

Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig  
Arbeitsgruppe Bad Brambach/Freiberg  
Badstraße 49, D-08648 Bad Brambach

## **Abschlussbericht 2010**

Vorhaben III.B.10a

### Beiträge zur Umweltforschung mittels radiometrisch-geochemischer Methoden

(Seismik des Vogtlandes)

Forschungsziele • Ergebnisse • Erfahrungen • Empfehlungen



Bad Brambach und Freiberg, im Dezember 2010

# Inhaltsverzeichnis

	Seite	
1	Das Vorhaben – Übersicht	3
1.1	Laufzeit	3
1.2	Personalbestand	3
1.3	Publikationen seit 1991	3
1.4	Kooperationen	3
2	Das Vorhaben – kurze Zusammenfassung der Entwicklung	4
2.1	Wissenschaftlicher Hintergrund – Zielstellung, Methodik, Ergebnisse	4
2.2	Schlussfolgerungen, Empfehlungen	8
3	Ausführlicher Forschungsbericht	10
3.1	Forschungsgegenstand und interdisziplinäre Zusammenarbeit	10
3.2	Bad Brambach – ein seismohydrologisch sensitiver Standort	12
3.2.1	Grundlagen	12
3.2.2	Etappen des Erkenntniszuwachses im Oberen Vogtland	13
3.2.2.1	Radonanomalien und Bebencluster, 1989-1995	13
3.2.2.2	Gasfluss – Schlüssel zur Anomaliegenese, 1996-1999	16
3.2.2.3	Seismohydrologische Anomalien 2000-2009	18
3.2.2.3.1	Die Grundwasser und Gasflussanomalie im August 2000	18
3.2.2.3.2	Die Multiparameteranomalie vom Oktober 2007	20
3.2.2.3.3	Die Grundwasser-Langzeitanomalie 2008-2009	21
3.2.2.3.4	Anomalienvergleich 2000 und 2008/09	22
3.2.2.4	Langzeittrends	26
3.2.2.4.1	Grundwasserstand und Seismizität	26
3.2.2.4.2	Gasisotopie und Gasfluss	27
3.2.2.5	Alterationsprozesse als Ursache für Schwarmbeben	29
3.3	Weitere Untersuchungsgebiete außerhalb des Vogtlandes/NW-Böhmens	31
3.3.1	Vorbemerkung	31
3.3.2	Untersuchungen in Italien	32
3.3.2.1	Untersuchungsobjekt Miano	32
3.3.2.2	Untersuchungsobjekt Caprese Michelangelo	35
3.3.2.3	Untersuchungsobjekt San Faustino	37
3.3.2.4	Untersuchungsobjekt Mefite d´Ansanto	40
3.3.2.5	Untersuchungsobjekt Tramutola	42
3.3.2.6	Untersuchungsobjekt Panarea	43
3.4	Taiwan – erfolgreiche Applikationen in einer Region starker Seismizität	47
3.5	Schlussbemerkungen	50
4	Weiterführende Literatur	51
5	Veröffentlichungen der Arbeitsgruppe 1991-2010	53
	A) Publikationen in Zeitschriften, Proceedings und Büchern	53
	B) Vorträge und Poster	58
	C) Projekte, Gutachten, Konzeptionen (seit 2000)	63
	D) Öffentlichkeitsarbeit, Exkursionen, Lehre (seit 2000)	64

# 1 Das Vorhaben – Übersicht

## 1.1 Laufzeit

1991-2010

## 1.2 Personalbestand

Projektleiter: OM Prof. Dr. Reinhard Gaupp, Jena

Arbeitsstellenleiter: Dr. Ulrich Koch  
Badstraße 49, 08648 Bad Brambach  
Tel.: (037438) 21854  
Fax: (037438) 21854  
E-mail: koch@saw-leipzig.de

Wissenschaftlicher Mitarbeiter: Dr. Jens Heinicke  
Anschritt: TU Bergakademie Freiberg, Institut für Angewandte Physik,  
Leipziger Straße 23, 09596 Freiberg  
Tel.: (03731) 39 22 12  
Fax: (03731) 39 22 12  
E-mail: heinicke@physik.tu-freiberg.de  
<http://www.saw-leipzig.de/forschung/projekte>

Vorhabenbegleitende Kommission:  
Prof. Dr. Michael Korn, Leipzig (Vorsitz)  
OM Prof. Dr. Lothar Eißmann, Leipzig  
Prof. Dr. Peter Fritz, Leipzig

## 1.3 Publikationen seit 1991

Zeitschriften, Proceedings, Bücher:	64
Poster, Vorträge:	78
Projekte, Gutachten, Konzeptionen:	8 (seit 2000)
Öffentlichkeitsarbeit, Exkursionen, Lehre:	23 (seit 2000)

## 1.4 Kooperationen

### *National*

Bundesanstalt für Geowissenschaften Hannover (BGR),  
GeoForschungszentrum Potsdam (GFZ),  
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung Leipzig-Halle (UFZ),  
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Freiberg (LfULG)  
Sächsische Staatsbäder GmbH (SSB),  
Seismologisches Zentralobservatorium Erlangen (SZGRF),  
TU Bergakademie Freiberg (TUBAF),  
Umweltbüro Vogtland GmbH Weischlitz (UBV),  
Universität Leipzig, Institut für Geophysik und Geologie,  
weitere Kooperationen im Rahmen des DFG-Bündelprojektes und der Antragstellung zur DFG-Forschergruppe "Fluide".

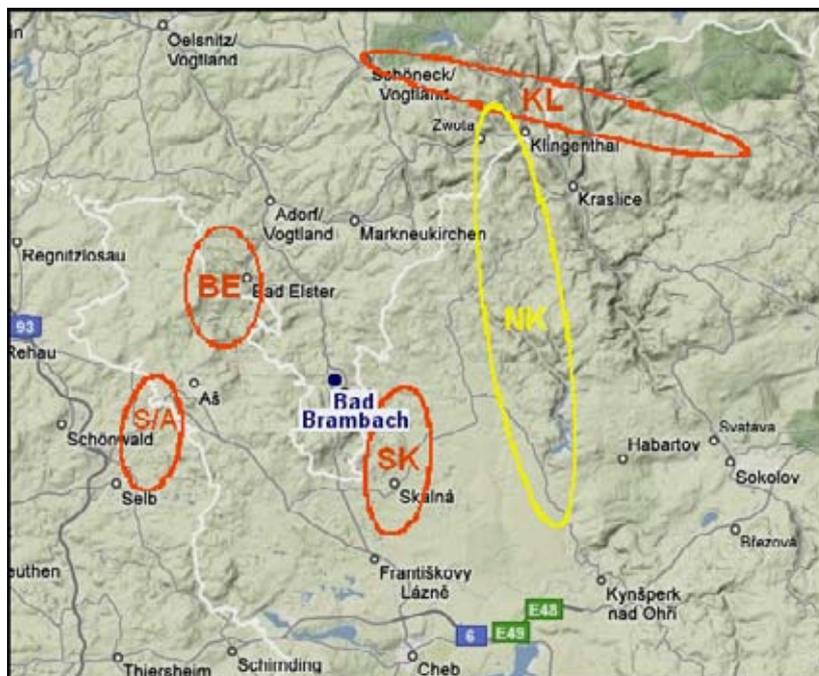
## International

Geological Survey of Israel (GSI), Israel (bis 2002),  
Geophysikalisches Institut der Tschechischen Akademie der Wissenschaften Prag (GFU),  
Tschechische Republik,  
IMAA/CNR Potenza, Italien,  
INGV Palermo / Rom / Arezzo, Italien,  
National Taiwan University (NTU), Department of Geosciences Taipeh, Taiwan,  
UNAM / CENAPRED Mexico City, Mexico (bis 2002).

## 2 Das Vorhaben – kurze Zusammenfassung der Entwicklung

### 2.1 Wissenschaftlicher Hintergrund - Zielstellung, Methodik, Ergebnisse

Neue Erkenntnisse zu den Wechselwirkungen zwischen geodynamischen Prozessen und einhergehender Fluidynamik bestimmten in den letzten 20 Jahren die Interpretation seismologischer und seismohydrologischer Untersuchungen nachhaltig. Diese Forschungsrichtung wurde von unserer Arbeitsgruppe als wesentliches Ziel ihrer wissenschaftlichen Tätigkeit verfolgt. Mittelpunkt bzw. Basisregion der Forschungstätigkeit war dabei das Obere Vogtland und NW-Böhmen (Eger-Becken). Neben der Eifel und dem Zentralmassiv (Frankreich) gehört dieses Gebiet zu den drei wichtigsten Erdbebenregionen Europas, in denen sogenannte Schwarmbeben unabhängig von starken tektonischen Beben auftreten. Im Untersuchungsgebiet ist diese Bebenaktivität als Intraplate Seismicity einzuordnen, also Erdbeben, die innerhalb tektonischer Platten stattfinden, nicht an deren Grenzen. Im Vogtland/NW-Böhmen treten bedeutende Bebenschwärme etwa aller 7-10 Jahre auf, stärkere Seismizität etwa aller 70-90 Jahre (L20)<sup>1</sup>. Das Hauptepizentralgebiet liegt seit 1985 im Raum Nový Kostel, Tschechien (Abb. 1). Die Magnituden einzelner Ereignisse sind kleiner als 5, aber die Häufigkeit kann bis zu mehreren Tausend Einzelereignissen



**Abb. 1**  
**Erdbeben-Epizentren im**  
**Vogtland/NW-Böhmen**

Seit 1985 treten die Schwarmbeben überwiegend im Gebiet um Nový Kostel (NK) auf und erreichen dort Magnituden bis 4.5.

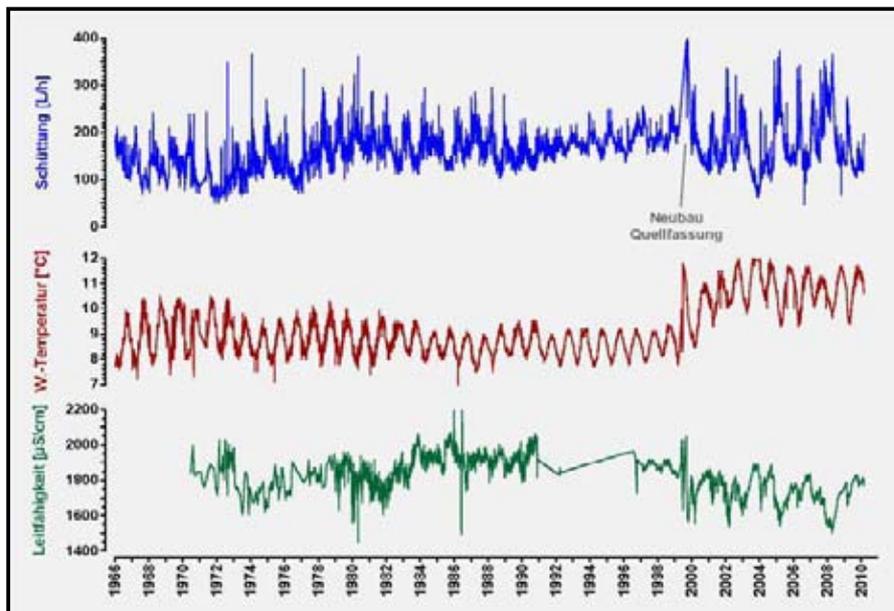
BE Bad Elster  
KL Klingenthal  
S/A Selb/Asch  
SK Skalná

innerhalb weniger Monate betragen. Nennenswerte Schäden traten bisher nicht auf. Diesem Umstand und dem Fehlen zeitlich hoch auflösender und hinreichend sensitiver Registriertechnik ist

<sup>1</sup>) Die Angaben in Klammern beziehen sich auf die eigenen Veröffentlichungen (A-D) und auf Literaturhinweise (L) des Publikations- bzw. Literaturverzeichnisses.

es wohl geschuldet, dass erst in den letzten 15-20 Jahren verstärkte Forschungsanstrengungen zu Genese und Mechanismus von Schwarmbeben unternommen wurden. Parallel dazu sind aufsteigende Krustenfluide (Wasser, Gase und mineralisierte Lösungen) immer mehr in den Focus der Betrachtungen gerückt, nicht zuletzt auch auf Grund der wissenschaftlichen Resultate unserer Arbeitsgruppe "Radiometrie-Geochemie" seit 1991. Anhand der publizierten Forschungsergebnisse in den vergangenen zwei Jahrzehnten lässt sich dies nachvollziehen.

Vor und kurz nach der Gründung der jetzigen Arbeitsgruppe im Jahre 1988 standen hydrogeologische, geochemische, isopenhydrologische und radiometrische Arbeiten zum Quellschutz in Bad Brambach noch im Mittelpunkt der Forschungstätigkeit. Jedoch schon ab Herbst 1989 wurden – begünstigt durch die lokale Nähe zum stärksten Schwarmbebengebiet Deutschlands – mögliche Zusammenhänge zwischen Seismizität und dem hydrogeologischen Regime der Wetzinquelle (früher Radonquelle), der stärksten Radontrinkquelle Europas, intensiv untersucht. Auslöser war eine Initiative von Dr. Kämpf (GFZ Potsdam) und unserem damaligen Projektleiter, Prof. Watznauer, die Mineralwässer nach der starken Schwarmbebenserie von 1985/86, der bis dahin seismisch aktivsten Periode seit der vogtländischen Schwarmbeben von 1908–1913, zeitlich zu beobachten. Die zu Beginn der 90er Jahre noch international sehr populären Radonmessungen als Basis für die Ableitung von Erdbebenvorhersagemethoden fanden auch an der Wetzinquelle Anwendung. Die hydrochemisch-physikalische Einzigartigkeit der Bad Brambacher Mineralwässer, die auf ihrer Kombination aus Mineralien, Kohlendioxid und Radon beruht, und ihre Nähe zu den Epizentren der vogtländisch-NW-böhmischen Schwarmbebengebiete, ließen diese Untersuchungen im Rahmen eines Langzeitvorhabens als höchst geeignet erscheinen, zumal der Stand der Vorarbeiten Bad Brambach zu einem der hydrogeologisch am besten untersuchten deutschen Kurorte machte. So wurden die Messreihen wichtiger Quellcharakteristika, die seit 1966 von dem 1991 abgewickelten Quellenlabor der Sächsischen Staatsbäder aufgebaut worden waren, von der Arbeitsstelle der SAW praktisch lückenlos fort-gesetzt. Sie sind mit ihrer über 40 jährigen Dauer seither nicht nur eine wichtige Basis für seismohydrologische Untersuchungen, sondern haben auch das Interesse der Klimaforscher geweckt ([Beispiel s. Abb. 2](#)).



**Abb. 2**  
**Schüttung, Wasser-**  
**temperatur**  
**und Leitfähigkeit**  
**der Wetzinquelle,**  
**Bad Brambach**  
**1966-2010**  
 Basis: Tageswerte

Die kontinuierlichen Messungen der Radonaktivität an der Wetzinquelle über das Gamma-Äquivalent der Radonfolgeprodukte zeigten schon nach kurzer Zeit erste Anomalien vor und nach lokalen Schwarmbeben. 1994 gelang der Arbeitsgruppe über statistische Analysen der Nachweis, dass nur Beben eines bestimmten Epizentralgebietes um Nový Kostel (CZ) in Bad Brambach Anomalien induzieren – ein wesentlicher Aspekt, der auf eine mögliche hydraulische Verbin-

dung über ein O-W streichendes Störungssystem schließen ließ. Später wurde ein Modell diskutiert, nach dem beide Gebiete einem gemeinsamen Spannungsregime unterliegen, welches sich aber durch lateral unterschiedliche Effekte – Beben in Nový Kostel und Anomalien in Bad Brambach – bemerkbar macht. Bis zur jüngsten Schwarmbebenseerie von 2008/2009 haben sich die Zusammenhänge zwischen Seismizität im Raum Nový Kostel und Anomalien im Bad Brambacher Mineralaquifer bestätigt. Bis auf eine Gasflussanomalie am Schönberger Säuerling vor einem Bebenschwarm, der sich im Januar 2010 nördlich von Bad Brambach ereignete, konnten in Bad Brambach selbst keine hydrogeologischen Effekte nachgewiesen werden, wenn sich die Epizentren außerhalb der Region Nový Kostel befanden.

Ausgehend von diesen ersten positiven Ergebnissen wurde nach Interpretationsmöglichkeiten für das Auftreten derartiger Anomalien gesucht. International hatte sich zu dieser Zeit durchgesetzt, dass Radonanomalien vor Erdbeben nur mit Hilfe eines Transportmediums entstehen können. Ohne ein solches ist wegen der geringen Lebensdauer des gasförmigen Radionuklids  $^{222}\text{Rn}$  (Halbwertszeit 3.82 Tage) eine Migration über lange Distanzen im Untergrund wenig wahrscheinlich. Für die vogtländische Mineralwasserregion kam als Trägergas die dominierende Quellgasfraktion  $\text{CO}_2$  in Frage. Eigene Isotopenuntersuchungen des Quellgases am Mineralogischen Institut der TUBAF ergaben  $\delta^{13}\text{C}$  Werte von  $-2.5$  bis  $-4.5$  ‰, was ein deutlicher Hinweis auf eine Genese im magmatischen Milieu ist. Umfangreiche Analysen des UFZ Leipzig-Halle und des GFZ Potsdam in der gesamten Entgasungsregion ergaben weitere Indikationen für einen Fluidaufstieg aus dem oberen Mantelbereich: die luftkorrigierten  $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisse liegen deutlich über eins und die  $\delta^{13}\text{C}$  Werte weisen auf ein magmatisches Reservoir hin. An der Mofette Bublák (CZ) haben dabei die seit 1993 beobachteten  $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisse bis 2005 nahezu Ätna-Niveau erreicht, was für eine erhöhte magmatische Aktivität unter dem Eger-Becken spricht. Dieser qualitative Befund konnte durch eigene Gasmessungen an Quellen und Mofetten zwischen 1998 und 2010 quantitativ bestätigt werden: In dem Zeitraum kam es zu einem Anstieg der Gasflussrate zwischen 2 und 41 % pro Jahr in der Region, darunter auch an der Mofette Bublák.

1997 gelang es, anhand der registrierten Anomalien wenige Tage vor dem Januar-Schwarmbeben die Ursache der "Radonanomalien" aufzuklären und Schlussfolgerungen für den Aufbau neuer Messstationen, speziell für die vor einer umfangreichen Sanierung stehende Wettinquelle abzuleiten. So ergab die Auswertung der Wasserspiegelmessungen in der alten Wettin-Quellfassung, dass die bisherigen "Radonanomalien" durch überschäumendes Wasser- $\text{CO}_2$ -Gemisch im engen Quellschacht verursacht wurden, ähnlich einem sogenannten Slug Flow. In den folgenden Jahren wurden deshalb die vorhandenen und neuen Messstationen mit Trommelgaszählern ausgestattet. Die Radonmessungen erfolgten in manchen Fällen noch als paralleler Indikator für Gasflussänderungen. Die Genese der registrierten Anomalien wurde in diesem Bearbeitungsstadium noch auf eine Druckübertragung mittels Druckimpuls, verursacht durch Öffnen von Klüften während des Nukleationprozesses vor dem Schwarmbeben, zurück geführt. Für diesen Prozess mussten jedoch gewisse, noch unbekannt seismohydraulische Bedingungen erfüllt sein. Denn nicht bei jedem Schwarmbeben traten Anomalien auf, aber praktisch jede registrierte Anomalie war mit seismischen Ereignissen aus der Region Nový Kostel korrelierbar.

In diesen Zeitraum fallen wesentliche Erkenntnisse, die unser Engagement in Gebieten mit starker Seismizität, speziell in Italien, auslösten. Hatte sich schon einige Jahre zuvor an der "benachbarten" Kontinentalen Tiefbohrung (KTB) in Windischeschenbach gezeigt, dass Fluide auf offenen Klüften im Millimeterbereich bis zur Endtiefe des Bohrlochs auftreten und über bestimmte Strecken relativ schnell kommunizieren können, so haben spätere hydraulische Drucktests an diesem Bohrloch die Wirkung selbst geringer Porendruckänderungen als Auslöser von Mikrobeben bestätigt. Ein nur um wenige Prozent erhöhter Porenfluiddruck reduziert die Normalspannung in der fluidgefüllten Kluftzone, so dass ein Bruch durch den verringerten Rei-

bungswiderstand auftreten kann. Oft sind es in diesem Fall Weitungbrüche. Die Akzeptanz dieses Prozesses und die fluidalen Anomalieeffekte in Bad Brambach vor Schwarmbeben waren wesentliche Auslöser für die Initiative des DFG-Bündelprojektes "Schwarmbebengebiet Vogtland/NW-Böhmen". Unsere Arbeitsgruppe war mit einem Gemeinschaftsantrag mit dem GFZ und dem UFZ ab 1999 in diesem Projekt beteiligt (DFG-Nr.: He2177/7-1). Aus dieser Zusammenarbeit mit dem GFZ und dem UFZ folgten weitere Indikationen für Änderungen der Isotopenverhältnisse nach Schwarmbeben.

Ein Monat vor dem großen Bebenschwarm im Herbst 2000 wurde in Bad Brambach, neben einer kurzen Gaseruption, eine lang anhaltende Grundwasserspiegeländerung im tieferen, mineralisierten Grundwasserleiter registriert. Dieser Vorläufereffekt vor dem stärksten Schwarmbeben seit 15 Jahren führte zu dem derzeitigen Interpretationsstand: ein durch Porenfluid-druckänderungen induziertes Signal im tieferen, bedeckten Kluftwasserleiter "paust" sich durch Druckerhöhung bis zur verrohrten Grundwassermessstelle durch. Ein direkter fluidaler Zusammenhang zum Hypozentrum von Nový Kostel ist danach für die Genese der Vorläufereffekte keine Voraussetzung. Die Ausbildung anomaler Porendruckverhältnisse wird wahrscheinlich durch Spannungsänderungen im gesamten Gesteinskomplex auf alle fluidführenden Kluftsysteme übertragen. Inwieweit diese Porendruckänderungen auch den Beginn von Schwarmbeben triggern können, wird von den Seismologen seit einigen Jahren ausgiebig diskutiert (L10-12). So gibt es Hinweise auf Fluidtriggerung im Verlauf des aus etwa neun Einzelperioden bestehenden Bebenschwarms vom Herbst 2000. Generell ist nur bei "echten" hydrologischen Vorläufereffekten eine Fluidtriggerung von Schwarmbeben wahrscheinlich. Problematischer wird dieser Befund, wenn es sich um sogenannte co- oder postseismische Anomalien handelt, die meist als vom Beben ausgelöst interpretiert werden (dynamic strain). Ihre Ursachen können aber durchaus vor dem Bebenereignis liegen, die Transformationszeit des anomalen Signals ist hier nur länger als bei echten Vorläufern, so dass die Anomalie erst nach Einsetzen der Seismizität auftritt. Das betrifft besonders hydro- oder gasgeochemische Effekte an den Mineralquellen, deren Übertragung im Untergrund auf Migrations- und nicht auf Druckausbreitungsprozessen beruhen.

Die Modellvorstellung über die Druckausbreitung infolge spannungsbedingter Porendruckänderungen (static strain) konnte auch vor und während der Schwarmbebenserie 2008/2009, der stärksten seit 1985/86, bestätigt werden. Zusätzlich bestand erstmals die Möglichkeit, unterschiedliche Eigenschaften der Fluidanomalien von 2000 und 2008 in Zusammenhang mit Dauer und Verlauf der zugehörigen Bebenschwärme zu vergleichen.

Weiterhin wurde versucht, Ursachen für das prinzipielle seismologische Phänomen „Schwarmbeben“ zu finden. Ein Prozess, der zu dem lawinenartigen Bruchverhalten beitragen könnte, wäre in der schrittweisen, langfristigen physiko-chemischen Anlösung der Kluftflächen zu suchen, der sogenannten Alterierung. Es konnte gezeigt werden, dass aggressive Krustenfluide die mechanische Stabilität im umgebenden Kluftgesteinsbereich reduzieren können, was eine verringerte Bruchfestigkeit zur Folge hat. Dadurch würden zahllose Mikrobeben schon bei geringerer Spannungsakkumulation initiiert werden. Diese können dann den Charakter von Schwarmbeben aufweisen (A58).

Parallel zu diesen Ergebnissen wurden wichtige Erkenntnisse über exogene Einflüsse auf die seismohydrologischen Parameter gewonnen, wie z. B. zur Abhängigkeit der Gasemissionsrate vom Luftdruck, vom Grundwasserstand und vom Niederschlag (Wassersättigung und Frostversiegelung des Bodens). Für derartige Untersuchungen waren besonders Langzeitmessungen während seismisch ruhiger Phasen geeignet. Darüber hinaus war der Nachweis tritiumfreien Wassers in einer stillgelegten Mineralwasserbohrung ein wichtiger Schritt für eine verbesserte Interpretation der langjährigen Tritiumreihen Bad Brambacher Mineralwässer.

Es darf nicht unerwähnt bleiben, dass für fast alle Messstationen das elektronische Design, der Aufbau und die Installation in Eigenleistung vorgenommen wurde. Das führte besonders für den Geländeeinsatz zu innovativen, energie-effektiven Gerätekonzeptionen bei vergleichsweise geringen Kosten.

Durch die erfolgreichen seismohydrologischen Messungen im vogtländischen Raum wurden auch ausländische Kollegen auf die Untersuchungen der Arbeitsgruppe aufmerksam. Hieraus entstanden intensive Kontakte und zum Teil langjährige Kooperationen zum IMAA und INGV in Italien, dem GSI in Israel, dem GFU in Tschechien und der Nationalen Universität von Taiwan. Hervorzuheben sind dabei die Fluiduntersuchungen in den Regionen Umbrien/Toskana, Basilicata und an den submarinen Gasaustritten vor Panarea, nahe des Vulkans Stromboli. Die Langzeitregistrierung der Fluidemission ergab auch in diesen Gebieten zahlreiche Anomalien, welche oft im Zusammenhang mit den seismischen Prozessen der näheren Umgebung standen. Besonders erwähnenswert sind die post-seismischen Entgasungen an den Mofetten von Caprese Michelangelo von 2002-2004, die teilweise als Vorläufereffekte aufgetretenen Gaseruptionen in Tramutola im Val d'Agri (Basilicata) zwischen 2000 und 2005 sowie eine Gasflussanomalie in San Faustino beim Abbruzzen-Erdbeben im Frühjahr 2009. Besonders vor Panarea, wo neue, eigenentwickelte akustische Gasflusslogger zum Einsatz kamen, konnten Zusammenhänge zwischen Entgasungsrate auf dem Meeresboden und der vulkanischen Aktivität des Stromboli nachgewiesen werden.

Der Auftrag, die 7. Veranstaltung der alle zwei Jahre stattfindenden International Conference on Gas Geochemistry in Freiberg (Sachsen) zu organisieren, war Bestätigung und Anerkennung unserer Forschungsergebnisse und dieses internationalen wissenschaftlichen Engagements.

## **2.2 Schlussfolgerungen, Empfehlungen**

Das Resümee von über zwanzigjähriger seismohydrologischer Forschung an der SAW zu Leipzig wird nachfolgend kurz dargestellt. Die Empfehlungen sollen nicht nur für mögliche Nachfolgewissenschaftler im Schwarmbebengebiet Vogtland/NW-Böhmen, sondern auch für diejenigen Fachkollegen eine Unterstützung sein, die sich mit der Anwendung seismohydrologischer Methoden in jenen Regionen unserer Erde beschäftigen wollen, wo starke tektonische Erdbeben auftreten.

1. Seismohydrologische Anomalien können sowohl vor, während oder nach Erdbeben auftreten. Insbesondere die Mechanismen für kurzzeitige Vorläufereffekte (Druck) und postseismische geochemische Effekte (Transport, Migration) bedürfen einer Klärung. Angesichts der unterschiedlichen Reaktionszeiten und der Komplexität der Vorgänge ist diese Aufgabe nur mit einem kontinuierlichen Langzeitmonitoring bei zeitlichen Auflösungen zwischen Minuten und mehreren Tagen/Wochen lösbar.
2. Der Zufallscharakter der für die Verifizierung eines solchen Forschungsansatzes erforderlichen Erdbeben erfordert eine ständige Überwachung des hydrologisch-geochemischen Backgrounds, um seismohydrologische Anomalien sicher identifizieren zu können. Dazu gehören umfangreiche hydrogeologische Vorarbeiten ebenso wie die parallele Registrierung von meteorologischen und hydrologischen Einflussgrößen mit entsprechender zeitlicher Auflösung (Luftdruck, Niederschlag, Wasserstände, Quellschüttungen).
3. Internationale Erfahrungen zeigen, dass mit diskontinuierlichen und/oder kurzzeitigen Messungen kaum Erfolge zu erzielen sind. Daher werden gerade die über fast zwei Jahrzehnte in Bad Brambach gewonnenen Messreihen in Fachkreisen als besonders wertvoll eingeschätzt. Auch der über mehrere Jahre andauernde Anstieg des Mantelheliums an der Mofette Bublák (CZ) und der zeitversetzt registrierte Aufwärtstrend der Gasflussraten, der eine Veränderung

im Entgasungsverhalten unter dem Eger-Becken signalisiert, unterstreichen die Bedeutung von Langzeitbeobachtungen.

4. Eine Vielzahl von seismohydrologischen Anomalien, die in Bad Brambach, aber auch in Italien und Taiwan registriert wurden, zeigt, dass Fluide unter bestimmten Voraussetzungen in einem zusammenhängenden Kluftsystem Spannungsaufnehmer sind, die als hochsensible hydrologische Strain-Meter das "Signal" bis zur Erdoberfläche transportieren/übertragen können. Dem gemäß handelt es sich bei den registrierten seismohydrologischen Effekten hauptsächlich um Anomalien des hydrostatischen Druckes (z. B. in Quelfassungen oder Grundwasserpegeln) oder der freien Gasemission an Quellen und Mofetten.
5. Die Druckausbreitung über Poren- und Klufttraum ist das Bindeglied zwischen dem dynamischen Prozess in der Erdkruste und der Erdoberfläche. Dies verdeutlicht auch die festgestellte Häufung von Schwarmbebenereignissen in der Region während oder nach Zeiträumen mit niedrigem Grundwasserstand, die auf eine dann erhöhte Mobilität von Tiefenfluiden schließen lässt.
6. Die Untersuchung des geohydraulischen Regimes in seismisch aktiven Gebieten sollte daher ein Hauptgegenstand zukünftiger Forschung sein. Hilfreich für die Entschlüsselung des Druckmechanismus sind z. B. zeitlich hoch aufgelöste Wasserspiegelmessungen an Tiefbohrungen, die langfristige Verteilung des geochemisch-geomikrobiologischen Inventars von (Mineral-) Quellen oder das Studium der oberflächennahen Fluidfreisetzung in Gebieten mit starker rezenter Tektonik und Seismizität sein.
7. Stehen gleichzeitige, kontinuierliche Langzeitmessungen des Gasflusses an mehreren Quellen und Mofetten eines Gebietes zur Verfügung, so können daraus einfache gashydraulische Parameter für den jeweiligen Standort abgeleitet werden, wie z. B. Verhältnisse von Kluftquerschnitten und Strömungsgeschwindigkeiten im Austrittsbereich der Gase an der Oberfläche.
8. Sowohl der internationale als auch eigene Forschungsstand erlaubt es gegenwärtig noch nicht, eine Erdbebenvorhersage nach **Ort – Zeit – Magnitude** gemäß den Anforderungen internationaler Gremien zu realisieren, wie man es z.B. aus der Meteorologie kennt.
9. An gut untersuchten Standorten mit nachgewiesener seismohydrologischer Sensitivität und einem gesicherten Zusammenhang zu einem Epizentralgebiet (wie Bad Brambach – Nový Kostel) können jedoch Aussagen über die Wahrscheinlichkeit des Eintretens von Schwarmbebenereignissen in einem gewissen Zeitraum nach hydrologischen Anomalien getroffen werden. Für diese Methode sollte aber der weniger strenge Begriff "Prognose" verwendet werden.
10. Gegenwärtig können aus dem Verlauf, der Dauer und Höhe einer Gasfluss- oder Grundwasserstands-anomalie keine Vorhersagen über den genauen Beginn und die Dauer des potenziellen Schwarmbebens, die Anzahl der Einzelereignisse, die Verteilung und Höhe der Magnituden oder eine maximale Stärke abgeleitet werden. Auch eine Übertragung der Aussagen auf Erdbeben in anderen, über Nový Kostel hinaus gehenden Epizentralgebieten der Region ist derzeit nicht möglich (Abb. 1 u. 3). Dazu bedürfte es z.B. eines langfristigen Grundwassermonitorings an geeigneten oder noch einzurichtenden Pegeln in den jeweiligen Gebieten. Hierzu wäre eine Fortführung der Untersuchungen angebracht gewesen.
11. Ausblick: im internationalen Maßstab wird tendenziell der Zusammenhang einer fluidinduzierten Seismizität immer stärker diskutiert. Der Einfluss des Porendrucks auf das Spannungsregime kann letztendlich zu den entscheidenden Verschiebungen im Mohr'schen Bruchliniendiagramm führen (L31).

### 3 Ausführlicher Forschungsbericht

#### 3.1 Forschungsgegenstand und interdisziplinäre Zusammenarbeit

Die wichtigsten Erdbeben- und Vulkanzonen der Erde befinden sich an aktiven Plattengrenzen. Aber nicht nur tektonische Verschiebungen und Lavaeruptionen kennzeichnen diese Zonen, sondern man findet ebenso zahlreiche Fluidemissionen in Form von Gas- und/oder Mineralwasseraustritten. Inzwischen konnte weltweit überzeugend dargelegt werden, dass zwischen diesen Fluiden und den regionalen geodynamischen Prozessen ein Zusammenhang besteht. Inwieweit nun diese Fluide, welche durch sehr tiefe magmatische bzw. metamorphe Prozesse freigesetzt werden, das Auftreten von seismischen Ereignissen beeinflussen, ist Arbeitsgegenstand zahlreicher Forschungsteams. Neben dem weit verbreiteten Ansatz mittels seismischer Methoden zu diesbezüglichen Aussagen zu gelangen, versuchte unsere Arbeitsgruppe, diese Zusammenhänge über die *langfristige* Untersuchung von Fluiden zu erforschen. Als Fluide, die nachweislich aus dem Krusten/oberen Mantelbereich der Erde kommen und über Kluftsysteme bis zur Erdoberfläche gelangen, eignen sich Kohlendioxid, Methan, Wasserstoff, Stickstoff und einige Edelgase mit entsprechender Isotopensignatur, die alle mit unterschiedlichen Anteilen einer Wasserphase vermischt sein können. Austritte von Mineral/Thermalwasserquellen mit gelösten und freien Gasanteilen sowie "trockene" Quellgasaustritte, sogenannte Mofetten, wurden deshalb besonders in die Untersuchungen einbezogen.

Die Arbeit unserer Forschungsgruppe konzentrierte sich im Wesentlichen auf die Interpretation zeitlicher Änderungen der Fluidfreisetzung an ausgewählten Standorten. Diese Kurzcharakterisierung basiert auf der Notwendigkeit einer interdisziplinären Forschung, welche oft in Verbindung mit Kooperationspartnern durchgeführt wurde.

