

## **Fachliche Position der Staatlichen Geologischen Dienste Deutschlands (SGD) zu den Ausschlusskriterien des Standortauswahlgesetzes (StandAG)**

### **Ausschlusskriterium „Vulkanismus“ (§ 22 Abs. 2 Nr. 5 StandAG)**

07. Oktober 2020

#### **Anlass**

Die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) hat auf ihrer Internetseite den „Methodensteckbrief: Ausschlusskriterium Vulkanismus“ (BGE 2020) veröffentlicht. Zur gemeinsamen Herbstsitzung des BLA-GEO und des DK am 09. und 10. September 2020 lag ein Positionspapier zur Anwendung des Ausschlusskriteriums Vulkanismus (§ 22 Abs. 2 Nr. 5 StandAG) der drei Bundesländer Bayern, Rheinland-Pfalz und Sachsen vor, in denen die quartären Vulkanfelder der Eifel und der Region Vogtland-Fichtelgebirge/Oberpfalz-Egerbecken auftreten. Das Vorgehen wurde im Anschluss mit den SGD aller Bundesländer abgestimmt.

#### **BGE-Ansatz zum Teil-Ausschlusskriterium Vulkanismus**

Gemäß o. g. Methodensteckbrief „Ausschlusskriterium Vulkanismus“ schlägt die BGE vor, Gebiete, in denen quartärer Vulkanismus nachgewiesen ist, von der Endlagersuche auszuschließen. Diese potentiellen Gefährdungsgebiete werden als Umkreis um quartäre vulkanische Eruptionszentren in der Eifel und der Region Vogtland-Oberpfalz abgegrenzt, wobei die Auswirkungen zukünftiger vulkanischer Aktivitäten mit einem Radius von 10 km um jedes Eruptionszentrum undifferenziert berücksichtigt werden. „Dieser gilt als ‚Minimalabstand‘ und wird auf Grundlage eines extern vergebenen Forschungsprojektes mit einem individuell an die jeweiligen Gebiete angepassten und vom konkreten Chemismus des Vulkanismus abhängigen Sicherheitsaufschlag versehen, der sich bezüglich der ausgeschlossenen Fläche einzig vergrößernd auswirken kann. Während für die Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG zunächst der statische Sicherheitsabstand von 10 km ausgewiesen wird, sollen zur Ermittlung von Standortregionen nach § 14 StandAG individuelle Sicherheitsabstände zur Anwendung kommen“ (BGE 2020).

## Fachliche Position der SGD

Die BGE betrachtet ausschließlich die Vulkanbauten an der Erdoberfläche. Eine Vielzahl vulkanischer Erscheinungsformen bleiben dabei unberücksichtigt. Die SGD gehen nachfolgend von einem gesamtheitlichen Ansatz auf Basis der aktuellen wissenschaftlichen Forschungen aus, mit dem bereits heute ein adäquater Sicherheitsabstand festgelegt werden kann.

Neben den eigentlichen oberflächigen Vulkanstrukturen (*Schlackenkegel, Maar, Caldera*) und der seismischen Aktivität (z.B. *Schwarmbeben und tiefe niedrigfrequente Erdbeben*) stellen auch mantelbürtige Gasaustritte (z.B. in *Mofetten* und *Mineralwässern*) und heterogene Hebungsraten (*Magmendynamik, Gasaufstieg*) aus geowissenschaftlicher Betrachtung zu berücksichtigende und beeinträchtigende Faktoren eines Endlagerstandortes für hochradioaktive Abfälle dar.

Forschungsergebnisse der letzten zwei Dekaden haben zu einem deutlichen Sprung im Kenntnisstand der beiden Vulkangebiete geführt. Neben der Entdeckung neuerer quartärer Vulkanstrukturen und der modernen seismologischen Überwachung, zeugen das Langzeitmonitoring von Hebungsraten (*Bewegung des Mantelplume*), die geophysikalische Erkundung (*Verortung von Magmenkörpern*) und die Isotopen-chemische Zusammensetzung austretender Fluide (*mögliche Pfade für Magmenaufstieg*) von den dynamischen Prozessen in und unterhalb der Lithosphäre. Diese Erkenntnisse sind gewichtige Argumente, dass eine Reaktivierung der vulkanischen Aktivität innerhalb der nächsten 1 Millionen Jahre mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit wahrscheinlich ist. Die überwiegende Mehrheit befragter Expertinnen und Experten halten zukünftige Vulkanausbrüche in den genannten Gebieten für wahrscheinlich (1 – 10 Ausbrüche) oder sehr wahrscheinlich (> 10 Ausbrüche) ([Bartels et al., 2020](#)). Die beiden Vulkangebiete sind somit nach §22 Abs. 2 Nr. 5 StandAG auszuschließen. Ebenfalls weisen diese neuen Erkenntnisse den von [Jentzsch \(2001\)](#) aufgestellten einheitlichem Radius von 10 km um ein Vulkangebiet als ungenügend aus.

Das Ausschlusskriterium der geogenen, großräumigen Vertikalbewegungen von im Mittel mehr als 1mm pro Jahr über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahren (§ 22 Abs. 2 Nr. 1 StandAG) wird hier nicht berücksichtigt, sondern ist gesondert zu betrachten.

