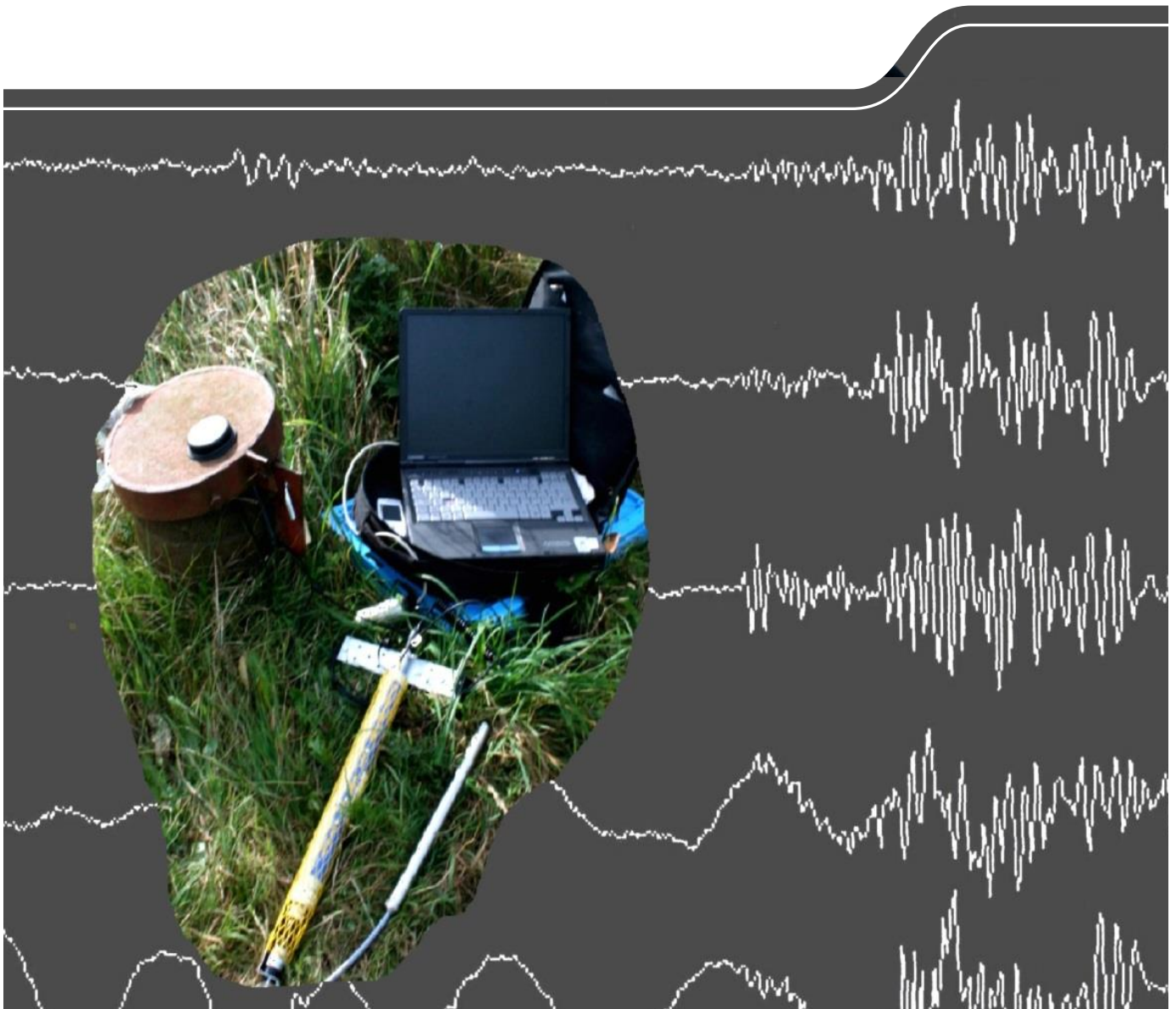


# Seismohydrologie im Vogtland



# Einsatz der Seismohydrologie zur Erdbebenprognose im Vogtland

Dr. Ulrich Koch

Projektbegleitende Kommission:

Prof. Dr. Reinhard Gaupp (Friedrich-Schiller-Universität Jena)

Dr. Jens Heinicke (Dresden)

Prof. Dr. Horst Hennig, Prof. Dr. Jörg Kärger, Prof. Dr. Dieter Michel (Universität Leipzig)

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Zielstellung .....</b>  | <b>6</b>  |
| <b>2</b> | <b>Wissenschaftlicher Kenntnisstand .....</b>  | <b>6</b>  |
| 2.1      | Allgemeines .....  | 6         |
| 2.2      | Zusammenfassung des Forschungsstandes .....  | 7         |
| <b>3</b> | <b>Das seismohydrologische Messnetz .....</b>  | <b>9</b>  |
| 3.1      | Standorte und Messmethoden in Bad Brambach .....   | 9         |
| 3.1.1    | Multiparameterstation Wetтинquelle .....   | 10        |
| 3.1.2    | Gasflussmessungen an Eisen- und Schillerquelle .....                                     | 13        |
| 3.1.3    | Hydrostatische Druckmessungen an Bad Brambacher Grundwasserpegeln .....                  | 14        |
| 3.2      | Das erweiterte seismohydrologische Messnetz .....  | 17        |
| 3.2.1    | Standorte .....  | 17        |
| 3.2.2    | Messtechnik, Installation .....  | 19        |
| 3.2.3    | Installation der Datenfernübertragungsmodule .....                                       | 22        |
| 3.2.3.1  | Technik .....  | 22        |
| 3.2.3.2  | Besonderheiten an den Standorten des erweiterten Messnetzes .....                        | 23        |
| <b>4</b> | <b>Seismische und hydrologische Situation im Untersuchungsgebiet 2012 und 2013 .....</b> | <b>25</b> |
| 4.1      | Seismizität .....  | 25        |
| 4.2      | Hydrologie und Grundwasserstände .....   | 26        |
| <b>5</b> | <b>Messergebnisse .....</b>  | <b>27</b> |
| 5.1      | Bad Brambach (Pegel VL4T und GW1) .....  | 27        |
| 5.2      | Das erweiterte Grundwassermessnetz .....   | 30        |
| 5.2.1    | Brunnen Rohrbach 1 (RO1) .....   | 30        |
| 5.2.2    | Pegel Gürth (GUE) .....  | 31        |
| 5.2.3    | Vorfeldbohrung Bad Elster (BE_VOR) .....   | 33        |
| 5.2.4    | Brunnen Hennebach (HEB) .....  | 35        |
| 5.2.5    | Thermalsolebohrung Bad Elster (BE_TSB) .....   | 36        |
| 5.2.6    | Grundwassertemperaturen .....  | 37        |
| 5.3      | Seismohydrologische Eignung der Messstellen .....  | 38        |
| <b>6</b> | <b>Langzeittrend des Gasflusses an Quellen von Bad Brambach .....</b>                    | <b>41</b> |
| <b>7</b> | <b>Zusammenfassung und Perspektiven .....</b>  | <b>43</b> |
| <b>8</b> | <b>Literaturverzeichnis .....</b>  | <b>45</b> |

## Abbildungsverzeichnis

|               |  |    |
|---------------|--|----|
| Abbildung 1:  | Erdbeben-Epizentren im Vogtland/NW-Böhmen .....  | 7  |
| Abbildung 2:  | Kurpark von Bad Brambach mit seismohydrologischen Messstationen .....  | 10 |
| Abbildung 3:  | Keller der Wetтинquelle (Bad Brambach) mit Quelfassung und seismohydrologischer<br>Multiparameterstation .....   | 11 |
| Abbildung 4:  | Druckanomalien in der Quelfassung der Wetтинquelle Bad Brambach vor den Schwarmbeben<br>2000 und 2008 .....  | 11 |
| Abbildung 5:  | Gasflussmessstationen an den Quelfassungen von Eisen- (links) und Schillerquelle (rechts).....   | 12 |
| Abbildung 6:  | Gasfluss-Fluktuationen in der Eisenquelle (Bad Brambach) zwischen dem 8. und 28. März 2011 .....   | 13 |
| Abbildung 7:  | Grundwasserpegel im Kurpark von Bad Brambach mit Drucksonden.....  | 16 |
| Abbildung 8:  | Differenzkurven des Grundwasserstandes 2000 und 2008 zwischen Pegel VL4T und GW1 im<br>Kurpark von Bad Brambach .....  | 16 |
| Abbildung 9:  | Erweitertes Grundwassermessnetz für seismohydrologisches Monitoring.....   | 18 |
| Abbildung 10: | Standorte für das erweiterte seismohydrologische Messnetz .....  | 20 |
| Abbildung 11: | SEBA-SlimCom-Modul für die Datenfernübertragung als Nachrüstsatz zum p/T-Dipper T3 .....   | 23 |
| Abbildung 12: | Grundwassermessstelle Pegel Gürth (GUE).....   | 25 |
| Abbildung 13: | Grundwasserstands anomalie am Pegel VL4T, Kurpark Bad Brambach .....   | 28 |
| Abbildung 14: | Grundwasserstände an der 200-m-Bohrung im Bad Brambacher Kurpark mit Luftdruck,<br>Niederschlag und der lokalen Seismizität.....   | 29 |
| Abbildung 15: | Grundwasserstände, GW-Differenzkurve, Luftdruck und Niederschlag Bad Brambach,<br>Tagesmittel 2011-2013.....   | 30 |
| Abbildung 16: | Grundwasserstand, Luftdruck und Niederschlag am Brunnen Rohrbach 1, Tagesmittel 2011-2013 .....  | 31 |
| Abbildung 17: | Grundwasserstand, -temperatur, Luftdruck und Niederschlag am Pegel Gürth,<br>Tagesmittel 2011-2013.....  | 32 |
| Abbildung 18: | Grundwasserstände am Pegel Gürth (GUE) und der Vorfelddbohrung Bad Elster (BE_VOR) mit<br>Luftdruck, Niederschlag (BBR) und der lokalen Seismizität im August/September 2011 ..... | 33 |
| Abbildung 19: | Grundwasserstand, -temperatur, Luftdruck und Niederschlag an der Vorfelddbohrung Bad Elster,<br>Tagesmittel 2011-2013.....   | 34 |
| Abbildung 20: | Grundwasserstand, -temperatur, Luftdruck und Niederschlag am Brunnen Hennebach<br>Tagesmittel 2011-2013.....   | 35 |
| Abbildung 21: | Grundwasserstände am Brunnen Hennebach (HEB) mit Luftdruck, Niederschlag (BBR) und der<br>lokalen Seismizität im August/September 2011. ....                                       | 36 |
| Abbildung 22: | Artesischer Druck, Wassertemperatur, Luftdruck, Niederschlag an der Thermalsolebohrung<br>Bad Elster, Tagesmittel 2011-2013 .....  | 37 |
| Abbildung 23: | Grundwassertemperaturen im erweiterten Messnetz, Tagesmittel 2011-2013 .....   | 38 |
| Abbildung 24: | Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Entgasungsrate an Quellen in Bad Brambach und Mofetten im Egerbecken.....   | 42 |

## Tabellenverzeichnis

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Tabelle 1: | Grundwasseraufschlüsse für seismohydrologisches Monitoring.....                           | 15 |
| Tabelle 2: | Schwankungsbreiten der Grundwasserstände im erweiterten Messnetz bis Ende Juni 2013 ..... | 21 |
| Tabelle 3: | Technische Daten GFÜ-Einheit SlimCom (Angaben Fa. SEBA Hydrometrie) .....                 | 23 |
| Tabelle 4: | Messstandorte und ihre technische Ausrüstung zur Datenfernübertragung .....               | 24 |
| Tabelle 5: | Seismohydrologische Charakterisierung und Bewertung der Messstandorte .....               | 40 |

# 1 Zielstellung

Mit der Prognose lokaler Erdbeben können Schutz und Aufklärung der Bevölkerung hinsichtlich seismischer Ereignisse im gegenwärtig wichtigsten Epizentralgebiet von Nový Kostel (CZ) verbessert werden. Gemäß den bisherigen Erkenntnissen, nach denen der Fluiddruck ein wichtiger seismohydrologischer Parameter ist, sollte die seismische Sensitivität weiterer Grundwasseraufschlüsse getestet werden. So war neben der Fortsetzung der Langzeitmessreihen an der Basisstation Wetzinquelle und Grundwassermessstellen Bad Brambachs das GW-Pegelnetz räumlich zu erweitern, um

- a) Lokationen zu finden, die hinsichtlich anderer Epizentren seismohydrologisch sensitiv sind (Klingenthal/Markneukirchen, Bad Elster, Landwüst, nördlich von Bad Brambach),
- b) auf künftige Erdbebenereignisse im Oberen Vogtland optimal vorbereitet zu sein.

Dabei waren die bisherigen Langzeitmessungen auf für die Erdbebenbeobachtung auswertbare Ansätze auszurichten, mit dem Ziel der Entwicklung einer praxistauglichen, möglichst weitgehend automatisierten Methodik der Erdbebenprognose für das Vogtland.

Vorliegender Abschlussbericht fasst die von 2011 bis 2013 ausgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse zusammen (KOCH 2013). Grundlage dieser Arbeiten waren die Ergebnisse aus dem Langzeitprojekt „Radiometrie-Geochemie“ (1991–2010) der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig (SAW). Während dessen Laufzeit konnten zahlreiche hydrologische Effekte an Quellen und Mofetten des Vogtlandes und NW-Böhmens im zeitlichen Umfeld von Schwarmbeben dokumentiert und detailliert untersucht werden (KOCH & HEINICKE 2010).

## 2 Wissenschaftlicher Kenntnisstand

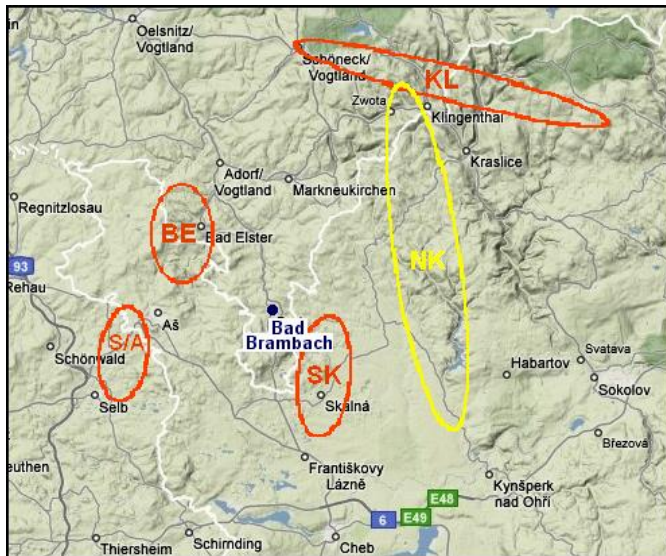
### 2.1 Allgemeines

Neue Erkenntnisse zu den Wechselwirkungen zwischen geodynamischen Prozessen und damit verbundener Fluidynamik bestimmten in den letzten 20 Jahren die Interpretation seismologischer und seismohydrologischer Untersuchungen nachhaltig. Mittelpunkt bzw. Basisregion der Forschungstätigkeit waren dabei das Obere Vogtland und NW-Böhmen (Eger-Becken). Neben der Eifel und dem Zentralmassiv (Frankreich) gehört dieses Gebiet zu den drei wichtigsten Regionen 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 und in NW-Böhmen treten bedeutende Bebenschwärme etwa alle 7 bis 10 Jahre auf, stärkere Seismizität etwa alle 70 bis 90 Jahre (NEUNHÖFER & MEIER 2004). Das Hauptepizentralgebiet liegt seit 1985 im Raum Nový Kostel, Tschechien (Abbildung 1). Nach 2009 traten aber auch vermehrt Beben nördlich von Bad Brambach auf, also zwischen den Epizentralgebieten von Skalná und Bad Elster (s. a. Abbildung 9).

Die Magnituden einzelner Ereignisse sind kleiner als 5, aber die Häufigkeit kann bis zu mehreren tausend Einzelereignissen innerhalb weniger Monate betragen. Nennenswerte Schäden traten bisher nicht auf. Sicher ist es diesem Umstand und dem Fehlen zeitlich hoch auflösender, hinreichend sensitiver Registriertechnik

geschuldet, dass erst in den letzten 20 bis 25 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 Fokus der Betrachtungen gerückt, nicht zuletzt auch auf Grund der wissenschaftlichen Resultate aus dem SAW-Langzeitvorhaben „Radiometrie-Geochemie“ seit 1991.



**Abbildung 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).

## 2.2 Zusammenfassung des Forschungsstandes

- Seismohydrologische Anomalien können sowohl vor, während als auch nach Erdbeben auftreten. Insbesondere die Mechanismen für kurzzeitige Vorläufereffekte (Druck) und post-seismische geochemische Effekte (Transport, Migration) bedürfen weiterer Untersuchungen. Angesichts der unterschiedlichen Reaktionszeiten und der Komplexität der Vorgänge ist diese Aufgabe nur mit einem kontinuierlichen Langzeitmonitoring bei zeitlichen Auflösungen zwischen Minuten (hydrologische/hydraulische Parameter) und mehreren Tagen/Wochen (hydrochemische/isotopengeochemische Parameter) lösbar.
- Der Zufallscharakter der für die Verifizierung erforderlichen Erdbeben erfordert eine ständige Überwachung des hydrologisch-geochemischen Backgrounds, um seismohydrologische Anomalien sicher identifizieren zu können. Dazu gehört unbedingt die parallele Registrierung von meteorologischen, hydrologischen und Entgasungsparametern mit entsprechender zeitlicher Auflösung (Luftdruck, Niederschlag, Wasserstände, Quellschüttungen, Gasflussraten).
- Internationale Erfahrungen zeigen, dass mit diskontinuierlichen und/oder kurzzeitigen Messungen kaum Erfolge zu erzielen sind. Auch der über mehrere Jahre andauernde Anstieg des Mantelheliums und der zeitversetzt registrierte Aufwärtstrend der Gasflussraten an NW-böhmischen Mofetten, die eine Veränderung im Entgasungsverhalten unter dem Eger-Becken signalisieren, unterstreichen die Bedeutung von Langzeitbeobachtungen.
- 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 zusammenhän-

genden Kluftsystem Spannungsaufnehmer sind, die als hochsensible hydrologische Strain-Meter das „Signal“ bis zur Erdoberfläche transportieren oder übertragen können. Demgemäß 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.

- 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 Perioden mit niedrigem Grundwasserstand, sprich: geringerem hydraulischen Gegendruck auf das Fluidsystem. Dadurch kann sich die Mobilität von Tiefenfluiden erhöhen.
- In Gebieten mit starker rezenter Tektonik und Seismizität sind zeitlich hoch aufgelöste Messungen des Wasserspiegels an Tiefbohrungen und der Emissionsraten von Tiefenfluiden der Schlüssel für die Klärung dieses Druckmechanismus erforderlich.
- Sowohl der internationale als auch eigene Forschungsstand erlaubt es gegenwärtig noch nicht, eine Erdbebenvorhersage nach Ort – Zeit – Magnitude (inkl. Wahrscheinlichkeiten) gemäß den hohen Anforderungen der internationalen Gremien zu realisieren (s. a. Earthquake Prediction Debate in: Nature online, Februar 1999).
- An gut untersuchten Standorten mit nachgewiesener seismohydrologischer Sensitivität und einem gesicherten Zusammenhang mit einem Epizentralgebiet (wie Bad Brambach - Nový Kostel) können jedoch Aussagen über die Wahrscheinlichkeit des Eintretens von Schwarmbebenereignissen in einem gewissen Zeitfenster nach hydrologischen Anomalien getroffen werden. Dafür wird hier der weniger strenge Begriff „Prognose“ verwendet.
- Gegenwärtig sind nach sicherer Identifizierung einer Grundwasser- oder Gasflussanomalie an Bad Brambacher Messstandorten folgende Aussagen für das Auftreten eines Schwarmbebens möglich:
  - Epizentrum Nový Kostel: Wahrscheinlichkeit 90 %
  - Einsatz 6 bis 8 Wochen nach Anomaliebeginn: Wahrscheinlichkeit 75 bis 85 %
  - maximale Magnitude: < 4,5 (Erfahrungswert)
- Aus dem Verlauf, der Dauer und Höhe einer Gasfluss- oder Grundwasserstands-anomalie können keine Vorhersagen über den exakten Beginn und die Dauer des potenziellen Schwarmbebens, die Anzahl der Einzelereignisse, die Verteilung und Höhe der Magnituden oder die maximale Energiefreisetzung abgeleitet werden.
- Zur Übertragung der in Bad Brambach möglichen Aussagen auf Erdbeben in anderen, über Nový Kostel hinaus gehenden Epizentralgebieten der Region (Abbildung 1) gibt es noch keine Erfahrungen. Dazu sollte das im Rahmen des vorliegenden Projektes räumlich zu erweiternde Grundwasserstandsmessnetz die Voraussetzungen schaffen.
- Im neuen Grundwassermessnetz konnte an dem Pegel Gürth (GUE), der Vorfeldbohrung Bad Elster (BEV) und dem Brunnen Hennebach (HEB) die seismische Sensitivität der Standorte gegenüber Schwarmbeben im Raum Luby/Nový Kostel (CZ) nachgewiesen werden. Diese äußerte sich in Form ko-seismischer Grundwasserstands-anomalien. Über eventuelle hydrologische Vorläufer zu diesem Bebenereignis sind keine Aussagen möglich, weil die Messungen an den neuen Standorten erst wenige Tage zuvor begannen.

