

# **Hydrogeologische Phänomene des Bad Brambacher Mineralwassersystems im Umfeld vogtländisch/NW-böhmischer Schwarmbeben**

Ulrich Koch und Jens Heinicke

Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Forschungsgruppe Freiberg/Bad  
Brambach, Badstraße 49, 08648 Bad Brambach

Tel./Fax: 037438-21854, E-Mail: koch@saw-leipzig.de, www.saw-leipzig.de

## **Einleitung**

Die hydrochemisch-physikalische Einzigartigkeit der Bad Brambacher Mineralwässer, die sich in ihrer Kombination aus Mineralien, Kohlendioxid und Radon äußert, zieht nicht nur viele Heilung Suchende Menschen an. Das bis heute weitgehend vor anthropogenen Einflüssen geschützte Mineralwassersystem und seine Nähe zu geologischen Strukturen, deren tektonische Aktivität bis in die Gegenwart spürbar und registrierbar ist, haben in den Jahren immer wieder Hydrogeologen, Geophysiker, Geochemiker und Seismologen angezogen. Demnächst werden sich noch Geomikrobiologen hinzugesellen.

Seit 1974 ist hier eine Arbeitsstelle der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig (SAW) ansässig. Die naturwissenschaftliche Attraktivität des kleinen Sächsischen Staatsbades wuchs jedoch insbesondere, nachdem Ende der 80er Jahre mit systematischen Untersuchungen zu möglichen Zusammenhängen zwischen dem Verhalten der Mineralquellen und seismischen Ereignissen im Vogtland und NW-Böhmen begonnen wurde.

Die Idee zu diesem akademischen Langzeitprojekt entstand nach dem Auftreten starker Erdbebenschwärme im Vogtland und NW Böhmen in den Jahren 1985/85. Die neue Forschungsrichtung wurde maßgeblich von dem 1990 verstorbenen Geologen Prof. ADOLF WATZNAUER gefördert. Prof. Watznauer erkannte, dass der enorme, bis dahin weitgehend ungenutzte hydrogeologisch-hydrochemische Datenfundus des damaligen Quellenlabors der Staatsbäder beste Voraussetzungen für derartige systematische Forschungen bot. Aus diesen Jahren rührt die bis heute äußerst enge und fruchtbare Kooperation zwischen der SAW und den Sächsischen Staatsbädern her (Koch, 1999).

Mit einfachsten radiometrischen Messmethoden wurde zunächst an der Wetтинquelle (damals noch: Radonquelle) das Verhalten der Radioaktivität des Quellwassers kontinuierlich aufgezeichnet und registrierte hydrologische Anomalien zur regionalen Seismizität in Beziehung gesetzt (Heinicke et al. 1995). Aus diesen Anfängen entstand die modern ausgestattete Messstation 'Wetтинquelle', die unmittelbar nach der Quellsanierung im Januar 2000 in Betrieb ging, rechtzeitig vor dem großen Erdbebenschwarm des Herbstes 2000. Weitere Messpunkte an Quellen und Grundwässern Bad Brambachs sowie an Mofetten in Tschechien haben wichtige Beiträge zum Verständnis der Anomaliegenese geliefert und uns darin bestärkt, die seismohydrologischen Untersuchungen auch auf andere seismisch aktive Regionen (Italien, Israel) auszudehnen (Heinicke et al., 2000).

Einige wenige Beispiele solcher Anomalien sollen hier vorgestellt werden, denn sie demonstrieren die Erkenntnisfortschritte in Richtung auf eine regionale seismotektonische Modellvorstellung am deutlichsten.

## Grundlagen

### *Geologie, Tektonik, Seismizität*

An der Grenze zwischen Saxothuringikum und Bohemium, den beiden überregionalen Einheiten des mitteleuropäischen Variszikums, befindet sich als ein wesentliches Trennglied das Zentralsächsische Lineament. Seine NO-SW Streichrichtung ist dabei maßgebend für kleinere Teilblöcke. Im Vogtland wird dieses tektonische Element durch zwei NW-SO verlaufende Tiefenbruchzonen gestört: die südöstlicher verlaufende Störungszone von Tachov-Aš-Hainichen sowie die Marienbader Störungszone. Sie grenzen als eine Art Blockfugenzone einen Teilblock ab, das südwestliche Vogtland. Eine weitere bedeutende geologische Einheit ist der sich südlich anschließende, SW-NE verlaufende Egergraben mit dem Egerbecken.

In dieser tektonisch stark gestörten Region kommt es zu einer erhöhten Seismizität. Diese äußert sich überwiegend durch die typischen Vogtländischen Schwarmbeben, die sich durch ihre zeitliche Abfolge und ihr flacheres Hypozentrum von 3-10 km Tiefe deutlich von den Einzelereignissen (Hypozentrum in 8-20 km) dieses Gebietes unterscheiden. (Neunhöfer & Güth 1988). Die Magnituden sind in der Regel kleiner als 4, so dass nennenswerte Schäden nicht eintreten. Zur Erfassung dieser kleinen Magnituden existieren auf deutscher und tschechischer Seite sechs lokale seismische Netze mit über 24 Stationen.

Horálek et al. (1996) identifizierten insgesamt fünf Epizentralgebiete. Von den in Abb. 1 dargestellten vier Bereichen ist das Gebiet 1 dasjenige mit der größten Bebenhäufigkeit. In seinem Zentrum liegt Nový Kostel.

Der Standort unserer seismohydrologischen Untersuchungen, das Kurbad Bad Brambach (12.298 E, 50.239 N), befindet sich an der E-W verlaufenden Grenze zwischen Fichtelgebirgsgranit und Glimmerschiefer. Auf dem Übersichtsplan des Kurparks (Abb. 2) markiert etwa der Verlauf des Röthenbaches diese wichtige Gesteinsgrenze, entlang derer sich die meisten Mineralquellen aufreihen.

### *Besondere hydrogeologische Aspekte der Region*

Für die Interpretation von Meßdaten hinsichtlich eines geochemisch/hydrogeologisch Zusammenhanges mit der Seismizität ist es notwendig, den Stoff- und Informationstransport aus der Tiefe zu betrachten. Die für Transportprozesse notwendigen Kluftsysteme mit entsprechenden Permeabilitäten bis zu einer Tiefe von über 10 km sind in jüngster Zeit mehrfach diskutiert bzw. in Tiefbohrungen nachgewiesen worden (KTB-Report 1993, Person & Baumgartner 1995).