## 1. Einleitung

Das 2013 erlassene Standortauswahlgesetz (StandAG) sieht vor, ergebnisoffen nach einem geeigneten Endlager für Atommüll zu suchen. Gemäß §1 Abs. 3 StandAG kommen grundsätzlich neben Salzgesteingestein auch Ton- und Kristallingestein in Betracht, welche das Grundgebirge beider quartären Vulkangebiete aufbauen. Gebiete mit quartären oder zu erwartenden Vulkanismus werden vom Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE, ehemals BfE) im Allgemeinen ausgeschlossen. Nach § 22 Absatz 2 sind u.a. Gebiete auszuschließen, in denen zukünftig mit großräumigen Vertikalbewegungen (*geogene Hebungen von > 1mm/y*), aktiven Störungszonen (*Zerrüttungszonen mit tektonischer Bewegung innerhalb der letzten 34 Ma, bis Rupel*), seismischer (*örtliche seismische Gefährdung > Erdbebenzone 1*) und vulkanischer Aktivität (*quartärer oder zukünftig zu erwartender Vulkanismus*) zu rechnen ist. Die von [Jentzsch \(2001\)](#) aufgestellten potenziellen

Gefährdungsgebiete, die von [May \(2019\)](#) unter Hinzuziehung weiterer Kriterien großräumig differenziert wurden, sind nach aktuellem Forschungsstand zu erweitern, da rezente subkrustale magmatische Prozesse (*Bewegungen eines Mantelplumes, Magmenaufstieg, Mantelgasexhalationen*) zur Entstehung Schwarm- und DLF-Erdbeben (Deep Low-Frequency), Hebung der Erdoberfläche und Bildung von Mofetten und Sauerlingen beitragen. Die dabei angelegten tiefen oder reaktivierten Strukturen schaffen potenzielle Wegsamkeiten vulkanischer Durchschlagsröhren. Somit stellen auch weitere vulkanische Erscheinungen (wie Mofetten und Sauerlinge) beeinträchtigende Faktoren eines Endlagerstandortes für hochradioaktive Abfälle dar.

## 2. Aktueller Forschungsstand

### 2.1 Eifel

Mit einer Verbreitung der Vulkanbauten von über 2.000 km<sup>2</sup>, bildet die Eifel im Bundesland Rheinland-Pfalz eines der bedeutendsten Vulkangebiete Mitteleuropas ([Bogaard & Schmincke, 1990](#); [Büchel & Bardon, 1994](#)). Die jüngsten Eruptionen der Region bilden jene des Laacher See Vulkans (12.900 a, [van den Bogaard, 1995](#)) und die des ca. 30 km entfernten Ulmener Maars (11.600 a, [Preusser et al., 2011](#)). Mit einem Vulkanexplosivitätsindex (VEI) von 6 stellt die Caldereneruption des Laacher See Vulkans eines der gewaltigsten quartären Vulkanausbrüche Europas dar ([Schuhmacher & Schmincke, 1991](#); [Harms & Schmincke, 2000](#)). Sie wird im Zusammenhang mit dem Kulturwandel in Südkandinavien und Osteuropa am Ende des Alleröd-Interstadials gesehen ([Riede, 2007](#); [Riede et al., 2011](#)). Die größte Entfernung zwischen datierten Vulkanbauten - dem Dümpelmaar der Osteifel (ca. 115.000 a) und dem Mosenberg-Schlackenkegel der Westeifel (ca. 90.000 a) - beträgt 55 km (neuere Arbeiten von [Mertz et al., 2015](#); [Förster & Sirocko, 2016](#)).

Seismische Untersuchungen haben gezeigt, dass die Vulkaneifel das Resultat eines Hotspot-Mantelplumes ist ([Ritter et al., 2000](#); [Walker et al., 2005](#); [2007](#)). Anomalien seismischer Geschwindigkeiten im Erdmantel unter dem Rheinischen Massiv (z.B. [Raikes & Bonjer, 1983](#); [Meier et al., 2016](#)) und insbesondere unter der Eifel („Eifel Plume“, [Ritter et al., 2001](#)) werden z.B. mit Manteldiapirismus, der Hochlage der Lithosphären-Asthenosphären-Grenze und partiellen Schmelzen im oberen Erdmantel und deren Akkumulation unter der Kruste in Verbindung gebracht ([Ritter & Christensen, 2007](#); [Dahm et al., 2020](#)). Aufgrund der differenzierten tektonischen und petrografischen Strukturen der Erdkruste und des oberen Mantels, der aufgrund der wechselhaften orogenetischen Entwicklung des Schiefergebirges sehr heterogen ausgebildet ist, kann keine „tropfenförmige“, homogene Magmakammer angenommen werden ([Mertes & Schmincke, 1985](#); [Denis et al., 2013](#)). Zudem ist in den Randbereichen des Schiefergebirges durch Differentiationen und Aufschmelzung von Krustenmaterial auch ein interner, differenzierter Aufbau zu erwarten, wie die unterschiedlichen Vulkantypen verschiedenster chemischer Zusammensetzung vor allem in der Eifel bestätigen ([Schmincke et al., 1983](#)).

Hebungen in der Region werden mit aufsteigenden Magmen des Eifel-Plumes begründet, welche auf die Auswertungen durch die Auswertung von Satellitendaten und

Präzisionsnivellements des Landesamtes für Vermessung und Geobasisdaten Rheinland-Pfalz nachgewiesen sind (Kreemer et al., 2020). Diese vertikalen Landbewegungen lassen sich noch im Brabant in Belgien, in Luxemburg, Lothringen in Frankreich, im Ruhrgebiet und Westhessen fassen (Abbildung 1). Das Aufsteigen der Magmen aus dem oberen Erdmantel in die mittlere und obere Erdkruste, äußert sich in der Tieflage der DLF-Erdbeben in 10 bis 40 km Tiefe (Hensch et al., 2019; Dahm et al., 2020). Weitere vulkanische Erscheinung der Eifel sind Mantelgasaustritte in Mofetten, Säuerlingen und Kaltwasser-Geysiren (z.B. Bräuer et al., 2013; Dittrich, 2017). Diese vulkanischen Erscheinungen sind in morphologischen Niederungen um die West- bzw. Osteifel verstärkt nachgewiesen (z.B. Plum, 1989; Stoffels & Thein, 2000; May, 2002a,b; Berberich et al., 2019; Pfanz et al., 2019), treten aber auch in einem weiten Bereich über die Eifel hinaus auf (Carlé, 1975; May et al., 1996; Michel et al., 1998). So finden sich Austritte dieser magmatischen Gase finden sich auch in anderen Gebieten mit tertiären Vulkaniten oder in Gebieten ohne känozoischen Vulkanismus. Isotope und Spurengase zeigen lokal eine Herkunft eine Herkunft der Gase aus dem Erdmantel (z.B. Griesshaber et al., 1992; Dunai & Baur, 1996; Aeschbach-Hertig et al., 1996; Bräuer et al., 2013; Caracausi et al., 2016).

