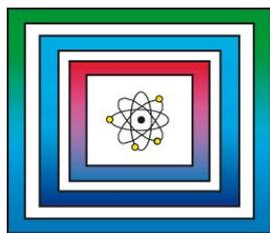


# Standortauswahl

9S2018050000

Dokumentation und  
Auswertung einer zweiten  
Expertenbefragung zur  
langfristigen Vorhersage  
vulkanischer Aktivität in  
Deutschland



Dokumentation

Hannover, März 2021

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND  
ROHSTOFFE HANNOVER

Standortauswahl

Entwicklung von Indikatoren zukünftig zu erwartender vulkanischer  
Aktivität in Deutschland

Dokumentation und Auswertung einer zweiten Expertenbefragung  
zur langfristigen Vorhersage vulkanischer Aktivität in Deutschland

Dokumentation

Autoren:	Rummel, Lisa, Dr. Bartels, Alexander, Dr. May, Franz, Dr.
Auftragsnummer:	9S2018050000
Datum:	11.03.2021
Geschäftszeichen:	B3.1/B50161-11/2021-0002/001
Gesamtblattzahl:	73

Im Auftrag:

gez. G. Enste

Direktor und Professor G. Enste  
Abteilungsleitung B 3 und Projektleitung Endlagerung

Inhaltsverzeichnis	Seite
Verkürzte Zusammenfassung .....	3
Abstract .....	4
1 Einleitung .....	5
1.1 Veranlassung und Zielsetzung .....	5
1.2 Zielgruppe und Befragung .....	6
1.3 Betrachtung zur Statistik .....	6
1.4 Definitionen .....	7
2 Bewertung der neuen bzw. überarbeiteten Indikatoren hinsichtlich ihrer Relevanz für die Prognose der vulkanischen Aktivität in Deutschland .....	8
3 Relevanz der neuen Indikatoren für das Prozessverständnis vulkanischer Aktivität in Deutschland .....	12
4 Repräsentative Zeitskalen der Indikatoren .....	14
5 Parametrisierung der Indikatoren .....	16
6 Expertise .....	18
7 Umgang mit Ungewissheiten und Datenlücken .....	20
8 Analogien und Zusammenhänge mit Vulkangebieten außerhalb Deutsch- lands .....	23
9 Anmerkungen der Befragten .....	25
10 Fazit .....	26
11 Nächste Schritte .....	27
Literaturverzeichnis .....	28
Tabellenverzeichnis .....	29
Abbildungsverzeichnis .....	30
Anhangverzeichnis .....	31

---

## Verkürzte Zusammenfassung

Autoren:	Rummel, Lisa, Dr. Bartels, Alexander, Dr. May, Franz, Dr.
Titel:	Dokumentation und Auswertung einer zweiten Expertenbefragung zur langfristigen Vorhersage vulkanischer Aktivität in Deutschland
Schlagwörter:	Expertenumfrage, Indikatoren, Parameter, Prognose, Standortauswahl, Vulkanismus

Bei der Suche nach einem Endlagerstandort für hochradioaktive Abfälle sind Gebiete mit zu erwartendem Vulkanismus in den kommenden 1 Mio. Jahren auszuschließen. Hierfür ist das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland hinsichtlich einer zukünftig möglichen vulkanischen Aktivität zu bewerten. Nach Durchführung einer ersten Befragungsrunde (Bartels et al., 2020) mit 41 teilnehmenden Personen, haben sich an der hier dokumentierten zweiten Befragungsrunde 23 Expertinnen und Experten beteiligt. Aufbauend auf der Studie von Bartels et al. (2020) ergibt sich eine erweiterte Liste möglicher Indikatoren, die für die Prognose eines zukünftigen Vulkanismus in Deutschland genutzt werden können. Zur Quantifizierung der einzelnen Indikatoren wurden von den Teilnehmern der zweiten Befragungsrunde eine Vielzahl möglicher Parameter vorgeschlagen, die in der weiteren Diskussion zu den Prognosemöglichkeiten des zukünftigen Vulkanismus in Deutschland konkretisiert und festgelegt werden können. Bei der Bemessung von Ausschlussgebieten für ein Endlager hochradioaktiver Abfallstoffe bevorzugt die relative Mehrheit der Befragten, unter Berücksichtigung von Ungewissheiten und lückenhaften geologischen Daten, die Ausweisung großräumiger Gebiete.

## Abstract

Authors:	Rummel, Lisa, Dr. Bartels, Alexander, Dr. May, Franz, Dr.
Title:	Documentation and evaluation of a second expert survey on the long-term forecast of volcanic activity in Germany
Subject terms:	expert survey, forecast, indicators, parameters, site selection, volcanism

In the search for a final repository site for high-level radioactive waste, areas with expected volcanic activity in the next 1 million years are to be excluded. For this purpose, the area of the Federal Republic of Germany has to be assessed with regard to possible future volcanic activity. After a first expert survey (Bartels et al., 2020) with 41 participants, 23 experts participated in a second survey presented in this report. Based on the results from Bartels et al. (2020), an expanded list of possible indicators that can be used to forecast future volcanism in Germany is proposed. In order to quantify the individual indicators, the participants of the second survey suggested a large number of possible parameters that can be specified and defined in further discussions regarding the possibilities to forecast future volcanism in Germany. Considering uncertainties and incomplete geological data, the relative majority of the participants prefer to exclude large-scale areas in which volcanic activity can be expected in the search for a repository site.

## 1 Einleitung

### 1.1 *Veranlassung und Zielsetzung*

Bei der Suche nach einem Endlagerstandort für hochradioaktive Abfälle sind Gebiete mit zukünftig (in den kommenden 1 Mio. Jahren) zu erwartender vulkanischer Aktivität auszuschließen (§22 Abs. 2 Nr. 5 Standortauswahlgesetz; StandAG, 2017). Im Forschungsprojekt „Magmatismus“ der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) soll ein Konzept für die Prognose einer zukünftigen vulkanischen Aktivität in Deutschland erarbeitet werden, das bei der Anwendung des Ausschlusskriteriums „Vulkanische Aktivität“ im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen genutzt werden kann. Dabei wird der Bericht „Möglichkeiten der Prognose zukünftiger vulkanischer Aktivität in Deutschland“ von May (2019) zugrunde gelegt, der für die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) erstellt wurde. In diesem Bericht wird die Verwendung von Indikatoren zur Abschätzung der zukünftig zu erwartenden vulkanischen Aktivität vorgeschlagen. Dieser Ansatz soll im Projekt „Magmatismus“ anhand der vorhandenen Daten und unter Einbeziehung der wissenschaftlichen Gemeinschaft konkretisiert werden.

Nach einer ersten Befragung der wissenschaftlichen Gemeinschaft zu Prognosemöglichkeiten des Intraplattenvulkanismus sowie grundsätzlichen Vorstellungen zu den Ursachen und Prozessen des jungen Magmatismus in Deutschland (Bartels et al., 2020), ergaben sich weiterführende Fragestellungen, die sowohl das weitere Vorgehen im Projekt „Magmatismus“, als auch die optimale Einbindung externer Expertinnen und Experten in das Projekt betreffen. Basierend auf den ausgewerteten Antworten der ersten Befragungsrunde konnte die von May (2019) vorgeschlagene Liste von Indikatoren spezifiziert und durch weitere Indikatoren ergänzt werden. Die überarbeitete Liste ist mit kurzen Erläuterungen zu den jeweiligen Indikatoren im Anhang hinterlegt (Anhang 2). Im Zuge der hier dargestellten zweiten Befragungsrunde wurden ergänzende Fragen zu der überarbeiteten Indikatorenliste gestellt und es wurde nach möglichen Parametern gefragt, die für die Quantifizierung der Indikatoren genutzt werden können. Der Umgang mit mangelnden oder mehrdeutigen geologischen Daten für die Abgrenzung von Gebieten, in denen zukünftiger Vulkanismus möglich erscheint, sowie Zusammenhänge und Analogien zu anderen Intraplattenvulkanfeldern und Studien zu Prognosemöglichkeiten dessen möglicher zukünftiger vulkanischer Aktivität, stellen einen weiteren Fokus dieser Befragungsrunde dar.

Die ausgewerteten Daten sollen zur besseren Bewertung der Indikatoren beitragen, die im weiteren Projektverlauf ausführlicher behandelt werden sollen. Dabei ist der primäre Zweck die Unterstützung des Standortauswahlverfahrens, nicht der wissenschaftliche Fortschritt, was jedoch nicht ausschließt, dass sich Empfehlungen oder Ansätze für weitere Forschungen ergeben können.

## **1.2 Zielgruppe und Befragung**

Einladungen zur Teilnahme wurden an insgesamt 43 Expertinnen und Experten versandt, von denen 41 bereits an der ersten Befragungsrunde teilgenommen hatten. Die zwei zusätzlichen Personen haben ihr Interesse, an dem Projekt mitzuwirken, nach Abschluss der ersten Befragungsrunde bekundet und wurden entsprechend bei der zweiten Befragungsrunde mitberücksichtigt. 23 der angeschriebenen Personen haben den Fragebogen bearbeitet. Darunter sind Fachleute mit unterschiedlichstem wissenschaftlichem Hintergrund, sowohl von Forschungseinrichtungen als auch von den geologischen Diensten Deutschlands, die sich mit dem Magmatismus und der jungen Geodynamik in Deutschland beschäftigen bzw. beschäftigt haben, oder zum allgemeinen Prozessverständnis beitragen können. Bei der Auswertung der Fragen sind Vorschläge oder Textzitate nicht personenbezogen wiedergegeben worden.

## **1.3 Betrachtung zur Statistik**

Zur Beurteilung der Antworten ist die Auswahl und somit der wissenschaftliche Hintergrund der Expertinnen und Experten zu berücksichtigen. Da jedoch weder die Auswahl der Expertinnen und Experten noch deren Antworten einer statistisch gesetzmäßigen Verteilung unterliegen, sind statistische Auswertungen zur Beurteilung der Konfidenz der Umfrageergebnisse nicht sinnvoll. Wir beschränken uns daher auf die Anzahl der Antworten und auf deren graphische Darstellung. Haben sich Personen enthalten, wurde dies jeweils mit dokumentiert, um eine bessere Abschätzung des wissenschaftlichen Konsenses zu ermöglichen. Rein statistische Einschätzungen des wissenschaftlichen Konsenses sind zudem nicht sinnvoll, da die befragten Fachleute die den Indikatoren zugrundeliegenden Wissensgebiete in unterschiedlicher Breite und Tiefe sowie in unterschiedlicher Anzahl abdecken.

Um abschätzen zu können, in wie weit auch die neu hinzugefügten oder inhaltlich geänderten Indikatoren durch Fachkenntnisse der Befragten abgedeckt sind, wurde hierzu um eine Einschätzung der persönlichen Expertise gebeten. Die Auswertung zeigt, dass 8 der insgesamt 9 genannten Indikatoren von mindestens drei der befragten Personen als persönliche Expertise angegeben wurden. Ausschließlich der Indikator „Temperaturfeld und Wärmestromdichte“ ist von keiner Person als persönliche Expertise benannt worden. Für den Zweck dieser Studie werden Indikatoren als hinreichend repräsentiert angesehen, wenn mindestens zwei Personen diesbezüglich eine persönliche Expertise angegeben haben. Der Indikator „Temperaturfeld und Wärmestromdichte“ wird daher als nicht ausreichend repräsentiert angesehen. Zur Beurteilung der Bewertung aller Indikatoren, auch derjenigen, die nicht geändert oder hinzugefügt wurden (siehe Spalte 1, Tab. 8 im Anhang 2), müssen die Ergebnisse aus der ersten Befragungsrunde

(Bartels et al., 2020) herangezogen werden. Hieraus ergab sich, dass 7 der insgesamt 27 aufgeführten Indikatoren von keiner bzw. maximal einer Person als persönliche Expertise angegeben wurden und damit nur gering oder gar nicht repräsentiert waren. Sie umfassten die Indikatoren „Wärmestromdichte“, „Elektrische Leitfähigkeit“, „Extensives Spannungsfeld“, „Neotektonische Aktivität“, „Geoidanomalie“, „Mantelxenolithe“ und „Krustenxenolithe“. Erfreulicherweise fanden sich zu dem generalisierten Indikator 7 („Spannungsfeld“, zuvor „Extensives Spannungsfeld“) nun weitere Experten/-innen, so dass insgesamt noch 6 der 30 Indikatoren der aktualisierten Liste (Tab. 8, Anhang 2) als nicht ausreichend repräsentiert angesehen werden müssen. Es ist jedoch anzumerken, dass alle diese Indikatoren, obwohl nicht als persönliche Expertise genannt, trotzdem von einer Mehrheit der Befragten hinsichtlich ihrer Relevanz bewertet wurden. Im weiteren Projektverlauf können noch gezielt Expertenmeinungen zu den gering repräsentierten Indikatoren erfragt werden.

Die Verteilung von Spezialisten und Personen, die sich vermutlich mehr als Generalisten sehen oder Experten auf anderen Gebieten sind, ist für die interdisziplinäre Aufgabe einer multikriteriellen Abschätzung der zu erwartenden vulkanischen Aktivität von Vorteil, wenn sich einerseits Einschätzungen aus einer mehrheitlichen Meinung ergeben und andererseits Spezialisten mit einschlägigen Kenntnissen diese mehrheitlichen Ansichten teilen. Die jeweilige Bewertung der Relevanz eines Indikators durch die Gesamtzahl der Befragten kann der Bewertung der für einen Indikator identifizierten Expertinnen und Experten gegenübergestellt und so für die Abschätzung des Konsenses bzw. zum Aufdecken möglicher Diskrepanzen genutzt werden.

#### **1.4 Definitionen**

Die folgenden qualitativen Angaben sind wie folgt definiert und finden im weiteren Verlauf des Textes Verwendung.

- **Relative Mehrheit:** Vereint eine Antwortoption mehr Stimmen auf sich als jede andere Option, ist dies als relative Mehrheit definiert.
- **Absolute Mehrheit:** Vereint eine Antwortoption mehr Stimmen auf sich als alle anderen Optionen zusammen (> 50 %), inklusive der Anzahl der Enthaltungen, ist dies als absolute Mehrheit definiert.
- **Überwiegende Mehrheit:** Vereint eine Antwortoption mehr als zwei Drittel aller abgegebenen Stimmen ( $\geq 66\%$ ), inklusive Enthaltungen, ist dies als überwiegende Mehrheit definiert.

## **2 Bewertung der neuen bzw. überarbeiteten Indikatoren hinsichtlich ihrer Relevanz für die Prognose der vulkanischen Aktivität in Deutschland**

Magmatische Prozesse äußern sich in einer Vielzahl von Phänomenen (Erdbeben, Vertikalbewegungen, seismische Laufzeitanomalien etc.), die als Indikatoren für die Abschätzung einer zukünftigen vulkanischen Aktivität herangezogen werden können. Im Auftrag der BGE hat die BGR eine Kurzstudie zu Prognosemöglichkeiten erstellt (May, 2019), die u. a. eine Liste möglicher Indikatoren enthält, die für die Prognose eines zukünftigen Vulkanismus in Deutschland von Relevanz sein können. Unter Berücksichtigung der Rückmeldungen zur ersten Befragung (Bartels et al., 2020), wurde die durch May (2019) vorgeschlagene Liste mit 27 möglichen Indikatoren, um drei Indikatoren ergänzt und einige der bereits existierenden Indikatoren inhaltlich erweitert oder generalisiert (siehe Anhang 2).

Die in der Tab. 1 aufgeführten Indikatoren wurden von den Befragten in Hinblick auf ihre Relevanz für die Prognose des Vulkanismus in Deutschland für die kommenden 1 Mio. Jahre bewertet. Generelle Enthaltungen wurden bei der Auszählung der Antworten der Rubrik „Keine Aussage“ zugerechnet (Tab. 1). Neben der Bewertung der neuen, erweiterten und generalisierten Indikatoren hatten die Befragten weiterhin die Möglichkeit, die nicht veränderten Indikatoren erneut zu bewerten, sofern sie die Relevanz des Indikators anders einschätzen als bei der ersten Umfrage. Waren hier „Keine Änderungen“ angegeben, wurden jeweils die Relevanzen aus der ersten Befragungsrunde (Bartels et al., 2020) in Tab. 1 übernommen. Anzumerken ist, dass auch bei den neuen und inhaltlich geänderten Indikatoren teilweise die Rubrik „Keine Änderungen“ angegeben wurde. Im Falle der geänderten Indikatoren wurden auch hier die Relevanzen aus der ersten Befragung übernommen.

Tab. 1: Bewertung der Indikatoren hinsichtlich ihrer Relevanz für die Prognose der zukünftigen vulkanischen Aktivität in Deutschland (Frage 1, Anhang 1.1). Angegeben ist die Gesamtzahl der abgegebenen Antworten inklusive Mehrfachbewertungen einzelner Indikatoren (siehe Text für weitere Informationen). Die sich aus der ersten Befragungsrunde ergebenden Änderungen in der Indikatorenliste sind mit „Neu“, „Generalisiert“ oder „Erweitert“ gekennzeichnet und sind in der Tabelle als erstes aufgeführt.

Nr.	Indikator	Relevanz (bitte ankreuzen) *							Sehr gering (unbedeutend)	Keine Aussage	Keine Änderungen
		Sehr hoch (unerlässlich)	Hoch	Mittel	Gering	Sehr gering (unbedeutend)	Keine Aussage	Keine Änderungen			
28	Neu	Bodenbewegungen	6	10	4	2	-	1	-		
29	Neu	Alte Störungen und Suturen	1	12	5	2	-	3	1		
30	Neu	Plattentektonische Rekonstruktionen und Modelle	3	9	7	3	-	1	-		
1	Generalisiert	Teleseismische Laufzeitanomalien	6	10	3	1	-	4	3		
7	Generalisiert	Spannungsfeld	3	6	6	3	-	5	2		
14	Generalisiert	Ergebnisse numeri- scher Simulationen der Manteldynamik	3	4	9	3	-	4	3		
5	Erweitert	Temperaturfeld und Wärmestromdichte	3	6	4	4	1	5	3		
16	Erweitert	Verbreitung känozoischer Vulkanfelder und Vulkanite	15	5	1	-	-	2	3		
27	Erweitert	Numerische Modelle zur Genese, Differentiation und zum Aufstieg von Magmen	3	9	5	2	-	4	3		
2	-	Tiefe niederfrequente (DLF) Erdbeben	11	7	3	-	-	2	9		
3	-	Schwarmbeben	7	11	3	-	-	2	8		
4	-	Vulkano-tektonische Störungen	5	11	4	1	-	2	8		
6	-	Langfristige Hebung	4	8	8	1	-	2	9		
8	-	Neotektonische Aktivität	6	6	8	1	-	2	10		
9	-	Schwereanomalien	2	4	5	8	-	4	9		
10	-	Magnetfeldanomalien	2	3	6	8	-	4	10		
11	-	Geoidanomalien	1	2	4	8	1	7	11		
12	-	Tiefenseismische Strukturen	3	8	8	-	-	4	9		
13	-	Elektrische Leitfähigkeit	1	5	5	5	1	6	10		
15	-	Ergebnisse numeri- scher Simulationen der Lithosphärendynamik	3	6	6	3	1	4	10		
17	-	Isolierte känozoische Vulkane	4	10	5	1	1	2	9		
18	-	Mantelxenolithe	1	8	5	5	1	3	10		
19	-	Krustenxenolithe	1	6	7	5	1	3	10		
20	-	Phänokristalle	3	9	3	3	1	4	10		
21	-	Gesteinschemismus	3	10	4	2	2	2	9		
22	-	Thermalwässer	2	6	8	4	-	3	9		
23	-	Geochronologische Daten	13	5	3	-	-	2	10		
24	-	Mofetten und Sauerlinge	8	7	5	-	-	3	9		
25	-	Gas- und Isotopengeochemische Analysen von Mantelfluiden	13	4	4	-	-	2	10		
26	-	Ergebnisse petrologischer Experimente	1	11	3	3	2	3	9		

\*Die meist genannte Relevanzstufe ist jeweils hervorgehoben.

Nach Auszählung der Bewertungen zur Relevanz einzelner Indikatoren (Tab. 1), ist der Bewertungsmaßstab faktorisiert (sehr hoch = 5 Pkt. bis sehr gering = 1 Pkt.) und die durchschnittlichen Relevanzen berechnet worden. Von einem Befragten wurden für einen Indikator zwei Relevanzstufen vergeben. Diese sind der Übersicht halber in Tab. 1 beide mit aufgenommen. Bei der Faktorisierung der Relevanzen (s. u.) ist für diesen Fall der Mittelwert der unterschiedlich gesetzten Relevanzen verwendet worden. Die neuen Indikatoren „Bodenbewegungen“, „Alte Störungen und Suturen“ sowie „Plattentektonische Rekonstruktionen und Modelle“ werden durch die Befragten mit durchschnittlich mittleren bis hohen Relevanzen von 3,91, 3,60 bzw. 3,55 bewertet und ordnen sich damit in der nach Relevanz bewerteten Rangliste aus Bartels et al. (2020) auf den Plätzen 8, 10 bzw. 12 ein (Abb. 1).

Die generalisierten und erweiterten Indikatoren werden im Vergleich zur ersten Befragungsrunde (Bartels et al., 2020) generell mit höheren Relevanzen bewertet (siehe Abb. 1). Auffällig sind dabei die Indikatoren „Verbreitung känozoischer Vulkanfelder und Vulkanite“ und „Ergebnisse numerischer Simulationen der Manteldynamik“, die mit 4,7 gegenüber 4,1 und 3,4 gegenüber 2,9 deutlich höher bewertet wurden. Anzumerken ist jedoch, dass sich auch die Anzahl der sich in diesem Themenfeld als Expertin oder Experte sehenden Personen verändert hat, was die Bewertung beeinflussen kann. Auch die Indikatoren, die inhaltlich nicht verändert wurden, jedoch erneut bewertet werden konnten, zeigen einen generellen Trend hin zu höheren Relevanzen (Abb. 1).

Kritisch angemerkt wurde die nicht vorhandene Quantifizierung des Begriffes „Alt“ in dem neu formulierten Indikator „Alte Störungen und Suturen“.

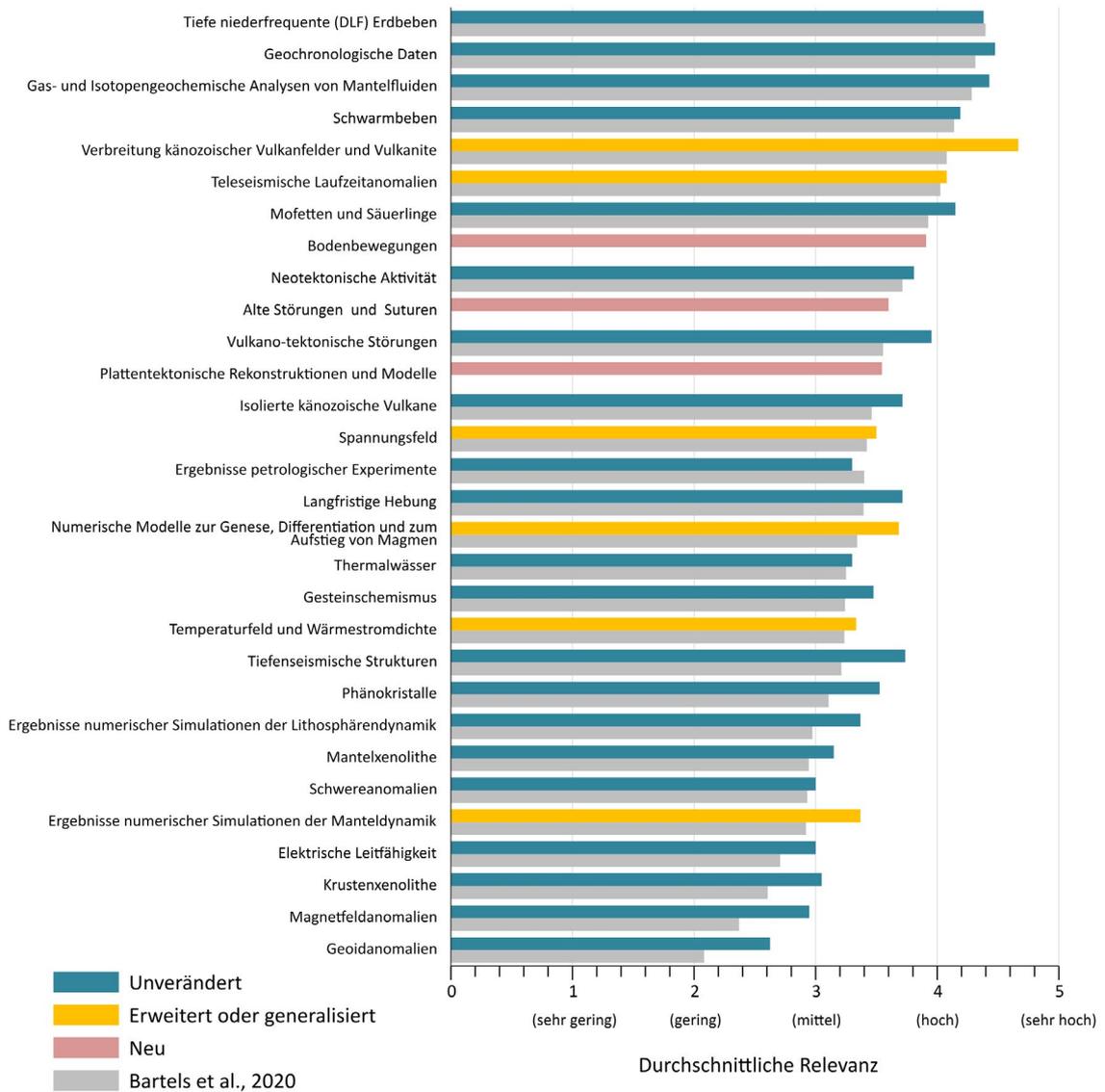


Abb. 1: Ergebnisse der Bewertung der Relevanz der unveränderten, erweiterten oder generalisierten sowie der neuen Indikatoren für die Prognose zukünftiger vulkanischer Aktivität in Deutschland im Vergleich zu den Bewertungen aus Bartels et al. (2020) (Frage 1, Anhang 1.1).

