



**BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG**

Anwendung

Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG

(Untersetzende Unterlage des Zwischenberichts Teilgebiete)

Stand 28.09.2020

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	10
Glossar	12
1 Zusammenfassung der Anwendungsergebnisse	13
2 Einführung	15
2.1 Veranlassung	15
2.2 Gegenstand und Zielsetzung	15
2.3 Abgrenzung	16
3 Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG	17
4 Verfahrensgrundsätze	19
5 Datenabfragen und Datenaufbereitung	20
5.1 Datenabfragen	20
5.2 Datenaufbereitung	20
6 Großräumige Vertikalbewegungen	22
6.1 Einführung	22
6.1.1 Fachliche Grundlagen	23
6.1.2 Großräumige Vertikalbewegungen in Deutschland seit der Oberkreide	25
6.1.3 Prognosen zu großräumigen Vertikalbewegungen in Deutschland	27
6.2 Datenabfragen und Datengrundlage	29
6.3 Anwendungsmethode	30
6.4 Ergebnisse	30
7 Aktive Störungszonen – tektonische Störungszonen	32
7.1 Einführung	32
7.1.1 Fachliche Grundlagen	32
7.1.2 Tektonische Entwicklung Deutschlands im Känozoikum	35
7.2 Datenabfragen	35
7.3 Datengrundlage und Datenaufbereitung	36
7.4 Ausweisung aktiver Störungszonen	39
7.4.1 Bewertung der Vorschläge der Bundes- und Landesbehörden	39
7.4.2 Ausweisung von aktiven Störungen in geologischen Einheiten jünger 34 Millionen Jahre	39

7.4.3	Ausweisung aktiver Störungszonen in tektonisch aktiven Großstrukturen	41
7.4.3.1	Oberheingraben und Hanauer Becken	44
7.4.3.2	Niederrheinische Bucht	46
7.4.3.3	Rheinisches Massiv und Neuwieder Becken	47
7.4.3.4	Bayerische Alpen und Molassebecken	48
7.4.3.5	Albstadt Scherzone	50
7.4.3.6	Freiburg-Bonndorf-Bodensee Scherzone	52
7.4.3.7	Vogtland	54
7.4.3.8	Lausitzer Tertiärgräben	55
7.4.4	Anwendungsmethode	57
7.5	Ergebnisse	59
8	Aktive Störungszonen – atektonische Vorgänge	62
8.1	Einführung	62
8.1.1	Fachliche Grundlagen	62
8.1.1.1	Deformationen durch Diagenese	62
8.1.1.2	Senkungen und Einstürze über Lösungshohlräumen	63
8.1.1.3	Subaerische und subaquatische Rutschungen	65
8.1.1.4	Glazialtektonik und Kryoturbation	66
8.1.1.5	Impaktereignisse	67
8.1.2	Potenzielle Beeinflussung des endlagerrelevanten Bereiches	67
8.1.3	Atektionische Deformationserscheinungen in Deutschland	69
8.2	Datenabfragen und Datengrundlage	72
8.3	Datenaufbereitung	74
8.4	Anwendungsmethode	75
8.5	Ergebnisse	75
9	Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bohrungen	80
9.1	Einführung	80
9.2	Fachliche Grundlagen	80
9.3	Datenabfragen und Datengrundlage	84
9.4	Datenaufbereitung	85
9.5	Anwendungsmethode	86
9.6	Ergebnisse	89
10	Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bergwerke	92
10.1	Einführung	92
10.1.1	Fachliche Grundlagen	92
10.1.2	Bergbau in Deutschland	94
10.1.3	Bergrechtliche Aspekte	95
10.2	Datenabfragen	96