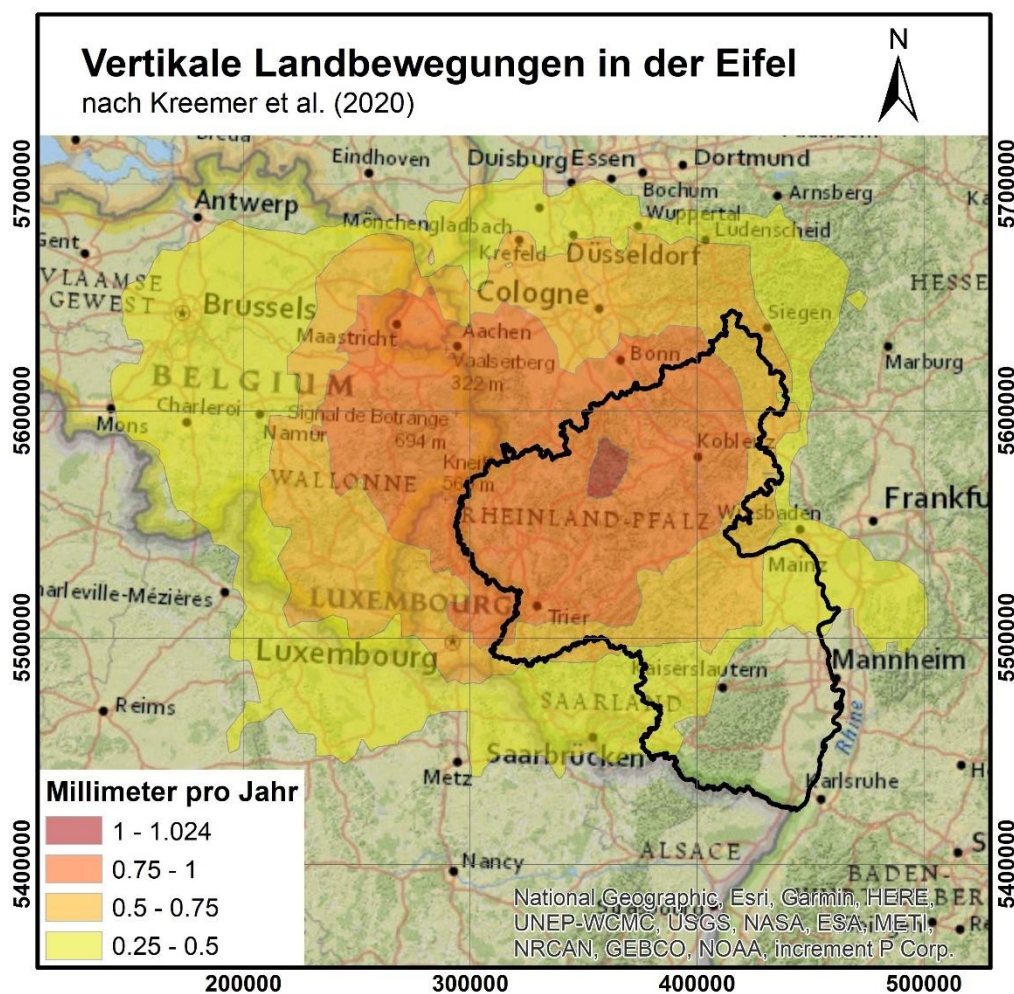


Abbildung 1 Hebungen in der näheren Umgebung des Rheinischen Massivs; nach Kreemer et al. (2020).

## 2.2 Region Vogtland-Fichtelgebirge/Oberpfalz-Egerbecken

Eines der aktivsten Vulkangebiete Mitteleuropas bildet - neben der Eifel - das deutsch-tschechische Grenzgebiet an den Rändern des Cheb-Domažlice-Grabens. Der Intraplatten-Vulkanismus des Egerbeckens ist durch mehrmalige kurzzeitige vulkanische Aktivitäten mit Ruhephasen von mehreren 10.000 bis 100.000 Jahren gekennzeichnet (Wagner et al., 2002; Hošek et al., 2019). Der alkalische Gesteinschemismus ist charakteristisch für Vulkanite in Rift-Zonen und passt in die Differentiationsreihe von Foiden, Tephriten und Basaniten bis hin zu Trachyten der tertiären Vulkanite des Eger Rifts (Ulrych et al., 2000; Haase & Renno, 2008; Haase et al., 2017). In der Regel handelt es sich um geringe Fördervolumen, welche die Vulkanstrukturen der Schlackenkegel Komorní hůrka (*deutsch: Kammerbühl*) und Železná hůrka (*deutsch: Eisenbühl*), sowie die Maare von Mýtina (Mrlina et al., 2007; 2009; Lied et al., 2020), Neualbenreuth (Rohrmüller et al., 2017) und Libá (Mrlina et al., 2019; Hošek et al., 2019) entstehen ließen. Maare werden im Allgemeinen als das Resultat phreatomagmatischer Eruptionen angesehen (z.B. Lorenz et al., 2017), wobei die Maarstrukturen von Libá auch ausschließlich durch phreatische Explosionen ohne juvenile Ejektiva entstanden sein könnten (vgl. Ollier, 1967), da bisher keine magmatischen Förderprodukte gefunden wurden. Beziehungen zwischen der Verbreitung der känozoischen Vulkanite des Egergrabens zu den variszischen Suturen des Grundgebirges sowie dem räumlich benachbarten Auftreten von Schwarmbeben, Mantelgasen und aktiven Störungszonen sind lange bekannt. Die tektonische Geometrie des Egerbeckens deutet darauf, dass das Gebiet als westlichster aktiver Bereich des Eger Rifts anzusehen ist (Babuška & Plomerová, 2010; Babuška et al., 2010; Hrubcová et al., 2017).