### 3 Relevanz der neuen Indikatoren für das Prozessverständnis vulkanischer Aktivität in Deutschland

Die Indikatoren ermöglichen Erkenntnisse über verschiedene Prozesse, von der Entstehung der Magmen im Erdmantel, über deren Aufstieg und Differentiation innerhalb der Erdkruste bis hin zu den Eruptionsmechanismen an der Erdoberfläche. Entsprechend können zur Auswertung verschiedener Prozesse unterschiedliche Indikatoren herangezogen werden. Abb. 2 zeigt die Beurteilung der neuen Indikatoren hinsichtlich ihrer jeweiligen Möglichkeit, Informationen zu den oben genannten Prozessen zu liefern.

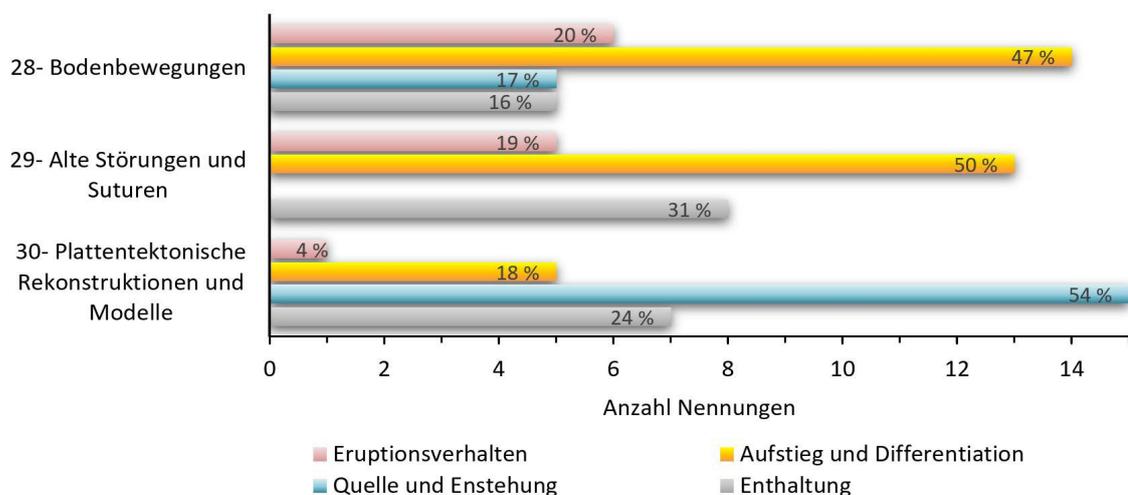


Abb. 2: Beurteilung der neuen Indikatoren hinsichtlich ihrer Möglichkeit, wichtige Erkenntnisse über die Quelle, den Aufstieg und die Differentiation oder das Eruptionsverhalten des Magmas zu liefern (Frage 2, Anhang 1.2). Anzahl der Nennungen in absoluten Zahlen der abgegebenen Antworten mit den jeweiligen prozentualen Anteilen.

Der Indikator „Plattentektonische Rekonstruktionen und Modelle“ liefert nach Ansicht der Befragten (15 x) in erster Linie Informationen über die möglichen Quellregionen von Magmen, während „Bodenbewegungen“ und „Alte Störungen und Suturen“ Rückschlüsse auf den Aufstieg und die Differentiation des Magmas zulassen (14 x bzw. 13 x). Die beiden letztgenannten Indikatoren ermöglichen zudem, wenn auch weniger häufig genannt (6 x bzw. 5 x), Erkenntnisse über das Eruptionsverhalten des Magmas.

Zusätzlich wurden von einigen Befragten weitere Erläuterungen zu den Indikatoren und deren Relevanzen für die genannten Prozesse aufgeführt (Tab. 4, Anhang 1.2). In Bezug auf das Eruptionsverhalten des Magmas wird für den Indikator „Bodenbewegungen“ auf die Wichtigkeit der Geschwindigkeit dieser Bewegung hingewiesen, welche auch bei der Überwachung aktiver Vulkane ein wichtiger Indikator ist. Auch lassen sich über die Registrierung der Bodenbewegungen Aussagen zu der Größe einer möglichen Magmakammer im Untergrund treffen. Das Wissen über die Größe einer Magmakammer und dessen Eigenschaften lässt wiederum Rückschlüsse auf das Eruptionsverhalten zu. „Alte

Störungen und Suturen“ sind insbesondere dann entscheidend für das Eruptionsverhalten, wenn der Aufstieg des Magmas in hydraulisch aktiven Störungen erfolgt und somit phreatomagmatische Eruptionen begünstigen kann. Des Weiteren wird auch hier sowie beim Indikator „Plattentektonische Rekonstruktionen und Modelle“ von einem Befragten darauf verwiesen, dass sich aus diesen Indikatoren Hinweise zur Platznahme von Magmen ergeben können. Die Eignung des Indikators „Plattentektonische Rekonstruktionen und Modelle“ für die Prognose eines zukünftigen Vulkanismus in Deutschland innerhalb der nächsten 1 Mio. Jahre wird von einem Befragten als kritisch angesehen, da solche Prozesse, gerade im Inneren stabiler Lithosphärenplatten, auf längeren Zeitskalen ablaufen.

Zudem konnten in Frage 2 auch die generalisierten bzw. erweiterten Indikatoren (Tab. 1) aufgeführt werden, falls sich durch deren inhaltliche Änderungen, im Vergleich zur ersten Befragungsrunde (Bartels et al., 2020), zusätzliche Erkenntnisse ergeben. Hier wurden von jeweils einem Befragten die Indikatoren „Temperaturfeld und Wärmestromdichte“ sowie „Verbreitung känozoischer Vulkanfelder und Vulkanite“ aufgeführt, die jeweils Erkenntnisse zu allen aufgeführten Prozessen liefern können. Des Weiteren wurde von einem Befragten der Indikator „Krustenxenolithe“ genannt. Diese können je nach Typ (Fragmente der Ober- und Unterkruste oder Fragmente junger Intrusionen) Informationen über die Quelle und Entstehung des Magmas liefern.

Darüber hinaus haben einige der Befragten an dieser Stelle weitere Indikatoren aufgeführt, die in ihren Augen zusätzliche Erkenntnisse über die Prozesse der Magmenbildung, des Magmenaufstieges sowie des Eruptionsverhaltens liefern können. Zwei Personen weisen auf die Wasserzutrittsmöglichkeiten zum Magma bzw. die Grundwasserverbreitung hin, welche sich auf das Eruptionsverhalten auswirken und phreatomagmatische Eruptionen begünstigen können. Auch wird von einem Befragten angeführt, dass ein möglicher Vulkanismus in Sedimentbecken Einfluss auf das Eruptionsverhalten haben kann, da es zu „Platznahmen von Sills und Lakkolithen in unverfestigten Sedimenten“ kommen kann. Als möglicher weiterer Indikator, der sich vor allem auf den Magmenaufstieg und die -differentiation auswirken kann, wurden von einem Befragten die Vereisungszyklen und die damit einhergehenden Druckänderungen angeführt.

An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass vor allem Phänomene, die mit oberflächennahen Prozessen in Verbindung stehen und somit das Eruptionsverhalten beeinflussen bzw. kontrollieren können, durch die hier dargestellten Indikatoren (Tab. 8, Anhang 2) nicht immer ausreichend beschrieben werden können. Für die Prognose des Auftretens von Vulkanismus konzentrieren wir uns jedoch zunächst primär auf die generelle Entstehung der Magmen und deren Aufstieg durch die Lithosphäre. Im weiteren Verlauf des Standortauswahlverfahrens sind Faktoren, wie z. B. der Eruptionsmechanismus, zu berücksichtigen, im Speziellen für lokale Abgrenzungen von Gefährdungsgebieten.

## 4 Repräsentative Zeitskalen der Indikatoren

Hinsichtlich einer zukünftigen vulkanischen Aktivität in Deutschland, sind 87 % der Befragten der Ansicht, dass die einzelnen Indikatoren Informationen für unterschiedliche Prognosezeiträume liefern können. Die übrigen 13 % haben sich an dieser Stelle enthalten. Zwei der befragten Personen enthielten sich zunächst, machten jedoch im zweiten Teil der Frage Angaben zu den Prognosezeiträumen, die von den unterschiedlichen Indikatoren ausgehen. Sie sind daher in den 87 % enthalten (Frage 3, Abb. 7, Anhang 1.3).

Die in der Abb. 3 aufgeführten Indikatoren wurden von den Befragten in Hinblick auf ihre zeitliche Reichweite für Prognosezwecke bewertet. Der kurzfristige Zeitraum entspricht dabei dem Zeitraum der zu gewährleistenden möglichen Bergung hochradioaktiver Abfälle nach dem Verschluss des Endlagers gemäß §1 des StandAG. Hierbei haben 20 der teilnehmenden Personen zu einzelnen Indikatoren Zeiträume genannt. Da nicht jede dieser 20 Personen zu allen Indikatoren Stellung bezog, wurden keine Angaben zu einem jeweiligen Indikator bei der Auszählung der Antworten der Rubrik „Keine Aussage“ zugerechnet (Tab. 5, Anhang 1.3). Es zeigt sich, dass die Indikatoren „Tiefe niederfrequente (DLF) Erdbeben“, „Schwarmbeben“, „Thermalwässer“ sowie „Mofetten und Säuerlinge“ nach Ansicht der Befragten eher geeignet sind, Informationen zu kurzfristigen Zeiträumen zu liefern. Dem gegenüber stehen die Indikatoren „Langfristige Hebung“, „Geoidanomalien“ und „Plattentektonische Rekonstruktionen und Modelle“, die nach Ansicht der Befragten in erster Linie langfristige Prozesse abbilden. Für die übrigen Indikatoren ergibt sich ein ausgeglichenes Bild und es wird angenommen, dass sich aus diesen Indikatoren Informationen sowohl für kurz- als auch langfristige Prozesse ableiten lassen können (Abb. 3).

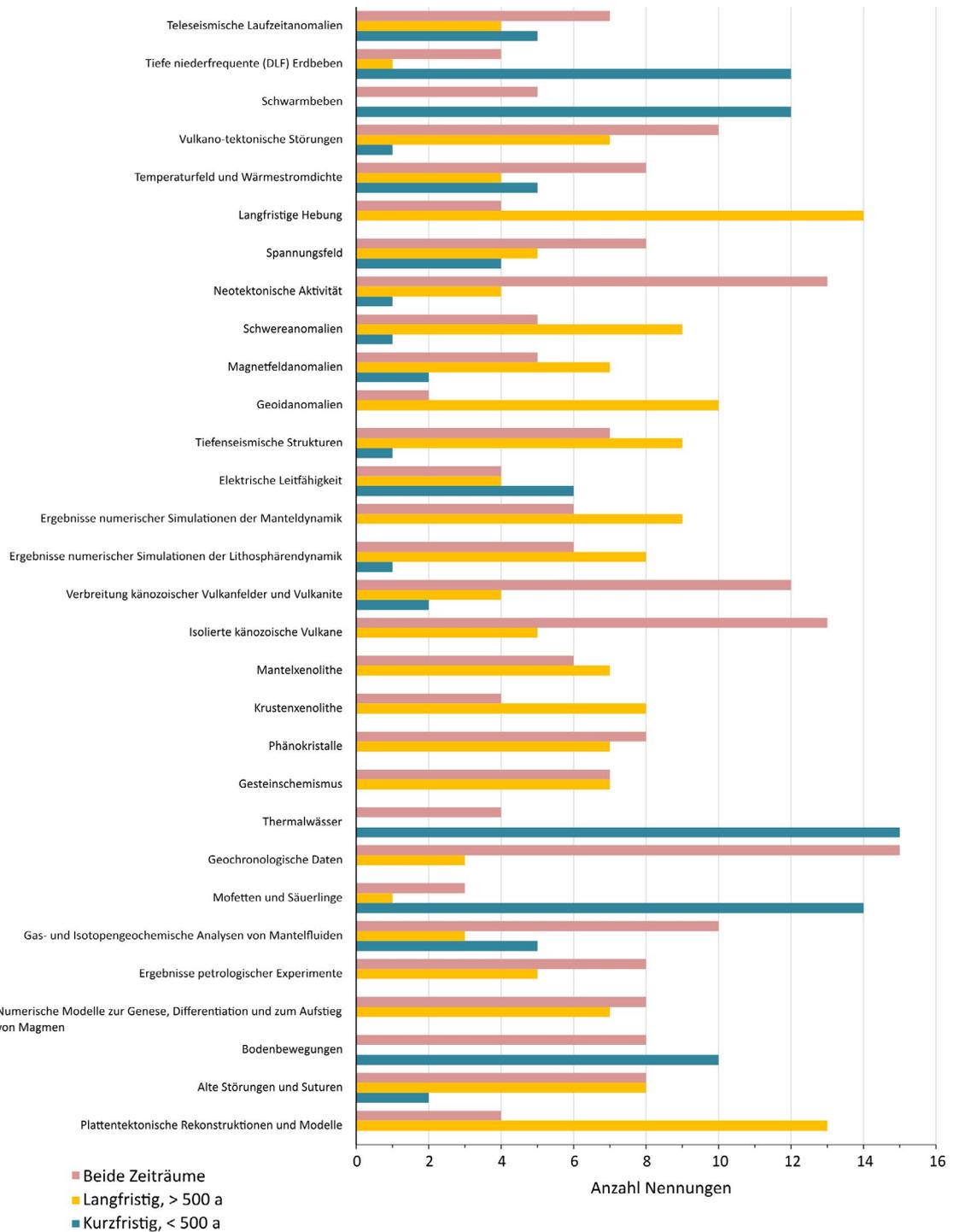


Abb. 3: Bewertung von Prognosemöglichkeiten der einzelnen Indikatoren zur vulkanischen Aktivität auf unterschiedlichen Zeitskalen (Frage 3, Anhang 1.3). Anzahl der Nennungen in absoluten Zahlen der abgegebenen Antworten.

## 5 Parametrisierung der Indikatoren

Zur Quantifizierung der einzelnen Indikatoren kann eine Vielzahl an Parametern (quantifizierbare Größe der/einer Eigenschaft eines Indikators, wie z. B.  $\Delta V_p$ ,  $\Delta V_s$ , Anisotropie, etc. für den Indikator „Teleseismische Laufzeitanomalien“) herangezogen werden. Tab. 2 zeigt eine Auswahl möglicher, von den Befragten vorgeschlagener Parameter, mit deren Hilfe eine Quantifizierung des jeweiligen Indikators denkbar wäre. Eine ausführliche Auflistung der abgegebenen Vorschläge findet sich im Anhang (Frage 4, Tab. 6, Anhang 1.4). Inwiefern die einzelnen Parameter flächendeckend auf Deutschland angewendet werden können, hängt u. a. von den zur Verfügung stehenden Daten ab.

Tab. 2: Auswahl einiger, durch die Befragten genannter Parameter zur Quantifizierung von Indikatoren (Frage 4, Anhang 1.4).

Nr.	Indikator	Parameter
1	Teleseismische Laufzeitanomalien	Wellengeschwindigkeiten ( $\Delta V_p$ , $\Delta V_s$ ), Wellendämpfung ( $\Delta Q_p$ , $\Delta Q_s$ ) Anisotropie, Oberflächenwellen, Tiefe LAB, Tiefe Moho, Tiefe MTZ, full wave form inversion
2	Tiefe niederfrequente (DLF) Erdbeben	Hypozentren, Epizentren, Periodizität, Herzbereich
3	Schwarmbeben	Hypozentren, Epizentren, Periodizität, Magnitude, Anzahl Beben
4	Vulkano-tektonische Störungen	Vorkommen, Orientierung, Chronologie, Störungsflächendichte, räumliche Ausdehnung
5	Temperaturfeld und Wärmestromdichte	Vorkommen Wärmeanomalien, Größe Wärmeanomalien, Amplitude Wärmeanomalien, $\Delta T$ (zeitlich, räumlich), T, Wärmefluss, Konvektivität/Konduktivität, Wärmestromdichte
6	Langfristige Hebung	Hebungsraten/Höhenänderungen, Thermochronologie, Geomorphologie
7	Spannungsfeld	Hauptspannungsrichtung, Spannungsstärke, Gebiete kompressiver Spannung, Gebiete extensiver Spannung, Gebiete mit Scherspannung, Spannungsänderung (Tiefe), Spannungsänderung (zeitlich), Porendrücke, Herdmechanismus (focal mechanism), In-Situ-Spannungsmessungen, Bohrlochhausbrüche
8	Neotektonische Aktivität	Vorkommen, Chronologie, Vorkommen von Störungen, Orientierungen von Störungen, Bewegungs-/Deformationsraten, Erdbensystematik (Magnitude, Tiefe, Zeit), Geländemorphologie
9	Schwereanomalien	Größe/Ausdehnung Anomalie, Vorkommen, Schwerebeschleunigung, Gesteinsdichte, Schwerfeld (g), Schweredifferenzen ( $\Delta g$ ), kurzwelliger Anteil, langwelliger Anteil
10	Magnetfeldanomalien	Größe/Ausdehnung Anomalie, Vorkommen, Suszeptibilität von Gestein, Magnetfeldvektoren (Orientierung)
11	Geoidanomalien	Größe/Ausdehnung Anomalie, Vorkommen, Schwerebeschleunigung
12	Tiefenseismische Strukturen	Vorkommen (generell, Störungen/Suturen, laminierte Unterkruste, Intrusivkörper), $\Delta V_p$ , $\Delta V_s$ , $\Delta Q_p$ , $\Delta Q_s$ , Anisotropie, Reflektivität, Tiefe Moho
13	Elektrische Leitfähigkeit	Größe/Ausdehnung Anomalien, Vorkommen Anomalien, Feldvektoren (Orientierung/Länge)
14	Ergebnisse numerischer Simulationen der Manteldynamik	Schmelzentstehung, Aufstieg Mantelmaterial, laterale Divergenzbereiche, laterale Geschwindigkeitsänderungen, P-T-Bedingungen, LAB-Tiefe, Plume-Lithosphären Interaktion, Dynamik kleiner Konvektionszellen, Entwässerung im Mantel, Einfluss subduzierter Platten
15	Ergebnisse numerischer Simulationen der Lithosphärenndynamik	Magmentransport, laterale Divergenzbereiche, Krustenmächtigkeit, laterale Geschwindigkeitsänderungen, P-T-Bedingungen, LAB-Tiefe, Plume-Lithosphären-Interaktion, Dynamik kleiner Konvektionszellen, Entwässerung im Mantel, Einfluss subduzierter Platten, Plattenkonvergenz/ Spannungsfeld
16	Verbreitung känozoischer Vulkanfelder und Vulkanite	Vorkommen Vulkanite allgemein, Vorkommen spezieller Vulkanite, Vorkommen Eruptionszentren, Vulkantyp, Altersdaten, Orientierung Gangintrusionen, Isotopendaten, Geochemie
17	Isolierte känozoische Vulkane	Vorkommen Vulkanite allgemein, Vorkommen spezieller Vulkanite, Vorkommen Eruptionszentren, Vulkantyp, Altersdaten, Periodizität, Isotopendaten, Geochemie
18	Mantelxenolithe	Vorkommen, Geochemie (Edelgasanalysen, Gesamtgesteinsanalysen, REE-Systematiken, Isotopen-Systematiken, P-T-Bedingungen), Petrographie (Kataklaste), Mineralogie (Glasanteil, Fluid- und Schmelzeinschlüsse, Fertilität, Diffusionsprofile), seismische Anisotropie, seismische Geschwindigkeiten
19	Krustenxenolithe	Vorkommen, Herkunft, Aufstiegshistorie, Geochemie (Isotopen-Systematiken, P-T-Bedingungen), Petrographie, Mineralogie (Fluid- und Schmelzeinschlüsse, Aufschmelzgrad), seismische Anisotropie, seismische Geschwindigkeiten
20	Phänokristalle	Geochemie (Isotopen-Systematiken, P-T-Bedingungen), Petrographie, Mineralogie (Diffusionsprofile, Abkühlraten)
21	Gesteinschemismus	Geochemie (Haupt- und Spurenelemente, REE-Systematiken, Isotopen-Systematiken, Mg-Gehalt, AFC-Modelle), Petrographie
22	Thermalwässer	Vorkommen, Temperatur, Geotemperatur/Temperaturgradient, hydrochemische Zusammensetzung, Isotopen-Systematik ( $He^3/He^4$ , $CO_2$ -Gehalt), $CO_2$ -Flussrate
23	Geochronologische Daten	Alter, absolute Altersdatierung, relative Altersdatierungen, Periodizität, Aktivitäts-Verlagerungsvektoren, Altersverteilung (Raum u. Zeit), Alter der jüngsten/ältesten Aktivität, Dauer von Aktivitätsphasen, Kristallisationsalter, Häufigkeitsverteilung
24	Mofetten und Säuerlinge	Vorkommen, Gaszusammensetzung (Isotopen-Systematik, $He^3/He^4$ ), Fluxdaten ( $CO_2$ -Flussraten), T, $\Delta T$
25	Gas- und Isotopengeochemische Analysen von Mantelfluiden	Vorkommen Austrittsstellen, Gaszusammensetzung (Isotopen-Systematik, $He^3/He^4$ , $\delta^{13}C$ , Xe, S), pH-Wert, Fluxdaten ( $CO_2$ -Flussraten), T, $\Delta T$
26	Ergebnisse petrologischer Experimente	Viskosität, Wasserlöslichkeit, $CO_2$ -Löslichkeit, Vp und Vs teilgeschmolzener Gesteine, Diffusionsexperimente, P-T-Bedingungen
27	Numerische Modelle zur Genese, Differentiation und zum Aufstieg von Magmen	Eruptionsperiodizität, Aufstiegsgeschwindigkeiten, Magmenentstehung, Schmelzentwicklung, P-T-Bedingungen, $H_2O$ -Gehalt, $CO_2$ -Gehalt, Störungsbildung, Störungsentwicklung, Stabilität von Magmakammern, Aufstiegswegsamkeiten, Schmelzzusammensetzung, Reichweite Metasomatose, Zeitskala Metasomatose, Art Metasomatose, Entgasungsentwicklung, Schmelz-Wasser-Interaktion, Kristallisation
28	Bodenbewegungen	Bewegungs-/Deformationsraten, Neigungsrate (Tiltmeter), Geländemorphologie
29	Alte Störungen und Suturen	Vorkommen, Orientierung, Tiefe, Einfallen, Aktivität, Seismizität, Alter, Störungsstärke, Umgebungsgestein
30	Plattentektonische Rekonstruktionen und Modelle	Extrapoliertes Spannungsfeld, Bewegungsrichtung, Bewegungsgeschwindigkeit, Extrapolation zukünftiger Bewegungen, Regionen mit Mantelmetasomatose

## 6 Expertise

Die Einbeziehung unterschiedlicher Expertinnen und Experten bei der Beurteilung einzelner Indikatoren ist von großer Bedeutung für eine partizipative, wissenschaftsbasierte und somit gesellschaftlich konsensfähige Prognose zukünftig zu erwartender vulkanischer Aktivität in Deutschland. Daher wurden die Teilnehmer gebeten, ihre persönliche Expertise noch einmal zu den inhaltlich geänderten und neu hinzugefügten Indikatoren zu nennen. Das Ergebnis zeigt, dass die meisten Themenfelder dieser Indikatoren hinreichend durch die Befragten repräsentiert sind. Eine Ausnahme stellt der Indikator „Temperaturfeld und Wärmestromdichte“ dar, der von keiner der befragten Personen als persönliche Expertise genannt wurde (Abb. 4).