Folgende Zusammenhänge wurden dabei von unserer Arbeitsgruppe untersucht bzw. durch Kooperation oder Literaturrecherchen in die Interpretation einbezogen:

Physikalisch-chemische Charakterisierung der Fluide	Chemische Elementanalyse, Leitfähigkeit, pH-Wert, Redoxpotential, Temperatur sowie die zeitliche Änderung dieser Parameter durch kontinuierliche Messung oder regelmäßige Beprobung.
Genese der Fluide, Reservoirvorstellungen (als ein Auswahlkriterium für den Messstandort)	Zusammenstellung von Informationen zum stratigraphischen Aufbau des Untersuchungsgebietes, speziell zu metamorphen und magmatischen Bildungen (Lagerstätten, Vulkane etc.); Isotopenanalysen der Fluide ( $^{18}\text{O}$ , D, T, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ , $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ , He, $^{15}\text{N}$ , $^{222}\text{Rn}$ , $^3\text{He}/^4\text{He}$ als Krusten/Mantel Signatur).
mögliche Transportpfade für die Fluide	Analyse des tektonischen Störungssystems; Herdflächenlösungen geben Hinweise zum Kluftsystem und zum Einfluss von Fluiden auf den Herdmechanismus; $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Werte liefern Aussagen zur möglichen Tiefenreichweite des Fluidaufstiegs.
Geodynamik / Seismologie	Einbeziehung des Spannungsregimes des Untersuchungsgebietes; Aussagen aus seismischen Ergebnissen werden integriert; Herdflächenlösungen – Non-DC-Prozesse, Verteilung der Beben – Aufstiegszonen, Low-Velocity-Zonen – mögliche Fluidreservoirs; Migration der Beben – Hinweise auf Porendruckdiffusionsprozesse.
Analyse historischer Daten	Informationen über alte Mineralquellen, Mofetten sowie mögliche seismohydrologische Phänomene aus alten Schriften; speziell Freiberg besitzt hervorragende Recherchemöglichkeiten: den Altbestand der Bibliothek der Bergakademie und das Bergarchiv mit sehr alten Werken zum Bergbau und zur Geologie.
Strukturgeologie	Die Verteilung der Fluidemissionsstellen gibt Auskunft über strukturgeologische Einheiten: Hinweise zur Lage und Streichrichtung der offenen Kluftzonen als Transportpfade.
Registrierung von Messdaten	Aus den Ergebnissen der letzten Jahre haben sich als wichtigste Messparameter die porendruckabhängigen Größen, wie Gas/Wasser-Freisetzung (Flowrate) und Wasserspiegelschwankungen herauskristallisiert. Je nach Standort wurde versucht, sie

	kontinuierlich und mit relativ hoher Frequenz zu registrieren. Weitere Parameter wie Radonkonzentration, Wassertemperatur, chemische Elemente, Leitfähigkeit usw. wurden je nach Möglichkeit parallel registriert bzw. durch Beprobung gewonnen.
Analyse von störenden Einflußgrößen zur sicheren Identifikation von Anomalien	Eine parallele Registrierung von „störenden“ Einflussgrößen, wie Niederschlag, Luftdruck, Temperatur sowie eine Analyse der Auswirkungen jahreszeitlicher Variationen und markanter Wetterlagen, wie Schneeschmelze oder lange Trockenheit, ist unabdingbar. Bei Grundwasserstands anomalien hat sich die Differenzbildung zwischen einem seismohydrologisch sensitiven und einem Vergleichspegel bewährt, der allein die meteorologischen Einflüsse abbildet. Wo erforderlich, sollte der Erdzeiteneinfluss berücksichtigt werden.
Diskussion möglicher Ursachen für Anomalien	Bei einem ungestörten Fluidtransportprozess kann von einem mehr oder weniger gleichförmigen Parameterverhalten am Fluidaustritt ausgegangen werden. Änderungen einzelner Parameter haben eine Ursache im Untergrund, die es zu erkunden gilt. Nach einer Evaluierung der genannten, störenden Einflussgrößen können dann andere Prozesse in Betracht gezogen werden: <i>Transportanomalie:</i> die Wegsamkeiten des Fluidaufstiegs werden durch Spannungsumlagerungen beeinflusst, es kommt zu Änderung der Transportparameter bzw. Änderungen des Porenfluiddrucks; <i>Mischungsanomalie:</i> Veränderter Porenfluiddruck durch Spannungsänderungen bewirkt verstärkte oder verminderte Beimischung oberflächennaher Fluide; <i>Reservoiranomalie:</i> Änderungen im Druck-/Temperaturregime des Fluidreservoirs führt zu einer veränderten Abgabe überkritischer Fluide. Änderungen in der Normalspannung wäre u. a. eine Folge davon.
Einbeziehung weiterer Messverfahren	Parallele Anomalien in chemischen oder isotopengeochemischen Analysen; Geoelektrische Eigenpotential-Registrierungen zur Identifizierung von Änderungen des fluidbeeinflussten Strömungspotentials; Geomikrobiologischen Untersuchungen als weitere mögliche Informationsquelle über Auswirkungen von Druckvariationen im Untergrund; Geodätische Ergebnisse zu möglichen großräumigen Hebungen oder Verschiebungen.

Die Bedeutung der interdisziplinären Herangehensweise für derartige Fragestellungen spiegelte sich aber auch in dem von der BGR/SZGRF 1997 ins Leben gerufenen DFG-Bündelprojekt „Schwarmbebengebiet Vogtland/NW-Böhmen“ wider.

Ausgangspunkt für dieses Projekt waren nicht nur die geowissenschaftlich sehr interessanten vogtländischen Schwarmbeben allgemein und ihre mögliche Beeinflussung durch Fluide, sondern auch unsere Forschungsergebnisse hinsichtlich der registrierten Fluidemissionsanomalien vor Erdbeben, welche in einem lokal begrenzten Epizentralgebiet bei Nový Kostel (Tschechische Republik, ca. 12 km östlich von Bad Brambach) auftreten. Dieser Zusammenhang wurde in einem wesentlich größeren Areal, im sogenannten Bäderdreieck zwischen Bad Elster, Bad Brambach, Franzensbad, Marienbad und Karlsbad mit weiteren Messpunkten untersucht. Die innerhalb des Bündels entstandenen Arbeitsgruppen bestanden größtenteils nach dem Projektabschluss weiter und setzten im Ergebnis eines DFG-Rundgesprächs im November 2004 ihre Zusammenarbeit fort, um 2006 die Gründung einer transdisziplinären Forschergruppe bei der DFG zu beantragen. Dieses Vorhaben, das die beiden (neo-)geotektonisch hoch interessanten Gebiete Vogtland/NW-Böhmen und Eifel unter vulkanologischen, seismologischen, fluiddynamischen, geodätischen und geomikrobiologischen Aspekten untersuchen sollte, wurde jedoch abgelehnt.

Aus den Ergebnissen unserer langjährigen Grundlagenforschung im Vogtland ergaben sich aber auch Strategien für Messeinsätze in anderen erdbebengefährdeten Regionen der Erde (siehe Punkte 3.3 und 3.4) bzw. waren Ausgangspunkt für DFG-, EU- und BMBF-Projektanträge. Allein bis 2005 wurden 15 Anträge eingereicht. Leider war die Akzeptanz aus unterschiedlichsten Gründen nur selten gegeben. Nur zwei davon wurden bewilligt (siehe Punkt 6: C1, C3), was jedoch den bilateralen Kooperationen in der Regel keinen Abbruch tat. Die gemeinsamen Forschungsziele wurden dann, wenn möglich, mit geringeren Mitteln untersucht.

## 3.2 Bad Brambach – ein seismohydrologisch sensitiver Standort

### 3.2.1 Grundlagen

Mit dem Interesse der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig am Aufbau einer Arbeitsstelle im Vogtland, speziell in Bad Brambach, wurde eine Tradition fortgesetzt, die von den Akademiemitgliedern HERMANN CREDNER und FRANZ ETZOLD durch ihre umfangreiche Dokumentation der starken vogtländischen Schwarmbeben zwischen 1900 und 1919 begründet worden war.

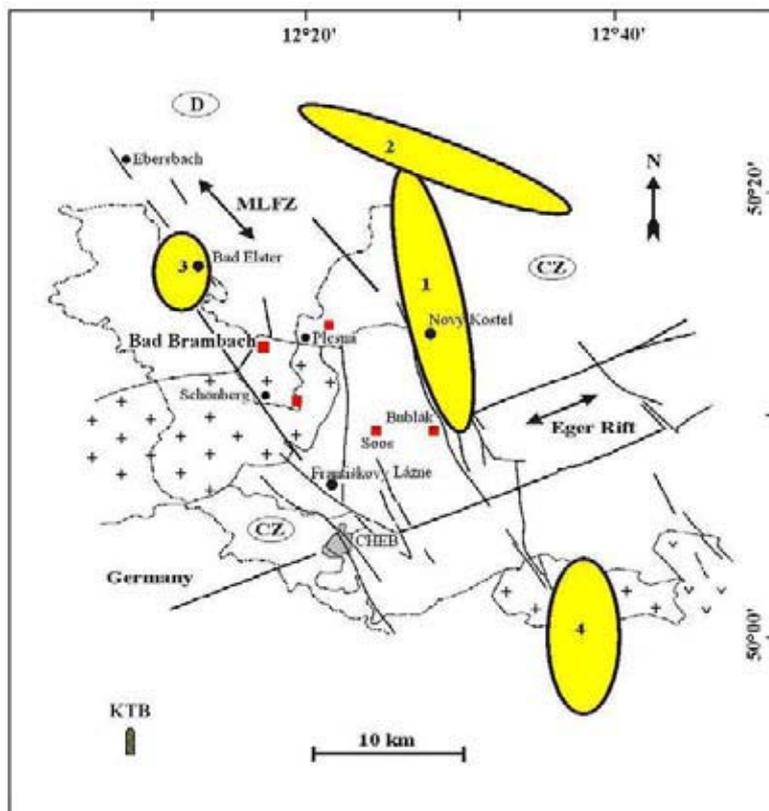
Seit 1974 ist mit Unterbrechungen eine Arbeitsstelle in Bad Brambach ansässig, die bis Ende der 80er Jahre des vergangenen Jahrhunderts Grundlagenforschung zum vorbeugenden Schutz der Mineralquellen dieses Sächsischen Staatsbades betrieb. Diese Arbeit wurde 1989 unter Mitarbeit des bis 1990 existierenden Quellenlabors der Staatsbäder zu einem gewissen Abschluss geführt (L1).

Die Idee zu dem 1989 begonnenen und seit 1991 in das Akademienprogramm eingegliederten Langzeitprojekt entstand nach dem Auftreten sehr starker Erdbebenschwärme im Vogtland und NW Böhmen in den Jahren 1985/86. Sie wurde maßgeblich von dem 1990 verstorbenen Geologen OM Prof. ADOLF WATZNAUER initiiert, der erkannt hatte, dass die bis dahin erzielten hydrogeologischen Ergebnisse und die Daten des Quellenlabors beste Voraussetzungen für systematische Forschungen zum Langzeitverhalten hydrologischer Parameter im Zusammenhang mit der lokalen Seismizität boten. Weltweite Untersuchungen, mit Hilfe von Radonmessungen in der Bodenluft, an Quellen oder an Bohrungen Erdbebenvorhersagemöglichkeiten abzuleiten, ermutigten dazu, nach einer Verbindung zwischen lokaler Seismizität und möglichen Variationen der Radonkonzentration in Mineralwässern zu suchen.

Mit der Einrichtung unserer Freiburger Arbeitsstelle wurde außerdem die traditionelle Verbindung zwischen SAW, Bergakademie Freiberg und den Staatsbädern aufrechterhalten, die 1911 mit den Freibergern CARL SCHIFFNER und MAX WEIDIG begann. Sie identifizierten damals im Rahmen ihrer Untersuchungen zur Radioaktivität der Quellwässer Sachsens die Wetтинquelle als die stärkste radioaktive Mineralquelle der Welt.

Die Mineralquellen von Bad Brambach sind Teil der vogtländisch/NW-böhmischen Mineralwasserprovinz und befinden sich in unmittelbarer Nähe der Marienbader Störungszone (MLFZ) und des Eger-Grabens (Abb. 3). Sie entspringen an der Nordgrenze des Fichtelgebirgsgranites, der im Bereich der Kontaktzone zum vogtländischen Ordovizium stark tektonisch zerrüttet ist. Das Gebiet ist nach CREDNER der Locus Typicus für Schwarmbeben an sich (L2). Es weist einige typische Cluster an Epizentren auf, von denen das Gebiet 1 bei Nový Kostel dasjenige mit der größten Bebenhäufigkeit der letzten Jahrzehnte ist (L3). Speziell dieses Bebencluster liegt im Kreuzungsbereich der MLFZ mit einer Nebenstörung (L4). Die Schwärme haben Magnituden  $< 5$  und Herdtiefen zwischen 3 und 12 km. Sie werden von 6 lokalen Messnetzen mit über 30 Stationen registriert. Von den Bad Brambacher Mineralquellen erschien von Anfang an die Wetтинquelle als seismohydrologischer Standort wegen ihrer hydrogeologisch-geochemischen Eigenschaften als besonders geeignet:

Mineralisation	$> 2000 \text{ mg/l}$
Radonkonzentration	$26 \text{ kBq/l}$
CO <sub>2</sub> -Übersättigung	$2500 \text{ mg/l}$
Anteil alter meteor. Wässer	$80 \%$
Gasphase	$99.5 \%$ CO <sub>2</sub>
mit magmatischer Signatur	$\delta^{13}\text{C} = -2 \text{ bis } -5 \text{ ‰ PDB}$
<sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> He Verhältnis	$2 \cdot 10^{-6} \text{ (R/R}_a > 2)$ .



**Abb. 3**  
**Schwarmbebenregion Vogtland/NW-Böhmen mit Messstandort Bad Brambach**

Geologische Einheiten:  
 Granit (+), metamorphe Gesteine, Sedimente;  
 Tektonische Hauptstrukturen:  
 Marienbader Störungszone (MLFZ, NW-SE), Eger-Rift (ENE-WSW).  
 Von den Epizentralgebieten 1-4 ist Nr. 1 dasjenige mit der höchsten Bebenhäufigkeit.  
 ■ Quellen/Mofetten mit seismohydrologischen Stationen der SAW;  
 KTB:  
 Kontinentale Tiefbohrung Oberpfalz (nach A30).

Die CO<sub>2</sub>-Gehalte der Quellen und Mofetten der Region sind auf den tertiären bzw. quartären Vulkanismus der Region zurückzuführen. Außerdem weisen die Gase durchweg einen hohen Anteil an Mantelhelium auf: Wetzinquelle 29–36 %, Bublák 78–99 % (L5, A63). Besondere Bedeutung für die Interpretation der bis ins Jahr 1972 zurückreichenden Tritiummessungen an den Brambacher Quellen und für Mischungsberechnungen hat der 2001 erbrachte Nachweis von tritiumfreiem Wasser in einer stillgelegten 200 m tiefen Mineralwasserbohrung (B39, B42, A48), da auf diese Weise die bis dahin vorausgesetzte Existenz einer "alten" Grundwasserkomponente bestätigt werden konnte.

### 3.2.2 Etappen des Erkenntniszuwachses im Oberen Vogtland

#### 3.2.2.1 Radonanomalien und Bebencluster, 1989-1995

Bereits 1989 wurde mit einer einfachen, kunststoffverrohrten NaJ-Szintillationssonde begonnen, im Quellschacht der Bad Brambacher Wetzinquelle die Gamma-Strahlungsaktivität mit einem Aufzeichnungsintervall von 10 min zu registrieren. Wegen der hohen Radonaktivität im Wasser war die Verwendung des Rn-Nachfolgers Bi-214 als Radonäquivalent naheliegend und zulässig. Parallel dazu wurde in einer 1 m tiefen Bohrung im Kurpark die Radonaktivität der Bodenluft mit einem alpha-sensitiven Halbleiterdetektor gemessen (Messintervall: 100 min).

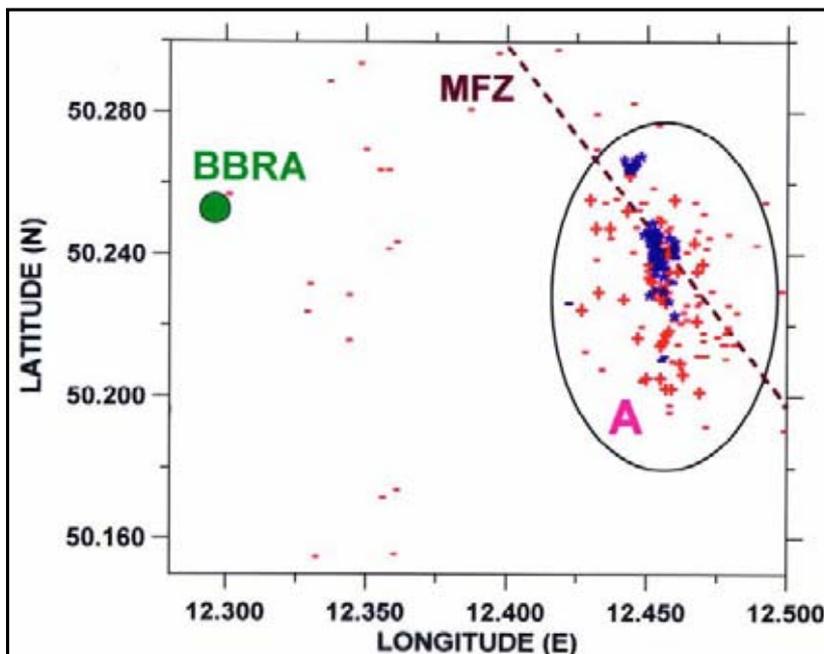
Die Auswertung dieser ersten Messungen und der internationalen Literatur führten 1991 zu folgendem grundlegendem Forschungsansatz:

- Geochemische Veränderungen infolge geotektonischer Prozesse sind – wenn überhaupt – an Grundwässern und/oder den Gasen im Boden bzw. Wasser zu erwarten, da diese eine fluidale Kommunikation zwischen geotektonisch beeinflussten Tiefenbereichen und der Erdoberfläche herstellen können.

- Einzelne tägliche oder längerperiodische Beprobungen reichen für die erwartete wissenschaftliche Aussage nicht aus. Von Anfang an sind Messzeitintervalle von kleiner als zwei Stunden einzuplanen. Der Einsatz automatisch registrierender Stationen ist notwendig.
- Die Messungen müssen wegen des zufälligen Auftretens von Erdbeben langfristig angelegt sein, besonders auch im Hinblick auf eine ausreichende, statistische Absicherung der natürlichen Schwankungsbreite der Signale (nicht-seismogener Background).

Bis 1995 wurde im Quellwasser der Wetтинquelle über 20 Gamma-Strahlungsanomalien gemessen. Mit Methoden der räumliche Statistik konnten 70 % mit seismischen Ereignissen in einem eng begrenzten Gebiet bei Nový Kostel (CZ, 12 km E von Bad Brambach ) korreliert werden (Abb. 4, A15-A19). Es handelte sich überwiegend um Vorläufereffekte, die wenige Stunden bis Tage vor dem Schwarmbeben auftraten. Als Ursache wurde zunächst eine höhere Radonfreisetzung durch den Spannungsaufbau im Untergrund vor den Beben angenommen. Die anderen 30 % der Anomalien waren auf meteorologische Ursachen (extreme Quellschüttung) und Unregelmäßigkeiten bei der täglichen Quellbewirtschaftung zurückzuführen.

Zum besseren Verständnis dieser seismohydrologisch verursachten Anomalien sollte u. a. das Quellgas mittels Isotopenanalysen quasikontinuierlich untersucht werden. Der diesbezügliche DFG-Antrag wurde jedoch 1994 abgelehnt. Spätere Untersuchungen wiesen die vermuteten Zusammenhänge nach (A33).



**Abb. 4**  
Ausschnitt der Region  
Vogtland/NW-Böhmen  
mit allen Epizentren zwi-  
schen 1989 und 1998

(- + \*).

Erdbeben und Schwärme  
mit einem zeitlichen Bezug  
zu Anomalien an der Wet-  
тинquelle sind mit + und \*  
gekennzeichnet. Auffällig  
ist das Anomaliecluster  
innerhalb des Gebietes A,  
das etwa der Epizentralre-  
gion Nový Kostel ent-  
spricht.

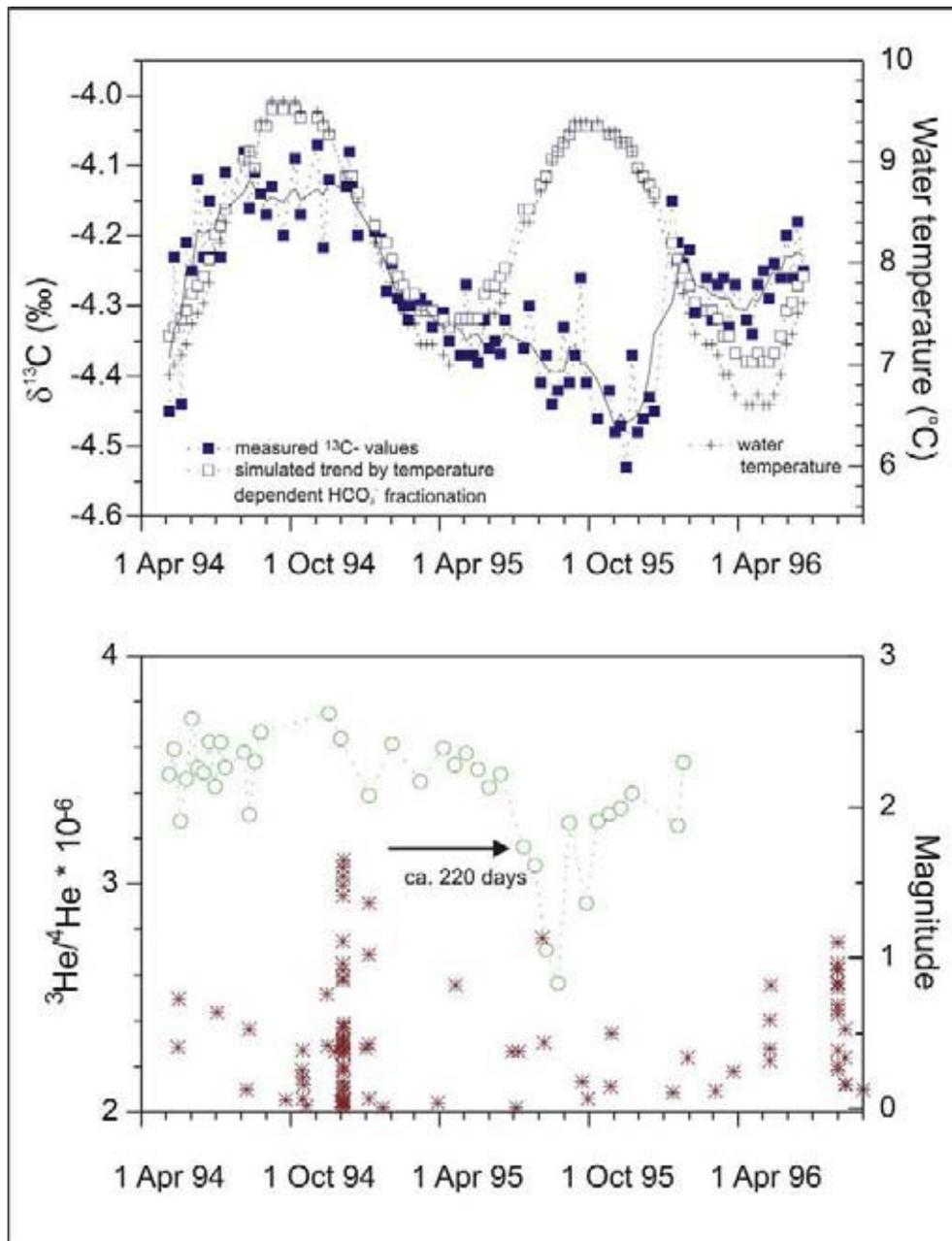
MFZ: Marienbader Stö-  
rungszone,  
BBRA: Bad Brambach  
(nach A30).

Die Radon-Bodenluft-Messungen zeigten sich wegen ihrer starken Abhängigkeit von meteorologischen Faktoren als nicht geeignet für eine Identifizierung spannungsinduzierter Anomalien. Nach Mehrfachregressionen der Messreihen zwischen Radonaktivität einerseits und Luftdruck, Temperatur, Feuchte (Niederschlag) waren praktisch keine signifikanten Anomalien mit möglichem seismogenen Hintergrund vorhanden, so dass die Bodenluftmessungen nicht weiter verfolgt wurden.

Die Ergebnisse an der Wetтинquelle führten zu fachlichen Kontakten mit italienischen Kollegen und zum Aufbau einer ersten Messstation an der Thermalwasserbohrung in Tramutola (Basilicata). Darüber hinaus entschlossen sich Kollegen von GFZ und UFZ, zwischen April 1994 und Juni 1996 an der Eisenquelle, Bad Brambach eine Gasbeprobungskampagne durchzuführen, um mögliche Änderungen von Gaszusammensetzung und Isotopie im Umfeld von Schwarmbeben zu bestimmen. Zu dieser Zeit war die Fassung der Wetтинquelle noch nicht für eine qualifizierte Gasbeprobung ausgerüstet. In die Beprobungsperiode fiel das Schwarmbeben vom 4./5. Dezem-

ber 1994. Die gemeinsame Auswertung der relativ langwierigen Analysen zeigte eine Erhöhung des Heliumgehaltes nach einem Monat, sowie 220 Tage nach dem Beben ein Absinken des  $\delta^{13}\text{C}$ -Gehaltes im  $\text{CO}_2$  und des  $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisses im Quellgas gegenüber den saisonalen Untergrundschwankungen (Abb. 5, A33, B18, L13). Dies wurde als eine verstärkte Zumischung von Gasen aus der oberen Kruste infolge des Bebens interpretiert und führte zu einer ersten Abschätzung der Transportgeschwindigkeit der freigesetzten Krustenfluide von etwa 50 m/d. Dies deutet auf einen relativ raschen Fluidtransport auf Klüften hoher Permeabilität hin.

Damit war an den Bad Brambacher Mineralquellen sowohl das Auftreten von kurzzeitigen seis-



**Abb. 5**

Zeitreihen von  $\delta^{13}\text{C}$  des freien  $\text{CO}_2$  und des  $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisses im Quellgas der Eisenquelle, Bad Brambach, zusammen mit seismischen Ereignissen im Raum Nový Kostel (aus A33).

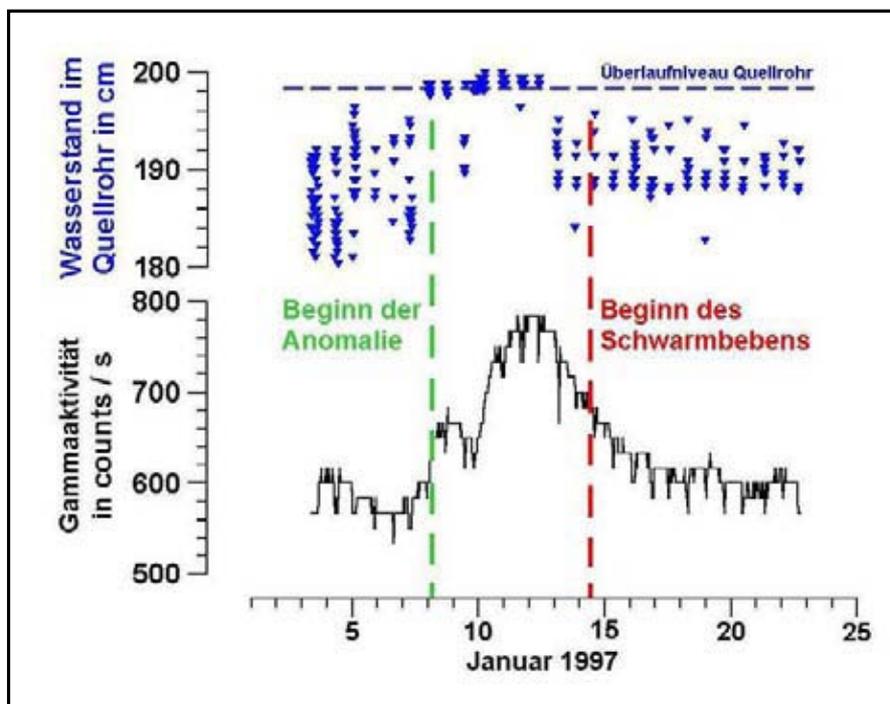
mohydrologischen Vorläuferphänomenen in Form einer Druckimpulsausbreitung im Untergrund als auch von zeitlich verzögerten gasgeochemischen Nachläufereffekten nachgewiesen, die of-

fenbar durch das Beben selbst ausgelöst werden. Gemeinsam ist ihnen der räumliche Zusammenhang mit den Beben um Nový Kostel, zu dem vermutlich eine fluidale Verbindung besteht.

Die wahrscheinlich unterschiedlichen Mechanismen für die Entstehung von kurzzeitigen Effekten vor den Beben einerseits und ausgeprägten geochemischen Nachläufereffekten andererseits führten 1995 zur zusätzlichen Installation einer Gamma-Spektrometersonde über der Sohle und einer Drucksonde in der Fassung der Wetzinquelle, um Charakter und Verlauf der Gamma-Anomalien besser charakterisieren, und damit zur Aufklärung der Genese der Bebenvorläufereffekte beitragen zu können.

### 3.2.2.2 Gasfluss – Schlüssel zur Anomaliegenese, 1996-1999

Vom 8. bis 16. Januar 1997 kam es an der Wetzinquelle Bad Brambach zu einer ausgeprägten Gamma-Anomalie, über welche die Fachkollegen in Erlangen, Jena und Prag informiert wurden (A20). Ihr Maximum trat am 12.01.97 ein, das 55 Stunden später von einem Schwarmbeben im Raum Nový Kostel mit mehr als 100 Einzelereignissen gefolgt wurde (Abb. 6).



**Abb. 6**  
Hydrostatische Druck- und Gammaanomalie an der Wetzinquelle vor dem Schwarmbeben vom Januar 1997 (nach A20).

Auffällig an dieser Anomalie war, dass sie a) nur von der oberen der beiden Gammasonden in der Quellfassung registriert wurde und b) von einer hydrostatischen Druckanomalie begleitet war. Beides deutete darauf hin, dass die Quellfassung bei einem bestimmten Betriebszustand übergeschäumt war und sich dieses Wasser in einem Drainageraum gesammelt hatte, der unmittelbar in Höhe des Sensors der oberen Gammasonde lag (A24, A26). Die praktisch unveränderte Quellschüttung zeigte, dass zusätzliches freies Quellgas für dieses Überlaufen der Fassung verantwortlich war. Damit war diese Anomalie nicht nur Anlass für die erste "interne hydrologische Vorhersage" eines Schwarmbebens im Vogtland, sondern stützte entscheidend die Modellvorstellung von einem sogenannten "Slug-flow"-Prozess im Quellschacht als Resultat einer relativ schnellen Druckimpulsausbreitung im Untergrund durch Spannungsaufbau und Veränderung des Kluft- und Porenraumes vor dem Beben (A20).

Damit waren die Radonanomalien primär auf eine höhere CO<sub>2</sub>-Entgasung zurückzuführen und ließen darauf schließen, dass Transport und Entgasung von Mantelfluiden durch das aktive Spannungsfeld im Umfeld der Marienbader Störungszone beeinflusst werden. Die Übertragung von Vorläufereffekten aus der Schwächezone (dem späteren Hypozentrum) zur Oberfläche durch

schnelle Druckwellenausbreitung innerhalb der zusammenhängenden Kluftsysteme war zu diesem Zeitpunkt eine plausible Interpretation für die Genese der beobachteten Anomalien (L6). Diese Vorstellung wird durch Ergebnisse aus dem Kontinentalen Tiefbohrprogramm (KTB) gestützt, bei dem u.a. die Existenz relativ hoher Kluftweiten mit entsprechender Diffusivität selbst in großen Tiefen nachgewiesen wurden (L7-L9).

Dementsprechend wurde in den Folgejahren der Untersuchung von Druckverhalten, Gasflussraten und Gaszusammensetzung eine stärkere Bedeutung beigemessen. Dies kam besonders bei der Konfiguration neuer Messstationen für den Geländeeinsatz zum Ausdruck.

Die bisherigen Forschungsergebnisse führten zu einem dazu, die Feldmessungen auf interessante Standorte in den tschechischen Entgasungsgebieten von Soos und Bublák auszudehnen. Erwartet wurden ähnliche Messeffekte wie in Bad Brambach, jedoch auf Grund der kürzeren Distanz zum Epizentrum zu einem anderen Zeitpunkt.

Andererseits sollten die Kontakte nach Italien genutzt werden, um seismohydrologische Stationen in anderen seismisch aktiven Gebieten zu testen und geeignete Parameter zur Identifizierung von Vorläufereffekten zu erhalten (A21). Darüber hinaus wurden aufgrund internationaler Kooperationsbeziehungen Stationen in weiteren seismisch aktiven Gebieten errichtet, die zur Schaffung und Überprüfung der Modellvorstellungen zur Anomaliegenese beitragen sollten (Israel: C1, Mexiko).

Aus Kostengründen erforderte dies die Eigenentwicklung von robusten Messstationen, die Dr. Heinicke gemeinsam mit einem Freiburger Ingenieurbüro erfolgreich bewältigte. Die meisten Stationen registrieren Umgebungs-, Wassertemperatur, hydrostatischen Druck und Gasflussrate mit einem Messintervall von 10 min. Erst später kamen kommerzielle Datenloggersysteme zum Einsatz, jedoch wurden auch dann noch Konzeption und Aufbau der Stationen entsprechend der von uns durchgeführt und den jeweiligen Standorten angepasst. So wurden u. a. spezielle Gerätesysteme entwickelt, die den relativen Gasfluss auf Grund seines verursachten Strömungsgeräusches registrieren (acoustic gas flow sensors).

Eine der neuen Messstationen nahm bereits 1996 in Soos (CZ ) ihren Betrieb auf und arbeitete praktisch bis zum Projektende. Neben den genannten Parametern registrierte sie das Eigenpotential (SP) im Untergrund entlang einer 100 m langen, N-S und O-W ausgerichteten Elektrodenanordnung. Dabei konnten mit der Erfahrung und Unterstützung italienischer Kollegen Zusammenhänge zwischen Gasflussrate der Mofetten und dem Eigenpotential im Boden statistisch ermittelt werden (A35). Diese Untersuchungen wurden später in Zusammenarbeit mit dem Institut



**Abb. 7**  
**Keller der Wetтинquelle,**  
**Bad Brambach,**  
mit Quelfassung und seismohydrologischer Multiparameterstation.

für Geophysik der Universität Leipzig fortgesetzt, wobei als Ergebnis im Dezember 2004 eine Diplomarbeit eingereicht werden konnte.

Die Erkenntnisse aus der Anomalieauswertung von 1997 und die Ergebnisse der Gasbeprobung waren ein wichtiger Beitrag für die Initiative zum interdisziplinären DFG-Bündel "Vogtlandprojekt", das von 1999 bis 2001 bearbeitet wurde und an dem unsere Arbeitsgruppe gemeinsam mit Kollegen von GFZ und UFZ in einem Teilprojekt beteiligt war (He2177/7-1, C3).