Neben der räumlich begrenzten vulkanischen Aktivität treten in der gesamten Region wiederholt Schwarmbeben auf (z.B. Kurz et al., 2003). In den letzten Dekaden rückte insbesondere das Zusammenspiel von magmatischen Fluiden und seismischer Aktivität an sich überschneidenden Störungssystemen im deutsch-tschechischen Grenzgebiet in der Region Vogtland-Fichtelgebirge/Oberpfalz-Egerbecken in den zentralen Fokus der (Georisiken-)Forschung (z.B. Heinicke et al. 1992; Weise et al., 2001; Parotidis et al. 2003). Der Magmatismus in der Region ist durch die relative Hochlage der Asthenosphäre verursacht (Heuer et al. 2006; Geissler et al. 2007), welche zur Bildung der Schmelzen führt. Magmen aus dem lithosphärischen Mantel und der oberen Asthenosphäre (oberer Erdmantel), sowie deren Volatile dringen entlang tiefgreifender Störungssysteme in die untere Erdkruste ein und lösen durch ihren Druck eine Extension aus (Špičák et al. 1999; Bräuer et al. 2008). Solche Intrusivkörper sind in Nordwestböhmen (einschließlich Bereich des Egerbeckens) bereits in der Unterkruste nachgewiesen (28 bis 30 km Tiefe, Hrubcová et al. 2017). Der enorme Druck der durch die Intrusionen und damit verbundene Fluidbewegungen entsteht, führt zu einer Extensionstektonik, welche eine Stauung der Spannungsenergie in der Erdkruste zur Folge hat (Špičáková et al. 2000). Dies wird als mögliche Ursache für Schwarmbeben in der Region gesehen (z.B. Parotidis et al. 2003; Bräuer et al. 2005; Fischer et al. 2014; Babuška et al. 2016). Rund 80% der Erdbeben haben ihr Epizentrum nahe der Ortschaft Nový Kostel (Tschechien; Michálek & Fischer 2013), nur wenige hundert Meter von der tschechisch-sächsischen Grenze bei Klingenthal entfernt. Somit stellen diese auch für den Südwesten Sachsens und den Nordosten Bayerns ein großes Gefährdungspotenzial dar. Im Verlauf des Schwarms im Winter 1985/86 trat ein

Erdbeben der Magnitude 4,6 auf, welches seit der Erdbebenaufzeichnung das stärkste Ereignis in dieser Region darstellt. Im Egerbecken deuten Deformationen der holozänen Ablagerungen in historischer Zeit auf stärkere Erdbebenereignisse (Magnituden > 6,5) während des Frühmittelalters hin (Štěpančíková et al., 2019). Die Hypozentren der Schwarmbeben liegen in Tiefen zwischen 5 und 15 km, wobei sich flachere Hypozentren in den letzten Jahren mehren (vgl. Buchholz & Wendt, 2011; Buchholz et al., 2013).

### **3. Gebietsabgrenzung**

Die beiden quartären Vulkangebiete in Deutschland werden aufgrund der genannten Kriterien nicht nur durch die Verbreitung der nachgewiesenen Vulkanbauten abgegrenzt, sondern von der Umhüllenden aller o.g. vulkanischen Folgen.

#### **3.1 Eifel (Rheinland-Pfalz)**

Wesentliche Indikatoren zur Begrenzung der quartären Vulkanfelder der Eifel sind:

- Verbreitung der Vulkanbauten in der Eifelregion, die sich auf ein Gebiet mit der Ausdehnung von ca. 2.000 km<sup>2</sup> konzentrieren.
- DLF-Erdbeben, deren Tiefenlage auf aufsteigende Magmen aus dem oberen Erdmantel in die mittlere und obere Erdkruste hindeutet.
- Verbreitung der Gasaustritte in Form von Mofetten und Sauerlingen, mit hohen Gehalten an Gasen des Erdmantels, die mit der Verbreitung vulkanischer Eruptionszentren in der Eifel korreliert. Sie treten aber auch in Gebieten außerhalb der quartären Vulkanfelder zu Tage.
- Forschungsergebnisse belegen eine Ausdehnung des Eifel-Plumes von ca. 30 auf 50 km (Mathar et al., 2006). Neuere Daten gehen von einer Ausdehnung der seismischen Mantelanomalie über mehrere zehner bis hunderte von Kilometern aus (Meier et al., 2016).
- Langanhaltende, großräumige Hebungen, mit den höchsten Beträgen in der Eifel. Sie werden mit dem Aufstieg eines Mantel Diapirs („Eifel-Plume“) und dem damit zusammenhängenden Magmatismus erklärt.

#### **3.2 Vogtland-Fichtelgebirge/Oberpfalz-Egerbecken**

Wesentliche Indikatoren zur Begrenzung des quartären Vulkanismus im Gebiet Vogtland-Fichtelgebirge/Oberpfalz-Egerbecken sind:

- Derzeit bekannte quartäre Vulkanstrukturen (Schlackenkegel, Maar) und die mit der magmatischen Aktivität verbundenen hydrothermale Aktivität (Mofetten, Sauerlinge, Quellaustritte).
- Austritte CO<sub>2</sub>-reicher Gase in Sauerlingen und Mofetten. Die Isotopie des Spurengases Helium und des Kohlenstoffs im CO<sub>2</sub> zeigen eine mögliche Herkunft der Gase aus dem oberen Erdmantel an. Diese Mantelsignaturen sind

im Westen bis Bad Alexanderbad (Bayern) und in den Norden bis Plauen (Sachsen) nachweisbar. Die temporäre Anreicherung und Speicherung kann als Ursache für lokale Hebungen der Krustensegmente gesehen werden, dessen Spannungsentladung als Ursache für die Schwarmbeben gesehen werden.

- Schwarmbeben, die mehrheitlich entlang der Mariánské Lázně (*Marienbader*) Störungen im Raum von Nový Kostel (wenige Kilometer südlich der sächsisch-tschechischen Grenze) vorkommen und nach Norden bis Werdau (Sachsen) und nach Westen bis Marktredwitz (Bayern) nachgewiesen werden können. Die Hypozentren der Schwarmbeben schwanken in Tiefen zwischen 5 und 15 km, wobei Erdbeben mit flachen Hypozentren in den letzten Jahren häufiger werden.