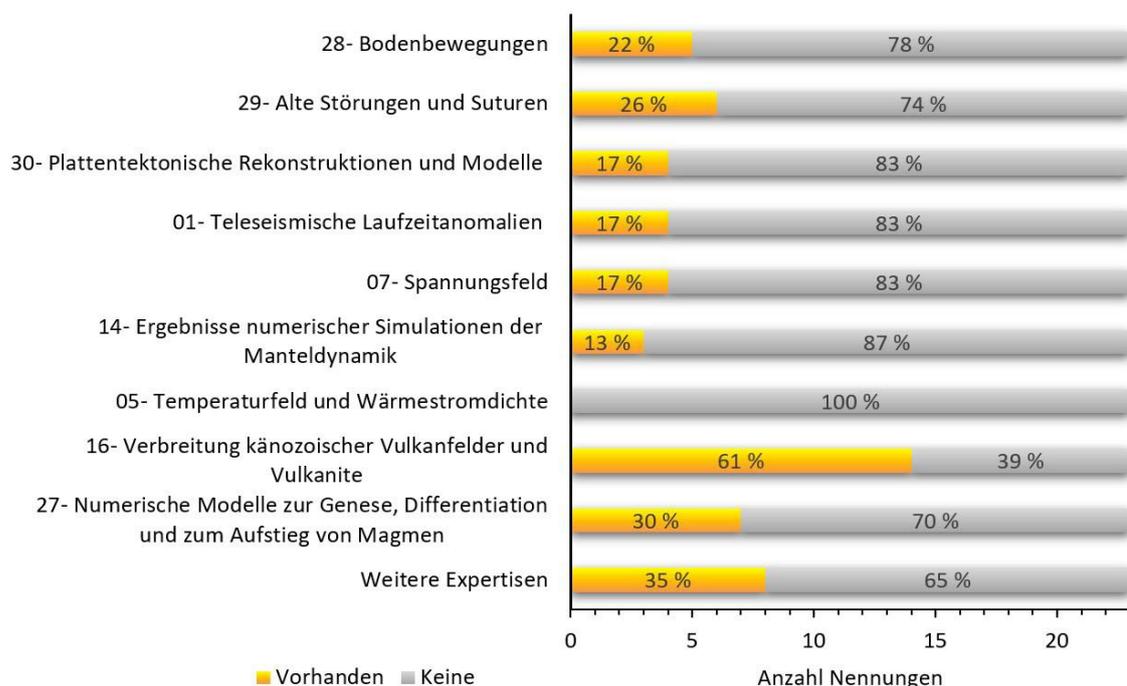


Abb. 4: Mögliche vorhandene Expertise im Themenbereich der überarbeiteten und neu hinzugefügten Indikatoren (Frage 5, Anhang 1.5). Anzahl der Nennungen in absoluten Zahlen der Befragten mit dem jeweiligen prozentualen Anteil pro Indikator.

Die Befragten konnten weitere persönliche Expertisen oder Kenntnisse nennen, sofern sich diese noch nicht in den vorhandenen Indikatoren widerspiegeln und von Bedeutung für die Prognose des Vulkanismus in Deutschland sein können. Diese weiteren Expertisen sind im Anhang (Frage 5, Tab. 7, Anhang 1.5) im Detail aufgelistet und umfassen ein breites Spektrum von Themen, von geologischen Kartendarstellungen, über junge Tektonik bis hin zur Thermochronologie, die zur Rekonstruktion der Landschaftsentwicklung sowie Datierung von Vulkaniten herangezogen werden kann. Weiterhin werden neue Daten zu Vulkaniten und Ganggesteinen in der Rhön, generelle Kenntnisse über Maar-Diatrem-Vulkane weltweit, Mineral- und Thermalwässer, Mantel-CO<sub>2</sub>-Gas, allgemeine Seismologie, Eruptionsverhalten, Altersverteilung, sowie generelle petrologische Aspekte, wie z. B. magmatische Differentiation, Geochemie und Phänokristalle genannt.

Mit dieser Einschätzung zur persönlichen Expertise kann die Bewertung zur Relevanz eines Indikators durch die Gesamtheit der Befragten (siehe Abb. 1, Kapitel 2) der Bewertung im Expertenkreis gegenübergestellt werden, um mögliche Diskrepanzen aufzudecken. Aus der Auswertung dieser Gegenüberstellung geht hervor, dass die Einschätzungen zu der Relevanz eines jeweiligen Indikators innerhalb der Gemeinschaft und im Expertenkreis sehr ähnlich sind und sich im Durchschnitt weniger als eine Relevanzstufe voneinander unterscheiden (Abb. 5). Alle Indikatoren werden mit einer durchschnittlich mittleren bis hohen und teilweise auch hohen bis sehr hohen Relevanz für die Prognosen des Vulkanismus in Deutschland bewertet, unabhängig von der jeweiligen Expertise des Befragten. Die zwischen Experten und „Nicht-Experten“ übereinstimmende Einschätzung zur Relevanz eines jeweiligen Indikators (Abb. 5) kann als Anzeichen für die hohe Fachkompetenz und Objektivität der Personen insgesamt angesehen werden, die an der Befragung teilgenommen haben.

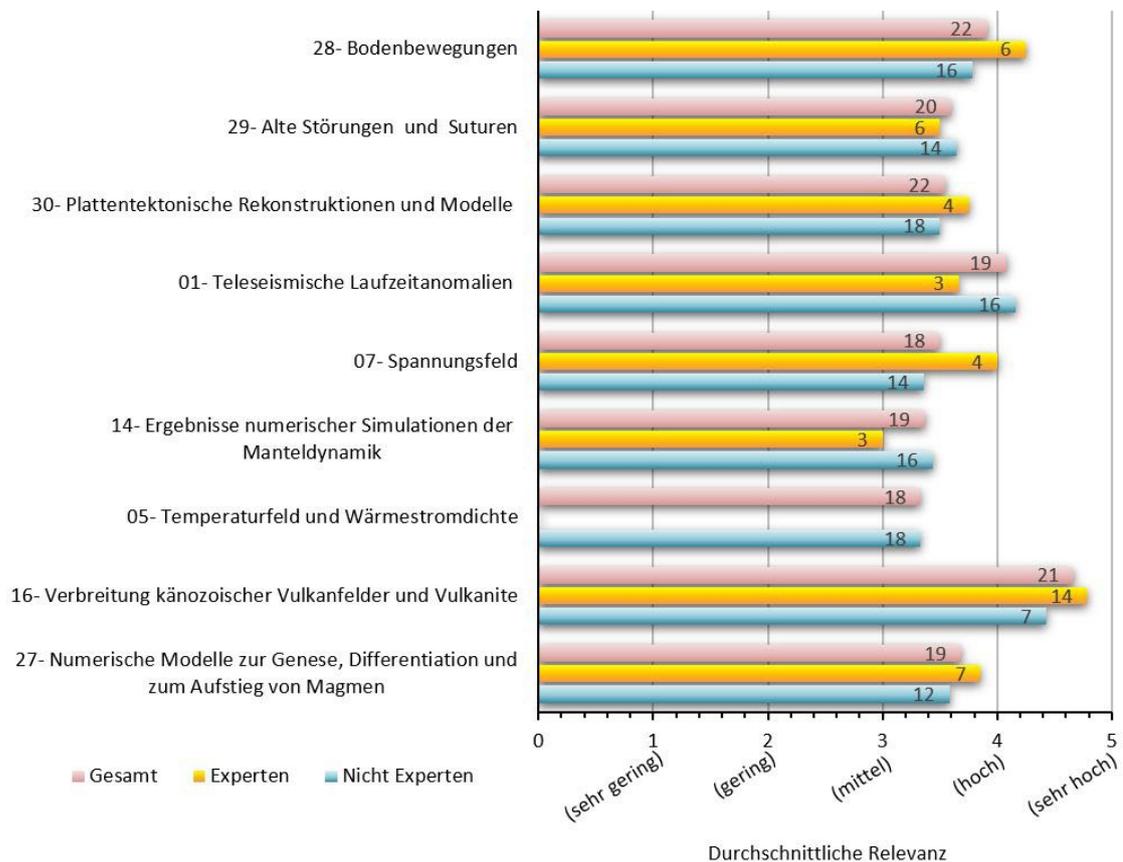


Abb. 5: Bewertung zur durchschnittlichen Relevanz der inhaltlich geänderten und neu hinzugefügten Indikatoren für die Prognosen des Vulkanismus in Deutschland. Die absolute Anzahl der gesamten Nennungen ist den Nennungen der Experten und „Nicht-Experten“ gegenübergestellt.

## 7 Umgang mit Ungewissheiten und Datenlücken

Ungewissheiten, Mehrdeutigkeiten und Datenlücken (nicht hinreichende geologische Daten) von Parametern unterschiedlicher Indikatoren sind bei der Beurteilung von Regionen, in denen zukünftiger Vulkanismus in den kommenden 1 Mio. Jahren zu erwarten ist bzw. nicht ausgeschlossen werden kann, zu berücksichtigen. Daher wurde in Frage 6 (Anhang 1.6) um eine Einschätzung hinsichtlich der relativen Größe auszuweisender Ausschlussgebiete mit zu erwartendem Vulkanismus, unter Berücksichtigung von möglicherweise mangelnden oder mehrdeutigen geologischen Daten, gebeten.

Das Ergebnis dieser Befragung zeigt ein eher geteiltes Meinungsbild, wobei 35 % der Befragten, und somit die relative Mehrheit, die Ausweisung großräumiger Gebiete bevorzugen. Neben einem großen Anteil an Enthaltungen (30 %), erachten jedoch 22 % der Befragten die Ausweisung kleinräumiger Gebiete als sinnvoll und 13 % würde eine Kombination aus klein- und großräumigen Ausschlussgebieten bevorzugen (Abb. 6).

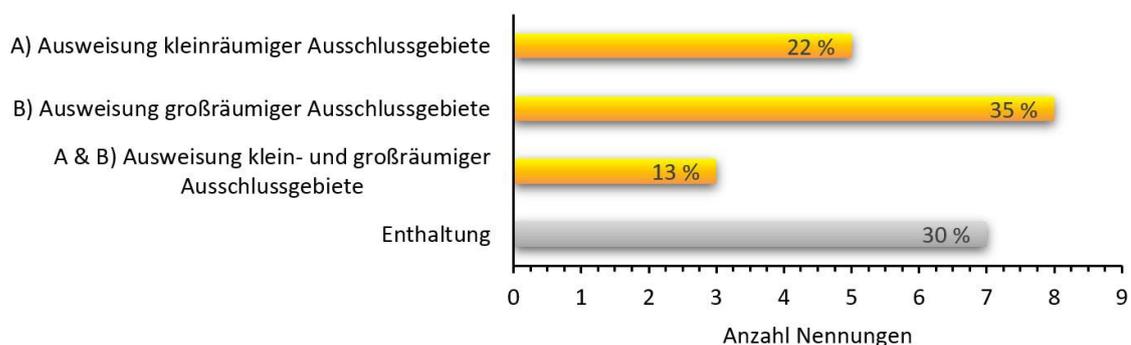


Abb. 6: Bevorzugte relative Größe von auszuweisenden Ausschlussgebieten mit einer möglichen vulkanischen Aktivität in den kommenden 1 Mio. Jahre (Frage 6, Anhang 1.6). Anzahl der Nennungen in absoluten Zahlen der Befragten mit dem jeweiligen prozentualen Anteil.

Die Gründe für die bevorzugte Ausweisung von entweder klein- oder großräumigen Gebieten sind vielseitig und im Anhang (Frage 6, Anhang 1.6) detailliert aufgelistet. Hierbei wird z. B. auf den Standortauswahlprozess hingewiesen, in dem „eine kleinräumige Ausweisung, die im Verlauf des Verfahrens mit zunehmender Datendichte und Kenntnis der räumlichen Faktoren sukzessive erweitert werden kann“, gesellschaftlich vertretbarer sei. Auch wird in diesem Zusammenhang auf das transparente, wissenschaftsbasierte Verfahren Bezug genommen, in dem „immer nur begründet (sicher belegt) und daher kleinräumig (so viel wie nötig) ausgeschlossen werden sollte“. Weiterhin wird darauf hingewiesen, dass angesichts des kurzen Zeitraumes und der noch ausstehenden Untersuchungen und Datenerhebungen kleinräumigere Gebiete aus organisatorischen und kostentechnischen Gründen detaillierter und schneller erfasst werden könnten. „Auch die Schließung von Lücken durch numerische Modellierung kann besser für kleinere Regionen erfolgen (einfach aufgrund der Auflösung und Elementzahlen)“, die „an regionale Modelle angeschlossen

werden können“. Als ein weiterer Grund für eine Ausweisung kleinräumiger Gebiete wird der meist räumlich stark begrenzte Einflussbereich von Eruptionsprodukten der Vulkane genannt. Eine weitere befragte Person gibt an, dass die Verbreitung des känozoischen Vulkanismus in Deutschland eine Ausweisung von großen Gebieten, in denen möglicher Vulkanismus vernachlässigt werden kann, nicht zulässt. So wird ein Zusammenhang zwischen dem tertiären Vulkanismus und der Deformationsfront der Alpen-Orogenese gesehen. Regionen könnten beim Vergleich krustaler Strukturen und Regionen tertiären Vulkanismus ausgeschlossen werden. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass großräumige Gebiete für einen zukünftigen Vulkanismus in Frage kommen, und daher kann diese Antwort der Ausweisung großräumiger Ausschlussgebiete zugeordnet werden.

Bei den Begründungen für eine bevorzugte Ausweisung großräumiger Gebiete wird u. a. auch hier auf den Prozess der Standortauswahl Bezug genommen. So wird das „Vorsorgeprinzip“ genannt, eine Beschränkung der Erkundung „auf Gebiete mit Erfolgsaussichten“ oder auch, dass „Punktgenaue Prognosen“ nicht möglich seien. Weitere angeführte Argumente sind z. B. die verbleibenden Unsicherheiten, die „in der Vergangenheit auch immer wieder falschen geowissenschaftlichen Vorhersagen“ oder die allgemeine Verringerung des Risikos. Hierbei könnte „eine Untersuchung der Migration der vulkanischen Eruptionszentren in den letzten z. B. 10 Mio. Jahren“ helfen das Risiko-Gebiet einzugrenzen (unter Berücksichtigung von Alter der Vulkanite und alten Störungen und Suturen). Eine weitere Person gibt an, die Ausweisung großräumiger Ausschlussgebiete zu bevorzugen, da die „Möglichkeit besteht, dass in den tertiären Vulkanfeldern neuer Vulkanismus stattfinden könnte, wie es mehrere Vulkanfelder in Deutschland und in Frankreich zeigen“. Jedoch zeigten der eozäne Vulkanismus der Hocheifel und der quartäre Vulkanismus der Ost- und Westeifel, der miozäne und quartäre Vulkanismus in der Oberpfalz und eine ganze Reihe von Vulkanfeldern in der Auvergne, dass neue Vulkanfelder nicht den alten genau folgen müssten. Weiterhin merkt diese Person an, dass sich die Anzahl der bekannten Maare in den letzten Jahren und Jahrzehnten drastisch erhöht hat. „Dies sagt, dass wir unsere Vulkanfelder nicht in jedem Detail kennen.“ Als Ursache für verschiedene aktive Prozesse in Deutschland werden die Plattentektonik und somit die Bewegungen zwischen Afrika und Europa gesehen. Solange dieser Prozess nicht als beendet angesehen werden kann, werden weiterhin Kompressionszonen zwischen den Platten existieren, „die zu weiteren Hebungen, Auf- und Überschiebungen, Zerrungen, Absenkungen, Erdbeben und Vulkanismus führen werden“. So wird als ein Endlagerstandort ein Gebiet außerhalb des Einflussbereiches des Europäischen Känozoischen Riftsystems (ECRIS) vorgeschlagen, „möglichst östlich der Tornquist-Linie“. Die Wichtigkeit der dynamischen Mantelprozesse für das Auftreten vulkanischer Aktivität im Innern von tektonischen Platten, und deren Einfluss auf regionale Strukturen, wird als weiteres Argument dafür genannt, sich auf ein größeres Ausschlussareal zu konzentrieren. So können „Magmenentstehungsprozesse sehr dynamisch nicht nur über Zeit, sondern auch räumlich sein“, in einem System, in

dem die „aufgeschlossenen Vulkanite nur punktuelle Erscheinungen eines womöglich weitaus größeren magmatischen Systems“ darstellen, „worunter sich noch eine weitaus größere Anomalie im Mantel befinden kann“.

Es gibt jedoch auch Gründe, die Ausweisung von sowohl klein- als auch großräumigen Ausschlussgebieten gleichermaßen zu bevorzugen. Hierbei wird z. B. die individuell zu betrachtende Datenlage im jeweiligen Gebiet angeführt, aber auch ein sukzessives Vorgehen von groß- zu kleinräumig genannt, damit nach großräumiger Erfassung auch kleinräumige Faktoren, wie z. B. die zeitliche Änderung von Eruptionspunkten, miteinbezogen werden können. Als weiterer Aspekt wird die Unsicherheit in Vorhersagemodellen zukünftiger Vulkanausbrüche beschrieben, die automatisch in den meisten Regionen eine Vergrößerung des Risikogebietes herbeiführe.

Kritisch angemerkt wird, dass die Begriffe „großräumig“ und „kleinräumig“ nicht genau definiert sind.

## 8 Analogien und Zusammenhänge mit Vulkangebieten außerhalb Deutschlands

Analogien und Zusammenhänge zwischen dem känozoischen Vulkanismus in Deutschland und anderen Vulkanfeldern in Europa aber auch weltweit werden von vielen der zuvor bereits befragten Expertinnen und Experten (Bartels et al., 2020) als wichtig für das Verständnis und eine mögliche Prognose magmatischer Aktivität in Deutschland erachtet. Folglich können allgemeine Prognosen zum Intraplattenvulkanismus auch hilfreiche Informationen über den zu erwartenden Vulkanismus in Deutschland liefern oder mögliche Methoden zur Vorhersagbarkeit von Vulkanausbrüchen aufzeigen. So wurde in der Frage 7 (Anhang 1.7) nach bereits existierenden Prognosen zum Intraplattenmagmatismus gefragt, die für die Prognosen des deutschen Vulkanismus relevant sein könnten. Etwa ein Drittel der befragten Personen haben hierzu nähere Informationen liefern können und gaben, neben einzelnen Regionen, auch eine Vielzahl an Literatur an, die bei Prognosen des Vulkanismus in Deutschland berücksichtigt werden kann (siehe Anhang 1.7).

Neben Beispielen aus deutschen Vulkanregionen sind vergleichbare Gebiete genannt worden, wie der Yucca Mountain (USA), das monogenetische Auckland-Vulkanfeld (Neuseeland) und die Auvergne in Frankreich. In diesem Zusammenhang wird auch auf die gut untersuchten jungen Vulkanfelder der Basin and Range Province (westlich der Rocky Mountains) hingewiesen, wozu auch der Yucca Mountain gehört.

Die Methodik der Gefährdungsanalysen für das Auckland-Vulkanfeld sowie die dort verwendeten Indikatoren könnten als Vorbild für Prognosen des Vulkanismus in Deutschland in Betracht gezogen werden. Weiterhin sei für die Prognose insbesondere die zeitliche und räumliche Entwicklung der quartären und tertiären Vulkanfelder (Eruptionseignisse und Ruhephasen) in Deutschland von zentraler Bedeutung, was auch für die Gebiete in Frankreich gelte. Auch das Pannonische Becken könnte ein Vergleichsgebiet für die deutschen Vulkanfelder sein sowie andere Vulkanprovinzen, die sich im Vorland eines sich aufbauenden Gebirges befinden (z. B. östlich entlang der Anden und der Rocky Mountains). Eine weitere Anmerkung hinsichtlich der zugrundeliegenden Prozesse betrifft die generelle Ähnlichkeit zum Zentralmassiv und zur Auvergne.

Neben den Nennungen von speziellen Regionen werden auch Prozesse genannt, die rezente Ereignisse aufzeigen, wie z. B. spezielle Erdbeben als Anzeiger für die Platznahme von Magmen in der Eifel. Weiterhin wird angemerkt, dass Datierungen „tendenziell auf ein klares und eindeutiges Wandern des Intraplatten-Magmatismus hindeuten“. Es können aber auch Informationen, wie z. B. Methoden, aus anderen Projekten gewonnen werden, auch wenn sich die entsprechende Vulkanregion stark von dem Vulkanismus in

Deutschland unterscheidet (z. B. aus dem Projekt „FUTUREVOLC“). Einer der Befragten spricht sich klar gegen die Übertragbarkeit von Prognosen anderer Vulkanfelder auf die Standortauswahl in Deutschland aus, „weil ähnliche Situationen (Manteldynamik, Tektonik) nie gegeben sind“ und empfiehlt die Anwendung von statistischen Methoden zur Prognose der vulkanischen Aktivität.

## 9 Anmerkungen der Befragten

Über die Beantwortung der konkreten Fragestellungen hinaus wurden zusätzliche Anmerkungen seitens der Teilnehmerinnen und Teilnehmer gemacht, die u. a. die Indikatoren und deren Verwendung betreffen. Sie sind detailliert im Anhang (Anhang 1.8) verzeichnet. Es wird angemerkt, dass einige der aufgelisteten Indikatoren zwar für das Prozessverständnis relevant seien, aber „nicht alle zur Überwachung bzw. der Änderung des Aktivitätszustandes geeignet sind“. So sind für die Parametrisierung nur einige der aufgelisteten Indikatoren geeignet. Weitere Anmerkungen betreffen die Beschreibung der einzelnen Indikatoren und wie diese betrachtet und zusammengefasst werden könnten, z. B. „Junge Tektonik“ als vereinender Indikator von „Bodenbewegungen“, „Vulkanotektonische Störungen“ und „Neotektonische Aktivität“. Als „Junge Tektonik“ werden hier Vorgänge mit verstärkten tektonischen Bewegungen in den letzten 1 Mio. Jahren beschrieben, die mit Hilfe von hochauflösenden 3D-Modellen der Geländeoberfläche (LIDAR) identifiziert werden können. In diesem Zusammenhang wird auch angemerkt, „dass die Fernerkundung (Luftbild-, Satellitenbildinterpretation und die Interpretation von hochauflösenden digitalen Geländemodellen) bisher deutlich zu kurz kommt“. Anzumerken ist hier, dass wir einzelne Methoden möglichst nicht als einen eigenen Indikator erfasst haben, da sie in der Regel zur Beurteilung unterschiedlicher Indikatoren beitragen können. So zeichnen sich z. B. auch Alte Suturen oder Vulkanzentren in der Fernerkundung ab.

## 10 Fazit

- Basierend auf den hier dargestellten Ergebnissen, zusammen mit den Erkenntnissen aus der ersten Befragungsrunde (Bartels et al., 2020) ergibt sich eine konsolidierte Liste von Indikatoren und deren Relevanzen für die Prognose eines zukünftigen Vulkanismus in Deutschland.
- Zusammen mit den Ergebnissen aus der ersten Befragungsrunde können den genannten magmatischen Prozessen, wie Quelle, Entstehung, Aufstieg und Differentiation von Magma sowie in Teilen das Eruptionsverhalten, Indikatoren zugeordnet werden. Die jeweiligen Indikatoren liefern dabei Informationen zu Prozessabläufen auf unterschiedlichen Zeitskalen.
- Die Ausführungen sowie weiterführende Literaturverweise der Befragten zu möglichen Parametern unterstützen die weitere Quantifizierung der einzelnen Indikatoren.
- Für die Bemessung von Ausschlussgebieten für ein Endlager hochradioaktiver Abfallstoffe präferiert die relative Mehrheit der Befragten, unter Berücksichtigung von mangelnden oder mehrdeutigen geologischen Daten, einen großräumigen Ansatz.
- Für die Prognosen des Vulkanismus in Deutschland können, neben Studien deutscher Vulkanregionen, auch Vergleichsstudien von anderen Intraplattenvulkanfeldern herangezogen werden, wie z. B. von der Auvergne (Frankreich), dem Auckland Vulkanfeld (Neuseeland) oder der Basin and Range Province (z. B. Yucca Mountain, USA).