Unsere Erfahrungen hatten auch maßgeblichen Einfluss auf die Sanierung der Wetтинquelle 1999-2000, wo der Ausbau von Quellsfassung und -kopf im Sinne einer Optimierung der Messmöglichkeiten von unserer Arbeitsgruppe maßgeblich mitgestaltet werden konnte (Abb. 7).

Dadurch konnte der Standort nicht nur mit einer Multiparameterstation aus Mitteln der DFG ausgestattet werden, sondern bietet seitdem auch ideale Gasbeprobungsbedingungen. Im Herbst 2001 wurde von der BGR Hannover das Messprogramm noch um ein kontinuierlich arbeitendes Massenspektrometer zur Gasanalyse erweitert. Damit war eine seismohydrologische Basisstation für die Region geschaffen worden, die in Fachkreisen stark beachtet und anerkannt wurde.

### 3.2.2.3 *Seismohydrologische Anomalien 2000-2009*

Im Folgenden werden als seismohydrologische Anomalien Veränderungen von hydrostatischem Drucke, Schüttung, Gasfluss, Temperatur, Radioaktivität, chemischer/isotopischer Zusammensetzung an (Mineral)Quellen und Mofetten sowie Variationen des Grundwasserstandes bezeichnet, die einen durch Langzeitmessungen ermittelten natürlichen Schwankungsbereich des entsprechenden Parameters überschreiten. Dabei wird, je nach dem Zeitraum des Auftretens der Anomalie, von Vorläufern, co- oder postseismischen Effekten gesprochen. "Wirkliche" Vorläufereffekte (real precursors) sind dabei von besonderem Interesse. Sie entstehen, wenn der anomalieauslösende Prozess im Untergrund **und** das Auftreten der Anomalie an der Erdoberfläche zeitlich vor den seismischen Ereignissen liegen. Anomalien, die nach dem Beginn der Seismizität einsetzen, werden üblicherweise als "co-seismisch" bezeichnet, obwohl ihr Entstehungsprozess durchaus vor der Erdbebenperiode gelegen haben kann. In einem solchen Fall ist der zeitliche Anomalieursprung an der Oberfläche praktisch nicht zu verifizieren, da eine Trennung von hydrologischen Effekten, die das Erdbeben selbst durch den dynamischen Stress auslösen kann, den Effekt überlagert (z. B. Öffnen von Mikrokluft und Spalten durch seismische Wellen, vermehrter Gasblasenaufstieg).

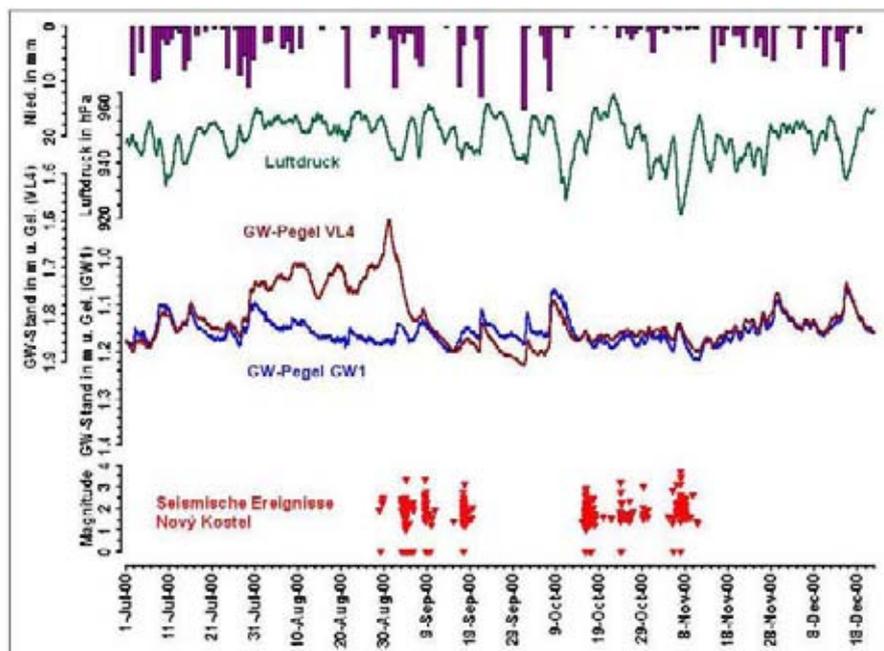
#### 3.2.2.3.1 *Die Grundwasser und Gasflussanomalie im August 2000*

Unmittelbar nach Inbetriebnahme der rekonstruierten Wetтинquelle im April 2000 wurde gemeinsam mit GFZ und UFZ eine Gasprobenahmekampagne begonnen, deren Ziel die Erweiterung der zwischen 1994 und 1996 an der Eisenquelle erzielten Ergebnisse war. Durch den nunmehr bis auf einen Gasauslass hermetisch abgedichteten Quellskopf waren ideale Beprobungsbedingungen vorhanden. Zudem lieferte die Multiparameterstation und eine seit 1999 automatisierte Wetterstation alle wichtigen Quell- und meteorologischen Parameter: Quellschüttung, Gasflussrate, hydrostatischer Druck, Wassertemperatur, Lufttemperatur, Niederschlag, Luftdruck. Später kamen noch die spezifische Leitfähigkeit und der pH-Wert des Quellwassers hinzu.

Anfang September 2000 kam es zur stärksten Schwarmbebenserie seit 1985/86 im Raum Nový Kostel. Bis zum Dezember 2004 wurden mehr als 7000 Ereignisse registriert, gefolgt von einigen schwächeren Ereignissen im Januar und Februar 2001. Die maximale Magnitude betrug 3.7. Bereits 4 Wochen vor den ersten Beben wurde ein anomaler Grundwasseranstieg von bis zu 25 cm in einer 15 m tiefen Pegelbohrung im Kurpark Bad Brambach registriert, der bis zum Beginn der Beben andauerte und danach abrupt abbrach. Der Wasserstand eines flacheren Vergleichspegels blieb unverändert, bis auf die bekannten Auswirkungen von Luftdruck und Niederschlag.

Begleitet wurde dieses Phänomen von Fluktuationen und einem Anstieg des Gasflusses in der Wetтинquelle (A36, A37, Abb. 8). Im Naturpark Soos kam es zu einer etwa 3 Monate andauernden co-seismischen Anomalie des Eigenpotentials. Im Januar und Februar 2001 wurden an zwei unabhängigen Standorten im Mofettenfeld Bublák (6 km südlich von Nový Kostel) zwei Gasflussanomalien jeweils 25 bzw. 18 Stunden nach Einzelbeben registriert.

Die gemeinsam mit UFZ und GFZ durchgeführte Gasbeobachtung zeigte einen deutlichen Anstieg



**Abb. 8**  
Niederschlag, Luftdruck, Grundwasserspiegel der Pegel VL4 (15 m tief) und GW1 (4 m tief) sowie Seismizität im Epizentralgebiet von Nový Kostel, Juli-Dezember 2000 (nach A36).

des Methangehaltes 8 Wochen nach dem Beginn des Schwarms auf Grund eines isotopisch eindeutig identifizierbaren Anstieges in der mikrobakteriellen Methanproduktion, offenbar durch zusätzlichen, seismogen freigesetzten Wasserstoff (A44, A52, B32, B38). Untersuchungen zur Herkunft dieser Wasserstoffquelle laufen gegenwärtig noch.

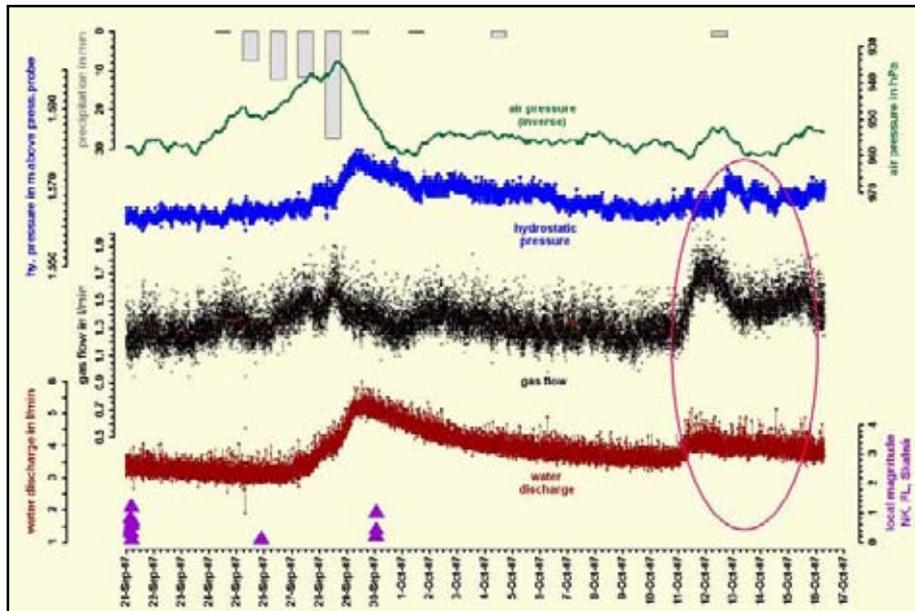
Die aus dem 2000er Schwarm gewonnenen Ergebnisse der beteiligten deutschen und tschechischen Gruppen bestätigten einen Einfluss von Tiefenfluiden, der im Verlauf der einzelnen Teilschwärme zunahm. Er kann auch im Sinne einer Triggerung der Beben durch höheren Fluiddruck und dessen Migration in Poren und auf Klüften verstanden werden (L11, L12). In diesem Zusammenhang wird auch die Bedeutung einer unter dem Eger-Becken identifizierten Mantelaufwölbung, die für die starke Entgasung in der Region verantwortlich gemacht wird, diskutiert (DFG-Projekt BOHEMA sowie L13).

Eigene Kartierungen von existierenden bzw. historischen Quellaustritten und Mofetten in der Region zeigen, dass die Austritte überwiegend an tektonische Störungen gebunden sind (A43), jedoch im Epizentralcluster von Nový Kostel oder Lazy fehlen. Diskutiert wird in diesem Zusammenhang die Möglichkeit einer undurchlässigen Zone, die im Falle eines höheren Poren-drucks dort Schwarmbeben auslöst, wogegen in Bad Brambach die gleiche Ursache zu Wasser-spiegel- und Gasflussanomalien führt (B37).

Unterstützt wird diese Modellvorstellung von der derzeitigen Neuinterpretation unserer alten Gammastrahlungs-Anomalien von 1989-1997 (A40). Der damals registrierte Überlauf des radonhaltigen Quellwassers war durch einen erhöhten Porenfluiddruck im CO<sub>2</sub>-übersättigten, tiefreichenden Mineralwasserleiter verursacht worden. Aus heutiger Sicht ist die Quelfassung im Anomaliefall einfach übergelaufen bzw. übergeschäumt.

### 3.2.2.3.2 Die Multiparameteranomalie vom Oktober 2007

Am späten Abend des 10. Okt. 2007 kam es in der Wetтинquelle, Bad Brambach zu einem Anstieg des Gasflusses, der Quellschüttung und des Fassungsdruckes, der nicht durch Niederschläge oder Luftdruckschwankungen erklärbar war (Abb. 9). Auch die spezifische Leitfähigkeit und



**Abb. 9**  
Gasfluss, Quellschüttung und Fassungsdruck in der Wetтинquelle vom 21.09.-17.10.2007.

Der anomale Bereich ist durch die rote Ellipse markiert.

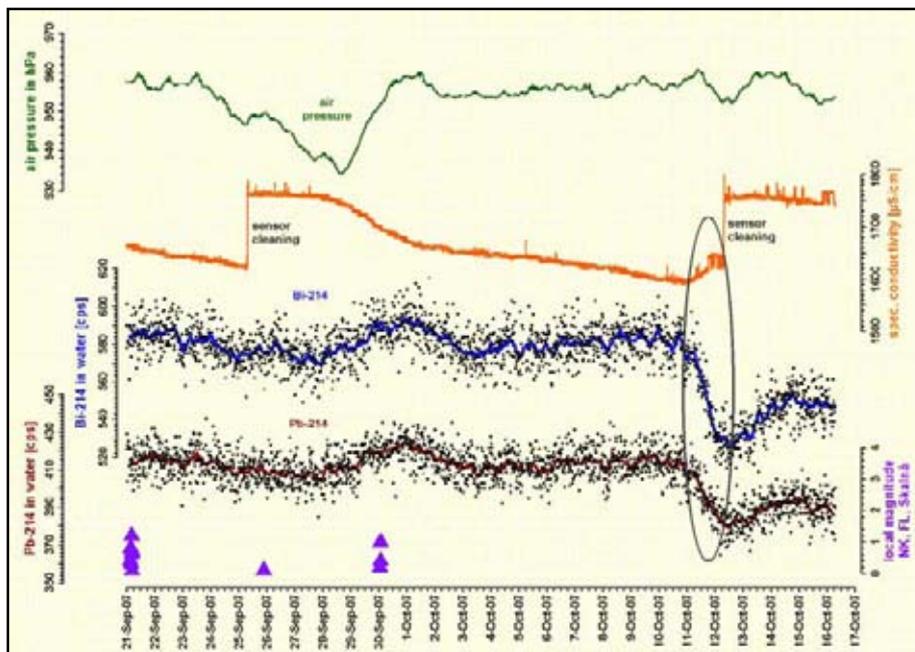
Messintervalle:

2 min: hydrostatischer Druck, Gasfluss, Schüttung;

15 min: Luftdruck;

1 d: Niederschlag.

die Aktivität der  $^{222}\text{Rn}$ -Nachfolger  $^{214}\text{Pb}$  und  $^{214}\text{Bi}$  im Quellwasser unmittelbar über der Fassungssohle zeigten ein anomales Verhalten (Abb. 10). Dies deutete auf einen verstärkten Zu-



**Abb. 10**  
Spezifische Leitfähigkeit und Gamma-Aktivität von  $^{214}\text{Pb}$  und  $^{214}\text{Bi}$  in der Fassung der Wetтинquelle vom 21.09.-17.10.2007

Der anomale Bereich ist durch die graue Ellipse markiert.

Messintervalle:

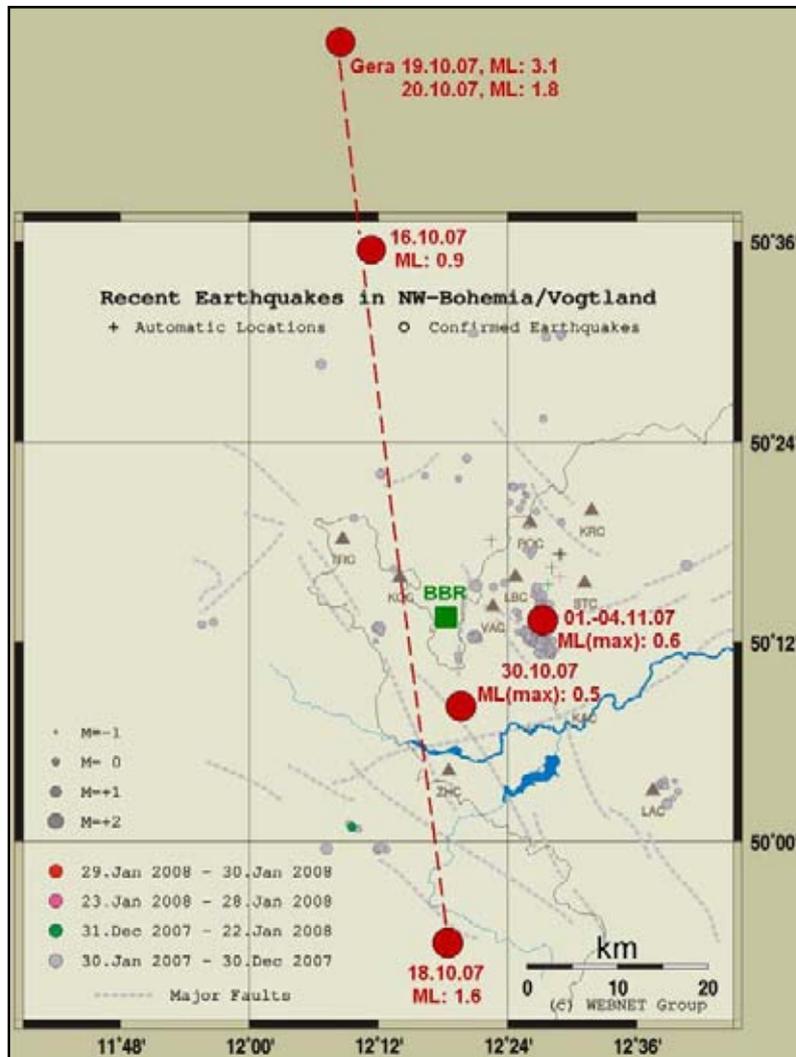
2 min: spezifische Leitfähigkeit

15 min: Luftdruck, Gamma-Aktivität.

strom von mineralisierten (tiefen) Wässern und eine intensivere Rn-Entgasung des Wassers durch einen höheren Fluss an freiem  $\text{CO}_2$  in der Quellfassung hin. Allerdings war im Epizentralgebiet von Nový Kostel in diesem Zeitraum praktisch keine signifikante Seismizität zu verzeichnen gewesen.

Am 18. Oktober 2007 wurde in Františkovy Lázně auf einem Workshop des GFU Prag über diese Phänomene berichtet und auf mögliche bevorstehende Beben in der Region aufmerksam gemacht. Zwischen 16. und 30.10.2007 kam es etwa auf der Linie Gera–Waldsassen zu mehreren Erdbeben mit einer maximalen Magnitude von 3.1, die am 19.10.2007 bei Gera registriert wurde

(Abb. 11). Erst im November 2007 gab es wieder mehrere kleiner Ereignisse im Raum Nový Kostel. Damit traten die stärksten Ereignisse ( $M_L = 1.6-3.1$ ) am 6. bis 10. Tag nach Anomaliebeginn in der Bad Brambacher Wettingquelle auf. Dies ist etwa die Vorlaufzeit, die auch bei den Schwarmbeben vom Januar 1997 ermittelt wurde. Damit war diese Fluidanomalie vom Oktober 2007 nicht nur die erste an der Wettingquelle aufgezeichnete *Multiparameteranomalie*, sondern auch die erste Anomalie die mit seismischen Ereignissen außerhalb des Nový Kostel-Epizentralgebietes korrelierbar war. Auffällig ist dabei die Reihung der Epizentren entlang der



**Abb. 11**  
**Regionale und lokale Seismizität zwischen 16.10. und 04.11.2007**

Auffällig ist die Reihung der Epizentren entlang der Regensburg-Leipzig-Rostock-Zone (gestrichelte Linie).  
BBR: Bad Brambach,  
ML: Lokale Magnitude.

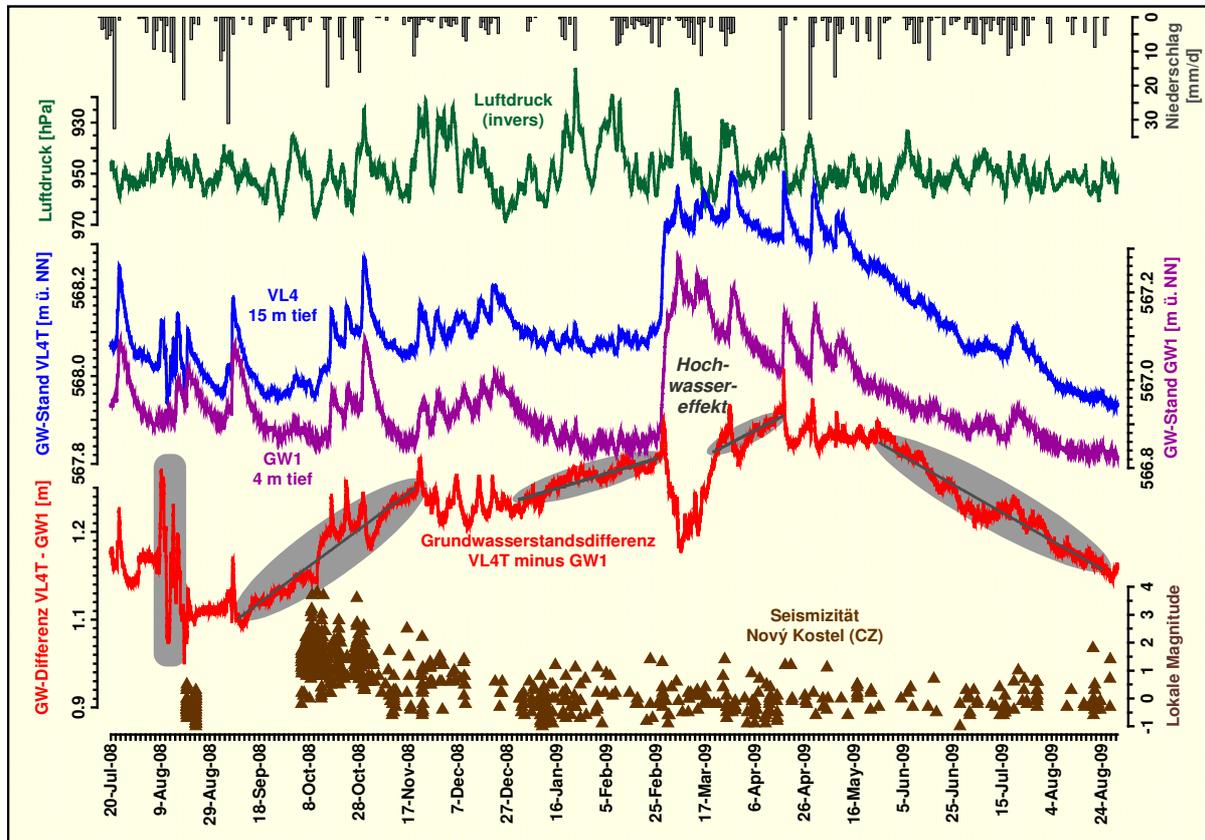
Basiskarte: GFU Prag

Regensburg-Leipzig-Rostock-Zone, die in ihrem mittleren Teil seismisch aktiv ist (L4). Dieser Abschnitt stand im maßgeblichen Zeitraum offenbar unter einem erhöhten Fluidruck, wobei nicht entschieden werden kann, ob dieser "nur" ein Indikator für den Spannungsaufbaus im Untergrund war oder ob er auch zur Auslösung (Triggerung) von Erdbeben beigetragen hat.

### 3.2.2.3.3 Die Grundwasser-Langzeitanomalie 2008-2009

Bis auf die im vorigen Abschnitt beschriebenen seismischen Ereignisse 2007 war die Periode nach den Schwarmbeben vom Herbst 2000 von einer nur schwachen Seismizität im Raum Nový Kostel geprägt. Dieser Zeitraum konnte daher idealerweise für eine seismisch ungestörte Beobachtung des Gasflusslangzeittrends an verschiedenen Gasaustritten der Region genutzt werden (vergl. 3.2.2.4). Erst im Oktober 2008 kam es erneut zu Erdbebenschwärmen, den stärksten seit 1985/86. Diesen Beben waren Anfang und Ende August deutliche Fluktuationen des hydrostatischen Druckes an der Brambacher Wettingquelle sowie ein Anstieg der Grundwasserstandsdifferenzkurve zwischen den Pegeln VL4T und GW1 vorausgegangen, der 26 Tage vor den ersten

seismischen Ereignissen (03.10.2008) einsetzte. Im Gegensatz zur Grundwasserstandsanomalie vom August 2000, ging die GW-Differenzkurve zu Beginn der Beben nicht wieder zurück (vergl. 3.2.2.3.1, Abb. 8), sondern stieg im Verlauf des Bebenschwarmes weiter an, unterbrochen von plateau-artigen Abschnitten (Abb. 12). Erst ab Mai 2009 begannen die Grundwasserstände des seismisch sensitiven Pegels VL4T wieder zu sinken und erreichten im August 2009 das Niveau des Vorjahres.

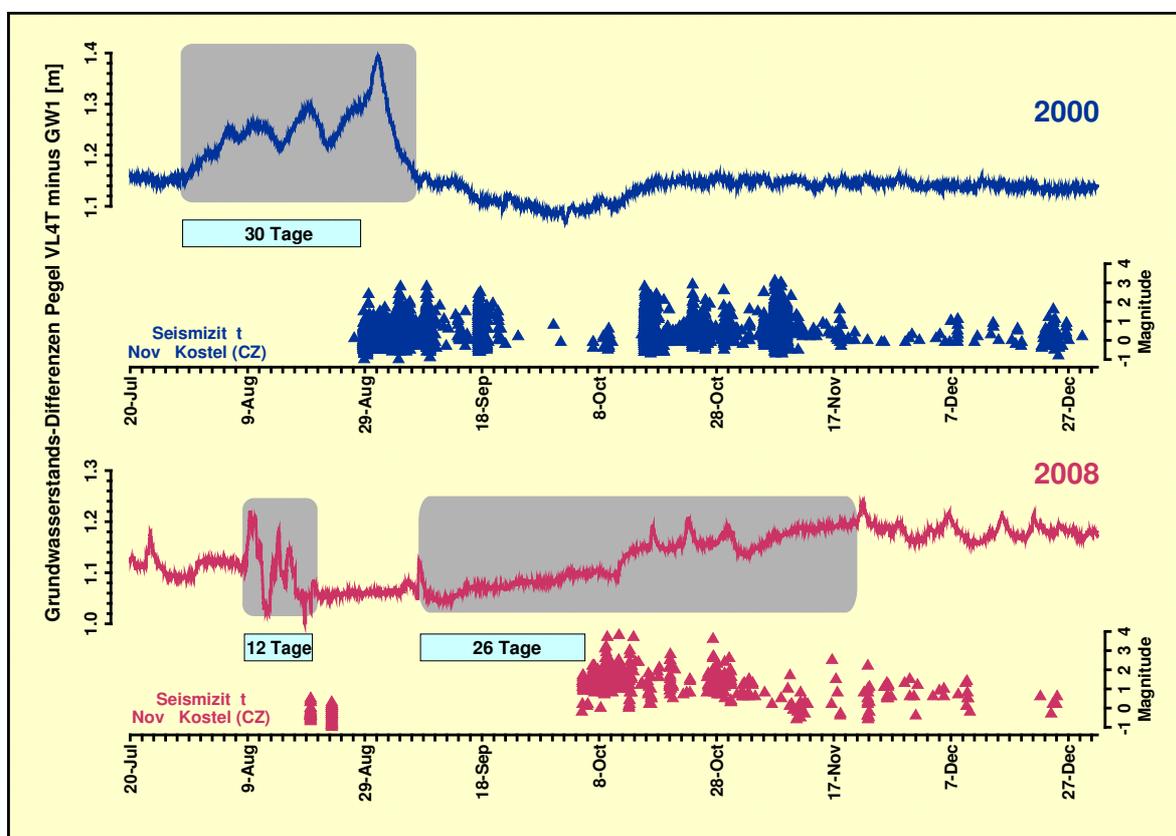


**Abb. 12**  
**Grundwasserstände, GW-Differenzkurve, Luftdruck, Niederschläge Bad Brambach und Seismizität im Raum Nový Kostel zwischen Juli 2008 und August 2009.** Zwei Anomalien wurden registriert: 12 Tage vor einem kleinen und 26 Tage vor dem Hauptschwarm. Die zweite Anomalie dauerte ~74 Tage und begleitete den Hauptschwarm. Nach einer kurzen Unterbrechung Ende Dezember (GW-Differenz-Plateau) setzten sich die Beben fort und die GW-Differenzkurve stieg weiter bis Mitte April 2009. Sie erreichte das prä-seismische Niveau erst wieder Ende August 2009. Der Hochwassereffekt im Spätwinter 2009 entstand infolge unterschiedlicher Reaktion der beiden GW-Pegel auf einen Eisstau im benachbarten Röthenbach.

#### 3.2.2.3.4 Anomalienvergleich 2000 und 2008/09

Die deutlich verschiedenen Erscheinungsformen der seismohydrologischen Anomalien 2000 und 2008/09 eigneten sich hervorragend für eine Diskussion über Gemeinsamkeiten und Unterschiede in den seismotektonischen, geo- und fluiddynamischen Prozessen, die für die entsprechende Anomaliegenese verantwortlich sein könnten. Die Ergebnisse, die in einer umfangreichen Veröffentlichung (A62) ausführlich dargestellt worden sind, werden nachfolgend kurz zusammengefasst.

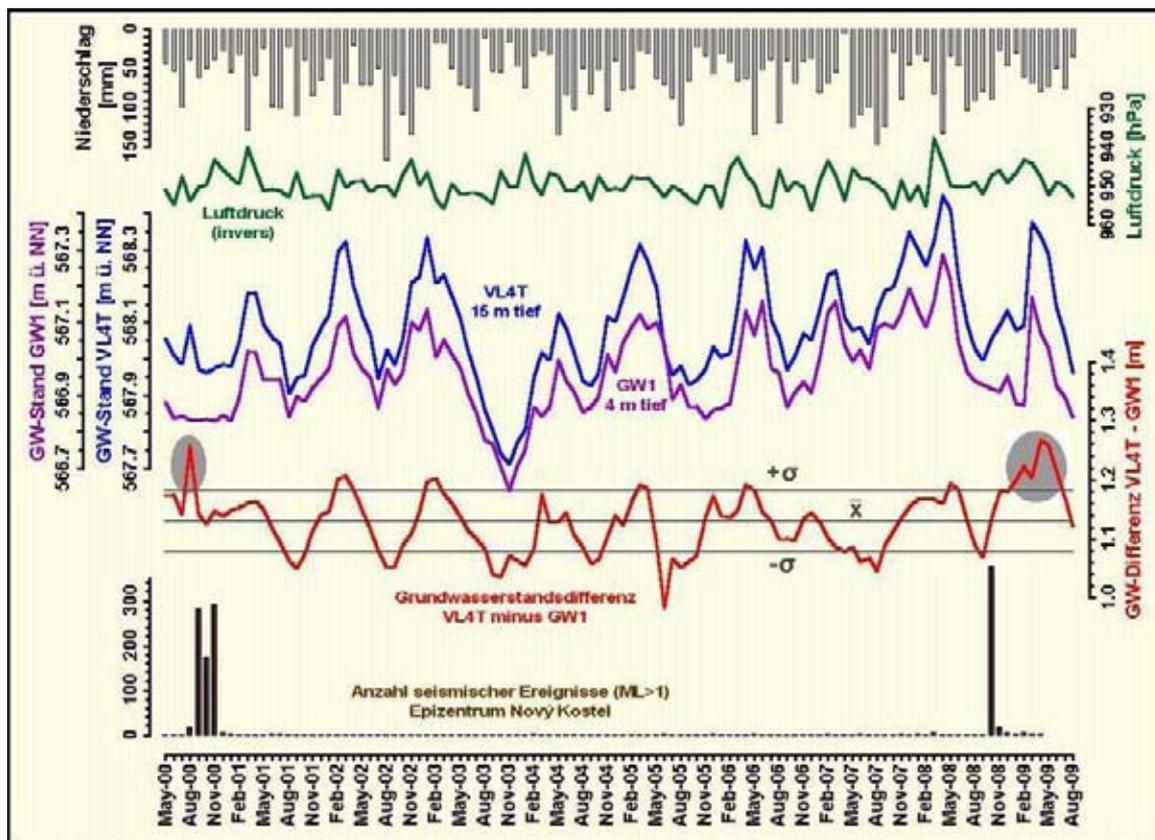
Das Auftreten von hydrologischen Anomalien und seismischen Ereignissen unterliegt keinem festen Zeitablauf. Bisher sind keine entsprechenden Veröffentlichungen bekannt, in denen zwei oder mehrere seismohydrologisch anomale Perioden betrachtet werden, die durch mehrerer Jahre mit sehr geringer Seismizität getrennt sind und in denen ebenfalls keine Anomalien registriert wurden. ("Nullhypothese"). Die Zeitunterschiede zwischen den Anomalien und seismischer Periode und/oder die Dauer von beiden lassen den Schluss zu, dass der lokale Strain-Anstieg und Veränderungen des Porendruckes vor den Beben sowohl von der Lage der ersten Herdfläche abhängt, die durch den Schwarm aktiviert wurde als auch vom Stress, der dort akkumuliert wurde. Die Prozesse, die zur Generierung einer hydraulischen Anomalie in 13-14 km Entfernung vom Hypozentrum führen, sind äußerst komplex und offenbar für jedes Schwarmbeben spezifisch. Daraus resultieren entsprechend unterschiedliche Anomalieverläufe. Die Änderungen in der Bruchspannung vor und während des Schwarms (preparation und relaxation) beeinflussten die elastischen Eigenschaften an den Scherflächen und in den Fluidtransportwegen. Die folgende seismische Periode unterscheidet sich damit zwangsläufig von der vorangegangenen, sowohl hinsichtlich der aktivierten Herdflächen als auch der Erscheinungsbilder der Anomalien. Das kommt u. a. in unterschiedlichen Zeitspannen zwischen hydrologischen Anomalien und den Erdbeben (12–30 Tage) sowie in Form und Dauer der Anomalien (einige Tage bis 8 Monate)



**Abb. 13**  
**Vergleich der Differenzkurven des Grundwasserstandes 2000 und 2008 zwischen den zwei unterschiedlich tiefen Pegeln VL4T und GW1 im Kurpark von Bad Brambach, 10 km westlich des Epizentrums von Nový Kostel.** Im Gegensatz zu 2000 hielt 2008 der seismogen erhöhte Fluiddruck in der Tiefe auch nach Beginn der Beben an und ist bis ins Frühjahr 2009 auf diesem Niveau geblieben.

zum Ausdruck (Abb. 13). So ist es gegenwärtig unmöglich, eine systematische Beziehung zwischen dem Auftreten einer Anomalie und der seismischen Aktivität herzustellen, wie das in

der internationalen Debatte um eine Erdbebenvorhersage ("Ort-Zeit-Magnitude") gefordert wird (z. B. Nature, Feb./März 1999). Besonders bei lang anhaltenden Anomalien (2008-09) ist die



**Abb. 14**

**Monatsmittel der Grundwasserstände und GW-Differenzen über der Anzahl der Erdbeben mit Magnituden >1 im Raum Nový Kostel zwischen Mai 2000 und August 2009.** Die Anzahl der Erdbeben im Jahr 2008 (374 Ereignisse) ist gegenüber 2000 nur etwa halb so groß (742 Ereignisse). Jedoch wurde 2008 nahezu die gesamte seismische Energie innerhalb nur eines Monats freigesetzt. Die periodischen saisonalen Schwankungen der GW-Differenzkurve entstehen durch das höhere Retentionsvermögen des durch Pegel VL4T erschlossenen Aquifers. Die GW-Differenz-Minima 2003/04 und 2005 wurden durch Tiefbauarbeiten in der Nähe von VL4T verursacht.

Untersuchung saisonaler Effekte unabdingbar. [Abbildung 14](#) zeigt, dass es bei den Monatsmitteln der Grundwasserstände und deren Differenz jahreszeitliche Effekte gibt, welche im unterschiedlichen Retentionsvermögen der Grundwasserleiterbereiche begründet sind, die von den beiden verschieden tiefen GW-Pegeln erschlossen werden. Allerdings überschreitet die GW-Differenzkurve in Zeiten geringer Seismizität (2002-2007) selten die  $+\sigma$ -Linie. Die deutlichen Minima 2003/04 und 2005 wurden durch Tiefbauarbeiten in der Nähe des Pegels VL4T verursacht. [Abbildung 14](#) verdeutlicht aber auch, dass Mittelwerte nicht für eine zuverlässige Identifizierung und Bewertung von GW-Anomalien ausreichen, auch wenn sie über viele Jahre berechnet wurden. Sie können detaillierte Messungen mit hoher zeitlicher Auflösung nicht ersetzen (vergl. [Abb. 11, 12 und 13](#)).