Die Vulkane, Mofetten, Säuerlinge und Schwarmbeben der Vogtland-Fichtelgebirge/Oberpfalz-Egerbecken sind in einem Gebiet verbreitet, das mehr als 4.100 km<sup>2</sup> umfasst.

#### 4. Sicherheitsbereiche

Die bisherigen Vorschläge zur Abgrenzung von Sicherheitsbereichen um die nachgewiesenen vulkanischen Gebiete erfolgten mit einem einheitlichen Radius als Umhüllende der Vulkanfelder. Der von Jentzsch (2001) und Bräuer & Jentzsch (2005) vorgeschlagene Radius von 10 km ist, nach heutigem Kenntnisstand, als zu gering einzuschätzen. Zudem reichen die, mit den geodynamischen Prozessen, der Magmengengese und deren Aufstieg und Platznahme in der Lithosphäre verbundenen Erscheinungen, wie z.B. Vertikal- und Horizontalbewegungen (Kreemer et al., 2020) sowie die Migration und Speicherung von mantelbürtigem Gas innerhalb der Lithosphäre (Bräuer et al., 2008), welche jeweils Einfluss auf die physikalische Beschaffenheit eines Wirtsgesteins haben können, weit über die Ausdehnung der Vulkanfelder hinaus (Abbildung 1).

In der Eifel werden komplexe Magmensysteme mit multiplen Magmenreservoirs in der Erdkruste und dem oberen Erdmantel vermutet (z.B. Shaw, 2004; Schmincke, 2007), die über einen Zeitraum von 100.000 Jahren aktiv waren (Ginibre et al., 2004; Schmitt, 2006). Die gewaltige Caldereneruption des Laacher See Vulkans (Vulkanexplosivitätsindex von 6) vor 13.000 Jahren wurde durch so ein Magmensystem gespeist. Dessen direkte und indirekte Auswirkungen reichten weit über die Grenzen des Vulkanfeldes hinaus (Schmincke, 2009; Leder et al., 2017). Im Gegensatz dazu stehen die Schlackenkegel und Maar-Diatrem-Vulkane beider Vulkangebiete, deren Magmen keine wesentliche Differenzierung in krustalen Magmensystemen erfahren haben und die teilweise in so kurzer Zeit aus dem lithosphärischen Mantel bis zur Erdoberfläche aufgestiegen sind (Denis et al., 2013), dass kaum Zeit für Sicherheitsmaßnahmen bleiben könnte.

Für die Sicherheit eines radioaktiven Endlagers, die für mindestens 1 Mio. Jahre zu gewährleisten ist (§ 1 Abs. 2 StandAG), muss auch die mögliche weitere Ausbreitung der quartären Vulkanfelder miteinbezogen werden. Nach Untersuchungen in der Westeifel von Mertz et al. (2015) hat sich dort die vulkanische Aktivität verlagert, mit einer über das Alter

gemittelten Geschwindigkeit von ca. 50 km/My. Allein deshalb wird für beide Vulkangebiete ein Sicherheitsabstand von mindestens 50 km allseitig um die bekannten quartären vulkanischen Bildungen als unbedingt erforderlich betrachtet. Wesentlich weiter ausgedehnt, bis in benachbarte Bundesländer hinein, sind die mit dem Magmatismus verbundenen geodynamischen Prozesse, welche die Anomalien im Erdmantel und an der Erdoberfläche (Abb. 1), sowie die Verbreitung der Mantelgasaustritte bestimmen. Dies ist bei der Planung eines Standortes zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle zusätzlich zu berücksichtigen.

## Literatur

- Babuška, V., Plomerová, J., 2010. Mantle lithosphere control of crustal tectonics and magmatism of the western Ohře (Eger) Rift. *Journal of Geosciences* 55, 171–186.
- Babuška, V., Plomerová, J., Vecsey, L., 2010. Links between the structure of the mantle lithosphere and morphology of the Cheb Basin (Eger Rift, central Europe). *International Journal of Earth Sciences* 99, 1535–1544.
- Bartels, A., Rummel, L., May, F., 2020. Dokumentation und Auswertung einer Expertenbefragung zur langfristigen Vorhersage vulkanischer Aktivität in Deutschland. *Bericht BGR, Hannover*, 104 S.
- Berberich, G.M., Berberich, M.B.; Ellison, A.M.; Wöhler, C. 2019. First Identification of Periodic Degassing Rhythms in Three Mineral Springs of the East Eifel Volcanic Field (EEVF, Germany). *Geosciences* 9, 189, doi.org/10.3390/geosciences9040189.
- Bogaard, P., Schmincke, H.-U., 1990. Vulkanologische Karte der Osteifel, 1:25.000, *Pluto Press Witten/Kiel*.
- Bräuer, V., Jentzsch G. 2005: Abgrenzung von Gebieten mit offensichtlich ungünstigen geologischen Verhältnissen. *K MAT 12-09*, 8 S.
- Bräuer, K., Kämpf, H., Niedermann, S., Strauch, G., 2005. Evidence for ascending upper mantle-derived melt beneath the Cheb basin, central Europe. *Geophysical Research Letters* 32 (8), doi.org/10.1029/2004GL022205.
- Bräuer, K., Kämpf, H., Niedermann, S., Strauch, G., Tesar, J., 2008. The natural laboratory NW Bohemia-comprehensive fluid studies between 1992-2005 used to trace geodynamic processes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 9, doi.org/10.1029/2007GC001921.
- Bräuer, K., Kämpf, H., Niedermann, S., Strauch, G., 2013. Indications for the existence of different magma reservoirs beneath the Eifel area (Germany): A multi-isotope (C, N, He, Ne, Ar) approach. *Chemical Geology* 356, 193-208.
- Büchel, G., Bardon, E., 1994. Vulkanologische Karte West- und Hocheifel 1:50.000. *Institut für Geowissenschaften, Universität Mainz*.



