daß das Grundwasser die Radonanomalien nicht verursacht haben kann. Nichtsdestoweniger bleibt aber die Möglichkeit bestehen, daß ein weniger starker Einfluß des Grundwassers auf die Radonkonzentration existiert.

Eine gleichartige Untersuchung des Zusammenhanges der Radonkonzentration mit dem äußeren Luftdruck hat gezeigt, daß dieser weder für die Anomalien verantwortlich ist, noch daß eine Korrelation zu den Radonwerten außerhalb der Anomaliezeiträume besteht. Dies ist insofern von Bedeutung, als aus vielen Untersuchungen (kleine Zusammenstellung in C.-Y. KING, 1986) bekannt ist, daß die Radonkonzentration in Bodengasen zumeist mit der zeitlichen Ableitung des Luftdruckes korreliert ist. Es ergibt sich daraus auch die Schlußfolgerung, daß Radonkonzentrationsmessungen in Quellwässern i. a. Bodengasmessungen vorzuziehen sind.

Untersuchungen bezüglich der Niederschlagstätigkeit ergaben, daß diese ebenfalls nicht Ursache der Anomalien I und II sein können. So ist keine mit den Radonanomalien koinzidente extreme Abweichung von den jahreszeitlich bedingten Durchschnittswerten feststellbar. Wie in diesem Kapitel noch ausgeführt wird, dürfte aber ein Zusammenhang zwischen Niederschlagstätigkeit und kurzfristigen Radonkonzentrationschwankungen bestehen. Die Beeinflussung der Quelle durch äußere Faktoren wird auch durch eine Fourieranalyse (Analysezeitraum: 6 Jahre) bestätigt, die u. a. ein relatives Maximum für eine Periodenlänge von einem Jahr zeigt. Dies stimmt auch mit den Ergebnissen der Isotopenuntersuchungen von H. Zojer (H. ZOJER, 1980) überein.

Somit ergibt sich einerseits die Konsequenz, daß bei Schwankungen der Radonkonzentration im Bereich von etwa 2 Standardabweichungen (95 % Vertrauensniveau) um den jeweiligen laufenden Mittelwert, Niederschlagsdaten zu beachten sind, d. h. der Niederschlag einen Einfluß auf den Radongehalt aufweist, dieser jedoch nicht ausreicht Anomalien der beobachteten Größe zu verursachen. Die beiden Anomalien sind daher nicht auf meteorologische Ursachen oder auf Grundwassereinflüsse rückführbar sind.

Als weitere mögliche Ursachen für die Radonanomalien I und II kommen künstlich verursachte Störungen der Quellwasserhorizonte in Frage. Vor und während der Anomalie I konnten keine Bohrtätigkeit, Pumpversuche usw. festgestellt werden. Anders verhält es sich während der Anomalie II. Es wurde etwa 100 m von der Quelle entfernt die Bohrung 1/81 niedergebracht (verrohrt bis -150 m, Endteufe -268 m). Nach Fertigstellung der Bohrung wurden vom 9. 6. 1981 bis 12. 6. 1981 Pumpversuche unternommen, wobei eine maximale Absenkung des Wasserpegels um 11,9 m bei einer Förderung von 10,75 l/s erfolgte. Die unmittelbare zeitliche Nähe mit dem Einsetzen der Anomalie II lassen diese Pumpversuche als Ursache der Anomalie vorerst durchaus wahrscheinlich erscheinen. Dagegen spricht jedoch das lange Andauern der Anomalie, welches sich kaum durch diesen relativ kurzfristigen

Pumpversuch erklären läßt. Ein weiteres Indiz, daß dieser Pumpversuch nicht Ursache der Radonanomalie war, ist ein weiterer Pumpversuch, der vom 18. 4. bis 5. 5. 1983 durchgeführt wurde. Letzterer verursachte nämlich bei etwa gleicher Pumpleistung keinen Anstieg der Radonkonzentration, vielmehr ist zur Zeit dieses Pumpversuches eine eher geringe Radonkonzentration feststellbar. Aus diesen beiden Gründen dürfte daher der Pumpversuch vom 9. 6. bis 12. 6. 1981 nicht Ursache der Anomalie II sein.

Schließlich haben Überprüfungen der Apparatur ergeben, daß die beobachteten Anomalien nicht durch Meßfehler erklärt werden können. Daher müssen andere Faktoren als Ursachen angenommen werden.

So wurden im nächsten Schritt seismische Ereignisse auf mögliche Koinzidenzen mit Radonanomalien untersucht. Die Auswahl der in Frage kommenden Erdbeben erfolgte nach (2.1), wobei die Parameter aus der, für  $M \geq 4$  den größten Einflußbereich liefernden Zusammenstellung (siehe Kap. 2.1) genommen wurden und zusätzlich der Parameter  $b$  um 0,3 verkleinert worden ist, damit eventuelle Ungenauigkeiten bei der Magnitudenbestimmung berücksichtigt werden:

$$M \geq 2.4 \cdot \lg D - 0.43 - 0.3 = M_{\min} - 0.3 \quad (4.1)$$

Durch diese großzügige Festlegung des Untersuchungsbereiches soll die Wahrscheinlichkeit des Nichtbeachtens eines möglicherweise relevanten Bebens klein gehalten werden. Da man jedoch erwarten kann, daß unterschiedliche Bebengebiete auch unterschiedliche Auswirkungen auf das Quelleinzugsgebiet haben werden, bedeutet dies, daß sicher nicht alle nach (4.1) ausgewählten Beben mit Radonanomalien in Zusammenhang gebracht werden können.

Die nach (4.1) zur Untersuchung herangezogenen Beben sind in Tab. 1 zusammengefaßt. Die Daten stammen einerseits vom Centre Seismologique Europeo-Mediterraneen Strasbourg (Determination Hypocentral, 1976–1984), andererseits sind sie den Aufzeichnungen der Nahbebenstation Bleiberg entnommen. Die Zeitpunkte dieser Beben sind in Abb. 4 bzw. Abb. 8 und 9 markiert.

Betrachtet man vorerst Anomalie I (Abb. 8), so ist deren Beginn durch einen relativ raschen Anstieg der Radonkonzentration gekennzeichnet. Innerhalb eines Zeitraums von wenigen Tagen stieg die Radonkonzentration von  $25 \text{ kBq/m}^3$  bis zu einem Wert von  $59 \text{ kBq/m}^3$  an. Im weiteren fiel vorerst die Radonkonzentration wieder etwas zurück, jedoch konnten in den nächsten 4 Monaten im Mittel weiter ansteigende Werte registriert werden, wobei nur zweimal deutliche Einbrüche des Anstiegs beobachtbar waren. Diese Erhöhung der Radonkonzentration erfolgte jedoch wesentlich langsamer als jene zu Beginn der Anomalie. Das Maximum wurde schließlich am 3. Juni 1979 mit  $98 \text{ kBq/m}^3$  erreicht, jedoch schon am selben Tag kam es innerhalb weniger Stunden zu einer Reduktion der Radonkonzentration auf ca.  $80 \text{ kBq/m}^3$ . Noch im selben Monat ging der Radongehalt der Quelle auf ca.  $60 \text{ kBq/m}^3$  zurück und verblieb etwa in dieser Größe bis Mitte September. Schließlich wurde

Beben Nr.	Datum	N/E	M	d (km)	M <sub>min</sub>	
	1	78 02 20	46,45/13,33	4,0	39,6	3,4
	2	78 04 02	46,27/13,35	3,5	50,2	3,7
	3	78 04 03	46,16/13,19	4,2	67,6	4,0
	4	78 04 06	46,28/13,31	3,4	51,6	3,7
	5	78 04 30	46,22/13,21	3,8	61,8	3,9
	6	78 06 20	40,74/23,23	6,8	998,0	6,8
	7	78 12 06	46,32/13,25	3,5	52,4	3,7
	8	78 12 12	46,13/12,71	4,4	89,5	4,3
	9	78 12 17	46,11/14,11	3,9	59,4	3,8
I	10	79 04 15	42,09/19,20	6,9	659,5	6,3
I	11	79 04 15	42,32/18,68	6,3	612,9	6,3
I	12	79 04 18	46,31/13,25	4,8	53,0	3,7
I	13	79 05 24	42,26/18,75	6,8	621,7	6,3
I	14	79 09 19	42,81/13,06	5,8	425,2	5,9
	15	80 05 18	43,29/20,84	6,4	664,3	6,3
	16	80 07 09	39,27/23,04	7,0	1106,9	6,9
	17	80 07 09	39,26/22,56	6,7	1081,8	6,9
	18	80 11 23	40,91/15,37	6,5	644,7	6,3
	19	81 02 24	38,22/22,93	7,1	1193,4	7,0
	20	81 02 25	38,12/23,14	6,8	1213,2	7,0
	21	81 03 04	38,21/23,29	7,0	1212,9	7,0
	22	81 04 23	46,34/13,28	3,5	49,2	3,6
	23	81 06 10	46,43/13,31	3,6	41,9	3,5
II	24	81 06 15	47,06/14,69	3,9	84,7	4,2
II	25	81 06 28	46,47/12,93	3,8	68,0	4,0
II	26	81 08 13	44,82/17,26	5,8	333,4	5,6
II	27	81 08 30	46,36/13,29	4,3	47,3	3,6
II	28	81 08 31	46,33/13,35	3,4	45,6	3,6
II	29	81 12 03	46,35/13,63	2,9	30,6	3,1
II	30	81 12 05	46,32/12,69	4,4	90,5	4,3
II	31	81 12 19	39,37/25,25	6,9	1227,3	7,0
II	32	82 01 18	39,97/24,41	7,0	1129,3	6,9
II	33	82 03 16	46,15/16,13	4,7	185,5	5,0
	34	83 06 17	46,33/12,93	5,0	73,0	4,0
	35	83 08 06	40,14/24,79	6,7	1139,8	6,9
	36	83 08 31	46,77/10,49	5,1	253,0	5,3
	37	83 10 18	46,69/13,90	3,1	12,8	2,2
	38	83 11 09	44,70/10,30	5,5	344,2	5,7
	39	83 12 20	46,33/13,33	3,5	46,8	3,6
	40	84 03 11	45,88/15,49	4,5	152,5	4,8
	41	84 04 15	47,68/15,87	4,8	197,2	5,1
	42	84 04 29	43,23/12,48	5,7	388,6	5,8

Tabelle 1: Alle Beben zwischen November 1977 und April 1984, die (4.1) erfüllen. Friarler Beben sind durch gekennzeichnet. I, II am linken Rand kennzeichnen Beben während der Radonanomalien.