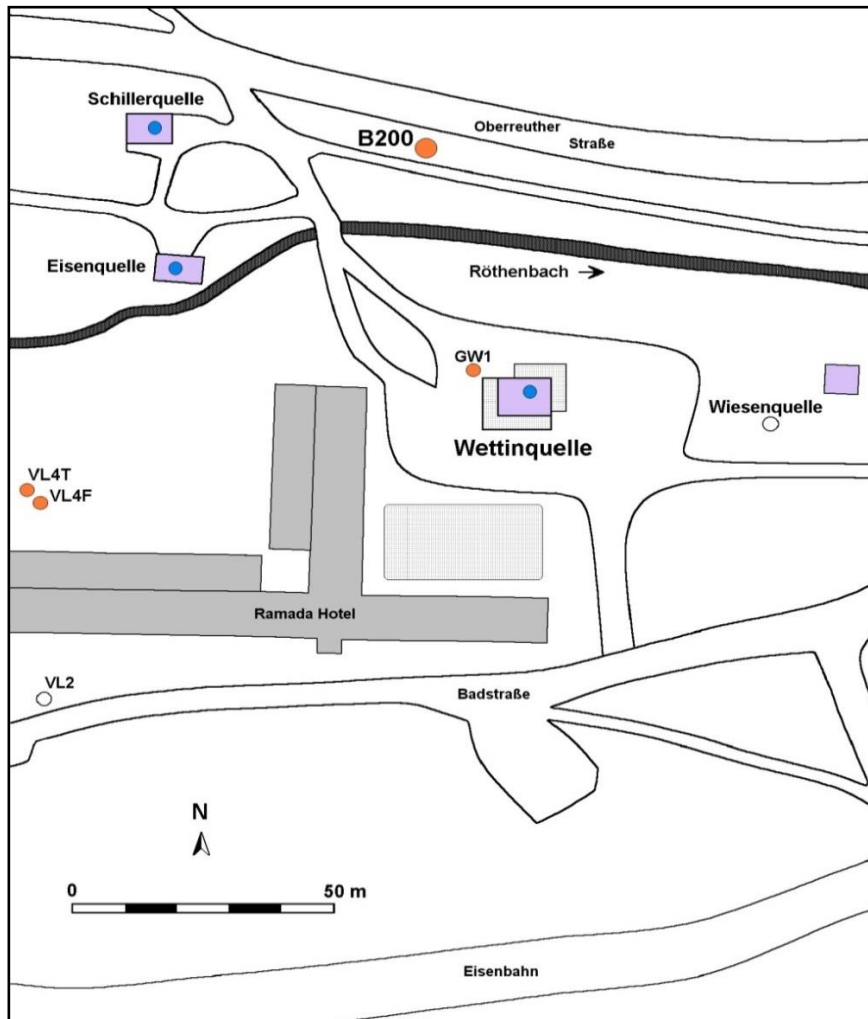


- Damit sind für das neue Messnetz zwar Angaben über zu erwartende seismisch induzierte GW-Schwankungen (–11 bis +5 cm) möglich, jedoch nicht die Ableitung von Kriterien für eine Bebenprognose. Auch der Fluidruckaufbau vor den wenigen nachfolgenden lokalen Schwarmbeben (bes. April 2013) war offenbar nicht ausreichend, um hydrologische Bebenvorläufer zu generieren.
- Aus den bisherigen Beobachtungen im neuen GW-Messnetz kann vermutet werden, dass bei lokalen Magnituden kleiner als etwa 2.5 nicht mit hydrologischen Reaktionen im zeitlichen Umfeld von Beben im Raum Luby/Nový Kostel zu rechnen ist.

## **3 Das seismohydrologische Messnetz**

### **3.1 Standorte und Messmethoden in Bad Brambach**

Der Standort Bad Brambach umfasst insgesamt drei Mineralquellen und neun Grundwasseraufschlüsse (7 Pegel, 1 Mineralwasserbohrung, 1 Brunnen). An den Quellen, zwei Pegeln (VL4T, GW) und der Mineralwasserbohrung (B200) werden seit 1998 bzw. 2000 unterschiedliche seismohydrologische Langzeitmessungen mit hoher zeitlicher Auflösung durchgeführt (Abbildung 2). Außerdem stehen die Daten einer automatischen Klimastation für die Evaluierung meteorologischer Einflussgrößen zur Verfügung (Messintervall 15 min), die sich etwa 150 m westlich der Eisenquelle befindet.



**Abbildung 2: Kurpark von Bad Brambach mit seismohydrologischen Messstationen**

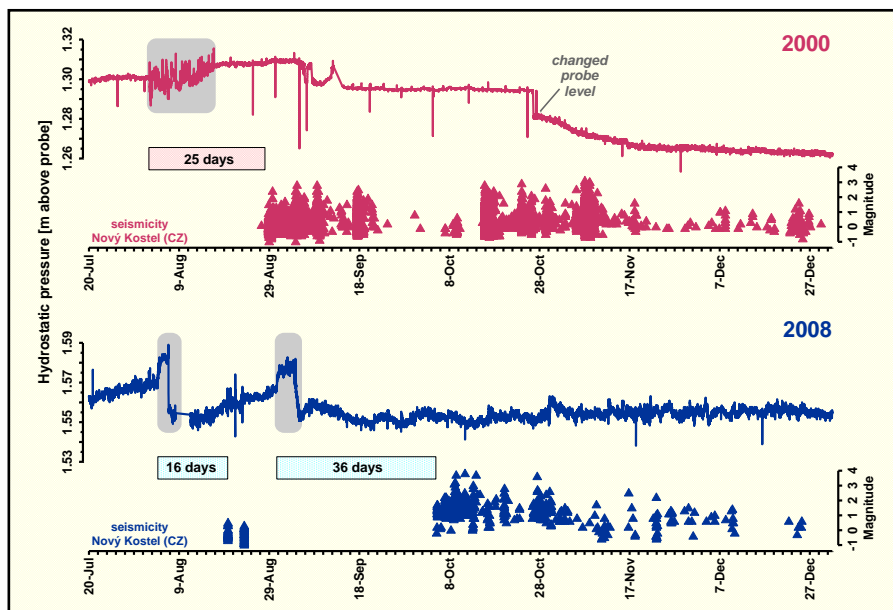
Standortsignaturen: blau – Mineralquellen mit Gasflusszählern und anderen kontinuierlich messenden seismohydrologischen Geräten, orange – Brunnen und GW-Pegel mit Drucksensoren, weiß – andere Quellen und GW-Pegel (VL2/4 und GW1: Pegelbohrungen, B200: 200-m-Bohrung)

### 3.1.1 Multiparameterstation Wietinquelle

Von den Bad Brambacher Mineralquellen erschien von Anfang an die Wietinquelle wegen ihrer hydrogeologisch-geochemischen Eigenschaften als seismohydrologischer Standort besonders geeignet: Mineralisation > 2.000 mg/l, Radonkonzentration 26 kBq/l, CO<sub>2</sub>-Übersättigung 2.500 mg/l, Anteil alter meteorischer Wässer 80 %, Gasphase 99,5 % CO<sub>2</sub> mit magmatischer Signatur und  $\delta^{13}\text{C} = -2$  bis  $-5$  ‰ PDB, <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He-Verhältnis  $2 \cdot 10^{-6}$  (R/Ra > 2). Die Wietinquelle ist ein 5,4 m tiefer Schachtbrunnen, dessen Sohle sich an der Oberfläche des stark geklüfteten Fichtelgebirgsgranits befindet.



**Abbildung 3: Keller der Wetтинquelle (Bad Brambach) mit Quelfassung und seismohydrologischer Multiparameterstation**



**Abbildung 4: Druckanomalien in der Quelfassung der Wetтинquelle Bad Brambach vor den Schwarmbebenserien 2000 und 2008**

*Im Jahr 2000 wurde eine Anomalie 25 Tage vor Bebenbeginn registriert, während 2008 zwei Anomalien auftraten: 16 Tage vor einem kleinen Schwarm und 36 Tage vor dem Hauptbebenschwarm im Gebiet von Nový Kostel.*

Das aufsteigende Quellwasser wurde bis 1999 durch eine kupfer-/betonummantelte Eichenholzfassung gewonnen. Seit dem Jahr 2000 wird es von einem pyramidenförmigen Edelstahlbehälter aufgefangen, der eine Sohlfläche von 2 m<sup>2</sup> erfasst. Der freie Überlauf befindet sich 3,3 m über der Quellsohle. Gegen den Zustrom von oberflächennahem Grundwasser ist die Fassung durch Beton- bzw. Toneinbauten abgedichtet. Bis 1995 wurden im Wasser der alten Wetтин-Quellfassung über 20 Gamma-Strahlungsanomalien gemessen. Mit Me-

thoden der räumlichen Statistik konnten 70 % davon mit seismischen Ereignissen in einem begrenzten Gebiet bei Nový Kostel (CZ, 10 km östlich von Bad Brambach) korreliert werden (HEINICKE et al. 1995a, b; HEINICKE & KOCH 1996; KOCH & HEINICKE 1996; HEINICKE et al. 1997). 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 übrigen 30 % der Anomalien waren auf meteorologische Ursachen (extreme Quellschüttung) und Unregelmäßigkeiten bei der täglichen Quellbewirtschaftung zurückzuführen.



**Abbildung 5: Gasflussmessstationen an den Quellfassungen von Eisen- (links) und Schillerquelle (rechts)**

*Über den grünen Schlauch wird das freie Quellgas zum Gasflusszähler geleitet (jeweils im Hintergrund).*

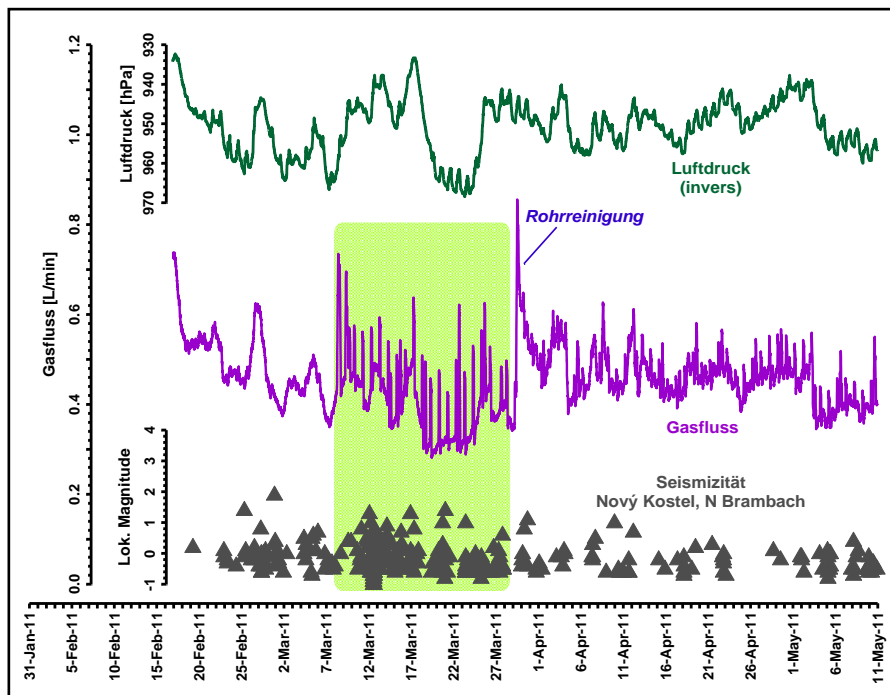
Eine Radonanomalie vor den Schwarmbeben vom Januar 1997, bei der ein Überschäumen des CO<sub>2</sub>-übersättigten Wassers in der Quellfassung nachgewiesen werden konnte, führte dazu, die Parameter Druck und freier Gasfluss in die Messungen einzubeziehen. Dies war aber nur bei einer gasdichten Quellfassung möglich. Letztere konnte im Rahmen der Generalsanierung der Wetinquelle 1999–2000 nach wissenschaftlichen Vorgaben realisiert werden. Nach Installation einer von der DFG geförderten Multiparameterstation, die noch heute arbeitet, entstanden optimale Messbedingungen (Abbildung 3). Neben dem hydrostatischen Druck und dem Gasfluss werden gegenwärtig folgende Parameter mit einer zeitlichen Auflösung zwischen 2 und 15 min registriert: Quellschüttung, Wasser- und Umgebungstemperatur, spezifische Leitfähigkeit, Radon im Quellwasser und -gas,  $\gamma$ -Aktivität über der Quellsohle. Mit dieser Apparatur gelang die Verifizierung der Modellvorstellung von einer Druckimpulsausbreitung innerhalb des tiefen Fluidsystems auf Grund von Änderung im Poren-/Kluftdruckregime infolge geotektonischen Spannungsaufbaues vor lokalen Erdbeben. Dazu gehört ebenfalls die Möglichkeit der Triggerung von Schwarmbeben durch erhöhten Fluiddruck in der Tiefe, die beim

Auftreten realer<sup>1)</sup> hydrologischer Vorläufereffekte stets in Betracht gezogen werden muss (HORÁLEK & FISCHER 2008; PAROTIDIS et al. 2005).

Abbildung 4 zeigt zwei typische Vorläufereffekte beim hydrostatischen Druck in der Quelfassung, die zwischen 16 und 36 Tagen vor den Schwarmbeben im Herbst der Jahre 2000 bzw. 2008 registriert wurden. Anfang August 2000 war zusätzlich eine kurzzeitige Gasflusserhöhung zu verzeichnen gewesen. Bei beiden seismischen Perioden gibt es Hinweise für eine Fluidtriggerung, die 2008/2009 offenbar auch im weiteren Verlauf der Beben noch wirksam war (KOCH & HEINICKE 2010; KOCH & HEINICKE 2011). Auf Grund ihrer Bedeutung als seismohydrologische Basis- bzw. Referenzstation wird die Multiparametermessung an der Wettinquelle auch im Rahmen des LfULG-Projektes „Seismohydrologie“ weiter betrieben, zumal es Hinweise gibt, dass bestimmte Parameter dieser Quelle auch auf regionale Seismizität außerhalb des Herdgebietes von Nový Kostel ansprechen.

### 3.1.2 Gasflussmessungen an Eisen- und Schillerquelle

Die bisherigen Langzeitmessungen des Gasflusses an Eisen- und Schillerquelle Bad Brambach (zeitliche Auflösung 10–15 min) haben bis auf einige wenige ko-seismische Fluktuationen kaum Hinweise auf eine Sensibilität der beiden Quellen hinsichtlich lokaler/regionaler Seismizität geliefert (Abbildung 5; Abbildung 6).



**Abbildung 6: Gasfluss-Fluktuationen in der Eisenquelle (Bad Brambach) zwischen dem 8. und 28. März 2011**

*In diesem Zeitraum ist der Einfluss des Luftdruckes auf den Gasfluss kaum ausgeprägt.*

Neben der Wettinquelle zeigen aber auch sie einen deutlichen Anstieg des Gasflusses während der letzten 13 Jahre. Zusammen mit den Erkenntnissen zur Entwicklung der  $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisse an  $\text{CO}_2$ -Gasen ver-

<sup>1)</sup> „real“ bedeutet hier: sowohl Ursache (Porendruckänderung) als auch deren Effekt an der Oberfläche (Anomalie) liegen zeitlich vor dem Bebenbeginn.



schiedener Mofetten in NW-Böhmen (BRÄUER et al. 2005a, 2007, 2009) und den Ergebnissen der Langzeit-Gasflussmessungen an den tschechischen Mofetten Soos und Bublák (KOCH & HEINICKE 2007; KOCH et al. 2008) belegen diese Zeitreihen eine verstärkte Fluidfreisetzung aus tieferen Reservoirs unter dem Vogtland bzw. NW-Böhmen. Damit sind sie ein wichtiger Mosaikstein bei der Beurteilung des magmatischen Risikos in der Region. Zur Aufrechterhaltung der Kontinuität der Datenreihen werden daher auch die Gasflussmessungen an Eisen- und Schillerquelle fortgesetzt und in Abständen hinsichtlich ihres Trends ausgewertet. Dies erscheint umso wichtiger als die Gasflussmessungen auf tschechischem Gebiet im Rahmen dieses Projektes nicht mehr durchgeführt werden können.

### 3.1.3 Hydrostatische Druckmessungen an Bad Brambacher Grundwasserpegeln

Tabelle 1 zeigt im oberen Teil (Nr. 1-7) die Lokationen des für den Bau des Kurmittelhauses geschaffenen Grundwassermessnetzes im Kurpark von Bad Brambach, in dem 1999 mit seismohydrologischen Auswertungen der Grundwasserstände begonnen wurde. Von besonderer Bedeutung sind dabei die beiden Pegel VL4T und GW1 (Abbildung 7) sowie eine alte, ungenutzte, 200 m tiefe Mineralwasserbohrung (B200), an denen der Wasserspiegel kontinuierlich aufgezeichnet wird (Messintervall 15 min).

Etwa vier Wochen vor den Schwarmbeben vom Herbst 2000, gleichzeitig mit den Druckschwankungen in der Wetтинquelle und mit ähnlichen "Vorlaufzeiten", wurde an der 15 m tiefen GW-Messstelle VL4T ein Anstieg des Grundwasserspiegels zwischen 20 und 25 cm gemessen (Koch et al. 2003). Als Vergleichspegel dient der Pegel Brunnen 1 (GW1) nahe der Wetтинquelle, der mit 4 m Tiefe nachweislich die hier ca. 6 m mächtige Zersatzzone über dem geklüfteten Granitaquifer erschließt und nicht seismisch beeinflusst wird. Mit der Bildung zeitgleicher Differenzen der Wasserstände beider Pegel werden meteorologische Einflüsse (Luftdruckänderungen, Niederschläge, Schneeschmelzeffekte) weitgehend separiert, sodass die Differenzkurve als Abbild der Druckvariationen aus der Tiefe betrachtet werden kann.

**Tabelle 1: Grundwasseraufschlüsse für seismohydrologisches Monitoring**

(blau: erweitertes Messnetz, Nr. fett: automatische Messung)

| Nr. | Messstellenname             | Kennung | Messstellenart                        | Hochwert   | Rechtswert | N-Breite | E Länge  | Innen Ø [mm]           | Baujahr  |
|-----|-----------------------------|---------|---------------------------------------|------------|------------|----------|----------|------------------------|----------|
| 1   | Bad Brambach, Kurpark, VL1  | V       | GW-Beobachtungsrohr, 15 m             | 5565037,68 | 4521320,92 | 50,22107 | 12,29727 | 100                    | 1998     |
| 2   | Bad Brambach, Kurpark, VL2  | V       | GW-Beobachtungsrohr, 15 m             | 5565045,74 | 4521388,69 | 50,22114 | 12,29822 | 100                    | 1998     |
| 3   | Bad Brambach, Kurpark,      | V       | GW-Beobachtungsrohr, 6 m              | 5565067,72 | 4521322,23 | 50,22134 | 12,29729 | 100                    | 1998     |
| 4   | Bad Brambach, Kurpark, VL3T | V       | GW-Beobachtungsrohr, 15 m             | 5565069,95 | 4521321,51 | 50,22136 | 12,29728 | 100                    | 1998     |
| 5   | Bad Brambach, Kurpark,      | V       | GW-Beobachtungsrohr, 6 m              | 5565088,00 | 4521385,66 | 50,22152 | 12,29818 | 100                    | 1998     |
| 6   | Bad Brambach, Kurpark, L4T  | V       | GW-Beobachtungsrohr, 15 m             | 5565083,56 | 4521387,11 | 50,22148 | 12,29820 | 100                    | 1998     |
| 7   | Bad Brambach, Kurpark,      | G       | GW-Beobachtungsrohr, 4 m              | 5565116,16 | 4521473,33 | 50,22177 | 12,29941 | 50                     | 1998     |
| 8   | Bad Brambach, Kurpark,      | B       | Mineralwasserbohrung, 200 m           | 5565157,25 | 4521456,75 | 50,22214 | 12,29918 | 300                    | 1940     |
| 9   | Bad Brambach, Kurpark,      | R       | Schachtbrunnen, westl. Badstr. 49, 11 | 5564980,27 | 4521149,87 | 50,22056 | 12,29487 | 1000                   | vor 1960 |
| 10  | Gürth, 03/95, Flurstück 282 | G       | Bohrbrunnen, als Pegel ausgebaut, 50  | 5568799,00 | 4517952,00 | 50,25500 | 12,25024 | 100                    | 1995     |
| 11  | Rohrbach 1, 05/95           | R       | Bohrbrunnen, 85 m                     | 5566859,00 | 4525217,00 | 50,23729 | 12,35198 | 100                    | 1995     |
| 12  | Hennebach, 04/95            | H       | Bohrbrunnen, 88 m                     | 5567763,00 | 4525550,00 | 50,24540 | 12,35671 | 100                    | 1995     |
| 13  | Bad Elster, Vorfeldbohrung  | B       | Bohrbrunnen, 101 m                    | 5572613,68 | 4517507,21 | 50,28930 | 12,24418 | 100                    | 2007     |
| 14  | Bad Elster, Thermalsole-    | B       | Bohrbrunnen, 1200 m                   | 5573103,73 | 4517728,58 | 50,29370 | 12,24731 | 311/211 <sup>+) </sup> | 2008     |