10.3	Datengrundlage und Datenaufbereitung	97
10.4	Anwendungsmethode	100
10.4.1	Allgemeine Verfahrensweise	100
10.4.2	Anwendungsmethode	100
10.4.3	Umgang mit dem Steinkohlenbergbau in Nordrhein-Westfalen	104
10.4.4	Umgang mit fehlenden Daten und einzelnstehenden Schächten	108
10.4.5	Umgang mit Bestandsbergwerken der BGE	108
10.4.5.1	Ausgeschlossenes Gebiet Endlager Konrad	109
10.4.5.2	Ausgeschlossenes Gebiet Schachanlage Asse II	110
10.4.5.3	Ausgeschlossenes Gebiet für das Endlager Morsleben	110
10.5	Ergebnisse	111
10.5.1	Ausgeschlossene Gebiete	111
10.5.2	Vorgemerkte bergbauliche Tätigkeiten	115
11	Seismische Aktivität	118
11.1	Einführung	118
11.1.1	Fachliche Grundlagen	118
11.1.2	Seismizität in Deutschland	120
11.1.3	Aktuell gültiger Nationaler Anhang DIN EN 1998-1/NA:2011-01	122
11.2	Datenabfragen und Datengrundlage	126
11.3	Anwendungsmethode	126
11.4	Ergebnisse	126
11.5	Ausblick	128
12	Vulkanische Aktivität	130
12.1	Einführung	130
12.1.1	Fachliche Grundlagen	130
12.1.2	Vulkanismus in Deutschland	132
12.1.3	Prognosen vulkanischer Aktivität in Deutschland	136
12.2	Datenabfragen und Datengrundlage	137
12.3	Anwendungsmethode	138
12.4	Ergebnisse	138
13	Grundwasseralter	143
13.1	Einführung	143
13.2	Fachliche Grundlagen	143
13.3	Datenabfragen und Datengrundlage	145
13.4	Anwendungsmethode	146
13.5	Ergebnisse	147
14	Entwicklung der Anwendungsmethoden zu den Ausschlusskriterien	151
15	Zusammenfassung	155

16	Literaturverzeichnis	157
	Anzahl der Blätter dieses Dokumentes	177

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Maßstabsgetreue Darstellung ausgeschlossener Gebiete nach Anwendung der Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG durch die BGE	14
Abbildung 2:	Schematische Darstellung der Beziehung zwischen den verschiedenen Arten von Vertikalbewegungen.	23
Abbildung 3:	Prozesse, die Vertikalbewegungen der Lithosphäre auslösen (Teixell et al. 2009).	24
Abbildung 4:	Schematische Darstellung der Hauptverwerfungsarten (Reuther 2012)	33
Abbildung 5:	Schematischer Aufbau einer Störungszone, bestehend aus dem Störungskern und der umgebenden Zerrüttungszone (Agemar et al. 2017; Choi et al. 2016)	34
Abbildung 6:	Idealisierte geologische Karte, an der das Vorgehen der manuellen Ergänzung der Aktivitätszuweisung für Störungssegmente der post-Eozän-Verschneidung schematisch dargestellt ist.	41
Abbildung 7:	Von der BGE definierte Umrisse tektonisch aktiver Großstrukturen	43
Abbildung 8:	Die Grabensysteme des Europäischen Känozoischen Riftsystems (Ziegler et al. 2004).	45
Abbildung 9:	Tektonische Karte der Niederrheinischen Bucht (Reicherter et al. 2008).	47
Abbildung 10:	Vereinfachte Karte und geologisches Profil des Molassebeckens (Reinecker et al. 2010).	50
Abbildung 11:	Orientierung der Grabensysteme der Albstadt Scherzone (Reinecker & Schneider 2002)	52
Abbildung 12:	Vereinfachte tektonische Karte von Südwestdeutschland und der Nordschweiz (Egli et al. 2017)	53
Abbildung 13:	Vereinfachte tektonische Karte mit Störungszonen der Leipzig-Regensburg-Zone und des Eger Graben sowie eine Auswahl der Epizentren von Erdbeben zwischen 1991 und 2011 (Fischer et al. 2014)	55
Abbildung 14:	Vereinfachte tektonische Karte der Niederlausitz mit ausgewählten Störungszonen und Gräben (Krentz & Lapp 2010)	56
Abbildung 15:	Schematische Darstellung positiver und negativer Blumenstrukturen in Seitenverschiebungssystemen (Fossen 2011)	57
Abbildung 16:	Darstellung von Deformationsprozessen im Dachbereich eines Salzdiapirs (Davison et al. 2000)	59
Abbildung 17:	Ausgeschlossene Gebiete nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „aktive Störungszonen – tektonische Störungszonen“	61