Vor beiden Schwarmbeben 2000 und 2008 wurden reale Vorläufereffekte gemessen (vergl. 3.2.2.3.), d. h. sowohl der die Anomalie generierende Prozess in der Tiefe als auch das Auftreten der Anomalie an der Erdoberfläche lagen vor dem Einsetzen der Seismizität. Vereinfacht dargestellt, können hydrologische Erdbebenvorläufer auf folgende Art und Weise entstehen:

- (A) Tektonischer Stressaufbau in der Erdkruste verursacht höhere Drücke im Porenraum und auf Klüften des Fluidsystems. Statische Strainakkumulation kann das Kluftsystem und damit seine Diffusivität verändern. Die daraus folgende Porendruckänderung überträgt dieses Signal auf Störungszonen aus dem Krustenbereich bis hin zur Erdoberfläche, wo es z. B.

als Grundwasseranstieg, höhere Quellschüttung und/oder eine stärkere Entgasung an Mineralquellen oder trockenen Gasaustritten (Mofetten) beobachtet werden kann (A30, A36). Ein Prozess, der nach einem Schwarm mit dem neuen Spannungsaufbau beginnt und sehr langsam – also über Jahre verlaufen kann.

- (B) Ein primärer Druckanstieg im Fluidsystem mit den unter (A) beschriebenen Effekten kann die Reibung zwischen Klufflächen verringern. Zusammen mit einer Reduzierung der Stabilität der Klufflächen durch aggressive Fluide (sog. Alterierungseffekten) können diese Prozesse die kritische Bruchgrenze entlang der Störung herabsetzen, was zu einer Triggerung von Erdbeben führt (L17, A57, A58).

Beide Szenarien beruhen auf einer hinreichenden tektonischen Stressakkumulation, um Seismizität auszulösen. Andererseits, können hydrologische Anomalien an der Oberfläche auch ohne nachfolgende seismische Ereignisse auftreten. Die Grundwasseranomalie einen Monat vor den Beben vom Herbst 2000 und der anschließende Wasserspiegelabfall unter das vor-seismische Niveau sprechen für Prozess A (Abb. 13). Allerdings gibt es gerade in dieser seismischen Periode Anzeichen für eine Bebentriggerung durch Fluide (L17). Im Gegensatz dazu wird hervorgehoben, dass der Porendruck von Krustenfluiden entscheidend dafür ist, die Kluffzonen vom subkritischen in einen kritischen Zustand zu versetzen (L18). Das würde bedeuten, dass eine Fluidtriggerung nur in der Initialphase des Bebenschwarms 2000 stattfand.

Die seismischen Ereignisse 2008-2009 im Epizentralgebiet von Nový Kostel wurden über 8 Monate von einem anomalen Druck im tiefen Aquifersystem begleitet. Im Gegensatz zu 2000, wo keine nennenswerten Erdbeben nach Januar 2001 auftraten, setzte sich eine schwache aber häufige Seismizität bis Ende April 2009 fort. Daher kann angenommen werden, dass die Fluidtriggerung der maßgebliche Prozess sowohl für die Auslösung als auch für die Fortdauer der Schwarmbebenserie 2008-2009 war.

Trotz ihrer ähnlichen räumlichen Verteilung in beiden seismischen Perioden migrierten die Epizentren der Nový Kostel- Erdbeben zeitlich verschieden: 2000-2001 von Süden nach Norden, dagegen Süd-Nord-Süd 2008-2009. In beiden Fällen wurden die geringsten Herdtiefen dann beobachtet als die Epizentren ihre nördlichste Position erreichten.

Die Anzahl der Ereignisse mit Magnituden  $>1$  betrug in der Periode 2008-2009 nur die Hälfte gegenüber 2000-2001, wobei die überwiegende seismische Energie 2008 innerhalb nur eines Monats (Oktober 2008) freigesetzt wurde (2000: 3 Monate; L19; Abb. 14). Auch die Anzahl von Ereignissen mit  $M_L > 3,3$  überstieg die von 2000. Damit unterschieden sich die beiden seismischen Perioden hauptsächlich in den unterschiedlichen Eigenschaften der hydraulischen Anomalien, die in Bad Brambach gemessen wurden: Anomlieanzahl, -form und -progression bzw. -dauer. Dabei stehen zwei relativ kurzen Anomalien vor den 2000er Beben insgesamt vier teilweise lang anhaltende Anomalien 2008-2009 gegenüber. Die umfangreichen Daten hoher zeitlicher Auflösung führen zu dem Schluss, dass nicht nur in den seismischen Startphasen eine Fluidtriggerung stattfand, sondern dass die hohe Freisetzung seismischer Energie und die andauernde Bebenaktivität 2008-2009 von einem stetigen Druckanstieg begleitet war, der erst im August 2009 wieder auf das vor-seismische Niveau von 2008 zurück ging. Damit kann die Seismizität im ersten Halbjahr 2009 auf eine ständige Triggerung von schwachen Erdbeben durch unter Überdruck stehende Tiefenfluide zurückgeführt werden (L17). Offensichtlich reichte aber 2009 der statische Strain für das Entstehen von starken Erdbeben nicht aus, wie das zu Beginn der seismischen Perioden 2000 und 2008 der Fall war. Darüber hinaus kann aber der anhaltend hohe Fluidruck 2009 auch auf eine Fortsetzung des Gasflussanstiegs hindeuten, der an verschiedenen Gasaustritten in der Region Vogtland/NW-Böhmen zwischen 1998 und 2008 beobachtet wurde (A57). Zusammen mit einem gleichzeitigen Anstieg der  $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisse in aufsteigenden Gasen könnte dies ein Hinweis für eine steigende magmatische Aktivität unter dem Egerbecken sein (vergl. 3.2.2.4; A33, L20).

### 3.2.2.4 Langzeittrends

#### 3.2.2.4.2 Grundwasserstand und Seismizität

Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebene Reaktion des Gasflusses an der Wetтинquelle und des Grundwasserstandes am Standort Bad Brambach vor und während seismischer Ereignisse im Raum Nový Kostel sowie die in diesem Kontext identifizierten Abhängigkeiten der Entgasungsraten von Grundwasserstand und Luftdruck (A54, B52, B57) werfen die Frage auf, ob es auch einen langfristigen Zusammenhang zwischen Grundwasserstand und Seismizität gibt. Neunhöfer und Meier (L20) ermittelten nach Analyse der vogtländisch-NW-böhmischen Schwarmbeben zwischen 1962 und 1998 eine signifikantes Wiederkehrintervall stärkerer Schwarmbebenereignisse von 72 Monaten. Nach Einbeziehung von Erdbebendaten aus dem Zeitraum 1897 bis 1908 stellten sie jedoch Abweichungen von diesem Wert fest, so dass man gegenwärtig von einem zeitlichen Abstand von 5 bis 8 Jahren zwischen größeren Schwarmbeben in der Region ausgeht.

Wasserstandsmessungen, die seit 1983 wöchentlich an einem etwa 12 m tiefen Schachtbrunnen nahe der SAW-Arbeitsstelle Bad Brambach durchgeführt wurden, erlauben nach 27 Jahren Beobachtungszeit einen Hinweis auf mögliche Zusammenhänge zwischen Grundwasserstand, also dem "hydraulischen Gegendruck" auf das tiefe Fluid-(Entgasungs-) System und der Seismizität, überwiegend im Raum Nový Kostel (Abb. 15). Dabei fällt auf, dass größere Erdbebenschwärme

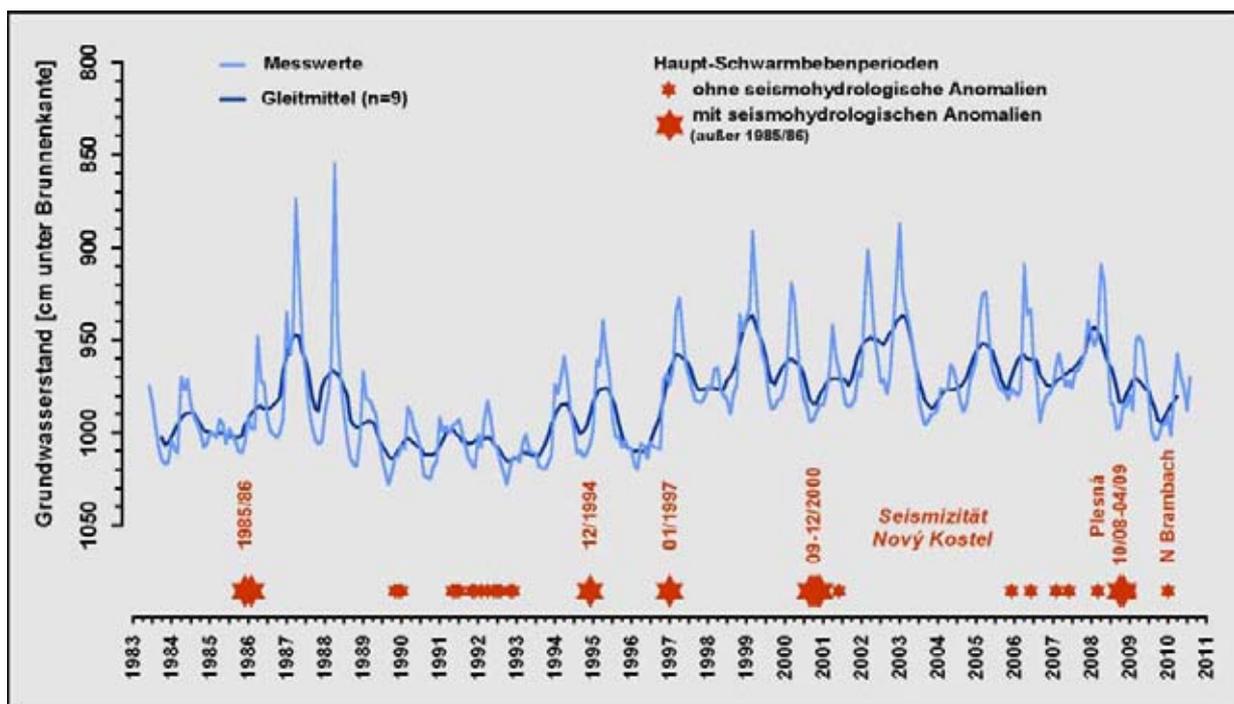


Abb. 15

Monatsmittel des Grundwasserstandes 1983-2010 an einem 12 m tiefen Schachtbrunnen in Bad Brambach über wichtigen Schwarmbebenereignissen mit Epizentren im Raum Nový Kostel, Plesná und nördlich von Bad Brambach. Offenbar ereignen sich Erdbeben, die mit hydrologischen Anomalien verbunden sind, bevorzugt während oder nach Perioden mit niedrigem Grundwasserstand.

im Epizentralgebiet von Nový Kostel bevorzugt während oder gegen Ende von Perioden mit niedrigem Grundwasserstand auftreten, so besonders 1985–1986 und in den Jahren, in denen auch seismohydrologische Anomalien an Wetтинquelle und dem Grundwasserpegel VL4T gemessen wurden, also 1994, 1997, 2000 und 2008 (siehe auch 3.2.2.2 und 3.2.2.3). Dies trifft aber auch auf Häufungen kleinerer Schwärme zu, wie während einer relativ langen Trockenperiode in den Jahren 1990–1993. Die typischen Zeiträume niedrigen Grundwasserstandes liegen in der

Region zwischen September und Mitte November bzw. in den Frostmonaten Januar und Februar, wo jeweils nur wenig Grundwasserneubildung stattfindet. Auch die vor 1985 stärksten und gut dokumentierten Schwarmbeben im Vogtland und NW-Böhmen begannen vorwiegend in diesen Monaten (L23-L25):

- 24. Oktober–29. November 1897,
- 13. Februar–18. Mai 1903,
- Februar 1908,
- 18. Oktober–22. November 1908.

Wenn man den Einfluss von Fluiden auf Entstehung, Verlauf und Charakteristik von Schwarmbeben in der Region – bis hin zur fluidinduzierten Bebentriggerung – grundsätzlich akzeptiert, so liegt es nahe, bei der Langzeitverteilung von Erdbeben ebenso den hydrostatischen Druck in der Tiefe in die Betrachtungen einzubeziehen. Dabei ist der Aufbau eines ausreichenden geotektonischen Spannungszustandes unbedingte Voraussetzung, dass Erdbeben überhaupt entstehen können. Dieser Spannungsaufbau vollzieht sich offenbar regelmäßig in dem o. g. Zeitraum von 5–8 Jahren. Ist ein solcher kritischer Zustand erreicht, so könnte eine großräumige Veränderung des hydrostatischen Druckregimes entscheidend für den Auslösezeitpunkt sein. Wie in den vorherigen Abschnitten bereits gezeigt wurde, geht eine Druckausbreitung besonders in geklüfteten Aquiferen relativ schnell vor sich, im Gegensatz zu Migrationsvorgängen. So bedeutet der jahreszeitlich bedingte Rückgang des Grundwasserspiegels eine weiträumige Verringerung des hydrostatischen Gegendruckes auf das tiefe Fluidsystem. Die Mobilität der CO<sub>2</sub>-übersättigten Tiefenfluide steigt und es kann zu einer verstärkten Entlösung von Gasen, die an die Oberfläche steigen. So konnte gezeigt werden, dass in Trockenperioden die diffuse Entgasung im Gelände steigt und zwar auf Kosten der Entgasung an den Mineralquellen, die permanente hydraulische Senken innerhalb des Grundwasserregimes darstellen (A54). Dagegen geht sie in Zeiten hohen Grundwasserstandes zurück, wobei im Winter noch zusätzlich die Frostversiegelung wirken kann. Führt eine relativ rasche Änderung im Drucksystem (hoher Druckgradient) zu einer Störung des (akkumulierten) geotektonischen Spannungszustandes, so erscheint die Auslösung von Schwarmbeben infolge dieser Instabilitäten möglich. Shapiro und Mitarbeiter haben mittels Druckexperimenten an der Kontinentalen Tiefbohrung in der Oberpfalz (KTB) nachgewiesen, dass bereits Druckänderungen im Hypozentrum von 0,01–1 bar in der Umgebung der KTB zur Auslösung von Mikrobeben führten (L26). Das entspricht Wasserdruckdifferenzen von 0,1 bis 10 m. Die beobachteten natürlichen innerjährlichen Schwankungen im Bad Brambacher Grundwassersystem liegen mit 0,2–1,4 m in diesem Bereich, wenn auch im unteren. Ob bei diesem Mechanismus eine Reibungsverringerung auf Störungsflächen oder der kurzzeitige Zusammenbruch von Kluft- und Porenraum im Vordergrund stehen, kann dabei nicht entschieden werden. Vielmehr muss von einem äußerst komplexen Zusammenwirken verschiedener fluiddynamischer Prozesse ausgegangen werden, bei denen sicherlich auch Alterationsvorgänge für die "Vorgeschichte" der Erdbeben und ihre Initiierung eine wichtige Rolle spielen (vergl. 3.2.2.5, A58). Möglicherweise verbirgt sich hier auch das Geheimnis, warum Schwarmbeben ausgerechnet in unserer Region vorkommen, einem Gebiet, das charakterisiert ist durch eine Vielzahl von gasübersättigten Mineralquellen und freien, trockenen Gasaustritten (Mofetten), die zudem einen hohen Anteil an Gaskomponenten magmatischen Ursprungs aufweisen. Maßgebend ist jedoch, dass eine Fluidtriggerung von Beben nur möglich ist, wenn vorher ein kritischer tektonischer Spannungszustand erreicht wurde. Daher treten lokale Schwarmbeben auch nicht alljährlich zu Zeiten signifikanter Grundwasserstandsschwankungen auf.

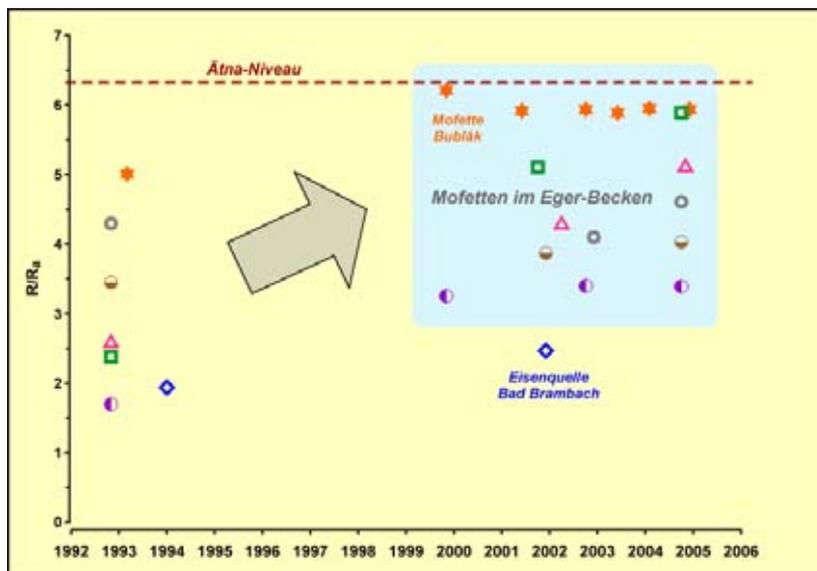
#### 3.2.2.4.2 *Gasisotopie und Gasfluss*

Langzeitreihen natürlicher Beobachtungsdaten eröffnen Möglichkeit, Aussagen über grundlegende Trends bestimmter Parameter in einer Region zu treffen. Bei den Forschungen zu den Zusammenhängen zwischen den lokalen geodynamischen und fluid-dynamischen Prozessen im Oberen Vogtland und NW-Böhmen standen stets auch Messungen der Gassflussraten an Mine-

ralquellen und Mofetten im Mittelpunkt des Interesses, da die isotopische Signatur dieser Gase belegte, das bestimmter Komponenten aus dem Erdmantel stammen, also magmatischen Ursprungs sind (A33, A44, A52, L13, L21, L22). Insgesamt wurden an folgenden Standorten Messungen mittels Gaszählern bei einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten durchgeführt:

Wetinquelle, Bad Brambach (Basisstation)	seit 04/2000
Eisenquelle, Bad Brambach	seit 04/1998
Schillerquelle, Bad Brambach	seit 04/1998
Mofette Naturpark Soos (CZ)	seit 07/2001
Mofette Bublák, Hartoušov (CZ)	seit 04/2004.

Besonders die Jahre geringer Seismizität (2001-2007) konnten effektiv genutzt werden, um ein umfassendes Bild der natürlichen Gasdynamik und seines magmatischen Reservoirs zu erhalten (A54, A57). Ausgangspunkt dafür war eine von Kollegen des GFZ Potsdam bzw. dem UFZ Leipzig-Halle zwischen 1992 und 2005 beobachtete Zunahme der  $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisse an  $\text{CO}_2$ -Gasen verschiedener Mofetten in NW-Böhmen. Dies deutete auf eine Zunahme des magmatischen Gasanteils und damit auf eine verstärkte Mantelentgasung im Gebiet des Egerbeckens (NW-Böhmen) hin (L23). An der Mofette Bublák wurde dabei Ätna-Niveau erreicht (Abb. 16). Dieser qualitative Effekt wird auch quantitativ untersetzt. So zeigen die Langzeituntersuchungen unserer Arbeitsgruppe an drei Bad Brambacher Mineralquellen eine stetige Erhöhung der Gasflussrate seit 1998 (Abb. 17). An den drei Brambacher Mineralquellen beträgt sie im Zeitraum 1998 bzw. 2000 bis 2009 etwa 2–4.5 % pro Jahr. An den tschechischen Mofettenstandorten Bublák (2004–2009) und Soos (2001–2009) liegt der Gasflussanstieg mit 18 bis 41 % pro Jahr deutlich darüber.



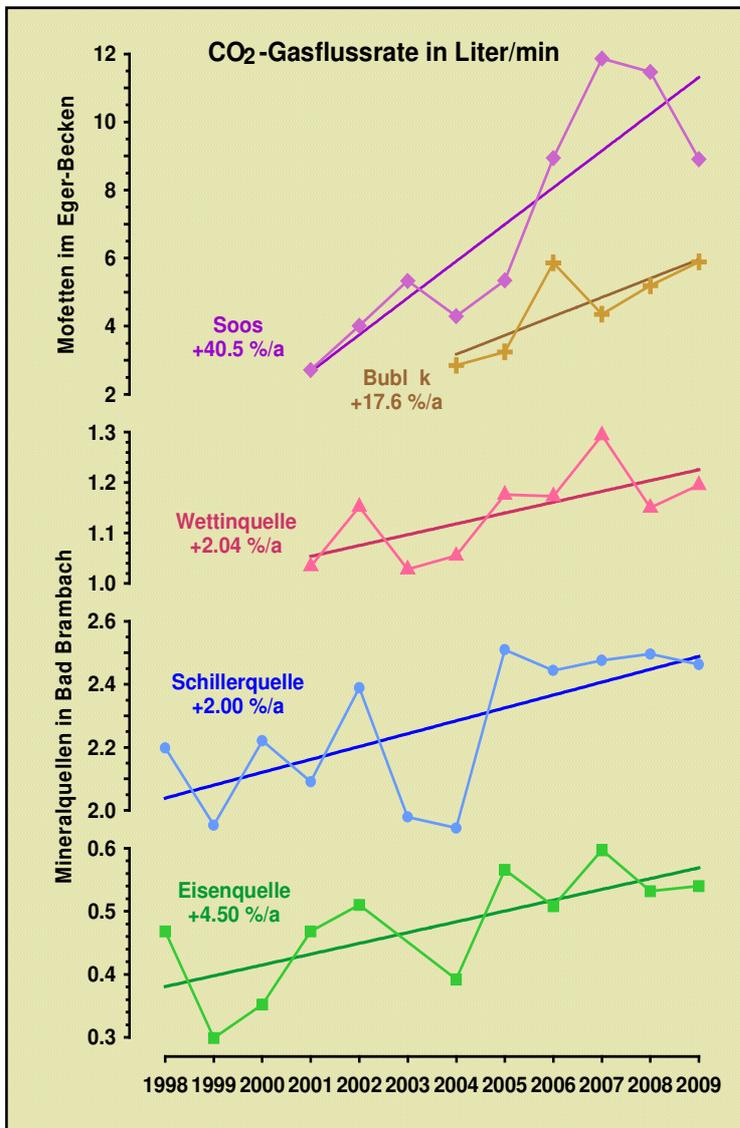
**Abb. 16**  
 **$R/R_a$  stellt das Verhältnis zwischen Mantel- und Krusten-Helium ( $^3\text{He}/^4\text{He}$ ) im  $\text{CO}_2$ -Gas dar.** Ein deutlicher Aufwärtstrend von 7 bis über 100 % zwischen 1993 und 2005 an Gasaustritten im Eger-Becken und der Brambacher Eisenquelle weist auf einen aktiven magmatischen Prozess unter dem Egerbecken hin. An der Mofette Bublák ist nahezu Ätna-Niveau erreicht.

Daten: UFZ Leipzig Halle, GFZ Potsdam

Diese Ergebnisse weisen zunächst auf eine verstärkte Fluidfreisetzung aus tieferen Reservoirs unter dem Vogtland/NW-Böhmen hin, stimmen aber auch gut mit der Vorstellung einer aufsteigenden Schmelze aus dem oberen Mantel überein, die von Bräuer et al. (L22) aus der genannten Zunahme der Kruste/Mantel-Signatur der Gase abgeleitet wird.

Der regionale Anstieg des Gasflusses kann aber auch auf eine Veränderung des lokalen Spannungsfeldes nach Jahren seismischer Ruhe hinweisen. Neben dem Langzeittrend treten sowohl an der Wetinquelle als auch in Soos deutliche innerjährliche Schwankungen des Gasflusses auf. Die Ursachen dafür sind noch unklar, aber wahrscheinlich in einer unregelmäßigen Entgasungsaktivität des Fluidreservoirs zu suchen. Es konnte mit unseren Messungen weiterhin gezeigt werden, dass der Einfluss des Luftdruckes auf die Entgasung bei der Betrachtung längerer Zeiträume (Monatsmittel) vernachlässigbar ist, dagegen die Wirkung des Grundwasserstandes eine bedeutende Rolle spielt, besonders an Entgasungsstellen, die gegenüber dem lokalen Grundwas-

serniveau permanent abgesenkt sind, also an frei auslaufenden oder gepumpten Mineralquellen und Brunnen (A54, B52, B57). Als entscheidender Faktor für die wesentlich geringere Zunahme der Entgasung an den Bad Brambacher Quellen wurde der gegenüber den tschechischen Mofetten um 135 m höhere hydrostatische Gegendruck auf das Entgasungssystem identifiziert. Ver-



**Abb. 17**  
**Zeitliche Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Entgasungsrate an Quellen in Bad Brambach und Mofetten im Egerbecken.** An den Bad Brambacher Mineralquellen wurde zwischen 1998 und 2009 ein Anstieg des Gasflusses von 2,0 bis 4,5 % pro Jahr registriert, an den Mofetten im Egerbecken sogar zwischen 18 und 41 % pro Jahr. Neben dem Mantelhelium-Trend ist auch dies ein Hinweis auf einen aktiven magmatischen Prozess unter dem Egerbecken (vergl. Abb.16).

gleiche der monatlichen Gasflussrate (99.5 % CO<sub>2</sub>) mit der Konzentration des gelösten CO<sub>2</sub> im Quellwasser der Wetтинquelle zeigten einen inversen Verlauf, wobei das gelöste CO<sub>2</sub> keinen Langzeittrend aufweist. Der Wasserkörper der Wetтинquelle wirkt somit als eine Art CO<sub>2</sub>-Puffer, der je nach Strömungsrate des freien Gases zusätzlich entgast werden kann.

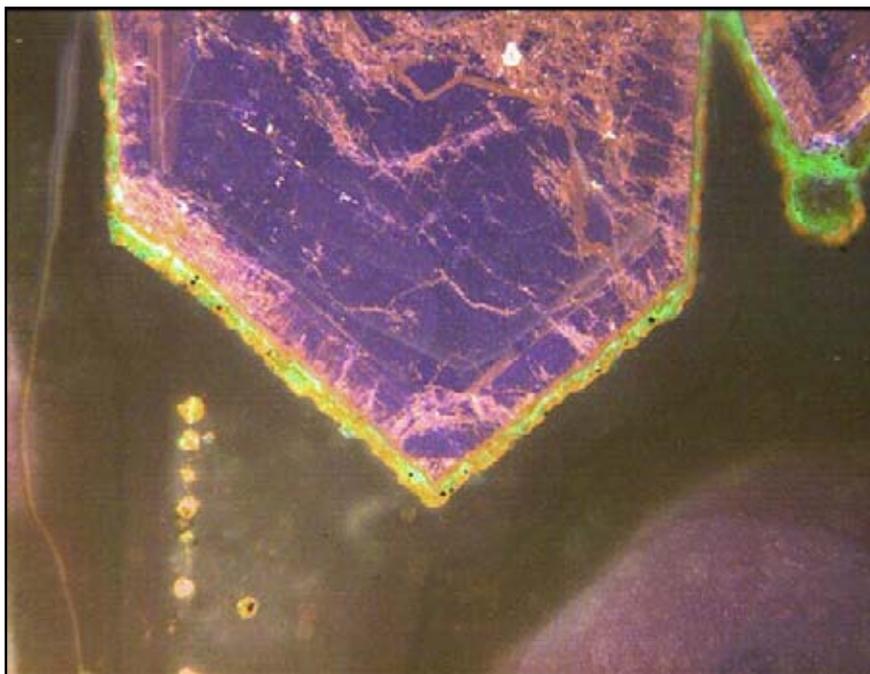
Durch Kopplung der langjährigen Beobachtungsdaten mit einem einfachen gas-hydraulischen Kluftmodell konnten die Verhältnisse der für die Entgasung maßgeblichen oberflächennahen Kluftquerschnitte zwischen den fünf untersuchten Gasaustrittsstellen in Bad Brambach und Tschechien berechnet werden. So ist z. B. der für den Gasfluss effektive Kluftquerschnitt an der Mofette Soos um den Faktor 13 höher als an der Wetтинquelle (A57, B60, B64, B69).

### 3.2.2.5 Alterationsprozesse – eine mögliche Ursache für Schwarmbeben?

Schwarmbeben treten weltweit nur in räumlich begrenzten Regionen auf. Meist an vulkanische Aktivitäten (speziell Dikes) gebunden, sind sie jedoch in fast allen Fällen an das Vorkommen von aggressiven Fluiden, wie z.B. die Kohlensäure (eine schwache Säure), Schwefelsäure und

auch Schwefelwasserstoff, gekoppelt. Dies führte zu der Arbeitshypothese, dass das bisher nur unvollständig geklärte Phänomen „Schwarmbeben“ an sich ebenfalls mit dem möglichen Einfluss von aggressiven Fluiden begründet werden kann. Mittels einer komplexen geowissenschaftlichen Herangehensweise wurde versucht, viele potentielle Faktoren zu untersuchen und zu kombinieren, die das typische Bruchverhalten eines Schwarmbebens berücksichtigt: zahlreiches lawinenartiges Auftreten von Mikrobeben, die sich in teilweise verschiedenen Clustern zeitlich versetzt ereignen. Auslösendes Moment könnten dabei Porendruckänderungen sein, da sich das Migrationsverhalten der Beben mit Transportvorgängen auf den fluidgefüllten Bruchflächen erklären lässt.

Aber was führt zu den oft zahllosen Mikrorissen und -beben? Wir vermuten, dass geochemische Lösungsprozesse von hydrothermalen Lösungen unter den Druck- und Temperaturbedingungen in mehreren Kilometern Tiefe in der Lage sind, Kluftbeläge meist mit kristalliner Struktur anzulösen, umzuwandeln bzw. in ihrer mechanischen Stabilität zu beeinflussen (Mikrorisse). Ein veringertes Reibungswiderstand auf den verzahnten Kluftflächen würde einen vorzeitigen Scherbruch ermöglichen, und dies im gesamten fluidgefüllten System von Störungszonen im Krustenbereich. Konkrete Hinweise auf dieses Szenario finden sich in erhaltenen Kluftflächen in Quarzstufen aus der ehemaligen Fassung der Bad Brambacher Wettingquelle von 1921: die erhaltenen Quarzkristalle zeigten im Dünnschliff deutliche Mikrorisse (Abb. 18). Mittels Kathodolumineszenz waren in diesen hydrothermal gewachsenen Alpha-Quarze später zugefügte Mikrorissbildungen deutlich zu erkennen. Diese Mineralstufen spiegeln einen Sachverhalt wider, welcher



**Abb. 18**  
**Mittels Kathodolumineszenz**  
**aktivierter Alpha-**  
**Quarzkristall (blaue Farbe).**  
Die bräunlich gefärbten Mikrostrukturen weisen auf später zugefügte Rissbildungen und Alterierungsprozesse hin (aus A58).

sich im Mesozoikum an gleicher Stelle und den gleichen hydrothermalen Fluiden in ca. 5-8 km Tiefe abgespielt hat. Hebungsprozesse und Erosion brachten diese Indizien an die Erdoberfläche. Weitere Argumente, wie die jüngsten Versuche zu geochemischen Lösungsprozessen an Gesteinen mittels CO<sub>2</sub>-haltiger Fluide, wie sie bei den geplanten CO<sub>2</sub>-Sequestrierungsvorhaben anzutreffen sein werden, bestätigen die schnelle Anlösung und Schwächung der Kristallstruktur. In der Publikation A58 sind die entsprechenden Prozesse umfassend dargestellt und diskutiert worden.

All diese "Mosaiksteine" führen zu der berechtigten Annahme, dass sich die hydrothermale Alterierung als eine Voraussetzung für das Auftreten von Schwarmbeben ist. Jedoch kann erst eine Tiefbohrung in das Hypozentrum von Schwarmbebenclustern dazu gesicherte Erkenntnisse liefern.

### 3.3 Weitere Untersuchungsgebiete außerhalb des Vogtlandes/NW-Böhmens

#### 3.3.1 Vorbemerkung

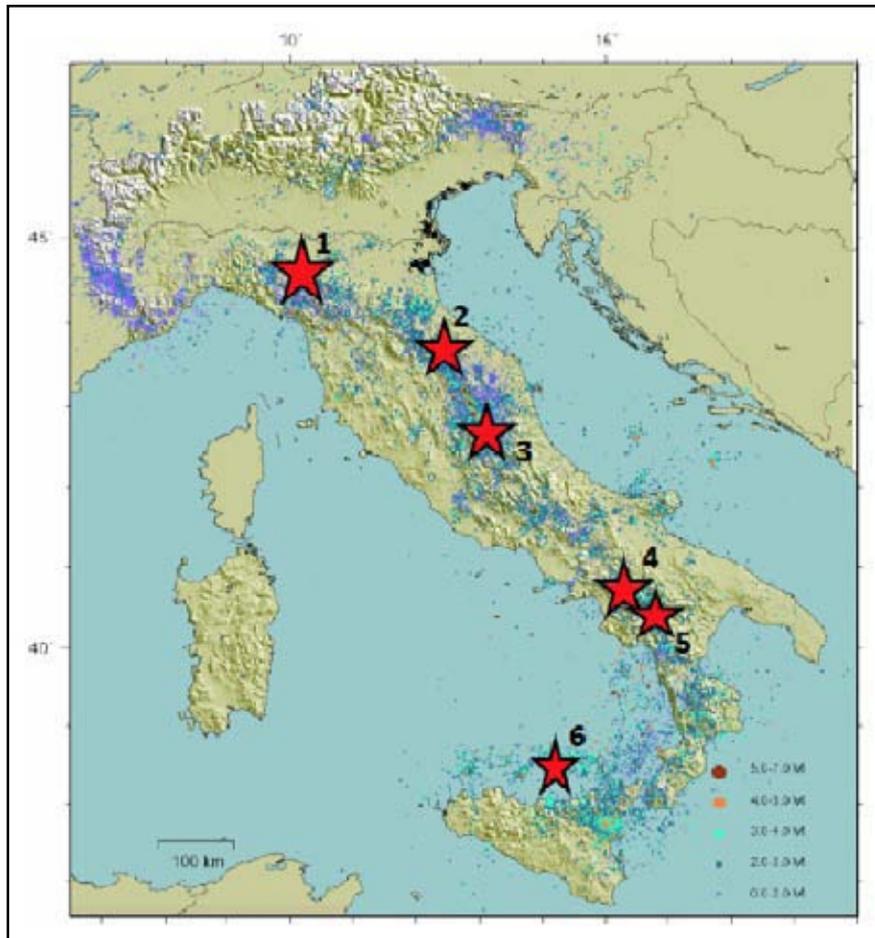
Ausgangspunkt für die Erweiterung unserer Messnetzes und damit auch der Aufgabenstellung war das Interesse von Fachkollegen, die Erforschung von geodynamisch beeinflussten Fluidaustritten auch in anderen erdbebengefährdeten Regionen im Rahmen einer internationalen Kooperation näher zu untersuchen. Dabei reicht die Palette der Messgebiete von Mittelamerika (Nicaragua und Mexiko) über Italien und Israel bis nach Taiwan. Auf Grund von technischen Problemen und schwierigen Umgebungsbedingungen sind einige der Untersuchungsobjekte nur kurze Zeit bearbeitet worden, haben aber dennoch wesentlich zum Fehlermanagement beigetragen. Anfang der 1990er Jahre waren die Forschungsmöglichkeiten an natürlichen aggressiven Fluidaustritten aus messtechnischer Sicht wenig entwickelt bzw. war das notwendige Methodeninventar noch nicht allgemein akzeptiert. Im gesamten Untersuchungszeitraum bis 2010 sind in dieser Hinsicht aber enorme Fortschritte erzielt worden, die wesentlich in folgendem bestehen:

- im Bereich der Messtechnik, Sensortechnik und Datenloggerapplikation kamen immer neue Generationen an Geräten auf den Markt,
- geowissenschaftliche Fehleinschätzungen, wie z. B. zur Fluidmigration in großer Tiefe und deren Einfluss auf die Triggerung von Erdbeben, wurden schrittweise korrigiert,
- im wissenschaftlichen Streit um die Möglichkeit eines geochemischen Erdbebenprognoseverfahrens wurde das geogene radioaktive Edelgas Radon als "Allheilmittel" verdrängt.

Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt bei der Auswahl der Messgebiete und speziell einzelner Messpunkte war die hydrologische, geochemische und isotopengeochemische Analyse der austretenden Fluide. Aus diesen Analysen ergeben sich Hinweise auf die Genese, die Verweilzeit beim Transport, die Wechselwirkungen mit dem umgebenden Gestein und Aussagen zu Druck- und Temperaturbedingungen im Reservoir. Während im Untersuchungsgebiet Vogtland/NW-Böhmen "optimale" Fluide mit tief liegender, magmatischen Genese anzutreffen sind, waren in anderen Untersuchungsgebieten zum Auffinden von möglicherweise geodynamisch beeinflussten Fluiden oft umfangreiche Geländebegehungen, Befragungen bzw. Literaturrecherchen historischer wie auch aktueller Dokumente erforderlich. Nur wenn der begründete Hinweis auf ein Tiefenfluid vorliegt, ist die Installation einer Messstation sinnvoll. Geodynamische Prozesse, welche auf kontinentalen, regionalen oder lokalen Stressakkumulationen beruhen, wirken in Form von Druckänderungen auf die Scher- bzw. Bruchflächen. Einer der relevanten physikalischen Parameter ist der hydrostatische Druck im fluidgefüllten Poren- bzw. Klufttraum. Bei einer vereinfachten Modellannahme kann man sich vorstellen, dass bei verstärkten oder auch abnehmenden Drücken im umgebenden Gesteinskomplex die Fluidkomponente in mehreren Kilometern Tiefe ebenfalls beeinflusst wird. Auch an der Erdoberfläche würde sich die Übertragung dieser Druckänderung über die fluide Phase quantitativ und/oder qualitativ bemerkbar machen. Aus diesem Grund wird auch die Anwendung hydrostatischer Druckänderungen als empfindliches Strainmeter allgemein akzeptiert. Diesen Vorgang kann man experimentell mit einem Gartenschlauch nachvollziehen, er läuft aber in der geotektonischen Realität nicht in dieser Einfachheit ab – dazu sind die Transport- und Strömungsbedingungen in der Erdkruste zu komplex und teilweise unbekannt. Diese Vielfalt und Komplexität kommt in den nachfolgend vorgestellten Messobjekten Italiens und Taiwans zum Ausdruck. Sie gehören für uns zu den "erfolgreichen" Untersuchungsgebieten. Dem Vorteil solcher Untersuchungen, die direkte Arbeit in geodynamisch sehr aktiven Regionen, steht jedoch der Nachteil gegenüber, dass eine kontinuierliche Kontrolle der Messgeräte wie im Vogtland aus Entfernungs- und Kostengründen nicht möglich ist. Ein wesentliches Ergebnis der langjährigen Untersuchungstätigkeit ist deshalb das erworbene Know-how für auf dem Gebiet kontinuierlich arbeitender, teilweise vollautomatischer Messstationen im unwegsamen Gelände, die nur noch ein- bis zweimal jährlich kontrolliert werden müssen.

### 3.3.2 Untersuchungen in Italien

Die Messkampagnen in Italien sind als die kontinuierlichsten und erfolgreichsten Arbeiten unserer Arbeitsgruppe in geotektonisch aktiven Regionen einzuschätzen. Voraussetzung waren gute Kooperationsbeziehungen, die den Aufbau der Stationen, technische und logistische Unterstützung sowie eine gemeinsame Publikationstätigkeit ermöglichten. Als wesentliche Kooperationspartner sind die Institute INGV, IMAA und ARPA zu nennen.



**Abb. 19**  
**Verteilung der Messstationen in Italien.**

- 1 - Miano,
- 2 - Caprese Michelangelo,
- 3 - San Faustino,
- 4 - Mefite d'Ansanto,
- 5 - Tramutola,
- 6 - Panarea.

Die farbigen Punkte im Hintergrund markieren die Verteilung der Erdbeben, gestaffelt nach Magnituden (Quelle INGV Rom).

In den ersten Jahren nach 1992 musste viel "Lehrgeld" gezahlt werden, bis stabile und zuverlässige Messbedingungen geschaffen waren. Die teilweise sehr aggressiven Gase ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ) sind in Verbindung mit Wasser bzw. Luftfeuchtigkeit äußerst korrosive Agenzien, was für in der Nähe befindliche Sensorik und Messtechnik oft eine nur kurze Lebensdauer bedeutete. Einige interessante Messpunkte, wie z. B. die riesige  $\text{CO}_2$ -Mofette von Mefite d'Ansanto, mussten aufgegeben werden, da vulkanähnliche Bedingungen jedes Gerät in kürzester Zeit unbrauchbar machten. Gegenwärtig werden dort nur noch hydrogeologische Bohrlochmessungen durchgeführt. Eine Übersicht zur Lage der derzeitigen Messpunkte vermittelt [Abbildung 19](#).

#### 3.3.2.1 Untersuchungsobjekt Miano

Im Nordwesten Italiens, am oberen Flusslauf der Parma, befindet sich das Dorf Miano. Hier wurden in den 1920er Jahren Tiefbohrungen zur Erdölprospektion durchgeführt. In einer über 1000 m tiefen Bohrung wurde ein Thermalwasser (ca.  $40^\circ\text{C}$ ) mit starker Methanentgasung aufgeschlossen. Anfangs zu Badezwecken verwendet, konnte diese Bohrung seit 2006 zu Forschungszwecken genutzt werden. Die vorhandenen Voraussetzungen auf dem privaten Grund-

stück, wie z. B. ein verrosteter, aber intakter Gas-Wasser-Separator und offene, nicht isolierte Rohrleitungen, beeinflussten zwar die Messgrößen, dennoch konnten durch immer weiter verbesserte Messbedingungen und mittels komplexer statistischer Datenanalyse signifikante Anomalien ausgehalten werden.

Die [Abbildungen 20 a, b](#) zeigen den technischen Teil der Station, bestehend aus dem Bohrloch mit angeschlossenen Separator und der Gas- bzw. Thermalwasserleitung zum Stationshaus. Mit-



**Abb. 20a**  
**Gas-Wasser-Separator an der Miano-Tiefbohrung.**

Die Gas- und Wasserleitungen führen zum Stationshaus. unter: Ausfluss des Thermalwassers mit Temperatur- und Durchflusssensor.



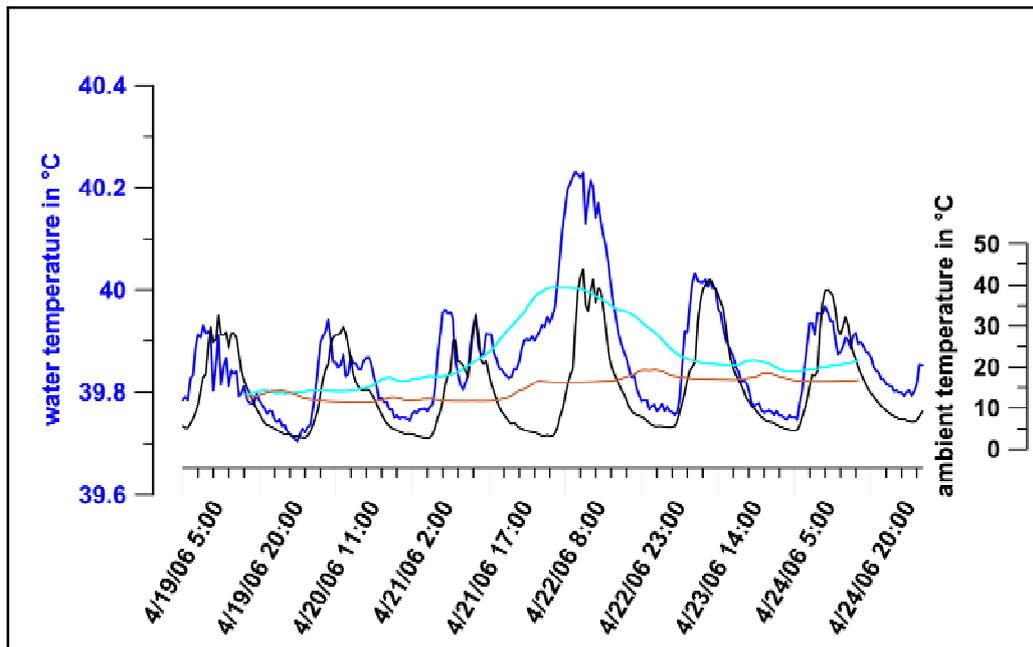
**Abb. 20b**  
**Miano-Tiefbohrung.**

Ausfluss des Thermalwassers mit Temperatur- und Durchflusssensor.

tels Datenlogger und Funkmodem können die aktuellen Messdaten jederzeit abgefragt und bearbeitet werden.

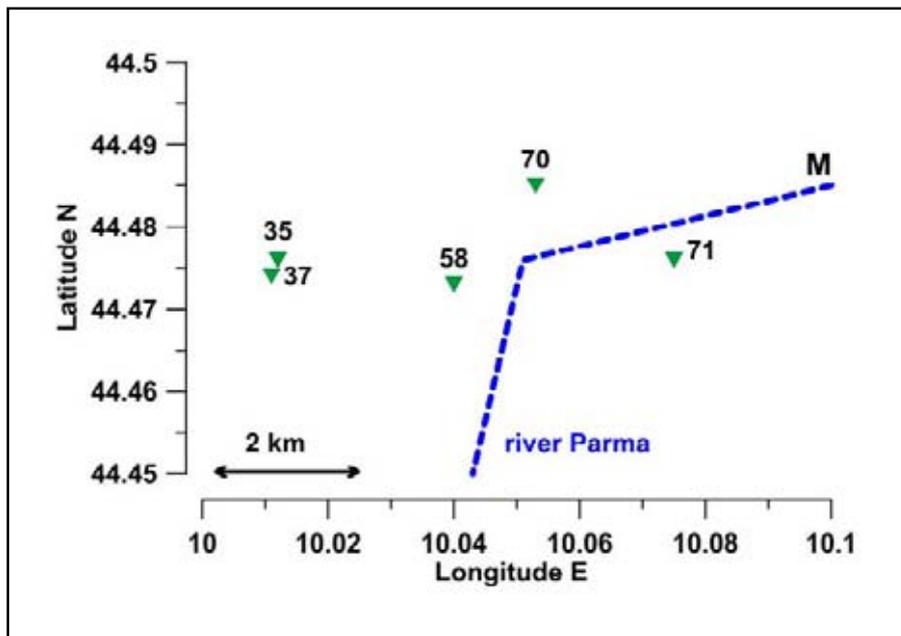
Die seit 2006 andauernde Forschungsaufgabe besteht darin, herauszufinden, ob und wie die natürlich austretenden Fluide (Gas und Wasser) mit ihren jeweiligen Parametern (Gasmenge, Wassermenge, Wassertemperatur) durch die tektonische Aktivität des nördlichen Apenninengürtels, speziell im SW-streichenden Tal der Parma, dem seismisch aktiven Gebiet von Frignano, beeinflusst werden. Ein NNW gerichtetes Verschiebungsverhalten, das man aus den Herdparametern

der Erdbeben ableiten kann, führt zu verbesserten Fluidtransportbedingungen in der Kruste, die sich auch auf die mengenmäßige und mischungsbedingte Fluidemission auswirken sollte. Das Thermalwasser vom Typus eines Na-Cl-Mineralwassers mit einem Tritiumgehalt von weniger als 0.5 T.E. deutet auf einen langen Transportweg mit Kontakt zu einem tiefliegenden Methanreservoir hin. Während die Schüttungsraten über längere Zeiträume relativ stabil bleiben, zeigen sich in der Temperatur des Thermalwassers deutliche Anstiege über einen Zeitraum von ein bis zwei Tagen, welche sich auch mit der Seismotektonik in der Umgebung gut korrelieren lässt. Die Analyse der Thermalwasseranomalien beruht aber auch auf einer statistischen Evaluierung der Daten, da eine Beeinflussung durch die Umgebungstemperatur vorliegt. Der kurze Transport zum Stationshaus wirkt sich ungünstig auf die Wassertemperaturmessung aus. Dieses Problem kann jedoch durch parallele Messungen der Umgebungsbedingungen reduziert werden, zumal die Anomalien über einen längeren Zeitraum als die täglichen Lufttemperaturschwankungen andauern. [Abbildung 21](#) soll demonstrieren, wie die täglichen Schwankungen der Thermal-



**Abb. 21**  
**Messbeispiel der Umgebungstemperatur (schwarz) und der Thermalwassertemperatur (blau) am Stationshaus Miano.** Die tägliche Beeinflussung des Thermalwassers durch die Umgebungstemperatur ist deutlich sichtbar. Im Falle einer Anomalie ist die Temperatur des Tiefenwassers erhöht und dieser Effekt wird durch die Glättung nicht verdeckt (hellblaue Linie). Die braune Linie zeigt den geglätteten Tagesgang der Umgebungstemperatur (aus A61).

wassertemperatur durch die Sonneneinstrahlung beeinflusst wird und wie durch einfache Glättung dieser Effekt verringert und die signifikante Temperaturerhöhung des Thermalwassers im Falle einer Anomalie sichtbar wird. Eine umfangreiche statistische Analyse bestätigt diesen Zusammenhang, der in der entsprechenden Publikation [A61](#) zu finden ist. Aus den Ergebnissen kann geschlossen werden, dass hier Mischungsänderungen von verschiedenen temperierten Krustenfluiden eine entscheidende Rolle spielen. Die zeitliche Begrenzung der Anomalien auf wenige Tage lässt auf mikroseismische Bruchprozesse schließen, die nicht stabil sind und die eine zusätzliche Zufuhr aus einem wärmeren Aquifer limitieren. Damit wurde das prinzipielle Ziel erreicht, nachzuweisen, dass Krustenfluide Hinweise auf geodynamische Prozesse, welche im Vorfeld von Erdbeben ablaufen, bis zur Erdoberfläche übertragen und dort qualitative und/oder quantitative Änderungen auslösen können. Außerdem wurden in den Untersuchungen von 2006 bis heute eine Anzahl derartiger Anomalien identifiziert, so dass sich auch eine laterale Einordnung feststellen lässt. [Abbildung 22](#) zeigt die Lage der Epizentren, deren Seismizität einen Anomalieeffekt in Miano hervorgerufen haben. Deutlich ist der Zusammenhang zu einem



**Abb. 22**  
**Verteilung der Epizentren von Erdbeben**, die am Messpunkt Miano (M) zu einer Erhöhung der Thermalwassertemperatur geführt haben.

dominierenden WSW-ENE streichenden tektonischen Element ersichtlich, dem auch der Flusslauf der Parma folgt. Einige der Anomalien sind im Prozess des Spannungsaufbaus kurzfristig, also einige Tage vor dem eigentlichen Beben registriert worden.

### 3.3.2.2 Untersuchungsobjekt Caprese Michelangelo

Nach einer Bebenserie im November 2001 wurde auch die Region des oberen Tibertals (Alto Tiberina) in die Untersuchungen zur geogenen Fluidemission in seismisch aktiven Gebieten Italiens einbezogen. Ein Cluster von Mofetten, welches sich in der Nähe der Ortschaft Caprese Michelangelo befindet, war der Ausgangspunkt für langfristige Untersuchungen zur zeitlichen Änderung der CO<sub>2</sub>-Freisetzung. Die Mofetten befinden sich am Rande eines großen, natürlichen CO<sub>2</sub>-Reservoirs, das durch eine Bohrung hinsichtlich seiner Tiefenstruktur und seiner Druck- und Temperaturverteilung erkundet wurde. Die Migration der Bebenherde führte zu der Annahme, dass die flach einfallende Alto-Tiberina-Störungszone der Haupttransportweg für die aufsteigenden Fluide ist. Der Aufbau der Station Michelangelo diente der kontinuierlichen Gasflussmessung im gesamten Mofettenfeld. Jedoch erwies es sich als äußerst schwierig, eine unge-



**Abb. 23**  
**Morphologische Veränderungen an einer Mofette bei Caprese Michelangelo.** Links: im Februar 2002, unmittelbar nach dem Erdbeben, sind nur feine Risse im Boden als Gasvents sichtbar, eher typisch für eine diffuse Entgasung. Rechts: starke Entgasung im April 2004, mehrere Monate nach der Bebenserie. Die Mofette wurde durch die Seismizität anhaltend aktiviert.

störte kontinuierliche Messreihe aufzuzeichnen, da die Morphologie der Mofetten sehr unbeständig ist. Die eingesetzten Auffangsysteme für den Gasstrom wurden durch die Bildung neuer, abseits gelegener Mofetten wirkungslos und mussten häufig umgesetzt werden. Eine regelmäßige Fotodokumentation der Gasaustritte erwies sich als geeignetes Mittel, um die starken Änderungen im Gasstrom begründen zu können. Beispielsweise waren zu Beginn der Messungen im Jahre 2002 bestimmte Mofetten nur durch feine Risse im Boden erkennbar. Sie bildeten jedoch in der post-seismischen Entgasungsphase deutliche Krater aus, deren Form zeitlichen Variationen unterliegt (siehe [Abb. 23](#) bzw. die Zusammenstellung von 2006 in [A50](#)).

Die Einrichtung einer kontinuierlichen Kameraüberwachung (Beispiel in [Abb. 24](#)), führte leider zu keinem wesentlichen Erkenntnisfortschritt, da sich die Mofette im Laufe von Wochen und Monaten aus dem justierten Bildausschnitt hinaus verlagerte.



**Abb. 24**

**Mofette in Caprese Michelangelo.** Auf dem "Krater" im Vordergrund stand Monate zuvor der Gas-Auffangzylinder. Über einige Wochen wanderte der Gasaustritt an die benachbarte Stelle im Hintergrund. Kontinuierliche Gasflussmessungen mit der Auffangmethode waren hier nicht möglich. Das justierte Kamerasystem befindet sich links am Solarpaneel.

Aus heutiger Sicht ergibt sich für dieses Mofettenfeld ein dynamisches Entgasungsverhalten, das 18 Monate nach dem Hauptbeben begann und die seismische Aktivität auf den als Aufstiegszone dienenden Klufflächen widerspiegelt. Die Migration der Beben entlang der Störungszone kann mit einer voranschreitenden Porendruckdiffusion erklärt werden. Diese detaillierte Interpretation war aber nur durch die intensive Zusammenarbeit mit dem seismologischen Observatorium des INGV in Arezzo möglich, da sich die Migration der Mikrobeben nur mit Hilfe eines erweiterten Stationsnetzes beobachten ließ.

Zusammenfassend kann in diesem Untersuchungsobjekt eine Migrationszeit des erhöhten Porenfluids von ca. 1.5 Jahren zwischen Hypozentrum und Mofette angenommen werden, was einer Migrationsgeschwindigkeit von durchschnittlich 20 m/d entspricht. Die Ergebnisse dieser Fluidbewegung stellen gewissermaßen das fehlende Bindeglied zwischen der seismogenen Porendruckdiffusion und dem Austreten dieser Fluide an der Erdoberfläche dar ([L10](#), [L15](#)) dar.

Die Untersuchungen in Caprese Michelangelo sollen im Rahmen eines DFG Projektes über die derzeitige SAW-Projektlaufzeit hinaus fortgeführt werden, da Ende 2010 geplant ist, die dortige Tiefbohrung PS1 für die Produktion von CO<sub>2</sub> zu nutzen. Dies würde zu einer Druckentlastung im Krustenbereich und zu weitreichenden Deformationen führen, mit der damit verbundenen Gefahr, lokale Erdbeben zu induzieren. Dabei werden Änderungen in der Gasemission ebenso wie ein seismotektonischer Einfluss auf die fluidgefüllten Klüftflächen erwartet. Zahlreiche Untersuchungen haben gerade diesen Zusammenhang immer wieder bestätigt, dass Änderungen der resultierenden Effektivspannung durch Variationen des Porendrucks hervorgerufen werden können. Dieser Prozess führt auch zur Reduzierung der Scherfestigkeit und kann somit Erdbeben triggern.

### 3.3.2.3 Untersuchungsobjekt San Faustino

San Faustino italienweit für sein Mineralwasser bekannt. Ein an das Mineralbrunnensystem gekoppelter natürlicher CO<sub>2</sub>-Austritt in einer gefassten Mofette wurde von uns seit der starken Bebenserie 1997/98 in Umbrien und Marken (A27). Einige technische Probleme bei der Erfassung des aggressiven Gases führten aber erst 2005 zu derart verbesserten Stationskonfiguration, dass die damit gewonnene Datenserie auch Gegenstand einer kürzlich eingereichten Publikation werden konnte (A64). Das kontinuierliche Austreten von CO<sub>2</sub> im Gelände der Mineralwasserproduktionsstätte führte zur Korrosion an den Betriebsanlagen, wie letztendlich



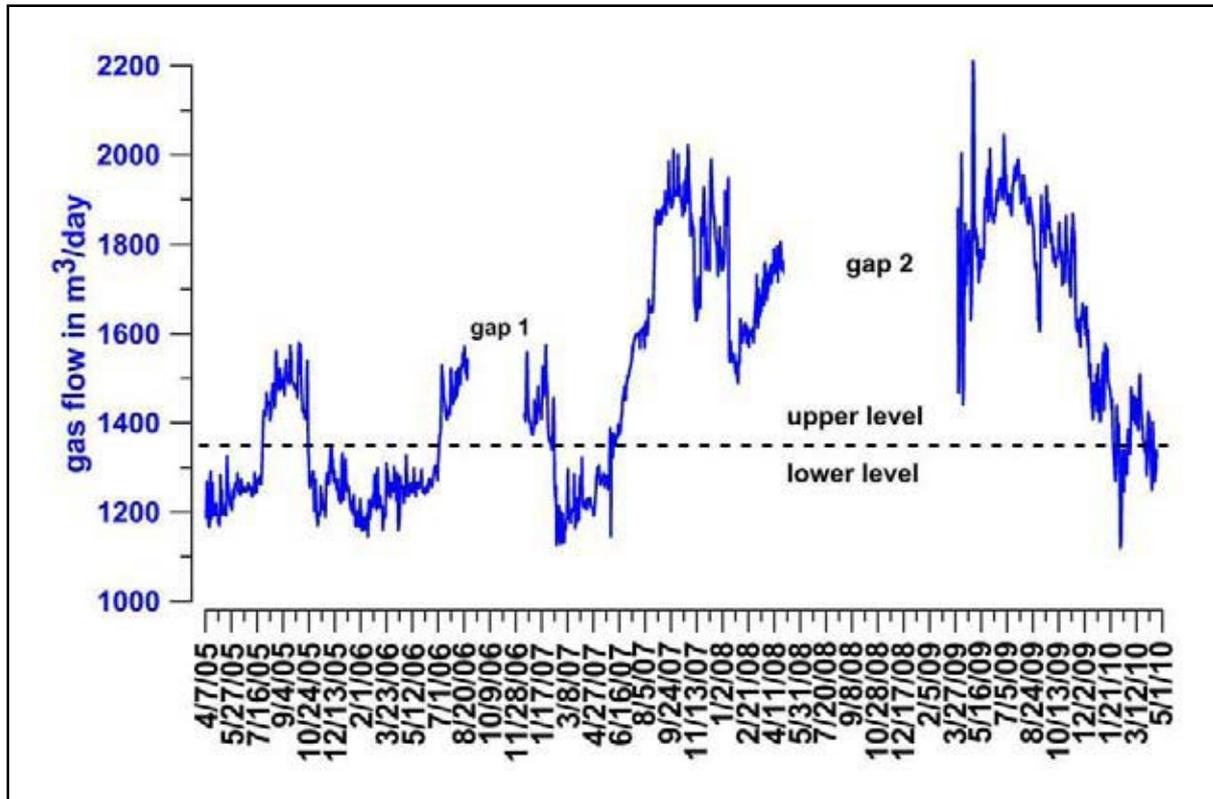
**Abb. 25**

**Messstation San Faustino.** Links: Entgasungsrohr der Mofette, Solarstromversorgung und Gebäude der Mineralwasserfirma im Hintergrund. Rechts: Pelicase mit Sensorelektronik, Batterien und Datenlogger sowie Laptop zu Auslesen der Daten.

duktionsstätte führte zur Korrosion an den Betriebsanlagen, wie letztendlich auch an unseren Messgeräten. Die Gasaustrittsstelle wurde 2005 – auch unter Einbeziehung unserer Empfehlungen – verlegt und konnte anschließend zur die Installation einer neuen Station mit Solarstromversorgung, definiertem Gastransportsystem und entsprechend solider Sensoranordnung genutzt werden (Abb. 25).

Im Ergebnis der Untersuchungen bis 2010 konnten zwei prinzipielle geodynamisch bedingte Einflussgrößen auf die Entgasungsrate festgestellt werden. Das ist zum einen der ständige Einfluss des sogenannten "static strains", der durch das regionale Spannungsfeld zu einer kontinuierlichen Druck- bzw. Dehnungsspannung im Krustenbereich führt, aber auch dem Zyklus der Erdbebengenerierung unterliegt und andererseits der "dynamic strain", der sich bei der Ausbreitung relativ schneller Prozesse, wie Erdbebenwellen, nur kurzzeitig bemerkbar macht. Beide Vorgänge sind die Folge der akkumulierten Krustenspannung, die zu schnellen Relaxationen (Erdbeben) oder zu langsamen Bewegungen (a-seismisches Kriechen, Hebungen/Senkungen) führen kann.

Im Zeitraum 2005 bis 2010 wurden vier lang andauernde Anomalien mit erhöhtem Gasfluss registriert, die sich deutlich über dem Niveau der „normalen“ Entgasungsrate bewegen. [Abbildung 26](#) zeigt den Verlauf der Entgasungsrate über diesen Zeitraum. Die beiden Ausfälle in der Registrierung (Gaps), sind auf einen Programmierungsfehler bzw. einen Umbau des Rohrleitungssystems zurückzuführen.

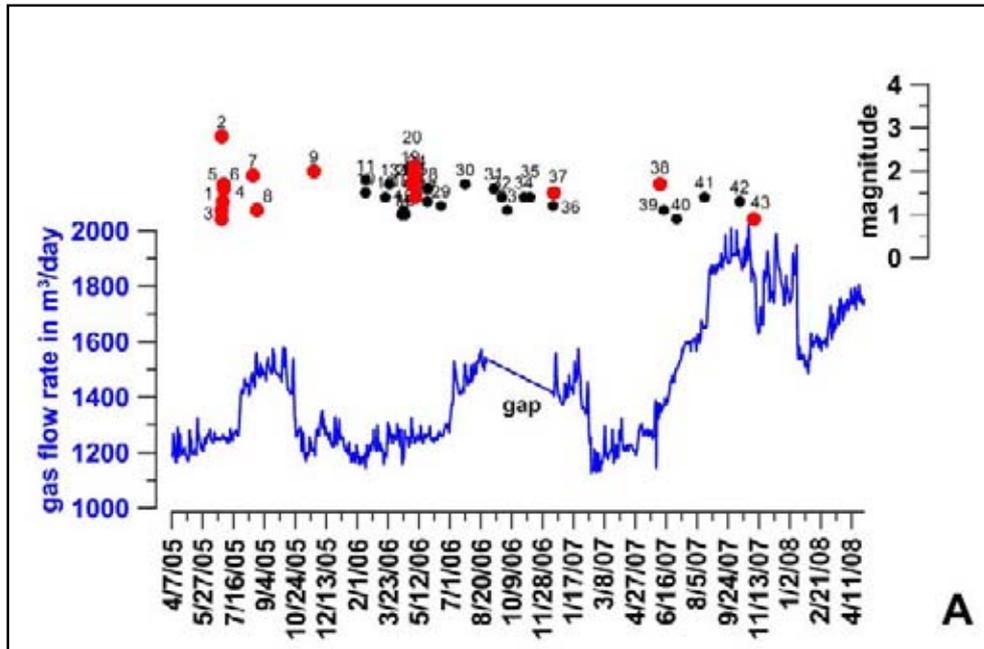


**Abb. 26**

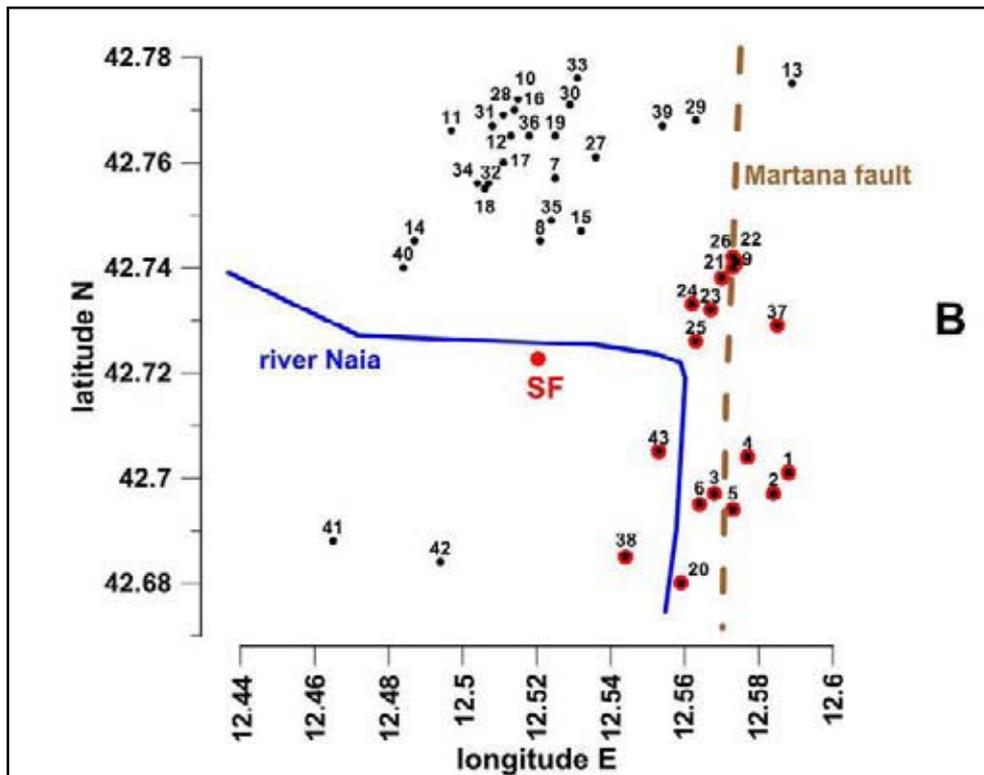
**Gasflussremission in San Faustino zwischen 2005 und 2010 (in m<sup>3</sup>/d).** Zwei längere Pausen in der Registrierung waren technisch bedingt. Man kann deutlich zwei Niveaus unterscheiden, die sich mittels des Schwellenwertes von 1350 m<sup>3</sup>/d unterscheiden lassen.

Da sich nach einer Evaluation möglicher Einflussgrößen auf die Gasfreisetzung (z. B. Meteorologie oder Gezeiten) keine weiteren Argumente finden ließen, muss an diesem Standort von einer geodynamisch bedingten Beeinflussung auf das Entgasungsverhalten ausgegangen werden. Eine Analyse der lokalen Seismizität, die letztendlich Ausdruck der geodynamischen Aktivität ist, zeigt, dass jede Phase einer erhöhten Gasemission von einem oder mehreren Beben auf ein und derselben Störungszone begleitet wurde. Zwar sind Magnitude und demzufolge auch die Herdflächen gering ( $M_1 < 3$ ), jedoch sind sie in jeder Phase aktiviert worden und gleichzeitig auch der einzig messbare Ausdruck einer langsamen Krustendeformation. Diese Hypothese wird durch tektonische Bewegungsvorgänge gestützt, die einen verbesserten Fluidtransport erst ermöglichen (normal and thrust faulting). In einem regionalen Spannungsfeld, das eine Abschiebung in NE-Richtung induziert, werden Störungszone, die diese Einfallsrichtung aufweisen, durch einen höheren Fluidtransport gekennzeichnet sein. Daher ist davon auszugehen, dass langsame Abschiebungen, wie sie für a-seismische Prozesse typisch sind, die Ursache für die über Monate anhaltenden Anomalien sind. Dabei wird das Eindringen/Aufsteigen von hochgespannten Fluiden aus dem Mantelbereich diesen Prozess noch unterstützt haben.

[Abbildung 27](#) zeigt die Lage der Epizentren um die Messstation San Faustino. Allerdings ereigneten sich nur die Beben am südöstlichen Teil der Martana Störungszone vor oder während der anomalen Perioden mit erhöhter Gasemission. Der post-seismische Effekt verdeutlicht auch den zeitlichen Ablauf: erst nach den Bruchbildungen und Verschiebungen in 5-10 km Tiefe, die ei-



**Abb. 27**  
**Zeitlicher Verlauf**  
**der Gasemission an**  
**der Station San**  
**Faustino** und der  
entsprechenden Erd-  
beben in der näheren  
Umgebung (A);  
Gebiet: 6x6 km².  
Die geringe laterale  
Ausdehnung ist  
durch die schwachen  
Magnituden bedingt.  
B: Lage der Epizen-  
tren um die Messsta-  
tion San Faustino.  
Nur die Beben am  
südöst-lichen Teil der  
Martana-Störungs-  
zone (rote Punkte)  
ereigneten sich *in*  
*allen* Perioden er-  
höhter Gasemission  
(siehe Text).



nen verbesserten Fluidaufstieg erlauben, kommt es nach einer gewissen Aufstiegszeit (Retardation) zu einer erhöhten Gasemission an der Oberfläche.