**Höhen [m NN]**

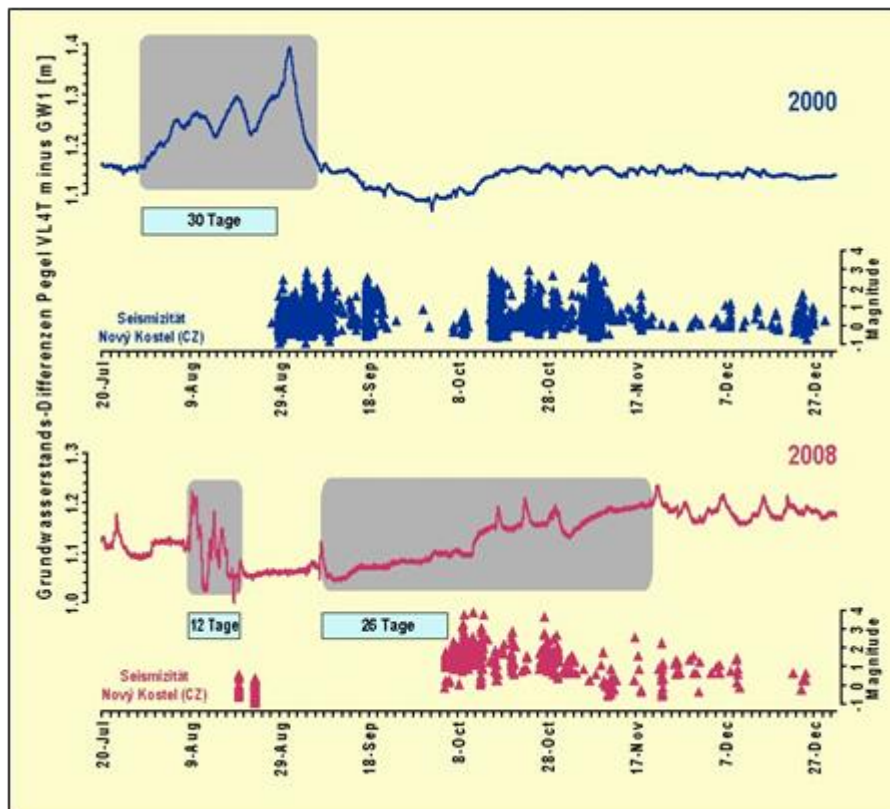
| Nr. | Höhen [m NN] |            |                    |           |                  |          | Grundwasserkörper | Bemerkungen  |
|-----|--------------|------------|--------------------|-----------|------------------|----------|-------------------|--|
|     | Gelände      | Brunnen OK | Filter OK          | Filter UK | Ausbau-<br>sohle | Endteufe |                   |  |
| 1   | 574,79       | 575,63     |                    |           |                  | 559,79   | schwach minera-   | BOK-Höhen GW-Pegel 1-7, BBR: Oberkante b. offener Klappe<br>GW-Aufschlüsse 6-8: Kontinuierliche Datenaufzeichnung (Δt=15 min) seit 1999<br>GW-Aufschlüsse 10-14: Messnetzerweiterung; Datenaufzeichnung (Δt=15 min)<br>GW-Aufschlüsse 1-9: 14-tägige Messung mittels Kabellichtlot<br>GW-Aufschlüsse 10-13: Kontrollmessung m. Lichtlot beim Auslesen (4/5-wöchig)<br><br>Ende der Verrohrung: 111,77 m u. BOK |
| 2   | 573,39       | 574,14     |                    |           |                  | 558,39   | schwach minera-   |  |
| 3   | 570,24       | 570,20     |                    |           |                  | 564,24   | schwach minera-   |  |
| 4   | 570,40       | 570,34     |                    |           |                  | 555,40   | schwach minera-   |  |
| 5   | 570,03       | 569,94     |                    |           |                  | 564,03   | schwach minera-   |  |
| 6   | 569,97       | 569,85     |                    |           |                  | 554,97   | schwach minera-   |  |
| 7   | 568,19       | 567,99     |                    |           |                  | 564,19   | schwach minera-   |  |
| 8   | 568,83       | 568,88     | 503,42             | 473,14    |                  | 371,05   | schwach minera-   |  |
| 9   | 586,00       | 585,65     |                    |           |                  | 575,00   | schwach minera-   |  |
| 10  | 518,00       | 518,22     | 489,00             | 473,00    | 468,00           | 418,00   | Mineralwasser     |  |
| 11  | 534,00       | 533,87     | 506,00             | 467,00    | 449,00           | 424,00   | schwach minera-   |  |
| 12  | 517,50       | 517,58     | 490,10             | 467,50    | 429,50           | 417,50   | schwach minera-   |  |
| 13  | 465,30       | 466,59     | 397,30             | 392,30    | 390,30           | 364,30   | Mineralwasser     |  |
| 14  | 459,68       | 458,87     | ohne Filterstrecke |           | -740,32          | -740,32  | Thermalsole,      |  |



**Abbildung 7: Grundwasserpegel im Kurpark von Bad Brambach mit Drucksonden**

Links: VL4T (15 m tief, erschließt Granitaquifer = seismisch sensitiv); rechts: GW1 (4 m tief, erschließt Verwitterungszone = Vergleichspegel)

Während im Jahr 2000 die Druckanomalie in Pegel VL4T unmittelbar mit Einsetzen der ersten Schwarmbeben wieder zurückging und anschließend der Wasserstand sogar das prä-seismische Niveau unterschritt, dauerte die GW-Anomalie vom Herbst 2008 praktisch über ein halbes Jahr an (Abbildung 8).



**Abbildung 8: Differenzkurven des Grundwasserstandes 2000 und 2008 zwischen Pegel VL4T und GW1 im Kurpark von Bad Brambach**

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.

Diese Anomalien sind in zwei Publikationen ausführlich diskutiert worden (KOCH & HEINICKE 2010, 2011), auch hinsichtlich der Relevanz saisonaler Effekte. Jeweils 2000 und 2008 wurden reale Vorläufereffekte gemessen,



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. So fließen die Ergebnisse früherer Untersuchungen auf nützliche Weise in die gegenwärtigen Forschungsarbeiten ein.

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 resultierende Porendruckänderung wird als „Signal“ über Störungszonen aus dem Krustenbereich bis hin zur Erdoberfläche übertragen, wo es als Grundwasseranstieg, höhere Quellschüttung und/oder eine stärkere Entgasung an Mineralquellen oder trockenen Gasaustritten (Mofetten) beobachtet werden kann (HEINICKE & KOCH 2000; KOCH et al. 2003). Dieser Prozess setzt sich nach einem Schwarm mit erneutem Spannungsaufbau fort und kann sehr langsam – also über Jahre – verlaufen.
- (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 (sogenannten Alterationseffekten) können diese Prozesse die kritische Bruchgrenze entlang der Störung herabsetzen, was zu einer Triggerung von Erdbeben führt (PAROTIDIS et al. 2005; KOCH et al. 2008; HEINICKE et al. 2009).

Beide Szenarien setzen aber eine hinreichende tektonische Stressakkumulation voraus, 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 prä-seismische Niveau sprechen für Prozess A (Abbildung 8). Allerdings gibt es gerade in dieser seismischen Periode Anzeichen für eine Bebentriggerung durch Fluide (PAROTIDIS et al. 2005). Von anderen Autoren wird dagegen hervorgehoben, dass der Porendruck von Krustenfluiden entscheidend dafür ist, die Kluftzonen vom subkritischen in einen kritischen Zustand zu versetzen (HORÁLEK & FISCHER 2008). Das würde bedeuten, dass eine Fluidtriggerung nur in der Initialphase des Bebenschwarms 2000 stattfand. Die seismischen Ereignisse 2008/09 im Epizentralgebiet von Nový Kostel wurden über acht 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 Schwarmbebenseerie 2008/09 war.

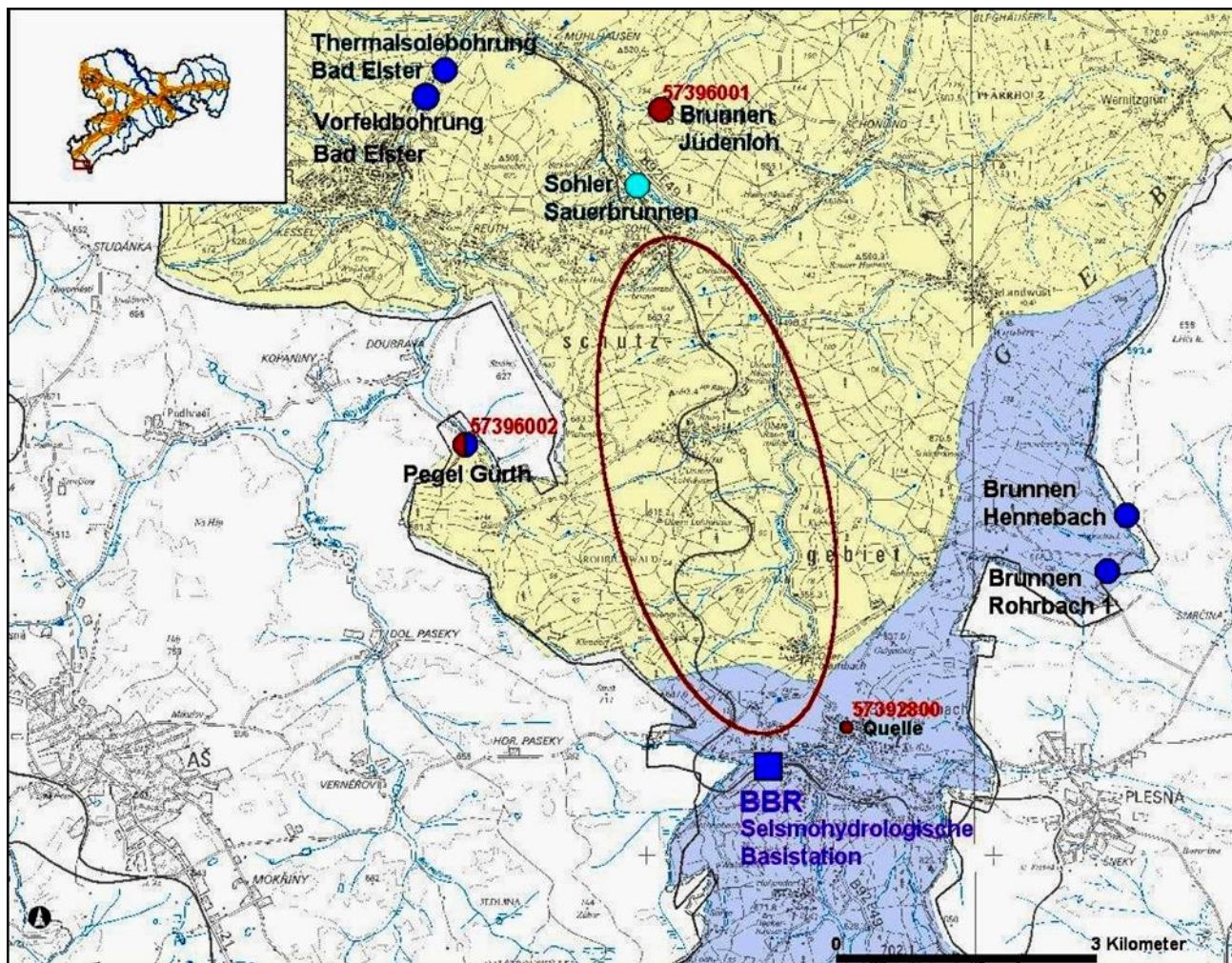
## 3.2 Das erweiterte seismohydrologische Messnetz

### 3.2.1 Standorte

Die folgenden fünf Messstellen waren im Mai 2011 für die Installation mit kombinierten Wasserdruck-Temperatur-Sonden inkl. Datenloggern ausgewählt worden (Abbildung 9 und Abbildung 10):

- Pegel Gürth (GUE)
- Brunnen Hennebach (HEB)
- Brunnen Rohrbach 1 (RO1; ohne Temperaturmessung)
- Vorfeldbohrung Bad Elster (BE\_VOR)
- Thermalsolebohrung Bad Elster, 1.200 m (BE\_TSB)

Bei den ersten drei Aufschlüssen handelt es sich um von der Bad Brambacher Sprudel GmbH zur Mineralwassergewinnung niedergebrachte Brunnen, wovon die Bohrung Gürth als GW-Pegel ausgebaut und in das sächsische Landesbeobachtungsnetz eingebunden wurde. Ihre Tiefe zwischen 50 und 88 m und die Abdichtung gegenüber dem oberflächennahen Grundwasser lassen eine unbeeinflusste Anbindung an den geklüfteten Festgesteinsaquifer erwarten, der überwiegend von Glimmerschiefer (HEB, RO1) bis hin zu phyllitischem Glimmerschiefer (GUE) gebildet wird. Details der Standorte sind in Tabelle 1 (Nr. 10-12) ersichtlich.



**Abbildung 9: Erweitertes Grundwassermessnetz für seismohydrologisches Monitoring**

Die dunkelrote Ellipse kennzeichnet das Epizentrum nördlich von Bad Brambach, wo seit 2009 verstärkt Beben auftreten. rot – Messpunkte des sächsischen Landesmessnetzes, blau – Bohrbrunnen für Messnetzerweiterung, hellblau – weitere potenzielle Monitoringstandorte

Im Brunnen Hennebach waren bis Anfang 2011 im Rahmen eines Pilotversuchs ein Seismometer und ein Geophon der Universität Leipzig installiert. Dank der großzügigen Unterstützung der Brambacher Sprudel GmbH können diese drei Messstellen nun auch für unser seismohydrologisches Monitoring genutzt werden. Dagegen ist der ursprünglich vorgesehene Brunnen Jüdenloh bei Sohl nicht für derartige Messungen geeignet, weil aus ihm bis auf weiteres Mineralwasser gefördert wird.

Ein weiterer Standort ist die sogenannte Vorfeldbohrung (BE\_VOR) des Staatsbades Bad Elster, die als Beobachtungsbrunnen während der Abteufung der 1.200-m-Thermalsolebohrung Bad Elster vorgesehen war (Abbildung 9 und Tabelle 1, Nr. 13). Sie befindet sich ca. 250 m SSW der Thermalsolebohrung, ist 110 m tief

und steht vollständig im Phyllit. Hier und am Brunnen Rohrbach 1 erfolgt ein Datenaustausch mit der Umweltbüro GmbH Vogtland in Weischlitz (UBV), die mit der hydrogeologischen Routineüberwachung sowohl für die Sächsische Staatsbäder GmbH (SSB) als auch für die Bad Brambacher Sprudel GmbH (BBS) beauftragt ist.

Die Thermalsolebohrung Bad Elster (BE\_TSB) wurde zusätzlich in das Messprogramm aufgenommen. Sie ist als Thermalsolequelle für die Versorgung der Staatsbäder konzipiert (Tabelle 1, Nr. 14). Das 1.200 m tiefe Bohrloch steht über die gesamte Länge im vogtländischen Phyllit, der in den obersten ca. 600 m quarzitisches ausgebildet ist. Bis zu etwa 300 m Tiefe wird er von Quarzitschieferlagen durchzogen. Die Klüftigkeit ist sehr gering. Das spiegelt sich in der niedrigen Ergiebigkeit von etwa 0,04 l/s wider. Das Wasser war anfänglich mit einem Überdruck von etwa 12 m über Gelände artesisch gespannt. Nach verschiedenen Untersuchungen und damit verbundenem längeren Überlauf der Fassung wurde die Wassersäule bis nach oben stark aufgesalzen, sodass der Kopfdruck im April 2013 bei nur noch etwa 3 m über Gelände lag. Der artesischer Überdruck und die hohe saline Aggressivität des Wassers stellen besondere Anforderungen an die einzusetzenden Drucksonden, sodass hier die zusätzliche Anschaffung eines integrierten Druck-Temperatur-Levelloggers LT F100/M30 (Fa. SOLINST, Kanada) notwendig war, der ohne eine Kabeldurchführung am Brunnenkopf auskommt (KOCH 2012). Besondere Metallbeschichtungen machen den Sensor hoch beständig gegenüber Korrosion (vergl. Kap. 3.2.2). Dank der Unterstützung durch das UBV Weischlitz, das eine Edelstahlblindmutter mit eingeschweißter Innenöse für die Halteseile anfertigen ließ, konnte die Sonde bereits im November 2011 vor Ort installiert werden (Abbildung 10). Sie registriert Druck und Wassertemperatur mit dem gleichen Aufzeichnungsintervall wie die übrigen Stationen (15 min).

Ursprünglich war auch eine der zahlreichen Fassungen des ehemaligen Sohler Sauerbrunnens von Interesse, an denen brodelnde Entgasungserscheinungen während der starken Schwarmbeben im Herbst 1908 dokumentiert worden waren (WEISE 1908). Die Brunnen sind für relevante Wasserstandsmessungen jedoch nur bedingt geeignet, weil die Fassungen größtenteils miteinander verbunden sind und zudem frei ausfließen. Dadurch wird der Wasserstand überwiegend von der Höhe des Auslaufniveaus bestimmt, und mögliche geotektonische Einflüsse können kaum erkannt werden. Ein „Hochziehen“ des Wasserspiegels auf das natürliche Grundwasserniveau in einem ausgewählten Brunnen durch Rohreinbauten und Abdichtungen wäre zu aufwendig gewesen, gemessen an den Erfolgsaussichten für ein seismohydrologisches Monitoring an diesem Standort.

### 3.2.2 Messtechnik, Installation

Von den in Kap. 3.2.1 vorgestellten Standorten wurden am 9. August 2011 zunächst die Lokationen Hennebach, Gürth und Vorfeldbohrung Bad Elster mit modernen kombinierten Druck-Temperatur-Datenloggern des Typs MDS Dipper-T3 der Fa. SEBA HYDROMETRIE, Kaufbeuren ausgerüstet (Abbildung 10 und Abbildung 11) Logger dieses Herstellers haben sich über Jahre im Feldeinsatz in Bad Brambach durch ihre Robustheit, Wartungsarmut, Messstabilität und gute Reproduzierbarkeit der Daten bewährt. Neben der Druckmessung bietet die Temperaturmessung zudem die Möglichkeit, signifikante Änderungen der Zuströmung unterschiedlicher Wasserkomponenten zu den Pegeln (Tiefen-, oberflächennahes Grundwasser/Niederschlag) zu identifizieren.

Die insgesamt vier angeschafften Logger haben Kabellängen von je 2 x 10 und 2 x 20 m bei einem Messbereich zwischen 0 und 10 m. Letzterer wird durch die zu erwartenden Grundwasserstandsschwankungen bestimmt, während sich die Kabellängen nach den jeweils zu erwartenden maximalen Tiefen des Grundwasserspiegels unter Brunnen-Oberkante (BOK) richten (Tabelle 2). In der vorliegenden Ausführung haben die **SEBS-Dipper-T3** folgende technische Daten (SEBA-Bedienungsanleitung MDS Dipper-T3):





**Abbildung 10: Standorte für das erweiterte seismohydrologische Messnetz**

1 – Brunnen Hennebach, 2 – Pegel Gürth, 3 – Brunnen Rohrbach 1, 4 – Vorfeldbohrung Bad Elster, 5 – Thermalsolebohrung Bad Elster (Kopf des Brunnenaufsatzrohres mit Edelstahlmutter und Halteseil der Drucksonde)

|                         |  |
|-------------------------|--|
| <u>Drucktensor</u>      | Keramik-Messzelle, Messprinzip kapazitiv       |
| Messbereich:            | 0 m bis 10 m                                   |
| Genauigkeit:            | $\pm 0,1$ % FS                                 |
| Auflösung:              | 1 mm   |
| Langzeitstabilität:     | $\pm 0,1$ %/Jahr                               |
| Temperaturabhängigkeit: | $\pm 0,1$ %/K                                  |
| <u>Temperatursensor</u> | NTC30  |
| Messbereich:            | - 5 °C bis + 50 °C                             |
| Genauigkeit:            | $\pm 0,1$ °C                                   |
| Auflösung:              | 0,002 °C                                       |
| Betriebstemperatur:     | - 20 °C bis + 70 °C                            |
| Speicherkapazität:      | 1 Mbyte Flash-Speicher (ca. 480.000 Messwerte) |
| Mikroprozessor:         | 16 bit   |
| Auflösung:              | 15 bit   |
| Stromverbrauch Standby: | max. 20 $\mu$ A                                |
| Stromverbrauch Messung: | max. 8 mA                                      |
| Batteriestandzeit:      | 8 Jahre bei 15 min Messintervall               |

Messintervall: 5 sec bis 45 Tage  
 Maße Sondenkörper: Ø 22 mm, Länge 278 mm

**Tabelle 2: Schwankungsbreiten der Grundwasserstände im erweiterten Messnetz bis Ende Juni 2013**

| Messstelle                      | Kennung | Messstelle<br>Geländehöhe<br>[m NN] | Grundwasserstand<br>[m NN] |        | Grundwasserstand<br>[m über Gelände] |       | GW-Differenz<br>[m] | Bemerkung  |
|---------------------------------|---------|-------------------------------------|----------------------------|--------|--------------------------------------|-------|---------------------|--|
|                                 |         |                                     | max                        | min    | max                                  | min   |                     |  |
| Bad Elster<br>Thermalsolbohrung | BE_TSB  | 459,68                              | 472,34                     | 462,07 | 12,66                                | 2,39  | <b>10,27</b>        | ab 11/2011<br><i>artesisch</i>                             |
| Bad Elster<br>Vorfeldbohrung    | BE_VOR  | 465,30                              | 465,22                     | 459,73 | -0,08                                | -5,57 | <b>5,49</b>         | ab 08/2011<br>März-Mai 2013: Störung<br>durch Bohrarbeiten |
| Gürth                           | GUE     | 518,00                              | 517,39                     | 510,81 | -0,61                                | -7,19 | <b>6,58</b>         | ab 08/2011   |
| Hennebach                       | HEB     | 517,50                              | 516,63                     | 515,61 | -0,87                                | -1,89 | <b>1,02</b>         | ab 08/2011   |
| Rohrbach 1                      | RO1     | 534,00                              | 527,30                     | 525,42 | -6,70                                | -8,58 | <b>1,88</b>         | ab 04/2011   |