Abbildung 18:	Typische Erscheinungsformen der Karstmorphologie (Grotzinger & Jordan 2017)	64
Abbildung 19:	Verbreitung der Karstlandschaften Deutschlands und ihre verkarsteten stratigraphischen und lithologischen Einheiten (Pfeffer 2003)	72
Abbildung 20:	Ausgeschlossene Gebiete nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „aktive Störungszonen – atektonische Vorgänge“	77
Abbildung 21:	Ausgeschlossene Gebiete nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „aktive Störungszonen“	79
Abbildung 22:	Vereinfachte Darstellung eines Verrohrungsschemas einer Tiefbohrung	83
Abbildung 23:	Beispiel der Visualisierung ausgeschlossener Gebiete um vertikale, abgelenkte und gerichtete Bohrungen	89
Abbildung 24:	Ausgeschlossene Gebiete nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bohrungen“.	90
Abbildung 25:	Vereinfachtes, schematisches Beispiel eines Tagebaus im Lockergestein.	93
Abbildung 26:	Vereinfachtes, schematisches Beispiel eines Erztiefbaus	94
Abbildung 27:	Graphische Darstellung zur Ermittlung der größten lateralen Erstreckung eines Bergwerkes.	102
Abbildung 28:	Schematische Darstellung der Ausweisung des Beeinflussungsbereichs um die größte laterale Erstreckung des Bergwerkes anhand der Tiefe und dem Grenzwinkel	103
Abbildung 29:	Beispiel einer Spannungsänderung unterhalb eines Abbaustoßes (Wagner 2017)	104
Abbildung 30:	Schematische Beispiele mehrerer Rissblatthüllenden in verschiedenen Maßstäben.	105
Abbildung 31:	Kartendarstellung der ausgeschlossenen Gebiete um die Bestandsbergwerke der BGE	111
Abbildung 32:	Ausgeschlossene Gebiete nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit“ – Bergwerke“.	113
Abbildung 33:	Ausgeschlossene Gebiete nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit“.	114
Abbildung 34:	Kartendarstellung vorgemerakter ausgeschlossener Gebiete.	116
Abbildung 35:	Ausbreitung seismischer Wellen vom Erdbebenherd (Press & Siever 2008).	119
Abbildung 36:	Darstellung der Verteilung der natürlichen seismischen Ereignisse in Deutschland (Grünthal et al. 2018b).	121

Abbildung 37:	Schematische Darstellung der Erdbebenzonen der Bundesrepublik Deutschland (DIN EN 1998-1/NA:2011-01, Bild NA.1)	124
Abbildung 38:	Ausgeschlossene Gebiete nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „seismische Aktivität“ durch die BGE.	127
Abbildung 39:	Schematisches Vulkan-Magma-System (verändert nach Schmincke (2013), um magmatische Vorgänge in der Lithospähre darzustellen).	131
Abbildung 40:	Übersichtskarte über quartäre und tertiäre Vulkanfelder in Deutschland sowie im tschechischen Teil des Egergrabens (Basiskarte nach NordNordWest (2008), Lokalisationen nach Hofbauer (2016) hinzugefügt).	134
Abbildung 41:	Luftbild des Laacher-See-Vulkans (Df1paw 2017).	136
Abbildung 42:	Eruptionszentren (grau) und durch die BGE ausgeschlossene Gebiete (blau) nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „vulkanische Aktivität“.	140
Abbildung 43:	Eruptionszentren (grau) und ausgeschlossene Gebiete in der Eifel der BGE (blau) verglichen mit den in Jentzsch (2001; hellblau) dargestellten Gebieten.	141
Abbildung 44:	Eruptionszentren (grau) und ausgeschlossene Gebiete im Vogtland/Egergraben der BGE (blau) verglichen mit den in Jentzsch (2001; hellblau) dargestellten Gebieten	142
Abbildung 45:	Schematisches Modell eines natürlichen hydrologischen Systems mit Veranschaulichung verschiedener Zu- und Abflusspfade sowie Verweilzeiten von Wasser im Untergrund (Cornaton 2003).	144
Abbildung 46:	Ausgeschlossene Gebiete nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „Grundwasseralter“.	149