## 11 Nächste Schritte

Aufbauend auf den hier dargestellten Ergebnissen sowie den Resultaten der ersten Expertenbefragung (Bartels et al., 2020), sind zunächst die folgenden Schritte zur verbesserten Abschätzung der zu erwartenden zukünftigen vulkanischen Aktivität in Deutschland für die Zwecke der Standortauswahl nach StandAG vorgesehen:

- Auswahl von Indikatoren und Festlegung von Parametern, die deutschlandweite Auswertungen ermöglichen.
- Parametrisierung der Indikatoren und Abstimmung von Schwellenwerten zur Abgrenzung von Gebieten mit einem erhöhten Potenzial einer zukünftigen vulkanischen Aktivität.
- Weitere Diskussionen im Expertenkreis zur Ableitung von Gewichtungen von Indikatoren und deren Parametern.

---

## Literaturverzeichnis

- Bartels, A., Rummel, L. & May, F. (2020): Dokumentation und Auswertung einer Expertenbefragung zur langfristigen Vorhersage vulkanischer Aktivität in Deutschland. Dokumentation, BGR Hannover, 104 S.
- 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.
- 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.
- Homuth, B., & Rumpker, G. (2017): The 2014–2015 earthquake series in the northern Upper Rhine Graben, Central Europe. *Journal of Seismology*, 21(1): 83-98.
- May, F. (2019): Möglichkeiten der Prognose zukünftiger vulkanischer Aktivität in Deutschland. Kurzbericht, BGR Hannover, 87 S.
- Stewart, I. S., & Hancock, P. L. (1994): Neotectonics. In *Continental deformation* (pp. 370-409).
- Verbeeck, K., Vanneste, K., & Camelbeeck, T. (2009): Seismotectonic zones for probabilistic seismic-hazard assessment in Belgium. *ONDRAF/NIRAS Report noNIROND TR-2008–31 E*.
- Weber, K. (2012): Erdbeben in der Eifel und dem Neuwieder Becken, in *Einblicke - vom Gestern zum Heute*, ed. Viereck, L., 25 Jahre DVG, Mendig.

Tabellenverzeichnis	Seite
Tab. 1: Bewertung der Indikatoren hinsichtlich ihrer Relevanz für die Prognose der zukünftigen vulkanischen Aktivität in Deutschland (Frage 1, Anhang 1.1). Angegeben ist die Gesamtzahl der abgegebenen Antworten inklusive Mehrfachbewertungen einzelner Indikatoren (siehe Text für weitere Informationen). Die sich aus der ersten Befragungsrunde ergebenden Änderungen in der Indikatorenliste sind mit „Neu“, „Generalisiert“ oder „Erweitert“ gekennzeichnet und sind in der Tabelle als erstes aufgeführt. ....	9
Tab. 2: Auswahl einiger, durch die Befragten genannter Parameter zur Quantifizierung von Indikatoren (Frage 4, Anhang 1.4). ....	17
Tab. 3: Auswertung Frage 1. Angegeben ist die Gesamtzahl der abgegebenen Antworten inklusive Mehrfachbewertungen einzelner Indikatoren. Ist die Rubrik „Keine Änderungen“ angegeben, sind die Relevanzen aus der ersten Befragungsrunde (Bartels et al., 2020) übernommen worden. ....	33
Tab. 4: Auswertung Frage 2. Angaben in absoluten Zahlen der abgegebenen Antworten. Zusätzliche Kommentare zu weiteren Indikatoren sind aufgeführt. ....	35
Tab. 5: Auswertung Frage 3. Angaben in absoluten Zahlen der abgegebenen Antworten. ....	37
Tab. 6: Auswertung Frage 4. Die Auflistung der Parameter und Literaturquellen sind wörtlich wiedergegeben. ....	38
Tab. 7: Auswertung Frage 5. Angegeben ist die absolute Anzahl der Nennungen persönlicher Expertisen im Themenbereich der inhaltlich geänderten (generalisiert oder erweitert) und neu hinzugefügten Indikatoren. Hinzu sind die genannten weiteren Expertisen aufgelistet. ....	53
Tab. 8: Erweiterung der durch May (2019) aufgestellten Liste von Indikatoren. Änderungen sind in der Spalte „Bearbeitung“ vermerkt. ....	63

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abb. 1: Ergebnisse der Bewertung der Relevanz der unveränderten, erweiterten oder generalisierten sowie der neuen Indikatoren für die Prognose zukünftiger vulkanischer Aktivität in Deutschland im Vergleich zu den Bewertungen aus Bartels et al. (2020) (Frage 1, Anhang 1.1). ....	11
Abb. 2: Beurteilung der neuen Indikatoren hinsichtlich ihrer Möglichkeit, wichtige Erkenntnisse über die Quelle, den Aufstieg und die Differentiation oder das Eruptionsverhalten des Magmas zu liefern (Frage 2, Anhang 1.2). Anzahl der Nennungen in absoluten Zahlen der abgegebenen Antworten mit den jeweiligen prozentualen Anteilen. ....	12
Abb. 3: Bewertung von Prognosemöglichkeiten der einzelnen Indikatoren zur vulkanischen Aktivität auf unterschiedlichen Zeitskalen (Frage 3, Anhang 1.3). Anzahl der Nennungen in absoluten Zahlen der abgegebenen Antworten. ....	15
Abb. 4: Mögliche vorhandene Expertise im Themenbereich der überarbeiteten und neu hinzugefügten Indikatoren (Frage 5, Anhang 1.5). Anzahl der Nennungen in absoluten Zahlen der Befragten mit dem jeweiligen prozentualen Anteil pro Indikator. ....	18
Abb. 5: Bewertung zur durchschnittlichen Relevanz der inhaltlich geänderten und neu hinzugefügten Indikatoren für die Prognosen des Vulkanismus in Deutschland. Die absolute Anzahl der gesamten Nennungen ist den Nennungen der Experten und „Nicht-Experten“ gegenübergestellt. ....	19
Abb. 6: Bevorzugte relative Größe von auszuweisenden Ausschlussgebieten mit einer möglichen vulkanischen Aktivität in den kommenden 1 Mio. Jahre (Frage 6, Anhang 1.6). Anzahl der Nennungen in absoluten Zahlen der Befragten mit dem jeweiligen prozentualen Anteil. ....	20
Abb. 7: Auswertung Frage 3. Anzahl der Nennungen in absoluten Zahlen der Befragten mit dem jeweiligen prozentualen Anteil. ....	36
Abb. 8: Auswertung Frage 6. Anzahl der Nennungen in absoluten Zahlen der Befragten mit dem jeweiligen prozentualen Anteil. ....	54
Abb. 9: Auswertung Frage 7. Anzahl der Nennungen in absoluten Zahlen der Befragten mit dem jeweiligen prozentualen Anteil. ....	58

---

Anhangverzeichnis		Seite
1	Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen) .....	32
1.1	Auswertung Frage 1 .....	32
1.2	Auswertung Frage 2 .....	34
1.3	Auswertung Frage 3 .....	36
1.4	Auswertung Frage 4 .....	38
1.5	Auswertung Frage 5 .....	52
1.6	Auswertung Frage 6 .....	54
1.7	Auswertung Frage 7 .....	58
1.8	Allgemeine Anmerkungen/ Fragen .....	60
2	Anhang 2 (Indikatorenliste und Beschreibung der Indikatoren) .....	62

## **1 Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen)**

Im Folgenden sind die an die Teilnehmer gestellten Fragen sowie die abgegebenen Antworten und beigefügten Kommentare detailliert aufgelistet. Die Abschnitte des ursprünglichen Fragebogens sind dabei kursiv dargestellt. Einleitende Textpassagen aus dem ursprünglichen Umfragedokument werden hier nicht wiedergegeben. Beigefügte Grafiken illustrieren die Ergebnisse der Auswertung.

### **1.1 Auswertung Frage 1**

- 1. Bitte bewerten Sie die in der folgenden Tabelle aufgeführten neuen und geänderten Indikatoren in Hinblick auf ihre Relevanz für die Prognose des Vulkanismus in Deutschland für die kommenden 1 Mio. Jahre. Die nicht veränderten Indikatoren können zusätzlich neu bewertet werden, sofern Sie die Relevanz des Indikators anders einschätzen, als bei der ersten Umfrage (ist dies nicht der Fall, geben Sie hier bitte „Keine Änderung“ an).*

- Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen) -

Tab. 3: Auswertung Frage 1. Angegeben ist die Gesamtzahl der abgegebenen Antworten inklusive Mehrfachbewertungen einzelner Indikatoren. Ist die Rubrik „Keine Änderungen“ angegeben, sind die Relevanzen aus der ersten Befragungsrunde (Bartels et al., 2020) übernommen worden.

Nr.	Indikator	Relevanz (bitte ankreuzen)*							Keine Aussage	Keine Änderungen
		Sehr hoch (un-erlässlich)	Hoch	Mittel	Gering	Sehr gering (un-bedeutend)	Keine Aussage	Keine Änderungen		
28	Neu	6	10	4	2	-	-	1	-	
29	Neu	1	12	5	2	-	-	3	1	
30	Neu	3	9	7	3	-	-	1	-	
1	Generalisiert	6	10	3	1	-	-	4	3	
7	Generalisiert	3	6	6	3	-	-	5	2	
14	Generalisiert	3	4	9	3	-	-	4	3	
5	Erweitert	3	6	4	4	1	-	5	3	
16	Erweitert	15	5	1	-	-	-	2	3	
27	Erweitert	3	9	5	2	-	-	4	3	
2	-	11	7	3	-	-	-	2	9	
3	-	7	11	3	-	-	-	2	8	
4	-	5	11	4	1	-	-	2	8	
6	-	4	8	8	1	-	-	2	9	
8	-	6	6	8	1	-	-	2	10	
9	-	2	4	5	8	-	-	4	9	
10	-	2	3	6	8	-	-	4	10	
11	-	1	2	4	8	1	-	7	11	
12	-	3	8	8	-	-	-	4	9	
13	-	1	5	5	5	1	-	6	10	
15	-	3	6	6	3	1	-	4	10	
17	-	4	10	5	1	1	-	2	9	
18	-	1	8	5	5	1	-	3	10	
19	-	1	6	7	5	1	-	3	10	
20	-	3	9	3	3	1	-	4	10	
21	-	3	10	4	2	2	-	2	9	
22	-	2	6	8	4	-	-	3	9	
23	-	13	5	3	-	-	-	2	10	
24	-	8	7	5	-	-	-	3	9	
25	-	13	4	4	-	-	-	2	10	
26	-	1	11	3	3	2	-	3	9	

\* Die meist genannte Relevanzstufe ist jeweils hervorgehoben.

---

- Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen) -

## **1.2 Auswertung Frage 2**

2. *Welche Erkenntnisse lassen sich aus den neu hinzugefügten Indikatoren ableiten?  
(bitte kreuzen Sie das jeweils Zutreffende an)*

*(unter „Andere“ können erweiterte oder generalisierte Indikatoren angeführt werden,  
falls durch deren Erweiterung oder Generalisierung zusätzliche Erkenntnisse möglich  
sind)*

- Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen) -

Tab. 4: Auswertung Frage 2. Angaben in absoluten Zahlen der abgegebenen Antworten. Zusätzliche Kommentare zu weiteren Indikatoren sind aufgeführt.

Indikator	Erkenntnisse über Quelle und Entstehung eines Magmas im Erdmantel	Erkenntnisse über Aufstieg und Differentiation des Magmas innerhalb der Kruste	Erkenntnisse über Eruptionsverhalten des Magmas	Keine Angabe
30- Plattentektonische Rekonstruktionen und Modelle	15	5	1	7
29- Alte Störungen und Suturen	-	13	5	8
28- Bodenbewegungen	5	14	6	5
<b>Andere (bitte benennen)</b>				
5- Temperaturfeld und Wärmestromdichte	1	1	„Indirekt, da wenn man weiß, dass sich z. B. große Magmenkammern entwickeln, daraus auch das Eruptionsverhalten resultiert!“	-
16- Verbreitung känozoischer Vulkanfelder und Vulkanite	1	1	1	-
19- Krustenxenolithe	„Krustenxenolithe muss man unterteilen in Fragmente kontinentaler Kruste (da bei trennen Unter- und Oberkruste) und Fragmente junger Intrusionen (Hornblendite, Pyroxenite etc.)“	-	-	-
„Grundwasserverbreitung, siehe Westeifel und Schwäbische Alb“	-	-	„In vielen Fällen Möglichkeit der phreatomagm. Eruptionen“	-
„Vulkanismus in Sedimentbecken: Oberrheingraben, Niederrheinische Bucht, Hessische Gräben, Neuwieder Becken“	-	-	„Möglichkeit von Platznahme von Sills, Lakkolithen in un- verfestigten Sedimenten und Diatremen an Verwerfungen und in größeren Sedimenten“	-
„Vereisung“	-	„Mehrere Kollegen haben mich in letzter Zeit angesprochen, ob Vereisungszyklen evtl. Magmenaufstiege und Eruptionen triggern können. Als Mechanismus werden Druckänderungen (Auflast) angeführt. Ich selbst bin eher skeptisch und stelle mir mehr tiefen- getriebene Prozesse vor. Für Island wird das ernsthaft diskutiert und dort kann ich es mir eher vorstellen (mehr Eis, geringere Tiefen der Schmelzreservoir.“	-	-
„Wasserzutrittsmöglichkeit zum Magma“	-	-	1	-
<b>Zusätzliche Kommentare</b>				
28- Bodenbewegungen	-	-	„Geschwindigkeit siehe Monitoring aktiver Vulkane“	-
	-	-	„Indirekt, da wenn man weiß, dass sich z. B. große Magmenkammern entwickeln, daraus auch das Eruptionsverhalten resultiert!“	-
29- Alte Störungen und Suturen	-	-	„Wenn Aufstieg von Magma in hydraulisch aktiven Störungen - dann phreatomagm.“	-
	-	-	„In Kombination mit Spannungsfeld“	-
30- Plattentektonische Rekonstruktionen und Modelle	-	-	„Indirekt, da wenn man weiß, dass sich z. B. große Magmenkammern entwickeln, daraus auch das Eruptionsverhalten resultiert!“	-
	„Für magmatisch kurzzeitige Prozesse (<1 Mio. Jahre) ist das evtl. nett zu wissen, aber speziell für neue Ausbruchsszenarien auf einer stabilen Lithosphärenplatte zu ge- nerell. Die plattentektoni- schen Prozesse haben dort (stabile Bereiche) größere Zeitskalen.“	-	„Indirekt, da wenn man weiß, dass sich z. B. große Magmenkammern entwickeln, daraus auch das Eruptionsverhalten resultiert!“	-

- Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen) -

### 1.3 Auswertung Frage 3

3. Würden Sie für verschiedene Prognosezeiträume Informationen von unterschiedlichen Indikatoren verwenden?

- Ja
- Nein
- Enthaltung

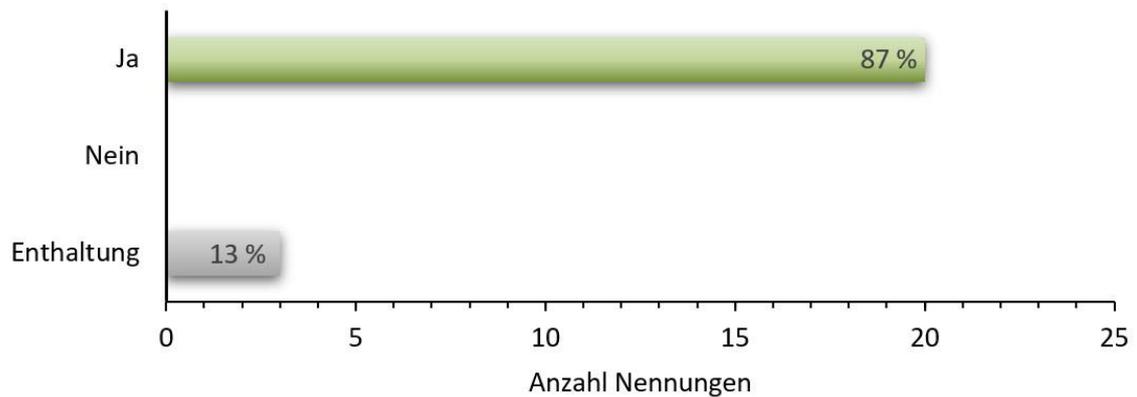


Abb. 7: Auswertung Frage 3. Anzahl der Nennungen in absoluten Zahlen der Befragten mit dem jeweiligen prozentualen Anteil.

*Wenn ja, welche Indikatoren liefern Informationen für eher kurzfristige, eher langfristige, oder gegebenenfalls für beide Zeiträume? (Der kurzfristige Zeitraum entspricht dem Zeitraum der zu gewährleistenden möglichen Bergung hochradioaktiver Abfälle nach dem Verschluss des Endlagers (§ 1, StandAG).)*

**(bitte kreuzen Sie das jeweils Zutreffende an)**

- Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen) -

Tab. 5: Auswertung Frage 3. Angaben in absoluten Zahlen der abgegebenen Antworten.

Nr.	Indikator	Kurzfristig, < 500 a	Langfristig, > 500 a	Beide Zeiträume	Keine Aussage
1	Teleseismische Laufzeitanomalien	5	4	7	4
2	Tiefe niederfrequente (DLF) Erdbeben	12	1	4	3
3	Schwarmbeben	12	-	5	3
4	Vulkano-tektonische Störungen	1	7	10	2
5	Temperaturfeld und Wärmestromdichte	5	4	8	3
6	Langfristige Hebung	-	14	4	2
7	Spannungsfeld	4	5	8	3
8	Neotektonische Aktivität	1	4	13	2
9	Schwereanomalien	1	9	5	5
10	Magnetfeldanomalien	2	7	5	6
11	Geoidanomalien	-	10	2	8
12	Tiefenseismische Strukturen	1	9	7	3
13	Elektrische Leitfähigkeit	6	4	4	6
14	Ergebnisse numerischer Simulationen der Manteldynamik	-	9	6	5
15	Ergebnisse numerischer Simulationen der Lithosphärendynamik	1	8	6	5
16	Verbreitung känozoischer Vulkanfelder und Vulkanite	2	4	12	2
17	Isolierte känozoische Vulkane	-	5	13	2
18	Mantelxenolithe	-	7	6	7
19	Krustenxenolithe	-	8	4	8
20	Phänokristalle	-	7	8	5
21	Gesteinschemismus	-	7	7	6
22	Thermalwässer	15	-	4	1
23	Geochronologische Daten	-	3	15	2
24	Mofetten und Säuerlinge	14	1	3	2
25	Gas- und Isotopengeochemische Analysen von Mantelfluiden	5	3	10	2
26	Ergebnisse petrologischer Experimente	-	5	8	7
27	Numerische Modelle zur Genese, Differentiation und zum Aufstieg von Magmen	-	7	8	5
28	Bodenbewegungen	10	-	8	2
29	Alte Störungen und Suturen	2	8	8	2
30	Plattentektonische Rekonstruktionen und Modelle	-	13	4	3

### 1.4 Auswertung Frage 4

4. Welche Parameter können zur Quantifizierung eines jeweiligen Indikators verwendet werden? (bitte listen Sie mögliche Parameter auf und geben Sie, wenn möglich, Hinweise auf Datenquellen; falls der zu Verfügung stehende Platz nicht ausreicht, erweitern Sie diesen oder fügen Sie ggfs. einen Anhang bei)

Tab. 6: Auswertung Frage 4. Die Auflistung der Parameter und Literaturquellen sind wörtlich wiedergegeben.

Nr.	Indikator	Parameter	Datenquelle
1	Teleseismische Laufzeitanomalien	Size and Location of low-velocity anomalies: Localization of magma storage bodies in the lower crust	-
		$\Delta V_s$	-
		$\Delta V_p$	-
		Laufzeitresiduen	Seismische Stationen
		Datenbanken und Karten am Besten in 3D	-
		Delta $V_p, V_s$	Ritter et al, Meier et al.
		$dV_p$ & $dV_s$ (x,y,z,t)	-
		$\Delta V_p, \Delta V_s, \Delta Q_p, \Delta Q_s$ , Anisotropie	BGR, GFZ, KIT
		$\Delta V_s, \Delta V_p$ , Anisotropie, Dämpfung	-
		Body waves $\Delta V_p$	Bijwaard & Spakman 2000; Goes et al., 1999; Koulakov et al., 2009; Spakman et al., 1993; Montelli et al., 2004; Plomerova et al., 2016; Plomerova et al., 2007; Glahn et al., 1993; Kissling et al., 2015; Raikes & Bonjer 1983; Ritter et al., 2001; Granet et al., 1995; Glahn et al., 1991; Braun & Berckhemer 1992;
		Body waves $\Delta V_s$	Koulakov et al., 2009; Legendre et al., 2012; Hoernle et al., 1995; Montelli et al., 2006; Plomerova et al., 2016; Keyser et al., 2002
		Surface waves	Meier et al., 2016; Soomro et al., 2016; Pilidou et al., 2005; Legendre et al., 2012; Friedrich et al., 1998; Mathar et al., 2006; Passier et al., 1996
		Full-wave-Form Inversion	Fichtner et al., 2005; Zhu et al., 2012/2015
		Receiver Funktion (Tiefe verschiedener Lagen/Diskontinuitäten, z. B. LAB, Moho, MTZ)	Geissler et al., 2005/2008/2010/2012; Geissler 2005; Kämpf et al., 2005/2008; Heuer et al., 2006/2011; Hetenyi et al., 2018; Budweg et al., 2006; Budweg 2002; Grunewald et al., 2001; Seiberlich et al., 2013
		Anisotropie	Babuska & Plomerova 1988/1992/2010; Plomerova et al., 2007/2012; Babuska et al., 2010; Christensen et al., 2001; Friedrich et al., 1996; Walker et al., 2005; Babuska 2002; Rabbel et al., 1998;
Attenuation	-		
Local earthquakes (Attenuation and velocity)	Mousavi et al., 2015/2017; Lopes et al., 2003		
2	Tiefe niederfrequente (DLF) Erdbeben	location and temporal evolution of activity: Constraint on Magma ascent pathways (current, potentially: future)	-
		Hypozentren (Lokation)	-
		Periodizität	-
		Datenbanken und Karten am Besten in 3D	-
		DLF in der Osteifel: Deep low-frequency earthquakes reveal ongoing magmatic recharge beneath Laacher See Volcano Osteifel, Germany) Hensch, M. et al. 2019 Geophys. J.Intern., 216/3, 2025-2036. <a href="https://doi.org/10.1093/gji/ggy532">https://doi.org/10.1093/gji/ggy532</a>	-
		Epizentren	-
		Hypozentren	-
		location (x,y,z)	-
		Frequenz und Bebedetektion, -lokalisierung, d. h. Herdparameter	Landesämter, KIT, GFZ ?
		Vorkommen	Hensch et al., 2019
(Herzbereich, Tiefe)	Hensch et al., 2019		

- Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen) -

Nr.	Indikator	Parameter	Datenquelle
3	Schwarmbeben	location and temporal evolution of activity: Magma ascent pathways (current, potentially: future)	-
		Hypozentren (Lokation)	-
		Periodizität	-
		Datenbanken und Karten am Besten in 3D	-
		Schwarmbeben im Vogtland und in Egerbecken. Auch bei ozeanischen Rücken, z. B. Juan de Fuca ridge), transform faults (Gulf of Aquaba) und "aktiven" Vulkanen, z. B. Yellowstone gibt es Schwarmbeben:	Hemmann, A., 2002, Relativrelokalisierung von Schwarmbeben in der Saxothuringischen Seismotektonischen Provinz, Diss. Univ. Jena. Shelly DR, Hill DP, Massin F, Farrell J, Smith RB, & Taira TA (2013) A fluid-driven earthquake swarm on the margin of the Yellowstone caldera. J Geophys Res: Solid Earth, 118(9); 4872-4886. (siehe auch Google scholar)
		Epizentren	-
		Häufigkeit	-
		Location (x,y,z)	-
		Bebendetektion, -lokalisierung, d.h. Herdparameter	Landesämter, KIT, GFZ ?
		Vorkommen (auch Wiederkehrrate), Anzahl Beben, Tiefe, Magnitude,	Verbeeck et al., 2009; Fischer et al., 2013; Bräuer et al., 2003/2004/2007/2008/2009/2011/ 2014/2018; Babuska et al., 2016; Heinicke et al., 2019; Spacek et al., 2006; Spicak et al., 1999; Vavrycuk & Hrubcova 2017; Weise et al., 2001; Hensch et al., 2019; Homuth & Rumpker 2017; Weber et al., 2012; Kraft et al., 2006;
Systematik mit Mofetten/Säuerlingen	-		
Magnituden	Erdbebenberichte		
4	Vulkano-tektonische Störungen	Ggfs. ableiten von Linienelementen in der Nähe von auf Karten dargestellte vulkanischer Ablagerungen	GK25 der Staatlichen Geologischen Dienste, GÜK250, Diplomkartierungen, Veröffentlichungen, weitere Karten (zu recherchieren)
		Location and time-series of activity: Magma ascent pathways (historic, potentially: future)	-
		Vorkommen (Lokalität)	-
		Orientierung	-
		Lage der Störungen im Raum, Bewegungsmuster	Herdflächenlösungen, geologische Geländeaufnahme
		Richtungen und Einfallen an der Oberfläche und Verfolgung in die Tief. Eine 3D Darstellung wäre extrem gut.	-
		Tachov-Verwerfung mit den Vulkanen im westlichsten Böhmen und östlichster Oberpfalz. 2. Verwerfung entlang dem Mosenberg und im Devon unter dem Meerfelder Maar, Westeifel. 3. Verwerfung mit Diatrem am Westrand des nördlichen Oberrheingraben (Lutz et al., 2013)	-
		Verlauf in Bezug auf das regionale Spannungsfeld	-
		Störungsflächendichte, Streichrichtungsverteilung (2D), Einfallsrichtungsverteilung (2D)	-
		Richtung	-
		Ausmaß (laterale und vertikale Komponente)	-
Alter	-		

- Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen) -

Nr.	Indikator	Parameter	Datenquelle
5	Temperaturfeld und Wärmestromdichte	Size, amplitude and Location of anomalies: Localization of magma storage bodies in the lower crust, and shallow magma chambers	-
		Vorkommen von Wärmeanomalien ( $\Delta T$ )	-
		Zeitliche Veränderung von $\Delta T$	-
		Wärmefluss, Verhältnis Konvektivität zu Konduktivität	-
		Wärmestromdichte	-
		Satellite data	-
		Oberflächentemperaturverteilung, Wärmefluss, Wärmeflussdichte	-
		T, q	-
		Wärmestromdichte (gemessen & Modell)	<a href="https://ihfc-iugg.org/products/global-heat-flow-database/data">https://ihfc-iugg.org/products/global-heat-flow-database/data</a> ; Cermak, 1993; Förster et al., 2000/2003; Schintgen et al., 2015; Norden et al., 2008; Kappelmeyer, 1977; Hänel 1983; Dijkshoorn & Clauser, 2013; Bucher & Stolper, 2016; Schädel & Stolper 1984; Lithe et al., 2019;
		Rezente Temperaturdaten (Bohrloch, Oberfläche (vermutlich nicht relevant))	Agemar et al., 2012/2014; Clauser et al., 2002; Geothermie-Atlas; Schintgen 2015;
		Temperaturmodell	Cloetingh et al., 2010; Pollack et al., 1977; Sobolev et al., 1997; Freymark et al., 2017; Artemieva, 2019;
		Abgeleitet von $\Delta V_p / \Delta V_s$	Goes et al., 2000;
		Vergangene Temperaturdaten (Xenolithe/Modelle)	-
6	Langfristige Hebung	Wavelength and amplitude of anomalies: Active loading of magma storage bodies at various depths	-
		Hebungsraten	Jähne-Klingberg, 2020
		Präzise geodätische Höhenänderungen	Relative Höhenänderungen auf Nivellements
		Oberflächenbewegung	Radardaten-InSAR, Bodenbewegungsdienste
		Thermochronologische Daten, Geomorphologische Daten	-
		Seit Beginn der zweiten (= stärkeren Hebung der Rheinischen Masse (vor 800-700 ka) setzte der Vulkanismus in der Westeifel, Osteifel, und südlichster Westerwald ein (Literatur Fuchs, K., Gehlen, K., Mälzer, H., Murawski, H., & Semmel, A. (Eds.). (2013). Plateau uplift: The Rhenish Shield-a case history (No. 104). Springer Science & Business Media.	-
		Betrag	-
		Hebungsrate	-
		InSAR, dz, available from ESA/DFR	-
		Hebungsrate, räumliche (2D, 3D) Hebungsratenverteilung	-
		$\Delta h$ <a href="https://www.bkg.bund.de/DE/UEber-das-BKG/Geodaesie/Integrierter-Raumbezug/Hoehe-Deutschland/hoehe-deutsch_cont.html">https://www.bkg.bund.de/DE/UEber-das-BKG/Geodaesie/Integrierter-Raumbezug/Hoehe-Deutschland/hoehe-deutsch_cont.html</a>	Bundesamt für Geodäsie und Kartographie
		Hebungsrate	-
		Hebungsentwicklung (relativ, falls genaue Daten nicht vorhanden)	-

- Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen) -

Nr.	Indikator	Parameter	Datenquelle
7	Spannungsfeld	Wavelength and amplitude of anomalies: Active loading/unloading of magma storage bodies; magma transport	-
		Orientierungen der Spannungsvektoren	-
		Krustale Stressindikatoren	Herdflächenlösungen, Bohrlochrandausbrüche, geologische Indikatoren (Bruchkriterien) etc.
		Richtungen und Größe	-
		Maximale Kompression in NNE/SSW-Richtung führte zur Bildung des Oberrheingrabens, der Ausrichtung der Heldburger Gangschar und des Hocheifel-Vulkanfeldes. Drehung der maximalen Kompressionsrichtung nach NW-SE führte zur NW_SE Ausrichtung der beiden Eifel-Vulkanfelder (siehe Fuchs et al. 2013. In Nr. 6	-
		Regime (kompressiv, extensiv, Scherung)	-
		Für Spannungsmagnituden und Spannungsorientierungen:	World-stress-map.org für Orientierungen und teilweise für Spannungsmagnituden
		-	Ergebnisse und Publikationen des Projekts SpannEnd (Sammlung der Daten von Spannungsmagnituden in Deutschland und Umgebung; numerische Modellierung zum Spannungsfeld). <a href="http://www.spannend-projekt.de/">http://www.spannend-projekt.de/</a>
		Drilling Induced Fractures und Breakouts aus Bohrlochlogs, Leak Off Test und FIT Ergebnisse, Bohrberichte (z. B. für Spülungsverlustdaten), Porendrucke für die Ermittlung der effektiven Spannungen	Zu Porendrücken (für effektives Spannungsfeld) Veröffentlichungen von Drews: Porenüberdruck im Bayerischen Molassebecken M. Drews, W. Bauer, H. Stollhofen, GeoZentrum Nordbayern, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg DGMK/ÖGEW-Frühjahrstagung 2018, Fachbereich Aufsuchung und Gewinnung Celle, 18./19. April 2018, Disequilibrium compaction overpressure in shales of the Bavarian Foreland Molasse Basin: Results and geographical distribution from velocity-based analyses Michael C. Drews*, Wolfgang Bauer, Luca Caracciolo, Marine and Petroleum Geology 2018
		Weitere Spannungsindikatoren nach WSM (z. B. Focal Mechanisms, geologische Indikatoren etc.)	-
		Earthquake catalogues	Earthquake focal mechanisms
		Spannungsfeldgradienten	-
		Spannungstensor	World Stress Map, GFZ
		Spannungsregime (Richtung der Hauptnormalspannung)	-
Änderung der Spannung mit der Tiefe	-		
Zeitliche Spannungsänderung (wenn nicht in Neotektonik enthalten)	-		
8	Neotektonische Aktivität	Location, Timing: Active loading/unloading of magma storage bodies; magma transport	-
		Vorkommen von Störungen (Lokalität)	-
		Orientierungen von Störungen	-
		Bewegungsraten an Störungszonen	-
		Rezente Deformationsraten	-
		Geodätisch nachgewiesene Bewegungen, Scharfkantigkeit von topografischen Geländeformen, Luft- und Satellitenbildinterpretationen	Nivellementmessungen, LIDAR-Daten, Luftbild und Satellitenbilddaten
		Bewegungen	Radardaten, InSAR
		Karten mit Lokalisierungen am Besten in 3D	-
		Erdbeben und Scherung des Oberrheingrabens, junge Erdbeben mit entsprechender Ausrichtung, Erdbeben im Grenzbereich Deutschland-Belgien-Holland, junge Versetzungsbeträge in Niederrheinischer Bucht	-
		Erdbeben	-
		Störungen	-
		Ereignis-Häufigkeiten, Ereignis-Häufigkeitsverteilungen (2D und 3D)	-
		Erdbeben (Magnitude, Tiefe, Zeit)	-
		Störung (laterale und vertikale Ausdehnung)	-
		Deformationen (Störungsanzeiger)	-
		Zeit der aktiven Phase	-

- Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen) -

Nr.	Indikator	Parameter	Datenquelle
9	Schwereanomalien	Wavelength and amplitude of anomalies: Localization of magma storage bodies in the lower crust	-
		Vorkommen (Lokalität)	-
		$\Delta m/s^2$ der Schwerebeschleunigung	-
		Dichte von Gesteinen, Schweredifferenzen	Geologisch plausible Modelle
		Karten mit Größen und Richtungen am Besten in 3D	-
		Langwellige Anteile und kurzwellige Anteile	-
		Interpretation erfordert zusätzliche Informationen	-
		-	Ergebnisse der Untersuchungen im Geotechnologien Programm
		dg(x,y,z) satellite Grace	-
		$\Delta g$	LIAG
		Wert	-
		Gradient	-
		Tiefe der Anomalie	-
		mGal	-
10	Magnetfeldanomalien	Wavelength and amplitude of anomalies: Localization of magma storage bodies in the lower crust	-
		Vorkommen (Lokalität)	-
		Magnetische Anomalien passiver Messungen (Magnetometer), Messgröße magnetische Flussdichte (Tesla). Elektromagnetische Anomalien bei aktiven Messungen (Induktionsspule), Messgröße Spannung der Sekundärfelder (Volt)	-
		Suszeptibilitätsunterschiede verschiedener Gesteine	Geologisch plausible Modelle
		Karten mit Größen und Richtungen am Besten in 3D	-
		Vertikale Gradienten	-
		Horizontale Gradienten	-
		Interpretation erfordert zusätzliche Informationen	-
		Satellites ESA	-
		Magnetfeld-Vektoren	LIAG LMU (Max Moorkamp)
		Wert	-
		Gradient	-
		Tiefe der Anomalie	-
		Nt (Nanotesla)	-
11	Geoidanomalien	Wavelength and amplitude of anomalies: Localization of magma storage bodies in the lower crust	-
		Vorkommen (Lokalität)	-
		Siehe Schwereanomalie	-
		Karten mit Größen und Richtungen am Besten in 3D	-
		Interpretation erfordert zusätzliche Informationen	-
		InSAR	-

- Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen) -

Nr.	Indikator	Parameter	Datenquelle
12	Tiefenseismische Strukturen	Size and Location of low-velocity anomalies: Localization of magma storage bodies in the lower crust	-
		Vorkommen (Lokalität)	-
		Orientierung	-
		Karten mit Größen und Richtungen am Besten in 3D	-
		Störungen und Suturen	-
		Lamellare Unterkruste	-
		Intrusivkörper	-
		-	Sind nur dort gut erfasst wo es 3DSeismik gibt, aber nicht mal unbedingt da, weil das Grundgebirge normalerweise nicht miterfasst wurde. Vorschlag: über BVEG die tatsächlichen Strukturen prüfen. Z. B. im norddeutschen tektonischen Atlas sind viele Störungen drin, die die KW-Industrie als falsch erachtet. Über BVEG könnte man ggfs. die Informationen erhalten
		Earthquake catalogues	-
		Vp, Vs, Qp, Qs, Anisotropie, Reflektivität	GFZ, KIT
		Seismische Geschwindigkeit mit der Tiefe	Artemieva & Thybo, 2013; Artemieva et al., 2006; Tesauro et al., 2008; Sichien et al., 2012
		reflektierende bzw. refraktierende Lagen	Hrubcova et al., 2017; Dahm et al., 2020; Prodehl et al., 1992;
Tiefenlage der Diskontinuitäten (z. B. Moho)	Siehe Ergebnisse: DEKORP, Granu95, KTB, BOHEMIA, ECORS, EUGEMI, POLONAISE, SUDETES, ALP, Geotraverse à seismische Profile		
13	Elektrische Leitfähigkeit	Size and Location of low-resistivity anomalies: Localization of magma storage bodies in the lower crust	-
		Karten mit Größen und Richtungen am Besten in 3D	-
		Interpretation erfordert zusätzliche Informationen	-
		Feldvektoren	-
		Erhöhte elektrische Leitfähigkeit (Magnetotellurik)	Munoz et al., 2018
14	Ergebnisse numerischer Simulationen der Manteldynamik	Predicted large-scale distribution of mantle melting and volcanism over space and time	-
		Wo können mögliche Strukturen aufsteigenden Mantelmaterials modelliert werden	-
		Karten mit Größen und Richtungen am Besten in 3D	-
		Vertikaler Aufstieg, mm/a	-
		Laterale Divergenzbereiche	-
		Laterale Geschwindigkeitsänderungen	-
		dT(x,y,z), dP	-
		-	L. Rummel
		Einfluss der LAB Tiefe	-
		Plume-Lithosphäre Interaktion	-
		Dynamik kleiner Konvektionszellen	-
		Entwässerung im Mantel	-
		Einfluss subduzierter Platten	-
Aufstiegsraten von Mantelmaterial unterschiedlicher Temperatur und Zusammensetzung	-		

- Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen) -

Nr.	Indikator	Parameter	Datenquelle
15	Ergebnisse numerischer Simulationen der Lithosphärendynamik	General orientation and dynamics of magma transport (e. g. as a function of Spannungsfeld)	-
		Modellierung möglicher Dehnungsstrukturen	-
		Modellierung der Krustenmächtigkeit	-
		Karten mit Größen und Richtungen am Besten in 3D	-
		Laterale Divergenzbereiche	-
		Laterale Geschwindigkeitsänderungen	-
		dT(x,y,z), dP	-
		-	L. Rummel
		Einfluss der LAB Tiefe	-
		Plume-Lithosphäre Interaktion	-
		Dynamik kleiner Konvektionszellen	-
		Entwässerung im Mantel	-
		Einfluss subduzierter Platten	-
		Aufstiegsraten von Mantelmaterial unterschiedlicher Temperatur und Zusammensetzung	-
		Einfluss einer Plattenkonvergenz/Kollision aufs Spannungsfeld	-
Einfluss von Rheologie auf Magmenaufstieg	-		
16	Verbreitung känozoischer Vulkanfelder und Vulkanite	Analyse von Flächeninformation (Känozoikum, Vulkanite) von Geol. Karten	GK25 der Staatlichen Geologischen Dienst, GÜK250, Diplomkartierungen, Veröffentlichungen, weitere Karten
		Potential future sites of eruption. Or: need to be excluded based on other criteria (other criteria need to justify that these sites are not just dormant)	-
		Vorkommen (Lokalität) von Eruptionszentren	-
		Vorkommen (Lokalität) von Vulkaniten	-
		Orientierung vulkanischer Gänge	-
		Geologische Kartiererergebnisse, geophysikalische Anomalien, Luft- und Satellitenbildinterpretationen, Analyse von digitalen Geländemodellen, Analyse von Vulkantypen, Altersdaten	Geologische und geophysikalischen Karten und Publikationen, Altersdatierungen
		Datenbanken und Karten mit Altern, Isotopendaten und Geochemie in 3D	-
		Siehe hierzu separaten Bericht zu Fragebogen 2 von V. Lorenz	-
		Quartäre Eruptionszentren	-
		Tertiäre Vulkanite	-
		Verbreitung differenzierter Magmen	-
		Vulkandichte, Schlotdichte (2D)	-
		-	BGR
		Lage	-
		Art der Ablagerung (Lavastrom, Tephra, Xenolithe ...) Woher stammt Ablagerung (falls weiter transportiert)	-
Requires information 1) on the age of the beginning and end of volcanic activity 2) The style of volcanism and the changes in eruption style with time	Mertes, 1983, Shaw et al., 2010		
Vulkandichte / Km <sup>2</sup>	-		

- Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen) -

Nr.	Indikator	Parameter	Datenquelle
17	Isolierte känozoische Vulkane	Analyse von Flächeninformation (Känozoikum, Vulkanite) von Geol. Karten	GK25 der Staatlichen Geologischen Dienst, GÜK250, Diplomkartierungen, Veröffentlichungen, weitere Karten
		Potential future sites of eruption. Or: need to be excluded based on other criteria (other criteria need to justify that these sites are not just dormant)	-
		Vorkommen (Lokalität) von Eruptionszentren	-
		Vorkommen (Lokalität) von Vulkaniten	-
		Geologische Kartierergebnisse, geophysikalische Anomalien, Luft- und Satellitenbildinterpretationen, Analyse von digitalen Geländemodellen, Analyse von Vulkantypen, Altersdaten	Geologische und geophysikalischen Karten und Publikationen, Altersdatierungen
		Datenbanken und Karten mit Altern, Isotopendaten und Geochemie in 3D	-
		Siehe hierzu separaten Bericht zu Fragebogen 2 von V. Lorenz	-
		Eruptionszentren.	-
		Zuordnung Vulkanfeld/Isolierte Vulkanite nicht trivial	-
		Periodizität, Amplitude und Frequenz lokaler vulkanischer Aktivität	-
		Lage	-
		Art der Ablagerung (Lavastrom, Tephra, Xenolithe ...), Woher stammt Ablagerung (falls weiter transportiert)	-
		Requires information 1) on the age of the beginning and end of volcanic activity 2) The style of volcanism and the changes in eruption style with time	Mertes, 1983, Shaw et al., 2010
		18	Mantelxenolithe
wr systematics	Lustrino & Wilson, 2007		
REE systematics	-		
Isotope systematics	-		
Druck und Temperaturbedingungen	-		
Datenbanken und Karten mit Petrographie und Geochemie, Isotopendaten in 3D	-		
Mantelxenolithe in Vulkanite und Tuffen werden auf schnellen Magmaaufstieg aus den Tiefen der Mantellithosphäre angesehen – was ich manchmal etwas bezweifle.	-		
Vorkommen, Verbreitung	-		
Glasanteil und Beschaffenheit	-		
Fluideinschlüsse	-		
Kataklase	-		
Fertilität (mineralogische und chemische), Schmelzbildungspotential	-		
Druck- und Temperatur	Christensen et al., 2001		
Seismische Anisotropie	Christensen et al., 2001; Rabbel et al., 1998;		
Seismische Geschwindigkeiten	Geissler & Kämpf, 2007; Geissler, 2005; Glahn et al., 1992; Keller et al., 1990; Mengel et al., 1990/1991; Okrusch et al., 1979; Puziewics et al., 2011; Sachs & Hansen, 2000		
Zusammensetzung (chemisch + mineralogisch)	-		
Fluid- und Schmelzeinschlüsse	-		
Isotopie	-		
Art (Kumulat, Gang, Mantel, Kruste, )	-		
Gefüge (protogranular, equigranular, etc.)	-		
Xenoliths can give information on ascent time from the mantle source – diffusion measurements in xenolith minerals – e. g. changes in forsterite content of olivine, changes in the hydroxyl content of xenolith minerals	Shaw, 2004; Denis et al., 2013		

- Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen) -

Nr.	Indikator	Parameter	Datenquelle
19	Krustenxenolithe	Datenbanken und Karten mit Petrographie und Geochemie, Isotopendaten in 3D	-
		“Tiefe“ Krustenxenolithe in Vulkaniten und Tuffen werden auf “Erosion“ im Krustenbereich zurückgeführt. Ganz flache Krustenxenolithe in Maar-Diatremen werden auf Fracking durch thermohydraulische/phreatomagmatische Explosionen zurückgeführt.	-
		Vorkommen	-
		Ursprungstiefe	-
		Kontaktmetamorphose, Aufschmelzungsgrad	-
		Kontaminationspotential (als Funktion der mineralogischen Zusammensetzung)	-
		Druck- und Temperatur	Christensen et al., 2001
		Seismische Anisotropie	Christensen et al., 2001; Rabbel et al., 1998;
		Seismische Geschwindigkeiten	Geissler & Kämpf, 2007; Geissler, 2005; Glahn et al., 1992; Keller et al., 1990; Mengel et al., 1990/1991; Okrusch et al., 1979; Puziewics et al., 2011; Sachs & Hansen, 2000
		Zusammensetzung (chemisch + mineralogisch)	-
		Fluid- und Schmelzeinschlüsse	-
		Isotopie	-
		Art (Kumulat, Gang, Mantel, Kruste, )	-
		Gefüge (protogranular, equigranular, etc.)	-
		Petrologic studies can give information on ascent dynamics in the crust and on the nature of the crustal section through which the magmas must pass.	Shaw, 2009; Woerner et al., 1982
20	Phänokristalle	Elementkonzentrationsprofile (Entwicklung der Schmelze)	.
		P-T-Bedingungen aus cpx (Masotta, 2013)	.
		Datenbanken und Karten mit Petrographie und Geochemie, Isotopendaten in 3D	.
		Zeitskalen von magmatischen Prozessen in einem Magma-Reservoir, die aus Diffusionsprofilen von Phänokristallen abgeleitet werden können (so genannte Diffusionschronometrie). Damit kann evtl. eine Frequenz von Eruptionen ermittelt werden, wenn man annimmt, dass jeder Diffusionsprofil mit einer Eruption verbunden ist (jede Eruption ist mit starken Änderungen im Magma Reservoir verbunden)	Chakraborty (2008) Annu. Rev. Earth Pl. Sc., 36, 153-190. Druitt et al. (2012) Nature, 482, 77-80.
		Phänokristalle, die eindeutig im Magma gewachsen sind, benötigen etwas Zeit für ihr Wachstum, sollten also eventuell bei geringerer Aufstiegs geschwindigkeit oder in einem Magmareservoir an der Krustenbasis oder in der Kruste gewachsen sein	.
		P-Tiefe	.
		Abkühlungsrate	.
		Alter	.
		Alter	.
		Zusammensetzung	.
		P-T Daten	.
		Größe und Anordnung	.
		Disequilibrium Erscheinungen (Zonierung)	.
		Gefüge im Magmatit allgemein	.
		Mineralogic and diffusion studies with phenocrysts can give information on magma ascent rates and episodes of magma – mixing during magma chamber evolution	Duda and Schmincke, 1985; Flaherty et al., 2018
Tiefe und Temperatur einer Magmaquelle im Untergrund	Andersen and Lindsley, 1985; Putrika, 2005; Putrika, 2008; Ridolfi et al. 2010; Ridolfi & Renzulli, 2012		

- Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen) -

Nr.	Indikator	Parameter	Datenquelle
21	Gesteinschemismus	wr systematics (z. B. TAS, Fraktionierungsgrad der Gesteine)	-
		REE systematics (z. B. La/Sm vs Sm/Yb)	-
		Isotope systematics	-
		AFC-Modelle (assimilation fractional crystallisation)	-
		Datenbanken und Karten mit Petrographie und Geochemie, Isotopendaten in 3D	-
		Liefert geochemische Daten von Gesteinen, die schon als Eruptionsprodukte vorhanden sind; hilft aber nicht sehr, um das zukünftige Eruptionsrisiko abzuschätzen	-
		Der Gesteinschemismus von Vulkaniten sagt etwas aus, ob das Magma in dem Mantel (Asthenosphäre und/oder Mantellithosphäre gebildet wurde – oder bei intermediären bis sauren Vulkaniten, ob sie durch Fraktionierung, Kontamination, Magmenmischung oder rein aus Krustenschmelzen entstanden ist	-
		Klassifizierung nach TAS	-
		Mg-Gehalt	-
		Gesteinschemismus ist eine Summe von Parametern. Hier können Schlüsselparameter definiert werden. Chemische Gradienten	-
		Hauptelemente	-
		Spurenelemente	-
		Isotope (Sr, Nd, Os, ...)	-
		REE, LILE	-
Entmischung? Homogenität	-		
22	Thermalwässer	Vorkommen (Lokalität)	-
		Austrittstemperatur	-
		Siehe auch Indikator 25	-
		Temperatur, hydrochemische Zusammensetzung und Hydroisotopie von Tiefenwässern, Ermittlung der Geotemperaturen	Bohrbrunnen, Packertests, Hydrochemische hydroisotopische Daten
		Datenbanken und Karten mit Geochemie und Isotopendaten am Besten in 3D	-
		Zusammensetzung der Wässer, Temperatur-Schwankungen	-
		Thermalwässer sagen etwas aus über die Wegsamkeit von absinkendem Grundwasser bis in heißere Krustentiefen, Aufheizung in entsprechenden Tiefen und relativ schnellen Aufstieg aus den heißeren Krustentiefen aus. Die Thermalwässer sind etwas mineralisiert und können CO <sub>2</sub> und andere Volatile enthalten	-
		Geothermometer, Interpretation erfordert zusätzliche Informationen	-
		-	Hydrologischer Atlas Deutschland <a href="https://www.whymap.org/DE/Themen/Wasser/Projekte/abgeschlossen/Beratung/Had/Was_had_abb_hmtw1000_g.html?nn=1557832">https://www.whymap.org/DE/Themen/Wasser/Projekte/abgeschlossen/Beratung/Had/Was_had_abb_hmtw1000_g.html?nn=1557832</a>
		CO <sub>2</sub> , dT(x,y,z)	-
Delta T	-		

- Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen) -

Nr.	Indikator	Parameter	Datenquelle
23	Geochronologische Daten	Spatio-temporal distribution: statistical guide to potential future sites of eruptions (which would have to be scrutinized and potentially excluded based on other criteria). First guide to define study area	-
		Periodizität	-
		Räumliche Verlagerung	-
		Alter der jüngsten Aktivität	-
		Radiometrische Altersdaten (vor allen Ar-Ar und 14C), Thermolumineszenz-Daten, Spaltspuren, Warvenchronologie, Geologische Indizien	Altersdatierung, Kartiererergebnisse
		Datenbanken und Karten mit Altern, am Besten in 3D	-
		Kann benutzt werden, um die Frequenz von Eruptionen in einem bestimmten Gebiet zu untersuchen. Die Prognose, ob mit Hilfe der Geochronologie eine Eruption in den kommenden 500 Jahre stattfinden soll, ist für die vulkanische Aktivität in Deutschland schwierig, weil es sehr lange Zeitintervalle zwischen den Ereignissen gibt. Die Prognose kann aber für eine Zeitspanne von 1 Mio. Jahre versucht werden, wenn alle vulkanische Ereignisse registriert und datiert sind (statistischer Ansatz).	-
		Geochronologische Daten sind von sehr, sehr großer Bedeutung, um die jüngsten Vulkane zu erfassen, ebenso die ältesten und außerdem sehr viel Vulkane zwischen diesen beiden Altern zu erfassen, damit generell kürzere und längere Eruptions- und kürzere oder längere Ruhephasen im Vulkanfeld erfasst werden können, aber auch eventuell vorhandene viel jüngere oder viel ältere Vulkane im jeweiligen Vulkanfeld (siehe hierzu auch separaten Bericht zu Fragebogen 2 von V. Lorenz)	-
		Gesamtgestein	-
		Kristallisationsdauer	-
		Alter, Altersverteilungen (2D), Eruptionshäufigkeiten und Häufigkeitsverteilungen, Eruptionsfrequenzen und Amplituden, Aktivitäts-Verlagerungsvektoren	-
		Alter	-
		Wann und wie gemessen (für Unsicherheiten)	-
Ar-Ar dating of minerals in particular micas, which are a common part of the xenolith and lava mineral assemblages will be important in determining the age of eruptive events in the volcanic complexes. Luminescence dating may also be useful	Shaw et al., 2010; Schmidt et al., 2017		
24	Mofetten und Sauerlinge	Vorkommen (Lokalität)	Carlé, 1975
		Siehe auch Indikator 25	-
		Koordinaten der Austrittstellen, Fluxdaten, Gaszusammensetzung	Kartiererergebnisse, Messdaten
		Datenbanken und Karten mit Geochemie und Isotopendaten am Besten in 3D	-
		Zusammensetzung der Gewässer, Temperatur-Schwankungen	-
		Sie sagen etwas aus über die Freisetzung von volatilen Phasen aus Mantel- und evtl. auch Krustentiefen, aus Magmen, die eventuell aufsteigen (siehe hierzu Arbeitsgruppe Horst Kämpf in GFZ Potsdam)	-
		Verbreitung	-
		Kohlenstoffisotopie	-
		sollte auch mit der Hydrogeologie abgeglichen werden.	Hydrologischer Atlas Deutschland
		location	-
		Lage	-
		Ausflussrate	-
		Wann gemessen (natürliche Schwankungen)	-

- Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen) -

Nr.	Indikator	Parameter	Datenquelle
25	Gas- und Isotopengeochemische Analysen von Mantelfluiden	(He <sub>3</sub> /He <sub>4</sub> )	Weinlich et al., 1998/1999
		C-Isotopie	Bräuer et al., diverse
		CO <sub>2</sub> Flussraten	etc.
		d <sup>13</sup> C aufsteigender Gase (gelöst, frei; speziell CO <sub>2</sub> (ggf. CH <sub>4</sub> ); Edelgaszusammensetzung, speziell <sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> He) sowie in Fluid-Inklusionen von Mantelgestein.	Gal et al. (2011; Int. J. Greenh. Gas Contr.); Griesshaber et al. (1992; Chem. Geol.); Weinlich et al., (1999; GCA)
		Koordinaten der Austrittsstellen, Fluxdaten, Gaszusammensetzung	Kartierergebnisse, Messdaten
		Datenbanken und Karten mit Geochemie und Isotopendaten am Besten in 3D	-
		Zusammensetzung der Gase (He, S Isotope), Temperatur-Schwankungen	-
		Für Nr. 24 und 25. gilt z. T. dieselbe Antwort von mir.	-
		Heliumisotopie	-
		Analysendaten sind eine Summe von Parametern, auch hier müssen Schlüsselparameter definiert werden (pH-Wert, zeitliche Veränderung von Zusammensetzung und Massenstrom usw.	-
		Lage	-
		Isotopenwerte (Xe, He, ...)	-
		Zeitpunkt der Messung	-
		Wie gemessen	-
26	Ergebnisse petrologischer Experimente	Viskositätsbestimmungen	-
		Wasser- und CO <sub>2</sub> -Löslichkeiten	-
		Nutzen sehr fragwürdig	-
		Liefert Informationen zu der Entstehung/Differenzierung/Aufstiegsgeschwindigkeit von Gesteinen, die schon als Eruptionsprodukte vorhanden sind; hilft aber nicht sehr, um das zukünftige Eruptionsrisiko abzuschätzen	-
		Petrologische Experimente geben Auskunft über Schmelzbildung von Magmen im Mantel und ebenso in der Kruste sowie über ihre Kristallisationsgeschichte (auch über Fraktionierung, Kontamination und Magmenmischungen – je nach Experiment-Ansatz und Durchführung. Ähnliche Prozesse und dadurch bedingte unterschiedliche Eruptionen könnten auch in Zukunft ablaufen.	-
		Zu den petrologischen Experimenten gehört meiner Ansicht nach auch die physikalisch experimentelle Untersuchung von thermohydraulischen Explosionen und der damit verbundenen Bildung der juvenilen Komponenten von Tephren/ Tuffen (Publikationen von B. Zimanowski + et al., Büttner, R. + et al.. Solche Explosionen (die explosives fracking verursachen und entsprechende Eruptionen können auch in Zukunft stattfinden	-
		Vp und Vs teilgeschmolzener Gesteine	-
		Experimental data on diffusion kinetics are an essential part of modelling magma residence times in volcanic systems. We need a lot more data on diffusion in clinopyroxene	Dohmen et al., 2017
P, T, x Bedingungen in Magmenkammern	Berndt J, Holtz F., Koepke J. (2001)		

- Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen) -

Nr.	Indikator	Parameter	Datenquelle
27	Numerische Modelle zur Genese, Differentiation und zum Aufstieg von Magmen	Predicted periodicity of eruptions, or of events of magma ascent (e. g. from the lower crust to a shallow magma chamber). Predicted style (e. g. speed) of magma ascent. Link predictions with observations from seismicity	-
		Liefert Informationen zu der Entstehung/Differenzierung/Aufstiegsgeschwindigkeit von Gesteinen, die schon als Eruptionsprodukte vorhanden sind; hilft aber nicht sehr, um das zukünftige Eruptionsrisiko abzuschätzen	-
		Interpretation erfordert zusätzliche Informationen	-
		dP, H <sub>2</sub> O/CO <sub>2</sub> contents, dT	-
		Aufstiegsraten von Schmelzen	-
		Bildung von Störungen und Langlebigkeit (Richtung und Veränderung) wie lange sind sie reaktivierbar	-
		Stabilität von Magmenkammern	-
		Aufstieg der Schmelze (Dikes, entlang Korngrenzen (penetrativ), Diapire, etc.)	-
		Zusammensetzung Schmelze mit sich ändernder Zusammensetzung der Quelle)	-
		Änderung Zusammensetzung durch Aufstieg (Reaktion mit Nebengestein)	-
		Metasomatose Nebengestein (Reichweite und Zeitskala, Art der Metasomatose)	-
		Entgasungsprozesse (Wann, Wo und Wie entgast Magma)	-
		Wie interagiert Schmelze mit freiem Wasser	-
		Kristallisation und Veränderung durch äußere Einflüsse	-
		These models could be developed by they require much more data than we have available at present. At some point in the future we may develop such models in a generally applicable way, but this is not likely to happen any time soon.	-
P, T, x Bedingungen in Magmenkammern	Berndt J, Holtz F., Koepke J. (2001)		
28	Bodenbewegungen	Laterale Bewegungsrate, Vertikale Bewegungsrate	-
		Neigungsrate (Tiltmeter)	-
		vgl. 6 und 8	-
		Bewegungen im mm Bereich	Radar, InSAR, Bodenbewegungsdienste
		Datenbanken und Karten am Besten in 3D	-
		Zu Bodenbewegungen gehören Hebungen, Senkungen, Zerrungen und differentielle Bewegung an Verwerfungen (Abschiebungen, Aufschiebungen und sinistrale oder dextrale Blattverschiebungen). Wenn rezente Bodenbewegungen dieser Art stattfinden, sollten sie unbedingt über längere Zeiträume beobachtet und gemessen werden.	-
		Geodätische Hebungsraten	-
		Divergenzgebiete	-
		PSInSar Horizontal- und Vertikalbewegungen in Kombination mit Nivellierungsdaten z. B. aus Landesvermessungen	-
		see InSAR	-
		3D Bodenbewegungsvektor	-
		Vertikale Komponente (absolute und relative Änderung)	-
		Hebungsrate (kurz und längerfristig) (Geodätische Verfahren, Satelliten-basierte Verfahren, Ursache der Hebung (z. B. glazialen Ausgleich zeigen))	-
Horizontale Komponente (absolut und relativ)	-		

- Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen) -

Nr.	Indikator	Parameter	Datenquelle
29	Alte Störungen und Suturen	Analyse von Linieninformationen von Geol. Karten	Evtl. aus GK25 der Staatlichen Geologischen Dienste, Diplomkartierungen, Veröffentlichungen, weitere Karten (zu recherchieren)
		Vorkommen (Lokalität)	-
		Orientierung	-
		Tiefe	-
		Erstreckung, Erdgeschichtliche Aktivitäten, Seismizität	Geologische Daten und Erdbeben
		Richtungen, Einfallen in Datenbanken und Karten am Besten in 3D	-
		Alte Verwerfungen und Klüftzonen wurden in vielen Fällen von aufsteigenden Magmen genutzt – wie zum Beispiel in der Eifel, der Schwäbischen Alb, im südlichem Afrika (Kimberlite), Northwest Territories in Kanada (Kimberlite), in Chile, wie am Auftreten von vielen Maar-Diatreme, aber auch von Dykes zu erkennen ist	-
		Verlauf subvertikaler Lineamente	-
		Tiefenlage, Orientierung	Sind nur dort gut erfasst wo es 3D-Seismik gibt, aber nicht mal unbedingt da, weil das Grundgebirge normalerweise nicht miterfasst wurde. Vorschlag: über BVEG die tatsächlichen Strukturen prüfen. Z. B. im norddeutschen tektonischen Atlas sind viele Störungen drin, die die KW-Industrie als falsch erachtet. Über BVEG könnte man ggfs. die Informationen erhalten
		Störungsdichte, Tiefenreichweite	-
		Lage (horizontale und vertikale Ausdehnung)	-
		Alter	-
		Umgebungsgestein	-
Aktiv vs. inaktiv (falls inaktiv, wann war sie aktiv?)	-		
30	Plattentektonische Rekonstruktionen und Modelle	Orientierung des zukünftigen Spannungsfeldes (der zukünftigen Spannungsvektoren)	-
		In Kartenform	-
		Kann Informationen zu der zukünftigen Verlagerung von aktiven vulkanischen Gebieten liefern (Migration von Eruptionszentren). Ich bin nicht überzeugt, dass die räumliche Auflösung der Modelle es erlaubt, diese Verlagerung in den nächsten 1 Mio. Jahren klar einzugrenzen.	-
		Der große Bogen der Vulkanfelder um die Alpen - vom Mittelmeer über die Auvergne, die Eifel, Siebengebirge, Westerwald, Vogelsberg, Rhön, Heldburger Gangschar, Oberpfalz, Egergraben bis ins südwestliche Polen spricht für eine plattentektonische Verknüpfung des Vulkanismus mit der durch die großen Platten Afrika und Europa (mit ihren unterschiedlich dicken Lithosphären und unterschiedlichem Wärmefluss). Die plattentektonischen Bewegungen sollten bis in die Jetztzeit verfolgt und in ihren Bewegungsrichtungen und -intensität genau rekonstruiert werden. Z. B. Kley, J., & Voigt, T. (2008). Late Cretaceous intraplate thrusting in central Europe: Effect of Africa-Iberia-Europe convergence, not Alpine collision. <i>Geology</i> , 36(11), 839-842. Und ihre Arbeiten mit weiteren Kollegen	-
		Hinweise auf Mantelstruktur und Heterogenitäten (Metasomatose)	-
		Prognose zukünftiger Entwicklung des europäischen Riftsystems	-
		Interpretation erfordert zusätzliche Informationen	-
		Zeitskala für Plattenbewegung (Deformation)	-
		Interaktion Plattenbewegung mit Magmatismus	-
		Veränderung des Spannungsfeldes	-
		Kompression vs. Extension	-
		Veränderung der Riftsysteme	-

---

- Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen) -

## **1.5 Auswertung Frage 5**

5. *Bitten schätzen Sie Ihre persönliche Expertise für die in der folgenden Tabelle aufgeführten neuen oder inhaltlich geänderten Indikatoren ein. Sollten Sie sich fachlich mit weiteren Themen beschäftigen, die sich nicht in den Indikatoren (siehe Anhang 2) widerspiegeln, jedoch von Bedeutung für die Prognosemöglichkeit des deutschen Vulkanismus sein können, geben Sie bitte diese zusätzlichen persönlichen Expertisen unten in der Tabelle an. (Ihre Angaben werden anonym bleiben, wir erbitten diese Information, damit wir Sie gegebenenfalls individuell zu fachlichen Themen befragen können, wo unser Allgemeinverständnis an seine Grenzen stößt.)*

- Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen) -

Tab. 7: Auswertung Frage 5. Angegeben ist die absolute Anzahl der Nennungen persönlicher Expertisen im Themenbereich der inhaltlich geänderten (generalisiert oder erweitert) und neu hinzugefügten Indikatoren. Hinzu sind die genannten weiteren Expertisen aufgelistet.

Indikator		Expertise (bitte ankreuzen)	
		Vorhanden	Keine
Neu	Bodenbewegungen	5	18
Neu	Alte Störungen und Suturen	6	17
Neu	Plattentektonische Rekonstruktionen und Modelle	4	19
Generalisiert	Teleseismische Laufzeitanomalien	4	19
Generalisiert	Spannungsfeld	4	19
Generalisiert	Ergebnisse numerischer Simulationen der Manteldynamik	3	20
Erweitert	Temperaturfeld und Wärmestromdichte	0	23
Erweitert	Verbreitung känozoischer Vulkanfelder und Vulkanite	14	9
Erweitert	Numerische Modelle zur Genese, Differentiation und zum Aufstieg von Magmen	7	16
<b>Weitere Expertise(n) (bitte benennen)</b>			
„Räumliche Darstellung (Karten) von geologischen Phänomena“			
„Junge Tektonik“			
„Thermochronologie zur Rekonstruktion der Langzeitlichen Landschaftsentwicklung und auch zur Datierung von Vulkaniten, da diese fast alle genügend Apatit enthalten. Neue Alter, Geochemie- und Mineraldaten von ca. 160 übertägigen und untertägigen Vulkaniten und Ganggesteinen in der Rhön.“			
„Phreatomagmatismus von Maar-Diatrem-Vulkanen seit Jahrzehnten: Forschung in der Westeifel, auch dort über Schlackenkegeln, Schwäbische Alb, Carbonatit- und Kimberlit-Diatreme in Namibia; die zwei 1977 gebildeten Ukinrek-Maare in Alaska, 2 Maare in Oregon/USA, Gutachten an Kimberlitdiatremen in Kanada und an Lamproitdiatremen in Westaustralien. Kenntnisse von Kimberlitdiatremen in Südafrika, Teilnahme an 11 Int. Kimberlit Konferenzen und dazu gehörende Exkursionen, Teilnahme an 6 von 7 Internationalen Maar Konferenzen; viele Publikationen über Maar-Diatrem-Vulkane, siehe separat übersandte Publikationsliste“			
„Mineral- und Thermalwässer; Mantel-CO <sub>2</sub> “			
„Guter Überblick über Literatur zur Eifel; Generell Seismologie“			
„Eruptionstyp-verhalten (Mechanismen, Energie etc.), Altersverteilung“			
„Magmatische Differentiation, Phänokristalle, Thermobarometrie, Haupt- & Spurenelementgeochemie“			

- Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen) -

## 1.6 Auswertung Frage 6

6. Würden Sie, unter Berücksichtigung von Ungewissheiten und Datenlücken, bei der Bemessung von Ausschlussgebieten eher kleinräumige (a) oder großräumige (b) Gebiete ausweisen?

- A
- B
- Enthaltung

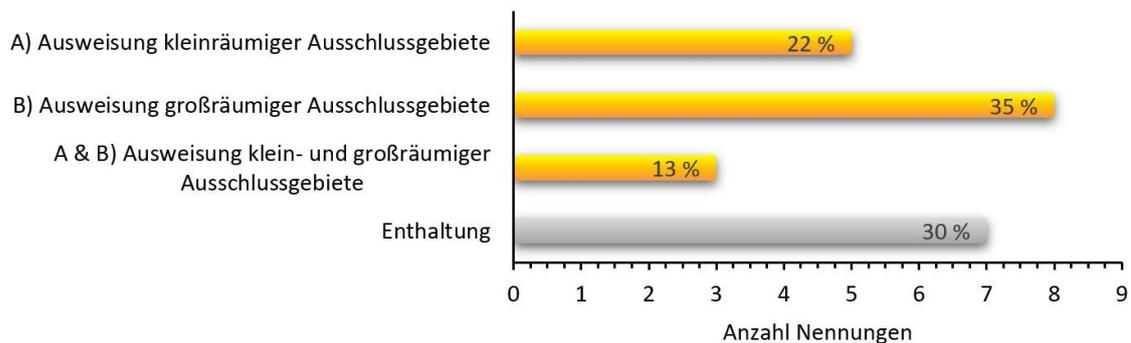


Abb. 8: Auswertung Frage 6. Anzahl der Nennungen in absoluten Zahlen der Befragten mit dem jeweiligen prozentualen Anteil.

*Wenn a oder b, bitte kurz begründen:*

Begründungen für eine bevorzugte Ausweisung kleinräumiger Gebiete (**A**):

- „Mit Blick auf das gesellschaftlich brisante Thema der Standortauswahl ist eine kleinräumige Ausweisung, die im Verlauf des Verfahrens mit zunehmender Datendichte und Kenntnis der räumlichen Faktoren sukzessive erweitert werden kann, sicherlich besser zu vertreten als der umgekehrte Fall.“
- „Aus der räumlich/zeitlichen Analyse von Vulkanfeldern sieht man, dass sich die Eruptionspunkte der Vulkane fast immer an ein Verbreitungsgebiet mit einer imaginären Verbreitungsgrenze halten. Als Ausnahme ist jedoch der Laacher See zu betrachten, der als ein violentes stratovulkanisches Eruptionseignis weit über die Grenzen des Vulkanfeldes der Osteifel zerstörerisch gewirkt hat.“
- „Großräumig bestehen mehr Chancen bereits bestehende Informationen zu erhalten, aber insgesamt muss eh noch viel erfasst werden und daher schlage ich vor eher kleinräumige Gebiete zu betrachten. Kleinräumigere Regionen können detaillierter erfasst werden (Datenbereitstellung etc.). Falls keine Beobachtungen bisher vorliegen, kann die Erfassung schneller und kostengünstiger erfolgen. Es sind ja teilweise sehr aufwändige Messungen. Auch die Schließung von Lücken durch

- Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen) -

numerische Modellierung kann besser für kleinere Regionen erfolgen (einfach aufgrund der Auflösung und Elementzahlen). Diese können mit einem Submodelling Ansatz ([www.spannend-projekt.de](http://www.spannend-projekt.de)) an regionale Modelle angeschlossen werden.“

- “The distribution of cenozoic volcanism across Germany is such that I do not think that it is feasible to exclude large areas from consideration. There is abundant evidence for Tertiary volcanic activity in a broad arc associated with the deformation limits of the Alpine orogeny. It should be possible to exclude regions on the basis of crustal structure after comparison with the regions that have experienced Tertiary volcanism.”
- “Im Sinne eines transparenten, wissenschaftsbasierten Verfahrens sollte immer nur begründet (sicher belegt) und daher kleinräumig (so viel wie nötig) ausgeschlossen werden.“

Begründungen für eine bevorzugte Ausweisung großräumiger Gebiete (**B**):

- „b) 1. Aufgrund der sicherlich verbleibenden Unsicherheiten und der in der Vergangenheit auch immer wieder falschen geowissenschaftlichen Vorhersagen. 2. Der Fragestellung (Endlagerung) und den damit verbundenen Risiken („Puffer“) und den aktuell noch großflächig für geeignet erklärten Areale in D.“
- „Großräumig und kleinräumig ist hier nicht definiert (km, 10 km, 100 km von den jüngsten Eruptionen?). Großräumig verringert das Risiko. Eine Untersuchung der Migration der vulkanischen Eruptionszentren in den letzten z. B. 10 Mio. Jahren (diese Zahl wäre zu diskutieren) würde helfen, um das Perimeter eines Risiko-Gebiet einzugrenzen. Hier wären Geochronologie und Kenntnisse über Alte Störungen und Suturen von Bedeutung.“
- „zu b: Ich würde großräumige Ausschlussgebiete ausweisen, weil nach meiner Ansicht die Möglichkeit besteht, dass in den tertiären Vulkanfeldern neuer Vulkanismus stattfinden könnte, wie es mehrere Vulkanfelder in Deutschland und in Frankreich zeigen. Neue Vulkanfelder müssen auch nicht genau dort im selben Gebiet sich bilden, wo tertiäre Vulkanfelder existieren: wie es die Eifel mit dem eozänen Vulkanismus der Hocheifel und den beiden quartären Vulkanfeldern zeigt, wie es die Oberpfalz mit miozänem und quartärem Vulkanismus zeigt, und wie es eine ganze Reihe von Vulkanfeldern in der Auvergne zeigen. Wir müssen auch erkennen, dass selbst in der Westeifel, wo seit 200 Jahren geologisch-vulkanologisch geforscht wird, die Zahl der bekannten Maare sich seit ca. 1975 durch die vulkanologische Forschung durch Georg Büchel sich von 32 auf 76 erhöht hat. Genauso hat sich seit ca. 2003 die Zahl der Vulkane im Grenzgebiet von Böhmen und der Oberpfalz von 2 auf inzwischen 7 erhöht. Dies sagt, dass wir unsere Vulkanfelder nicht in jedem Detail kennen, dies gilt nicht nur für die beiden

- Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen) -

genannten quartären Vulkanfelder, sondern auch die tertiären Vulkanfelder – wie es die Hoheifel durch die Forschung von Georg Büchel gezeigt hat – und wie es die Forschung von Otto Mäussnest (1974a, b) gezeigt hat, der mit der magnetischen Feldkartierung die Zahl der bekannten Maar-Diatrem-Vulkane auf den Zahlenwert von 351 mehr als verdoppelt hatte. Wenn wir vor 1 Mio. Jahren – mit unserem heutigen Wissen und unseren heutigen Forschungsmöglichkeiten – in der Eifel uns Gedanken über die Forschung zur Wahrscheinlichkeit von neuem Vulkanismus in den nächsten 1 Mio. Jahren gemacht, bzw. durchgeführt hätten, bezweifele ich, dass wir dort nach dem eozänen Vulkanismus in der Nordeifel an neuen Vulkanismus nach 300 ka gedacht hätten, bzw. ihn hätten voraussehen können. Hinzu kommt, dass die plattentektonischen Bewegungen zwischen den großen Platten Afrika und Europa nicht als beendet angesehen werden können, was sich im European Cenozoic Rift System (ECRIS) ausgedrückt und auch weiterhin ausdrücken wird, also, dass weiterhin Kompression zwischen den Platten existieren wird, die zu weiteren Hebungen, Auf- und Überschiebungen, Zerrungen, Absenkungen, Erdbeben und Vulkanismus führen werden. Aufgrund dieser Ansicht würde ich für ein Endlager ein Gebiet außerhalb des vom ECRIS betroffenen Gebietes in Norddeutschland vorschlagen, eventuell sogar im Osten Norddeutschlands, möglichst östlich der Tornquist-Linie in entsprechender Tiefe. Allerdings muss ich gestehen, dass ich die geologischen Verhältnisse in den für ein Endlager eventuell geeigneten Gebieten in Norddeutschland nicht kenne, also auch nicht beurteilen kann.“

- „1. Vorsorgeprinzip 2. Wirtschaftliche und zügige Standortauswahl: Erkundung auf Gebiete mit Erfolgsaussichten beschränken um nicht später möglicherweise geeignete Gebiete trotz Erkundung, eventuell nach Gerichtsprozessen mit zusätzlichen Gutachten, auszuschließen.“
- „Da ich die vulkanische Aktivität im Intraplattenbereich primär durch dynamische Prozesse im Mantel kontrolliert sehe, die aber regionale Strukturen (Suturen, Störungen, lokale Spannungsfelder) aktivieren oder triggern können, halte ich kleinräumige Prognosen (Ausbruch in Köln oder in Bonn?) für schwierig. Eher für möglich halte ich großräumige Aussagen wie z. B. ‚nicht im Schwarzwald, aber wahrscheinlich in der Eifel‘.“
- „Es ist nicht sicher, dass zukünftiger Vulkanismus die gleichen Aufstiegswege benutzt als der ältere. Magmenentstehungsprozesse können sehr dynamisch nicht nur über Zeit, sondern auch räumlich sein. Die aufgeschlossenen Vulkanite sind nur punktuelle Erscheinungen eines womöglich weitaus größeren magmatischen Systems worunter sich noch eine weitaus größere Anomalie im Mantel befinden kann. Vergangene vulkanische Aktivitäten zeigen, dass Eruptionen nicht immer einer direkt erkennbaren Systematik folgten.“

---

- Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen) -

- „Im Zweifel lieber ein zu großes Gebiet ausweisen, um sicher zu gehen, dass es in dem angegebenen Gebiet nicht zu magmatischer Aktivität in den kommenden 1 Mio. Jahren kommt.“
- „Punktgenaue Prognosen werden nicht möglich sein, so dass man sich besser auf großräumige Gebiete festlegt.“

Begründungen für eine bevorzugte Ausweisung klein- und großräumiger Gebiete (**A & B**):

- „Uncertainties need to be appropriately propagated through any predictive model. Any uncertainty would tend to smear out the probability cloud of predicted sites of future eruptions. This smearing out of the probability cloud would primarily lead to an increase of the area of significant risk around the region of the highest risk. In a few small locations, it might also lead to a reduction of the risk (through distribution of the cloud) below a given threshold of risk. However, this would depend on which threshold of estimated risk is chosen. In any case, I suggest that adequate propagation of error and uncertainty through the predictive model, including in terms of the geographic prediction of potential eruption sites, will be performed.“
- „Beides: Das Ausweisen von Gebieten muss im Einzelfall entschieden werden, da die Datengrundlage eine entscheidende Rolle spielt.“
- „Zunächst natürlich großräumig. Da Eruptionenpunkte mit der Zeit wandern zusätzlich kleinräumig. Z. B. das WEVF (Westeifel Vulkanfeld) ist NW-SE ausgerichtet und im NW am ältesten (ca. 600-700 ka) während am SE Ende (Pulvermaar-Wartgesberg-Bad Bertrich-Ulmen) seit ca. 30 ka vier Eruptionen jeweils in Abständen von ca. 10 ky stattfanden (ca. 30 ka, ca. 20 ka, ca. 15 ka, 11 ka). In der EEVF ist in den vergangenen 50 ka nur eine große Eruption bekannt (Laacher See, ca. 12,900 ka)“

Weitere Anmerkungen:

- „Eher kleinräumiger, desto genauer“
- „This depends on the availability of data; the better the resolution the smaller the area.“
- „Was ist klein- oder großräumig?“

- Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen) -

## 1.7 Auswertung Frage 7

7. Sind Ihnen Prognosen zum Intraplattenvulkanismus bekannt, die Sie für die Prognosen des zukünftigen Vulkanismus in Deutschland für relevant erachten?

- Ja
- Nein
- Enthaltung

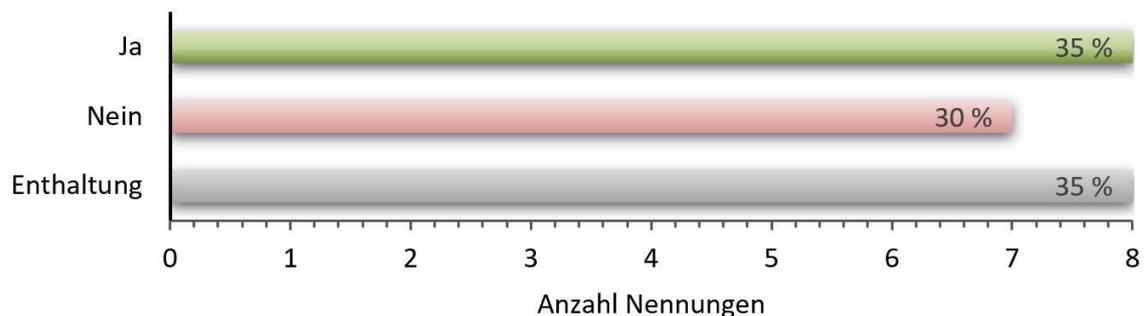


Abb. 9: Auswertung Frage 7. Anzahl der Nennungen in absoluten Zahlen der Befragten mit dem jeweiligen prozentualen Anteil.

*Wenn ja, bitte benennen Sie diese (wenn möglich, mit Literaturangabe) und erläutern kurz deren Relevanz (z. B. auf Grund der verwendeten Methodik, analoger Prozesse oder ursächlicher Zusammenhänge) für die Prognose zukünftigen Vulkanismus in Deutschland.*

Kommentare, die unter „Ja“ angegeben wurden:

- „Yucca Mountain: Ho et al.; Auckland: GNS Report; Deutschland: Jentzsch 2001, 2013“
- „An dieser Stelle möchte ich das EU-Projekt FUTUREVOLC benennen, das insbesondere Island betrifft, ein Gebiet, dass nicht direkt mit den Vulkangebieten Deutschlands verglichen werden kann. Der Endbericht von FUTUREVOLC umfasst jedoch topaktuelle Untersuchungsmethoden und enthält eine gute internationale Literaturübersicht. Für Prognosen des zukünftigen Vulkanismus in Deutschland verweise ich ansonsten auf Arbeiten und Diskussionsbeiträge von Volker Lorenz.“
- „Schwarmbeben, Beben, die auf die Platznahme von Magmen in der Eifel hinweisen. Die publizierten Datierungen deuten tendenziell auf ein klares und eindeutiges wandern des Intraplatten-Magmatismus hin. Alle großen vulkanischen Ereignisse (Large Igneous Province) sind Intraplatten Ereignisse. Erst danach kam es zu Riftereignissen und der Bildung von ozeanischer Kruste. Leider ist dies nicht im generellen geowissenschaftlichen Bewusstsein.“

---

- Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen) -

- „Ich habe in meinen separat eingeschickten Anmerkungen zum Fragebogen 2 in Deutschland die quartären Vulkanfelder und etwas die Altersbezüge in tertiären Vulkanfeldern in Deutschland von den hauptsächlichen Eruptionsphasen und den dazwischenliegenden Ruhephasen beschrieben. Zusätzlich hatte ich die französischen quartären und tertiären Vulkanfelder in der Auvergne und in dem anliegenden Gebiet behandelt: ich habe sowohl für den quartären Vulkanismus in Deutschland als auch für den quartären und tertiären Vulkanismus in Frankreich Zitate angegeben, auch Zitate, die darauf hinweisen, dass weiterhin Vulkanismus in Frankreich stattfinden kann. Noch dazu anmerken möchte ich, dass das panonische Becken, das intensiv von Karoly Németh und Co-Autoren bearbeitet wurde, auch ein Vergleichsgebiet für die Vulkanfelder in Deutschland darstellt. Dies gilt sicherlich auch für Vulkanfelder, die östlich entlang der Anden und der Rocky Mountains liegen. Für sie gilt auch, dass sie vor der Front des auf die südamerikanische und die nordamerikanische Platte jeweils aufgeschobenen und überschobenen Gebirgskörpers liegen. Zusätzlich liegen im Gebiet westlich der Rocky Mountains eine ganze Reihe von jungen sehr gut untersuchten Vulkanfeldern, die in dem Gebiet der Basin and Range Province in den USA und Mexico liegen. In den USA sind in der Basin and Range Province ca. 15 Vulkanfelder, wobei die jüngsten Vulkane vor ca. 200 Jahren ausgebrochen sein sollen; zu diesem Thema hat im Oktober 2012 ein Meeting <Volcanism in the American Southwest> im Geological Survey of Arizona in Flagstaff stattgefunden, an dem ich teilgenommen hatte. Dazu ein kurzer Text: FLAGSTAFF, Ariz. – Experts in volcano hazards and public safety have started a conversation about volcanoes in the southwestern United States, and how best to prepare for future activity. Prior to this meeting, emergency response planning for volcanic unrest in the region had received little attention by federal or state agencies. Zu dem Meeting gibt es einen Abstract Band vom USGS: Lowenstern, J.B. (ed.) 2013...“
- „Auckland, Methodik, Indikatoren, siehe Mailanhänge (Hayes et al., 2020; Hopkins et al., 2020; Shan Ang et al., 2020). Zentralmassiv (Volker Lorenz), Indikatoren und Parameterverteilung. U. a. Geochronologie. Aktivitätsdauer der Vulkanfelder und Pausen.“
- „Ca. 50 Publikationen von Schmincke und Kollegen/Mitarbeitern von 1970-2020, z. B. Schmincke 2000, 2004, 2007, 2011, 2014...“
- “There has been a significant body of work done on the intraplate volcanism in the S.W. United States associated with their initial work on nuclear waste storage at Yucca Mountain – in particular the work of Greg Valentine and his working group is particularly relevant. The ongoing work on the monogenetic volcanic fields of the North Island of New Zealand (Shane & Coote, 2018; Kereszturi et al., 2013) is an excellent framework on which to base continued study of the Cenozoic volcanism in

- Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen) -

Germany. References: Denis et al., 2013; Dohmen et al., 2017; Duda & Schmincke, 1985; Flaherty et al., 2018; Hintz & Valentine, 2012; Kereszturi et al., 2013; Mertes, 1983; Schmidt et al., 2017; Shane & Coote, 2018; Shaw, 2004; Shaw, 2009; Shaw et al., 2010; Valentine & Krogh, 2006; Valentine & Perry, 2006; Wörner et al., 1982”

- „1. Auckland NZ; 2. Auvergne, Frankreich (Literatur s. Anhang)“

Kommentare, die unter „Nein“ angegeben wurden:

- „Die sichere Prognose einer Eruption innerhalb des nächsten 1 Mio. Jahre wird anhand von anderen Beispielen in anderen Regionen der Welt sehr schwierig sein, weil ähnliche Situationen (Manteldynamik, Tektonik) nie gegeben sind. Zu Prognose: Direkte und eindeutige Hinweise für eine kommende Eruption in Deutschland haben wir zurzeit nicht, soweit ich informiert bin (z. B. ein Magma-Aufstieg durch seismische Messungen identifiziert). Die Prognose einer Eruption in den nächsten 1 Mio. Jahren kann evtl. statistisch ermittelt werden, über die Analyse der Zahl der Eruptionen in der Vergangenheit. Dafür müssten alle Eruptionereignisse erfasst werden, um eine Eruptionsfrequenz abzuleiten. Andere Beispiele wo diese Statistik für Intraplattenvulkanismus gemacht wurde, und wo auch alle kleinen Ereignisse erfasst und datiert wurden, sind mir nicht bekannt (Im Falle der Eifel müssten z. B. alle Maare erfasst werden).“

Kommentare, die unter „Enthaltung“ angegeben wurden:

- „Massif Central und Auvergne sehe ich was die Prozesse betrifft als sehr ähnlich an. Jentzsch 2001; Barth et al., 2007; Ritter et al., 2007“

## **1.8 Allgemeine Anmerkungen/ Fragen**

- „Vielleicht habe ich es übersehen. Informationen und Interpretationen zu der Frage sind ja bereits in die Bewertung der BGE eingegangen und Areale ausgeschlossen worden zu sein. Ist die weitergehende Betrachtung für den Prozess noch von Relevanz? Meine Einschätzung zur „Demokratisierung“ von Wissenschaft, wie es mir hier als Ansatz erscheint, habe ich bei meiner letzten Antwort schon gegeben.“
- „Zu dem 2. Fragebogen möchte ich sagen, dass sicher alle aufgelisteten Indikatoren zu einem verbesserten Verständnis der geodynamischen Situation als Ganzes führen aber nicht alle zur Überwachung bzw. der Änderung des Aktivitätszustandes geeignet sind. Auch für eine Parametrisierung sind meiner Meinung nach nur einige der aufgelisteten Indikatoren geeignet.“

---

- Anhang 1 (Ergebnisse und Auswertung der Fragebögen) -

- „Das neue Kriterium „Bodenbewegungen“ (28) und die alten Kriterien „Vulkanotektonische Störungen“ (4) und „Neotektonische Aktivität“ (8) drücken in meinen Augen das aus, was man unter dem Kriterium „Junge Tektonik“ vereinen kann. Bodenbewegungen (28) können durch hochaufgelöste langfristige geodätische Messungen identifiziert werden (z. B. durch Nivellements). Es schließt an das Kriterium „Langfristige Hebungen“ (6) an. „Vulkanotektonische Störungen“ (4) können auch vulkaninterne Brüche sein, die nichts über die Wahrscheinlichkeit eines Vulkanausbruchs aussagen. Linienhafte Aufreihungen von Eruptionszentren können hingegen auf vulkanotektonisch aktive Brüche hinweisen. Junge Tektonik hingegen sagt etwas darüber aus, wo in junger Vergangenheit (< 1 Mio. Jahre\*) verstärkte tektonische Bewegungen stattgefunden haben und wo sich junge Vulkane gebildet haben. Ich kann solche Gebiete mit der Hilfe von hochauflösenden 3D-Modellen der Geländeoberfläche (LIDAR) als scharfe Kanten, hochgradiente Bereiche und scharf eingeschnittene Gullies identifizieren und sie von Gebieten abtrennen, bei denen die Verwitterung, die Erosion und die Denudation abgerundete Geländeoberflächen und -kanten inzwischen erzeugt hat. Ich finde, dass die Fernerkundung (Luftbild-, Satellitenbildinterpretation und die Interpretation von hochauflösenden digitalen Geländemodellen) bisher deutlich zu kurz kommt. \*) Jung sollte in diesem Fall mit jünger als 1 Mio. Jahre definiert werden. Wenn ich junge Strukturen auf dem Mars analysieren möchte, dann sind ganz andere Zeiträume gemeint. Jung muss in jedem Gebiet neu definiert werden.“
- „Wäre es nicht umgekehrt besser, sich um Eignungsgebiete kümmern? Es werden händeringend Ausschlusskriterien gesucht..... wir sollten mal einen positiveren Tenor anschlagen.“
- „Wie konnte ein Kernkraftwerk unweit an einem Ort genehmigt werden, wo nach Literaturrecherche von Homuth & Rumpker (2017) am 24. Februar 1952 das bisher stärkste aufgezeichnete Erdbeben im Oberrheingraben stattfand? ...“

## **2 Anhang 2 (Indikatorenliste und Beschreibung der Indikatoren)**

Die Auswertung der vorangegangenen Expertenbefragung zur langfristigen Vorhersage vulkanischer Aktivität in Deutschland (Bartels et al., 2020) ergab Vorschläge zu Erweiterungen und Neuerfassungen der von May (2019) vorgeschlagene Liste von Indikatoren, die für die Abschätzung einer zukünftigen vulkanischen Aktivität herangezogen werden können.

Im Folgenden wurde die durch May (2019) aufgestellte Liste von Indikatoren unter Berücksichtigung der zuvor eingegangenen Vorschläge überarbeitet und ergänzt. In den überwiegenden Fällen konnten angeführten Vorschlägen und Anmerkungen aus der ersten Befragung (Bartels et al., 2020) bereits vorhandene Indikatoren zugeordnet werden bzw. ergänzen diese durch aufgezeigte Methoden. Daneben fanden sich jedoch auch gute Gründe, neue Indikatoren zu formulieren und diese bei der Abschätzung eines zukünftig möglichen Vulkanismus in Deutschland mit zu berücksichtigen (Tab. 8). Die in diesem Dokument dargestellte zweite Befragung verwendet die sich hieraus ergebende aktualisierte Indikatorenliste als Basis.

Inhaltliche Überschneidungen der im Folgenden beschriebenen Indikatoren sind möglich, da einzelne Phänomene oder Parameter mehreren Indikatoren zugeordnet werden können. Die Zuordnung einzelner Parameter zu den Indikatoren und die Gesamtanzahl der Indikatoren ist für die weitere Anwendung, in dem durch May (2019) vorgeschlagenen Verfahren, allerdings nicht entscheidend, da jeder, im weiteren Verlauf zu betrachtende, quantifizierbare Parameter individuell berücksichtigt werden kann.

- Anhang 2 (Indikatorenliste und Beschreibung der Indikatoren) -

Tab. 8: Erweiterung der durch May (2019) aufgestellten Liste von Indikatoren. Änderungen sind in der Spalte „Bearbeitung“ vermerkt.

Alte Indikatorenliste (May, 2019)	Neue Indikatorenliste	Nr.	Bearbeitung
Teleseismische Laufzeitanomalien im Erdmantel	Teleseismische Laufzeitanomalien	1	Generalisiert
Tiefe niederfrequente DLF-Erdbeben	Tiefe niederfrequente (DLF) Erdbeben	2	-
Schwarmbeben	Schwarmbeben	3	-
Vulkano-tektonische Störungen	Vulkano-tektonische Störungen	4	-
Wärmestromdichte	Temperaturfeld und Wärmestromdichte	5	Erweitert
Langfristige Hebung	Langfristige Hebung	6	-
Extensives Spannungsfeld	Spannungsfeld	7	Generalisiert
Neotektonische Aktivität	Neotektonische Aktivität	8	-
Schwereanomalien	Schwereanomalien	9	-
Magnetfeldanomalien	Magnetfeldanomalien	10	-
Geoidanomalien	Geoidanomalien	11	-
Tiefenseismische Strukturen	Tiefenseismische Strukturen	12	-
Elektrische Leitfähigkeit	Elektrische Leitfähigkeit	13	-
Ergebnisse von numerischen Simulationen der Mantelkonvektion	Ergebnisse numerischer Simulationen der Manteldynamik	14	Generalisiert
Ergebnisse numerischer Simulationen der Lithosphärendynamik	Ergebnisse numerischer Simulationen der Lithosphärendynamik	15	-
Verbreitung känozoischer Vulkanfelder	Verbreitung känozoischer Vulkanfelder und Vulkanite	16	Erweitert
Isolierte känozoische Vulkane	Isolierte känozoische Vulkane	17	-
Mantelxenolithe	Mantelxenolithe	18	-
Krustenxenolithe	Krustenxenolithe	19	-
Phänokristalle	Phänokristalle	20	-
Gesteinschemismus	Gesteinschemismus	21	-
Thermalwässer	Thermalwässer	22	-
Geochronologische Daten	Geochronologische Daten	23	-
Mofetten und Säuerlinge	Mofetten und Säuerlinge	24	-
Gas- und Isotopengeochemische Analysen von Mantelfluiden	Gas- und Isotopengeochemische Analysen von Mantelfluiden	25	-
Ergebnisse petrologischer Experimente	Ergebnisse petrologischer Experimente	26	-
Numerische Modelle zur Genese und Differentiation von Magmen	Numerische Modelle zur Genese, Differentiation und zum Aufstieg von Magmen	27	Erweitert
-	Bodenbewegungen	28	Neu
-	Alte Störungen und Suturen	29	Neu
-	Plattentektonische Rekonstruktionen und Modelle	30	Neu

---

- Anhang 2 (Indikatorenliste und Beschreibung der Indikatoren) -

Im weiteren Verlauf des Standortauswahlverfahrens für ein Endlager hochradioaktiver Abfälle können weitere Indikatoren in die Bewertung der Teilgebiete miteinbezogen werden, die Schlüsse auf die Art der vulkanischen Eruption und/oder dessen Auswirkungen auf die Umgebung zulassen und damit zur Abgrenzung von Ausschlussgebieten beitragen können. Hierbei können z. B. der Einfluss von Volatilen, die Fragmentierung des Magmas, die jeweilige Verbreitung und Petrographie der vulkanischen Förderprodukte sowie die regionalen hydrogeologischen Verhältnisse von Bedeutung sein. Die einzelnen Indikatoren sind mit einer kurzen Beschreibung im Folgenden aufgelistet.

### **1. Teleseismische Laufzeitanomalien**

Der Indikator „Teleseismische Laufzeitanomalien“ beinhaltet Informationen, die aus der Auswertung der Laufzeiten seismischer Wellen von Fernbeben gewonnen werden. Ergänzend dazu können regionale Erdbeben, z. B. beim Verfahren der Vollen Wellenform Inversion (Full Waveform Inversion), verwendet werden. Die Ergebnisse können mit unterschiedlichen Methoden, wie z. B. der Tomographie oder mit Hilfe von sogenannten „Receiver Functions“, ausgewertet werden. Aus den Ergebnissen können neben Geschwindigkeitsanomalien auch seismische Anisotropien und Dämpfungen ermittelt werden. Die Auswertungen der Ergebnisse ermöglichen Rückschlüsse auf großmaßstäbige Unterschiede von Materialeigenschaften, vor allem im Mantel, und können somit Auskünfte über die Beschaffenheit des Erdinneren geben.

### **2. Tiefe niederfrequente (DLF) Erdbeben**

Der Indikator „Tiefe niederfrequente (engl.: Deep Low Frequency – DLF) Erdbeben“ erfasst niederfrequente Erdbeben mit Hypozentren in der Unterkruste und im oberen Mantel, wie rezent unter der Osteifel (Hensch et al., 2019), für die ein Aufstieg von Magmen oder magmatischen Fluiden diskutiert wird.

### **3. Schwarmbeben**

Der Indikator „Schwarmbeben“ umfasst Sequenzen von Erdbeben, die innerhalb kurzer Zeit auftreten und kein spezifisches Hauptereignis aufweisen. Sie treten vor allem gehäuft im Vogtland/Egergraben (z. B. Fischer et al., 2014), aber auch vereinzelt z. B. in der Eifel (Weber et al., 2012; Hensch et al., 2019), im nördlichen Oberrheingraben (Homuth & Rumpker, 2017) sowie im deutsch-belgischen Grenzgebiet in den östlichen Ardennen (Verbeeck et al., 2009) auf. Sie werden häufig mit dem Einfluss von Fluiden in Verbindung gebracht und können somit Hinweise auf mögliche Aufstiegswege geben.

### **4. Vulkano-tektonische Störungen**

Der Indikator „Vulkano-tektonische Störungen“ beschreibt synvulkanisch aktive Störungen. Aus ihnen können Deformations- und Spannungsprozesse abgeleitet werden, die zeitgleich mit der vulkanischen Aktivität abgelaufen sind bzw. ablaufen. Sie können Regionen

---

- Anhang 2 (Indikatorenliste und Beschreibung der Indikatoren) -

anzeigen, in denen es durch Magmenbewegung zu einer Konvergenz des zuvor mit Schmelze gefüllten Hohlraumes kommt. Insbesondere bei Calderen (kesselförmige vulkanische Einbruchsstrukturen) können begrenzende synvulkanische Störungen Hinweise auf die Existenz und die Volumina von Magmenansammlungen in der Erdkruste geben. Synvulkanische Störungen können aber auch Wegsamkeiten für aufsteigende Schmelzen darstellen. In Vulkanfeldern bilden Reihen von Eruptionszentren und Spalteneruptionen Magmenaufstiegswege ab. Diese und benachbarte vergleichbar orientierte Störungen könnten zukünftige Ausbrüche ermöglichen.