Alle Dipper-T3 sind bei Bedarf mit einem batteriebetriebenen Online-Überwachungssystem mit GSM/GPRS-Modem (SIM-Karte) nachrüstbar, das eine Datenfernübertragung über die entsprechenden Netze ermöglicht (vgl. Kap. 3.2.3). Die Brunnen Rohrbach 1 gehört zum Kontrollmessnetz der Brambacher Sprudel GmbH, das vom UBV Weischlitz betrieben wird. Sie enthält bereits einen älteren SEBA-MDS-1-Logger (Auflösung 0.3 mm, Abbildung 10. Hier wurde vereinbart, dass die Daten regelmäßig von der SAW ausgelesen und sowohl vom UBV als auch der SAW genutzt werden. Gleichermaßen wird an der Vorfeldbohrung Bad Elster verfahren, wo der MDS-1 des UBV Weischlitz gegen einen eigenen Dipper-T3 ausgetauscht wurde (Abbildung 10), weil dort eine zusätzliche Temperaturmessung wichtiger erscheint als am GW-Aufschluss Rohrbach 1 (s. a. Kap. 5.2.1 bis 5.2.5). An allen Standorten wurden die Drucksensoren nach dem mittels Kabellichtlot gemessenen GW-Spiegel unter Brunnenoberkante (BOK) kalibriert und ein Messintervall von 15 min gewählt. Nach den Erfahrungen an den Bad Brambacher Messstellen ist diese zeitliche Auflösung für eine sichere Anomalie-Identifizierung, überschaubare Datenmengen und eine hinreichend lange Batterielebensdauer ausreichend. An der Thermalsolbohrung Bad Elster wurde am 23.11.2011 eine Spezialsonde **Levellogger LT F100/M30** (Fa. SOLINST, Kanada) installiert. Sie hat folgende technische Daten (SOLINST Levellogger Series Data Sheet, Model 3001):

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| <u>Drucktensor</u>            | Piezoresistives Silikon in 316L Edelstahl |
| Genauigkeit:                  | 0,05 % vom Messbereichsendwert            |
| Auflösung:                    | 0,002 % bis 0,0006 %                      |
| Normalisierung:               | automatische Temperaturkompensation       |
| <u>Temperatursensor</u>       | Platinum-Widerstands Temperaturdetektor   |
| Genauigkeit:                  | ± 0,05 °C                                 |
| Auflösung:                    | 0,0003 °C                                 |
| Kompensationsbereich:         | - 10 °C bis + 40 °C                       |
| Ansprechzeit:                 | < 1 min                                   |
| <u>Weitere Daten</u>          |   |
| Batterielebensdauer:          | 10 Jahre bei 1 Messung/min                |
| Genauigkeit der internen Uhr: | ± 1 min/a                                 |
| Temperaturbereich:            | - 20 °C bis + 80 °C                       |

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Speicherplatz:              | 40.000 Messungen von Druck und Temperatur                           |
| Speicher:                   | EEPROM, redundant backup der letzten 1.200 logs                     |
| <u>Kommunikation</u>        | optisches Infrarot Interface mit RS232- oder USB-Schnittstelle      |
| Abmessungen:                | 22 mm x 154 mm  |
| Gewicht:                    | 179 g   |
| Korrosionsschutz:           | Überzug aus Zirkoniumnitrid (ZrN)                                   |
| Weitere Kontaktmaterialien: | 316-L Edelstahl, Delrin, Viton                                      |
| Messmodus:                  | linear, logarithmisch, ereignisbasiert, benutzerbestimmt (30 items) |
| Messintervall:              | 0,5 s bis 99 h  |

Der Levelogger misst grundsätzlich den Gesamtdruck in der verschlossenen Bohrung, also die Summe aus hydrostatischem im und dem Luftdruck auf das Aquifersystem. Während die SEBA-Sonden bei den Messungen an offenen Pegeln eine automatische Luftdruckkorrektur der Daten vornehmen, muss an der TSB Bad Elster dieser Arbeitsschritt nachträglich durchgeführt werden. Der Luftdruck und andere für Korrelationen notwendigen Klimadaten werden im gleichen Zeittakt (15 min) registriert wie die Druckwerte. Besonders bei gashaltigen Grundwässern in geklüfteten Aquiferen bewirkt ein sinkender Luftdruck ein Ansteigen des Grundwasserspiegels bzw. – bei permanenten hydraulischen Senken (z. B. Quellen) – eine Erhöhung der Gasflussrate (= geringerer Gegendruck auf das lokale Fluidsystem). Umgekehrt wirken steigende Luftdruckwerte. Seit Inbetriebnahme der Datenfernübertragung (3.2.3) brauchen nur die Messstellen RO1 und BE\_TSB mindestens im 4-Wochen-Abstand zum Auslesen der Daten aufgesucht zu werden. Allerdings werden in größeren Abständen an allen Pegeln Wasserstandskontrollmessungen mittels Kabellichtlot durchgeführt.

### 3.2.3 Installation der Datenfernübertragungsmodule

Nach der Testphase des erweiterten Messnetzes, die aufgrund der starken Seismizität von August/September 2011 im Raum Nový Kostel und Luby (CZ) so erfolgreich verlief, wurde die Ausrüstung geeigneter Stationen mit Datenfernübertragung bereits am 15. November 2012 vollzogen. Dadurch war mehr Zeit für die Beherrschung von technischen und Übertragungsproblemen sowie für die Einarbeitung eventueller Übernahmekandidaten für das Messnetz nach Projektabschluss (11/2013) vorhanden.

Zwar wurden an keiner der Stationen des erweiterten GW-Messnetzes bisher seismogene Vorläufereffekte registriert, jedoch die seismische Sensitivität an drei Standorten anhand ko-seismischer Grundwasserstandsschwankungen eindeutig nachgewiesen (KOCH 2012). Entsprechend wurden die Stationen Gürth (GUE), Hennebach (HEB) und Vorfeldbohrung Bad Elster (BE\_VOR) für die Datenfernübertragung vorgesehen. Die Daten der Stationen sind sowohl per Direktwahl zur jeweiligen Station als auch über das SEBA-Hydrocenter jederzeit abrufbar (vergl. Kap. 3.2.3.1).

#### 3.2.3.1 Technik

Bereits die Grundausrüstung der Stationen GUE, HEB und BE\_VOR war 2011 so gewählt worden, dass eine unkomplizierte Nachrüstung mit Datenfernübertragungskomponenten möglich ist. Neben den installierten GW-Druck-/Temperatur-Loggern Dipper T3 (KOCH 2012) bietet die Fa. SEBA Hydrometrie (Kaufbeuren) dafür die passenden Module SlimCom als Nachrüstsätze an (Abbildung 11, Tabelle 3). Durch ein umfangreiches Sortiment an Antennen- und Einbauteilvarianten sind die Geräte auch an nichtstandardisierte Brunnenköpfe anpassbar.

Als Zugangsmöglichkeiten wurden sowohl die Option des direkten Kontaktes zu den Messstellen mittels Verbindungssoftware SEBAconfig als auch die Möglichkeit des Datenabrufes über das SEBA-Hydrocenter gewählt. Aus Gründen der Energieeffizienz gehen gegenwärtig die Modems der Stationen BE\_VOR, GUE und

HEB montags, dienstags, donnerstags und freitags zwischen 10:10 und 11:00 MEZ jeweils für 10 min ans Netz. In diesen Zeitfenstern werden regelmäßig vom SEBA-Hydrocenter die Daten abgerufen bzw. können die Stationen direkt angewählt werden. Besonders die Internetplattform bietet einen einfachen, passwortgeschützten Zugriff auf alle Daten über die Website <http://www.seba-hydrocenter.de/projects/login.php>, was vor allem nach Übergabe der Stationen zum Projektende für den neuen Betreiber von Vorteil ist. Bis auf eine einmalige Einrichtungsgebühr ist die regelmäßige Nutzung des Hydrocenters kostenlos.



**Abbildung 11: SEBA-SlimCom-Modul für die Datenfernübertragung als Nachrüstset zum p/T-Dipper T3**

Rechts: Standardantenne, dahinter der Stecker für die Direktverbindung zu PC bzw. Notebook (Quelle: Verkaufsprospekt Fa. SEBA Hydrometrie, Kaufbeuren).

**Tabelle 3: Technische Daten GFÜ-Einheit SlimCom (Angaben Fa. SEBA Hydrometrie)**

|                           |   |
|---------------------------|---|
| <b>Gehäuse</b>            | Aluminium, IP67   |
| Abmessungen               | Standard: Ø 35 mm, Höhe 350 mm<br>inkl. Antenne: Ø 35 mm, Höhe 390 mm   |
| <b>Modem</b>              | GSM Standard, 850/900MHz/1800/1900MHz (GSM, Quadband), GPRS   |
| <b>Betrieb</b>            | 1,8/3 V-SIM-Karte   |
| <b>Antenne</b>            |   |
| Standard                  | integriert, robust und witterungsbeständig  |
| Puck                      | zur Montage auf Brunnen-/Pegeldeckel, robust, witterungsbeständig   |
| <b>Schnittstellen</b>     |   |
| Standard                  | RS 485  |
| Option                    | Bluetooth   |
| <b>SMS-Alarm</b>          | 8 x SMS-Alarm auf Mobiltelefon<br>SMS-Alarm auf FAX-Gerät   |
| <b>Zeitschlitz</b>        | frei programmierbar   |
| <b>Stromversorgung</b>    |   |
| Standard                  | 3 x 1,5 V Alkali-Mangan-Batterien<br>Standzeit: > 2 Jahre bei 1 Abruf/Tag   |
| Option                    | 2 x 3,6 V Lithium-Batterien<br>Standzeit: > 8 Jahre bei 1 Abruf/Woche<br>(abhängig von der Qualität der GSM-Verbindung) |
| <b>Betriebstemperatur</b> | - 20° bis +70° C  |

### 3.2.3.2 Besonderheiten an den Standorten des erweiterten Messnetzes

Nach eingehender technischer Recherche und Überprüfung der Netzabdeckung vor Ort mittels eines Testmobiltelefons und entsprechender Telekom-Datenkarte wurde der Fa. Böhm (Plauen) der Auftrag für die drei speziellen Daten-SIM-Karten erteilt. Letztere wurden direkt an die Fa. SEBA geliefert, dort in die SlimCom-Modems eingebaut und standortbezogen konfiguriert.

Tabelle 4 gibt einen Überblick über gestalterisch-technische Besonderheiten und die Unterschiede in den Mobilfunkempfangsbedingungen an den Messstellen Bad Elster (Vorfeld), Gürth und Hennebach. Während sich BE\_VOR in einer Blechhütte befindet, wo die Empfangsbedingungen im deutschen Netz so gut sind, dass die integrierte Stabantenne des SlimCom-Moduls ausreicht, sind an den Pegeln HEB und GUE massive Brunnen-

deckel vorhanden, unter denen der Funkempfang instabil bis unmöglich ist. Abhilfe bot hier jeweils die Montage einer zusätzlichen Puckantenne auf dem Pegeldeckel (Abbildung 12), bei der Mitarbeiter der Bad Brambacher Mineralquellen GmbH technische Hilfe leisteten.

Empfangsprobleme im deutschen Netz gibt es am Brunnen Hennebach, der sich unmittelbar an der Grenze zu Tschechien befindet. Hier musste eine SIM-Karte mit Roaming-Funktion gewählt werden, um eine Datenübertragung überhaupt zu realisieren. Der Mobilfunkempfang am Pegel Gürth war erst Ende November 2012 möglich, nach der Inbetriebnahme des zuvor auf der Anhöhe „Gürther Kreuz“ errichteten Funkmastes.

Zu den in Tabelle 4 angeführten Kosten kommen noch die Anrufgebühren für denjenigen Telefonanschluss hinzu, der mittels SEBAconfig-Software direkten Kontakt mit den Stationen aufnimmt. Bis zum Ende des Forschungsvorhabens werden diese Beträge aus dem Projekthaushalt finanziert. Danach müsste der seit 01.08.2012 für 24 Monate laufende Vertrag mit der Telekom AG vom zukünftigen Betreiber des seismohydrologischen Grundwassernetzes übernommen werden.

**Tabelle 4: Messstandorte und ihre technische Ausrüstung zur Datenfernübertragung**

| Messstelle<br>[Kennung]               | Geografische<br>Koordinaten<br>[°] |            | Datenlogger<br>SEBA-<br>Dipper T3 | Variante<br>SEBA-Daten-<br>übertragungsmodul         | Tarif für<br>Telekom-Datenkarte<br>(Fa. Böhm, Plauen) | Voraussichtliche<br>monatliche<br>Kosten |
|---------------------------------------|------------------------------------|------------|-----------------------------------|--|---|--|
|                                       | N                                  | E          | Nr.                               |  |   |  |
| Bad Elster Vorfeldbohrung<br>[BE_VOR] | 50.289                             | 12.24<br>4 | C45738                            | SlimCom sl000810<br>mit integrierter Standardantenne | Data 30 (national), inkl. 30<br>MB/Monat              | 5,00 €                                   |
| Gürth<br>[GUE]                        | 50.255                             | 12.25<br>0 | C45713                            | SlimCom sl000812<br>mit Puck-Antenne                 | Data 30 (national), inkl. 30<br>MB/Monat              | 5,00 €                                   |
| Hennebach [HEB]                       | 50.245                             | 12.35<br>6 | C45679                            | SlimCom sl000811<br>mit Puck-Antenne                 | Data 10 (europa),<br>inkl. 10 MB/Monat                | 13,50 €                                  |
|                                       |                                    |            |                                   |  | Einmalige<br>Anschlussgebühren                        | 39,00 €                                  |





**Abbildung 12: Grundwassermessstelle Pegel Gürth (GUE)**

*Links: SEBA-Druck-/Temperatursonde Dipper T3 mit SlimCom-Modul für die Datenfernübertragung und Brunnenrohr, auf dessen Deckel die Puckantenne montiert ist. Rechts: Detailansicht von p/T-Sonde (r) und Slim-Com-Modul (l)*

## 4 Seismische und hydrologische Situation im Untersuchungsgebiet 2012 und 2013

### 4.1 Seismizität

Verglichen mit 2011 war das Jahr 2012 von einer sehr geringen Seismizität im Raum Nový Kostel und im Oberen Vogtland geprägt. So wurden zwischen 01.01. und 31.12.2012 lediglich 158 Ereignisse mit Magnituden  $> 0$  gemessen, darunter 21 mit  $ML > 1$  ( $ML_{\max} = 2.1$ ). Beben mit  $ML > 3$  traten nicht auf. Diese und folgende Angaben sind von der Internetseite des Geophysikalischen Observatoriums Collm der Universität Leipzig unter der Rubrik Sachsenetz (<http://home.uni-leipzig.de/collm/>) abrufbar.

Dabei konzentrierten sich diese Ereignisse überwiegend auf Anfang März 2012: ( $ML > 0$ ,  $n = 65$ ,  $ML > 1$ ,  $n = 15$ ). Erfahrungsgemäß waren bei der geringen Stärke und Anzahl der Beben anomale Reaktionen im Grundwasser- und Gasregime an den beobachteten Standorten nicht zu erwarten. So wurden neben den typi-

schen Abhängigkeiten von Luftdruck, Niederschlägen bzw. Wasserständen benachbarter Vorfluter keine seismisch induzierten anomalen Effekte gemessen.

Im Jahr 2013 kam es besonders im Frühjahr im Raum Nový Kostel und Luby zu ausgeprägten Schwarmbeben mit einer maximalen Magnitude von 2.4. Bis zum 19. Mai wurden 195 Ereignisse mit  $ML > 0$  (davon 83 mit  $ML^0 > 1$ ) registriert, die sich vor allem auf die zweite April- und die erste Maihälfte konzentrierten. Zwischen 30. August und 1. September gab es noch einen kurzen Schwarm östlich von Luby mit 51 Ereignissen  $ML > 0$ , davon 13 mit  $ML > 1$  ( $ML_{max} = 2.1$ ). Auch hier konnten an keiner Messstelle seismisch induzierte hydrologische Anomalien identifiziert werden. Möglicherweise ist hierfür die vergleichsweise geringe Zahl von Ereignissen mit hohen Magnituden verantwortlich. Allein bei dem Schwarm vom Spätsommer 2011, wo ko-seismische Anomalien an drei der neuen Pegel aufgetreten waren, gab es 34 Ereignisse mit  $ML > 2.5$  (davon 10 mit  $ML > 3$ ).

## 4.2 Hydrologie und Grundwasserstände

Nach einem schneereichen, nicht besonders kalten Januar 2012 (N: 103,5 mm; Tm:  $-0,9$  °C) waren die folgenden drei Monate mit insgesamt nur 73 mm Niederschlag relativ trocken, sodass die üblicherweise durch die Schneeschmelze hervorgerufene Erhöhung der Grundwasservorräte nicht bis in den Sommer hinein vorhielt. Dies machte sich in einem relativ zeitigen saisonalen GW-Rückgang an allen Messstellen bemerkbar. Daran änderte sich auch im niederschlagsreichen Juli nichts (N: 92,7 mm), weil die für diese Jahreszeit typischen starken Gewitterschauer durch das überwiegend starke Geländegefälle sowie die hohe Evaporation und Evapotranspiration (entwickelte Vegetation) kaum oder nur kurzzeitig grundwasserwirksam wurden. Schon der Folgemonat August war mit  $N = 41,7$  mm und  $Tm = 16,7$  °C wieder wesentlich trockener und sehr warm. Mit Niederschlägen von 54,4 mm lag dann auch der September deutlich unter dem langjährigen Durchschnitt von 1982–2011 (64,7 mm). Besonders die relativ feuchten Monate November und Dezember (schneereich) sorgten dafür, dass die Niederschlagssumme mit 723,5 mm für 2012 einen Wert erreichte, der um 2,9 % über dem langjährigen Mittel der Station Bad Brambach liegt ( $n = 42$ ).

Die Grundwasserneubildung im Frühjahr 2013 profitierte vor allem von dem schneereichen Dezember 2012 und dem feuchten, später schneereichen Januar 2013. Bis auf eine milde Periode Anfang jenes Monats setzte die Schneeschmelze 2013 außergewöhnlich spät ein. Frost und Schnee kennzeichneten den Wetterablauf bis in die erste Aprildekade hinein. Eine Hochwasserwetterlage Ende Mai/Anfang Juni brachte für Mai und Juni 2013 Niederschlagsmengen von 132,2 bzw. 111,5 mm und ließ die GW-Stände auf für diese Jahreszeit außergewöhnlich hohe Werte ansteigen. Neben der hohen Vorfeuchte der Böden trug dazu besonders in Gürth die Behinderung des hypodermischen Abflusses durch den stark angeschwollenen benachbarten Vorfluter bei (Gürther Bach). Im Gegensatz dazu war der Juli an 26 Tagen niederschlagsfrei. Die N-Summe von 44,8 mm wurde überwiegend durch drei gewittrige Starkregenereignisse erreicht, die aber bis auf den Brunnen Hennebach und drei Bad Brambacher Messstellen nicht grundwasserwirksam waren. Ähnliches gilt auch für den August mit neun Niederschlagstagen und einer N-Summe von 60,8 mm. Generell setzte sich der saisonspezifische, etwa seit der zweiten Junihälfte herrschende GW-Abwärtstrend fort. Lediglich an der Station Bad Elster, Vorfeld (BE\_VOR) gibt es bis zur Gegenwart einen langsamen GW-Anstieg nach dem rapiden Absinken des Wasserspiegels während der Bohrung des neuen Nachbarpegels. Der Ausgangszustand ist dort noch nicht wieder erreicht (vergl. Kap. 5.2.3).

# 5 Messergebnisse

Bevor zuverlässige Aussagen zu einer Reaktion des Grundwasserstandes auf seismotektonische Vorgänge getroffen werden können, bedarf es nicht nur einer signifikanten lokalen Seismizität, sondern vor allem ausreichend langer Backgroundmessungen an den neuen Standorten. Diese sind die Voraussetzung, um vor allem meteorologische Einflüsse auf das Grundwasserregime (Luftdruck, Niederschläge) erkennen und im Falle seismisch induzierter Anomalien entsprechend separieren zu können.

Die Daten aus dem erweiterten Grundwassermessnetz geben nach etwa zwei Jahren Beobachtungsdauer einen guten Einblick in das unterschiedliche Verhalten der Standorte gegenüber Niederschlags-, Luftdruck-, Temperatur- und Erdgezeiteneinflüssen. Dies soll in den folgenden Abschnitten für die einzelnen Brunnen und Pegel des erweiterten Messnetzes diskutiert werden. Die Grundwasserstände weisen eine Schwankungsbreite zwischen 1,02 m (HEB) und 6,58 m (GUE) auf, was hauptsächlich auf Unterschiede in der Lage, der Morphologie und der Bewaldung der oberirdischen Einzugsgebiete sowie auf die hydraulischen Charakteristika der Grundwasserleiter selbst zurückzuführen ist (s. a. Tabelle 2).