Der zweite geodynamische Prozess – der dynamic strain effect – steht ursächlich mit dem Beginn der seismischen Bebenserie in den Abruzzen, dem sogenannten L’Aquila Beben ( $M_w=6.3$ ) in Verbindung. Durch Zufall wurden die Messungen am 30. März 2009 in San Faustino nach einer längeren Rekonstruktionsphase der Gaspipeline "rechtzeitig" wieder aufgenommen. Der starke Gasstrom schon zu Anfang der Messungen war außergewöhnlich, konnte aber nicht nicht seismotektonisch zugeordnet werden. Mehrere kurzzeitige Anomalien im Gasstrom folgten im Laufe eines Monats. Die markanteste und längste Anomalie wurde ca. 20 Tage nach den stärksten Beben registriert, welches sich ca. 80 km entfernt in Streichrichtung der regionalen Tektonik (NW-SE) ereignete. Mit dem Ende der starken Nachbebenserie, also Beben mit Magnituden  $>4$ , setz-

ten auch die Gasflussanomalien aus. Diese Zusammenhänge ließen den Schluss zu, dass die Spannungsfreisetzung hinsichtlich ihrer Energie ausreichte, um gasgefüllte Minireservoirs (po-

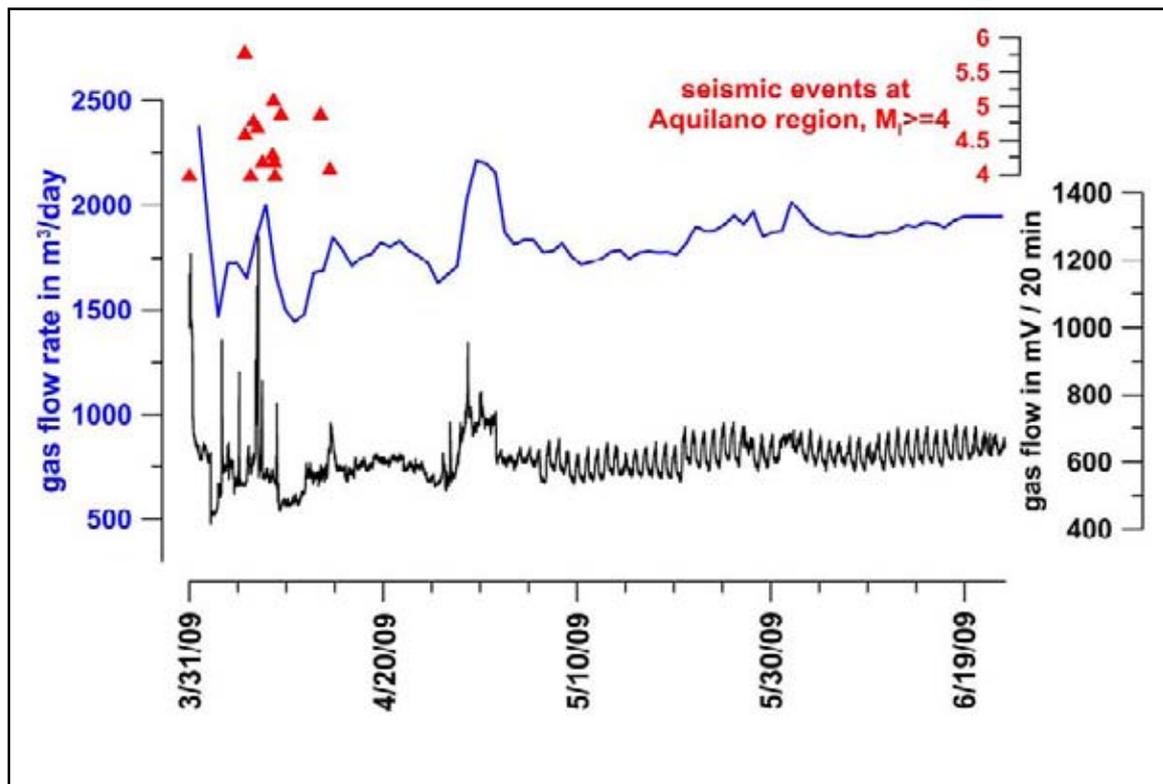


Abb. 28

**Der Gasfluss an der Station San Faustino im Umfeld des L'Aquila Bebens 2009** (Messintervall 20 min). Deutlich sind in der schwarzen Kurve die schmalen Anomalien im zeitlichen Umfeld der L'Aquila Beben (rote Dreiecke) zu erkennen. Auch in der aufsummierten täglichen Entgasungsmenge (blaue Linie) zeigen sich diese anomalen Zeiträume. Die größte Anomalie wurde ca. 20 Tage nach den stärksten Beben registriert.

ckets) und/oder an den Klüften angelagerte Mikrogasblasen zu aktivieren und aufsteigen zu lassen. [Abbildung 28](#) zeigt die kurzzeitigen Gasflussanomalien im Kontext mit der Bebenserie. Die Interpretation einer erhöhten Fluiddruckphase vor und während der L'Aquila Bebenserie wird durch andere Untersuchungen bestätigt. Veränderungen in den  $v_p/v_s$  Verhältnissen geben erste Hinweise auf einen verstärkten Einfluss der Fluide im Krustenbereich, speziell auf die aktivierten Bruchflächen ([L32](#), [L33](#)).

### 3.3.2.4 Untersuchungsobjekt Mefite d'Ansanto

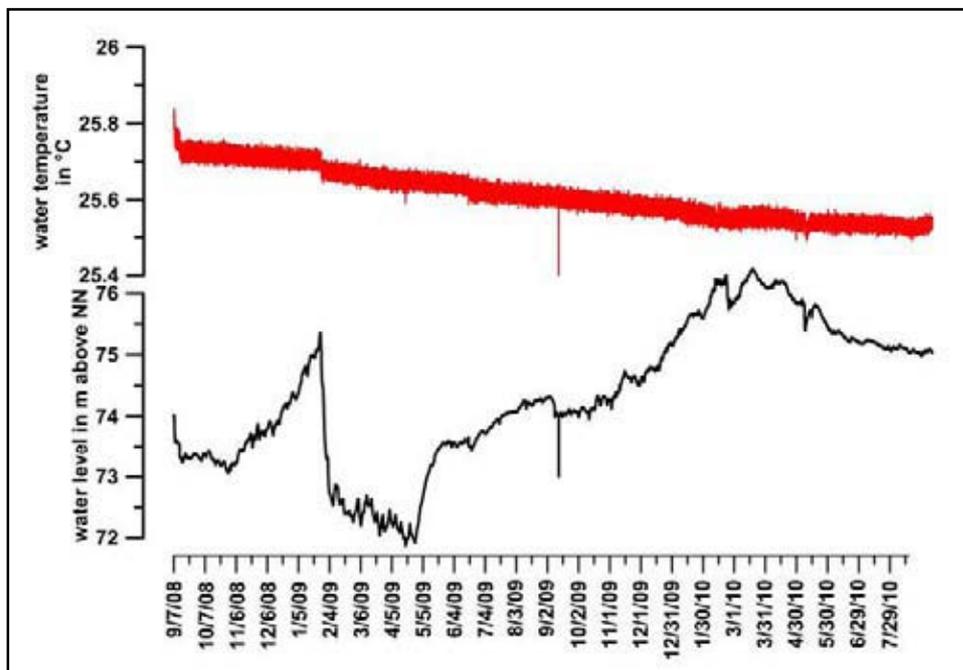
Schon in alten Kirchenbüchern wurde der riesige Mofettenpool von Mefite d'Ansanto als Zugang zur Hölle beschrieben. Aus heutiger Sicht ist die Lokation eine außergewöhnlich große Mofette oder ein Mofettenpool mit einer geschätzten Gasfreisetzung von ca. 1000 t/d ([L34](#), [Abb. 29](#)). Das CO<sub>2</sub>-dominierte Gasgemisch ist durch seinen hohen Anteil von 0.33 vol.% H<sub>2</sub>S besonders gefährlich. Gleichzeitig befindet sich dieses Gebiet aber auch im Epizentrum des Irpinia-Basilicata-Bebens von 1980, das mit einer maximalen Magnitude von 6.9 eine zerstörerische Auswirkung auf die Umgebung hatte.

In Kooperation mit dem IMAA Potenza wurde mehrfach versucht, hier Sensorik oder Messstationen zu installieren. Dies scheiterte jedoch stets an den sehr aggressiven Umweltbedingungen. Letztendlich war es aber möglich, eine Kombination aus Druck- und Temperatursonden in einem benachbarten Bohrloch unterzubringen. Die kontinuierliche Registrierung dieser Parameter gibt Hinweise, wie sich der hydrostatische Druck zeitlich verändert und/oder ob ein Aufstieg von



**Abb. 29**  
**Mefite d'Ansanto**  
 ist ein Mofettenfeld mit zahlreichen Vents und einer weit verbreiteten diffusen Entgasung, die durch das graue verwitterte Gesteinsmaterial verdeutlicht wird.

Thermalwasser existiert, der einen Hinweis auf erhöhte tektonische Spannungsakkumulation geben könnte. [Abbildung 30](#) vermittelt einen Eindruck von den Änderungen im Grundwasserstand bzw. im hydrostatischen Druck. Es wird zur Zeit noch versucht, diese Variationen im Kontext mit Niederschlagsereignissen oder lokalen Erdbeben zu interpretieren. Auch ein Anstieg des Fluidreservoirs oder Strain-Effekte müssen dabei in Betracht gezogen werden. So wird die starke



**Abb. 30**  
**Mefite d'Ansanto.**  
 Zeitliche Variation des Grundwasserstandes, bezogen auf die Bohrlochoberkante (schwarz) und der Wassertemperatur in 80 m Tiefe (rot). Der Einbruch 09/2009 ist durch das Auslesen der Daten bedingt. Die starke Absenkung 02/2009, wird auf lokale Strain-Effekte zurück geführt (siehe Text).

und relativ schnelle Absenkung im Februar 2009 auf letztere zurück geführt, wodurch z. B. eine gewisse Fluidmenge infolge von Klufterweiterungen in Extensionszonen migrieren konnte. Die Temperatur zeigt einen abklingenden Trend, der möglicherweise seit dem Irpinia-Basilicata Beben andauert. Eine gesicherte Einschätzung des Fluidverhaltens kann allerdings nur durch eine Fortführung der Untersuchungen erreicht werden.

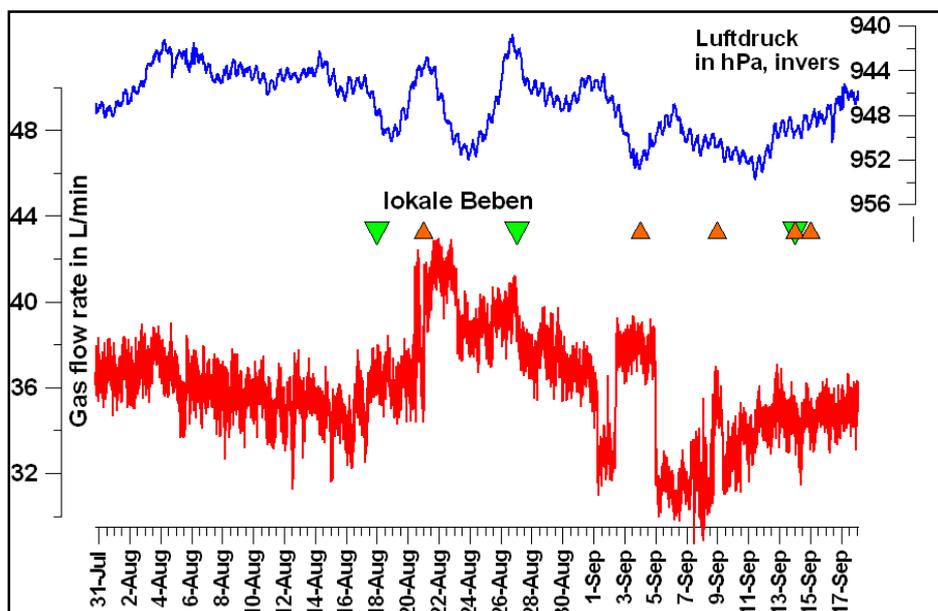
### 3.3.2.5 Untersuchungsobjekt Tramutola

In der Nähe des Val d'Agri, südlich von Potenza, befindet sich in NW-SE Streichrichtung die Monti-della-Maddalena-Störungszone. Auf dieser seismisch aktiven Zone wurde die 500 m tiefe Bohrung von Tramutola abgeteuft. Einst zur Erdölprospektion angelegt, erwies sie sich schließlich – wie die Bohrung im nördlichen Miano – "nur" als artesische Thermalwasserquelle mit starker Methanemission. Der Na-HCO<sub>3</sub>-Cl-Wassertyp deutet auf die karbonatischen Lösungsprozesse in der Tiefe hin. **Abbildung 31** zeigt den einfachen, aber robusten Stationsaufbau, bei



**Abb. 31**  
**Messstation Tramutola** mit gefasster Thermalwasserbohrung und starker Methanentgasung. Das im roten Eintauchrohr aufgefangene Gas wird zur Gasuhr geleitet.

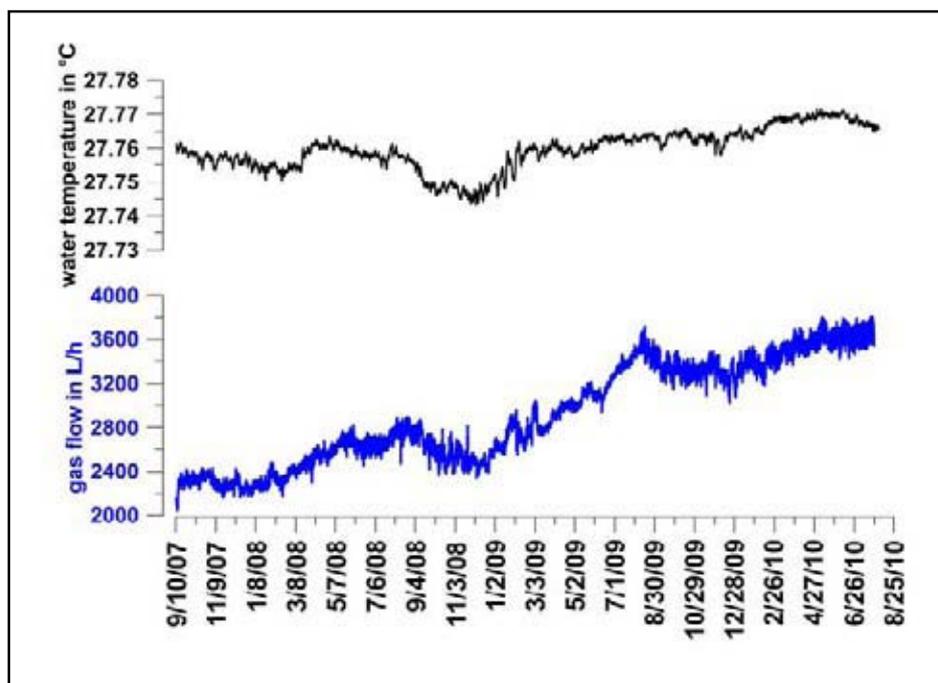
dem mittels eines Kunststoffrohres ein Teil der Gasmenge in einen Schlauch eingeleitet wird, der zur Gasuhr führt. Zur Zeit wird neben dem Gasfluss noch die Wassertemperatur stündlich registriert. Weitere Parameter, wie die elektrische Leitfähigkeit oder das Eigenpotential in der näheren Umgebung der Station können auf Grund der reduzierten Anzahl der Kontrollbesuche nicht weiter mit der notwendigen Datensicherheit aufgezeichnet werden.



**Abb. 32**  
**Messstation Tramutola.** Anomale Änderungen des Gasflusses im Aug./Sept. 2004. Lokale Beben mit maximal 30 km Entfernung sind als Dreiecke dargestellt. Rote Symbole repräsentieren ein südliches Epizentrum, grüne ein nördliches. Die Luftdruckvariation (blau) zeigt keinen Einfluss auf die mit Überdruck freigesetzte Gasmenge.

Die seismisch sehr aktive und gefährdete Region des Val d'Agri ist immer wieder durch bestehende Krustenspannungen zum Schauplatz schwacher bis starker Erdbeben geworden. Im Jahre 1857 wurde die Region durch ein Beben der Stärke XI (MCS-Intensitätsskala) völlig zerstört. Daher wurde die Station Tramutola im Sinne einer lokalen Überwachung in ein Netz verlinkter Stationen des IMAA Potenza eingebunden, von denen der größte Teil elektromagnetische Messungen durchführt. Bis in das Jahr 2007 hinein wurden die bis dahin registrierten Daten in umfangreichen Publikationen ausgewertet und interpretiert (A21, A45, A53). In **Abbildung 32** ist ein Beispiel für eine seismotektonisch getriggerte Gasflusserhöhung dargestellt, bei der man wegen der zahlreichen Beben nicht entscheiden kann, ob die Anomalie als Vorläufereffekt für die lokalen Beben auftritt oder als Folge des vorhergehenden Bebens vom 18.08.2004. Gerade diese Überlagerungseffekte machen die Untersuchung und Evaluierung von Vorläufereffekten schwierig, eine eindeutige Zuordnung ist aber notwendig, um gesicherte Hinweise an die lokalen Zivilschutzeinrichtungen geben zu können. Erste Erfolg versprechende Schritte wurden getan und sollten durch weitere Langzeitmessreihen und weitere Messpunkte in ihrer Aussage verdichtet werden.

In den Jahren ab 2007 wurden nur Mikrobeben mit geringer Magnitude registriert, so dass keine kurzzeitige Anomalien in der Gasfreisetzung auftraten. Jedoch kann der allgemein ansteigende Trend der Gasfreisetzung als Begleiterscheinung eines zunehmenden Spannungsaufbaus im Krustenbereich interpretiert werden (vgl. **Abb. 33**). Besonders interessant ist dieser Aspekt, wenn man von einem sogenannten seismic gap ausgeht – also einer seismisch inaktiven Phase, die eine größere Spannungsakkumulation ermöglicht. Dann könnte der beobachtete Gasflusstrend Vorläufer eines kommenden Erdbebens sein.



**Abb. 33**  
**Messstation Tramutola.** Zeitliche Änderungen des Gasflusses (blau) und der Wassertemperatur in den letzten 3 Jahren. Die Wassertemperatur kann im Prinzip als konstant angesehen werden. Kleine Variationen im Gasstrom können sich aber widerspiegeln. Ein ansteigender Trend (ca. 80 %) ist nur bei der Entgangsmenge nachweisbar.

### 3.3.2.6 Untersuchungsobjekt Panarea

Die Äolischen Inseln im Süden Italiens sind durchweg vulkanischen Ursprungs. Je nach Lage, zeichnen sie sich durch unterschiedlich starke post-vulkanische Erscheinungen aus. In der Nähe des aktiven Vulkans Stromboli befindet sich die Insel Panarea, die Teil eines submarinen Kraterkomplexes ist. Im November 2002 kam es zu einer Gaseruption bei der hydrothermales Wasser und vulkanische Gase explosionsartig in den oberen Bereich des Kraters aufstiegen und einen ca. 20x14 m<sup>2</sup> großen Trichter auf dem Meeresboden hinterließen. Die daraus abgeleitete wissen-

schaftliche Fragestellung bezog sich nicht nur auf das Wie und Warum, sondern auch auf eine Einschätzung der Möglichkeit, dass sich diese Prozesse wiederholen. Der submarine Bereich östlich von Panarea entspricht etwa dem Kraterzentrum, welcher gegenwärtig in einer Tiefe von 20-30m befindet, so dass eine Untersuchung der Entgasungsfelder nur durch Tauchexpeditionen erfolgen kann. Chemische Analysen der vulkanischen Gase und Untersuchungen zu deren hydrothermale Genese sind zahlreich (L27-29), jedoch ist über die Entgasungsmenge – also den quantitativen, dynamischen Parameter – nichts oder nach Einzelmessungen nur wenig bekannt. Das liegt zum einen daran, dass es extrem schwierig ist, Unterwassermessungen über einen längeren Zeitraum durchzuführen, zumal das Geräteangebot auf diesem Gebiet spärlich und teuer ist, und zum anderen daran, dass derartige submarine Explosionen relativ selten sind, weshalb bisher nur wenig Untersuchungsbedarf bestand. Aus der langjährigen Kooperation mit dem INGV Palermo ergab sich die Aufgabenstellung, unsere Erfahrungen in der kontinuierlichen Gasflussmessung auch auf unbekanntem Terrain, dem Meeresboden, anzuwenden. Ähnlich gelagerte Anforderungen bestanden bereits an den wassergefüllten Mofetten im Eger-Becken und anderen italienischen Standorten. Die dort gewonnenen Erfahrungen mussten erweitert und an die Bedingungen vor Panarea angepasst werden. Folgende Randbedingungen gab es u. a. dabei zu beachten: Wasserdruck von ca. 3 bar, solide Geräteverankerung wegen starkem Wellengang bei Sturm, extrem aggressives Meerwasser, Gerätelaufzeit ca. ein Jahr (Datenspeicher und Batterie), keine bewegliche oder anderweitig empfindliche Sensorik (Turbinen, Schläuche, Trichter etc.), eine Installations- und Ausleseprozedur, die von Tauchern sicher und in relativ kurzer Zeit durchgeführt werden kann. Im Ergebnis dieser Überlegungen wurde von uns ein Gerät entwickelt, dessen Messverfahren allein auf der akustischen Registrierung der am Meeresboden austretenden Gasblasen beruht. Der Gerätetyp mit Namen ABCO (acoustic bubble counter) wurde zuerst in einem Trichter über den Mofetten oder Fumarolen installiert (Abb. 34). Nach einem ersten Probjahr wurde das System weiterentwickelt und ist in dieser Version derzeit im Einsatz (Abb. 35). In dem Zylinder



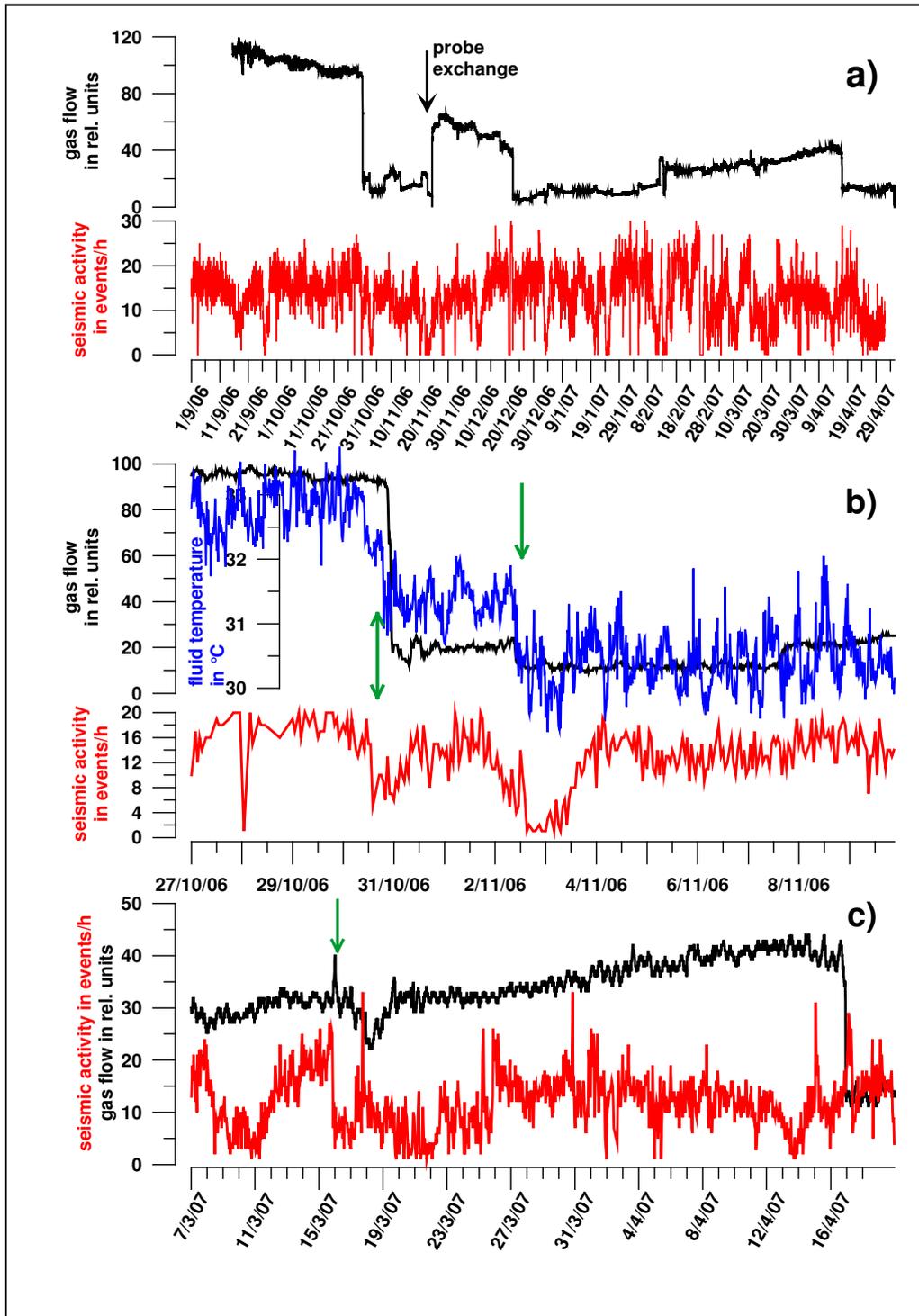
**Abb. 34**  
**Submarine Gasstrom-**  
**messung in Panarea.** Die freigesetzten Gasblasen erzeugen unter dem herrschenden hydrostatischen Druck ein lautes Geräusch, das mittels des Gasblasenzählgerätes ABCO I aufgezeichnet, digitalisiert und abgespeichert wird. Der Trichter über der Mofette dient der Verstärkung des Gasstromes im Bereich des empfindlichen Mikrofons.

befindet sich eine mit einem Mikrofon bestückte Platine (Verstärker und Zähler), nachfolgend der Datenlogger und der Batteriesatz, ausreichend für ein Jahr Messeinsatz. Eine Leuchtdiode am Ende des Zylinders zeigt dem Taucher an, ob die richtige Installationsposition für eine optimale akustische Signalregistrierung erreicht ist. Nur zum Auslesen und Batteriewechsel müssen die Geräte nach oben geholt und danach wieder in die gleiche Position am Meeresboden gebracht werden. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Hydrogeologie der TU Bergakademie Freiberg und der AG "Wissenschaftliches Tauchen" wurden die Instrumente im Rahmen von



**Abb. 35**  
**Submarine Gasstrom-**  
**messung in Panarea.** Die  
neue Gerätevariante  
ABCO II besteht nur  
noch aus einem Zylinder  
mit empfindlicher Sensor-  
fläche am vorderen Ende.  
Dieser Teil wird nahe der  
Mofette unter Steinen  
fixiert und nach ca. einem  
Jahr zum Auslesen an die  
Oberfläche gebracht

studentischen Tauchexkursionen installiert, wobei vor Ort zusätzlich eine Vielzahl geochemischer, geologischer und isotopengeochemischer Daten durch die Studenten gewonnen wurde. Natürlich kann mit diesem System keine Gasmenge in Liter/Zeiteinheit erfasst werden, es ist jedoch ausreichend, die zeitliche Änderung dieses Parameters hinreichend genau zu registrieren. In [Abbildung 36](#) sind die wesentlichen Ergebnisse vom Messzeitraum September 2006 bis September 2007 dargestellt, die durch einen Vergleich mit geodynamischen Parametern, speziell der seismischen Aktivität am benachbarten Vulkan Stromboli, gewonnen wurden. In der Publikation [A59](#) werden die Zusammenhänge mit der geodynamischen Aktivität eines tiefliegenden Fluidreservoirs diskutiert, in dem hydrothermale Fluidbewegungen paroxysmale Eruptionen am Stromboli triggern und gleichzeitig die Fluidemission in Panarea beeinflussen. Parallele Helium-Untersuchungen über einen längeren Zeitraum unterstützen diese Ergebnisse. Es konnten somit erstmalig fluiddynamische Zusammenhänge zwischen beiden Vulkankomplexen erkannt und damit Beweise für ein aktives tektonisches Element zwischen beiden Inseln gesammelt werden.



**Abb. 36 Beispiele der submarinen Gasflussregistrierung mit dem ABCO I-System 2006 und 2007 vor Panarea.** A: rasche Gasflussänderungen in Panarea (schwarze Linie) und Erdbeben im Vulkankomplex vom Stromboli, den sogen. VLP-events (rot). B: Ausschnitt aus A: zunächst zufälligen Änderungen liegt eine gemeinsame Systematik zugrunde, obwohl beide Stationen ca. 15 km (!) voneinander entfernt sind (grüne Pfeile). Eine Temperatursonde nahe einer benachbarten Fumarole in Panarea zeigt zeitgleiche Änderungen der Fluidemission durch eine geringere Mischungstemperatur an. Beide Variationen treten während der Beben auf, also in einer Phase reduzierten Druckes im Vulkanschlott. C: ein spezielles Ereignis belegt die Verbindung des gemeinsamen hydrothermalen Reservoirs: am 15.03.2007 ereignete sich eine außergewöhnliche paroxysmale Explosion am Kraterrand des Stromboli. Zeitgleich wurde in Panarea ein deutlicher, kurzzeitiger Fluidstrom aktiviert. Dies ist nicht allein mit dynamischem Strain zu begründen, da die Entfernung für die geringe Magnitude zu groß ist. Möglicherweise könnten hier Druckwellen im verbundenen Fluidsystem eine Triggerung bewirkt haben.

### 3.4 Taiwan – erfolgreiche Applikationen in einer Region starker Seismizität

Taiwan zählt zu den seismisch aktivsten Regionen der Welt, vor allem aufgrund der Kollision dreier Kontinentalplatten, die in dieser Region für einen ständigen Spannungsaufbau im Krustenbereich verantwortlich sind. Im Frühjahr 2008 wurde in Zusammenarbeit mit der NTU Taipeh ein Monitoringprogramm ins Leben gerufen, in das unsere langjährigen Erfahrungen der kontinuierlichen Fluiderdatenerfassung eingebracht werden sollten. Untersuchungsgegenstand ist der natürliche "mudpool" (Schlammbecken) Chung-Lun, nahe der Stadt Chiayi im SE Taiwans, welcher der Genese nach eher einen Schlammvulkan als eine Mofette darstellt. Denn auch CO<sub>2</sub> ist hier gegenüber Methan das dominierende Geogas. Von Bevölkerung wird dieses Schlammbecken als „earthquake pool“ bezeichnet, da hier sowohl vor als auch nach verschiedenen Erdbeben sichtbare Veränderungen auftraten, die sich im Laufe der Jahre wiederholten. Die Gruppe um Prof. T. F. Yang (NTU Taipeh) hatte mehrfach begonnen, dieses Phänomen zu verifizieren, jedoch scheiterten alle Versuche nach einigen Wochen bzw. Monaten wegen morphologischer Bewegungen (Rutschungen) infolge von Unwettern (Taifune). Auch waren die eingesetzten Messverfahren möglicherweise zu störanfällig für Langzeitmessungen unter den gegebenen Feldbedingungen. Im Jahre 2008 wurden daher nur noch Bodengasuntersuchungen durchgeführt. Folglich wurde auf eine neue, aber einfache und bewährte Instrumentation gesetzt: Wasserspiegel- und Wassertemperaturmessung, Gasflussmessung mittels Anemometer in einem großen Stahltrichter, zwei ABCOII Geräte an den Mofetten sowie ständige Kameraobservation. [Abb. 37](#) vermittelt einen Eindruck von der Lokation mit der Hauptmofette im hinteren Teil des



**Abb. 37**  
**Earthquake mud pool**  
**Chung-Lun im SE Tai-**  
**wans.**

Starke Gasvents befinden sich im hinteren Randbereich, kleinere sind überall verteilt. Ein Trichter zur Gasflussmessung ist im linken Bildteil zu sehen.

Schlammbeckens und dem großen Trichter für die Gasflussmessung. Ein kleines "Observatorium" steht auf einer Anhöhe, von dem aus der Pool per Kamera überwacht werden kann (Beispielsbilder in [Abb. 39](#)).

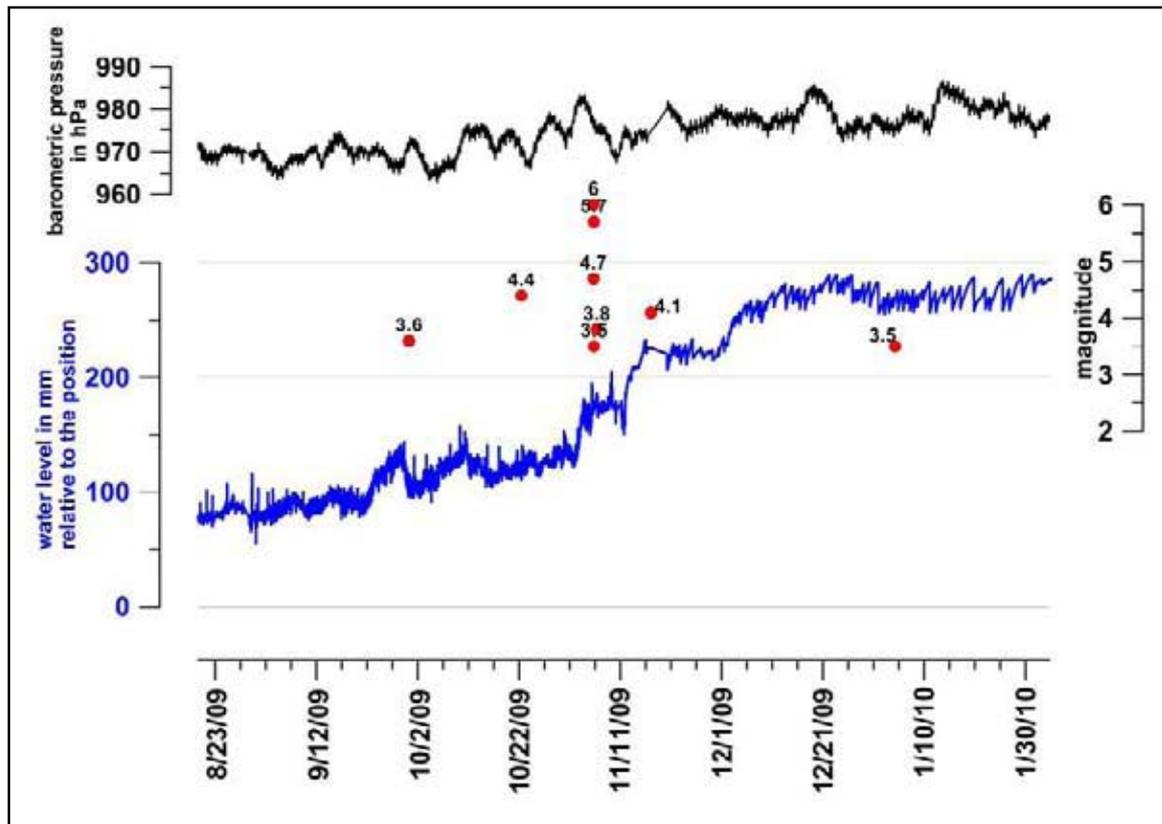
Aufgrund starker Hangrutschungen traten nach einigen Monaten auch für uns Probleme bei der Installation auf. So wurde der Trichter zur Gasflussbestimmung in seiner Nutzung stark eingeschränkt. Die Aufzeichnungen des Wasserspiegels wurden während der Taifun-Periode mehrfach unterbrochen, da die ausgelösten Rutschungen auch die Kabel der Sensoren in Mitleidenschaft zogen. Die bisherigen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Wesentlich für die Dokumentation von Veränderungen im Pool sind die kontinuierlichen Kameraaufzeichnungen (Intervall: 10 min) und die Wasserspiegelmessungen. Aus der Analyse der

kompletten Zeitreihe der Fotos ergeben sich fünf anomale Phasen, die sich durch ein signifikantes Ansteigen des Wasserspiegels bemerkbar machen:

- zu Beginn der Aufzeichnungen im März 2008,
- im Dezember 2008,
- im Juni 2009,
- in der Periode Oktober bis Dezember 2009,
- im März 2010.