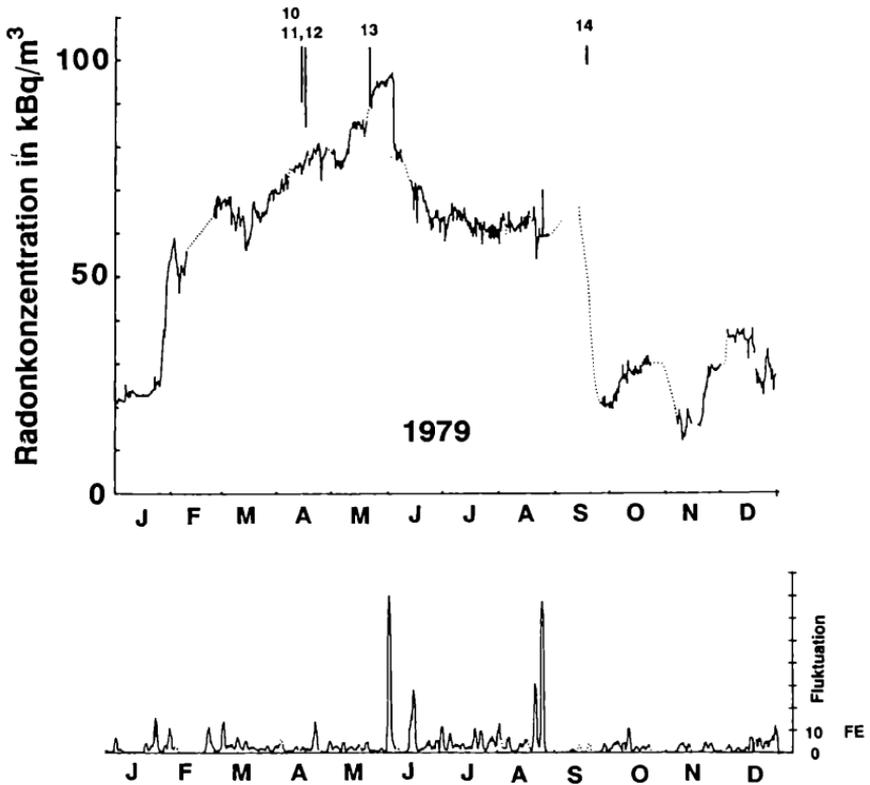


Abb. 8: oben: Radonanomalie 1979 und alle Beben, die (4.1) erfüllen, Numerierung nach Tab. 1. Die Länge der Bebensymbole ist ein Maß wieviel die Magnitude über dem Wert nach (4.1) liegt.  
 unten: Radonfluktationsfunktion  $F_{40}$  gemäß (3.4) in FE ( $1 \text{ FE} = 3 \text{ [kBq/m}^3\text{]}^2$ ).

Ende September 1979 eine Radonkonzentration von nur mehr ungefähr  $20 \text{ kBq/m}^3$  gemessen. Aufgrund eines Ausfalls der Registrierapparatur konnte der Übergang vom hohen Radonwert Mitte September zum niedrigen, bzw. normalen Wert nicht aufgezeichnet werden. Wiederholte Eichungen der Apparatur haben den Meßwerten jedoch eine hohe Zuverlässigkeit bestätigt, so daß an der Realität dieses Abfalls der Radonkonzentration nicht zu zweifeln ist. In den folgenden 3 Monaten konnten relativ große Schwankungen des Radongehaltes ( $\pm 40\%$ ) um den Normalwert beobachtet werden.

Die in den Zeitraum der Anomalie fallenden Beben, die (4.1) erfüllen, sind die Beben Nr. 10 bis 14. Beben Nr. 10 bis 12 liegen im Zeitraum des eher langsamen Anstiegs der Anomalie (April 1979), wobei ca. 10 bis 20 Tage nach diesen Beben ein leichter Rückgang der Radonkonzentration beobachtbar war. Beben Nr. 13 trat am 24. 5. 1979, also 10 Tage vor dem abrupten Rückgang der Radonkonzentration auf, und Beben Nr. 14 fällt

in den Zeitraum in welchem die Radonkonzentration auf den Normalwert zurückfiel. Es ist also eine Koinzidenz der Katastrophenbeben von Montenegro (Beben Nr. 10, 11, 13) mit der anomal hohen Radonkonzentration, und des Bebens in Mittelitalien mit dem Rückgang der Radonkonzentration auf den Normalwert, festzustellen.

Die Radonanomalie II (1981/82, siehe Abb. 9) zeigt einen wesentlich anderen Verlauf als jene im Jahre 1979. Einerseits erfolgte der Einsatz der Anomalie bedeutend rascher (innerhalb von etwa einer Stunde), andererseits weist sie keine klar ansteigende Tendenz auf, wie Anomalie I (1979), sondern es ist vielmehr eine mehrmalige Unterbrechung der Anomalie feststellbar. Während dieser Anomalie sind als möglicherweise relevante Ereignisse die Beben Nr. 24 und 33 zu untersuchen. Von besonderem Interesse scheint im Falle der Anomalie von 1981/82 das

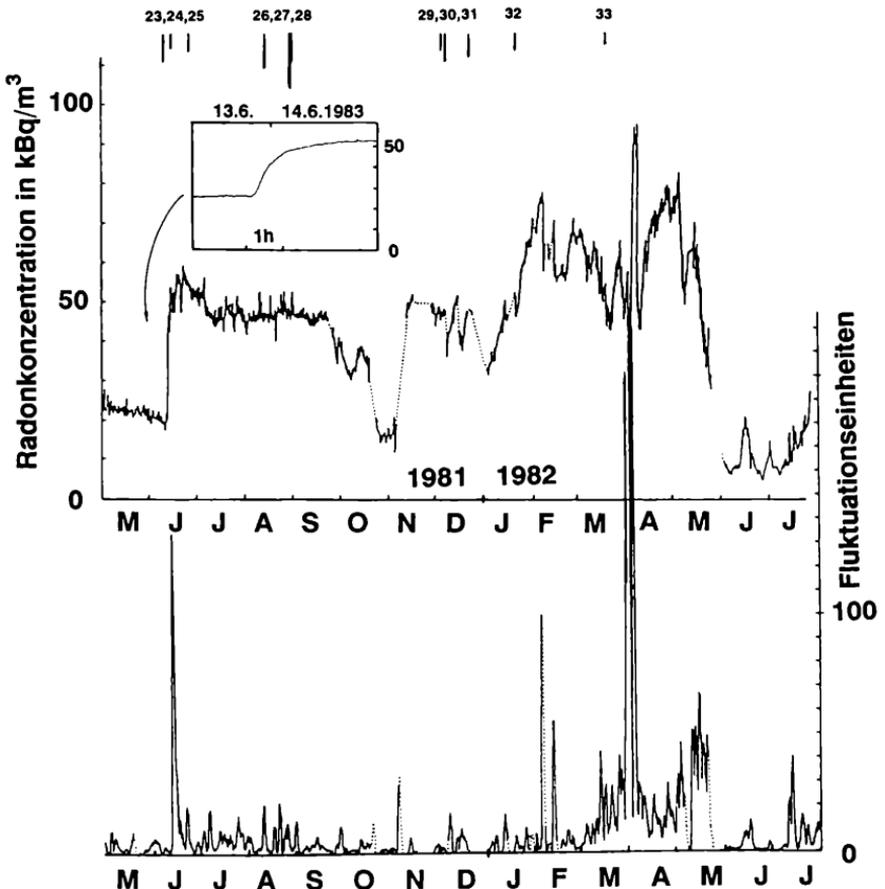


Abb. 9: oben: Radonanomalie 1981/82 und alle Beben, die (4.1) erfüllen, Numerierung nach Tab. 1 Bebensymbole wie in Abb. 8.

unten: Radonfluktuationsfunktion  $F_{40}$  in FE.

Erdbeben von Obdach (15. 6. 1981/M = 3,9, Beben Nr. 24, Tab. 1 und Abb. 9) zu sein, welches nur einen Tag nach dem abrupten Anstieg der Radonkonzentration auftrat.

Während der Anomalie II ist im April 1982 eine zusätzliche Spitze im Radongehalt aufgetreten (Abb. 9), zu welcher kein seismisches Ereignis gefunden werden konnte, das (4.1) erfüllt. Es käme in diesem Fall nur das Beben von Judenburg vom 9. 4. 1982/8<sup>25</sup> in Frage, jedoch mit einer Distanz von 92 km zur Quelle war dieses Beben um mindestens eine Magnitudeneinheit zu klein, um (4.1) zu erfüllen.

Aus Abb. 4 bzw. Tab. 1 sind weitere Beben ersichtlich, die (4.1) erfüllen, jedoch nicht in den Zeitraum einer Anomalie fallen. Zur Prüfung ob ein Zusammenhang zwischen Radonanomalien und Beben besteht, soll ein 4-Felder-Test verwendet werden. Der Untersuchungszeitraum umfaßt insgesamt 2.367 Tage während denen an 564 Tagen ein anomaler Radongehalt festgestellt werden konnte. Trägt man in eine 4-Felder-Tafel alle jene Tage ein, an denen zumindest ein Beben während einer Anomalie auftrat und ebenso alle Tage mit mindestens einem Beben ohne gleichzeitiger Radonanomalie, ergibt sich damit folgendes Bild:

Tage	mit Beben	ohne Beben	Summe
mit Anomalie	14	550	564
ohne Anomalie	26	1777	1803
Summe	40	2327	2367

Es ergibt sich ein  $\chi^2 = 2,8$ , bzw. nach einem Woolf Test ein  $G = 2,6$ . Das bedeutet, daß ein Zusammenhang zwischen Beben und den Radonanomalien mit ca. 95 % Wahrscheinlichkeit anzunehmen ist. Ein Test nach Fisher ergibt eine Signifikanz von 93 % (L. SACHS, 1969). Man kann den 4-Felder-Test variieren, indem man das Einheitsintervall vergrößert, d. h. alle jene Tage zählt, die weniger als z. B. 5 Tage Abstand zu (mindestens) einem Erdbeben aufweisen. In diesem Fall verringert sich die Wahrscheinlichkeit eines Zusammenhanges auf ca. 85 %. Dies ist eine Folge der Überlappung der verwendeten Zeitintervalle um die Zeitpunkte der Beben. Interessant wäre, ob eine Untermenge der nach (4.1) ausgewählten Beben eine wesentlich andere Wahrscheinlichkeit für einen Zusammenhang mit den Anomalien liefert. So ergibt sich etwa für alle Beben mit Epizentrum in Friaul folgendes Schema:

Tage	mit Beben	ohne Beben	Summe
mit Anomalie	6	558	564
ohne Anomalie	13	1790	1803
Summe	19	2348	2367

Man erhält  $\chi^2 = 0,64$  oder  $G = 0,59$  und damit nur mehr eine Wahrscheinlichkeit von 78 %, bzw. nach Fisher 71 %, für einen Zusammenhang zwischen Radonanomalien und Beben in Friaul.