- Buchholz, P., Wendt, S., 2011. Erdbebenschwarm Oktober bis Dezember 2008 im Herdgebiet Nový Kostel. In: Erdbebenbeobachtung im Freistaat Sachsen, Dreijahresbericht 2007-2009. *Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden*, 16-21.
- Buchholz, P., Funke, S., Korn, M., Wendt, S., 2013. Seismische Aktivität in Mitteldeutschland (Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen) und im regionalen Umfeld. In: Erdbebenbeobachtung im Freistaat Sachsen, Dreijahresbericht 2010-2012. *Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden*, 4-26.
- BGE (Bundesgesellschaft für Endlagerung), 2020: Methodensteckbrief: Ausschlusskriterium Vulkanismus. <https://www.bge.de/de/endlagersuche/wesentliche-unterlagen/methodik/> Stand: 28. Januar 2020 (zuletzt abgerufen: 21.09.2020).
- Carlé, W. 1975. Die Mineral- und Thermalwasservorkommen von Mitteleuropa. *Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft Stuttgart*, 643 S.
- Dahm, T., Stiller, M., Merchie, J., Heimann, S., Hensch, M., Woith, H., Schmidt, B., Gabriel, G., Weber, M., 2020. Seismological and Geophysical Signatures of the Deep Crustal Magma Systems of the Cenozoic Volcanic Fields Beneath the Eifel, Germany. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 21 (9), e2020GC009062, doi.org/10.1029/2020GC009062.
- Denis, C.M., Demouchy, S., Shaw, C.S., 2013. Evidence of dehydration in peridotites from Eifel Volcanic Field and estimates of the rate of magma ascent. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 258, 85-99.
- Dittrich, D., 2019. Der welthöchste Kaltwasser-Geysir bei Andernach–Aspekte der Geologie, Hydrogeologie und Geotouristik (Exkursionen B1 und B2 am 23. und 27. April 2019). *Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins*, 27-60.
- Fischer, T., Horálek, J., 2000. Refined locations of the swarm earthquakes in the Nový Kostel focal zone and spatial distribution of the January 1997 swarm in Western Bohemia, Czech Republic. *Studia Geophysica et Geodaetica* 44 (2), 210-226.
- Fischer, T., Horálek, J., Hrubcová, P., Vavryčuk, V., Bräuer, K., & Kämpf, H. (2014). Intra-continental earthquake swarms in West-Bohemia and Vogtland: a review. *Tectonophysics* 611, 1-27.
- Geissler, W. H., Kämpf, H., Seifert, W., Dulski, P., 2007. Petrological and seismic studies of the lithosphere in the earthquake swarm region Vogtland/NW Bohemia, central Europe. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 159 (1-3), 33-69.
- Ginibre, C., Wörner, G., Kronz, A., 2004. Structure and dynamics of the Laacher See magma chamber (Eifel, Germany) from major and trace element zoning in sanidine: a cathodoluminescence and electron microprobe study. *Journal of Petrology* 45 (11), 2197-2223.
- Goepel, A., Lonschinski, M., Viereck, L., Büchel, G., Kukowski, N., 2015. Volcano-tectonic structures and CO<sub>2</sub>-degassing patterns in the Laacher See basin, Germany. *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)* 104, 1483–1495.

- Haase, K.M., Renno, A.D., 2008. Variation of magma generation and mantle sources during continental rifting observed in Cenozoic lavas from Eger Rift, Central Europe. *Chemical Geology* 257, 192-202.
- Harms, E., Schmincke, H.-U., 2000. Volatile composition of the phonolitic Laacher See magma (12,900 yr BP): implications for syn-eruptive degassing of S, F, Cl and H<sub>2</sub>O. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 138 (1), 84-98.
- Havíř, J., 2000. Stress analyses in the epicentral area of Nový Kostel (Western Bohemia). *Studia geophysica et geodaetica* 44 (4), 522-536.
- Heuer, B., Geissler, W.H., Kind, R., Kämpf, H., 2006. Seismic evidence for asthenospheric updoming beneath the western Bohemian Massif, central Europe. *Geophysical research letters* 33, L05311, doi:10.1029/2005GL02515.
- Heinicke, J., Koch, U., Krbetschek, M., 1992. Zusammenhänge Zwischen Radonanomalien und Schwarm-Erdbeben im Oberen Vogtland. *Application of Environmental and Artificial Isotopes in Hydrogeology, Hydrology, Glaciology and Environmental Protection* 28 (3-4), 337-348.
- Hemmann, A., Meier, T., Jentzsch, G., Ziegert, A., 2003. Similarity of waveforms and relative relocalisation of the earthquake swarm 1997/1998 near Werdau. *Journal of Geodynamics* 35 (1-2), 191-208.
- Hensch, M., Dahm, T., Ritter, J., Heimann, S., Schmidt, B., Stange, S., Lehmann, K., 2019. Deep low-frequency earthquakes reveal ongoing magmatic recharge beneath Laacher See Volcano (Eifel, Germany). *Geophysical Journal International* 216 (3), 2025-2036.
- Horálek, J., Hampl, F., Boušková, A., Fischer, T., 1996. Seismic regime of the West Bohemian earthquake swarm region: preliminary results. *Studia Geophysica et Geodaetica* 40 (4), 398-412.
- Horálek, J., Fischer, T., Boušková, A., Michálek, J., Hrubcová, P., 2009. The West Bohemian 2008-earthquake swarm: when, where, what size and data. *Studia Geophysica et Geodaetica* 53 (3), 351-358.
- Hošek, J., Valenta, J., Rapprich, V., Hroch, T., Turjaková, V., Tábořík, P., Pokorný, P., 2019. Nově identifikované pleistocenní maary v západních Čechách. *Zprávy o geologických výzkumech* 52, 63-70.
- Hrupcová, P., Geissler, W.H., Bräuer, K., Vavryčuk, V., Tomek, Č., Kämpf, H., 2017. Active Magmatic Underplating in Western Eger Rift, Central Europe. *Tectonic* 36 (12), 2846-2862.
- Jentzsch, G., 2001. Vulkanische Gefährdung in Deutschland - Entwicklung eines Kriteriums zum Ausschluss von Gebieten für die weitere Untersuchung hinsichtlich der Eignung als Standort eines Endlagers für radioaktive Abfälle. *Bericht Friedrich Schiller Universität Jena*, 48 S.
- Kreemer, C., Blewitt, G., Davis, P.M., 2020. Geodetic evidence for a buoyant mantle plume beneath the Eifel volcanic area, NW Europe. *Geophysical Journal International* 222 (2), 1316-1332.