Die anomale Periode von Oktober bis Dezember 2009 konnte auch durch die Wasserspiegelmessungen bestätigt werden, deren Verlauf in [Abb. 38](#) abgebildet ist. Die Ursache für den Wasser-



**Abb. 38**

**Earthquake mud pool Chung-Lun im SE Taiwans.** Anomaler Anstieg des Wasserstandes im Schlammbecken bereits im Vorfeld der Erdbeben (rote Punkte). Eine genaue Identifizierung der Zusammenhänge bedarf noch weiterer seismischer Ereignisse (vergl. [Abb. 40](#)). Als Anomalieauslöser kommt neben den lokalen Ereignissen auch die entfernte Bebenserie Anfang November 2009 in Betracht, da hier Magnituden von 6.2 bzw. 5.7 auftraten.

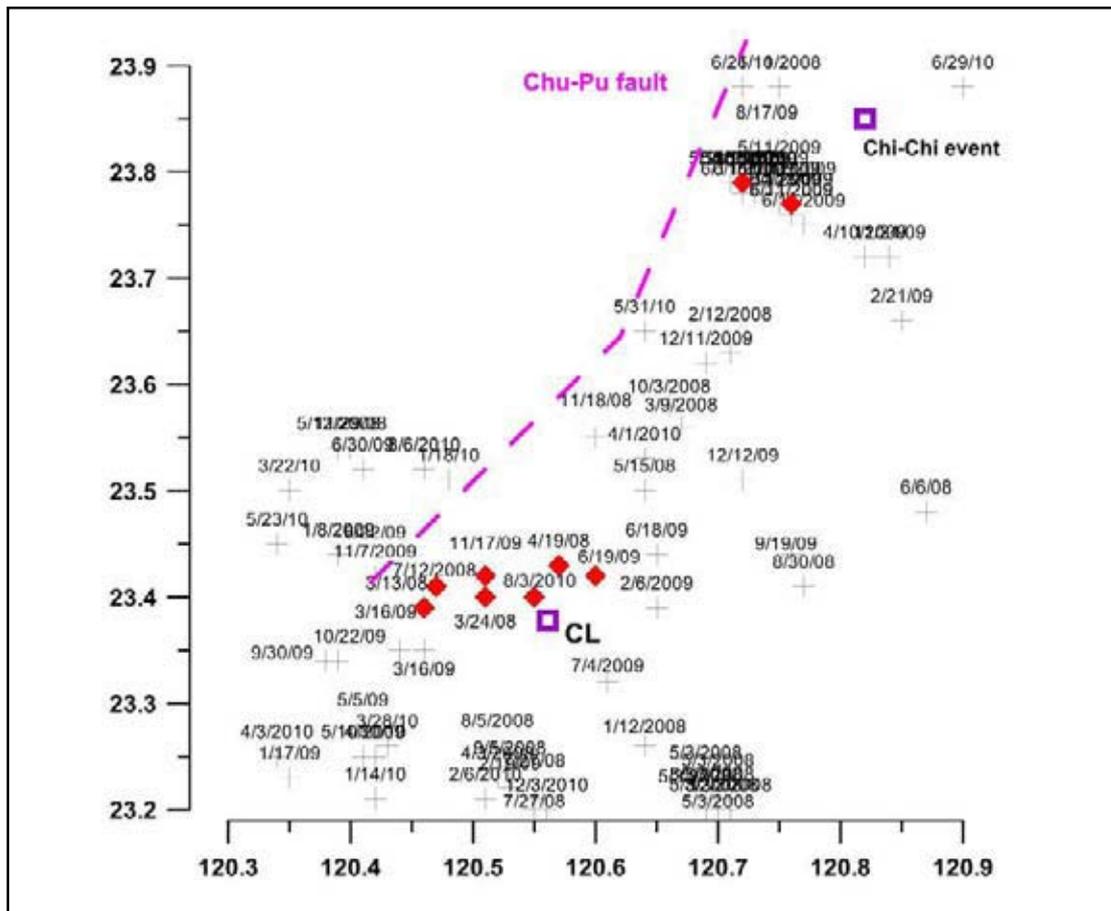
spiegelanstieg ist in einem veränderten Mischungsverhältnis von Wasser, Gas und Schlamm zu sehen. In "normalen" Zeiten wird der Schlammeintrag mit dem Wasser mehr oder weniger schnell abtransportiert, die Sedimentationsrate im Pool selbst ist relativ konstant und meistens sehr gering. Im Falle einer Anomalie wird mehr Schlamm vermutlich durch ein verändertes Gas/Wassergemisch nach oben befördert, so dass sich der Schlamm ablagert und eine Barriere für den Wasserabfluss bildet. Die Fotos in [Abb. 39](#) zeigen als Beispiel den signifikanten Wasserpiegelanstieg vor der Dezemberanomalie. Es muss hinzugefügt werden, dass sich bereits einige Tage zuvor ein anomaler Wasserstand eingestellt hatte, der nun nochmals erhöht wurde (vgl. auch [Abb. 37](#)). Die Ursache für die Wasserpegelanstiege sind in Porendruckänderungen zu suchen, die auf der NE-SW streichenden Chu-Pu Störung durch Spannungsumlagerungen hervorgerufen werden. Der typische Herdmechanismus wird als Abschiebung beschrieben. Da nicht alle Beben anomale Effekte in Chung-Lun hervorrufen, muss es noch weitere Kriterien geben,



**Abb. 39**  
**Earthquake mud pool**  
**Chung-Lun im SE Taiwans.**  
 Anstieg des Wasserspiegels im Schlamm-pool zwischen dem 30. Oktober 2009 (oben) und dem 7. November (un-ten). Am rechten Bildrand ist zu erkennen, dass das Wasser auch die Randflächen über-spült hat. Dieser außerge-wöhnlich hohe Wasserstand wurde vor dem lokalen Erd-beben vom 17.11.2009 (Ma-gnitude  $M_L=4$ ) bzw. vor der 50 km entfernten Bebenserie vom 05.11.2009 ( $M_L= 6.2$  und 5.7) beobachtet.



die den Zusammenhang zwischen "elastic strain accumulation" und "pore pressure perturbation" beschreiben. [Abb. 40](#) gibt schon visuell erste Hinweise, die auf ein begrenztes Cluster von Epizentren in westlicher Richtung hindeuten. Ob dabei die Anomalieeffekte durch den Erdbebenentstehungsprozess induziert werden oder ob sie die Ursache für eine veränderte Scherspannung sind, bedarf noch der Klärung. Kann ein Zusammenhang mit nachfolgenden Erdbeben bestätigt werden, so könnte zum einen der von der Bevölkerung bemerkte Vorläufereffekt verifiziert werden, zum anderen würden sich weitere Interpretationsmöglichkeiten für die hier stattfindenden Wechselwirkungen zwischen Seismotektonik und Poren-/Fluidrücken eröffnen.



**Abb. 40**  
**Verteilung der Epizentren entlang der NE-SW streichenden Chu-Pu fault**, in deren nördlichem Bereich sich auch das bekannte Chi-Chi Erdbeben ereignete ( $M_L=7.3$ ). Die Messstation in Chung-Lun (CL) befindet sich nur wenige km südöstlich von dieser Störungszone. Abschiebungsbrüche in südöstlicher Richtung würden einen Einfluss von Krustenfluiden begünstigen. Alle Erdbeben sind mit Kreuzsignatur und Datum versehen. Die roten Karos bezeichnen die Erdbeben, die sich nach den Fluidanomalien ereigneten. Eine gewisse Clusterbildung deutet auf einen sehr lokal begrenzten Zusammenhang hin.

### 3.5 Schlussbemerkungen

Der Forschungsschwerpunkt unserer über zwanzigjährigen Arbeit lag auf der Untersuchung des Zusammenhanges zwischen Fluidodynamik und Geodynamik, genauer gesagt, den Wechselwirkungen zwischen Fluidreservoir, dem Fluidtransport entlang aktiver, tektonischer Störungszone und der Fluidfreisetzung an ausgewählten Quellen, Mofetten oder Bohrungen. Der erzielte Kenntnisstand beruht auf der komplexen Interpretation der durch eine systematische Herangehensweise gewonnenen Messdaten, die im Rahmen interdisziplinärer Zusammenarbeit mit deutschen und ausländischen Kolleginnen und Kollegen analysiert und bewertet wurden. Nur durch die über die Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften gebotenen Voraussetzungen für Langzeitmonitorings war es möglich, einen entscheidenden Beitrag zu einem Zweig der Grundlagenforschung zu leisten, der auf dem schrittweisen Verständnis geogener Ursachen für das Auftreten von seismotektonisch induzierten Änderungen bzw. Anomalien bei der Freisetzung von Fluiden an der Erdoberfläche beruht. Unsere Arbeitsgruppe sieht darin auch einen Beitrag zur Lösung wichtiger geowissenschaftlicher Fragestellungen, wie der Erforschung von prinzipiellen Möglichkeiten zur Minimierung von Georisiken, insbesondere durch Erdbeben. Aus unserer Sicht ist diese Aufgabenstellung ein wichtiger Bestandteil der "Zukunftsaufgaben der

Geowissenschaften", wie sie von der Geokommission der DFG für die Naturgefahren-Forschung formuliert wurden (vergl. [Andruleit, H. et al., 2010: Dynamische Erde - Zukunftsaufgaben der Geowissenschaften: Strategieschrift](#)). Die Einstellung der seismohydrologischen Langzeitmessreihen und der damit verbundene Abbruch "verstehenden Lernens" aus Informationen, die aus der Emission geogener Fluide abgeleitet werden können, beruht offenbar auf einer kurzfristigen Fehleinschätzung der bestehenden Risiken, und dies, obwohl in jüngster Zeit die wissenschaftliche Akzeptanz des Einflusses der Krustenfluide auf seismische Bruchprozesse immer größer geworden ist. Die ermutigenden Ergebnisse und Ansätze, welche im Kapitel 2.2 zusammengefasst wurden, laufen Gefahr, größtenteils verloren zu gehen. Dies wird den Kritikern der Erdbebenvorhersageforschung Aufwind geben, die dieser Wissenschaftsdisziplin seit Jahren vorwerfen, es existierten nur kurze und unvollständige Datenreihen, aus denen keine Allgemeinaussagen abgeleitet werden könnten ([Earthquake Prediction Debate in: Nature, Februar 1999](#)). Das wissenschaftliche Potential einer Zweipersonen-Arbeitsgruppe ist "per se" begrenzt. Dennoch konnte gezeigt werden, dass die Fluide des vogtländisch-NW-böhmischen Raumes auf lokale Spannungsumlagerungen vorzeitig reagieren, und dass diese Erkenntnis die Basis für eine verantwortungsvolle Information der Bevölkerung sein könnte. Vergleicht man die Ergebnisse der internationalen Forschungen auf diesem Gebiet, so unterliegen sie der Problematik, dass zum einen zu wenige starke Beben die Verifizierung der Ergebnisse verzögern ([Bormann in: PAGEOPH, 2010](#)) und zum anderen, dass eine zu häufige Seismizität im Bereich niedriger Magnituden zu falschen Interpretationen führen kann. Zur Überwindung dieser Hindernisse können allein solche seismohydrologischen Langzeitmessreihen beitragen, deren administrativ verordneten Abbruch wir gerade erleben.

Ulrich Koch  
Jens Heinicke

Bad Brambach und Freiberg/Sa., Dezember 2010

#### 4 Weiterführende Literatur

- L1. Watznauer, A. & U. Koch, 1989. Die geologischen und hydrologischen Verhältnisse im Quellgebiet von Bad Brambach. In: Radontherapie heute. Abh. d. SAW zu Leipzig. Math. nat. Klasse, Bd. 57, Berlin: 49-58.
- L2. Credner, H., 1900. Die vogtländischen Erdbebenschwärme während der Zeit des Juli und August 1900. Berichte und Verhandlungen Kgl. Sächs. Ges. d. Wiss. zu Leipzig, Math.-phys. Klasse, 52: 153-177.
- L3. Horalek, J., F. Hampl, A. Bouskova & Fischer, T., 1996. Seismic regime of the West Bohemian earthquake swarm region: preliminary results. *Studia Geophysica et Geodetica*, 40: 398-412.
- L4. Bankwitz, P., G. Schneider, H. Kämpf & E. Bankwitz, 2003. Structural characteristics of epicentral areas in Central Europe: study case Cheb Basin (Czech Republic). *Journal of Geodynamics*, 35: 5-32.
- L5. Weinlich, F.-H., J. Tesař, S.M. Weise, K. Bräuer & H. Kämpf, 1998. Gas flux distribution in mineral springs and tectonic structure in the western Eger Rift. *J. Czech. Geol. Soc.*, 43: 91-110.
- L6. Roeloffs, E., 1996. Poroelastic techniques in the study of earthquake-related hydrologic phenomena. In: R. Dmowska and B. Saltzman (Editors), *Advances in Geophysics - Vol. 37*. Academic Press, San Diego: 135-194.

- L7. 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.
- L8. Huenges, E., J. Erzinger, J. Kück, B. Engeser & W. Kessels, 1997. The permeable crust: geohydraulic properties down to 9101 m depth. *Journal of Geophysical Research*, 102, B8: 18255-18265.
- L9. Zoback, M. D. & H.-P. Harjes, 1997. Injection-induced earthquakes and crustal stress at 9 km depth at the KTB deep drilling site, Germany. *Journal of Geophysical Research*, 102, B8: 18477-18491.
- L10. Špičák, A. & J. Horálek, 2001. Possible role of fluids in the process of earth-quake swarm generation in the West Bohemia/Vogtland seismoactive region. *Tectonophysics*, 336, 1-4, 151-161.
- L11. Shapiro, S. A.; R. Patzig; E. Rothert & J. Rindschwentner, 2003. Triggering of seismicity by pore-pressure perturbations: permeability-related signatures of the phenomenon. *Pure appl. geophys.*, 160:, 1051-1066.
- L12. Parotidis, M., E. Rothert & S. A. Shapiro, 2003. Pore-pressure diffusion: A possible triggering mechanism for the earthquake swarms 2000 in the Vogtland/ NW Bohemia, central Europe. *Geophysical Research Letters*, 30, 2075, doi:10.1029/2003GL018110.
- L13. Bräuer, K., H. Kämpf, G. Strauch & S. M. Weise, 2003. Isotopic evidence ( $^3\text{He}/^4\text{He}$ ;  $^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ ) of fluid-triggered intraplate seismicity. *Journal of Geophysical Research*, 108, B2, 2070, doi:10.1029/2002JB002077.
- L14. Chiodini, G., C. Cardellini, A. Amato, E. Boschi, S. Caliro & F. Frondini, 2004. Carbon dioxide Earth degassing and seismogenesis in central and southern Italy. *Geophysical Research Letters*, 31, L07615: 1-4.
- L15. Miller, S. A., C. Collettini, L. Chiaraluce, M. Cocco, M. Barchi & B. P. Kaus, 2004. Aftershocks driven by a high-pressure  $\text{CO}_2$  source at depth. *Nature*, 427: 724-727.
- L16. Häner, R., H. Woith, W. Welle & J. Zschau, 2004. Architecture and technologies for an online monitoring and information system. ESC, XXIX General Assembly Potsdam 2004. *Book of Abstracts*: 147.
- L17. Parotidis, M., S.A. Shapiro, & E. Rothert, 2005. Evidence for triggering of the Vogtland swarms 2000 by pore pressure diffusion. *Journal of Geophysical Research*, 110, B05S10, doi:10.1029/2004JB003267, 1-12.
- L18. Horálek, J. & T. Fischer, 2008. Role of crustal fluids in triggering the west Bohemia/Vogtland earthquake swarms: Just what we know (a review). *Studia Geophysica et Geodetica*, 52: 455-478, doi:10.1007/s11200-008-0052-0.
- L19. Horálek, J., T. Fischer, A. Boušková, J. Michálek & P. Hrubcová, 2009. The West Bohemian 2008-earthquake swarm: when, where, what size and data. *Studia Geophysica et Geodetica*, 53, 351-358.
- L20. Neunhöfer H. & T. Meier, 2004. Seismicity in the Vogtland/Western Bohemia earthquake region between 1962 and 1998. *Studia Geophysica et Geodetica*, 48: 539-562.
- L21. Bräuer, K., H. Kämpf & G. Strauch, 2009. Earthquake swarms in non-volcanic regions: What fluids have to say. *Geophysical Research Letters*, 36, L17309, 1-4, doi:10.1029/2009GL039615.
- L22. Bräuer, K., H. Kämpf, S. Niedermann & G. Strauch, 2005. Evidence for ascending upper mantle-derived melt beneath the Cheb basin, central Europe. *Geophysical Research Letters*, 32, L08303, doi:10.1029/2004GL022205.
- L23. Credner, H., 1898. Die sächsischen Erdbeben während der Jahre 1889 bis 1897, insbesondere das sächsisch-böhmische Erdbeben vom 24. October bis 29. November 1897. *Abh. d. mathematisch-physischen Classe der Königl. Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig*, Bd. 24, No. 4: 313-397.
- L24. Credner, H., 1904. Der vogtländische Erdbebenschwarm vom 13. Februar bis zum 18. Mai 1903 und seine Registrierung durch das Wiechertsche Pendelseismometer in Leipzig. *Abh.*

- d. mathematisch-physischen Klasse der Königl. Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig, Bd. 28, No. 6: 415-530.
- L25. Etzold, F., 1919. Die sächsischen Erdbeben während der Jahre 1907–1915. Abh. d. mathematisch-physischen Klasse der Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig, Bd. 36, No. 3: 213-429.
- L26. Shapiro, S. A., J. Kummerow, C. Dinske, G. Asch, E. Rothert, J. Erzinger, H.-J. Kämpel & R. Kind, 2006. Fluid induced seismicity guided by a continental fault: Injection experiment of 2004/2005 at the German Deep Drilling Site (KTB), *Geophysical Research Letters*, 33, L01309, doi:10.1029/2005GL024659.
- L27. Capaccioni, B., F. Tassi, O. Vaselli, D. Tedesco, & R. Poreda, 2007. Submarine gas burst at Panarea Island (southern Italy) on 3 November 2002: A magmatic versus hydrothermal episode. *Journal of Geophysical Research*, 112, B05201, doi:10.1029/2006JB004359.
- L28. Caracausi A., M. Ditta, F. Italiano, M. Longo, P.M. Nuccio, A. Paonita & A. Rizzo, 2005a. Changes in fluid geochemistry and physico-chemical conditions of geothermal systems caused by magmatic input: The recent abrupt outgassing off the island of Panarea (Aeolian Islands, Italy), *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69, 12: 3045-3059.
- L29. Caracausi A., M. Ditta, F. Italiano, M. Longo, P.M. Nuccio & A. Paonita, 2005b. Massive submarine gas output during the volcanic unrest off Panarea Island (Aeolian arc, Italy): Inferences for explosive conditions, *Geochemical Journal*, 39, 5: 459-467.
- L30. Yang, T. F., C. C. Fu, V. Walia, C. H. Chen, L. L. Chyi, T. K. Liu, S. R. Song, M. Lee, C. W. Lin & C. C. Lin, 2006. Seismo-geochemical variations in SW Taiwan: Multi-parameter automatic gas monitoring results. *Pure and Applied Geophysics*, 163: 693–709.
- L31. Terakawa, T., A. Zoporowski, B. Galvan & S. A. Miller, 2010. High-pressure fluid at hypocentral depths in the L'Aquila region inferred from earthquake focal mechanisms. *Geology*, 38, 11: 995-998.
- L32. Di Luccio, F., G. Ventura, R. Di Giovambattista, A. Piscini & F. R. Cinti, 2010. Normal faults and thrusts reactivated by deep fluids: The 6 April 2009 Mw 6.3 L'Aquila earthquake, central Italy. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth* 115, doi: 10.1029/2009jb007190.
- L33. Pio Lucente, F., P. De Gori, L. Margheriti, D. Piccinini, M. Di Bona, C. Chiarabba & N. Piana Agostinetti, 2010. Temporal variation of seismic velocity and anisotropy before the 2009 MW 6.3 L'Aquila earthquake, Italy. *Geology*, 38, 11: 1015-1018.
- L34. Chiodini, G., D. Granieri, R. Avino, S. Caliro, A. Costa, C. Minopoli & G. Vilardo, 2010. Non-volcanic CO<sub>2</sub> Earth degassing: Case of Mefite d'Ansanto (southern Apennines), Italy. *Geophysical Research Letters*, 37, 11, L11303.

## **5 Veröffentlichungen der Arbeitsgruppe 1991-2010** (chronologisch)

### **A) Publikationen in Zeitschriften, Proceedings und Büchern**

- A1. Koch, U. & W. Michler, 1991. Nutzung und Schutz von Mineral und Thermalwässern in der Balneologie am Beispiel der Staatsbäder Bad Brambach - Bad Elster. *Zeitschrift für Physiotherapie*, 43, 2: 75-82.
- A2. Koch, U., J. Heinicke, K. Fröhlich & M. Krbetschek, 1992. Radon im Oberen Vogtland und seine geowissenschaftliche Anwendung. *Wissenschaft und Fortschritt* 42, 6: 253-255.
- A3. Heinicke, J. & U. Koch, 1992. Radon measurements for the solution of engineering geology and geophysics for the earthquake prediction in Eastern Germany. In: *Radon et gaz rares dans le sciences de la terre et de l'environnement. Actes du Colloque Int. sur la Géochimie des Gaz*, Mons, Belgique, oct. 1990. *Mém. Expl. Cartes Géologiques et Minières de la Belgique* 32: 275-280.

- A4. Heinicke, J. & U. Koch, 1992. Radon-Anomalien im Oberen Vogtland im zeitlichen Umfeld des Erdbebens von Heinsberg (NRW) am 13. April 1992. Wiss. Kurzmitteilung. Seismologentreffen Gräfenberg (Bayern). 15. Mai 1992.
- A5. Heinicke, J., U. Koch & G. Martinelli, 1992. Investigations of the connection between seismicity and  $^{222}\text{Rn}$ - $\text{CO}_2$  content in spring waters at the Vogtland area (Germany): First results. In: Activity Report 1990-1992 and Proceedings of the XXIII General Assembly of the European Seismol. Comm. Prague. Vol. II: 317-323.
- A6. Heinicke J. & U. Koch, 1993. Dependence of radon anomalies on seismicity and other parameters in Bad Brambach (Vogtland, Germany). Proc. 2nd Workshop on Radon Monitoring in Radioprotection and/or Earth Sciences, Trieste Nov./Dec. 1991: 536-541.
- A7. Heinicke, J. & U. Koch, 1993. Experience with radon measurements for earthquake prediction and landslides. Vortrag 16. Int. Conf. on Nuclear Tracks and Solids. Peking 1992. Nuclear Tracks and Radiation Measurements 22, 1-4: p. 345.
- A8. Heinicke, J. & U. Koch, 1993. Zusammenhänge zwischen Seismizität und dem  $^{222}\text{Rn}$ - $\text{CO}_2$ -Gehalt von Quellwässern Bad Brambachs (Oberes Vogtland). Z. geol. Wiss. 21, 1/2: 101-104.
- A9. Heinicke, J., U. Koch & M. Krbetschek, 1993. Zusammenhänge zwischen Radonanomalien und Schwarmbeben im Oberen Vogtland. Isotopenkolloquium Freiberg 1991. Isotopenpraxis 28: 337-348.
- A10. Heinicke, J., U. Koch & G. Martinelli, 1993. Simultaneous measurements of radon and  $\text{CO}_2$  in spring water for earthquake prediction research. In: Proc. Scientific meeting on the seismic protection, Venice, July 1993: 152-155.
- A11. Balderer, W., V. Cuomo, G. DiBello, J. Heinicke, U. Koch, V. Lapenna, G. Martinelli, & V. Tramutoli, 1994. The joint monitoring of geochemical and geophysical parameters in a selected test site of Southern Italy: preliminary results. Proc. of European Seismological Commission, Athens, 1160-1169.
- A12. Balderer, W., V. Cuomo, J. Heinicke, U. Koch, V. Lapenna, A. Leggeri & G. Martinelli, 1994. Siting operations in test areas of Saxonia (Germany) and Basilicata (Southern Italy) for earthquake precursory phenomena researches. Proc. of European Seismological Commission, Athens, 1152-1159.
- A13. Heinicke, J., 1994. Earthquake prediction research with geochemical methods. In: Projects for the Understanding and Mitigation of Natural Disasters. German IDNDR-Committee, Bonn: S. 50.
- A14. Koch, U. & J. Heinicke, 1994. Radon behaviour in mineral spring water of Bad Brambach (Vogtland, Germany) in the temporal vicinity of the 1992 Roermond earthquake, the Netherlands. Geologie en Mijnbouw 73: 399-406.
- A15. Heinicke, J., U. Koch, D. Hebert & G. Martinelli, 1995. Simultaneous measurements of radon and  $\text{CO}_2$  in water as a possible tool for earthquake prediction. Environmental Geochem. Health, Supplement to Volume 16, Science reviews: 295-303.
- A16. Heinicke, J., U. Koch & G. Martinelli, 1995.  $\text{CO}_2$  and Radon measurements in the Vogtland area (Germany) - a contribution to earthquake prediction research. Geophysical Research Letters, 22: 771-774.
- A17. Heinicke, J. & U. Koch, 1996. Beiträge zur Umweltforschung mittels radiometrisch-geochemischer Methoden. Forschungsbericht 1993/94. Jahrbuch der Sächs. Akademie d. Wiss. zu Leipzig 1993-1994. Akademie Verlag Berlin: 81-90.
- A18. 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.
- A19. Heinicke, J., U. Koch & G. Martinelli, 1997. Radon and  $\text{CO}_2$  measurement for earthquake prediction research: status report and model conception about the Bad Brambach location (Germany). In: Rare Gas Geochemistry (Hsg. H.S. Virk). Guru Nanak Dev University, Amritsar (India): 136-142.

- A20. Koch, U. & J. Heinicke, 1997. Radonanomalie in der Radonquelle, Bad Brambach, als Vorläufer der vogtländisch-NW-böhmischen Schwarmbeben vom Januar 1997. SZGRF Seismogrammbispiele - Januar 1997 (Hsg. K. Klinge et al.). Seismologisches Zentralobservatorium Erlangen: S. 2 u. 19.
- A21. Di Bello, G., J. Heinicke, U. Koch, V. Lapenna, M. Macchiato, G. Martinelli, S. Piscitelli, 1998. Geophysical and geochemical parameters jointly monitored in a seismic area of Southern Apennines (Italy). *Phys. Chem. Earth*, 23, No.9-10: 909-914.
- A22. Koch, U. & J. Heinicke, 1998. Beiträge zur Umweltforschung mittels radiometrisch-geochemischer Methoden. Forschungsbericht. In: Sächs. Akademie der Wiss. zu Leipzig, Jahrbuch 1995-1996: 94-105.
- A23. Weise, S.M., K. Bräuer, G. Strauch, H. Kämpf, U. Koch & J. Tesar, 1998. Seismically induced release of deep-seated fluids as tracer of fast transport up to surface in fractured rocks of the Bohemian Massif. *Hard Rock Hydrogeology of the Bohemian Massif*. 3rd Int. Workshop IHA. Windischeschenbach, Germany. Oct. 28-30, 1998. *Münchner Geol. Hefte*, B8: 183-184.
- A24. Koch, U. & J. Heinicke, 1999. Anomalieeffekte an der Radonquelle Bad Brambach vor dem Schwarmbeben vom Januar 1997 bei Novy Kostel (CZ) - ein Baustein für die seismohydrogeologischen Modellvorstellungen im Oberen Vogtland. Forschungsbericht des Vorhabens „Beiträge zur Umweltforschung mittels radiometrisch-geochemischer Methoden“. In: Sächs. Akademie der Wiss. zu Leipzig. Jahrbuch 1997-1998: 158-168.
- A25. Koch, U., 1999. Hydrologie, Radiometrie, Geochemie – Grundlagen für komplexe geophysikalische Interpretationen im Oberen Vogtland. In: Penzlin, H. (Hsg.), *Geschichte ausgewählter Arbeitsvorhaben*. Sächs. Akademie der Wiss. zu Leipzig. S. Hirzel Stuttgart /Leipzig: 3-24.
- A26. Koch, U. & J. Heinicke, 1999. 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.
- A27. Heinicke, J., F. Italiano, V. Lapenna, G. Martinelli, & P.M. Nuccio, 2000. Co-seismic geochemical variations in some gas emissions of Umbria Region (Central Italy). *Phys. Chem. Earth (A)* 25, 3: 289-293.
- A28. Heinicke J. & U. Koch, 2000. First results of hydrogeochemical measurements in the Soos area, Czech Republic. *Studia Geophysica et Geodetica*, 44: 590-593
- A29. Heinicke, J., 2000. Fluiduntersuchungen in seismisch aktiven Gebieten. Int. Büro des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Jahresbericht '99. Dt. Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: S. 57.
- A30. Heinicke, J. & U. Koch, 2000. Slug flow – a possible explanation for hydrogeochemical earthquake precursors at Bad Brambach, Germany. *Pure and Applied Geophysics*, 157, 10: 1621-1641.
- A31. 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: Sächs. Akademie der Wiss. zu Leipzig. Jahrbuch 1999-2001: 192-206.
- A32. Koch, U. & J. Heinicke, 2001. Die Bad-Brambacher Mineralquellen: Heilwasserschutz gestern – heute – morgen. In: Fritzsche, W. & L. Zerling (Hsg.) *Umwelt und Mensch – Langzeitwirkungen und Schlußfolgerungen für die Zukunft*. Abh. d. Sächs. Akademie d. Wiss. zu Leipzig 59, 5: 175-193.
- A33. 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.

- A34. Heinicke, J., U. Koch, H. Kaden & W. Oelßner, 2002. Seismizität im sächsischen Vogtland – Einsatz von CO<sub>2</sub>-Sensoren für geowissenschaftliche Untersuchungen. Akademie-Journal, H.1: 52-56.
- A35. Balasco, M., J. Heinicke, U. Koch, G. Martinelli & L. Telesca, 2002. Fractal analysis of the hourly time variability in self-potential and flow variations concomitantly measured in the Soos Nature Park (Czech Republic). *Fractals* 10, 4: 463-472.
- A36. Koch, U., J. Heinicke & M. Voßberg, 2003. Hydrogeological effects of the latest Vogtland-NW Bohemian swarmquake period (August to December 2000). *Journal of Geodynamics*, 35, 1-2: 107-123.
- A37. 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: Sächs. Akademie der Wiss. zu Leipzig. Jahrbuch 2001-2002: 265-277.
- A38. Koch, U. & J. Heinicke, 2003. Hydrogeologische Phänomene des Bad Brambacher Mineralwassersystems im Umfeld vogtländisch/NW-böhmischer Schwarmbeben. 1. Europa Kongress "Kurort & Umwelt", Bad Elster/Bad Brambach 13.-15.10.2003. Tagungsband.
- A39. Hebert, D., U. Koch & M. Voßberg, 2003. Isotopen- und Tracerstudien an der Wettin-Quelle, Bad Brambach. 1. Europa Kongress "Kurort & Umwelt", Bad Elster/Bad Brambach 13.-15.10.2003. Tagungsband.
- A40. Heinicke, J. & U. Koch, 2004. Neuinterpretation seismohydrologischer Anomalien im Schwarmbebengebiet Oberes Vogtland/NW-Böhmen. Tagung GeoLeipzig2004, 29. Sept - 1. Okt. 2004. Schriftenreihe der Dt. Geolog. Gesellschaft, H. 34: S. 149.
- A41. Bock, M., C. Flechsig, J. Heinicke & U. Koch, 2004. Geochemische und geoelektrische Untersuchungen im Nationalpark Sooser Moor (Schwarmbebengebiet Vogtland-NW-Böhmen) als Beitrag zur Charakterisierung der Aktivität von magmatischen Fluiden. Tagung GeoLeipzig 2004, 29. Sept - 1. Okt. 2004. Schriftenreihe der Dt. Geolog. Gesellschaft, H. 34: S. 326.
- A42. Koch, U. & J. Heinicke, 2004. SIGNALE: Fluide aus der Erdkruste. In: Katalog zur öffentlichen SAW-Ausstellung "Garten der Erkenntnis" im Landtag von Sachsen-Anhalt. Magdeburg, 27. Okt.-01. Dez. 2004. 6 S.
- A43. Heinicke, J., 2004. Fluiduntersuchungen im Schwarmbebengebiet Vogtland/NW Böhmen. In: Materialien zur Geologie – Erdbebenbeobachtungen im Freistaat Sachsen 2002-2003. Sächs. Landesamt für Umwelt und Geologie: 45-48.
- A44. Bräuer, K., H. Kämpf, E. Faber, U. Koch, H.-M. Nitzsche & G. Strauch, 2005. Seismically triggered microbial methane production relating to the Vogtland-NW Bohemia earthquake swarm period 2000, Central Europe. *Geochemical Journal*, 39, 5: 441-450.
- A45. Colangelo, G., J. Heinicke, U. Koch, V. Lapenna, G. Martinelli & L. Telesca, 2005. Results of gas flux records in the seismically active area of Val d'Agri (Southern Italy). *Annals of Geophysics* 48, 1: 55-63.
- A46. Gaupp, R., J. Heinicke & U. Koch, 2005. Forschungsbericht des Vorhabens „Beiträge zur Umweltforschung mittels radiometrisch-geochemischer Methoden“. In: Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig. Jahrbuch 2003-2004: 419-426.
- A47. Heinicke, J. & G. Martinelli, 2005. Preface: A historical overview. *Annals of Geophysics* 48, 1: V-VIII.
- A48. Koch, U., D. Hebert, M. Voßberg & J. Heinicke, 2005. Auswirkungen der Fassungssanierung der Wettinquelle, Bad Brambach, auf die Altersstruktur des Mineralwassers. *Grundwasser*, 10, 2: 102-113.
- A49. Yang T. F., F. Italiano & J. Heinicke, 2005. Special Issue: Recent Progress in Gas Geochemistry. Preface. *Geochemical Journal*, 39, 5: 395.