Aus der dargestellten geologischen Situation läßt sich ableiten, dass sich die im Untersuchungsgebiet ablaufenden Transportprozesse von Fluiden aus dem Mantel/ Krustenbereich vermutlich auf Kluftsystemen in den Auflockerungszonen der seismisch aktiven Störungen abspielen.

Mittels isotopehydrogeologischer Methoden ist es möglich, Informationen zur Genese und Migration der jeweiligen Fluide zu gewinnen:

Aus dem Verhältnis der beiden *Heliumisotope*  $^3\text{He}$  und  $^4\text{He}$  an zahlreichen Quellgasproben der Region SW-Vogtland/NW-Böhmen ergaben sich eindeutige Beweise für das Auftreten von hohen Anteilen an Mantelhelium (Weinlich et al. 1993, Weise et al. 2001). In den Bad Brambacher Quellgasen sind davon über 20% ermittelt worden, was einen wesentlichen Hinweis auf die Genese der Quellgase und deren Transportpfade aus dem oberen Mantelbereich liefert.

Die Konzentration des *Kohlenstoffisotops*  $^{14}\text{C}$ , das auf Grund seiner Halbwertszeit von 5730 Jahren zur Datierung von alten Grundwässern verwendet wird, lag in den Quellgasen in Bad unter der Nachweisgrenze (Heinicke et al. 1995). Daraus leitet sich ein Mindestalter des Kohlendioxids von über 40.000 Jahren ab.

$^{13}\text{C}$ -Analysen an den Quellgasen ergaben  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte von -6 bis -2 ‰, nicht nur an den  $\text{CO}_2$ -reichen Quellen von Bad Brambach, sondern auch an den Mineralquellen und Mofetten entlang der Marienbader Störungszone (Weinlich et al. 1993, Heinicke et al. 1995, Weise et al. 2001, Bräuer et al. 2003). Derartige Isotopenzusammensetzungen sind für Gase aus dem magmatischen Bereich typisch und lassen demzufolge auf eine Genese im Krusten-/oberen Mantelbereich schließen.

Über 30 Jahre führte das Institut für Angewandte Physik der TU Bergakademie Freiberg *Tritiummessungen* an den Quellwässern von Bad Brambach durch. Die Auswertungen mittels entsprechender Transportmodelle ergaben z. B. für die Wetinquelle ca. 80 % Anteile an "sehr altem" Grundwasser und ca. 20 % an Wässern mit Altern von weniger als 30 Jahren. Die oberflächennahen Jungwasseranteile weisen eine durchschnittliche Verweildauer von ca. 15 Jahren auf (Fröhlich et al. 1988, Daffner et al. 1999, Koch et al. 2003b).

Michler (1973) zeigte an Hand von  $^{18}\text{O}$ - und  $^2\text{H}$ -Analysen, dass auch der Anteil des alten Grundwassers meteorischer Herkunft ist, mit möglicher Genese im Quartär.

Die Quellen von Bad Brambach zeichnen sich durch ihre hohe natürliche Radioaktivität (Radon- und Radonfolgeprodukte) aus. Untersuchungen zu  $^{238}\text{U}$ -,  $^{234}\text{U}$ -,  $^{226}\text{Ra}$ - und  $^{222}\text{Rn}$ -Gehalten haben daher das hydrogeologische Modellverständnis des Gebietes entscheidend geprägt. Die für Granite typischen erhöhten Uraniumkonzentrationen (ca. 20 ppm) sowie günstige geochemische Verhältnisse (pH-/Eh-Werte, mineralisiertes,  $\text{CO}_2$ -reiches Grundwasser) bewirken einen vergleichsweise hohen Radongehalt (ca. 1 kBq/l) in den Quellwässern dieser Region. Eine Besonderheit bildet dabei die Wetinquelle. Sie zählt mit einer durchschnittlichen Radonkonzentration von 26 kBq/l zu den stärksten natürlichen, radonhaltigen Mineralquellen der Welt. Der Ursprung ihrer hohen Aktivität ist in sekundären Uranium-/Radiumanreicherungen im Kluftzonenbereich zu suchen, deren Entfernung vom Quellaustritt nur auf wenige Dutzend bis 100 m geschätzt wird (Watznauer & Koch, 1989).

## **Seismohydrologische Anomalien an Mineralquellen, Grundwasseraufschlüssen und Mofetten**

### ***Radonanomalien bis 1997 und ihr räumlicher Bezug***

In Bad Brambach wurde bereits 1989 mit ersten kontinuierlichen Messungen zur Bestimmung des Radongehalts in der Bodenluft und im Quellwasser der Wetinquelle begonnen. Die relative Radonkonzentration im Quellwasser wurde dabei über die Messung der Gammastrahlung der kurzlebigen Radonfolgeprodukte ermittelt. Während die Ergebnisse der Bodenluftmessung eine signifikante Beeinflussung durch meteorologische Parameter aufwies, zeigte die Interpretation der über 40.000 Messwerte der Gammastrahlung (Registrierintervall 40 min) aus der Wetinquelle für den Zeitraum von 1989-1992 einen eindeutigen Zusammenhang zur lokalen Seismizität (Heinicke et al., 1995).

Beim Versuch der Zuordnung der jeweiligen Radonanomalien zur Seismizität mit Methoden der geometrischen Stochastik konnte festgestellt werden, dass die Radonanomalien mit Bebenereignissen korrelieren, deren Epizentren sich in einer begrenzten Region konzentrieren. Über 70 % der signifikant ausweisbaren Anomalien traten vor, in den wenigsten Fällen nach Erdbeben/-schwärmen aus dem lokalisierten Gebiet auf. Anhand der seismischen Daten von 1993 bis 1995 (Neunhöfer, 1997) konnten die bisher gewonnenen Aussagen für einen lokal

begrenzten Erdbebenvorläufereffekt bestätigt werden (Koch & Heinicke, 1996). Abb. 3 zeigt eine typische Anomalie aus diesem Zeitraum (Hänsel & Koch, 1998).

Dies ließ den Schluss zu, dass die Anomalien von Bad Brambach wahrscheinlich von den gleichen seismotektonischen Prozessen hervorgerufen werden, die auch in dem nur ca. 12 km östlich von Bad Brambach befindliche Epizentralgebiet von Nový Kostel auftreten. Dieses Gebiet entspricht dem östlichen Ausläufer des anstehenden Fichtelgebirgsgranits und markiert gleichzeitig eine Sektion der Marienbader Störungszone. Dieser tiefreichenden tektonischen Störungszone kommen somit zwei Funktionen zu: einmal als Aufstiegsbahn der Quellfluide, zum anderen als Ausgangspunkt für seismische Bruchflächen.