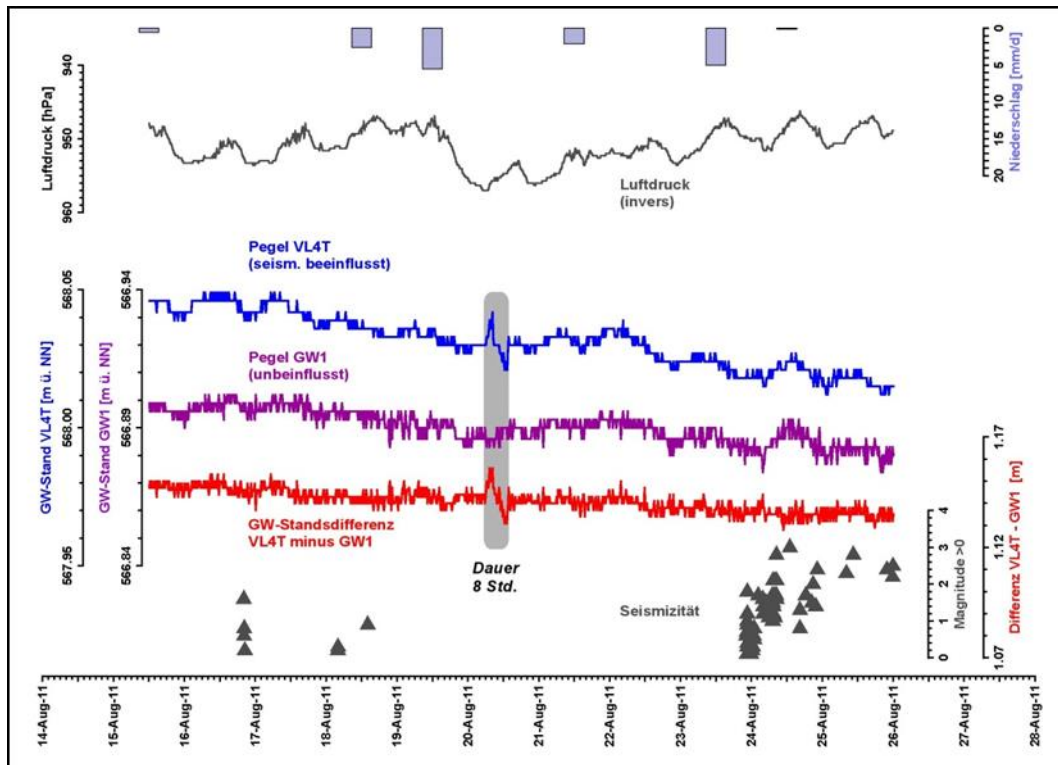
Besonderheiten gibt es in Bad Elster. Unmittelbar neben der Vorfeldbohrung (BE\_VOR) wurde im Frühjahr 2013 eine weitere, 450 m tiefe Bohrung zur Überwachung des Einflusses der Thermalsolebohrung bei deren geplanter Nutzung niedergebracht. Dadurch ist an BE\_VOR der Grundwasserspiegel um über 5 m gefallen und steigt nach den Bohrarbeiten nur langsam wieder an (vergl. Kap. 5.2.3).

An der 1200-m-Thermalsolebohrung (BE\_TSB) wurden im Januar 2013 umfangreiche geophysikalische Untersuchungen durchgeführt, bei denen der Arteser geöffnet war und tagelang überlief. Durch den Soleaufstieg wurde dabei das Wasser stark aufmineralisiert, was zu einem Dichteanstieg in der Wassersäule und einer damit verbundenen Abnahme des Kopfdruckes von 9 m auf etwa 2–3 m ü. Gel. führte (Messpunkt ca. 1,3 m u. BOK). Entsprechend sind auch hier die Druckschwankungsbreiten von 2,33 m (KOCH 2012) auf 10,06 m gestiegen (Tabelle 2).

Die in den folgenden Abbildungen dargestellten Erdbebendaten sind von der Internetseite des Geophysikalischen Observatoriums Collm der Universität Leipzig unter der Rubrik Sachsennetz (<http://home.uni-leipzig.de/collm/>) abrufbar. Niederschlag, Luftdruck und -temperatur wurden an der Klimastation Bad Brambach, Kurpark, gemessen.

## 5.1 Bad Brambach (Pegel VL4T und GW1)

Nur zwei Wochen nach Beginn der Testmessungen Anfang August 2011 begann eine Periode starker Seismizität, die am 23.08.2011 bei Nový Kostel ihren Anfang nahm und sich während der folgenden Tage Richtung Norden bzw. Nordosten (östlich von Luby) verlagerte. Die stärksten Erdbeben mit jeweils  $ML = 3.8$  bzw.  $ML = 3.7$  ereigneten sich am 26.08.2011 um 01:33 MESZ und am 04.09.2011 um 05:52 MESZ. Die Herdtiefen lagen bei 7,8 km bzw. 6,4 km.



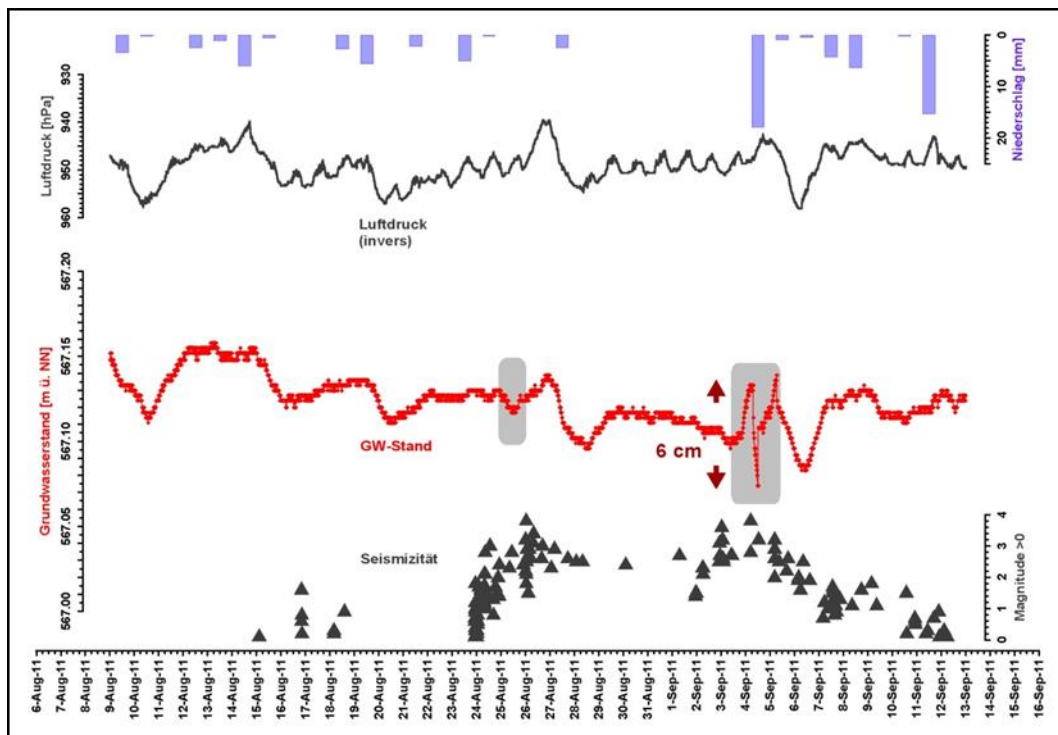
**Abbildung 13: Grundwasserstandsanomalie am Pegel VL4T, Kurpark Bad Brambach**

3,5 Tage vor Beginn des Bebenschwarms vom 24.08.2011 (Wasserstandsschwankung  $\pm 2,5$  cm). Der Vergleichspegel GW1 zeigt, dass die Anomalie nicht durch Niederschlags- oder Luftdruckeinflüsse entstand.

Im Vorfeld des Bebenschwarms ist in Bad Brambach am GW-Pegel VL4T eine typische geotektonisch induzierte, wenn auch kleine Grundwasserstandsanomalie registriert worden (20.08.11, Dauer ca. 8 Stunden, Abbildung 13). Sie ist nicht durch Luftdruck oder Niederschlagseinflüsse generiert worden. Andernfalls würde sich am Pegel GW1 ein ähnlicher Verlauf gezeigt haben. Die Vorlaufzeit von drei bis vier Tagen ist ungewöhnlich gering und nur mit jener vor dem kurzen Januar-Schwarm von 1997 zu vergleichen (KOCH & HEINICKE 1999, 2010). Dies ließ den vorsichtigen Schluss zu, dass es möglicherweise nicht zu einer so langen Bebenperiode wie 2000 oder 2008 kommen würde. Damals begannen die Anomalien 26 bis 30 Tage vor den ersten Beben, dauerten vier Wochen bzw. mehrere Monate und erreichten Maxima von 25 cm (KOCH & HEINICKE 2010, 2011). Abgesehen davon, dass die aktuellen Daten erst am 24.08.2011 ausgelesen wurden, hätte die geringe Ausprägung der Anomalie nach den bisherigen Erfahrungen eine „Vorwarnung“ nicht gerechtfertigt.

Auch an der 200-m-Bohrung im Kurpark Bad Brambach wurden erstmals seismisch induzierte hydraulische Effekte registriert (Abbildung 14). So zeigt der Grundwasserstand am 25.08.2011 einen kleinen, nicht zum Luftdruckverlauf passenden Rückgang, der zwischen den beiden ausgeprägten Abschnitten des ersten Bebenschwarms liegt. Starke ko-seismische Schwankungen treten zwischen dem 03. und 05.09.2011 auf, wo der luftdruck- bzw. niederschlagsbedingte GW-Anstieg durch einen abrupten Rückgang von über 6 cm unterbrochen wird. Die GW-Rückgangsphase setzt praktisch zeitgleich mit dem stärksten seismischen Ereignis des zweiten Bebenschwarms ein (ML= 3,8). Dies kann auf eine kurzzeitig verstärkte Freisetzung von Gasblasen aus der CO<sub>2</sub>-übersättigten Wassersäule zurückgeführt werden, wie sie auch bei Probenahmen an dieser Bohrung schon mehrfach beobachtet werden konnte (HEINICKE et al. 2002).





**Abbildung 14: Grundwasserstände an der 200-m-Bohrung im Bad Brambacher Kurpark mit Luftdruck, Niederschlag und der lokalen Seismizität**

*Der Grundwasserstand zeigt am 25.08.2011 einen kleinen, nicht zum Luftdruckverlauf passenden Rückgang. Starke ko-seismische Schwankungen zwischen dem 03. und 05.09.2011 sind offenbar durch eine plötzliche Entgasung der Wassersäule hervorgerufen worden.*

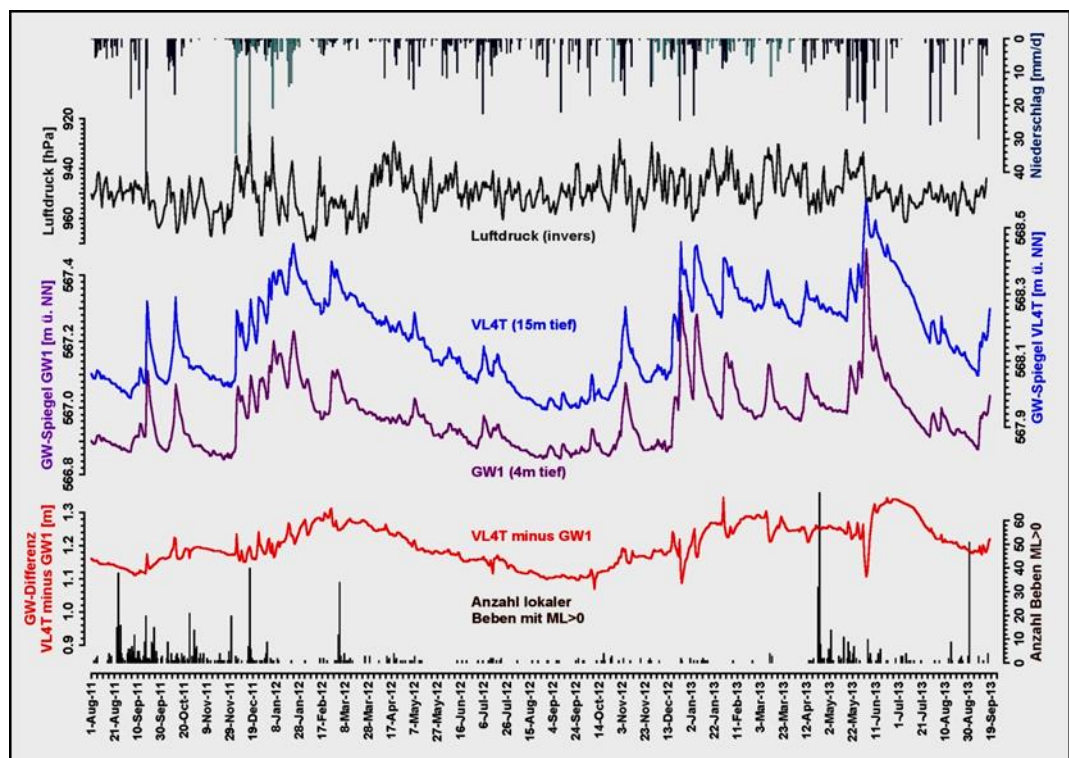
Diese Gasfreisetzung kann durch einen Druckimpuls und/oder ko-seismische Erschütterungen ausgelöst worden sein. Darauf deutet auch die Tatsache hin, dass der Wasserspiegel bereits am 06.09.2011 wieder sein vom Luftdruckverlauf dominiertes Niveau erreichte, nachdem die Anomalie am 04.09.2011 durch den Einfluss des Starkregens überlagert worden war. Damit unterscheidet sich dieser Mechanismus von jenem an der Vorfeldbohrung Bad Elster (vergl. Kap. 5.2.2). Die GW-Anomalien an der 200-m-Bohrung sind keine realen Vorläufereffekte wie am Pegel VL4T. (vergl. Abbildung 13), wenngleich die für die oberflächennahen hydraulischen Effekte primär maßgeblichen Prozesse im tiefen Fluidsystem durchaus vor Beginn des Bebenschwarms begonnen haben könnten (Abbildung 14).

Nach dem Erdbebenvorläufereffekt von etwa 3,5 Tagen am 20.08.2011 (Abbildung 13) traten am Pegel VL4T keine weiteren seismogenen GW-Anomalien auf, die mit denen der Jahre 2000 und 2008 vergleichbar wären (Abbildung 15; KOCH et al. 2003, KOCH & HEINICKE 2010).

Das wird besonders an der Differenzganglinie zwischen dem seismisch sensitiven Pegel VL4T und dem Vergleichspegel GW1 deutlich, deren Abweichung von einem theoretisch horizontalen Verlauf im wesentlichen auf unterschiedliche GW-Retentionsverhältnisse an den beiden Standorten zurückzuführen ist. Besonders ausgeprägt ist dieser Effekt nach der Starkregenperiode Anfang Juni 2013, die zu dem Katastrophenhochwasser in Süd- und Mitteldeutschland führte. Einzelne negative Spitzen werden durch die schnellere Reaktion von VL4T auf den Anstieg des Bachwasserstandes nach Starkregen oder Schneeschmelze verursacht. Verglichen mit anderen Jahren sind die Grundwasserstände im Sommer 2013 durch das Juni-Hochwasser regional außergewöhnlich hoch. Besonders die lange Dauer dieses Niveaus über etwa neun Monate bedeutet einen anhaltend hohen hydraulischen Gegendruck auf das Aquifersystem und kann den Aufstieg von tiefen

Fluiden behindern. (KOCH & HEINICKE 2010) diskutieren ausführlich, wie dies zur Triggerung von lokalen Erdbeben führen kann, einen kritischen tektonischen Spannungszustand vorausgesetzt.

Wegen eines technischen Defektes des SEBA-Dippers T2 am Pegel VL4T wurde diese Sonde Anfang August 2012 durch den vierten, als Reserve vorgesehenen SEBA-p/T-Dipper T3 ersetzt, wie er auch an den Stationen des erweiterten GW-Messnetzes verwendet wird. Damit ergeben sich auch für diesen Standort zusätzliche Vorteile:



**Abbildung 15: Grundwasserstände, GW-Differenzkurve, Luftdruck und Niederschlag Bad Brambach, Tagesmittel 2011-2013**

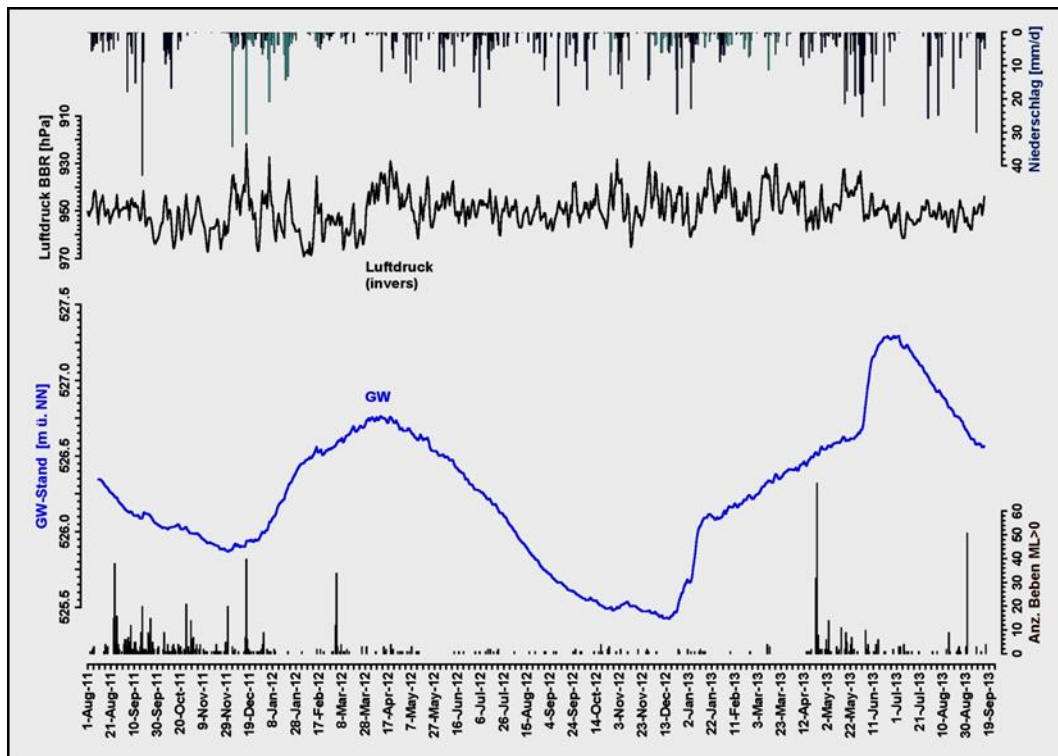
Die Abweichung der Differenzlinie vom (theoretisch) horizontalen Verlauf ist im Wesentlichen auf unterschiedliche Retentionsverhältnisse am Pegel VL4T (seismisch sensitiv) und dem Vergleichspegel GW1 zurückzuführen. Besonders ausgeprägt ist dieser Effekt nach den Starkregen Anfang Juni 2013 (Niederschlag: Regen – dunkelblau, Schnee – hellblau; Seismizität: Nový Kostel/Luby).

## 5.2 Das erweiterte Grundwassermessnetz

### 5.2.1 Brunnen Rohrbach 1 (RO1)

Dank des Datenaustausches mit der Umwelt GmbH Vogtland Weischlitz war es am Brunnen Rohrbach 1 möglich, gegenüber den anderen Standorten einen Datenvorlauf auszuwerten, der bis Ende April 2011 zurückreicht (KOCH 2012). Zur besseren Vergleichbarkeit mit den übrigen Pegeln ist in Abbildung 16 der Zeitraum August 2011 bis September 2013 dargestellt, der je zwei typische Perioden des Grundwasserrückganges und der Grundwasserneubildung umfasst. In Rohrbach zeigen sich neben dem GW-Langzeitrend überwiegend geringe Einflüsse ausgeprägter Luftdruckvariationen, deren Wirkung mit sinkendem Wasserspiegel noch abnimmt (KOCH 2012). Auf einzelne Starkniederschläge reagiert der Grundwasserstand kaum. Dies ist typisch für die Pufferwirkung eines überwiegend bewaldeten Einzugsgebietes vom Hochflächentyp. Üblicherweise

wird das Maximum des Grundwasserstandes unmittelbar nach der Schneeschmelzperiode erreicht, das Minimum zwischen Oktober und Dezember. Eine Ausnahme bildet der starke GW-Anstieg auf den Maximalwert von 527,30 m ü. NN etwa drei Wochen nach den Niederschlägen, die zum Katastrophenhochwasser Anfang Juni 2013 in Mitteldeutschland und Bayern führten. Dadurch erhöhte sich die maximale Differenz zwischen GW-Maximum und -Minimum von bisher 1,82 m auf 1,88 m (Tabelle 2). Die fehlende Reaktion dieser Bohrung auf die Seismizität vom Spätsommer 2011 führte zu der Entscheidung, an dem Standort vorerst weder eine nachrüstfähige Dipper-T3-Sonde noch ein Datenfernübertragungsmodul zu installieren. Er wurde aber weiterhin im Untersuchungsprogramm belassen, weil er zusammen mit Gürth einen sehr ruhigen, von kurzfristigen meteorologischen Ereignissen praktisch unbeeinflussten Verlauf zeigt (s. a. Kap. 5.2.2). Dies und die geringe innerjährliche GW-Schwankungsbreite gestatten eine relativ leichte Identifizierung potenzieller seismogener Anomalien.