## **5. Temperaturfeld und Wärmestromdichte**

Die Wärmestromdichte beschreibt den Wärmestrom pro Fläche und wird nahe der Erdoberfläche gemessen. Sie kann z. B. durch thermische Anomalien im Untergrund (wie z. B. eine Magmenkammer) erhöht sein. Die Wärmestromdichte wird von vielen Faktoren, wie z. B. dem Zerfall radioaktiver Elemente, der Grundwasserbewegung, der Variabilität der thermischen Leitfähigkeit verschiedener Gesteine und dem Klimawechsel zwischen Warm- und Kaltzeiten beeinflusst. Weiterhin können Prozesse in der Lithosphäre sowie im sublithosphärischen Mantel zur Änderung des Wärmestroms führen, sofern sich die relative Position der Gesteine verändert und somit auch das Temperaturfeld (z. B. durch einen aufsteigenden thermischen Plume oder durch Ausdünnung der Lithosphäre). Phasenumwandlungen und geochemische Reaktionen beeinflussen ebenfalls die Gesteinstemperaturen und den Wärmestrom. Aber auch oberflächennahe Prozesse, wie Erosion und Sedimentation, führen zur Änderung des Wärmestroms. Neben direkten Messungen der Wärmestromdichte können Modelle zur Änderung des Wärmestroms sowie zum möglichen Temperaturverlauf mit der Tiefe erstellt und mit Bohrlochmessungen verglichen werden. Temperaturen können auch direkt an der Erdoberfläche ermittelt werden und somit Hinweise auf magmatische oder hydrothermal aktive Bereiche geben.

## **6. Langfristige Hebung**

Der Indikator „Langfristige Hebung“ beinhaltet langfristige, großräumige Vertikalbewegungen. Diese können Hinweise auf aufwärts gerichtete Bewegungen der Gesteine im Erdmantel geben, die in Folge der Druckentlastung partiell aufgeschmolzen werden können. So kann eine Hebung der Erdoberfläche z. B. mit der Aufwölbung der Lithosphären-Astenosphären-Grenze (LAB) in Verbindung gebracht werden. Solch eine Hebung tieferen Ursprungs kann jedoch lokal von diversen endogenen und exogenen Prozessen beeinflusst werden. Aufgrund der charakteristischen Zeit- und Längenskalen der Mantelkonvektion äußert sich diese in großräumiger (zehner bis hunderte von Kilometern) und langanhaltender Hebung, die über geologische Zeitskalen in der Größenordnung von Jahrtausenden anhält.

## **7. Spannungsfeld**

Das krustale Spannungsfeld kann Hinweise auf großmaßstäbige tektonische Prozesse liefern, hervorgerufen z. B. durch die Plattentektonik, Mantelströmungen oder glaziale isostatische Anpassungen, aber auch aufzeigen ob und in welcher Form Schwächezonen reaktiviert oder neue Störungen gebildet werden können, an denen Schmelzen aufsteigen oder stagnieren können.

## **8. Neotektonische Aktivität**

Der Indikator „Neotektonische Aktivität“ beschreibt rezente und junge krustale Deformationsstrukturen (wie z. B. aktive Blattverschiebungen), die mögliche Wegsamkeiten für zukünftig aufsteigende Magmen darstellen können. Überregional aktive Strukturen der Lithosphäre können Hinweise auf manteldynamische Prozesse liefern, die mit der Bildung von Schmelzen im Mantel verbunden sein könnten. Der Zeitraum der Neotektonik ist nicht einheitlich definiert. So beziehen sich z. B. Stewart & Hancock (1994) auf Krusten- spannungen und Deformationsstrukturen, die sich unter dem gegenwärtig herrschenden tektonischen Regime bildeten. Als aktive Störungszonen betrachtet das StandAG (§ 22 (2) 2.) diejenigen, an denen innerhalb der letzten 34 Mio. Jahre Bewegungen stattgefunden haben.

## **9. Schwereanomalien**

Schwereanomalien im Untergrund können Hinweise auf lokale Dichteanomalien geben, wie z. B. von einem krustalen Magmenkörper verursacht. Vertikale Dichtegradien ermöglichen Abschätzungen der Tiefenlage der Körper. Zudem können laterale Veränderungen in der Mächtigkeit geologischer Körper und lithosphärischer Lagen angezeigt werden (z. B. Unterschiede in der Krustenmächtigkeit).

## **10. Magnetfeldanomalien**

Magnetfeldanomalien können durch unterschiedlich stark magnetisierte Gesteine in der Kruste verursacht werden und somit Hinweise auf Magmenkörper oder Veränderungen in der Mächtigkeit krustaler Lagen unterschiedlicher Magnetisierbarkeit liefern. Die Tiefenlage der magnetischen Körper kann über Gradienten abgeschätzt werden und über die Curie-Temperatur der Minerale (580-600 °C) sind indirekte Rückschlüsse auf Temperaturen in der tieferen Kruste möglich.

## **11. Geoidanomalien**

Die Abweichungen des Geoids vom Ellipsoid bilden die Masseverteilungen im Erdinneren ab und können großmaßstäbige Strukturen im Erdinneren anzeigen.

## **12. Tiefenseismische Strukturen**

Der Indikator „Tiefenseismische Strukturen“ bezieht sich überwiegend auf krustale Strukturen, die mit Verfahren der Seismik (mit künstlich angeregten seismischen Wellen) erfasst werden können. Zusätzlich können auch Signale von lokalen Erdbeben für seismische Untersuchungen des tiefen Untergrundes genutzt werden. Diese Verfahren ermöglichen eine Abbildung krustaler Lagen, Gesteinskörper und Inhomogenitäten sowie tektonischer Strukturen, an denen die seismischen Wellen unterschiedlich stark verändert (z. B. reflektiert oder refraktiert) werden. Alte oder möglicherweise rezente Magmeneinlagerungen in der Unterkruste (Underplating), Plutone, Magmenkammern oder Suturen können mit diesen Verfahren abgebildet werden.

## **13. Elektrische Leitfähigkeit**

Mittels elektromagnetischer Sondierungen kann die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit in der Kruste sowie im oberen Erdmantel untersucht werden. So können vertikale Profile der Leitfähigkeit der Erdkruste erstellt und Anisotropien innerhalb der Gesteine ermittelt werden. Verursacht werden solche Anisotropien z. B. durch Risse, die Schichtung der Gesteine oder die Einregelung von Kristallen. Mit geoelektrischen Verfahren können auch fluidführende Schichten mit einer erhöhten elektrischen Leitfähigkeit identifiziert werden (z. B. an vulkanischen Hydrothermalsystemen).

## **14. Ergebnisse numerischer Simulationen der Manteldynamik**

Da Strukturen und Prozesse im Erdmantel nicht direkt beobachtet werden können, bieten geodynamische Simulationen Möglichkeiten zur Überprüfung konzeptioneller Modelle sowie postulierter Kausalzusammenhänge zwischen verschiedenen Phänomenen. Indem die Beobachtungen der Gegenwart und der erdgeschichtlichen Vergangenheit mit den Modellrechnungen verglichen werden, können plausible Modelle erstellt und gegebenenfalls für Vorwärtssimulationen der Manteldynamik im Nachweiszeitraum genutzt werden. Numerische Simulationen der Manteldynamik betrachten vor allem großmaßstäbige Prozesse im sub-lithosphärischen Mantel, wobei auch die Dynamik der Lithosphäre miteinbezogen wird. So können Mantelkonvektion, Subduktion, aber auch andere vertikale Materialströme aus unterschiedlichsten Tiefen (Manteldiapire, Plumes) und deren Ursachen untersucht sowie mögliche Bereiche der Magmenbildung identifiziert werden. Hierbei spielen Modelle eine wichtige Rolle, die neben der Mechanik und der Temperatur auch die Mineralogie der Mantelgesteine, deren geochemische Heterogenität und deren Stabilität im Mantel miteinbeziehen.

## **15. Ergebnisse numerischer Simulationen der Lithosphärendynamik**

Numerische Simulationen zur Lithosphärendynamik sind vor allem auf die Lithosphäre und den obersten Erdmantel beschränkt und ermöglichen im Vergleich zu Mantelmodellen (Nr. 14), auf Grund der geringeren Mächtigkeit des zu betrachtenden Bereiches, eine

---

- Anhang 2 (Indikatorenliste und Beschreibung der Indikatoren) -

höhere Auflösung. Die Ergebnisse der Modelle lassen Rückschlüsse auf die Ursachen diverser Prozesse unterschiedlicher räumlicher und zeitlicher Ausdehnung zu. So können z. B. die Amplituden und/oder Gradienten von Spannungen und Deformationen, aber auch Änderungen der Temperatur- oder Dichteverhältnisse, hervorgerufen durch z. B. Schmelzextraktion, modelliert werden. Zudem kann die Konsistenz existierender geophysikalischer Daten durch ein vereinendes numerisches Modell überprüft werden. Da jedoch die in der Natur gegebene Kopplung von Deformation, Schmelzbildung und Aufstieg sowie die damit verbundene Änderung der Magmaeigenschaften schwer numerisch in einem Modell beschreibbar sind, beschränken sich lithosphärische Modelle häufig auf thermomechanische Simulationen. Die Prozesse der Magmengenese, -differentiation und des Aufstiegs wurden daher meist separat modelliert und sind folglich in einem eigenen Indikator (Nr. 27) beschrieben: „Numerische Modelle zur Genese, Differentiation und zum Aufstieg von Magmen“.

#### **16. Verbreitung känozoischer Vulkanfelder und Vulkanite**

Die Ermittlung der Verbreitung känozoischer Vulkanfelder und Vulkanite ist von zentraler Bedeutung zur Erfassung der Gebiete, die in der jüngeren erdgeschichtlichen Vergangenheit vulkanisch aktiv waren und, unter Annahme des in der Geologie anerkannten Aktualitätsprinzips für die zugrundeliegenden Prozesse, in den kommenden 1 Mio. Jahren wieder aktiv werden können. Neben der Verbreitung der Vulkanite an der Erdoberfläche können geophysikalische Messungen, Tiefbohrungen und geomorphologische Analysen zur Ermittlung überdeckter Ausbruchsorte (Eruptionszentren) oder abgetragener Schlotte genutzt werden.

#### **17. Isolierte känozoische Vulkane**

Neben den känozoischen Vulkanfeldern existieren einzelne, zeitlich und/oder räumlich isolierte Vulkane, wie z. B. der Rodderberg bei Bonn, der Steinsberg bei Weiler oder der Pechsteinkopf bei Forst. Sie belegen, dass auch abseits der Vulkanfelder Ausbrüche stattfanden und somit Vulkanismus außerhalb der Vulkanfelder nicht ausgeschlossen werden kann. Neben den känozoischen könnten dabei auch die spätkretazischen Vulkane als Vorläufer in die Betrachtung langfristiger magmatischer Prozesse miteinbezogen werden, da diese möglicherweise genetisch bereits mit dem zunehmenden Vulkanismus im Känozoikum zusammenhängen.

#### **18. Mantelxenolithe**

Mantelxenolithe sind direkte Proben des ansonsten nicht zugänglichen Erdmantels, an denen sich die Eigenschaften des Mantels, wie z. B. Zusammensetzung, Struktur, Druck- und Temperaturverhältnisse untersuchen lassen. Das Nebengestein kann einerseits Auskünfte über prä-känozoische Ereignisse, wie z. B. eine metasomatische Überprägung der Mantelgesteine geben, und andererseits Informationen zur primären Schmelzbildung

---

- Anhang 2 (Indikatorenliste und Beschreibung der Indikatoren) -

und zu möglichen älteren Intrusionen oder Differentiationsprodukten liefern, die die Erdoberfläche nicht erreichten. Weiterhin können Mantelxenolithe Hinweise auf den Aufstieg und die Stagnierung des Magmas und somit auf dessen Interaktion mit dem Nebengestein geben. Neben den Xenolithen können auch einzelne Xenokristalle und darin enthaltene Fluideinschlüsse Informationen zu vergangenen Prozessen liefern.

### **19. Krustenxenolithe**

Während das Vorherrschen von Mantelxenolithen einen raschen Aufstieg der Schmelzen durch die Kruste anzeigen kann, ist eine Häufung krustaler Xenolithe ein mögliches Indiz auf Magmenstagnation und auf mögliche krustale Magmenkammern. Anhand der Krustenxenolithe lassen sich Informationen über die Tiefenlage und die Dauer der Einwirkung des Magmas auf die Gesteine ablesen. Zudem liefern sie Informationen über geochemische Reaktionen zwischen Magmen und Krustengesteinen, die zu Veränderungen der Magmenzusammensetzung, ihrer Eigenschaften und des Ausbruchverhaltens führen können.

### **20. Phänokristalle**

Phänokristalle können Auskünfte über die Entwicklungsgeschichte eines Magmas geben. So können sie die Magmenherkunft, dessen Aufstieg und Differentiation und mögliche Interaktion mit anderen Schmelzen oder Entmischung aufzeigen. Aus ihnen kann die Entwicklung der Druck- und Temperaturverhältnisse sowie die Verweilzeit und die Dauer der Kristallisation von Schmelzen in Magmenreservoirs abgeleitet werden. Hinweise auf Aufstiegsgeschwindigkeiten und unterschiedliche Magmenschübe können aus Diffusionsprofilen abgeleitet werden. Fluideinschlüsse lassen weiterhin Rückschlüsse auf die Fluidzusammensetzungen in größeren Tiefen zu, die im Gleichgewicht mit Teilen des Phänokristalls standen.

### **21. Gesteinschemismus**

Der Gesteinschemismus spiegelt die Quelle des Magmas, dessen Aufschmelzgrad und mögliche Prozesse der Magmendifferentiation wider. Gesteinschemische Analysen können zudem Prozesse, wie z. B. Assimilation vom Nebengestein, fraktionierte Kristallisation sowie Magmenmischung oder -entmischung aufzeigen. Mineralogische und petrologische Untersuchungen, die Hinweise auf das Ausmaß, die Abfolge und die Umgebungsbedingungen dieser Prozesse liefern, können mit in diesem Indikator eingeschlossen sein, wobei den Phänokristallen, welche im Besonderen Rückschlüsse auf frühe Prozesse der Magmenbildung erlauben, ein eigener Indikator (Nr. 20) zugestanden wurde.

## **22. Thermalwässer**

Der Indikator „Thermalwässer“ umfasst Mineral- und Thermalwässer, die auf erhöhte Temperaturen im Untergrund hinweisen, verursacht z. B. durch magmatische Aktivität, aber auch in Folge einer tiefreichenden Zirkulation des Grundwassers. Die Zusammensetzung der Wässer ermöglicht die Berechnung geochemischer Thermometer zur Abschätzung von Temperaturen im tieferen Untergrund der in Bohrungen oder an der Oberfläche beprobten und teilweise abgekühlten Wässer. Änderungen in ihrer Zusammensetzung und Temperatur können Hinweise auf fortschreitende Gesteinsumwandlung, Veränderungen der Fließwege, aber auch Änderungen im tiefer liegenden magmatischen System liefern.

## **23. Geochronologische Daten**

Geochronologische Daten beinhalten Altersdaten von Vulkaniten, aber auch darunterliegender oder überlagernder Gesteine, die Zeiträume für Eruptionen angeben oder relative Alterseinstufungen ermöglichen, z. B. zur Rekonstruktion der Eruptionsgeschichte. Zudem sind Altersdatierungen einzelner Phänokristalle möglich, die Hinweise auf das Alter und die Dauer von Magmenbildung und Differentiation ermöglichen. Die Daten ermöglichen die Berechnung der Ausbruchshäufigkeit sowie von Zyklen vulkanischer Aktivität und Ruhephasen und geben somit Hinweise auf die Langlebigkeit und Reaktivierbarkeit magmatischer Systeme. Weiterhin können aus den Auswertungen geochronologischer Daten mögliche räumliche Verlagerungen der vergangenen vulkanischen Aktivitäten abgeleitet werden.

## **24. Mofetten und Säuerlinge**

Mofetten und Säuerlinge beschreiben Austrittsorte von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) oder Grundwässern, die sich durch einen relativ zu Grundwässern der Umgebung erhöhten Gehalt an gelöstem CO<sub>2</sub> auszeichnen. Neben CO<sub>2</sub> können andere Gase, wie z. B. Schwefelwasserstoff, Methan oder in Spuren auch Helium und andere Edelgase in der Gasphase enthalten sein. Das Auftreten von Mofetten und Säuerlingen kann die Entgasung der Kruste und des Mantels, aber auch möglicher basischer Schmelzen im Untergrund widerspiegeln. Ultrabasische und basische Schmelzen können reich an CO<sub>2</sub> sein, welches auch als Fluideinschluss in Mantelxenolithen auftritt. Da die Löslichkeit von CO<sub>2</sub> in den Schmelzen mit abnehmendem Druck geringer wird, kann es beim Aufstieg von Schmelzen sowie deren Kristallisation im Untergrund zur Freisetzung von CO<sub>2</sub> kommen.

## **25. Gas- und isotopengeochemische Analysen von Mantelfluiden**

Die chemische Analyse von an Mofetten oder Säuerlingen austretenden Mantelfluiden kann wichtige Hinweise auf deren Ursprung liefern. So können Konzentrationen und Isotope der Edelgase in CO<sub>2</sub>-reichen Quellgasen und Mofetten genutzt werden, um aus deren Isotopenverhältnissen den Ursprung des Fluids abzuleiten, da sich die Isotopenverhältnisse

---

- Anhang 2 (Indikatorenliste und Beschreibung der Indikatoren) -

z. B. von Mantel-Helium und von krustalem Helium stark unterscheiden. Änderungen in magmatischen Systemen können Änderungen in der Gaszusammensetzung und -isotopie zur Folge haben. Zudem können regionale Unterschiede in der Gaszusammensetzung Hinweise auf Aufstiegsmöglichkeiten der Fluide geben. Die Analyse von Fluideinschlüssen in Mantelxenolithen ermöglicht Korrelationen mit Fluiden, die an der Oberfläche austreten, und ist somit wichtig für die Interpretation der Herkunft der Fluide und das Verständnis magmatischer und Fluidtransportprozesse.

## **26. Ergebnisse petrologischer Experimente**

Petrologische Experimente können die Entstehung der Magmen, deren Zusammensetzung und Differentiation in vereinfachter Weise unter bekannten Bedingungen simulieren. Die Ergebnisse der Experimente können zum direkten Vergleich mit vulkanischen Förderprodukten herangezogen werden oder als Basis für numerische Modelle der Magmenbildung dienen. Zudem kann die Stabilität einzelner Phasen ermittelt und Rückschlüsse auf die Reaktion von Schmelzen mit Phänokristallen, Magmenmischungen oder die Assimilation von Krustengesteinen gezogen werden. Neben den chemischen Eigenschaften des Systems können auch physikalische Eigenschaften, wie z. B. die Dichte und Viskosität der Magmen, die Löslichkeit von Fluiden oder die Permeabilität von Gesteinen, aus Experimenten abgeleitet werden.

## **27. Numerische Modelle zur Genese, Differentiation und zum Aufstieg von Magmen**

Numerische Modelle zur Magmengenese, -differentiation und zum Magmenaufstieg werden in einem großen Bereich der Forschung angewendet. Sie reichen von reinen thermodynamischen Modellen zur Stabilität von Phasen und zur Magmendifferentiationen, über mechanische Modelle zum Aufstieg von Magmen und dessen Komponenten, bis hin zu Modellen, welche die Geschwindigkeit chemischer Prozesse miteinbeziehen. Die korrekte Kopplung von thermodynamischen und mechanischen Vorgänge ist hierbei von zentraler Bedeutung für realistische Simulationen. Ist dies gewährleistet, kann die gesamte Prozesskette und deren zeitliche und örtliche Ausprägung (die Hierarchie der Prozesse), von der Entstehung der Schmelze, über deren Aufstieg, mögliche Interaktionen mit dem Nebengestein, bis hin zur Magmendifferentiation und Eruption nachvollzogen werden. Die Ergebnisse solcher Modelle dienen im Vergleich mit dem Magmenchemismus vor allem dem Prozessverständnis, da sie die Komplexität der Natur immer nur begrenzt wiedergeben können. Prognosen können in Kombination mit den Ergebnissen petrologischer Experimente Argumente für die Interpretation geophysikalischer Messungen geben. Dichte, Schmelzanteil, Temperatur oder die Viskosität von Magmen beeinflussen geophysikalisch beobachtbare Größen. Parametervariationen mittels numerischer Modelle der Magmengenese können so helfen, die Plausibilität geophysikalischer Annahmen zu überprüfen.

## **28. Bodenbewegungen**

Aufgrund der Unterschiede in den Methoden und Unsicherheiten zur Bestimmung von Vertikalbewegungen sowie der möglichen Rückschlüsse auf zusätzliche Prozesse wird neben der langfristigen und großräumigen Hebung (Nr. 6) ein zusätzlicher Indikator vorgeschlagen. Der Indikator „Bodenbewegungen“ umfasst Deformationen, wie z. B. laterale Bodenbewegungen, Neigungsänderungen oder Senkungen/Hebungen, die auch über kürzere Zeiträume und auf kleinerem Maßstab an der Erdoberfläche nachweisbar sind. Die Ursachen solcher Deformationen können unterschiedlichster Herkunft sein, von tiefen lithosphärischen oder sub-lithosphärischen Prozessen, bis hin zu krustalen oder exogenen Prozessen. Die Interpretation der Bodenbewegungsdaten (gemeinsam mit anderen Informationen) kann mit Prozessen im Erdmantel (z. B. Mantel Plumes), der Bildung und Aktivität von Deformationszonen in der Lithosphäre (Aufstiegsmöglichkeiten) und der Platznahme und Bewegung von Magmen und Fluiden in der Kruste (Magmenkammern) verbunden werden. Die Deformation der Erdoberfläche wird meist mit geodätischen Methoden erfasst, die im Gegensatz zur meist geologisch bestimmten langfristigen Hebung ein Bild der rezenten Bodenbewegung liefert, in der aber auch anthropogene Einflüsse zu berücksichtigen sind.

## **29. Alte Störungen und Suturen**

Zusätzlich zum Indikator „Neotektonische Aktivität“ (Nr. 8) wird der Indikator „Alte Störungen und Suturen“ vorgeschlagen. Dieser beinhaltet tiefreichende Störungen oder Suturen, die Grundgebirgseinheiten oder Terrains voneinander trennen und teilweise wiederholt zu verschiedenen Zeiten in der Erdgeschichte aktiv waren. Solche Suturen stellen zusätzlich zu Strukturen, die dem Indikator „Neotektonische Aktivität“ zugeordnet werden können, möglicherweise Aufstiegswege für Magmen dar, wie beispielsweise in der Oberpfalz und im Egergraben. Suturen entstanden zwar in einem vom rezenten abweichenden tektonischen Regime, können aber von Bedeutung sein, wenn sie Schwächezonen darstellen, die den Aufstieg von Magmen begünstigen. Daher sind vor allem günstig zum rezenten Spannungsfeld orientierte ältere Störungen sowie großmaßstäbige Strukturen, die weit in die Lithosphäre reichen (wie z. B. variszische Suturen), als mögliche Aufstiegswege für Magmen in Betracht zu ziehen.

## **30. Plattentektonische Rekonstruktionen und Modelle**

Modelle zu vergangenen und rezenten Plattenbewegungen und -deformationen können Hinweise sowohl auf die Änderung des Spannungsfeldes als auch auf mögliche Konvektionsströme im sub-lithosphärischen Mantel geben. Mögliche Divergenzen können zur Ausdünnung der Lithosphäre und zur Schmelzbildung im aufsteigenden Mantel führen. Auch kompressive Ereignisse, wie das Einsetzen der Alpidischen Orogenese, können die tektonische und möglicherweise auch die vulkanische Aktivität in Zentraleuropa verursacht oder beeinflusst haben. Weiterhin können, basierend auf vergangenen Plattenbewegungen,

---

- Anhang 2 (Indikatorenliste und Beschreibung der Indikatoren) -

mögliche Szenarien für die Zukunft entwickelt werden. Obwohl Überschneidungen zum Indikator „Neotektonische Aktivität“ (Nr. 8) bestehen, rechtfertigt der größere Maßstab in Raum und Zeit und die mehr dynamische Betrachtung der Prozesse eine Unterscheidung der Indikatoren.