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Bewertungskategorien der Eintrittswahrscheinlichkeit von Hebungsbeiträgen von 1000 m in einer Million Jahren im rezenten plattentektonischen Rahmen für Deutschland allein durch den jeweiligen Prozess (Jähne-Klingberg et al. 2019)	27
Tabelle 2:	Bewertungskategorien der Relevanz für die jeweilig untersuchten Prozesse als Hebungsursache im Zeitraum vom Neogen bis heute in Deutschland (Jähne-Klingberg et al. 2019)	28
Tabelle 3:	Übersichtstabelle über die von den Landes- und Bundesbehörden gelieferten Datentypen für das Ausschlusskriterium „großräumige Vertikalbewegungen“	30
Tabelle 4:	Datensätze, die für die Ausweisung aktiver Störungszonen verwendet wurden	37
Tabelle 5:	Unterteilung von Rutschungen nach der Tiefenlage der Gleitfläche (nach Prinz & Strauß 2011)	66
Tabelle 6:	Zusammenstellung verschiedener atektonischer Vorgänge und ihrer potenziellen Beeinflussung des endlagerrelevanten Bereiches (größer gleich 300 m unter GOK)	67
Tabelle 7:	Relevante atektonische Vorgänge für die Ermittlung von ausgeschlossenen Gebieten	76
Tabelle 8:	Übersicht über die für die jeweiligen Bundesländer verwendete Datenbasis zur Anwendung des Ausschlusskriteriums „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bergwerke“	98
Tabelle 9:	Überblick über die Anzahl und Flächen der ausgeschlossenen Gebiete pro Bundesland für das Ausschlusskriterium „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bergwerke“	112
Tabelle 10:	Übersicht über vorgemerkte Bergwerke und Kavernen für das Ausschlusskriterium „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bergwerke“	116
Tabelle 11:	Zuordnung von Intensitätsintervallen und Referenz-Spitzenwerten der Bodenbeschleunigung a_{gR} zu den Erdbebenzonen gemäß DIN EN 1998-1/NA: 2011-01.	125

Abkürzungsverzeichnis

$\Delta\sigma_3$	Änderung der kleinsten Hauptspannung σ_3
$\Delta\sigma_{\text{eqv}}$	Änderung der von-Mises-Vergleichsspannung σ_{eqv}
a_{gR}	Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung
3D, 2D	Dreidimensional, zweidimensional
^3H	Tritium
$^3\text{HE}/^4\text{HE}$-Verhältnis	Verhältnis von Helium-3 zu Helium-4
^{14}C	Kohlenstoff-14
AkEnd	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte
AnSicht	Projekt „Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein“
AtG	Atomgesetz
BBergG	Bundesberggesetz
BGBI.	Bundesgesetzblatt
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BT-Drs.	Bundestag-Drucksache
CO₂	Kohlenstoffdioxid
DB	Datenbank
DIN	Deutsches Institut für Normung
DS	Drucksache
EdZ	Excavation disturbed Zone
Einwirkungs-BergV	Einwirkungsbereich-Bergverordnung
EMS	Europäische Makroseismische Skala
EN	Europäische Norm
EPSG	European Petroleum Survey Group Geodesy
ERAM	Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben

ERS1/2	European Remote Sensing Satellite 1/2
ETL	Extrahieren, Transformieren und Laden
ETRS	Europäisches Terrestrisches Referenzsystem
FBBS	Freiburg-Bonndorf-Bodensee Scherzone
FME	Feature Manipulation Engine
GeoMol	Bewertung der Geopotenziale in den alpinen Vorlandbecken für die nachhaltige Planung und Bewirtschaftung der natürlichen Ressourcen (3D-Modell)
GeORG	Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben (3D-Modell) (EU-Projekt)
GERSEIS	Deutscher Erdbebenkatalog
GIS	Geoinformationssystem
GNSS	Globales Navigationssatellitensystem
GOK	Geländeoberkante
GTA/GTA3D	Geotektonischer Atlas von Nordwestdeutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor/als 3D-Modell
GÜK250	Geologische Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1 : 250 000
Hessen3D	3D-Modellierung der Geothermischen Tiefenpotenziale von Hessen (3D-Modell)
InSpEE	Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft)
ISO	Internationale Organisation für Normung
INSPIRE	Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft
KTB	Kontinentales Tiefbohrprogramm
KW-Datenbank	Kohlenwasserstoff-Datenbank
LBEG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen
LfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt
LGRB	Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg
LMBV	Lausitzer und Mitteldeutschen Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH
M_L	Lokalmagnitude

M_w	Momentmagnitude
MWD	Measuring While Drilling
NA	Nationaler Anhang
NHN	Normalhöhennull
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle
pMC	percent modern carbon
S_{ap, R}	Spektrale Antwortbeschleunigung im Plateaubereich
StandAG	Standortauswahlgesetz
TU	Tritium Units
(U-Th)/He-Abkühlalter	Uran-Thorium/Helium-Abkühlalter
UTM	Universal Transverse Mercator
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WKID	Well-known ID

Glossar

Ein berichtsübergreifendes Glossar ist der Unterlage „Glossar der BGE zum Standortauswahlverfahren“ (BGE 2020af) zu entnehmen.

1 Zusammenfassung der Anwendungsergebnisse

Zur Ermittlung von Teilgebieten wendete die BGE als Vorhabenträgerin des Standortauswahlverfahrens gemäß § 13 Abs. 2 StandAG zunächst die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG an, gefolgt von den Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach §§ 23 und 24 StandAG. Die im Rahmen der Anwendung der Ausschlusskriterien ermittelten ausgeschlossenen Gebiete sind als potentieller Standort für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle nicht geeignet und werden für die anschließende Anwendung der Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nicht weiter berücksichtigt.

Die Ausschlusskriterien sind in § 22 Abs. 2 Nr. 1 – 6 StandAG definiert und umfassen Nr. 1) „großräumige Vertikalbewegungen“, Nr. 2) „aktive Störungszonen“, Nr. 3) „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit“, Nr. 4) „seismische Aktivität“, Nr. 5) „vulkanische Aktivität“ und Nr. 6) „Grundwasseralter“.

Die Ermittlung ausgeschlossener Gebiete erfolgt in dieser Phase des Standortauswahlverfahrens auf Grundlage von vorhandenen Daten. Diese hat die BGE bei den Bundes- und Landesbehörden abgefragt. Zusätzlich zu den digital bei den Behörden vorhandenen Daten hat die BGE im Rahmen von Digitalisierungskampagnen bei den Behörden ausschließlich analog vorliegende Daten digitalisiert, die insbesondere für die Anwendung des Ausschlusskriteriums „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit“ wesentlich waren. Die im Zuge der Datenabfragen bereitgestellten sowie digitalisierten Daten wurden von der BGE gesichtet, aufbereitet, in Datenbanksystemen organisiert und zur Entwicklung von Anwendungsmethoden der Ausschlusskriterien herangezogen.

Die Anwendungsmethoden beschreiben für jedes Ausschlusskriterium den Weg, der die von der BGE verwendete Datengrundlage in ausgeschlossene Gebiete übersetzt. Dabei hat die BGE den Verfahrensgrundsatz befolgt, ausgeschlossene Gebiete im Zweifel flächenhaft eher zu unter- als zu überschätzen. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die Ausschlusskriterien in jeder Phase des Standortauswahlverfahrens erneut anzuwenden sind und sich ausgeschlossene Gebiete dadurch im Laufe des Verfahrens mit steigendem Kenntnisstand vergrößern können. Die Anwendungsmethoden wurden im Vorfeld der Erstellung dieses Berichts in einem von der BGE eingerichteten Onlineforum öffentlich bereitgestellt und diskutiert.