Auf die Frage nach der Anomaliegenese und -ausbreitung wurden bis Ende 1996 lediglich theoretische Antworten und Vorstellungen gefunden:

Das Auftreten der Radonanomalien wenige Stunden bis Tage vor seismischen Ereignissen im Raum Nový Kostel schloss einen direkten Transport der Anomalie-Information über Fluide aus dem Gebiet des Hypozentrums aus. Dafür wären erheblich längere Zeiträume notwendig gewesen. Jedoch ist eine derart rasche Übermittlung geochemischer Signale im Untergrund über eine längere Distanz mit der Auslösung eines Druckimpulses durch eine erhöhte tektonische Spannung und dessen Ausbreitung über das fluidgefüllte Kluftsystem erklärbar. Roeloffs (1996) beschrieb eine mögliche Ausbreitung solcher Impulse über Distanzen von mehr als 50 km, abhängig von der Transmissibilität und der Speicherkonstante des Aquifers. Dass die dazu erforderlichen Kluftweiten im Gestein in unserer Region vorhanden sind, wurde u. a. durch Forschungen an der KTB in Windischeschenbach nachgewiesen (Huenges et al. 1997).

Mit dem Einsatz einer Drucksonde in der Wettinquelle konnten ab Ende 1995 Wasserspiegelschwankungen mit zeitlichen Auflösungen zwischen 1 und 10 Minuten registriert werden. Durch den Einbau einer Sonde zur Gammasspektrometrie der Radon-Tochterprodukte unmittelbar über den Klüften an der Quellsohle entstand zusammen mit der bereits vorhandenen Sonde im oberen Teil des Quellschachtes eine Gradientenanordnung, die in der Lage sein sollte, eine aufsteigende anomale "Radonfront" zu verfolgen.

Bereits 1993 war eine zweite Messstation in der benachbarten Eisenquelle eingerichtet worden, mit der die Konzentration der Quellgase Rn und CO<sub>2</sub> sowie die Flußrate des freien Gases aus der Wasseroberfläche registriert wurden ( $\Delta t = 15$  min). Letzterer Parameter wird seit 1998 ebenfalls an der Schillerquelle gemessen.

An der Eisenquelle wurden zwischen 1994 und 1996 Änderungen der Isotopenzusammensetzung des Quellgases beobachtet, die in Relation zur regionalen Seismizität gesetzt wurden (Bräuer et al., 2003). Darüber hinaus lieferten diese Stationen – im Gegensatz zur Wettinquelle – bis zur Gegenwart keine nennenswerten Anhaltspunkte für seismohydrologische Phänomene. Sie haben aber wesentlich zur Klärung der Zusammenhänge zwischen Schüttung, Gasfluss und meteorologischen Einflussgrößen beigetragen, die von einer Klimastation im Kurpark (seit 1999 vollautomatisch) geliefert werden (Herzig et al., 2001).

### ***Die Druckanomalie als Vorläufer des Bebenschwarms vom Januar 1997***

Am 26./27. Dezember 1996 wurde in der Wettinquelle an beiden Gammasonden eine Anomalie im Quellwasser gemessen (max. 12 % über dem langjährigen Background), wie sie als Folge eines starken Luftdruckanstieges typisch ist. Letzterer beeinflusst die im Quellwasser aufsteigende Gasphase in der Weise, dass bei steigendem Druck die Freisetzung des physikalisch gelösten CO<sub>2</sub> und die Entstehung von Blasen verringert wird. Der Gasanstieg verlangsamt sich insgesamt. Da sich damit die Aufenthaltszeit des mit den CO<sub>2</sub>-Blasen transportierten Radons vergrößert, können wesentlich mehr Radon-Tochterprodukte im Quellwasser

gebildet werden, bevor das empfindliche Sondenvolumen passiert wird. Entsprechend kann der umgekehrte Vorgang bei Luftdruckabfall beobachtet werden.

Wenige Tage später, am 7. Januar 1997, stieg die Gamma-Aktivität an der oberen Sonde im Quellschacht erneut an und erreichte ihr Maximum am 12. Januar mit mehr als 30 % über dem Mittel von 600 cps (counts per second). Abb. 4 zeigt parallel dazu die Gamma-Aktivität am Boden der Quellsfassung (Spektrometersonde) sowie den Verlauf des Wasserstandes und des Luftdruckes. Überraschenderweise verhielten sich die beiden Gammasonden uneinheitlich: die Sonde an der Sohle spiegelte sehr genau den Luftdruckverlauf wider, während der obere Sensor einen zusätzlichen radioaktiven Anteil registrierte, der mit Luftdruckschwankungen nicht erklärbar war. Da die Anomalieform denen vergangener seismischer Perioden ähnelte, wurden – gemäß einer internen Absprache – das Institut für Geowissenschaften der Universität Jena und das Institut für Physik der Erde in Prag (ČZ) informiert. Beide Einrichtungen hatten bis dahin jedoch keine bedeutende Seismizität in der Region registriert. Zwei Tage danach setzte ein relativ starker Erdbebenschwarm mit über 100 Ereignissen ein. Er dauerte vom 14.-19. Januar und hatte eine maximale Lokalmagnitude von  $M_L=2.8$ . Das Maximum der Bebenhäufigkeit war etwa 75 Stunden, das stärkste Ereignis ca. 140 Stunden nach dem Beginn des Anomaliemaximums zu verzeichnen. Das Epizentrum lag wiederum im Raum Nový Kostel zwischen 50.232 - 50.235 N und 12.454 - 12.458 E, für das der Brambacher als Aquifer als „sensitiv“ gilt.