**Abbildung 16: Grundwasserstand, Luftdruck und Niederschlag am Brunnen Rohrbach 1, Tagesmittel 2011-2013**

*Typisch für die Pufferwirkung eines überwiegend bewaldeten Einzugsgebietes ist die geringe Wirkung einzelner Starkniederschläge auf den Grundwasserstand (Niederschlag: Regen – dunkelblau, Schnee – hellblau; Seismizität: Nový Kostel/Luby).*

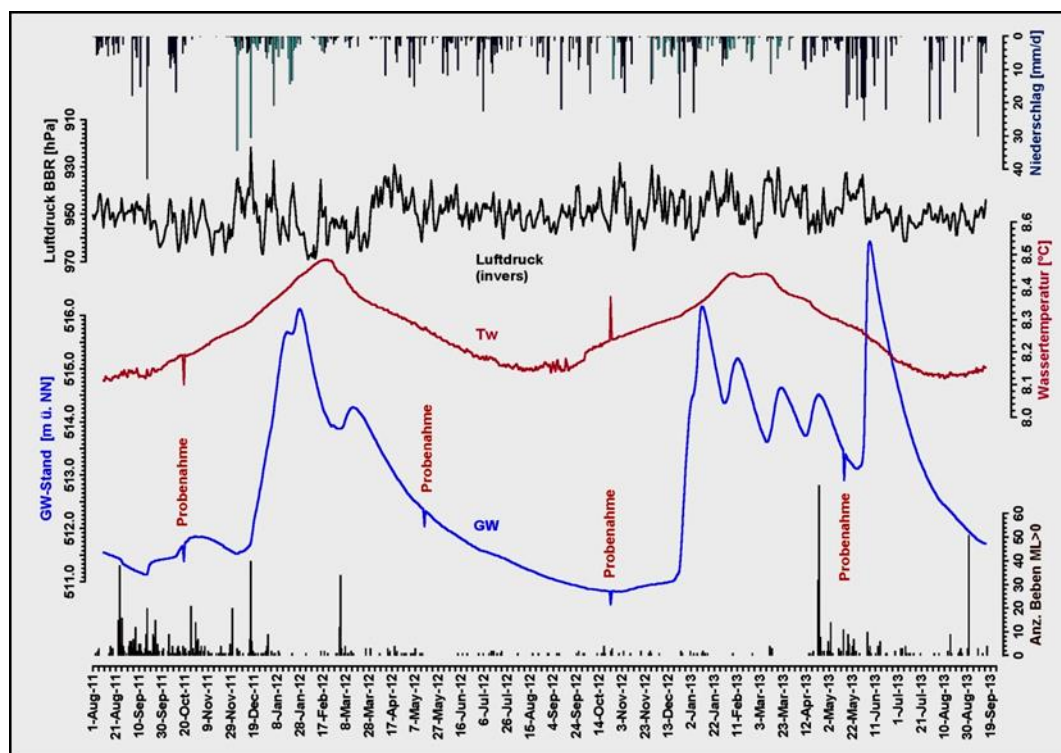
### 5.2.2 Pegel Gürth (GUE)

Nach der typischen Grundwasserneubildungsphase, besonders als Reaktion auf die Starkniederschlagsperiode vom Dezember 2011, zeigt sich am Pegel Gürth ein nahezu unbeeinflusster GW-Rückgang, der nur von einem durch die Frühlingschneeschmelze verursachten Anstieg unterbrochen wird (Abbildung 17). Mitte Oktober 2012 wird das Minimum von 510,81 m ü. NN erreicht (Tabelle 2). Eine erste Grundwasserneubildungsphase beginnt Ende Dezember 2012. Ihr folgen bis April mehrere Abschnitte ansteigenden GW, die von Regen bzw. Schneeschmelze hervorgerufen wurden. Der starke Dauerregen Ende Mai/Anfang Juni 2013 ließ den Grundwasserstand auf den Maximalwert von 517,39 m ü. NN ansteigen. Neben der hohen Vorfuchte der Böden trug dazu besonders die Behinderung des hypodermischen Abflusses durch den stark angeschwollenen benachbarten Gürther Bach bei. Damit ist Gürth der Pegel mit der höchsten Wasserstandsdifferenz:

6,58 m (Tabelle 2). Ungewöhnlich ist auch, dass das winterliche Lufttemperaturminimum erst etwa sieben Monate später im Grundwasser widergespiegelt wird (siehe auch Abbildung 23). Die offenbar vom Zustrom jungen, kalten Wassers verursachten Temperaturfluktuationen sind nur bei stärkerer zeitlicher Auflösung sichtbar. Sie werden nach Eintritt des Temperaturminimums wieder deutlich geringer. Der Luftdruckeinfluss ist wie auch die nachgewiesene Erdzeitenwirkung vernachlässigbar im Vergleich zu potenziellen seismogenen GW-Schwankungen, wie sie im August 2011 registriert werden konnten (KOCH 2012).

In der Schwarmbebenperiode vom August 2011 zeigt der Pegel Gürth ein signifikantes Absinken des Grundwasserspiegels um 9 cm (Abbildung 18). Allerdings beginnt dieses nicht erst beim zweiten, sondern bereits unmittelbar mit dem Maximalereignis des ersten Bebenschwarms (ML = 3.8) in der Nacht vom 25. zum 26.08.2011. Der Rückgang dauert etwa 36 Stunden. Die Tatsache, dass die Wasserstände nach dem ko-seismischen Break nicht wieder ihr vorseismisches Niveau erreichen (vgl. Kap. 5.1, Abbildung 13 und Abbildung 14) spricht gegen kurzzeitige Entgasungserscheinungen, sondern offenbar für eine Vergrößerung des fluidgefüllten Kluft-/Porenraumes infolge der seismischen Erschütterungen. Dabei setzt sich der jahreszeitlich bedingte GW-Rückgang fort, lediglich um den seismisch induzierten Absenkungsbetrag parallel verschoben.

Damit bestätigt sich der bisherige Eindruck, dass es sich in Gürth um ein verhältnismäßig großes Grundwasserereinzugsgebiet mit relativ geringen Porositäten bzw. Kluftdurchlässigkeiten und mächtigen Deckschichten handelt, besonders im Talbereich. Dafür spricht auch die Morphologie des Geländes, die durch ein starkes Gefälle der Talflanken gekennzeichnet ist. Besonders der sehr stetige, von kurzen Starkregen unbeeinflusste GW-Verlauf spricht für die seismohydrologische Eignung der Messstelle. Der Pegel Gürth gehört zum sächsischen Grundwasserbeobachtungsnetz. Die zweimal jährlich stattfindenden und jeweils angekündigten Beprobungen (Abbildung 17) stellen keine Beeinträchtigung für das seismohydrologische Beobachtungsregime dar.



**Abbildung 17: Grundwasserstand, -temperatur, Luftdruck und Niederschlag am Pegel Gürth, Tagesmittel 2011-2013**

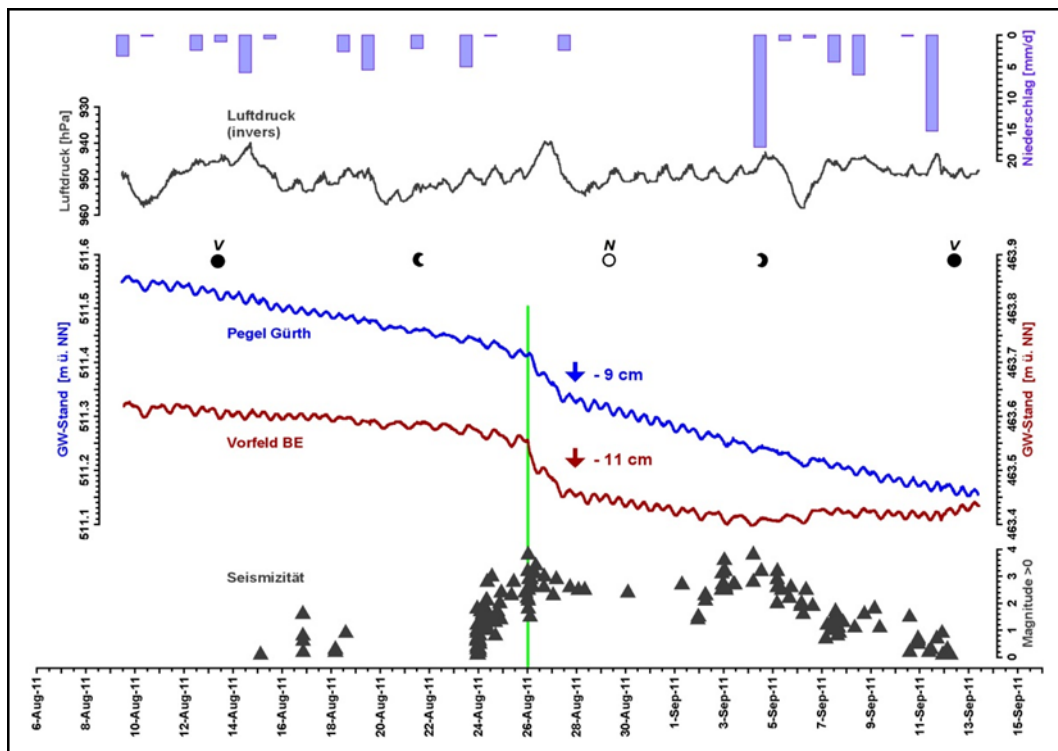
*Der GW-Stand wird praktisch nicht durch Luftdruck und kurzzeitige Niederschläge (außer extreme Starkregen) beeinflusst (Niederschlag: Regen – dunkelblau, Schnee – hellblau; Seismizität: Nový Kostel/Luby).*



### 5.2.3 Vorfeldbohrung Bad Elster (BE\_VOR)

Die Vorfeldbohrung Bad Elster wurde im August 2011 ebenfalls als seismisch sensitiv identifiziert, obwohl sie von allen Messpunkten am weitesten vom Epizentrum nordöstlich von Nový Kostel entfernt liegt. Verglichen mit Gürth zeigen Grundwasserstand und Lufttemperatur jedoch Verläufe, wie sie für einen stärker von oberflächennahem Grundwasser geprägten Aquifer typisch sind (Abbildung 19).

Bis Dezember 2012 lagen die GW-Stände mit etwa 2 bis 2,5 m unter Gelände deutlich höher als in Gürth (3 bis 8 m) und wiesen in der Grundwasserneubildungsperiode steilere Anstiegs- und Abklingphasen auf. Die innerjährlichen Wassertemperaturdifferenzen betragen 0,8 K und sind damit doppelt so hoch wie in Gürth. Dagegen betrug die zeitliche Verschiebung zwischen den Minima der Luft- und Wassertemperaturen nur vier Monate (Gürth: sieben Monate, siehe auch Abbildung 23). An BE\_VOR lag demnach eine wesentlich flachere Zirkulation vor, die vom Flussschotteraquifer der Weißen Elster geprägt wurde und trotz verhältnismäßig tief liegender, aber kurzer Filterstrecke für den hohen Anteil oberflächennahen Grundwassers verantwortlich war. Ähnlich wie in Gürth sind der geringe Luftdruckeinfluss und die bei höherer zeitlicher Auflösung sichtbare Erdzeitenwirkung zu bewerten (Abbildung 18), die auch hier die sichere Identifikation seismogener Anomalien nicht beeinträchtigte.

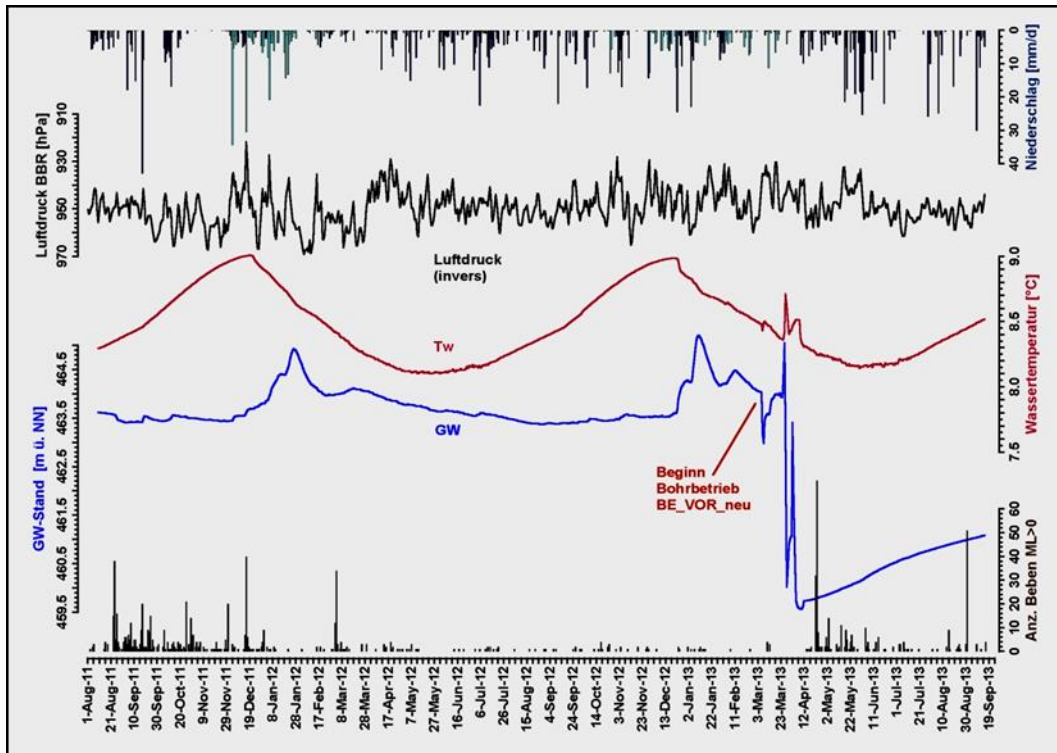


**Abbildung 18: Grundwasserstände am Pegel Gürth (GUE) und der Vorfeldbohrung Bad Elster (BE\_VOR) mit Luftdruck, Niederschlag (BBR) und der lokalen Seismizität im August/September 2011**  
*Unmittelbar mit dem starken Bebenschwarm ( $ML_{max}=3,8$ ) setzt am 26.08.2011 ein drastischer Rückgang des GW-Standes über ca. 36 Stunden ein. Die Frequenz der täglichen Wasserstandsvariationen ist eine Folge der Erdzeitenwirkung und ändert sich in Abhängigkeit von den Mondphasen regelmäßig von  $1 d^{-1}$  auf  $2 d^{-1}$  (V: Vollmond, N: Neumond).*

In der Schwarmbebenperiode vom August 2011 zeigt die Vorfeldbohrung Bad Elster ein sehr ähnliches Verhalten wie der Pegel Gürth. Sie weist ein signifikantes Absinken des Grundwasserspiegels um 11 cm auf (Abbildung 18). Dieses beginnt bereits unmittelbar mit dem Maximalereignis des ersten Bebenschwarms ( $ML = 3.8$ ) in der Nacht vom 25. zum 26.08.2011. Wie beim Pegel Gürth dauert der Rückgang etwa 36 Stun-

den. Die Tatsache, dass die Wasserstände nach dem ko-seismischen Break nicht wieder ihr vorseismisches Niveau erreichen (vgl. Kap. 5.1, Abbildung 13 und Abbildung 14), spricht gegen kurzzeitige Entgasungsercheinungen, sondern offenbar für eine Vergrößerung des fluidgefüllten Kluft-/Porenraumes infolge der seismischen Erschütterungen. Dabei setzt sich an beiden Standorten der jahreszeitlich bedingte GW-Rückgang fort, lediglich um den seismisch induzierten Absenkungsbetrag parallel verschoben.

Ein anderes Bild bietet sich seit etwa März 2013, wo nur etwa 3 bis 4 m westlich der Vorfeldbohrung (Tiefe: 100 m) ein zusätzliches 450-m-Bohrloch (BE\_VOR\_neu) niedergebracht wurde, um die 1.200 m tiefe Thermalsolebohrung (TSB) bei deren zukünftiger Nutzung überwachen zu können.



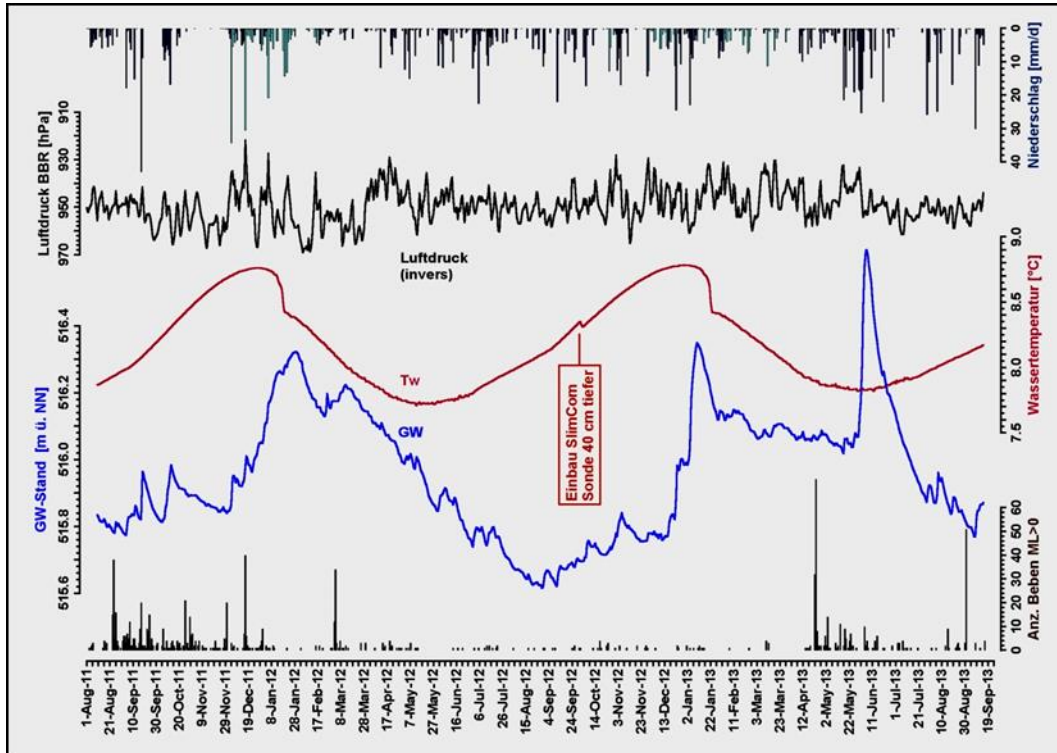
**Abbildung 19: Grundwasserstand, -temperatur, Luftdruck und Niederschlag an der Vorfeldbohrung Bad Elster, Tagesmittel 2011-2013**

*Im Vergleich zu Gürth deuten Grundwasserstand und Lufttemperatur bis März 2013 auf einen stärker von oberflächennahem Grundwasser geprägten Aquifer hin (Niederschlag: Regen – dunkelblau, Schnee – hellblau; Seismizität: Nový Kostel/Luby).*

Dadurch ist am Pegel BE\_VOR der Grundwasserspiegel um über 5 m gefallen und steigt nach den Bohrarbeiten nur langsam wieder an. Entsprechend hat sich die GW-Schwankungsbreite hier von 1,53 auf 5,59 m erhöht (Tabelle 2). Trotz eines auch während der Sommermonate anhaltenden Aufwärtstrends ist noch nicht absehbar, ob das Grundwasser wieder auf das vorherige Niveau ansteigen wird, weil möglicherweise durch Bohrspülung und/oder Zementierarbeiten am Nachbarpegel wasserwegsame Klüfte dauerhaft verschlossen wurden. Ob außerdem die 2011 nachgewiesene seismische Sensitivität der Lokation noch existiert, können nur zukünftige Messungen zeigen. Dazu wären aber signifikante Schwarmbebenperioden erforderlich. Vorteilhafter wäre es dagegen, die Mess- und Übertragungstechnik an BE\_VOR\_neu umzusetzen, nicht zuletzt, um hier die Zeit für entsprechende Backgroundmessungen im Vorfeld potenzieller Beben zu nutzen. Das wäre aber nur möglich, wenn diese Bohrung nicht mehr artesisch überläuft.

### 5.2.4 Brunnen Hennebach (HEB)

Der Brunnen Hennebach ist der Standort im neuen Beobachtungsnetz, der mit einem GW-Flurabstand von max. 1,8 m die stärkste Beeinflussung durch oberflächennahes Grundwasser aufweist (Abbildung 20). Sein Regime wird hauptsächlich vom nur wenige Meter entfernt vorüberfließenden Hennebach bestimmt. Mit 1,02 m sind die innerjährlichen Grundwasserschwankungen entsprechend gering, die Starkregenimpulse aber deutlich. So erreichte nach dem Dauerregen Ende Mai 2013 der GW-Stand einen Höchstwert von nur 0,87 m u. Gelände (Tabelle 2).