#### 4.1.2. Empirische Betrachtungen

Unter der Annahme, daß Beben ungefähr gleicher Magnituden, Herdtiefen und Herdgebiete ähnliche Auswirkungen auf das Quelleinzugsgebiet der untersuchten Quelle haben, können aus den mit den Anomalien zu korrelierenden Beben weitere gestrichen werden. Insbesondere könnten versuchsweise alle Beben von Friaul als nicht relevant für die Anomalien angesehen werden, da etwa die Friauler Beben Nr. 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9 (siehe Tab. 1 und Abb. 4) zu Zeiten normaler Radonkonzentration aufgetreten sind. Diese Annahme läßt sich mit den berechneten Werten des 4-Felder-Tests vereinbaren. Ebenso sind alle Beben in Griechenland und in Süditalien zu verwerfen. Abb. 10 zeigt die lokale Verteilung aller Beben, die (4.1) erfüllen. Jene Beben, bei welchen die prinzipielle Möglichkeit besteht, daß sie in kausalem Zusammenhang mit den beobachteten Radonanomalien stehen, sind durch schwarz ausgefüllte Kreise eingezeichnet. Man erkennt, daß diese vor allem in SE-Richtung von Warmbad Villach liegen, eine Richtung, die auch durch die Verteilung der Spannungszustände (A. R. RITSEMA, 1974; N. V. SHEBALIN et al., 1974) ausgezeichnet erscheint. Faßt man die so

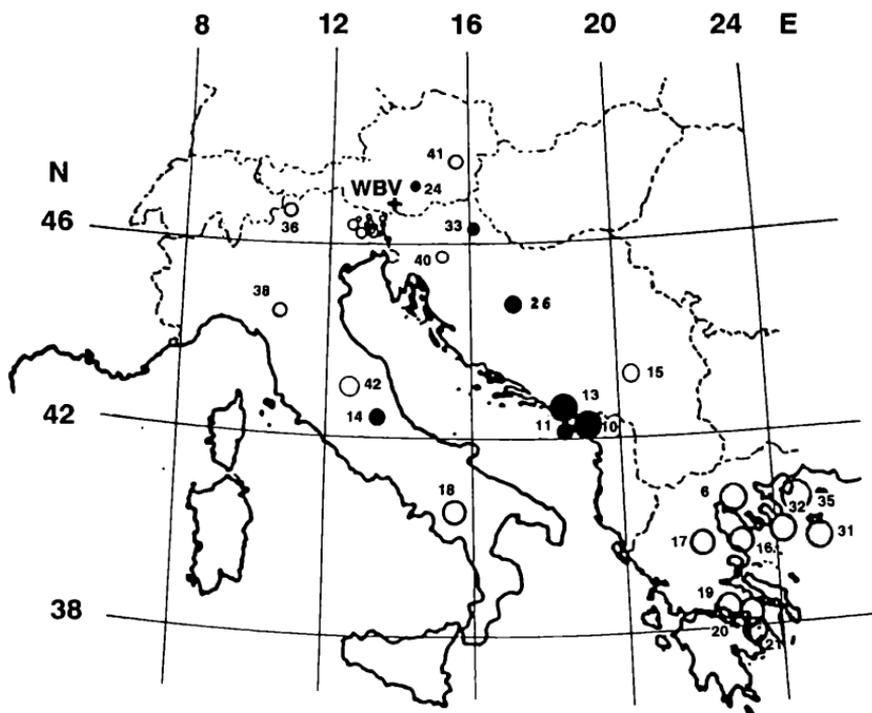


Abb. 10: Erdbeben im Zeitraum November 1977 bis April 1984, die Relation (4.1) erfüllen. Die Numerierung der Beben entspricht Tab. 1. Ausgefüllte Kreise sind Beben, bei denen ein Zusammenhang mit den Radonanomalien I und II denkbar ist.

ausgewählten Beben ( $\varphi > 42^\circ \text{ N}$ ,  $13^\circ < \lambda < 20^\circ \text{ E}$ , jedoch nicht Friaul) wie zuvor zusammen, erhält man:

Tage	mit Beben	ohne Beben	Summe
mit Anomalie	7	557	564
ohne Anomalie	2	1801	1803
Summe	9	2358	2367

Der 4-Felder-Test liefert  $\chi^2 = 14,5$  bzw.  $G = 11,7$  und somit eine Wahrscheinlichkeit von besser 99 %, daß ein Zusammenhang zwischen den ausgewählten Beben in SE-Richtung und den beobachteten Anomalien besteht. Ein Test nach Fisher bestätigt dieses Ergebnis. Die Überprüfung dieses 4-Felder-Tests mit einem Eintrittsfenster von  $\pm 5$  Tagen liefert nur unwesentlich andere Wahrscheinlichkeiten. Aus der Tatsache, daß im Beobachtungszeitraum nur 2 große Anomalien aufgetreten sind und diese dazu benutzt wurden, jene Beben auszuwählen, die als eventuelle Ursachen für die Anomalien in Frage kommen könnten, kann auch der durchgeführte 4-Felder-Test nur als Hinweis für einen Zusammenhang der beobachteten Radonanomalien und der aufgetretenen Beben betrachtet werden. Eine definitive Entscheidung ob die Hypothese einer Sensibilität der Quelle gegenüber bestimmten Beben (etwa SE-Richtung) anzunehmen ist, kann erst nach dem Auftreten weiterer Anomalien getroffen werden. Es soll in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen werden, daß die statistische Absicherung bei vielen in der Literatur zitierten „Erdbebenvorläufern“ oft nicht genügend berücksichtigt wird.

Im nächsten Schritt wurden die Untersuchungen auf eine Analyse der Radonkonzentration des Quellwassers für Zeiten eines normalen Radongehaltes ausgedehnt. Als Ansatzpunkt für solche Untersuchungen können die Schwankungen des Radongehaltes herangezogen werden. Es wird hierzu die in Kap. 3.2 definierte Fluktuationsfunktion  $F_H$  verwendet, die in Abb. 11 unten eingezeichnet ist. Eine Fourieranalyse zeigt, daß diese Funktion einen Jahresgang aufweist (die Analyse erfolgt unter Miteinbeziehung der Anomaliezeiten, da sonst die Zeit zu kurz wäre, um Jahresperioden sehen zu können). Es ist daher eine meteorologische Beeinflussung der Quelle anzunehmen. Die so hervorgerufenen Schwankungen des Radongehaltes sind in ihrer Amplitude wesentlich kleiner als die beobachteten Anomalien. Somit sind diese meteorologischen Einflüsse als Ursache der Radonanomalien auszuschließen. In Abb. 11 sind auch der tägliche Niederschlag sowie die Lufttemperatur einer Meßstation auf der Villacher Alpe ( $13^\circ 40' \text{ N}/46^\circ 36' \text{ E}$ ,  $h = 2.140 \text{ m}$ ) dargestellt. Aus dem entsprechenden Phasenwinkel in der Fourieranalyse ergeben sich die Minima der Radonfluktuation etwa um die Jahreswende. Es liegt daher nahe, diese Minima in einem Zusammenhang mit der Temperatur zu sehen. Der Effekt ist vermutlich über die Niederschlagstätigkeit zu erklären, die in den Wintermonaten i. a. als Schnee auftritt und somit keine Beeinflussung der Quelle hervorrufen kann. Diese Annahme

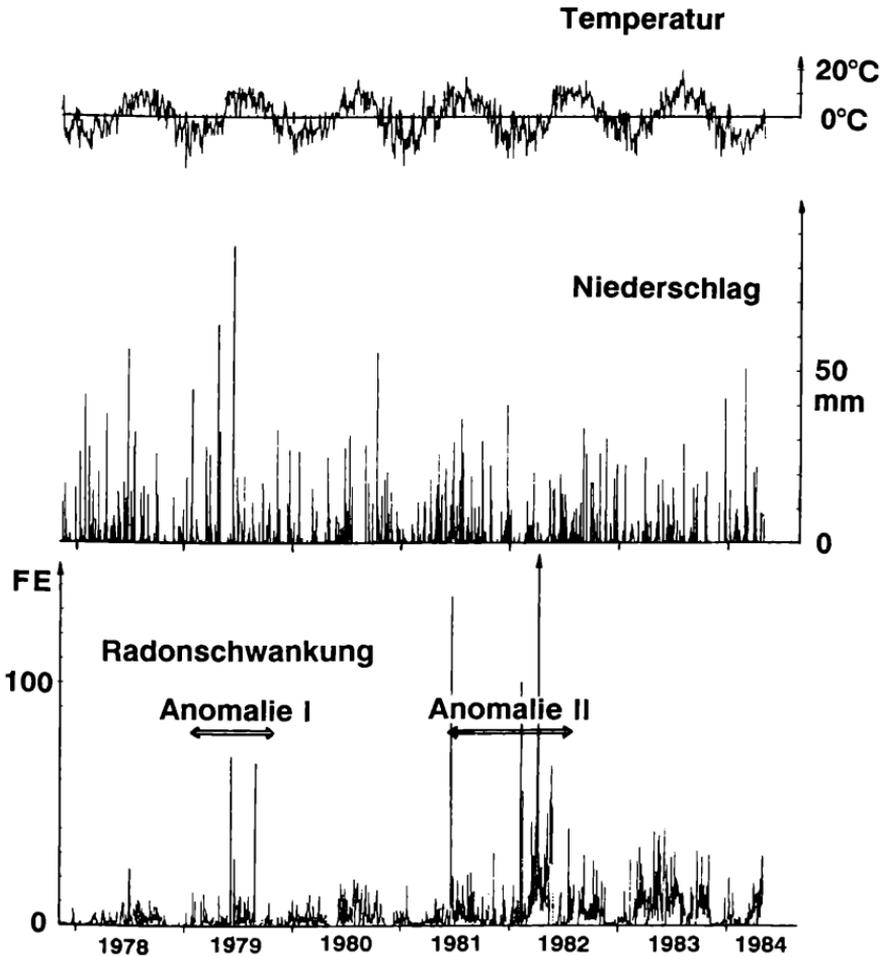


Abb. 11: Temperatur- und Niederschlagswerte der Meßstelle Villacher Alpe, darunter Radonfluktationsfunktion  $F_H$  ( $H = 40h$ ).

wird auch indirekt über die von Zojer (H. ZOJER, 1980) mittels Isotopenverhältnisse festgestellte Beeinflussung der Quelle durch Oberflächenwasser bestätigt. Versucht man eine Beeinflussung der Fluktationsfunktion festzustellen, in einer Größenordnung wesentlich kleiner als jene von Anomalien, so wird man durch nahezu andauernd auftretende „Hintergrundfluktuation“ behindert. Da die Fluktationsfunktion eine ausgeprägte Periode von einem Jahr aufweist (siehe auch Abb. 11 unten), kann man hoffen, daß eventuelle bebenrelevante Fluktuationen, die in den Sommermonaten im Rauschen verschwinden würden, in den Winterzeiträumen sichtbar sein könnten. Ist die Annahme gerechtfertigt, daß die unterschiedliche Eindringfähigkeit von Niederschlagswasser in die

Quelle den Unterschied in den Fluktuationen zwischen Sommer und Winter hervorruft, könnte man aus den meteorologischen Daten im Einzugsbereich der Quelle jene Zeitbereiche abzugrenzen versuchen, bei denen die Niederschlagstätigkeit keinen Einfluß auf die Quelle haben sollte. Da jedoch die entsprechende Übertragungsfunktion nicht bekannt ist, muß man jene Zeitintervalle wählen, in denen die 1-Jahres-Periode der Fluktuationsfunktion ihre Minima hat. Es ist jedoch zu beachten, daß diese Minima nur im Mittel auf den jährlich gleichen Zeitpunkt fallen und man daher auch in diesen Zeitperioden von einem Rauschen gestört sein kann. Aus dem Phasenwinkel der 1-Jahres-Periode ergeben sich als sinnvolle Untersuchungszeiträume jeweils die Zeiten von November bis März. Im Beobachtungszeitraum können insgesamt 7 solche Zeitintervalle untersucht werden, wobei die Zeit vom November 1981 bis März 1982 innerhalb des Anomaliezeitraumes II liegt und daher nicht betrachtet werden soll. Abb. 12 zeigt den Radongehalt, die Fluktuationsfunktion  $F_{40}$  sowie die Energie des jeweils stärksten Bebens eines Tages in einer Umgebung bis 200 km von der Quelle von Warmbad Villach im Jahr 1977/78. In Abb. 14 sind die Fluktuationsfunktion sowie die Beben bis 200 km Entfernung der Jahre 1978/79, 1979/80, 1980/81, 1981/82, 1982/83 und 1983/84 zu sehen, wobei 1979 der Bereich der Anomalie ausgelassen wurde. Um einen möglichen Zusammenhang zwischen Radonfluktuationsfunktion und Beben zu untersuchen, wurden Kreuzkorrelationsrechnungen durchgeführt (H. FRIEDMANN, 1979). Abb. 13 zeigt für den Zeitraum 1977/78 die Ergebnisse, wobei die strichliert eingezeichneten Linien den Signifikanzniveaus für 95 % und 99 % für einen Korrelationskoeffizienten ungleich Null entsprechen. Wie aus dieser Abbildung ersichtlich ist, deutet die Kreuzkorrelationsrechnung auf einen kausalen Zusammenhang zwischen dem Eintritt eines Erdbebens innerhalb einer Entfernung von 200 km und einer nachfolgenden Schwankung des Radongehaltes hin. Es ist jedoch zu beachten, daß die beiden Datenreihen nicht annähernd normalverteilt sind, so daß die berechneten Korrelationskoeffizienten zu hohe Signifikanz vortäuschen. Nichtsdestoweniger ist in diesem Zusammenhang interessant, daß die Schwankung des Radongehaltes ca. 5 bis 10 Tage nach dem Beben auftritt, was auch etwa jener Zeit entspricht, die zwischen dem zweiten starken Beben in Montenegro (24. 9. 1979) und dem Rückgang der Radonkonzentration von etwa dem dreifachen des Normalwertes auf den etwa doppelten Normalwert zu beobachten war. Es liegt nahe diese Zeitdifferenz von etwa 5 bis 10 Tagen auf die Fließgeschwindigkeit des Quellwassers vom Bereich der Radonaufnahme bis zur Erdoberfläche zurückzuführen. Zusätzlich sei bemerkt, daß Schwankungen des Radongehaltes und anderer chemischer Wasserinhaltsstoffe nach Erdbeben auch anderwärtig beobachtet worden sind (S. A. FEDOTOV et al., 1982).