Der auf den ersten Blick vorhandene Widerspruch zwischen dem Verhalten der beiden Gammasonden konnte nach Interpretation aller aufgezeichneter Parameter geklärt werden:

Besonders der Wasserspiegel in der Quellsfassung zeigt während des Beginns der Radonanomalie ebenfalls einen anomalen Verlauf (Linie A in Abb. 4). In der damaligen Quellsfassung stieg während der täglichen Füllung des Vorratsbehälters für die Trinkkur der Wasserstand um etwa 34 cm für die Dauer von 1-2 Stunden. Während der Anomalie wurden jedoch bis zu 6 cm höhere Werte gemessen, die identisch sind mit dem Erreichen des oberen Randes des Quellstandrohres (Linie B in Abb. 4). Dies bedeutet, dass Quellwasser in einen um den Quellskopf herum angelegten Drainageraum übergelaufen war. Das dort schon vorhandene Wasser wurde mit Radon angereichert, die zusätzliche Gammastrahlung seiner Tochterprodukte erreichte aber nur die Sensorfläche der oberen Sonde, die zufällig in Höhe des Drainageraumes installiert war und rief die Anomalie hervor. Analysiert man den absteigenden Ast der Anomalie, so ist dessen Verlauf mit der Zerfallsfunktion von  $^{222}\text{Rn}$  (Halbwertszeit 3.8 Tage) identisch.

Dieser Quellüberlauf war die erste derartige Beobachtung seit Beginn der hochauflösenden kontinuierlichen Wasserstandsmessung an der Wetzinquelle im Januar 1996. Auf diese Weise war es möglich, auch frühere „Radonanomalien“ auf diesen Effekt zurückzuführen, nämlich auf ein zusätzliches Wasservolumen mit hoher Radonkonzentration im sensiblen Bereich der Sonde und nicht auf eine erhöhte Radioaktivität des Quellwassers selbst (Koch & Heinicke 1999a, b).

Besonders nach der Rekonstruktion der Wetzinquelle 1999, bei der das Entnahmeregime und der Quellskopf grundlegend geändert wurden, zeigte sich, dass die zu beobachtenden Anomalien grundsätzlich auf einem stärkeren Gasfluss und/oder höheren hydrostatischen Druck in der Quellsfassung beruhen.

Der bis vor der Rekonstruktion unverzichtbare Tracer Radon spielte nach dem Wegfall des Drainageraumes nur noch eine untergeordnete Rolle. Seit Januar 2000 können nunmehr mit dem Gasfluss, der Quellschüttung und dem hydrostatischen Druck die eigentlichen seismo-hydrologisch relevanten Parameter mit einer zeitlichen Auflösung von 10 min (bei Bedarf 1 min) direkt gemessen werden. Dazu werden die Radonkonzentrationen in der Wasser- und freien Gasphase, pH-Wert, Leitfähigkeit sowie die Gammaaktivität an der Quellsohle gemes-

sen. Im Rahmen unserer Mitarbeit in einem Bündelprojekt konnte dafür im Jahr 2000 eine moderne, von der DFG finanzierte Multiparameterstation im Keller der Wetтинquelle in Betrieb genommen werden.

Darüber hinaus war es möglich, kontinuierlich aufgezeichnete Grundwasserstandsdaten im Bad Brambacher Kurgelände zu nutzen, die im Rahmen der Zusammenarbeit innerhalb eines vogtländischen Mineralwasserprojektes von der Fa. Umweltbüro GmbH Vogtland, Weischlitz gewonnen werden (Koch et al. 2003a).

### ***Gasfluss- und Grundwasserstandsanomalien während der Schwarmbebenperiode vom Herbst 2000***

Ende August 2000 kam es im Epizentralgebiet von Nový Kostel (ČZ) nach über drei Jahren relativer seismischer Ruhe zu der stärksten und am längsten andauernden Schwarmbebenserie seit 1985/86. Bis zum Jahresende 2000 wurden mehr als 5000 Ereignisse mit Magnituden bis zu 3.7 und Herdtiefen um 10 km registriert. Die Serie kann in zwei Hauptperioden unterteilt werden: 28. August – 19. September und 14. Oktober – 15. November, gefolgt von schwächeren Einzelereignissen am 24. Dezember 2000 bzw. am 17. Januar und 11. Februar 2001 (Kleinge & Plenefisch, 2001).

Bereits Ende Juli 2000 wurden an zwei Grundwasserbeobachtungsrohren im Kurpark Bad Brambach mit Hilfe kontinuierlich registrierender Drucksonden signifikante hydrogeologische Effekte aufgezeichnet (Messintervall 15 min).

Abbildung 5 zeigt die zeitliche Darstellung von Niederschlag, Luftdruck und Grundwasserständen der Pegelbohrungen VL4 und GW1 zusammen mit dem Fassungsdruck in der Wetтинquelle und der Seismizität im Epizentralgebiet von Nový Kostel. Der Pegel GW1 befindet sich unmittelbar vor dem Gebäude der Wetтинquelle, VL4 etwa 100 m WSW von GW1 entfernt (Abb. 2). Während GW1 mit einer Tiefe von 4 m nur die Verwitterungszone erschließt, reicht VL4 (Tiefe 15 m) bis in den bedeckten, geklüfteten Granitaquifer. Die Wässer beider Bohrungen haben einen ähnlichen Chemismus wie die Mineralquellen im Umfeld. Ebenso ist ihre Reaktion auf Niederschläge und Luftdruckschwankungen nahezu identisch (vergl. Differenzkurve in Abb. 5): bei Niederschlagsereignissen oder Schneeschmelze reagiert der unweit vorüber fließende Röthenbach sehr rasch und vermindert durch seinen hohen Wasserstand das Grundwassergefälle zum Bach hin. Dadurch steigen auch die Grundwasserstände unmittelbar an. Unabhängig davon verursacht steigender Luftdruck sinkende Pegelwasserstände und umgekehrt. Konstruktionsbedingt sind derartige Effekte in der Wetтинquelle kaum sichtbar, da hier der Wasserspiegel durch ein vorgegebenes Überlaufniveau konstant gehalten wird.

Der gleichförmige Verlauf der GW1- und VL4-Wasserstände endet am 30. Juli 2000. Ab diesem Zeitpunkt steigt der Wasserspiegel in VL4 stetig bis zu einem deutlichen Peak Ende August an, der identisch ist mit dem Beginn der ersten Schwarmbebenperiode. Während der gesamten anomalen Phase am tiefen Pegel VL4 zeigt der GW1-Grundwasserstand lediglich das typische Schwankungsverhalten auf Grund von Niederschlägen und Luftdruckvariationen. Bemerkenswert ist, dass der Maximalwasserstand an VL4 vom 31. August nicht durch Niederschläge beeinflusst wurde: das stärkste Regenereignis innerhalb dieses Zeitfensters wurde einen Tag nach dem VL4-Peak gemessen (Abb. 5, Linie A). Nach Beginn der Beben sank der Wasserspiegel rasch auf das Normalniveau (15. Sept. 2000, Linie B). Seitdem zeigen beide Pegel bis in die Gegenwart wieder ihr identisches Verhalten wie vor dem 30. Juli 2000. Dies verdeutlicht auch die Differenzkurve, deren Maximum von 25 cm über dem Normalniveau vor der ersten Schwarmbebenperiode liegt.