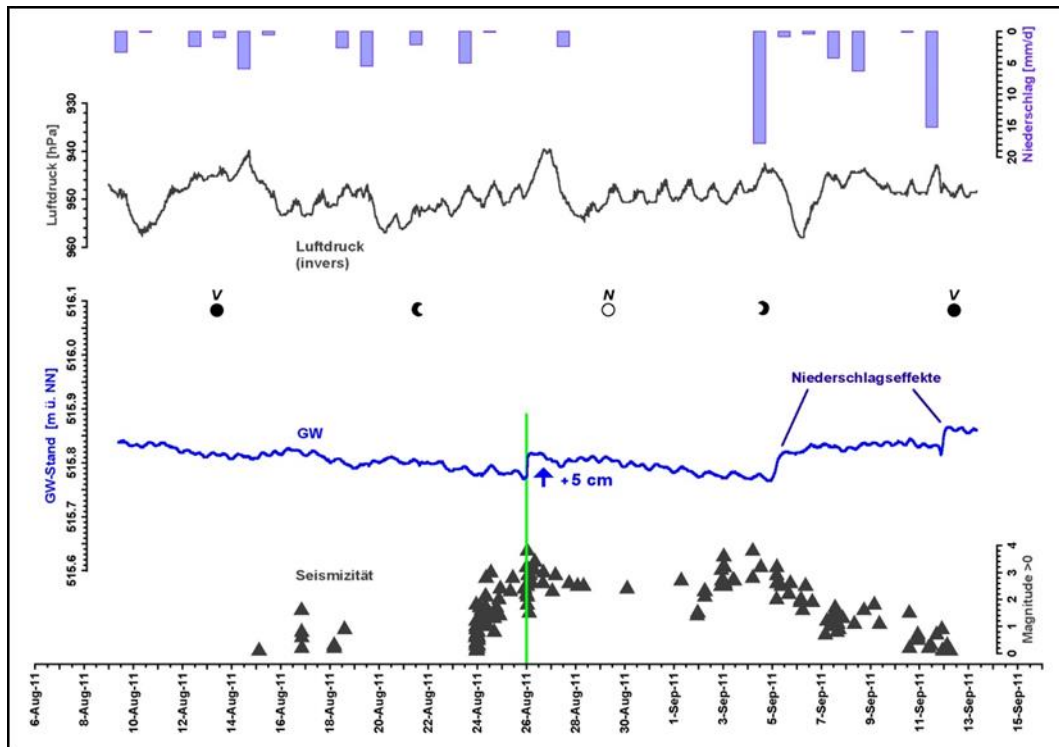


**Abbildung 20: Grundwasserstand, -temperatur, Luftdruck und Niederschlag am Brunnen Hennebach Tagesmittel 2011-2013**

Die Station weist die stärkste Beeinflussung durch oberflächennahes Grundwasser im erweiterten Messnetz auf (Niederschlag: Regen – dunkelblau, Schnee – hellblau; Seismizität: Nový Kostel/Luby).

Das Einzugsgebiet besteht überwiegend aus Wiesen- und Ackerflächen und hat nur ein geringes Geländegefälle. Die maximale Differenz der Wassertemperaturen beträgt etwa 1,0 K und ist damit die höchste aller Stationen. Wie an der Vorfeldbohrung Bad Elster (BE\_VOR) folgt das Minimum der Wassertemperatur dem der Lufttemperatur im Abstand von vier Monaten (siehe auch Abbildung 23). Der Grundwasserstand zeigt auch in Hennebach eine Reaktion auf Erdbeben, die aber wesentlich weniger ausgeprägt ist als an den Messpunkten GUE und BE\_VOR.

In Hennebach wurde am 26.08.2011 ebenfalls eine ko-seismische Anomalie registriert, die sich allerdings im Gegensatz zu GUE und BE\_VOR als Anstieg des GW-Standes um + 5 cm bemerkbar machte (Abbildung 21, 2012). Eine Erklärung für das unterschiedliche ko-seismische Verhalten der GW-Standorte GUE und BE\_VOR einerseits und HEB andererseits wird man erst nach Auswertung weiterer seismogener GW-Anomalien finden können. Durch seine geringe Entfernung von nur etwa 7,5 km westlich der Epizentren Nový Kostel und Luby (CZ) erscheint der Brunnen Hennebach trotz seiner Niederschlagsbeeinflussung als seismohydrologischer Standort gut geeignet.



**Abbildung 21: Grundwasserstände am Brunnen Hennebach (HEB) mit Luftdruck, Niederschlag (BBR) und der lokalen Seismizität im August/September 2011.**

*Auch hier gibt es am 26.08.2011 eine Grundwasserstands-anomalie. Innerhalb nur eines Messintervalls (15 min) steigt der GW-Stand um 5 cm. Im Vergleich zu den Messstellen BE-VOR und GUE dominiert der Niederschlagseinfluss deutlich gegenüber dem Erdgezeiteneffekt*

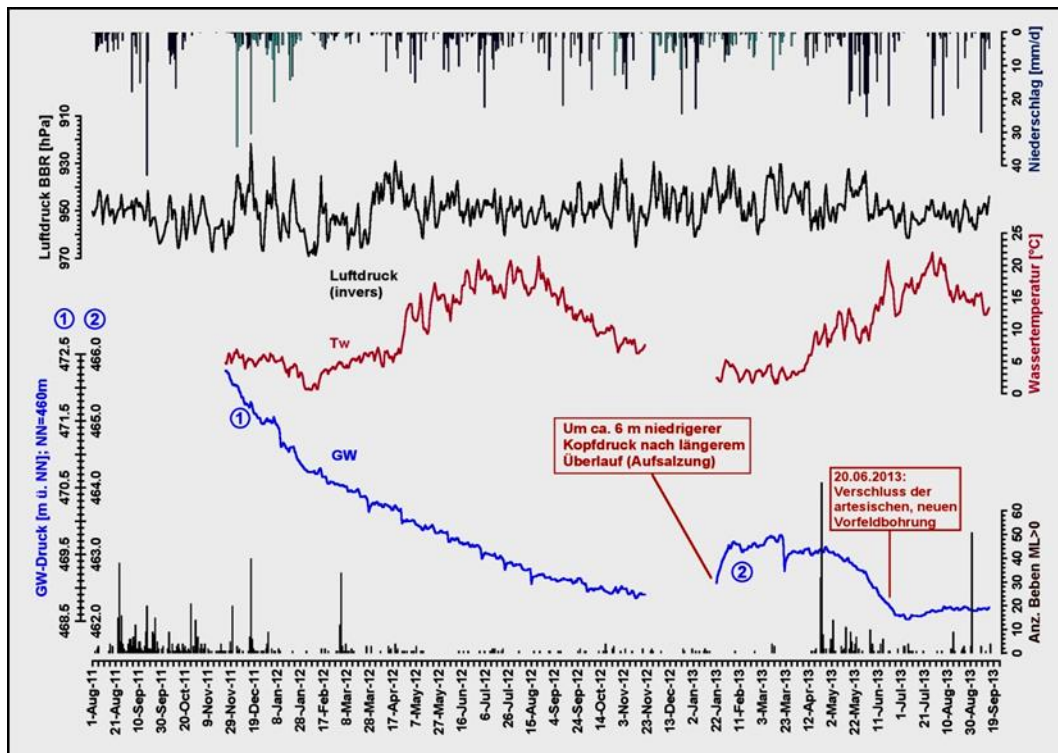
### 5.2.5 Thermalsolebohrung Bad Elster (BE\_TSB)

An der zusätzlich ins Programm aufgenommenen artesischen Thermalsolebohrung Bad Elster haben die Messungen erst nach der seismischen Periode von August/September 2011 begonnen, sodass über Reaktionen auf lokale Seismizität bisher keine Aussagen getroffen werden konnten. Die Druck-/Temperatursonde arbeitet in der verschlossenen, 1.200 m tiefen Bohrung unter Überdruck und registriert die Summe aus Grundwasser- und atmosphärischem Druck sowie die Wassertemperatur 1,3 m unter dem Brunnenkopf. Weil ohne freien Abfluss oder Entnahme im Bohrloch praktisch keine Wasserbewegung stattfindet, wird der Verlauf der Temperaturkurve vorwiegend durch die Umgebungstemperatur an der Messstelle bestimmt (Abbildung 22, rote Kurve). Die blaue Ganglinie zeigt den Wasserüberdruck in m über NN nach Subtraktion des Luftdrucks und der Umrechnung auf das geodätische Niveau der Messstelle. Die regelmäßigen Breaks sind auf den bei der Datengewinnung notwendigen Ausbau der Sonde zurückzuführen.

Der artesische Überdruck betrug zu Beginn der Messkampagne im November 2011 ca. 12 m WS (1,2 bar) über Gelände und ist bis Mitte November 2012 um über 3 m zurückgegangen (Abbildung 22, Abschnitt 1), 1 m mehr als noch im April 2012 (KOCH 2012). Eine saisonale Ursache für dieses Verhalten ist auszuschließen. Als nach geophysikalischen Tests und längerem Überlauf im Januar 2013 der Kopfdruck des Artesers um weitere ca. 6 m gefallen war (Abbildung 22, Abschnitt 2), konnte dieser Druckabnahmeeffekt auf die Aufsaltung der Wassersäule durch die anhaltende vertikale Strömung von hochmineralisiertem Tiefenwasser zurückgeführt werden. Die hohe Dichte des Wassers in der Bohrung führte so zu einem niedrigeren Druck am Brunnenkopf. Damit ist auch der stetige Rückgang bis November 2012 erklärbar: Bei der regelmäßigen Öffnung der Fassung zum Auslesen der p/T-Sonde kam es jeweils zu einem 10- bis 20-minütigen Überlauf, der eine wesentlich geringere, aber sukzessive Aufsaltung der Wassersäule bewirkt haben könnte. Offenbar wurde



das TSB-Druckregime ab März 2013 aber zusätzlich von den Bohrarbeiten am Pegel BE\_VOR\_neu beeinflusst (vergl. Kap. 5.2.3). Indirekt wird dies hier an einem beginnenden Druckanstieg nach dem Verschluss des Artesers BE\_VOR\_neu am 20.06.2013 sichtbar (Abbildung 22).



**Abbildung 22: Artesischer Druck, Wassertemperatur, Luftdruck, Niederschlag an der Thermalsolebohrung Bad Elster, Tagesmittel 2011-2013**

*Der artesischer Überdruck ging binnen eines Jahres um > 3 m WS zurück. Nach längerem Überlauf fiel Ende Januar 2013 der Druck um weitere 6 m. Der Erdgezeiteneffekt ist deutlich ausgeprägt. Die regelmäßigen Breaks entstehen beim Ausbau der Sonde zur Datengewinnung (Niederschlag: Regen – dunkelblau, Schnee – hellblau; Seismizität: Nový Kostel/Luby).*

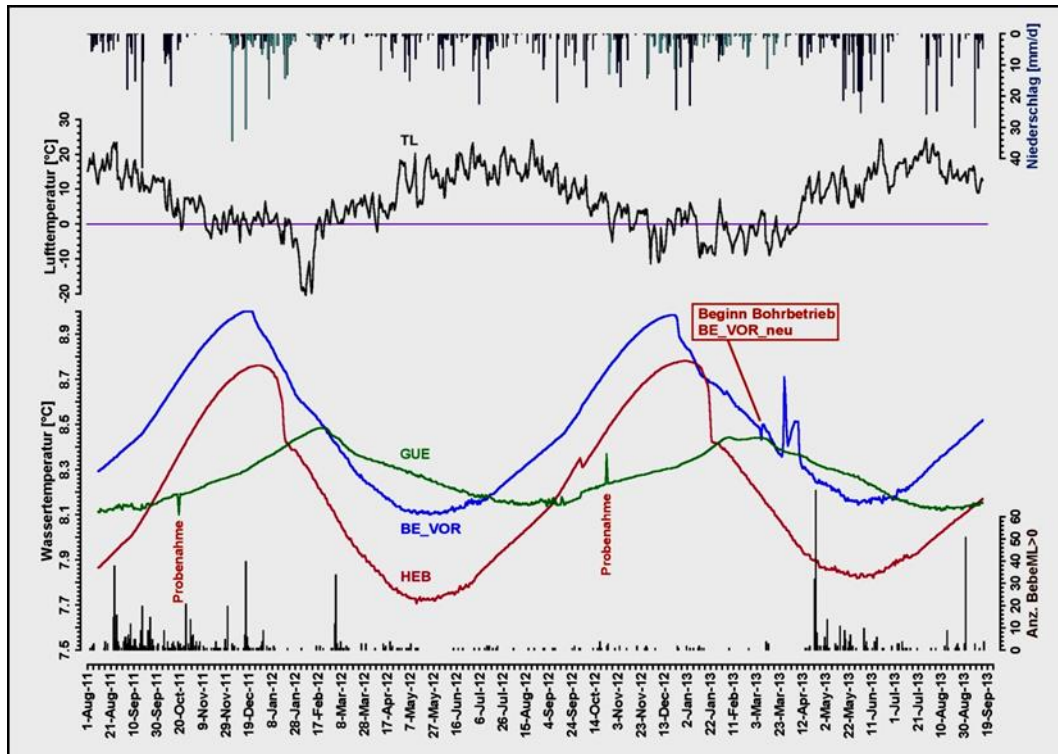
Erwartungsgemäß zeigen sich an der TSB Bad Elster keine Niederschlagseinflüsse und auch nur geringe Luftdruckeffekte. Im Vergleich zu den übrigen Standorten sind hier aber die Erdgezeiteneffekte mit  $\pm 10$  cm um etwa den Faktor 10 größer (KOCH 2012).

Die Bohrung BE\_TSB ist allein aufgrund ihrer Tiefe von 1.200 m seismohydrologisch interessant, trotz oder gerade wegen des deutlichen Erdgezeiteneffekts. Eine Ausrüstung mit Datenfernübertragungsmodul ist wegen des notwendigerweise anderen Sondentyps nicht nur technisch kompliziert, sondern auch wenig sinnvoll, weil mit dem bevorstehenden Hotelneubau in Bad Elster auch die Errichtung eines Thermalwasserbeckens und die Nutzung der Solebohrung einhergehen sollen.

### 5.2.6 Grundwassertemperaturen

Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Grundwassertemperaturen von drei der mit kombinierten Druck-/Temperatursonden ausgerüsteten Messstellen BE\_VOR, GUE und HEB zusammen mit den Tagesmitteln der Lufttemperatur in einer Darstellung zusammengefasst (Abbildung 23). Geht man vom Minimum der Lufttemperatur etwa Ende Januar aus, so reagieren die GW-Temperaturen an den Pegeln mit zeitlichen Verschiebungen von 4 bis max. 5 (BE\_VOR, HEB) und fast 7 Monaten (GUE). Nahezu die gleichen Reaktionszeiten zeigen sich nach dem Maximum der Lufttemperatur im Juli/August. Die entsprechenden GW-Temperaturmaxima

werden dann zwischen Ende Dezember (BE\_VOR, HEB) und Mitte März (GUE) beobachtet. Auch das Ende der hochfrequenten Temperaturfluktuationen, die in ihrer standortspezifischen Ausprägung die jeweilige Zumischungsdauer oberflächennaher Wässer widerspiegeln, tritt sowohl 2011 als auch 2012 im Sommer/Herbst zeitversetzt an den drei Pegeln auf (KOCH 2012).



**Abbildung 23: Grundwassertemperaturen im erweiterten Messnetz, Tagesmittel 2011-2013**

Die GW-Temperaturen reagieren mit zeitlichen Verschiebungen von 4 bis 5 (BE\_VOR, HEB) und fast sieben Monaten (GUE) auf den Jahresgang der Lufttemperatur (Niederschlag: Regen – dunkelblau, Schnee – hellblau; Seismizität: Nový Kostel/Luby).

### 5.3 Seismohydrologische Eignung der Messstellen

Eine Übersicht zur seismohydrologischen Charakterisierung der Messstandorte und zur Einschätzung ihres Potenzials im Hinblick auf die Ableitung von Parametern zur Bebenvorhersage gibt Tabelle 5. Sie baut auf den in den vorherigen Berichten enthaltenen Übersichten auf und ist entsprechend aktualisiert worden. Grundsätzlich sollten alle Standorte mit mindestens einer grünen Markierung (✓) weiter beobachtet werden. Das trifft auch auf den Brunnen RO1 zu, weil das Fehlen von Vorläufer- oder ko-seismischen Anomalien nicht bedeutet, dass es nicht doch zu solchen Effekten kommen kann, wenn die Epizentren künftiger Beben wieder direkt in Nový Kostel oder in einem noch näheren Cluster liegen, z. B. nördlich von Bad Brambach (Abbildung 9). Erfreulicherweise wurden an drei der fünf neu eingerichteten Messstellen ko-seismische Effekte gemessen. Ob es hier reale Vorläufereffekte gegeben hat, kann gegenwärtig nicht entschieden werden, weil mit den Messungen (außer an RO1) erst zwei Wochen vor dem Einsetzen der starken Seismizität begonnen wurde. Deshalb wird auch empfohlen, die Thermalsolebohrung Bad Elster weiter zu beobachten, solange dies technisch möglich ist und das Wasser nicht genutzt wird. Dort hatten die Messungen erst im November 2011 begonnen, weit nach der seismischen Hauptperiode.

Was die Angabe seismohydrologischer Kriterien für eine Prognose angeht, so zeigen die Ergebnisse, dass bereits Schwankungen des Grundwasserstandes von  $\pm 2,5$  cm als Anomalie gelten können, wenn die nicht-seismischen Einflüsse exakt separierbar sind. Sicherheitshalber sollten beim gegenwärtigen Kenntnisstand aber erst GW-Differenzen von mindestens  $\pm 5$  cm als seismogene Anomalie in Betracht gezogen werden. Weil bisher im erweiterten GW-Messnetz „nur“ ko-seismische Schwankungen gemessen wurden, ist die Höhe möglicher GW-Differenzen bei potenziellen Bebenvorläufern nur schwer einzuschätzen. Nach den Erfahrungen in Bad Brambach können diese wesentlich höher und auch zeitlich ausgedehnter ausfallen (Pegel VL4T im August 2000: + 25 cm, vier Wochen Dauer; KOCH et al. 2003).

Es muss ausdrücklich betont werden, dass es sich hier nicht um eine abschließende Bewertung handeln kann. Zwar waren die Schwarmbeben vom August/September 2011 für die Untersuchungen außerordentlich wertvoll, dennoch reicht ein Gesamtbeobachtungszeitraum von 25 Monaten nicht aus, um entscheidungsrelevante Aussagen über die seismohydrologische Eignung der Standorte des erweiterten GW-Messnetzes zu treffen. Gerade die Schwarmbeben von April/Mai und Ende August 2013 haben keine hydrologischen Anomalien generiert. Betrachtet man die seismisch aktiven Perioden zurück bis 1997, so fällt auf, dass nur solche Bebenschwärme mit Anomalien korrelierbar waren, innerhalb derer maximale Magnituden von über 2,5 auftraten, was 2013 bis Mitte September nicht der Fall war. Für eine ausreichende Absicherung dieser Aussage ist das Datenmaterial jedoch nicht ausreichend. Immerhin kann aber dieses Beobachtungsergebnis ein Ausgangspunkt für Erklärungen über das Auftreten oder Fehlen seismohydrologischer Anomalien sein.

Die Messungen seit den Schwarmbeben 2011 bestätigen erneut, wie wertvoll Phasen relativer seismischer Ruhe sind, um genauere Erkenntnisse über das saisonale Verhalten der Messstellen zu erhalten. Dies ist für eine sichere Anomalie-Identifizierung unabdingbar.

**Tabelle 5: Seismohydrologische Charakterisierung und Bewertung der Messstandorte**

| Standorte (alt)                           | Bisherige Vorläufereffekte   | Reaktion auf die Seismizität vom Aug./Sept. 2011 (östlich Luby, CZ)     | Seismohydrologisches Potenzial des Messstandortes<br>V – Vorläufereffekt<br>K – ko-seismischer Effekt | Bemerkung   |
|---|--|---|---|---|
| Wetinquelle<br>Bad Brambach (WEQ)         | Radonanomalien 1994, 1997; Druck-/Gasflussanomalien 2000, 2008; Multiparameteranomalie 2007. | prä-/ko-seismischer Anstieg des Radon-Gehaltes im Wasser                | V: ✓<br>K: ✓  |   |
| Pegel VL4T<br>Bad Brambach (VL4T)         | GW-Standsanomalien 2000, 2008/2009   | prä-seismische GW-Fluktuationen von ± 2,5 cm über 7 Stunden             | V: ✓<br>K: (✓)  | Anomalieverifizierung mittels des seismisch unbeeinflussten Vergleichspegels GW1  |
| 200-m-Bohrung<br>Bad Brambach (B200)      | keine  | ko-seismische GW-Fluktuationen von insgesamt 6 cm über ca. 40 Stunden   | V: ✗<br>K: ✓  | zu V: keine Vorläufereffekte seit Beobachtungsbeginn 1998   |
| <b>Standorte (neu)</b>                    |  |   |   |   |
| Brunnen Hennbach (HEB)                    | keine  | ko-seismischer abrupter GW-Anstieg von insgesamt 5 cm innerhalb 15 min  | V: ?<br>K: ✓  | ab 02.10.2012: Datenfunkmodul SEBA SlimCom  |
| Pegel Gürth (GUE)                         | keine  | ko-seismische GW-Standsabsenkung um insgesamt 9 cm über ca. 36 Stunden  | V: ?<br>K: ✓  | ab 09.11.2012: Datenfunkmodul SEBA SlimCom  |
| Brunnen Rohrbach 1 (RO1)                  | keine  | keine   | V: ?<br>K: ?  | Fortsetzung der Beobachtungen, weil kaum exogene Beeinflussungen  |
| Vorfeldbohrung<br>Bad Elster (BE_VOR)     | keine  | ko-seismische GW-Standsabsenkung um insgesamt 11 cm über ca. 36 Stunden | V: ?<br>K: ✓  | ab 02.10.2012: Datenfunkmodul SEBA SlimCom; Fortsetzung der Beobachtung mglw. am neuen Nachbarpegel                     |
| Thermalsolebohrung<br>Bad Elster (BE_TSB) | keine  | keine   | V: ?<br>K: ?  | Installation <i>nach</i> Bebenperiode 2011; Fortsetzung solange technisch möglich, weil Anbindung an tiefes Fluidsystem |



# 6 Langzeittrend des Gasflusses an Quellen von Bad Brambach

Langzeitreihen natürlicher Beobachtungsdaten eröffnen die Möglichkeit, Aussagen über grundlegende Trends bestimmter Parameter in einer Region zu treffen. Daher standen bei den Forschungen zu den Zusammenhängen zwischen den lokalen geodynamischen und fluiddynamischen Prozessen im Oberen Vogtland und NW-Böhmen stets auch Messungen der Gasflussraten an Mineralquellen und Mofetten im Mittelpunkt (KOCH & HEINICKE 2010), weil die isotopische Signatur dieser Gase belegt hatte, dass bestimmte Komponenten aus dem Erdmantel stammen, also magmatischen Ursprungs sind. 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 (WEISE et al. 2001; BRÄUER et al. 2005a/b; BRÄUER et al. 2007; BRÄUER et al. 2003; BRÄUER et al. 2009). Dies deutete auf eine Zunahme des magmatischen Gasanteils und damit auf eine verstärkte Mantelentgasung im Gebiet des Egerbeckens (NW-Böhmen) hin. An der Mofette Bublák wurde dabei Ätna-Niveau erreicht (BRÄUER et al. 2005a).