Von den Beben in Abb. 12 erfüllt nur das Beben vom 20. 2. 1978 Relation (4.1). Ein möglicher Zusammenhang der Beben im Dezember 1977 mit den darauf folgenden Radonfluktuationen ist kein Widerspruch

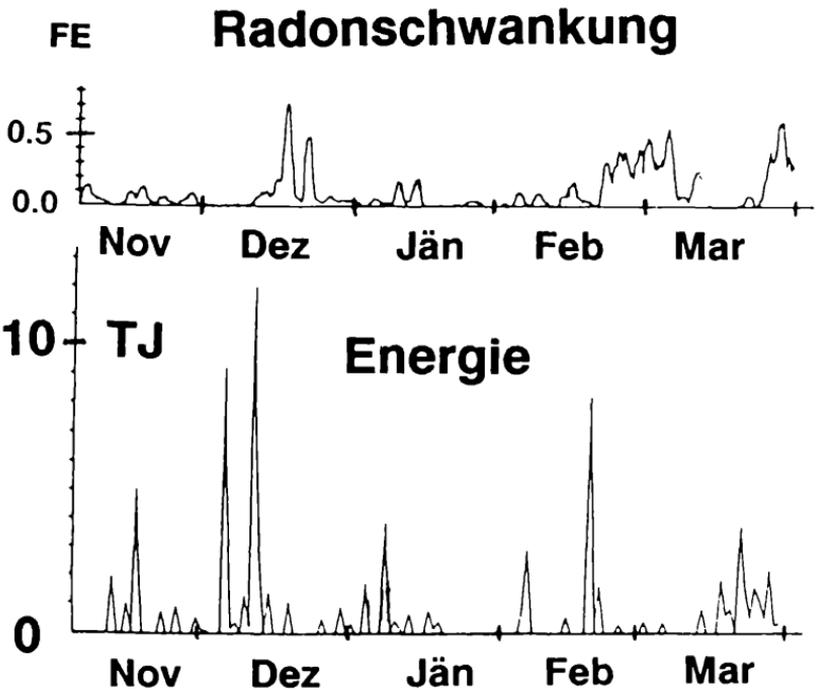
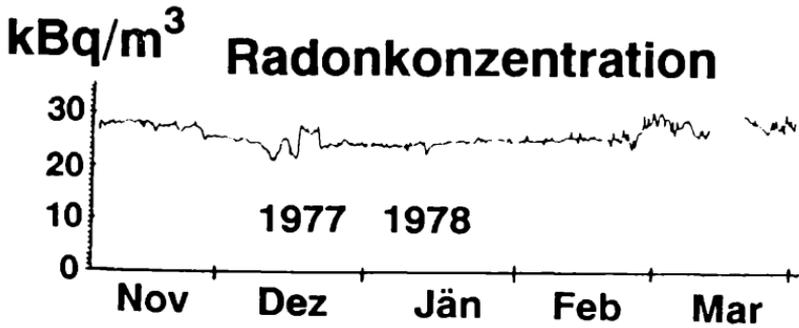


Abb. 12: Radonkonzentration, Radonfluktationsfunktion und Energie der stärksten Beben eines Tages in einer Entfernung 20–200 km um die Quelle.

zu (4.1), da die Fluktuationen nicht die Größe wie sie nach Kapitel 2.1 für eine Anomalie verlangt werden, erreichen.

Es erhebt sich nun die Frage, wie weit ein Zusammenhang zwischen Beben und Radonfluktuationen auch in anderen Zeiträumen feststellbar ist. Betrachtet man das Verhalten der Fluktuationsfunktion in den anderen Winterzeiträumen (Abb. 14), ist oft die zeitliche Nähe von

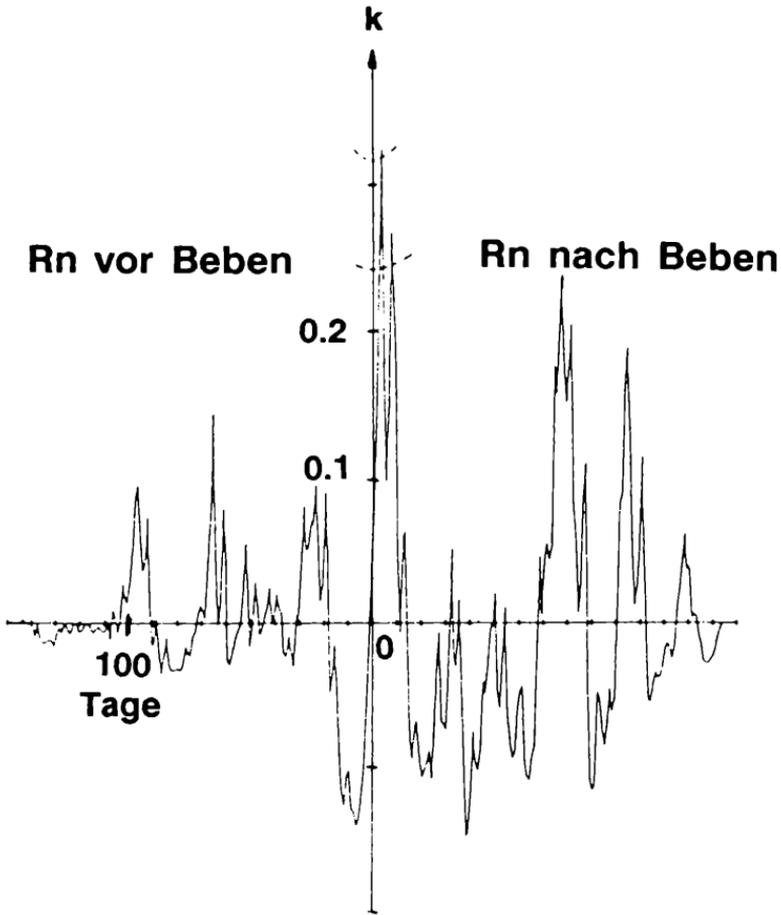


Abb. 13: Kreuzkorrelation Beben gegen Radonfluktuation für den Zeitbereich von Abb. 12.

Spitzen der Fluktuationsfunktion und Erdbeben bemerkenswert. In einigen Fällen erscheint die Fluktuationsfunktion vor dem Beben, in anderen Fällen ist sie jedoch danach registriert worden. Es gibt aber auch Fälle wo zwar Beben aufgetreten sind aber keine Fluktuationen beobachtet werden konnten und umgekehrt.

Ein 4-Felder-Test wie er für die Gesamtradonkonzentration durchgeführt wurde, wobei als Kriterien eine Bebenenergie größer 4 TJ und eine Radonfluktuation größer 5 FE genommen wurden, verneint bei einer gemeinsamen Betrachtung aller Zeitbereiche einen kausalen Zusammenhang mit hoher Wahrscheinlichkeit ( $> 80\%$ ). Es ist jedoch bemerkenswert, daß statistische Untersuchungen der einzelnen Zeiträume z. T. hohe Vertrauensniveau im Hinblick auf Kausalität liefern (siehe Abb. 13). Betrachtet man z. B. etwa den Winterzeitraum 1983/84,

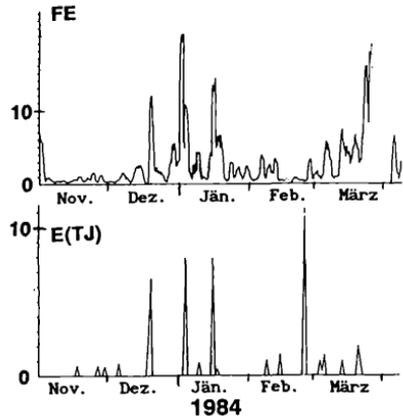
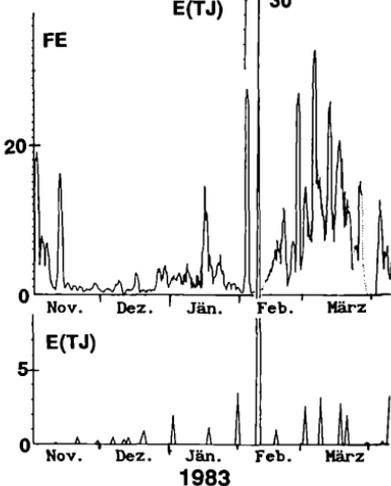
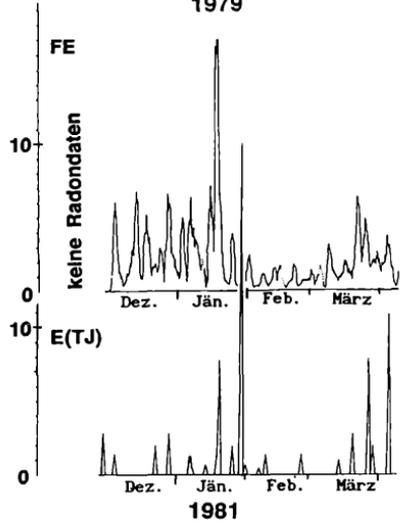
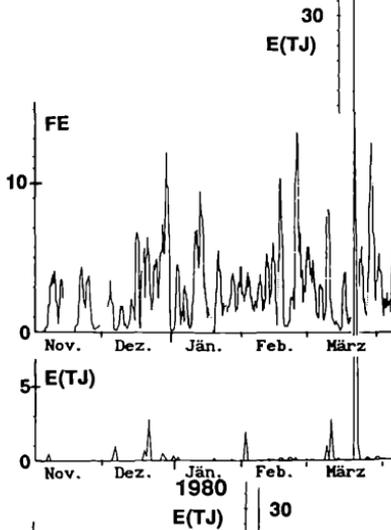
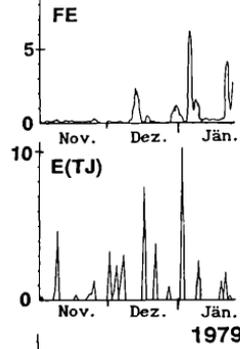
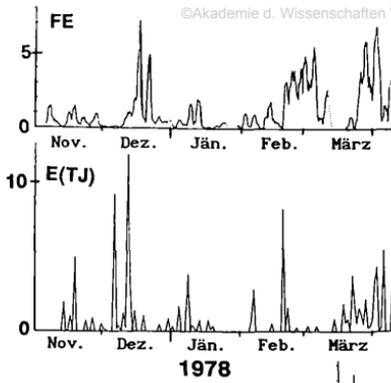