Die unterschiedliche Reaktion beider Grundwasseraufschlüsse spiegelt die völlig verschiedenen Kontaktbedingungen des oberflächennahen Grundwasserleiters der Verwitterungszone und des darunter liegenden geklüfteten Mineralwasseraquifers im Hinblick auf das seismotektonisch beeinflusste Fluidreservoir wider. Demnach erreicht nur die VL4-Bohrung jene tieferen Grundwasserleiterbereiche, die in Verbindung mit dem seismohydrologisch beeinflussten Kluft- und Spaltensystem stehen.

Gleichzeitig mit der Wasserspiegelanomalie am Pegel VL4 wurden anomale Effekte in der Fassung der Wetinquelle beobachtet: eine signifikante Erhöhung der Gasflussrate und des Fassungsdruckes mit nachfolgenden kurzzeitigen Variationen von bis zu 2 cm ab Anfang August 2000 (normale Schwankungsbreite: 1-2 mm; Abb. 5, untere Kurve). Verantwortlich hierfür ist das Regime der freien CO<sub>2</sub>-Gasemission. Auf Grund der hermetischen Abgeschlossenheit der Quelfassung (mit Ausnahme eines Hahnes zur Gasflussmessung) und des praktisch konstant gehaltenen Wasserspiegels kann bei gleichbleibendem Wasserzufluss ein höherer Fassungsdruck nur durch eine stärkere Entgasungsrate bewirkt werden.

Tatsächlich zeigt die zeitliche Darstellung der Gasflussrate am Mittag des 2. August 2000 eine signifikante Anomalie von weniger als einer Stunde Dauer und mit einer etwa doppelt so hohen Entgasungsmenge wie die natürliche Schwankungsbreite des Gasflusses (Abb. 6). Auch das Niveau der um den Luftdruckeinfluss bereinigten Gasflussrate insgesamt ist im betrachteten Zeitraum vor den Beben etwa um 10-15 % erhöht und geht erst gegen Ende des zweiten Hauptschwarmes wieder zurück (Koch et al. 2003a, Herzig et al. 2003).

Die gezeigten Anomaliebeispiele belegen, dass der geklüftete Bad Brambacher Mineralwasseraquifer etwa 4 bis 5 Wochen vor der Schwarmbebenserie des Herbstes 2000 einem höheren Fluiddruck aus der Tiefe ausgesetzt war. Dieses Phänomen war jedoch nur an Grundwasseraufschlüssen mit direktem Kontakt zu dem beeinflussten Kluftsystem zu beobachten. Die flache, in der Verwitterungszone stehende Pegelbohrung GW1 zeigte dagegen keine seismohydrologisch induzierten Wasserspiegeländerungen.

Es muss hervorgehoben werden, dass seit Beginn der kontinuierlichen Messungen in Bad Brambach im Jahre 1989 derartig lang anhaltende Vorläufereffekte wie an der Pegelbohrung VL4 nicht beobachtet werden konnten. Alle bisherigen Anomalien dauerten wenige Stunden bis einige Tage. Allerdings war auch die Schwarmbebenperiode 2000 die längste innerhalb unserer Beobachtungsreihe im Vogtland. Ihrer seismologischen Charakterisierung nach war sie eher mit der Bebenserie von 1985/86 vergleichbar als mit anderen Ereignissen der vergangenen 10 Jahre (Klinge & Plenefisch, 2001).

### ***Co-seismische Effekte an einer Mofette von Bublák (ČZ)***

Bereits Mitte der 90er Jahre wurden zusätzliche mobile Messstationen an Mofetten auf tschechischem Gebiet installiert: im Naturpark Soos und in Bublák südwestlich bzw. südlich von Nový Kostel. Sie sollten Aufschluss darüber geben, ob es nahe des häufigsten Epizentrums ebenfalls seismohydrologische Effekte gibt und welcher Art diese sind. In den letzten Jahren wurden die Messungen auf eine gasende Quelle in Plesná sowie den Schönberger Sauerling ausgedehnt.

Die Region ist eines der bedeutendsten geogenen Entgasungsgebiete Mitteleuropas und durch zahlreiche trockene Gasaustritte (Mofetten) und CO<sub>2</sub>-haltige Mineralquellen gekennzeichnet (Weinlich et al., 1993). Dies sowie der sehr junge Vulkanismus im Gebiet (Kammerbühl, Eisenbühl) und das Phänomen Schwarmbeben belegen, dass die Region tektonisch noch nicht zur Ruhe gekommen ist.

Während an den Mofetten in der Regel nur die Gasflussrate gemessen wird, registriert die Station in Soos zusätzlich Wasserdruck und -temperatur der Mofette, Bodentemperatur sowie das Eigenpotential im Boden auf zwei 100-m-Profilen in NS- bzw. EW-Richtung.

Sowohl in Soos als in Bublák traten im Umfeld der Schwarmbeben des Herbstes 2000 anomale Effekte auf (Herzig et al., 2003), wobei die Gasflussanomalien vom Winter 2001 hier als Beispiel vorgestellt werden sollen.

Im Vergleich zu anderen Standorten der Region weisen die in Bublák aufsteigenden Gase hinsichtlich ihrer Helium-Isotopie den höchsten Anteil an Mantelhelium auf (Weinlich et al. 1999, Weise et al. 2001, Bräuer et al. 2003).

Auf Grund häufiger Blockierung der Messturbinen durch Fremdkörper konnte die Station während der Schwarmbebenperiode im Herbst 2000 keine zuverlässigen Gasflussdaten liefern. Daher wurde der Standort zusätzlich mit einem der neu entwickelten akustischen Flowmeter ausgerüstet. Ähnliche Geräte sind in Plesná und am Schönberger Sauerling im Einsatz. Als Äquivalent des Gasflusses wird mittels eines hochempfindlichen Mikrophonsystems die Lautstärke der aufsteigenden Gasblasen im Wasser registriert.