- Kurz, J.H., Jahr, T., Jentzsch, G., 2003. Geodynamic modelling of the recent stress and strain field in the Vogtland swarm earthquake area using the finite-element-method. *Journal of Geodynamics* 35 (1-2), 247-258.
- Leder, J., Wenzel, F., Daniell, J.E., Gottschämmer, E. 2017. Loss of residential buildings in the event of a re-awakening of the Laacher See Volcano (Germany). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 337,111-123.
- Lied, P., Kontny, A., Nowacyk, N., Mrlina, J., Kämpf, H., 2020. Cooling rates of pyroclastic deposits inferred from mineral magnetic investigations: a case study from the Pleistocene Mýtina Maar (Czech Republic). *International Journal of Earth Sciences* 109, 1707–1725.
- Lorenz, V., Suhr, P., Suhr, S., 2017. Phreatomagmatic maar-diatreme volcanoes and their incremental growth: a model. In: Németh, K., Carrasco-Núñez, G., Aranda-Gómez, J. J. & Smith, I. E. M. (eds) 2017. Monogenetic Volcanism. *Geological Society London, Special Publications* 446, 29–59.
- Mathar, J.P., Ritter, J.R., Friederich, W., 2006. Surface waves image the top of the Eifel plume. *Geophysical Journal International* 164 (2), 377-382.
- May, F. 2002<sup>a</sup>. Säuerlinge der Vulkaneifel und der Südeifel. *Mainzer Geowissenschaftliche Mitteilungen* 31, 7-58.
- May, F. 2002<sup>b</sup>. Quantifizierung des CO<sub>2</sub>-Flusses zur Abbildung magmatischer Prozesse im Untergrund der Westeifel. *Shaker Verlag*, 170 S.
- May, F., 2019. Möglichkeiten der Prognose zukünftiger vulkanischer Aktivität in Deutschland. Kurzbericht, BGR Hannover, 87 S.
- May, F., Hoernes, S., Neugebauer, H.J., 1996. Genesis and distribution of mineral waters as a consequence of recent lithospheric dynamics: The Rhenish Massif, Central Europe. *Geologische Rundschau* 85, 782–799.
- Meier, T., Soomro, R.A., Viereck, L., Lebedev, S., Behrmann, J.H., Weidle, C., Cristiano, L., Hanemann, R., 2016. Mesozoic and Cenozoic evolution of the Central European lithosphere. *Tectonophysics* 692, 58-73.
- Mertes, H., Schmincke, H.-U., 1985. Mafic potassic lavas of the Quaternary West Eifel volcanic field. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 89 (4), 330-345.
- Mertz, D.F., Löhnertz, W., Nomade, S., Pereira, A., Prelević, D., Renne, P.R., 2015. Temporal-spatial evolution of low-SiO<sub>2</sub> volcanism in the Pleistocene West Eifel volcanic field (West Germany) and relationship to upwelling asthenosphere. *Journal of Geodynamics* 88, 59-79.
- Michálek, J., Fischer, T., 2013. Source parameters of the swarm earthquakes in West Bohemia/Vogtland. *Geophysical Journal International* 195 (2), 1196-1210.
- Michel, G., Adams, U., Schollmeyer, G. 1998. Mineral- und Heilwässervorkommen in Nordrhein-Westfalen und angrenzenden Gebieten. *GLA Krefeld*, 80S.
- Möller, I., Spickenbom, K., Krüger, M., Seeger, C. 2011. Characteristics of gas bubble streams in shallow waters of Lake Laach, Germany. *Geoöko* 32, 195-214.

- Mrlina, J., Kämpf, H., Geissler, W.H., van den Bogaard, P., 2007. Assumed Quaternary maar structure at the Czech/German border between Mýtina and Neualbenreuth (western Eger Rift, Central Europe): geophysical, petrochemical and geochronological indications. *Z. geol. Wiss.* 35 (4-5), 213-230.
- Mrlina, J., Kämpf, H., Kroner, C., Mingram, J., Stebich, M., Geissler, W.H., Kallmeyer, J., Matthes, H., Seidl, M., 2009. Discovery of the first Quaternary maar in the Bohemian Massif, Central Europe, based on combined geophysical and geological surveys. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 182 (1-2), 97-112.
- Mrlina, J., Kämpf, H., Poák, V., Seidl, M., 2019. Indikace dvou neznámých kvartérních maarových vulkánů u Libé v západních Čechách na základě gravimetrického průzkumu. *Mineralogie a geologie* 2/2019, 19-23.
- Ollier, C.D., 1967. Maars - their characteristics, varieties and definition. *Bulletin Volcanologique* 31, 45-73.
- Parotidis, M., Rothert, E., Shapiro, S.A. , 2003. Pore-pressure diffusion: A possible triggering mechanism for the earthquake swarms 2000 in Vogtland/NW-Bohemia, central Europe. *Geophysical Research Letters* 30 (20), doi: 10.1029/2003GL018110.
- Plum, H. 1989. Genetische Klassifikation und geochemische Interpretation der Mineral- und Thermalwässer der Eifel und Ardennen. *Mitteilungen zur Ingenieurgeologie und Hydrogeologie* 34 Aachen, 170 S.
- Pfanz, H., Saßmannshausen, F., Wittmann, C., Pfanz, B., Thomalla, A. 2019. Mofette Vegetation as an Indicator for geogenic CO<sub>2</sub> emission: A case study on the banks of the Laacher See Volcano, Vulkaneifel, Germany. *Geofluids* 2019, doi.org/10.1155/2019/9589306.
- Preusser, F., Rufer, D., Schreurs, G., 2011. Direct dating of Quaternary phreatic maar eruptions by luminescence methods. *Geology* 39 (12), 1135-1138.
- Raikes, S., Bonjer, K.P. 1983. Large-scale mantle heterogeneity beneath the Rhenish Massif and its vicinity from teleseismic Residuals measurements. In: Fuchs, K., von Gehlen, K., Mälzer, H., Murawski, H., Semmel, A. (Hrsg.) 1983: *Plateau Uplift, Springer Verlag*, 315-331.
- Riede, F., 2007. Der Ausbruch des Laacher See-Vulkans vor 12.920 Jahren und urgeschichtlicher Kulturwandel am Ende des Alleröd. Eine neue Hypothese zum Ursprung der Bromme-Kultur und des Perstunien. *Mitteilungen der Gesellschaft für Urgeschichte* 16, 25-54.
- Riede, F., Bazely, O., Newton, A.J., Lane, C.S., 2011. A Laacher See-eruption supplement to Tephabase: investigating distal tephra fallout dynamics. *Quaternary International* 246 (1-2), 134-144.
- Ritter, J.R.R., Christensen, U.R. 2007. Mantle Plumes - A Multidisciplinary Approach. *Springer Verlag*, 501 S.