Abb. 14: von oben nach unten: Radonfluktationsfunktion (in FE) und Energie (in TJ) der stärksten Beben eines Tages in einer Entfernung 20–200 km um die Quelle von Warmbad Villach in den Wintern 1977/78, 1978/79, 1979/80, 1980/81, 1982/83 und 1983/84.

so ist ein auffallendes zeitliches Zusammentreffen der Beben im Dezember und Jänner mit Spitzen der Fluktuationsfunktion zu erkennen. Keine Fluktuation ist zum Beben vom 26. 2. 1984 sichtbar, jedoch lag in diesem Fall das Epizentrum des Bebens in der Nähe von Innsbruck, in einem Gebiet, das ein anderes seismisches Verhalten aufweist als das Gebiet der Beben im Dezember und Jänner und mit diesem nicht in Zusammenhang zu stehen scheint (K. ARIC, 1981). Es bestehen nun die Alternativen, daß entweder die manchmal auftretenden Koinzidenz zwischen Beben und Radonfluktuationen rein statistischer Natur sind,

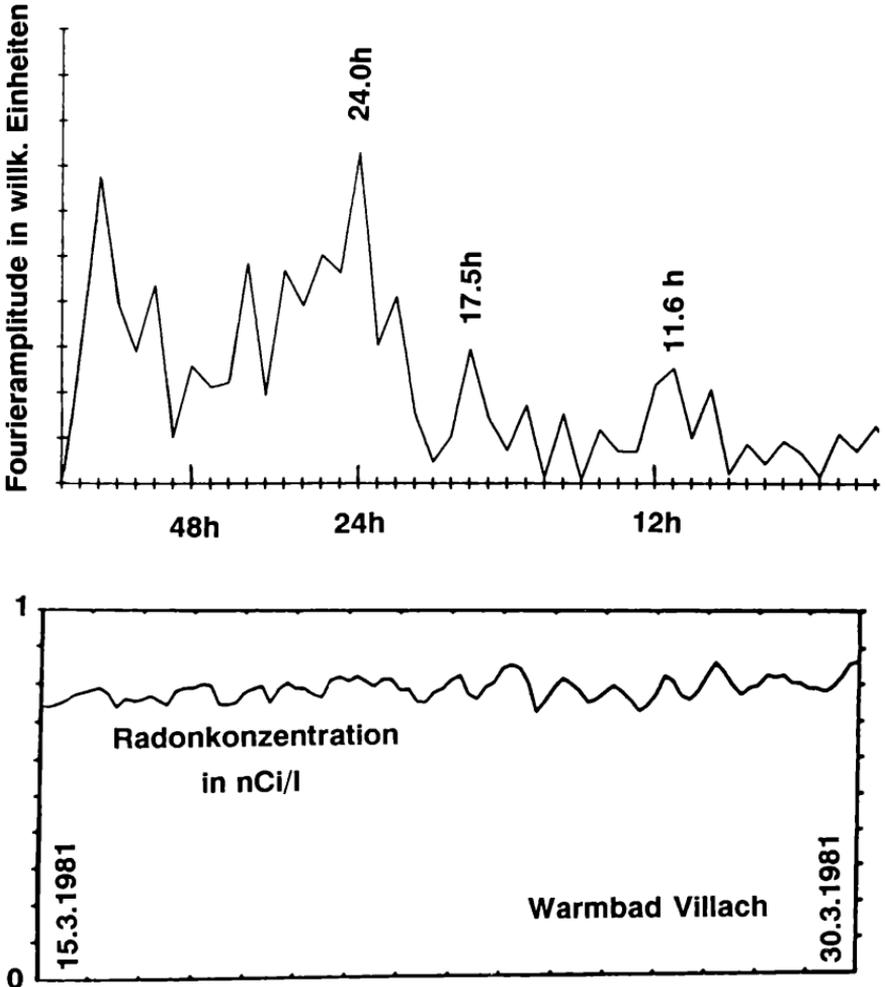


Abb. 15: Beispiel für tagesperiodische Schwankungen des Radongehaltes der Freibadquelle von Warmbad Villach.  
oben: Frequenzspektrum für den Zeitraum 15. 3. 1981 bis 30. 3. 1981.

oder daß ein wesentlicher Anteil der Fluktuationen auf andere Ursachen zurückzuführen ist, und eventuelle kausale Zusammenhänge durch diese Hintergrundfluktuationen überdeckt werden.

Trotz verschiedener gegenteiliger Indizien muß jedoch aus den durchgeführten Untersuchungen bezüglich der Radonfluktuationen geschlossen werden, daß ein Zusammenhang mit Erdbeben statistisch nicht belegt werden kann.

Von den beschriebenen Fluktuationen zu unterscheiden sind periodische Konzentrationschwankungen im Radongehalt, die vereinzelt jeweils über einen Zeitraum von etwa 2 bis 6 Wochen auftreten (siehe Abb. 15 unten). Diese Schwankungen des Radongehaltes zeigen Perioden von einem bzw. einem halben Tag und Amplituden in der Größenordnung von 10–15 %. Ähnliche Effekte sind nicht nur im Radongehalt von Quellwässern, sondern auch in den Transportgeschwindigkeiten von Tiefengasen und in Pegelständen von Grundwässern sowohl in der UdSSR, in den USA und in Japan gefunden worden (V. L. BARSUKOV et al., 1985; A. I. TUGARINOV et al., 1977; R. SUGISAKI, 1981; P. M. MERIFIELD, D. L. LAMAR, 1985; J. H. HEALY, T. C. URBAN, 1985; V. S. LEBEDEV et al., 1985). Diese periodischen Schwankungen wurden von den genannten Autoren (zumeist jedoch ohne genauere Analyse) auf die Wirkung der Erdzeiten zurückgeführt. Zwar sind die Gezeitenspannungen um Größenordnungen geringer als die tektonischen Spannungen, jedoch können sie periodische Volumsdilatationen in der Größenordnung von  $10^{-8}$  verursachen, die nach MELCHIOR, 1983, bereits merkbare Auswirkungen auf beobachtbare Phänomene haben können. K. ARIC et al., 1980, führten Rechnungen bezüglich der gezeiterregenden Beschleunigung durch und verglichen das Frequenzspektrum verschiedener Komponenten der Gezeitenkräfte, die große Amplituden im ganztägigen und halbtägigen Periodenbereich besitzen, mit jenem der Radonkonzentrationen. Als Ergebnis konnte zwar in allen Fällen eine gute Übereinstimmung im Bereich um eine Periode von 24 h gefunden werden, jedoch konnte nur in wenigen Fällen auch eine gute Übereinstimmung um die 12 h Periode registriert werden. Man muß daher annehmen, daß tagesperiodische Schwankungen vermutlich durch Temperaturschwankungen o. ä. verursacht werden, jedoch können die manchmal beobachtbaren halbtagesperiodischen Schwankungen nicht allein durch solche Effekte erklärt werden. Es besteht daher derzeit keine Klarheit über die wahre Ursache dieser beobachteten Schwankungen, so daß die Untersuchungen bezüglich dieser Frage keinesfalls als abgeschlossen betrachtet werden können.

#### 4.2. Untersuchungen im Bereich der Nordanatolischen Störungszone

Um auch in einem seismisch aktiven Gebiet Untersuchungen durchzuführen, wurde an der nordanatolischen Störungszone (NAFZ) eine weitere Meßapparatur installiert. Die NAFZ ist einerseits wegen

ihrer relativ leichten Erreichbarkeit, andererseits jedoch vor allem aus folgenden Gründen als weiteres Testareal ausgewählt worden:

- lange, deutlich erkennbare Störungszone,
- häufige Bebenaktivität (J. M. DEWEY, 1976, P. W. BURTON et al., 1984),
- Existenz seismischer Lücken, die auf zukünftige Starkbeben hinweisen,
- Vorhandensein eines Erdbebenkatalogs,
- gute Überwachung der Zone mittels seismischer Stationen, Vermessungen, Creepmeterstationen usw.

Betrachtet man die Seismizität an der NAFZ, so sind zwei besonders interessante Tatsachen festzustellen. In Abb. 16 oben sind die Längen (L) der durch Starkbeben nach 1939 aufgebrochenen Bereiche der NAFZ als Funktion der Zeit eingetragen. (Sofern oberflächlich die Länge der Bruchzone nicht feststellbar war, wurde sie nach der empirischen Relation  $\lg L = 0,78 \cdot M_s - 3,62$  abgeschätzt.) (M. N. TÖKSÖZ et al., 1979).

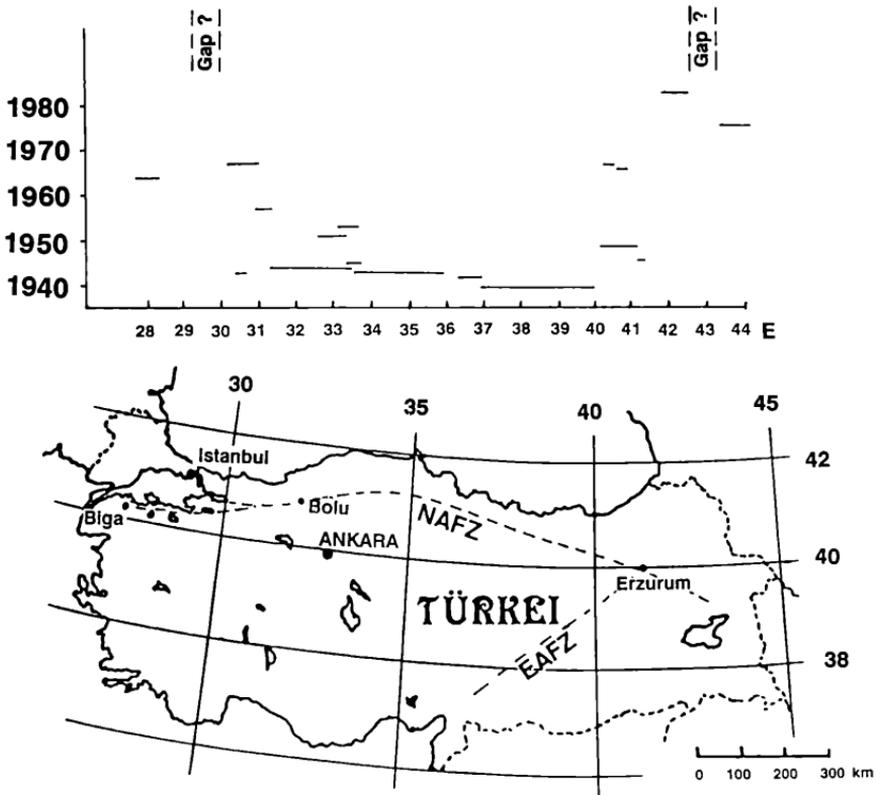


Abb. 16: unten: die nordanatolische Störungszone, oben: Bruchzonen und seismische Lücken; Abszisse: Längengrade, Ordinate: Zeit (nach M. N. TÖKSÖZ et al., 1979).

Beginnend mit dem Beben vom 26. 12. 1939 (39,80 N/39,51 E;  $M = 7,9$ ) ist einerseits eine vom 39. Längengrad nach Westen gerichtete, andererseits anscheinend auch eine vom gleichen Punkt nach Osten gerichtete Epizentrenwanderung feststellbar (M.N. TÖKSÖZ et al., 1979).