Durch Anwendung aller sechs Ausschlusskriterien wurden ausgeschlossene Gebiete ermittelt. Diese sind in Abbildung 1 als wesentliches Ergebnis dieses Berichts dargestellt. Die Karte zeigt neben einigen großflächig ausgeschlossenen Gebieten, die auf die Ausschlusskriterien „vulkanische Aktivität“ und „seismische Aktivität“ zurückgehen, eine Vielzahl kleinerer Flächen, die primär den Ausschlusskriterien „aktive Störungszonen“ und „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit“ zuzuordnen sind.

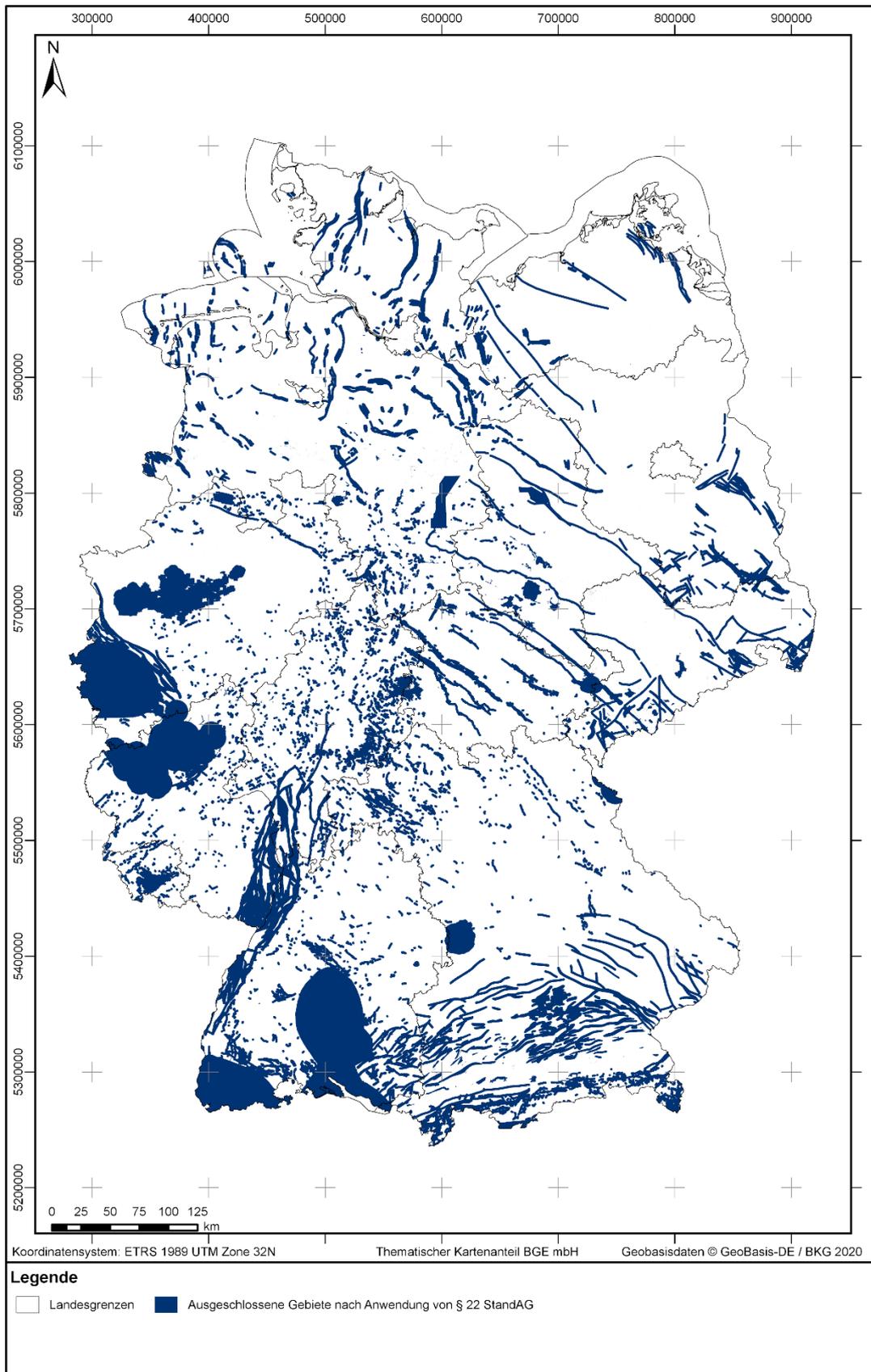


Abbildung 1: Maßstabsgetreue Darstellung ausgeschlossener Gebiete nach Anwendung der Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG durch die BGE