Insgesamt wurden an folgenden Standorten Messungen mittels Gaszählern bei einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten durchgeführt (KOCH & HEINICKE 2010):

|   |                 |
|---|-----------------|
| Wetтинquelle, Bad Brambach (Basisstation) | seit 04/2000    |
| Eisenquelle, Bad Brambach                 | seit 04/1998    |
| Schillerquelle, Bad Brambach              | seit 04/1998    |
| Mofette Naturpark Soos (CZ)               | 07/2001-11/2010 |
| Mofette Bublák, Hartoušov (CZ)            | 04/2004-11/2010 |

Ohne explizit Projektbestandteil zu sein, wurden diese Messungen im Rahmen des Seismohydrologie-Vorhabens fortgesetzt, wenn auch nicht an den tschechischen Lokationen. Damit konnten den Langzeittrendkurven drei weitere Jahre hinzugefügt werden (Abbildung 24).

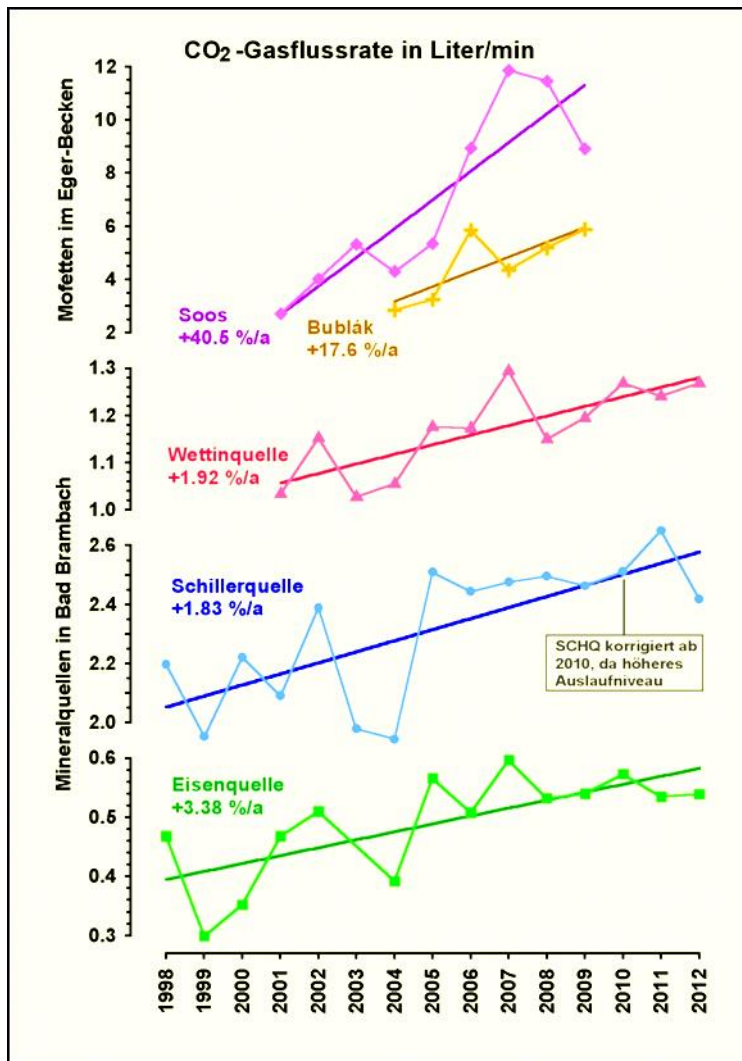
Gegenüber den bis 2009 gewonnenen Erkenntnissen (KOCH & HEINICKE 2010) hat sich der Anstieg des Gasflusses an den Bad Brambacher Quellen zwar geringfügig abgeschwächt (von 2,0–4,5 auf 1,8–3,4 %/Jahr), dennoch hält der Trend unvermindert an. An der Wetтинquelle ist er sogar auf dem gleichen Niveau geblieben. Lediglich an der Schillerquelle gibt es 2012 einen Rückgang des Gasflusses. Dafür könnten primär Verockerungen im Leitungssystem verantwortlich sein, die zu einem Anstieg des Wasserspiegels in der Fassung führen. Dieser Effekt reduziert die freie Entgasung des Wassers durch den höheren hydraulischen Gegendruck auf das Fluidsystem.

Die Ergebnisse weisen auf eine anhaltend 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. (2005a) aus der genannten Zunahme der Kruste/Mantel-Signatur der Gase abgeleitet wurde. Der regionale Anstieg des Gasflusses kann aber auch auf eine Veränderung des lokalen Spannungsfeldes hinweisen. Möglicherweise ist nach Jahren seismischer Ruhe die seit August 2011 wieder häufigere Seismizität in der Region darauf zurückzuführen.

Neben dem Langzeittrend treten besonders an der Wetтинquelle deutliche innerjährliche Schwankungen des Gasflusses auf. Die Ursachen dafür sind noch unklar, aber wahrscheinlich in einer unregelmäßigen Entga-

sungsaktivität des Fluidreservoirs zu suchen. Der Einfluss des Luftdruckes auf die Entgasung ist bei der Betrachtung längerer Zeiträume (Monats-, Jahresmittel) vernachlässigbar. Dagegen spielt die Wirkung des Grundwasserstandes eine bedeutende Rolle, besonders an Entgasungsstellen, die gegenüber dem lokalen Grundwasserniveau permanent abgesenkt sind, also – wie im vorliegenden Fall – an frei auslaufenden oder gepumpten Mineralquellen und Brunnen (KOCH & HEINICKE 2007; KOCH et al. 2008). Als entscheidender Faktor für die insgesamt geringere Zunahme der Entgasung an den Bad Brambacher Quellen gegenüber den tschechischen Mofetten (bis 2009) wird der um 135 m höhere hydrostatische Gegendruck auf das Entgasungssystem betrachtet (KOCH & HEINICKE 2010).

Diese Ergebnisse sprechen nachdrücklich für eine Fortsetzung der Gasflussmessungen über das Projektende hinaus, zumindest an den Standorten Wettin- und Eisenquelle, ist doch der beobachtete Langzeittrend ein Mosaikstein für eine wissenschaftlich fundierte Abschätzung des magmatischen Risikos im Egerbecken und damit auch im Oberen Vogtland.



**Abbildung 24: 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 2012 ein Anstieg des Gasflusses von 1,8 bis 3,4 % pro Jahr registriert. An den Mofetten im Egerbecken waren es zwischen 2000 und 2009 sogar 18 bzw. 41 % pro Jahr

# 7 Zusammenfassung und Perspektiven

- Die wissenschaftliche Ausbeute übertraf die Erwartungen, besonders dank des Bebenschwarms vom Spätsommer 2011.
- Neben der Registrierung eines Bebenvorläufereffektes in Bad Brambach konnten drei der fünf neu ausgestatteten Grundwassermessstellen als seismisch sensitiv identifiziert werden.
- Damit wurde die Möglichkeit deutlich verbessert, seismogene Grundwasseranomalien bereits im Vorfeld potenzieller lokaler Beben zu entdecken, weil für den Datenzugriff an den drei Messstellen nicht mehr der Befahrungsrhythmus ausschlaggebend ist. Für einen operativen Betrieb sollte mindestens einmal pro Woche ein Datenabruf erfolgen. Dieser kann per Direktwahl oder via Internetverbindung zum SEBA-Hydrocenter erfolgen, wo die Daten regelmäßig bereitgestellt werden.
- Die im November 2011 zusätzlich in das Programm aufgenommenen kontinuierlichen p/T-Messungen in der 1.200-m-Thermalsolebohrung Bad Elster zeigten bis März 2013 einen stetigen Abwärtstrend des artesischen Kopfdruckes, der auf eine Dichteerhöhung in der Wassersäule durch Aufstieg von hochsalinarem Tiefenwasser zurückzuführen ist. Leider werden die Messungen mittelfristig nicht mehr weitergeführt werden können, weil mit dem geplanten Hotelneubau vor Ort auch die Errichtung eines Thermalwasserbeckens und damit die Nutzung der Sole einhergehen werden.
- Aktuelle Vorabinformationen über potenzielle lokale Beben sind nur dann möglich, wenn hydrologische Anomalien oder zumindest deren Beginn zwischen dem jeweiligen Auslesen der Daten und dem Einsetzen der Seismizität entdeckt und zudem meteorologische Effekte sicher ausgeschlossen bzw. separiert werden können. Fällt der Zeitraum zwischen Vorläufereffekt (Anomalie) und Bebenbeginn in einen Messzyklus, der besonders an den Brambacher Offline-Stationen immerhin zwei bis drei Wochen betragen kann, so ist nur eine rückwirkende Anomaliediskussion möglich.
- Nach gegenwärtigem Kenntnisstand sollten nur eindeutig separierbare Grundwasserstandsdifferenzen von mehr als  $\pm 5$  cm als potenzielle seismohydrologische Anomalie betrachtet werden.
- Aus Beobachtungen im neuen Grundwassermessnetz während der seismischen Perioden 08-09/2011, 04-05/2013 und dem Bebenschwarm Ende 08/2013 ist zu vermuten, dass nur dann mit hydrologischen Reaktionen im zeitlichen Umfeld von Beben im Raum Nový Kostel/Luby gerechnet werden kann, wenn die lokalen Magnituden mindestens 2,5 erreichen.
- Grundsätzlich sind mehrere Bebenperioden erforderlich, um die Reproduzierbarkeit seismohydrologischer Effekte zu testen. Mit dem August/September-Schwarm 2011 und der erhöhten Seismizität von April/Mai und August 2013 hat sich allerdings die Wahrscheinlichkeit verringert, dass in den nächsten zwei Jahren weitere markante und damit seismohydrologisch wirksame Schwarmbeben in der Region auftreten.
- Weil im Bearbeitungszeitraum nur eine verwertbare Bebenperiode auftrat, in der überdies die hydrologischen Effekte koseismischer Natur waren, reicht für die drei neuen seismisch sensitiven Pegel BE\_VOR, GUE und HEB erwartungsgemäß die Datenlage nicht für eine Bebenprognose im Sinne des Projektzieles aus. Dabei haben sich die für den Bad Brambacher GW-Pegel VL4T vor Projektbeginn aufgestellten Prognosekriterien nicht geändert.
- Geodätische GPS-Messungen tschechischer Kollegen zeigen, dass es während der Schwarmbeben 2008 im östlichen Eger-Becken zu horizontalen Verschiebungen, noch stärker aber zu Hebungen und Senkungen des Geländes von bis zu 167 mm gekommen ist. SCHENK et al. (2012) führen dies auf Druckerhöhungen im Untergrund durch aufsteigende Fluide magmatischen Ursprunges zurück, wie dies bereits von

BRÄUER et al. (2005a, 2009) diskutiert wurde. Auch WEINLICH (2013) und WEINLICH et al. (2013) heben erneut die enge ursächliche Verknüpfung von Fluidtransport und Seismizität in der Region hervor.

- Wichtig ist die weitere Verfolgung des seit 1998 anhaltenden Aufwärtstrends der Gasflussrate an den Quellen Bad Brambachs, der mit einem Anstieg des  $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisses an Entgasungsstellen im Vogtland und im Egerbecken zwischen 1993 und 2005 einher ging. Dies wäre ein Mosaikstein für eine wissenschaftlich begründete Abschätzung des magmatischen Risikos für das Egerbecken und damit auch für das Obere Vogtland.

### Danksagung

Dem Autor ist es ein Bedürfnis, den Vertretern aller Unternehmen herzlich zu danken, die ihm bei Einrichtung und Betrieb des Bad Brambacher und des erweiterten seismohydrologischen Messnetzes auf unkomplizierte Weise eine überaus großzügige Unterstützung gewährten. Besonderer Dank gilt dem Geschäftsführer der Sächsischen Staatsbäder GmbH, Gernot Ressler, und dem Technischen Leiter Sven Bohmeier für die Nutzungsmöglichkeit der zahlreichen Messstellen in Bad Brambach und Bad Elster, dem Geschäftsführer der Bad Brambacher Mineralquellen GmbH, Andreas Henschke, und seinen Mitarbeitern Peter Hartmann und Uwe Weber für den Zugang zu den Brunnen Gürth, Hennebach und Rohrbach 1, für die Lieferung von Material über den Brunnenausbau sowie die technische Hilfe bei den Installationsarbeiten. Dem Geschäftsführer der Umweltbüro GmbH Vogtland in Weischlitz, Dr. Thomas Daffner, und seiner Prokuristin Manuela Voßberg danke ich für ihr Einverständnis zur gemeinschaftlichen Geräte- und Datennutzung, für technische Unterstützung und die Bereitstellung zusätzlicher Unterlagen zu den Messstellen.

# 8 Literaturverzeichnis

- BRÄUER, K., H. KÄMPF, S. NIEDERMANN & G. STRAUCH, 2005a. Evidence for ascending upper mantle-derived melt beneath the Cheb basin, central Europe. *Geophysical Research Letters*, 32, L08303, doi:10.1029/2004GL022205.
- BRÄUER, K., H. KÄMPF, E. FABER, U. KOCH, H.-M. NITZSCHE & G. STRAUCH, 2005b. Seismically triggered microbial methane production relating to the Vogtland-NW Bohemia earthquake swarm period 2000, Central Europe. *Geochemical Journal*, 39, 5: 441-450.
- 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 Wettingquelle, Bad Brambach (central Europe). *J. Geophys. Res.*, 112, B04307, doi:10.1029/2006JB004404.
- 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.
- Geophysikalisches Observatorium Collm der Universität Leipzig: Sachsenetz/Ergebnisliste.- <http://home.uni-leipzig.de/collm/>
- BRÄUER, K., H. KÄMPF, G. STRAUCH & S. M. WEISE, 2003. Isotopic evidence (<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He; <sup>13</sup>C<sub>CO2</sub>) of fluid-triggered intraplate seismicity. *Journal of Geophysical Research*, 108, B2, 2070, doi:10.1029/2002JB002077.
- 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.
- HEINICKE, J., U. KOCH, D. HEBERT & G. MARTINELLI, 1995a. Simultaneous measurements of radon and CO<sub>2</sub> in water as a possible tool for earthquake prediction. *Environmental Geochem. Health, Supplement to Volume 16*, Science reviews: 295-303.
- HEINICKE, J., U. KOCH, H. KADEN & W. OELBNER, 2002. Seismizität im sächsischen Vogtland – Einsatz von CO<sub>2</sub>-Sensoren für geowissenschaftliche Untersuchungen. *Akademie-Journal*, H.1: 52-56.
- HEINICKE, J., U. KOCH & G. MARTINELLI, 1995b. CO<sub>2</sub> and Radon measurements in the Vogtland area (Germany) - a contribution to earthquake prediction research. *Geoph. Res. Letters* 22: 771-774.
- 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.
- HEINICKE, J. & U. KOCH, 2000. Slug flow – a possible explanation for hydrogeochemical earthquake precursors at Bad Brambach, Germany. *Pure appl. geophys.* 157, 10: 1621-1641.
- HEINICKE, J., U. KOCH & G. MARTINELLI, 1997. Radon and CO<sub>2</sub> 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.
- 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.
- KOCH, U., 2012. Einsatz der Seismohydrologie zur Erdbebenprognose im Vogtland. FuE-Projekt. Abschlussbericht 2011-2012 (unveröff.), Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Pillnitz, 2012, 34 S.



- KOCH, U., 2013: Einsatz der Seismohydrologie zur Erdbebenprognose im Vogtland. FuE-Projekt. Abschlussbericht 2012-2013 (unveröff.), Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Pillnitz, 2013, 34 S.
- 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.
- KOCH, U. & J. HEINICKE, 1996. Earthquake prediction research by radiometric-geochemical methods in the Vogtland - NW Bohemian region: New results and aspects. In: *Seismology in Europe, Papers of the XXV General Assembly of European Seismol. Commission (ESC)*. Sept. 9-14, 1996. Reykjavík (Iceland): 241-246.
- KOCH, U. & J. HEINICKE, 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.
- 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.
- KOCH, U. & J. HEINICKE, 2010. Beiträge zur Umweltforschung mittels radiometrisch- geochemischer Methoden: Forschungsziele, Ergebnisse, Erfahrungen, Empfehlungen. Abschlussbericht. Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig. 64 S.
- KOCH, U. & J. HEINICKE, 2011. Seismohydrological effects related to the NW Bohemia earthquake swarms of 2000 and 2008: Similarities and distinctions. *Journal of Geodynamics* 51: 44-52, doi:10.1016/j.jog.2010.07.002.
- KOCH, U., J. HEINICKE & M. VOßBERG, 2003. Hydrogeological effects of the latest Vogtland-NW Bohemian swarmquake period (August to December 2000). *J. Geodynamics* 35, 1-2: 107-123.
- NEUNHÖFER, H. & T. MEIER, 2004. Seismicity in the Vogtland/Western Bohemia earthquake region between 1962 and 1998. *Studia Geophysica et Geodetica*, 48, 539-562.
- 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.
- SCHENK, V., Z. SCHENKOVÁ, Z. JECHUMTÁLOVÁ & R. PICHL, 2012. Crustal deformations in the epicentral area of the West Bohemia 2008 earthquake swarm in central Europe. *Journal of Geophysical Research*, 117, B07408, doi:10.1029/2011JB009053: 1-19.
- SEBA-HYDROMETRIE, 2010. Bedienungsanleitung Messdatensammler MDS Dipper-3, MDS Dipper-T3. Kaufbeuren, 08.02.2010. 19 S.
- SEBA-HYDROMETRIE, 2011. Grundwasserüberwachungssystem – Online Typ SlimCom. Bedienungsanleitung mit SEBAconfig und Messdatensammler MDS Dipper-3, MDS Dipper-T3. Kaufbeuren, 06.12.2011: 11 S.
- SOLINST Canada Ltd., 2011. Levellogger Series Model 3001 Data Sheet. Georgetown (Ontario) Canada, July 7, 2011. 4 S.
- WEINLICH, F.H., 2013. Carbon dioxide controlled earthquake distribution pattern in the NW Bohemian swarm earthquake region, western Eger Rift, Czech Republic – gas migration in the crystalline basement. *Geofluids*: 1-17, doi:10.1111/gfl.12058.
- WEINLICH, F.H., V. STEJSKAL, M. TESCHNER & J. POGGENBURG, 2013. Geodynamic processes in the NW Bohemian swarm earthquake region, Czech Republic, identified by continuous gas monitoring. *Geofluids* 13: 305-330, doi:10.1111/gfl.12027.

WEISE, E., 1908. Die vogtländischen Erdbeben im Oktober und November 1908. Vogtländischer Anzeiger und Tageblatt Nr. 274, 25. Nov. 1908: S. 10.

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.

**Herausgeber:**

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)  
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden  
Telefon: +49 351 2612-0  
Telefax: +49 351 2612-1099  
E-Mail: [lfulg@smul.sachsen.de](mailto:lfulg@smul.sachsen.de)  
[www.smul.sachsen.de/lfulg](http://www.smul.sachsen.de/lfulg)

**Autor:**

Dr. Ulrich Koch  
Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig  
Arbeitsstelle Seismohydrologie  
Ringstraße 23 B, 08648 Bad Brambach  
Telefon: +49 37438 219844  
Telefax: +49 37438 219844  
E-Mail: [koch@saw-leipzig.de](mailto:koch@saw-leipzig.de)

**Redaktion:**

Dr. Ottomar Krentz, Brunhild Witthauer  
Abteilung Geologie/Referat Geologische Kartierung, Geophysik  
Halsbrücker Str. 31a, 09599 Freiberg  
Telefon: +49 3731 294-1201/-1217  
Telefax: +49 3731 294-1099  
E-Mail: [ottomar.krentz@smul.sachsen.de](mailto:ottomar.krentz@smul.sachsen.de)  
[brunhild.witthauer@smul.sachsen.de](mailto:brunhild.witthauer@smul.sachsen.de)

**Fotos:**

Dr. Ulrich Koch

**Redaktionsschluss:**

30.09.2015

**Hinweis:**

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/> heruntergeladen werden.

**Verteilerhinweis**

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinahme des Herausgebers zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.