Die zweite interessante Tatsache betrifft die Existenz sogenannter seismischer Lücken. Die eine ist ca. 60 km lang und liegt bei etwa  $30^\circ$  östliche Länge. Die zweite, größere, lag zwischen dem 42. und 43. Längengrad. Das Beben von Erzurum (30. Oktober 1983, 40,30 N/42,19 E,  $M_b = 6,1$ ), welches jedoch möglicherweise nicht unmittelbar an die NAFZ gebunden war fällt genau in diesen Gap, dürfte aber vermutlich diese seismische Lücke nicht vollständig geschlossen haben, d. h. in diesem Gebiet muß in Zukunft mit einem weiteren Starkbeben gerechnet werden. Nicht geklärt ist, ob die bei  $36^\circ$  östlicher Länge liegende seismische Lücke der Realität entspricht oder nur aus der Ungenauigkeit bei der Bestimmung der Bruchlängen resultiert (M. N. TÖKSÖZ et al., 1979).

Die Aufstellung der Radonmeßapparatur erfolgt unter mehreren Gesichtspunkten. So soll die bei etwa  $30^\circ$  östlicher Länge liegende seismische Lücke beobachtet werden, d. h. ein Beben in diesem Gebiet mit  $M \geq 5$ , soll jedenfalls noch Auswirkungen auf den Radongehalt der Quelle erwarten lassen. Weitere Auswahlkriterien betrafen den normalen Radongehalt der Quelle, Lage der Quelle in bezug auf die Störungszone und nicht zuletzt auch nicht geophysikalische Gründe, wie etwa Erreichbarkeit der Quelle, Stromanschluß, Betreuungspersonal, usw. Schließlich wurde im März 1983 die Meßapparatur bei der kleinen Heilquelle bei Bolu (B. CANIK, 1980) (40,6 N, 31,5 E) installiert (Abb. 17).

Die Thermalquellen von Bolu entspringen am südlichen Rand des Beckens von Bolu. Dieses wird von tertiären und quartären Sedimenten

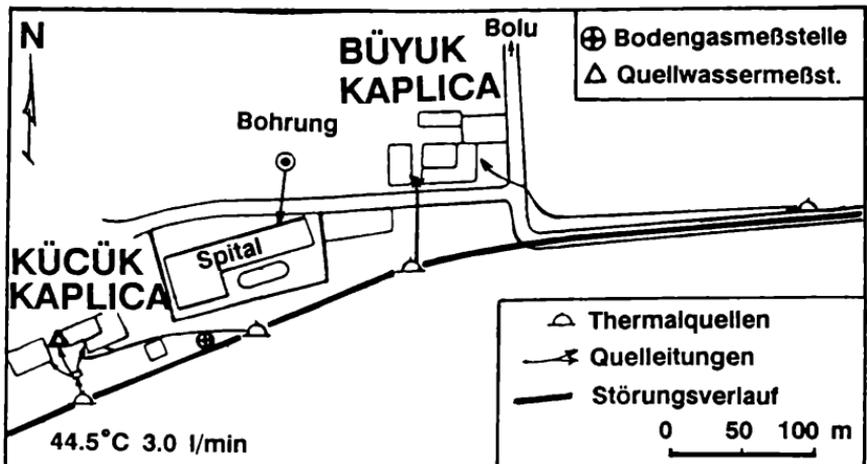


Abb. 17: Die Lage der Quellen von Bolu.

erfüllt. Das Liegende der sedimentären Schichten sind Kalkformationen. Darunter befinden sich metamorphe, präkambische Schiefer. Diese Schichten sind stellenweise durch Intrusiva von Gabbro, Granit, Basalt usw. gestört. Die Quellen entspringen einer nahezu senkrecht abtauchenden Störung, welche die südliche Begrenzung des Beckens von Bolu bildet. Nördlich dieser Störung befinden sich die talfüllenden Sedimente, südlich davon reichen die Kalkformationen bis an die Erdoberfläche. Ein Teil der derzeit kartierbaren Hauptstörungslinien der NAFZ liegt etwa 1 km nördlich der Störungslinie, an der die Thermalquellen entspringen (B. CANIK, 1980).

Aus den unterirdisch gefaßten Quellaustritten führen Rohre das Wasser zu den Badeanstalten. Aus einer dieser Zuleitungen wird das zur Untersuchung verwendete Wasser abgezapft und über eine etwa 10 m lange, unterirdische verlegte Leitung der Meßapparatur über eine Pumpe zugeführt. Die Apparatur entspricht im wesentlichen jener von Warmbad Villach, nur wurde zusätzlich eine unterbrechungsfreie Notstromversorgung (für etwa 2 Stunden) installiert.

Abb. 18 zeigt die Meßresultate. Die punktiert eingezeichneten Daten stellen möglicherweise fehlerhafte Meßwerte dar. Dies war vor allem in den ersten Monaten nach der Installation der Meßapparatur der Fall, da in diesem Zeitraum gewisse Anfangsschwierigkeiten bezüglich der Quelleigenschaften (Kalkablagerungen im Entemaniergerät usw.) zu überwinden

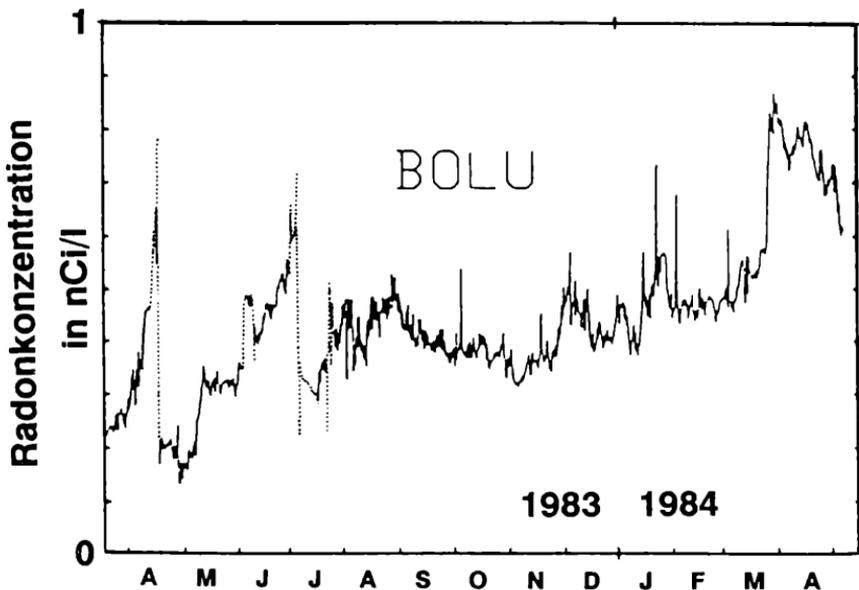


Abb. 18: Radonkonzentration in der kleinen Heilquelle von Bolu, punktierte Linien bedeuten möglicherweise fehlerhafte Meßwerte.

waren, andererseits der ortsansässige Betreuer noch nicht vollständig mit den Eigenschaften der Anlage vertraut war. Insbesondere scheint die Spitze Mitte April 1983 ein Artefakt zu sein, ebenso vermutlich die punktierten Werte Mitte Juni 1983 und Ende Juli 1983. Interessant ist, daß der Anstieg von Beginn Mai 1983 bis Anfang Juli 1983 zwar zum Teil unterbrochen, i. a. jedoch nahezu linear erscheint. Dies ist insofern von Bedeutung, da sich am 5. Juli 1983 bei Biga ( $40^{\circ}31' N$   $27^{\circ}13' E$ ) ein Erdbeben der Magnitude  $M = 5,7$  ereignete. Mit einer Entfernung von ca. 350 km erfüllte dieses Beben Relation (4.1). Dieses Beben war bis Ende 1983 das einzige Beben mit  $M > 3$ , das Relation (4.1) erfüllt. Das am 30. Oktober 1983 aufgetretene Katastrophenbeben ( $M = 6$ ) von Erzurum mit einer Entfernung von ca. 800 km zur Quelle zeigte anscheinend keine Auswirkungen auf den Radongehalt. Ob die Anfang Oktober aufgetretene Spitze der Radonkonzentration mit diesem Beben in Verbindung gebracht werden kann, ist eher fraglich, da dieses Beben auch Relation (4.1) nicht erfüllt. Betrachtet man den weiteren Verlauf der Radonkonzentration, so sind noch mehrere kurzfristige Erhöhungen des Radongehaltes von 20–40 % festzustellen. Solche Spitzen im Radongehalt wurden auch in der Quelle von Warmbad Villach in Österreich festgestellt (z. B. Februar, März 1983). Letztere hatten jedoch geringere Amplituden (ca. 15–25 %), konnten aber z. T. mit seismischen Ereignissen in Zusammenhang gebracht werden.

Ein weiteres interessantes Verhalten der Radonkonzentration konnte Mitte März 1984 festgestellt werden. Innerhalb von zwei Tagen stieg die Radonkonzentration um ca. 40 % und zeigte danach nur eine langsam rückläufige Tendenz. Insgesamt hatte die Radonkonzentration im Beobachtungszeitraum einen leicht ansteigenden Verlauf, mit sowohl kurzfristigen Fluktuationen (Fourieranalysen haben einwandfreie 24 h Perioden erkennen lassen, welche über verschiedene Zeiträume verschieden stark ausgeprägt sind), als auch längerfristige Schwankungen (Wochen, Monate). Da die Auswertung der seismischen Aufzeichnungen durch verschiedene Probleme auf türkischer Seite stark verzögert ist, kann derzeit noch keine vollständigen Korrelationsuntersuchung mit seismischen Ereignissen durchgeführt werden. So konnten nur für die stärkeren Beben ( $M \geq 4$ ) die Magnituden aus internationalen Erdbebenkatalogen entnommen werden. Für viele ab 1984 in Frage kommende Beben sind derzeit keine oder nur ungenügende Angaben erhältlich, so daß nicht geprüft werden kann, ob diese Relation (4.1) erfüllen. Nichtsdestoweniger weisen verschiedene Beobachtungsergebnisse auf eine seismische Sensibilität der Quelle hin. Diese sind vor allem der Anstieg der Radonkonzentration im Mai und Juni 1983, der zeitlich mit dem Beben von Biga zusammenfällt, sowie vielleicht auch die zu verschiedenen Zeiten auftretenden, tagesperiodischen Radonschwankungen.

Neben diesen Radonmessungen im Quellwasser von Bolu werden an 5 Stellen an der NAFZ Bodengasmeßstellen mit Track Etch Folien durchgeführt. Vorläufige Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden bei (H. FRIEDMANN et al., 1988) veröffentlicht.

## 5. Ergebnisse und Zusammenfassung

Es wurden an insgesamt 8 ausgesuchten Quellen in Österreich und in der Türkei kontinuierliche Radonmessungen mittels einer speziell für diesen Zweck entwickelten Apparatur durchgeführt. Die Auswahl der Quellen erfolgte aufgrund langjähriger Erfahrungen auf dem Gebiet der Quelluntersuchungen, bei denen verschiedene Beeinflussungen von Quellen studiert werden konnten. Bei 2 der kontinuierlich beobachteten Quellen haben sich Hinweise auf eine Sensibilität des Radongehaltes gegenüber Erdbeben gezeigt.

Aus allen durchgeführten Quelluntersuchungen hat sich ergeben, daß anscheinend nur ein verhältnismäßig kleiner Teil aller Quellen, die Tiefenwasser führen, durch seismische Ereignisse mit einer Änderung des Radongehaltes reagieren. Solche Quellen konnten bis jetzt nur an großen Störungen gefunden werden, wobei vermutlich nicht relevant ist, ob die Störung seismisch aktiv oder inaktiv ist.