2 Einführung

2.1 Veranlassung

Am 21. September 2016 wurde die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) auf Basis des Gesetzes zur Neuordnung der Organisationsstruktur im Bereich der Endlagerung aus dem Juni 2016 gegründet.

Die Durchführung des Standortauswahlverfahrens richtet sich nach dem Standortauswahlgesetz (StandAG). Die ursprüngliche Fassung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle (StandAG 2013) vom 23. Juli 2013 (Bundesgesetzblatt (BGBl.) I S. 2553) trat nach Evaluierung durch den Bundestag am 16. Mai 2017 außer Kraft. Zeitgleich trat die Neufassung, das Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle, Art. 1 des Gesetzes vom 05. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), überwiegend zum 16. Mai 2017 in Kraft. Letzte Änderungen des Standortauswahlgesetzes erfolgten durch Artikel 247 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) und traten am 27. Juni 2020 in Kraft.

Die Übertragung der Wahrnehmung der Aufgaben des Bundes nach § 9a Abs. 3 S. 1 des Atomgesetzes (AtG) auf die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) erfolgte gemäß § 9a Abs. 3 S. 2 AtG am 25. April 2017. Damit ist die BGE Vorhabenträgerin für das Standortauswahlverfahren nach § 3 Abs. 1 StandAG. Am 5. September 2017 erfolgte der offizielle Start des Standortauswahlverfahrens in Berlin. Nach § 13 ist die Vorhabenträgerin zur Veröffentlichung ihrer ersten Zwischenergebnisse im Zwischenbericht Teilgebiete verpflichtet.

2.2 Gegenstand und Zielsetzung

Das vorliegende Dokument stellt den Fachbericht zu den Ausschlusskriterien dar, in welchem die Methoden und Ergebnisse der Anwendung der Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG zur Ermittlung von Teilgebieten gemäß § 13 StandAG dargestellt sind. Ausgeschlossene Gebiete werden nach § 1 StandAG nur innerhalb der deutschen Bundesgrenzen ermittelt.

Die Ermittlung von Teilgebieten gemäß § 13 StandAG erfolgt auf Basis von Daten, welche der BGE von den zuständigen Bundes- und Landesbehörden im Zuge von Datenabfragen gemäß § 12 Abs. 3 StandAG zur Verfügung gestellt wurden.

In den nachfolgenden Kapiteln werden neben den Verfahrensgrundsätzen zur Anwendung der Ausschlusskriterien auch die von der BGE durchgeführten Arbeiten zur Abfrage und Aufbereitung von Daten beschrieben. Wesentlicher Inhalt dieses Berichts ist die Darstellung der Anwendungsmethoden und der Ergebnisse zu jedem Ausschlusskriterium. Eine ausführlichere Beschreibung zu den Datenlieferungen der Bundes- und Landesbehörden sowie die BGE-interne Datenverarbeitung und Archivierung ist im Daten-

bericht Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG (BGE 2020i) zu finden. Zudem beinhaltet der Datenbericht Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG sämtliche der Anwendung der Ausschlusskriterien zugrundeliegenden entscheidungserheblichen Daten (BGE 2020i).

2.3 Abgrenzung

Dieser Bericht enthält nicht die Ergebnisse der Anwendung der Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß §§ 23 und 24 StandAG. Diese können in den Berichten „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“ (BGE 2020j) und „Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“ (BGE 2020k) nachgelesen werden.

3 Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG

„(1) Ein Gebiet ist nicht als Endlagerstandort geeignet, wenn mindestens eines der Ausschlusskriterien nach Absatz 2 in diesem Gebiet erfüllt ist.