Abbildung 7 zeigt zwei seismische Einzelereignisse am 17. Januar und 11. Februar 2001 im Epizentralgebiet Nový Kostel (Magnitude 1.8), die von zwei Gasflussanomalien begleitet werden. Im Gegensatz zu den Fluktuationen, die für eine plötzliche Blockierung der Turbine bzw. den späteren Ausstoß des Fremdkörpers typisch sind, wurden diese Peaks durch einen höheren Gasfluss aus dem Untergrund hervorgerufen. Die zweite Anomalie konnte ebenfalls vom akustischen Flowmeter registriert werden. Beide beginnen exakt 10 Stunden nach dem Erdbeben und erreichen ihr Maximum weitere 15 bzw. 8 Stunden später. Damit handelt es sich um sogenannte co-seismische Phänomene.

## Diskussion und Schlussfolgerungen

Die vorgestellten Beispiele für anomale seismohydrologische Effekte im Oberen Vogtland dokumentieren anschaulich den Erkenntniszuwachs auf diesem Gebiet innerhalb der letzten 13 Jahre:

Als Ursache sämtlicher an der Bad Brambacher Wetтинquelle *bis 1995 registrierten Gamma-Anomalien* waren zunächst erhöhte Radonkonzentrationen vermutet worden, die möglicherweise vor den Beben durch den hohen Spannungsaufbau im Untergrund ausgepresst und mit dem stetig zu den Quellaustritten strömenden CO<sub>2</sub> sehr rasch zur Oberfläche transportiert werden.

Die Kenntnis über die geringe Tiefenlage des "Radonursprunges" und die Unwahrscheinlichkeit einer nennenswerten Beeinflussung dieser Akkumulationen durch tektonische Spannungen ließen Zweifel an dieser Vorstellung aufkommen.

Unabhängig davon jedoch waren alle bis dahin beobachteten Anomalien – gerade im internationalen Vergleich – höchst wertvoll, da sie erstmals den Nachweis des räumlichen Zusammenhangs zwischen seismischen Ereignissen in einem bestimmten Epizentralgebiet (Nový Kostel) und anomalen Effekten an einem über 10 km entfernten Quellaustritt (Wetтинquelle, Bad Brambach) erbrachten.

Die lang anhaltende *Gamma-Anomalie im Vorfeld des Januar-Bebenschwars 1997* führte durch den nachgewiesenen Überlauf des damals noch offenen Fassungsrohres zu einer ersten Revision der Vorstellungen über die Anomaliegenese. Welche Ursachen konnten für dieses Überlaufphänomen verantwortlich sein?



Die täglichen Messungen der Quellschüttung zeigten während dieser Zeit einen normalen Verlauf. Es herrschte Frost, Niederschläge fielen als Schnee und konnten nicht abflussrelevant werden. Neben dem Füllvorgang des Vorratsbehälters wurde das Quellregime nicht anderweitig anthropogen beeinflusst. Die Isotopenanalysen ( $\delta^{13}\text{C}$ ) damals täglich entnommener Gasproben wiesen auf keinerlei anomalen Isotopenaustausch hin. Das bedeutet, dass die Fluide (Gas + Mineralwasser) keinen außergewöhnlichen unterirdischen Mischungs- oder Wechselwirkungsprozessen ausgesetzt waren.

Als Erklärung für den Quellüberlauf bietet sich das aus der Erdöl-/Erdgasindustrie bekannte Phänomen des „blast streaming“ an, bei dem im Falle einer andauernden  $\text{CO}_2$ -Übersättigung des Quellwassers ein zusätzlicher Gasdruckimpuls aus dem Untergrund eine plötzliche Zusammenballung vieler kleiner Gasblasen verursacht (Heinicke & Koch 2000). Dieser Prozess geht sehr schnell vor sich und führt zu einem Gasstrom, der das Wasser im vorliegenden Fall aufschäumen und über Rand des Standrohres laufen ließ.

Ein ähnliches Phänomen konnte im Mai 2001 an der stagnierenden Mineralwasserbohrung B200 (Abb. 2) beobachtet werden, als im Rahmen einer Probenahme durch die Bewegung des Schöpfers das in großer Tiefe an  $\text{CO}_2$  übersättigte Wasser entlöst wurde. Die aufsteigenden Gasblasen vergrößerten sich, rissen weitere mit und führten zu einer etwa 12 m hohen und drei weiteren, kleineren Eruptionen (Koch et al., 2003b).

Abb. 4 zeigt, dass dieser Überlaufvorgang offenbar mehrere Tage anhielt, aber nur jeweils während der o.g. täglichen Anstauphase einsetzte, da hier der dafür notwendige Wasserstand erreicht wurde. Wahrscheinlich wird ein erhöhter Grundwasserspiegel, wie er im Juli/August 2000 an der VL4 registriert wurde, ebenfalls den Überlaufeffekt unterstützt haben. Leider wurden diese Phänomene damals noch nicht registriert.

Die Ursache für diese Art von Gaseruption wird in einem Druckimpuls vermutet, der sich vom Bereich des Hypozentrums her ausbreitete. Das Druckimpulsmodell (Häfner et al. 1985, Roeloffs 1996, Kessels & Kück 1995, Kessels 1996, Koch & Heinicke 1996) läßt sich auch sehr gut mit den beobachteten Anomalieformen und -dauern in Übereinstimmung bringen: Der typische seismotektonische Prozess mit Spannungsakkumulation, Beben und Spannungsabbau (Relaxation) führt zu einer Beeinflussung der offenen Kluftsysteme und damit des ständig zur Erdoberfläche hin stattfindenden Fluidtransports. Änderungen im Kluftsystem bewirken dabei Druckvariationen im Fluidkörper, die sich in schnell aufsteigenden Druckwellen äußern können. Da die Druckwellen etwa einige Tage bis zum Erreichen der Oberfläche benötigen, wird die Anomalie am Meßstandort einige Tage vor bis zu einigen Tagen nach dem Bebenereignis zu erwarten sein.