- A50. J. Heinicke, T. Braun, P. Burgassi, F. Italiano & G. Martinelli, 2006. Gas flow anomalies in seismogenic zones in the Upper Tiber Valley, Central Italy. *Geophysical Journal International*, 167: 794-806.
- A51. Wagner, C., M. Mau, M. Schlömann, J. Heinicke & U. Koch, 2007. Characterization of the bacterial flora in mineral waters in upstreaming fluids of deep igneous rock aquifer. *Journal of Geophysical Research*, 112, G01003, doi:10.1029/2005JG000105.
- A52. Bräuer, K., H. Kämpf, U. Koch, S. Niedermann & G. Strauch, 2007. Seismically induced changes of the fluid signature detected by a multi-isotope approach (He, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>) at the Wetztingerquelle, Bad Brambach (central Europe). *Journal of Geophysical Research*, 112, B04307, doi:10.1029/2006JB004404.
- A53. Colangelo, G., J. Heinicke, V. Lapenna, G. Martinelli, M. Mucciarelli & L. Telesca, 2007. Investigating correlations of local seismicity with geoelectrical, hydrogeological and geochemical anomalous signals jointly recorded in Basilicata Region (Southern Italy). *Annals of Geophysics*, 50, 4: 527-538.
- A54. Koch, U. & J. Heinicke, 2007. Hydrological influences on long-term gas flow trends at locations in the Vogtland/NW Bohemian seismic region (German-Czech border). *Annals of Geophysics*, 50, 4: 557-568.
- A55. Gaupp, R., J. Heinicke & U. Koch, 2007. Forschungsbericht des Vorhabens „Beiträge zur Umweltforschung mittels radiometrisch-geochemischer Methoden“. In: Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig. Jahrbuch 2005-2006: 302-306.
- A56. Koch, U., 2007. Seismohydrological station of the Saxon Academy of Sciences in Bad Brambach. In: *Geodynamics of Earthquake Swarm Areas. 8<sup>th</sup> West-Bohemia/Vogtland Intern. Workshop. Františkovy Lázně (Czech Republic), Oct. 16-19, 2007: G10-G12.*
- A57. Koch, U., Bräuer, K., Heinicke, J. & H. Kämpf, 2008. The gas flow at mineral springs and mofettes in the Vogtland/NW Bohemia: an enduring long-term increase. *Geofluids*, 8, 4: 274-285, doi:10.1111/j.1468-8123.2008.00230.x.
- A58. Heinicke, J., T. Fischer, R. Gaupp, J. Götze, U. Koch, H. Konietzky & K.-P. Stanek, 2009. Hydrothermal alteration as a trigger mechanism for earthquake swarms: the Vogtland/NW Bohemia region as a case study. *Geophysical Journal International* 178: 1-13. doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04138.x.
- A59. Heinicke, J., F. Italiano, R. Maugeri, B. Merkel, T. Pohl, M. Schipek & T. Braun, 2009. Evidence of tectonic control on active arc volcanism: the Panarea-Stromboli tectonic link inferred by submarine hydrothermal vents monitoring (Aeolian arc, Italy). *Geophysical Research Letters*, 36, L04301, doi:10.1029/2008GL036664.
- A60. Faber, E., J. Horálek, A. Boušková, M. Teschner, F. H. Weinlich, U. Koch & J. Poggenburg, 2009. Continuous gas monitoring in the West Bohemian earthquake area, Czech Republic: first results. *Studia Geophysica et Geodeatica* 53: 315-328.
- A61. Heinicke, J., F. Italiano, U. Koch, G. Martinelli & L. Telesca, 2010. Anomalous fluid emission of a deep borehole in a seismically active area of Northern Apennines (Italy). *Applied Geochemistry* 25: 555-571, doi:10.1016/j.apgeochem.2010.01.012.
- A62. U. Koch & J. Heinicke, 2010. Seismohydrological effects related to the NW Bohemia earthquake swarms of 2000 and 2008: Similarities and distinctions. *Journal of Geodynamics*. doi:10.1016/j.jog.2010.07.002.
- A63. Bräuer, K., H. Kämpf, U. Koch & G. Strauch, 2010. Monthly monitoring of the gas and isotope composition of the free gas phase at degassing locations close to the Nový Kostel focal zone in the western Eger rift, Czech Republic. *Eingereicht bei Chemical Geology*.
- A64. Heinicke, J., G. Martinelli & L. Telesca, 2010. Geodynamically induced variations in the CO<sub>2</sub>-gas emission of San Faustino (Central Apennines, Italy). *Eingereicht bei Geofluids*.

## **B) Vorträge und Poster**

- B1. Heinicke, J., U. Koch, K. Fröhlich & M. Krbetschek, 1991. Interpretation of radon anomalies in an area with microseismicity (Vogtland, Germany). Vortrag IAEA Vienna.
- B2. Koch, U. & J. Heinicke, 1991. Radon und vogtländische Mikrobeben: Ergebnisse der Registrierung zeitlicher Variationen. Vortrag, Deutsch-Tschechoslowakisches Seminar "Umweltradioaktivität", Mariánská (CSFR).
- B3. Heinicke, J. & U. Koch, 1992. Radonmessungen im Zusammenhang mit seismischen Ereignissen im Vogtland. Poster, 52. Jahrestagung der Dt. Geophys. Gesellschaft, Leipzig.
- B4. Koch, U. & J. Heinicke, 1993. Radon behaviour in mineral spring water of Bad Brambach (Vogtland, Germany) in temporal vicinity to the Roermond Earthquake, April 1992. Vortrag, Workshop 'The Roermond Earthquake of April 13, 1992', Veldhoven (NL).
- B5. Balderer, W., V. Cuomo, J. Heinicke, U. Koch, V. Lapenna, N. Leggeri & G. Martinelli, 1994. Siting operation in the test areas of Saxonia (Germany) and Basilicata (Southern Italy) for earthquake precursory phenomena researches. Poster. XXIV General Assembly of the European Seismological Commission, Athens (Greece).
- B6. Balderer, W., V. Cuomo, G. DiBello, J. Heinicke, U. Koch, V. Lapenna, G. Martinelli & V. Tramutoli, 1994. The joint monitoring of geochemical and geophysical precursory parameters in a selected test site of Southern Italy: Preliminary results. Poster. XXIV General Assembly of the European Seismological Commission, Athens (Greece).
- B7. Heinicke, J., U. Koch & G. Martinelli, 1994. Carbon dioxide - a possible information carrier for earthquake precursory phenomena. Poster. 27<sup>th</sup> IASPEI Assembly Wellington (New Zealand).
- B8. Heinicke, J., U. Koch & G. Martinelli, 1995. Radon and CO<sub>2</sub> measurements to earthquake prediction research: Status report and model conception about the Bad Brambach location (Germany). Vortrag. 3<sup>rd</sup> Int. Coll. on Rare Gas Geochemistry, Dec. 10-14, 1995. Amritsar (India).
- B9. Coumo, V., G. Di Bello, J. Heinicke, U. Koch, V. Lapenna, G. Martinelli, S. Piscitelli & M. Ragosta, 1996. Time series analysis of geophysical and geochemical data jointly monitored in a seismic area of Southern Apennines (Italy). Poster. XXV General Assembly of European Seismol. Commission (ESC). Sept. 9-14, 1996. Reykjavík (Iceland).
- B10. Heinicke, J. & U. Koch, 1996. Langzeitmessungen an Fluiden im Vogtland – ein Beitrag zur Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Erdbebenvorhersage. Poster. Jahrestagung der Dt. Geophys. Ges., Freiberg.
- B11. Heinicke, J. & U. Koch, 1996. Radonmessungen zur Erdbebenvorhersage - ein Beispiel für die Nutzung der natürlichen Radioaktivität in den Geowissenschaften. Poster. Symp. "100 Jahre Radioaktivität", Freiberg.
- B12. Koch, U. & J. Heinicke, 1996. Earthquake prediction research by radiometric-geochemical methods in the Vogtland - NW Bohemian region: New results and aspects. Vortrag. XXV General Assembly of European Seismol. Commission (ESC). Sept. 9-14, 1996. Reykjavík (Iceland).
- B13. Koch, U. & J. Heinicke, 1996. Results of geochemical monitoring around Bad Brambach and their relation to local earthquakes. Vortrag. 4<sup>th</sup> Meeting of the NW-Bohemia/Vogtland/NE-Bavaria Working Group. Oct. 9-11, 1996. Ostroh (Czech Republic).
- B14. Cuomo, V., G. DiBello, J. Heinicke, U. Koch, V. Lapenna, S. Piscitelli & G. Martinelli, 1997. Geophysical and geochemical parameters jointly monitored in a seismic area of Southern Apennines (Italy). Vortrag. XXII General Ass. of European Geoph. Soc. Vienna, April 21-25, 1997.

- B15. Heinicke, J. & U. Koch, 1997. An improved model for the interpretation of geochemical precursor phenomena at the Vogtland-NW Bohemian swarmquake region. Vortrag. XXII General Ass. of European Geoph. Soc. Vienna, April 21-25, 1997.
- B16. Koch, U. & J. Heinicke, 1997. The precursor effects in the mineral spring 'Radonquelle', Bad Brambach prior to the January 14-19, 1997 earthquake swarm near Novy Kostel (NW Bohemia). Vortrag. 4<sup>th</sup> Int. Conference Rare Gas Geochemistry. Roma, Oct. 8-10, 1997.
- B17. Streil, T., J. Heinicke, U. Koch, V. Oeser & J. Wiegand, 1997. EPOS1 - A multiparameter measuring system to earthquake prediction research. Poster. 4th Int. Conference Rare Gas Geochemistry. Roma, Oct. 8-10, 1997.
- B18. Bräuer, K., H. Kämpf, G. Strauch, S.M. Weise & U. Koch, 1999. 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. Poster. Workshop Seismic Processes and Associated Phenomena in West Bohemia and in the Vogtland, Teplá (CZ), Oct. 13-15.
- B19. Heinicke, J. & U. Koch, 1999. The monitoring network of the Saxon Academy of Sciences at Leipzig. Poster. Workshop Seismic Processes and Associated Phenomena in West Bohemia and in the Vogtland, Teplá (CZ), Oct. 13-15.
- B20. Meißgeyer, M., U. Koch & Th. Daffner, 1999. Sanierung der Radonquelle zu Bad Brambach: Aufbau und Betrieb eines entscheidungsorientierten Monitoring. Poster. 7. Dresdner Grundwasser-Forschungstage des DGFZ e.V., Dresden 27.-28. Sept. 1999.
- B21. Koch, U. & J. Heinicke, 2000. Die Bad Brambacher Mineralquellen: Heilwasserschutz gestern – heute – morgen. Sächs. Akademie der Wiss. zu Leipzig. Symposium Umwelt und Mensch. Leipzig 20.-22. März 2000.
- B22. Koch, U., 2000. Zusammenhänge zwischen seismischen Ereignissen in der Region Vogtland – NW-Böhmen und dem Fluidverhalten Bad Brambacher Mineralquellen. Frühjahrstagung AG Naturwissenschaft und Technik i. d. Vereinigung für Bäder- und Klimakunde. Bad Elster, 18.-21. Mai 2000 (incl. Exkursionsführung).
- B23. Koch, U., 2000. Zusammenhänge zwischen seismischen Ereignissen in der Region Vogtland – NW-Böhmen und dem Fluidverhalten. Vortrag. Absolventen-Workshop Lehrstuhl Hydrogeologie, TU Bergakademie Freiberg. Freiberg, 26.-27. Mai 2000.
- B24. Heinicke, J. & U. Koch, 2000. Fluid emission in the Vogtland/NW Bohemia region and their relation to the local seismic activity. Vortrag. Geophysikalisches Institut der Akademie der Wissenschaften der Tschechischen Republik. Prag, 21.11.2000.
- B25. Koch, U., 2000. Schwarmbeben im Vogtland und in NW-Böhmen: Hydrologische und hydrochemische Effekte an Mineralquellen. Vortrag. Freundeskreis Diesterweg-Gymnasium Plauen e.V., Plauen 24. Nov. 2000.
- B26. Bräuer, K., U. Koch, G. Strauch, J. Tesař & S.M. Weise, 2001. Isotopic and chemical composition of minor components in highly pure natural CO<sub>2</sub> gases – Issues to its determination. Poster Jülich.
- B27. Heinicke, J. & U. Koch, 2001. Precursor phenomena due to an increased gas emission of deep originated CO<sub>2</sub>. Vortrag. European Geophysical Society. XXVI General Assembly, Nice, March 25-30, 2001.
- B28. Koch, U., J. Heinicke & M. Voßberg, 2001. Hydrogeological pre- and co-seismic effects of the latest Vogtland-NW Bohemian swarmquake period (August to December 2000). Vortrag. European Geophysical Society. XXVI General Assembly, Nice, March 25-30, 2001.
- B29. Koch, U., 2001. Hydrogeologische Grundlagen der Bad Brambacher Heilquellen. Vortrag Herbsttagung der ARGE Europäischer Radonheilbäder. Bad Brambach 5.-6. Sept. 2001.
- B30. Bräuer, K., H. Kämpf, E. Faber, J. Heinicke, U. Koch, G. Strauch & S.M. Weise, 2002. Geochemical fluid-monitoring results in relation to the NW Bohemian earthquake swarm period 2000. Vortrag. European Geophysical Society. XXVII General Assembly, Nice, April 21-24, 2002.

- B31. Bräuer, K., H. Kämpf, U. Koch, S. Niedermann, G. Strauch, J. Tesař & S.M. Weise, 2002. 1992 to 2002 – Fluid research in the Vogtland and NW Bohemia area. Poster. Int. Workshop on geophysical studies in the West-Bohemia and Vogtland swarm earthquake region. Oct. 6-8, 2002. Bucha (Germany).
- B32. Kämpf, H., H. Bräuer, P. Dulski, E. Faber, U. Koch, J. Mrlina, G. Strauch, G. & S.M. Weise, 2003. Hydrochemical monitoring results in relation to the Vogtland-NW Bohemian earthquake swarm period 2000. Vortrag. EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, April 06-11, 2003.
- B33. Koch, U., D. Hebert, M. Voßberg & J. Heinicke, 2003. Mineral water age structure of the spring 'Wetтинquelle', 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, June 2003.
- B34. Bräuer, K., H. Kämpf, U. Koch, G. Strauch, F. H. Weinlich, & S. M. Weise, 2003. 10 years fluid research in the Vogtland and NW Bohemian area, Central Europe. Poster. 7<sup>th</sup> Intern. Conference on Gas Geochemistry Freiberg, Sept. 22-26, 2003.
- B35. Colangelo, G., J. Heinicke, U. Koch, V. Lapenna, G. Martinelli, & L. Telesca, 2003. Fluid measurements in the seismically active region of Val d'Agri (South Italy). Vortrag. 7<sup>th</sup> Intern. Conference on Gas Geochemistry Freiberg, Sept. 22-26, 2003.
- B36. Faber, E., J. Poggenburg, M. Teschner, F. H. Weinlich, U. Koch, & T. Streil, 2003. Continuous gas monitoring of spring and soil gases as a tool for detecting pre- and co-seismic geochemical phenomena. Vortrag. 7<sup>th</sup> Intern. Conference on Gas Geochemistry Freiberg, Sept. 22-26, 2003.
- B37. 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, Sept. 22-26, 2003.
- B38. Kämpf, H., K. Bräuer, E. Faber, U. Koch, J. Mrlina, G. Strauch & S.M. Weise, 2003. Gas monitoring results at the Wettingquelle in relation to the Vogtland-NW Bohemian earthquake swarm period 2000. Poster. 7<sup>th</sup> Intern. Conference on Gas Geochemistry Freiberg, Sept. 22-26, 2003.
- B39. Koch, U., D. Hebert, M. Voßberg & J. Heinicke, 2003. Mineral water age structure of the spring 'Wetтинquelle', Bad Brambach (Germany): Tritium and electric conductivity results. Poster. 7<sup>th</sup> Intern. Conference on Gas Geochemistry Freiberg, Sept. 22-26, 2003.
- B40. Wagner, C., M. Mau, J. Heinicke, M. Schlömann & U. Koch, 2003. Bacterial flora in mineral waters influenced by mantle fluids. Poster. 7<sup>th</sup> Intern. Conference on Gas Geochemistry Freiberg, Sept. 22-26, 2003.
- B41. Koch, U. & J. Heinicke, 2003. Hydrogeologische Phänomene des Bad Brambacher Mineralwassersystems im Umfeld vogtländisch/NW-böhmischer Schwarmbeben. Vortrag. 1. Europa Kongress "Kurort & Umwelt", Bad Elster/Bad Brambach 13.-15.10.2003.
- B42. Hebert, D., U. Koch & M. Voßberg, 2003. Isotopen- und Tracerstudien an der Wetтинquelle, Bad Brambach. Vortrag. 1. Europa Kongress "Kurort & Umwelt", Bad Elster/Bad Brambach 13.-15.10.2003.
- B43. Heinicke, J. & U. Koch, 2004. Fluide aus der Erdkruste – können sie uns bei der Erdbebenvorhersage helfen? Vortrag und Videopräsentation. GEOKINO in Zusammenarbeit mit dem Naturpark Bergstraße-Odenwald. "Die Insel" Kommunales Kino Biblis e.V., 17. März 2004.
- B44. Colangelo, G., J. Heinicke, U. Koch, V. Lapenna & L. Telesca, 2004. Geophysical and geochemical measurements in a seismically active region of Southern Italy. Vortrag IV. Intern. Workshop on Magnetic, Electric and Electromagnetic Methods in Seismology and Volcanology (MEEMSV). La Londe les Maures (France), Sept. 5-9, 2004.

- B45. Heinicke, J., G. Martinelli, T. Braun, N. Ciancabilla & U. Koch, 2004. Geodynamically induced gas flux changes in northern Apennines (Italy). Poster. XXIX ESC Conference, Potsdam, Sept. 12-17, 2004.
- B46. Bräuer, K., H. Kämpf, U. Koch, S. Niedermann, G. Strauch & S.M. Weise, 2004. Fluide und Seismizität – Variationen in der Helium- und Kohlenstoffisotopie. Vortrag. DFG–Rundgespräch "Physikalisch/Chemische Zustände und Geodynamische Prozesse im Schwarmbebengebiet Vogtland/NW-Böhmen". Bochum, 27. Sept. 2004.
- B47. Heinicke, J. & U. Koch, 2004. Derzeitiger Stand der Fluiduntersuchungen in Bad Brambach/Soos. Vortrag. DFG–Rundgespräch "Physikalisch/Chemische Zustände und Geodynamische Prozesse im Schwarmbebengebiet Vogtland/NW-Böhmen". Bochum, 27. Sept. 2004.
- B48. Bräuer, K., H. Kämpf, U. Koch, S. Niedermann, G. Strauch & S.M. Weise, 2004. Upper mantle derived fluids and seismicity in NW Bohemia: helium and carbon isotope systematics. Vortrag. ICDP-Workshop Býkov (CZ), Oct. 3-7, 2004.
- B49. Kämpf, H., K. Bräuer, P. Dulski, E. Faber, U. Koch, M. Mau & G. Strauch, 2004. Variations in the gas composition, the  $\delta^{13}\text{C}$  of methane and the Fe concentration at the Wettinquelle mineral spring, Bad Brambach (Germany): interaction between earthquake swarm processes, fluids and micro-biological activity. Vortrag. ICDP-Workshop Býkov (CZ), Oct. 3-7, 2004.
- B50. M. Mau, C. Wagner, J. Heinicke, U. Koch & M. Schlömann, 2004. Microbial diversity in water from the mineral spring Wettinquelle, Bad Brambach – Lessons for Deep Biosphere? Vortrag. ICDP-Workshop Býkov (CZ), Oct. 3-7, 2004.
- B51. Koch, U. & J. Heinicke, 2005. Die Bad Brambacher Naturschätze aus seismohydrologischer Sicht. Vortrag. Herbsttagung der ARGE Europäischer Radonheilbäder. Bad Brambach, 1.-2. September 2005.
- B52. Bräuer, K., H. Kämpf, U. Koch, S. Niedermann & G. Strauch, 2005. Isotopic evidence of fluid-triggered intraplate seismicity in NW Bohemia. Vortrag. 8<sup>th</sup> Intern. Conference on Gas Geochemistry. Palermo and Milazzo (Italy), Oct. 2-8, 2005.
- B53. Caracausi, A., G. Colangelo, M. Ditta, J. Heinicke, F. Italiano, V. Lapenna, G. Martinelli & L. Telesca, 2005. Geochemical monitoring of earthquake related fluids in Italy: a possible national geochemical network to better constrain the seismogenic sources. Poster. 8<sup>th</sup> Intern. Conference on Gas Geochemistry. Palermo and Milazzo (Italy), Oct. 2-8, 2005.
- B54. Colangelo, G., J. Heinicke, U. Koch, V. Lapenna & G. Martinelli, 2005. Geodynamically influenced fluid migration near the mofettes of Mefite d'Ansanto (Southern Italy). Poster. 8<sup>th</sup> Intern. Conference on Gas Geochemistry. Palermo and Milazzo (Italy), Oct. 2-8, 2005.
- B55. Colangelo, G., J. Heinicke, U. Koch, V. Lapenna, G. Martinelli, M. Mucciarelli & L. Telesca, 2005. Investigating correlations of local seismicity with geochemical and geoelectrical anomalous signals jointly recorded in Basilicata Region (Southern Italy). Vortrag. 8<sup>th</sup> Intern. Conference on Gas Geochemistry. Palermo and Milazzo (Italy), Oct. 2-8, 2005.
- B56. Heinicke, J., Th. Braun, F. Italiano, G. Martinelli & U. Koch, 2005. Seismogenic-influenced fluid transport on low angle faults to the mofettes of Caprese Michelangelo (Northern Apennines). Vortrag. 8<sup>th</sup> Intern. Conference on Gas Geochemistry. Palermo and Milazzo (Italy), Oct. 2-8, 2005.
- B57. Koch, U. & J. Heinicke, 2005. Hydrological influences on long-term gas flow trends at locations in the Vogtland/NW Bohemian seismic region. Vortrag. 8<sup>th</sup> Intern. Conference on Gas Geochemistry. Palermo and Milazzo (Italy), Oct. 2-8, 2005.
- B58. Heinicke, J., M. Apel, U. Koch & G. Martinelli, 2006. GIS-Einsatz in der Erdbebenforschung: neue Studien zum Einfluss von Luftdruckänderungen. Vortrag Kolloquium 3. 57. Berg- und Hüttenmännischer Tag Freiberg, Juni 2006.
- B59. Koch, U., D. Hebert, M. Voßberg & J. Heinicke, 2006. Auswirkungen der Fassungs-sanierung der Wettinquelle, Bad Brambach, auf die Altersstruktur des Mineralwassers.

- Poster. Symposium Analyse und Modellierung der Niederschlags-Abfluss-Prozesse (SYNAP). Dresden, 05.-06. Oktober 2006.
- B60. Koch, U. & J. Heinicke, 2006. Langzeit-Trends des Gasflusses an Mineralquellen und Mofetten in der Schwarmbebenregion Vogtland/NW-Böhmen. Vortrag. Kooperationsberatung GFZ Potsdam, 01. Dez. 2006.
- B61. Pfanz, H., K. Heide, L. Viereck-Götte, F. Saßmannshausen, C. Schmidt, D. Müller, U. Koch & G. Büchel, 2007. Plant based detection of dry mofettes – an example from the volcanic Laacher See district, Germany. Poster. EGU General Assembly Vienna, April 24-29, 2007.
- B62. Görlitz, P., J. Heinicke, F. Italiano, R. Maugeri, B. Merkel, M. Schipek & T. Pohl, 2007. Submarine gas flow monitoring at Panarea volcano, Italy. Poster. 9<sup>th</sup> Intern. Conference on Gas Geochemistry, Taipei (Taiwan), Oct. 1-8, 2007.
- B63. Heinicke, J., G. Martinelli & L. Telesca, 2007. A 1000 m water well as a test monitoring system for the detection of possible earthquake related anomalies in fluids. Vortrag. 9<sup>th</sup> Intern. Conference on Gas Geochemistry, Taipei (Taiwan), Oct. 1-8, 2007.
- B64. Koch, U., J. Heinicke, K. Bräuer & H. Kämpf, 2007. The gas flow at mineral springs and mofettes in the Vogtland/NW Bohemia: An enduring long-term uptrend. Vortrag. 9<sup>th</sup> Intern. Conference on Gas Geochemistry, Taipei (Taiwan), Oct. 1-8, 2007.
- B65. Pfanz, H., F. Saßmannshausen, K. Heide, L. Viereck-Götte, G. Büchel & U. Koch, 2007. Plant based detection of dry mofettes – an example from the volcanic Laacher See district, Germany. Poster. 9<sup>th</sup> Intern. Conference on Gas Geochemistry, Taipei (Taiwan), Oct. 1-8, 2007.
- B66. Faber, E., J. Horálek, A. Boušková, M. Teschner, F. Weinlich, U. Koch & J. Poggenburg, 2007. Continuous gas monitoring in West Bohemia, Czech Republic, and the Vogtland, Germany. Vortrag. 8<sup>th</sup> West-Bohemia/Vogtland Intern. Workshop. Františkovy Lázně (Czech Republic), Oct. 16-19, 2007.
- B67. Heinicke, J., T. Fischer, R. Gaupp, J. Götze, U. Koch, H. Konietzky & K. Stanek, 2007. Hydrothermal alteration by H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-rich fluids as a trigger mechanism for earthquake swarms: The Vogtland/NW-Bohemia region as case study. Poster. 8<sup>th</sup> West-Bohemia/Vogtland Intern. Workshop. Františkovy Lázně (Czech Republic), Oct. 16-19, 2007.
- B68. Heinicke, J., F. Italiano, R. Maugeri, P. Görlitz, B. Merkel, M. Schipek & T. Pohl, 2007. Submarine gas flow monitoring at Panarea, Italy. Poster. 8<sup>th</sup> West-Bohemia/Vogtland Intern. Workshop. Františkovy Lázně (Czech Republic), Oct. 16-19, 2007.
- B69. Koch, U., J. Heinicke, K. Bräuer & H. Kämpf, 2007. Long-term gas flow uptrend at mineral springs and mofettes in the Vogtland/NW Bohemia. Vortrag. 8<sup>th</sup> West-Bohemia/Vogtland Intern. Workshop, Františkovy Lázně (Czech Republic), Oct. 16-19, 2007.
- B70. Woith, H., G. Martinelli, J. Heinicke & H. Surbeck, 2008. Radon precursors to earthquakes: a search for physical mechanisms. Vortrag. EGU General Assembly, Vienna, 2008.
- B71. Bonfanti, P., A. Dadomo, J. Heinicke, F. Italiano, G. Martinelli, R. Maugeri, & S. Pizzullo, 2009. Fluids geochemistry characterization and monitoring in the April 6, 2009 Mw=6.2 central Italy earthquake. Vortrag. 10<sup>th</sup> Intern. Conference on Gas Geochemistry, Cluj-Napoca (Romania), Sept. 14-21, 2009.
- B72. Cheng, C.-Y., J. Heinicke, T. F. Yang, C.-C. Fu, W.-L. Hong & L.-T. Tong, 2009. Emission flux of CO<sub>2</sub> through an active fault zone and estimation of CO<sub>2</sub> reservoir in SW Taiwan. Vortrag. 10<sup>th</sup> Intern. Conference on Gas Geochemistry, Cluj-Napoca (Romania), Sept. 14-21, 2009.
- B73. Koch, U. & J. Heinicke, 2009. Seismohydrological effects related to the NW Bohemia earthquake swarms of 2000 and 2008: Similarities and distinctions. Vortrag. 10<sup>th</sup> Intern. Conference on Gas Geochemistry, Cluj-Napoca (Romania), Sept. 14-21, 2009.

- B74. Faber, E., J. Horálek, A. Boušková, M. Teschner, U. Koch & J. Poggenburg, 2009. Continuous Gas Monitoring in the West Bohemian earthquake area, Czech Republic. Poster. 161. Jahrestagung Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften, Dresden, 30. Sept.-02. Okt. 2009.
- B75. Yang, T. F., J. Heinicke, T. K. Liu, C. C. Fu, V. Walia & C. S. Hou, 2010. Precursory variations of gas flux and water level from an active mud volcano in SW Taiwan. Vortrag. EGU General Assembly, Vienna, May 2-7, 2010.
- B76. Yang, T. F., J. Heinicke, T. K. Liu, C. C. Fu, V. Walia & C. S. Hou, 2010. Precursory variations of gas flux and water level from an active mud volcano in SW Taiwan. Geophysical Research Abstracts, Vol. 12. EGU General Assembly, Vienna, May 2-7, 2010.
- B77. Heinicke, J., F. Italiano, R. Maugeri, B. Merkel, T. Pohl & M. Schipek, 2010. Long-term submarine gas flow continuous monitoring at Panarea (Aeolian Islands, Italy): preliminary results of the September 2008 – September 2010 monitoring period. Poster. Conference on Shallow Water Research, Palermo, Oct. 3-5, 2010.
- B78. Yang, T. F., J. Heinicke, T. K. Liu, C. C. Fu, V. Walia & C. S. Hou, 2010. Indications of anomalous fluid emissions at Chung-Lun station (SW Taiwan) before seismic events. Vortrag. Western Pacific Geophysics Meeting. AGU Taipei, June 22-25, 2010.

**C) Projekte, Gutachten, Konzeptionen (seit 2000)**

- C1. Lang, B., L. Michaeli, U. Kafri & J. Heinicke, 2000. Monitoring of radon and other physical and chemical parameters in En Sahina and Tiberias Spa Springs (Northern Israel). The Ministry of National Infrastructures. Geol. Survey of Israel. TR-GSI/4/2000. 12 S., 41 Abb.
- C2. Koch, U., 2000. Gutachten zum Zwischenbericht für das INTERREG II-Projekt „Grenzüberschreitender Schutz der Heil- und Mineralquellen im Vogtland in Sachsen und Westböhmen“. Bearbeitung: Umweltbüro GmbH Vogtland Weischlitz. Auftraggeber: Landratsamt des Vogtlandkreises.
- C3. Bräuer, K., J. Heinicke, H. Kämpf, U. Koch & G. Strauch, 2001. Fluiduntersuchungen im Schwarmbebengebiet Vogtland/NW Böhmen – Hydrologische, geochemische und isotopische Änderungen an der Gas- und Wasserphase. Arbeitsbericht zu dem DFG-Projekt HE2177/7-1, KA902/7-1 und STR376/6-1. 49 p.
- C4. Schlömann, M., J. Heinicke & M. Mau, 2004. Investigation of the impact of seismotectonic processes on the microbial community structure in water of a mineral spring in the earthquake area Vogtland/NW-Bohemia. DFG-Projektantrag SCHL284/9-1.
- C5. Koch, U., 2007. Stellungnahme zur Datengewinnung für die seismohydrologische Grundlagenforschung während des Abteufens und nach der Fertigstellung der geplanten 1200-m-Thermalwasserbohrung in Bad Elster. Bad Brambach, April 2007 (unveröffentlicht).
- C6. Koch, U., C. Flechsig & E. Faber, 2007. CO<sub>2</sub>-induced geophysical processes on the earth's surface and their geodynamic background. Teilprojekt innerhalb der geplanten DFG-Forschergruppe "Active CO<sub>2</sub>-related processes in the continental lithosphere of West Saxonia/NW Bohemia and the Eifel" (Koordinator: G. Jentzsch, Jena).
- C7. Heinicke, J., 2009. MOLE-Caprese Michelangelo (MOLE-CAMI): A fault stressing experiment at 4 km depth of the Alto Tiberina Low Angle Normal Fault, Italy. DFG-ICDP-Projektantrag. Eingereicht August 2009.
- C8. Koch, U., 2009. Einsatz der Seismohydrologie zur Erdbebenprognose im Vogtland. Projektentwurf für ein seismohydrologisches Monitoring im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Landwirtschaft, Umwelt und Geologie (LfLUG). Eingereicht beim LfLUG am 25.09.2009.

**D) Öffentlichkeitsarbeit, Exkursionen, Lehre (seit 2000)**

- D1. Rätsel um Erdbeben im Vogtland: Bevor in Böhmen die Erde rumort, spielt eine Quelle in Bad Brambach verrückt (2002). Reportage über die SAW-Arbeitsstelle Bad Brambach. Freie Presse Chemnitz, 05.04.2002. Lokalseite A6, Oberes Vogtland.
- D2. Heinicke, J. & U. Koch 2002. Fluide aus der Erdkruste – können sie uns bei der Erdbebenvorhersage helfen? Video in Zusammenarbeit mit der TU BA Freiberg zum "Jahr der Geowissenschaften 2002". Premiere: 06. Juni 2002 in Köln. Dauer 40 min.
- D3. Koch, U., 2003. Die Bad Brambacher Mineralquellen: Gemeinsamkeiten und Besonderheiten *und* The Bad Brambach mineral springs: Common and special properties. Deutscher und Englischer Text eines Faltblattes für Kurpatienten und Gäste der Sächsischen Staatsbäder GmbH.
- D4. Organisation und Durchführung der 7<sup>th</sup> International Conference on Gas Geochemistry, Freiberg, 22.-26. September 2003. In diesem Rahmen: u.a. ein öffentlicher wissenschaftlicher Vortrags- und Filmabend.
- D5. Koch, U. & J. Heinicke, 2004. Die Bad Brambacher Mineralquellen: Hydrogeologie, Genese und seismohydrologische Besonderheiten. Vortrag. 27. Sitzung des Arbeitskreises "Natürliche Radioaktivität" im Fachverband für Strahlenschutz e.V., Bad Brambach, 6.-7. Mai 2004. ([www.fs-ev.de/fs-ev/deutsch/akext/aknat\\_dokumente/aknat\\_unveroeffentlichte\\_arbeiten](http://www.fs-ev.de/fs-ev/deutsch/akext/aknat_dokumente/aknat_unveroeffentlichte_arbeiten)).
- D6. Koch, U., 2004. Die Wetтинquelle begründet Brambachs Bedeutung als Kurbad. Vortrag. Festveranstaltung "850 Jahre Bad Brambach". Bad Brambach, 31. Juli 2004.
- D7. Koch, U., 2004. Mineralquellen und Schwarmbeben. Vortrag. Festveranstaltung "850 Jahre Bad Brambach". Bad Brambach, 31. Juli 2004.
- D8. Koch, U. & J. Heinicke, 2004. SIGNALE: Fluide aus der Erdkruste. Ausstellungsmodul über das Forschungsvorhaben "Radiometrie – Geochemie" im Rahmen der öffentlichen SAW-Ausstellung im Landtag von Sachsen-Anhalt. Magdeburg, 27. Okt.- 01. Dez. 2004.
- D9. Koch, U. & J. Heinicke, 2005-2006. Leitung von insgesamt 4 Exkursionen zum Thema Heilquellen Bad Brambach bzw. Seismohydrologisches Monitoring in Bad Brambach und in Soos (CZ).
- D10. Koch, U., 2006. Mitwirkung beim Geologischen Geländepraktikum der Universität Jena. Laacher See (Eifel), Juli 2006.
- D11. Koch, U. & J. Heinicke, 2007-2008. Leitung von insgesamt 3 Exkursionen zum Thema Heilquellen Bad Brambach bzw. Seismohydrologisches Monitoring in Bad Brambach und in Soos (CZ).
- D12. Koch, U., 2007. Bad Brambach: Radon und CO<sub>2</sub> in Badebetrieb und Forschung. Interview mit Masami Ono-Feller. In: Doitsu Onsen Meguri (Bäderstädte Deutschlands), Dai 6-Kai (Nr. 6), Bad Brambach / Bad Elster. NHK Rajio Doitsugo Kohza 57-6, 9: 129-131. Begleitheft zum NHK Radio Deutschkurs 9/2007 (in Japanisch).
- D13. Sprudeln die Quellen stärker, kündigt sich ein Beben an (2009). Reportage von Gabi Gleißberg. Freie Presse Chemnitz, 31.07.2009, Lokalseite Oberes Vogtland.
- D14. Erdbebenforschung in der Region droht das Aus (2010). Reportage von Gabi Gleißberg. Freie Presse Chemnitz, 06.08.2010, Lokalseite Oberes Vogtland.
- D15. Interview mit MDR-Info (2009). Ergebnisse und Umstände der Beendigung des SAW-Forschungsprojektes "Seismohydrologie" in Bad Brambach, 16.08.2010.
- D16. Koch, U. & J. Heinicke, 2009-2010. Leitung von insgesamt 3 Exkursionen zum Thema Heilquellen Bad Brambach bzw. Seismohydrologisches Monitoring in Bad Brambach und in Soos (CZ).