Um nicht einer subjektiven Interpretation der Radondaten unterworfen zu sein, wurde eine exakte Definition einer Radonanomalie vorgeschlagen. Gemäß dieser Definition konnten bei der Quelle von Warmbad Villach Zeitbereiche gefunden werden, in denen die Radonkonzentration einen anomalen Wert aufwies. Systematische Untersuchungen haben gezeigt, daß weder Luftdruckschwankungen noch Niederschläge noch Pegelstands- bzw. Temperaturänderungen des Grundwasser diese Anomalien verursacht haben können, obwohl ein Einfluß von Niederschlägen auf den Radongehalt existiert. Dieser Einfluß ist jedoch nicht so stark, daß er als Ursache für die beobachteten Anomalien ausreichen könnte. Um die Einflußnahme von Erdbeben auf die Quelle zu untersuchen, wurden mittels einer Distanz-Magnituden-Relation (4.1) Erdbeben ausgewählt, von denen erwartet werden darf, daß sie im Prinzip einen Einfluß auf die Quelle ausüben könnten. Statistische Tests haben gezeigt, daß sicher nicht alle der ausgewählten Beben den Radongehalt beeinflusst haben können. Empirische Überlegungen ließen verschiedene Gruppen der nach (4.1) ausgewählten Beben als nicht relevant für die beobachteten Radonanomalien erscheinen.

Untersuchungen kurzfristiger Radonschwankungen haben eine etwa exponentielle Abnahme der Häufigkeit dieser Fluktuationen mit deren Größe geliefert. Diese Schwankungen sind nicht gleichmäßig über das Jahr verteilt, sondern sie weisen eine deutliche 1-Jahres-Periode auf. Es liegt nahe diesen Effekt auf die Einflußnahme meteorologischer Faktoren zurückzuführen. Die Minima in den Fluktuationen, welche etwa zu den Jahreswechslern auftreten, wurden benutzt, um eine mögliche kurzfristige (und in der Amplitude geringe) Einflußnahme von Erdbeben auf den Radongehalt zu studieren. Obwohl z. T. auffallende Koinzidenzen zwischen Erdbeben mit einer Entfernung von weniger als 200 km zur untersuchten Quelle beobachtbar waren, kann derzeit kein, über den gesamten untersuchten Zeitbereich, statistisch signifikanter Zusammenhang festgestellt werden.

Neben diesen Fluktuationen konnten durch Fourieranalyse auch periodische Konzentrationsschwankungen im Radongehalt festgestellt werden, die vereinzelt jeweils über einen Zeitraum von etwa 2 bis 6 Wochen auftraten. Diese Schwankungen zeigten Perioden von einem bzw. einem halben Tag und hatten relative Amplituden im Bereich von 10–15 %. In der einschlägigen Literatur wird von ähnlichen periodischen Schwankungen bei seismisch sensitiven Quellen berichtet.

Die Untersuchungen an der nordanatolischen Störungszone wurden 1983 aufgenommen. Es ist die kleine Heilquelle von Bolu für die kontinuierliche Überwachung gewählt worden. Daneben wird an 5 Stellen entlang der nordanatolischen Störungszone um Bolu die Radonkonzentration im Bodengas mittels Track Etch Folien registriert. Bis jetzt konnten aufgrund mangelnder Vollständigkeit sowohl meteorologischer als auch seismischer Daten keine genaueren statistischen Untersuchungen vorgenommen werden. Verschiedene Erscheinungen deuten jedoch auf eine seismische Beeinflussbarkeit der Quelle hin.

In Zusammenfassung der getätigten Untersuchungen konnte ein kausaler Zusammenhang zwischen einzelnen Erdbeben und Änderungen in der Radonkonzentration von Quellen nicht nachgewiesen werden. Da die physikalischen Abläufe, die einem Erdbeben vorangehen, sehr komplex sind und durch viele Parameter beeinflusst werden, können auch statistische Untersuchungen (4-Felder-Test, Kreuzkorrelationen usw.) nur Aussagen liefern, die auf eine konkrete Situation begrenzt sind. Ergebnisse solcher statistischer Untersuchungen dürfen daher nicht überbewertet werden, insbesondere wenn ihre Datenbasis klein ist. Um zu einem besseren Verständnis bezüglich der Beeinflussung von Quellen durch tektonische Vorgänge zu gelangen, sind langfristige Untersuchungen von vielen Quellen notwendig. Es ist insbesondere auch auf die Notwendigkeit der Beobachtung mehrerer Anomalien bei ein und derselben Quelle hinzuweisen, da nur in dieser Weise die Signifikanz vieler Untersuchungen verbessert werden kann.

### Danksagung

Diese Arbeit wurde vom Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung in Österreich gefördert. Für die hilfreiche Unterstützung und die überaus wertvollen Diskussionen seien den Mitgliedern des Instituts für Meteorologie und Geophysik, insbesondere Prof. GUT-DEUTSCH, Prof. STEINHAUSER und Prof. ARIC, sowie Dr. F. HERNEGGER vom Institut für Radiumforschung und Kernphysik, gedankt.

### Literatur

AGGARWAL, Y. P., SYKES, L. R., ARMBRUSTER, J., SBAR, M. L.: Premonitory changes in seismic velocity and earthquake prediction. *Nature* **241**, 101, 1973.

- ANDERLE, N.: Zur Schichtfolge und Tektonik des Dobratsch und seine Beziehungen zur Alpidinarischen Grenzzone, *Jb. geol. B.-A.* **94**, Vienna (Austria) 1950.
- ARIC, K., DUMA, G., FRIEDMANN, H., GUTDEUTSCH, R., HERNEGGER, F.: Untersuchung geophysikalischer Parameter in Zusammenhang mit Erdbeben in Kärnten und Friaul, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Publ. Nr. 243, Vienna 1980.
- ARIC, K.: Deutung krustenseismischer und seismologischer Ergebnisse im Zusammenhang mit der Tektonik des Alpenostrandes, *Sitzungsber. der Österr. Akad. Wiss., naturw. Kl., Abt. 1*, Bd. 190, Springer Wien, 1981.
- BARSUKOV, V. L., VARSHAL, G. M., ZAMOKINA, N. S.: Recent Results of Hydrogeochemical Studies für Earthquake Prediction in the USSR, *Pure Appl. Geophys.* **122**, Nos. 2–4, 143–156, 1984/85.
- NIRCHARD, G. F. and LIBBY, W. F.: Soil radon concentration changes preceding and following four magnitude 4.2–4.7 earthquakes on the San Jacinto fault in Southern California, *J. Geophys. Res.* **85**, 3100–3106, 1980.
- BOOKER, J. R.: Dilatancy and Crustal Uplift, *Pure Appl. Geophys.* **113**, Nos. 1/2, 119–126, 1975.
- BRACE, W. F.: Dilatancy-Related Electrical Resistivity Changes in Rocks, *Pure Appl. Geophys.* **113**, Nos. 1/2, 207–218, 1975.
- BRADY, B. T.: Theory of Earthquakes I, *Pure Appl. Geophys.* **112**, 701–725, 1974.
- BRADY, B. T.: Theory of Earthquakes II, *Pure Appl. Geophys.* **113**, Nos. 1/2, 149–168, 1975.
- BURTON, P. W., MCGONIGLE, R., MAKROPOULOS, K. C., ÜCER, S. B.: Seismic risk in Turkey, the Aegean and the Eastern Mediterranean: The occurrence of large magnitude earthquakes, *Geophys. J.*, Vol. 78, No. 2 (Aug. 1984), 475–506, 1984.
- CANIK, B.: Bolu Sicak Su Kaynaklarinin Hidrojeolojik Incelenmesi Selcuk Üniversitesi Fen Fakültesi Yayinlari, No. 1, s. = 74, Konya 1980.
- CLEMENTS, W. E.: The effect of atmospheric pressure variations on the transport of  $^{222}\text{Rn}$  from the soil to the atmosphere, Ph. D. thesis, New Mexica Inst. Mining & Technol., Socorro 1974.
- DAHAMBRA, T.: Vertical Movement of the earth's crust in relation to the Matsushiro earthquakes, *J. Geol. Soc. Japan* **12**, No. 1, 1966.
- DEWEY, J. W.: Seismicity of Northern Anatolia. *Bull. Seism. Soc. Am.* **66**, No. 3, 843–868, 1976.
- DOBROVOLSKY, I. P., ZUBKOV, S. I., MJACHKIN: Estimation of the size of earthquakes preparation zones. *Pure and Appl. Geophys.* **117**, 1025–1044, 1979.
- EVANS, R. D.: Ionisation currents produced by radon, RaA and RaC' in cylindrical ionisation chambers. *Phys. Rev.* **48**, 177–186, 1935.
- FEDOTOV, S. A., GORDEEV, E. I., GUSEV, A. A., SUGROBOV, V. M., ZOBIN, V. M., LEMZIKOV, V. K.: Results of Research on Earthquake Prediction in Kamchatka, EGS/ESC Conf., University of Leeds, Aug. 23<sup>rd</sup>–27<sup>th</sup>, 1982.
- FLEISCHER, R. L. and MOGRO-CAMPERO, A.: Mapping of integrated radon emanation for detection of long-distance migration of gases within the earth: Techniques and principles. *J. Geophys. Res.* **83**, 3539–3549, 1978.

- FLEISCHER, R. L. and MOGRO-CAMPERO, A.: Radon enhancements in the earth: Evidence for intermittent upflows? *Geophys. Res. Lett.* **6**, 361–364, 1979.
- FLEISCHER, R. L.: Dislocation model for radon response to distant earthquakes. *Geophys. Res.* **8**, 477–480, 1981.
- FRIEDMANN, H.: Möglichkeiten der Erdbebenprognose. *Die Naturwissenschaften* **64**, 566–568, 1977 a.
- FRIEDMANN, H.: Modell für die Entemanierung radioaktiver Lösungen. *Anz. naturw.-math. Kl. Österr. Akad. Wiss. Jg.* 1977, Nr. 7, 120–125, 1977 b.
- FRIEDMANN, H. and HERNEGGER, F.: A method of continuous measurement of radon in water of springs for earthquake prediction. *Geophys. Res. Lett.* **5**, 565–568, 1978.
- FRIEDMANN, H.: Ein Programmpaket zur Analyse von Radonmeßdaten im Zusammenhang mit der Möglichkeit aus solchen Meßergebnissen Erdbebenprognosen zu erstellen. *Anz. d. Österr. Akad. Wiss., Jg.* 1979, Nr. 7, 1–12, 1979.
- FRIEDMANN, H.: Radium- und Radonbestimmungen in Luft und Wasserproben. *Anz. mathem.-naturw. Kl. Österr. Akad. Wiss. Jg.* 1980, Nr. 7, 122–129, 1980.
- FRIEDMANN, H.: A Portable Radonmeter, *Radiation Protection Dosimetry* **4**, Nr. 2, 119–122, 1983.
- FRIEDMANN, H.: A portable continuously working radon measurement system. *Rad. Prot. Dos.* **7**, No. 1–4, 181–184, 1984.
- FRIEDMANN, H.: A Theoretical Model for the Change of Shape of Springwater Radon Anomalies with Epicentral Distance. *Pure Appl. Geophys.* **122**, Nos. 2–4, 531–544, 1984/85.
- FRIEDMANN, H.: Anomalies in the Radon Content of Spring Water as Earthquake Precursor Phenomena, *Earthquake Prediction Research* **3**, No. 2, 179–189, 1985.
- FRIEDMANN, H., HERNEGGER, F.: Über den Radongehalt der Freibadquelle in Warmbad Villach. *Carinthia II*, 175./95. Jahrgang, 47–59, Klagenfurt 1985.
- FRIEDMANN, H., ARIC, K., KING, C.-Y., SAV, H.: Radon measurements for earthquake prediction along the North Anatolian Fault Zone: a progress report. *Tectonophysics* **152**, 209–214, 1988.
- GIANDINI, A. A., SUBBARAYUDU, G. V. and MELTON, C. E.: The Emission of occluded gas from as a function of stress. Its possible use as a tool for prediction earthquakes. *Geophys. Res. Lett.* **3**, 355–358, 1976.
- HADLEY, K.: Vp/Vs Anomalies in Dilatant Rock Samples. *Pure Appl. Geophys.* **113**, Nos. 1/2, 1–24, 1975.
- HALLEDAUER, G.: Über eine Methode zur Messung kleinster Emanationsmengen und ihre Anwendung zur Bestimmung des Radiumgehaltes einiger Meteoriten. *Sitzungsber. Österr. Akad. Wiss., mathem.-naturw. Kl. Abt. IIa*, **134**, 39–44, Wien 1925.
- HAUKSSON, E.: Radon Content of Groundwater as an Earthquake Precursor: Evaluation of Worldwide Data and Physical Basis. *J. Geophys. Res.* **86**, No. B10, 9397, 1981.
- HAUKSSON, E., GODDARD, J. G.: Radon Earthquake Precursor Studies Iceland, *J. Geophys. Res.* **86**, No. B8, 7037–7054, 1981.