- Ritter, J.R., Achauer, U., Christensen, U.R., Eifel Plume Team, 2000. The teleseismic tomography experiment in the Eifel region, Central Europe: design and first results. *Seismological Research Letters* 71(4), 437-443.
- Rohrmüller, J., Geiß, E., Grossmann, J., Grun, I., Kämpf, H., Mingram, J., Mrlina, J., Nowaczyk, N., Plessen, B., Stebich, M., Veress, C., Wendt, A., 2017. Reconnaissance study of a newly discovered Quaternary maar structure in the western part of the Bohemian Massif near Neualbenreuth, NE-Bavaria (Germany). *International Journal of Earth Sciences* 107 (4), 1381-1405.
- Schmincke, H.U., 2009. Vulkane der Eifel. *Springer Spektrum*, 1. Auflage, 160 S.
- Schmincke, H.-U., Lorenz, V., Seck, H.A., 1983. The quaternary Eifel volcanic fields. In: Fuchs, K., von Gehlen, K., Mälzer, H., Murawski, H., Semmel, A. (Hrsg.). Plateau uplift, the Rhenish Shield – A case History. *Springer, Berlin, Heidelberg*, 139-151.
- Schumacher, R., Schmincke, H.-U., 1991. Internal structure and occurrence of accretionary lapilli — a case study at Laacher See Volcano. *Bulletin of Volcanology* 53, 612-634.
- Špičák, A., Horálek, J., Boušková, A., Tomek, Č., Vaněk, J., 1999. Magma Intrusions and Earthquake Swarm Occurrence in the Western Part of the Bohemian Massif. *Studia Geophysica et Geodaetica* 43 (1), 87-106.
- Špičák, A., Horálek, J., 2001. Possible role of fluids in the process of earthquake swarm generation in the West Bohemia/Vogtland seismoactive region. *Tectonophysics* 336 (1-4), 151-161.
- Špičáková, L., Uličný, D., Koudelková, G., 2000. Tectonosedimentary Evolution of the Cheb Basin (NW Bohemia, Czech Republic) between Late Oligocene and Pliocene: A Preliminary Note. *Studia Geophysica et Geodaetica* 44 (4), 556-580.
- Štěpančíková, P., Fischer, T., Stemberk jr., J., Nováková, L., Hartvich, F., Figueiredo, P.M., 2019. Active tectonics in the Cheb Basin: youngest documented Holocene surface faulting in Central Europe?. *Geomorphology* 327, 472-488.
- Stoffels, M., Thein, J. 2000. Die Mineral- und Heilquellen der Region Brohltal/Laacher See. *Görres-Verlag, Koblenz*, 71 S.
- Ulrych, J., Cajz, V., Pivec, E., Novák, J.K., Nekovařík, Č., Balogh, K., 2000. Cenozoic intraplate alkaline volcanism of Western Bohemia. *Studia Geophysica et Geodaetica* 44, 346-351.
- van den Bogaard, P., 1995.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages of sanidine phenocrysts from Laacher See Tephra (12,900 yr BP): Chronostratigraphic and petrological significance. *Earth Science and Planetary Letters* 133 (1-2), 163-174.
- Wagner, G. A., Gögen, K., Jonckheere, R., Kämpf, H., Wagner, I., Woda, C., 2002. Dating of the Quaternary volcanoes Komorní Hůrka (Kammerbühl) and Železná Hůrka (Eisenbühl), Czech Republic, by TL, ESR, alpha-recoil and fission track chronometry. *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften* 30 (3), 191-200.

- Walker, K.T., Bokelmann, G.H.R., Klemperer, S.L., Bock, G., 2005. Shear-wave splitting around the Eifel hotspot: evidence for a mantle upwelling. *Geophysical Journal International* 163 (3), 962-980.
- Walker, K.T., Bokelmann, G.H., Klemperer, S.L., Bock, G., 2007. Seismic anisotropy in the asthenosphere beneath the Eifel region, western Germany. In: Ritter, J.R.R., Christensen, U.R. (Hrsg.). *Mantle plumes*. Springer, Berlin, Heidelberg, 439-464.
- Weinlich, F.H., 2014. 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* 14 (2), 143-159.
- Weinlich, F.H., Bräuer, K., Kämpf, H., Strauch, G., Tesař, J., Weise, S.M., 1999. An active subcontinental mantle volatile system in the western Eger rift, Central Europe: Gas flux, isotopic (He, C, and N) and compositional fingerprints. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63 (21), 3653-3671.
- Weinlich, F.H., Bräuer, K., Kämpf, H., Strauch, G., Tesař, J., Weise, S.M. 2003. Geochemie und Verteilung der Quellgase und tektonische Struktur des Eger-Rifts in der Oberpfalz und in Oberfranken, Bayern. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft* 154 (1), 67-83.
- Weise, S.M., Bräuer, K., Kämpf, H., Strauch, G., Koch, U., 2002. 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.