*Die seismologischen Beobachtungen der letzten Jahre im Vogtland/NW-Böhmen präzisieren die Vorstellungen von fluidgefüllten Kluftsystemen innerhalb der seismisch aktiven Störungszonen. So wurden spezielle Herdflächenlösungen für einen Teil der seismischen Ereignisse gefunden, die auf einen Einfluß von Fluiden während der Schwarmbebensequenz hindeuten, wahrscheinlich in der Art des sogenannten Hydrofracturing (Wirth et al. 2000). Diese Ergebnisse unterstützen unsere Modellvorstellung für die seit Jahren registrierten Anomalieeffekte vor seismischen Ereignissen im Epizentralgebiet von Nový Kostel. Die Vorläufereffekte zeigen, dass das von Heinicke und Koch (2000) vorgestellte Druckimpulsmodell zur Erklärung der seismohydrologischen Anomaliegenese eine nach wie vor relevante Interpretationsmöglichkeit bietet, welche auf der Ausbreitung von Druckimpulsen im fluidgefüllten Kluftsystem infolge von Spannungsumlagerungen durch eine veränderte Fluidemission aus dem tieferen Krustenbereich basiert.*

Es wird angenommen, dass für die co-seismischen Anomalien von Soos und Bublák nahe des Epizentralgebietes die gleiche Ursache wie für die Vorläufereffekte in Bad Brambach verant-

wortlich ist: eine veränderte CO<sub>2</sub>-Entgasung aus der Tiefe. Ein gemeinsames Fluidreservoir im unteren Krusten-/Mantelbereich ist die Basis für diese Prozesse.

Zur Diskussion steht dabei nicht nur ein durch das regionale Spannungsfeld erhöhter Fluiddruck in diesem Reservoir, sondern ebenso die umgekehrte Betrachtungsweise: eine Erhöhung des Fluiddrucks aus dem Mantelbereich als mögliche Quelle für die Triggerung der Schwarmbeben (Špičák & Horálek, 2001). Die registrierten Anomalien der Fluidemission vor den seismischen Ereignissen sprechen für diese Modellvorstellung. Zwischenergebnisse anderer Teilnehmer des DFG-Bündels "Vogtlandprojekt", an dem unsere Gruppe gemeinsam mit Kollegen des UFZ Leipzig-Halle und des GFZ Potsdam innerhalb des Teilprojektes "Fluid-dynamik" (He2177/7-1) mitarbeitete, unterstützen diese Hypothese.

Eine in jüngster Zeit durchgeführte räumliche Analyse von Störungssystemen im Egerbecken und darauf sitzenden Gasaustritten ergibt ein überraschendes Bild: Im unmittelbaren Bereich des Epizentrums von Nový Kostel existieren kaum Mofetten oder Mineralquellen, um so mehr aber besonders südlich und westlich davon (Heinicke & Koch, 2003). Das läßt auf relativ fluidundurchlässige Schichten im Epizentralgebiet schließen.

Ist es denkbar, dass sich eine anomale Mantelentgasung unter dem Egerbecken dort, wo ein freier Gasaustritt möglich ist (Mofetten, Quellen), als Druckimpuls bemerkbar macht, die gleiche Ursache aber im Falle "undurchlässiger" Horizonte seismische Vorgänge auslösen kann?

Die Beantwortung dieser sowie der Frage nach den physiko-chemischen Ursachen und Prozessen für das Auftreten seismohydrologischer Vorläufereffekte in Bad Brambach, jedoch coseismischer Effekte an den tschechischen Standorten, wird Schwerpunkt der weiteren seismohydrologischen Forschungen in der Region sein. Die Fortsetzung der interdisziplinären und grenzüberschreitenden Zusammenarbeit zwischen Geologen, Geophysikern, Geochemikern, Seismologen und Geodäten bietet die Voraussetzung für die erfolgreiche Bewältigung dieser Aufgabe.

## Literatur

- Bräuer, K., H. Kämpf, G. Strauch & S. M. Weise, 2003 Isotopic evidence (<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He, <sup>13</sup>C<sub>CO2</sub>) of fluid-triggered intraplate seismicity. *J. Geoph. Res.*, 108, B2, 2070.
- Daffner, T., J. Dvořák, C. Leibenath, K. Missling, M. Palm & M. Voßberg, 1999 Grenzüberschreitender Schutz der Heil- und Mineralquellen im Vogtland in Sachsen und Westböhmen. Zwischenbericht für das INTERREG II-Projekt, Auftraggeber: Landratsamt des Vogtlandkreises. Bearbeitung: Umweltbüro GmbH Vogtland; Weischlitz: 231 S.
- Fröhlich, K., D. Hebert & R. Gellermann, 1988 Umwelt nuklid Tritium in Mineralwässern von Bad Brambach. *Isotopenpraxis*, 24, 4: 163-164.
- Häfner, F., H.D. Voigt, H.F. Bamberg & M. Lauterbach 1985, Geohydrodynamische Erkundung von Erdöl-, Erdgas- und Grundwasserlagerstätten. ZGI Berlin, WTI 26, H. 1: 232 S.
- Hänsel, C. & U. Koch, 1998 Beiträge zur Umweltforschung mittels radiometrisch-geochemischer Methoden. Forschungsbericht. In: Sächs. Akademie der Wiss. zu Leipzig, Jahrbuch 1995-1996: 94-105.
- Heinicke, J., F. Italiano, V. Lapenna, G. Martinelli, & P.M. Nuccio, 2000 Coseismic geo-chemical variations in some gas emissions of Umbria Region (Central Italy). *Phys. Chem. Earth (A)* 25, 3: 289-293.
- Heinicke, J. & U. Koch, 2000 Slug flow – a possible explanation for hydrogeochemical earthquake precursors at Bad Brambach, Germany. *Pure appl. geophys.* 157, 10: 1621-1641.
- Heinicke J. & U. Koch, 2003 CO<sub>2</sub> gas emission sites in the Vogtland/NW Bohemian region: spatial distribution and temporal variations of the flux rate in relation to the local seismicity. Vortrag. 7<sup>th</sup> Intern. Conference on Gas Geochemistry Freiberg.
- Heinicke, J., U. Koch & G. Martinelli, 1995 CO<sub>2</sub> and Radon measurements in the Vogtland area (Germany) - a contribution to earthquake prediction research. *Geoph. Res. Letters* 22: 771-774.
- Herzig, P.M., U. Koch, & J. Heinicke, 2001 Geochemische und hydrogeologische Untersuchungen an Mineralquellen und Mofetten in seismisch aktiven Gebieten. Forschungsbericht des Vorhabens „Beiträge zur Umweltforschung mittels radiometrisch-geochemischer Methoden“. In: Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig. Jahrbuch 1999-2000: 192-206.