- HEALY, J. H., URBAN, T. C.: In-situ Fluid-Pressure Measurements for Earthquake Prediction: An Example from a Deep Well at High Vista, California. *Pure Appl. Geophys.* **122**, Nos. 2–4, 255–279, 1984/85.
- HOLLER, H.: Gedanken zum Bau des Dobratsch in den östlichen Gailtaler Alpen, Carinthia, 166 bzw. (II) 86, Klagenfurt 1976.
- HOLUB, R. F. and BRADY, B. T.: The effect of stress on radon emanation from rock. *J. Geophys. Res.* **86**, 1776–1784, 1981.
- JANKA, K., LETITIMÄKI, M.: Method of eliminating the effect of decay products in continuous measurement of  $^{222}\text{Rn}$ . *Rev. Sci. Inst.* **53** (4), 523–527, April 1982.
- JIANG FONG-LIANG and LI GUI-RU: Experimental Studies of the Mechanisms of Seismo-Geochemical Precursors, *Geophys. Res. Lett.* **8**, 5, 473, 1981.
- KAHLER, F., FRITZ, A., JANSCHKE, H., KÖBERL, R.: Beobachtungen und Probleme im Thermalgebiet von Warmbad Villach, 20. Jahrbuch des Stadtmuseums Villach, Neues aus Alt-Villach 1983.
- KATOH, K., NAGATA and ITO, K.: Weekly observation of the radon activity around the active fault using a Track Etch method, *Zisin, J. Seismol. Soc. Jap.* **33** (3), 289–301, 1980.
- KING, C.-Y.: Radon emanation on San Andreas Fault, *Nature* **271**, 516–519, 1978.
- KING, C.-Y.: Radon emanation in tectonically active areas, in „The Natural Radiation Environment III“, Symposium Proc. Houston, Texas, April 23–28, 1978, Rep. CONF-780422, U. S. Dep. of Energy, Washington, D. C., 1980 a.
- KING, C.-Y.: Episode radon changes in subsurface soil gas along active faults and possible relation to earthquakes, *J. Geophys. Res.* **85**, 3065–3078, 1980 b.
- KING, C.-Y.: Gas geochemistry applied to earthquake prediction: an overview, *J. Geophys. Res.* **91**, B12, 12269–12281, 1986.
- KLUSMAN, R. W. and WEBSTER, J. D.: Preliminary analysis of meteorological and seasonal influences on crustal gas emission relevant to earthquake prediction, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **71**, 211–222, 1981.
- KUO, T., CHIN, P. and FENG, H.: Discussion on the change of groundwater level preceding a large earthquake from an earthquake source model, *Acta Geophys. Sinica*, 99–105, 1974.
- LEBEDEV, V. S., SARDAROV, S. S., MIRZALIYEV, M. M.: Results in Regular Observations in Daghestan by Use of Automatic Systems for Monitoring Gas Compositions. In *Hydrogeo-chemical Earthquake Precursors* (Nauka, Moscow 1985).
- LUO, G. and SHI, X.: Experimental results of radon and thoron emanations from rock specimen under pressure. *Acta Seismol. Sinica* **2** (2), 198–204, 1980.
- LUO, G., SHI, X. and WANG, J.: Experimental Results of the Variations of Several Kinds of Chemical Parameters in Process of Specimen Rupture Under Uniaxial Compression, *Acta Geophys. Sinica* **24**, No. 1, 117–122, 1981.
- MELCHIOR, P.: *The Tides of the Planet Earth*. Pergamon, 2<sup>nd</sup> ed., 641, 1983.
- MERIFIELD, P. M., LAMAR, D. L.: Possible Strain Events Reflected in Water Levels in Wells Along San Jacinto Fault Zone, Southern California. *Pure Appl. Geophys.* **122**, Nos. 2–4, 245–254, 1984/85.

- MJACHKIN, V. I., BRACE, W. F., SOBOLEV, G. A. and DIETERICH, J. H.: Two models for earthquake forerunners, *Pure and Appl. Geophys.* **113**, 169–181, 1975.
- MOGRO-CAMPERO, A. and FLEISCHER, R. L.: Subterrestrial fluid convection: A hypothesis for long-distance migration of radon within the earth, *Earth Planet. Sci. Lett.* **34**, 321–325, 1977.
- MOGRO-CAMPERO, A., FLEISCHER, R. L. and LIKES, R. S.: Changes in subsurface radon concentration associated with earthquakes, *J. Geophys. Res.* **85**, 3053–3057, 1980.
- NUR, A.: Dilatancy, pore fluids and premonitory variations of ts/tp travel time, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **62**, 1217–1222, 1972.
- NUR, A.: A Note on the Constitutive Law for Dilatancy, *Pure and Appl. Geophys.* **113**, Nos. 1/2, 197–206, 1975.
- OKABE, S.: Time variation of the atmospheric radon-content near the ground surface with relation to some geophysical phenomena, *Mem. Coll. Sci. Univ. Kyoto Ser. A28* (2), 99–115, 1956.
- PERTZ, H.: Über die Radioaktivität von Quellwässern. *Sitzungsber. Österr. Akad. Wiss., mathem.-naturw. Kl., Abt. IIa*, Bd. 146, 611–621, Wien 1937.
- PRESS, F.: Earthquake prediction, *Sci. Amer.* **232** (5), 14–24, 1975.
- RICE, J. R., RUDNICKI, J. W.: Earthquake Precursory Effects Due to Pore Fluid Stabilisation of a Weakening Fault Zone, *J. Geophys. Res.* **84**, No. B5, 2177, 1979.
- RIKITAKE, T.: *Earthquake Prediction*, 356, Elsevier Sci. Publ. Co., Amsterdam, 1976.
- RITSEMA, A. R.: *The Earthquake Mechanism of the Balkan Region*. UNDP Rem 70/172 UNESCO, de Bilt, 1974.
- SACHS, L.: *Statistische Auswertungsmethoden*, 2. Aufl., Springer, Berlin – Heidelberg – New York, 1969.
- SCHOLZ, C. H., SYKES, L. R. and AGGARWAL, Y. P.: Earthquake prediction: A physical basis, *Science* **181**, 803–810, 1973.
- SCHROEDER, G. L., KRANER, H. W., EVANS, R. D.: Diffusion of radon in several naturally occurring soil types. *J. Geophys. Res.* **70**, 471–474, 1965.
- Seismological Society of Japan: Proc. of the Chinese earthquake prediction by the 1977 delegation of the Seis. Soc. of Japan (1978), *Geochemistry Related to Earthquake Prediction in China* (H. WAKITA), 113.
- SHEBALIN, N. V., KARNIK, V., HADZIEVSKI, D.: *Catalogue of Earthquakes Part I, 1901–1970, Part II prior to 1901*, UNDPUNESCO, Survey of the Seismicity of the Balkan Region, Skopje 1974.
- STINY, J.: Zur Geologie der Umgebung von Warmbad Villach, *Jb. Geol. Bundesanst.* **87**. Bd. H1/2, 57–110, 1937.
- STRANDEN, E., KOLSTAD, A. K. and LIND, B.: The Influence of Moisture and Temperature on Radon Exhalation, *Rad. Prot. Dos.* **7**, Nos. 1–4, 55–58, 1984.
- SUGISAKI, R.: Relation Between Hydrogen Emission and Seismic Activities. *Pure Appl. Geophys.* **122**, Nos. 2–4, 175–184, 1984/85.

- SULTANKHODZHAYEV, A. N., CHERNOV, I. G. and ZAKIROV, T.: Hydrogeoseismological premonitors of the Gazli earthquake, Dokl. Akad. Nauk Uzb. SSR, 7, 51–53, 1976.
- SULTANKHODZHAYEV, A. N., LATIPOV, S. U., SAKIROV, T.: Hydrogeological Effects of the Alayic Earthquake on Nov. 2<sup>nd</sup>, 1978, Dokl. Akad. Nauk Uzb. SSR 3, 56–58, 1979.
- TANNER, A. B.: Radon migration in the ground: A review, in „The Natural Radiation Environment“, Symp. Proc. Houston, Texas, April 10–13, 1963, edited by J. A. S. Adams and W. M. Lowder, 161–190, University of Chicago Press, Chicago, Ill., 1964.
- TANNER, A. B.: Radon migration in the ground: A supplementary Review, in „The Natural Radiation Environment III“, Symp. Proc., Houston, Texas, April 23–28, 1978, Rep. CONF-780422, U. S. Dep. of Energy, Washington, D. C., 1980.
- TENG, T.: Some recent studies on groundwater content as an earthquake precursor, J. Geophys. Res. 85, 3089–3099, 1980.
- The Group of Hydro-Chemistry, Peking Brigade of Seismology: An experimental study of the relation between rock rupture and variation of radon content, Chinese Geophys. 1 (2), 361–367, 1978.
- TOKSÖZ, M. N., SHAKAL, A. F., MICHAEL, A. J.: Space-time migration of earthquakes along the North Anatolian Fault Zone and seismic gaps. Pure and Appl. Geophys. 117, 1258–1270, 1979.
- TUGARINOV, A. I. and SARDAROV, S. S.: Changes in the flows of radiogenic gases from depth produced by elastic deformation of the earth's crust, Dokl. Akad. Nauk SSR Earth Sci. Sect. 223 (1–6), 20–23, 1977.
- WAKITA, H.: Water wells as possible indicators of tectonic strain, Science 189, 553–555, 1975.
- WAKITA, H.: Earthquake prediction and geochemical studies in China, Chinese Geophys. 1 (2), 443–457, 1978.
- WAKITA, H., NAKAMURA, Y., NOGUCHI, M., ASADA, T.: Radon anomaly – Possible precursor of the 1978 Izu-Oshima-Kinkai earthquake, Science 207, 882, 1980.
- ZOJER, H.: Beitrag zur Kenntnis der Thermalwässer von Warmbad Villach, Steirische Beiträge zur Hydrogeologie 32, Graz (Austria), 1980.
- ZHANG, G., FU, Z.: Some Features of Medium- and Short-Therm Anomalies Before Great Earthquakes, in Earthquake Prediction, An Internat. Review (ed. SIMPSON, D. W., RICHARDS, P. G. ) Ewing Series No. 4, 1980.

# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse](#)

Jahr/Year: 1988/89

Band/Volume: [197](#)

Autor(en)/Author(s): Friedmann Harry

Artikel/Article: [Untersuchung über die Ursachen von Radonkonzentrationsschwankungen in Quellwässern unter besonderer Berücksichtigung der Seismizität. 343-387](#)