- Herzig, P.M., U. Koch & J. Heinicke, 2003 Anomales Fluidverhalten im Oberen Vogtland und NW-Böhmen vor und während des Erdbebenschwarms vom Herbst 2000 im Epizentralgebiet Nový Kostel (Tschechische Republik). Forschungsbericht des Vorhabens „Beiträge zur Umweltforschung mittels radiometrisch-geochemischer Methoden“. In: Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig. Jahrbuch 2001-2002: 265-277.
- Horálek, J., F. Hampl, A. Boušková & T. Fischer, 1996 Seismic regime of the West Bohemian earthquake swarm region: preliminary results. *Studia Geoph. et Geod.* 40: 398-412.
- Huenges, E., J. Erzinger, J. Kück, B. Engeser & W. Kessels, 1997 The permeable crust: Geohydraulic properties down to 9101 m depth. *J. Geophys. Res.* 102, B8: 18255-18265.
- Kessels, W., 1996 Geohydraulische Erkenntnisse aus der Kontinentalen Tiefbohrung (KTB) Oberpfalz. DGG Mitteilung, 4: 77-81.
- Kessels, W. & J. Kück, 1995 Hydraulic communication in crystalline rock between the two boreholes of the continental drilling project in Germany. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 32, 1: 37-47.
- Klinge, K. & T. Plenefisch, 2001. Der Erdbebenschwarm 2000 in der Region Vogtland/NW-Böhmen. *Mitt. Dt. Geophys. Ges.* 2: 11-21.
- Koch, U., 1999 Hydrologie, Radiometrie, Geochemie – Grundlagen für komplexe geophysikalische Interpretationen im Oberen Vogtland. In: Penzlin, H. (Hsg.) Geschichte ausgewählter Arbeitsvorhaben. Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig. S. Hirzel Stuttgart/Leipzig: 3-24.
- Koch, U., D. Hebert, M. Voßberg & J. Heinicke, 2003b Mineral water age structure of the spring 'Wettnquelle', Bad Brambach (Germany): Tritium and electric conductivity results. Poster. 54. Berg- und Hüttenmännischer Tag, Kolloquium 1: Trace Elements and Isotopes in Geochemistry – Fluids and Soils. Freiberg.
- Koch, U. & J. Heinicke, 1996 Earthquake prediction research by radiometric-geochemical methods in the Vogtland - NW Bohemian region: New results and aspects. In: *Seismology in Europe. Papers of the XXV General Assembly of European Seismol. Commission (ESC)*. Sept. 9-14, 1996. Reykjavík (Iceland): 241-246.
- Koch, U. & J. Heinicke, 1999a Anomalieeffekte an der Radonquelle Bad Brambach vor dem Schwarmbeben vom Januar 1997 bei Novy Kostel (CZ) - ein Baustein für die seismo-hydrogeologischen Modellvorstellungen im Oberen Vogtland. Forschungsbericht des Vorhabens „Beiträge zur Umweltforschung mittels radiometrisch-geochemischer Methoden“. In: Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig. Jahrbuch 1997-1998: 158-168.
- Koch, U. & J. Heinicke, 1999b The precursor effects in the mineral spring 'Radonquelle', Bad Brambach prior to the January 14-19, 1997 earthquake swarm near Novy Kostel (NW Bohemia). *Il Nuovo Cimento* 22, 3-4: 431-436.
- Koch, U., J. Heinicke & M. Voßberg, 2003a Hydrogeological effects of the latest Vogtland-NW Bohemian swarmquake period (August to December 2000). *J. Geodynamics* 35, 1-2: 107-123.
- KTB Report 93-2, 6. Annual KTB-Colloquium Geoscientific Results, Giessen 1.-2. April 1993, eds. R. Emmermann, J. Lauterjung and T. Umsonst: 590p.
- Michler, W., 1974 Beiträge zur Hydrogeologie des Oberen Vogtlandes unter besonderer Berücksichtigung der Mineralquellen. Dissertation. Martin-Luther-Univ. Halle: 157 S.
- Neunhöfer, H., 1997 Bulletin of the Vogtland/Western Bohemia earthquakes 1993-1995. Friedrich Schiller Universität Jena, Inst. f. Geowissenschaften.
- Neunhöfer, H. & D. Güth, 1988 Mikrobeben seit 1962 im Vogtland. Seismologische Aspekte und Beziehungen zur lokalen Geologie. *Z. geol. Wiss.* 16: 135-146.
- Person, M. & L. Baumgartner, 1995 New evidence for long-distance fluid migration within the Earth's crust. *Reviews of Geophys.*, Suppl.: 1083-1091.
- Roeloffs, E., 1996 Poroelastic techniques in the study of earthquake-related hydrologic phenomena. In: *Advances in Geophysics*, Bd. 37 (Hsg. R. Dmowska und B. Saltzman). Academic Press, San Diego: 135-194.
- Špičák, A. & Horálek, J., 2001 Possible role of fluids in the process of earthquake swarm generation in the West Bohemia/Vogtland seismoactive region. *Tectonophysics*. 336, 1-4: 151-161.
- Watznauer, A. & U. Koch, 1989 Die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse im Quellgebiet von Bad Brambach. Radontherapie heute. H. Jordan (Ed.). *Abh. d. Sächs. Akademie d. Wiss. zu Leipzig* 57, 1: 49-58.
- Weinlich, F.H., K. Bräuer, H. Kämpf, G. Strauch & S. Weise, 1993 Mantel-Kruste-Wechselwirkung im Bereich der Marienbader Störungszone - Teil 2: Gasgeochemische Untersuchungen an Mineralquellen entlang eines Profils über das Eger-Rift. *Z. Geol. Wiss.*, 21,1/2: 135-142.
- Weinlich, F.H., K. Bräuer, H. Kämpf, G. Strauch, J. Tesař & S.M. Weise, 1999 An active subcontinental mantle volatile system in the western Eger rift, Central Europe: Gas flux, isotopic (He, C, and N) and compositional fingerprints. *Geochim. Cosmochim. Acta* 63: 3653-3671.
- Weise, S.M., K. Bräuer, H. Kämpf, G. Strauch & U. Koch, 2001 Transport of mantle volatiles through the crust traced by seismically released fluids: A natural experiment in the earthquake swarm area Vogtland-NW-Bohemia, Central Europe. *Tectonophysics* 336: 137-150.
- Wirth, W., T. Plenefisch, K. Klinge, K. Stanmiller & D. Seidl, 2000 Focal mechanisms and stress field in the region Vogtland/Western Bohemia. *Studia geoph. et geod.* 44: 126-141.