(2) Die Ausschlusskriterien sind:

1. großräumige Vertikalbewegungen

es ist eine großräumige geogene Hebung von im Mittel mehr als 1 mm pro Jahr über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahren zu erwarten;

2. aktive Störungszonen

in den Gebirgsbereichen, die als Endlagerbereich in Betracht kommen, einschließlich eines abdeckenden Sicherheitsabstands, sind geologisch aktive Störungszonen vorhanden, die das Endlagersystem und seine Barrieren beeinträchtigen können;

Unter einer „aktiven Störungszone“ werden Brüche in den Gesteinsschichten der oberen Erdkruste wie Verwerfungen mit deutlichem Gesteinsversatz sowie ausgedehnte Zerrüttungszonen mit tektonischer Entstehung, an denen nachweislich oder mit großer Wahrscheinlichkeit im Zeitraum Rupel bis heute, also innerhalb der letzten 34 Millionen Jahre, Bewegungen stattgefunden haben. Atektonische beziehungsweise aseismische Vorgänge, also Vorgänge, die nicht aus tektonischen Abläufen abgeleitet werden können oder nicht auf seismische Aktivitäten zurückzuführen sind und die zu ähnlichen Konsequenzen für die Sicherheit eines Endlagers wie tektonische Störungen führen können, sind wie diese zu behandeln.

3. Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit

das Gebirge ist durch gegenwärtige oder frühere bergbauliche Tätigkeit so geschädigt, dass daraus negative Einflüsse auf den Spannungszustand und die Permeabilität des Gebirges im Bereich eines vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs oder vorgesehenen Endlagerbereichs zu besorgen sind; vorhandene alte Bohrungen dürfen die Barrieren eines Endlagers, die den sicheren Einschluss gewährleisten, in ihrer Einschlussfunktion nachweislich nicht beeinträchtigen;

4. seismische Aktivität

die örtliche seismische Gefährdung ist größer als in Erdbebenzone 1 nach DIN EN 1998-1/NA 2011-01;

5. vulkanische Aktivität

es liegt quartärer Vulkanismus vor oder es ist zukünftig vulkanische Aktivität zu erwarten;

6. Grundwasseralter

in den Gebirgsbereichen, die als einschlusswirksamer Gebirgsbereich oder Einlagerungsbereich in Betracht kommen, sind junge Grundwässer nachgewiesen worden.

(3) Folgen von Maßnahmen zur Erkundung potenzieller Endlagerstandorte bleiben bei der Anwendung des Kriteriums nach Absatz 2 Nummer 3 außer Betracht. In den vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen ist zu zeigen, dass der Nachweis des sicheren Einschlusses trotz dieser Folgen geführt werden kann. Erkundungsmaßnahmen sind so zu planen und durchzuführen, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich nur in dem für den erforderlichen Informationsgewinn unvermeidlichen Ausmaß verritzt und seine Integrität nicht gefährdet wird.“

4 Verfahrensgrundsätze

Im Rahmen der Erarbeitung der Methoden für die Anwendung der Ausschlusskriterien wurden von der BGE Verfahrensgrundsätze festgelegt, die grundsätzliche Rahmenbedingungen bei der Anwendung der Ausschlusskriterien bilden und eine übergeordnete Konsistenz zwischen den Anwendungsmethoden herstellen. Die Verfahrensgrundsätze sind:

- 1) Alle Ausschlusskriterien werden unabhängig voneinander deutschlandweit angewendet.
- 2) Ein Informationsgewinn im Laufe des Standortauswahlverfahrens soll sich nur vergrößernd auf ausgeschlossene Gebiete auswirken.
- 3) Eine Unterschätzung der ausgeschlossenen Gebiete kann durch wiederholtes Anwenden der Ausschlusskriterien im Fortschreiten des Standortauswahlverfahrens korrigiert werden.
- 4) Eine Überschätzung von ausgeschlossenen Gebieten soll durch die jeweilige Anwendungsmethode vermieden werden.
- 5) Die jeweilige Anwendungsmethode soll bundesweit einheitlich sein, soweit es auf Grundlage der von den Bundes- und Landesbehörden gelieferten Daten möglich ist.
- 6) Die Prüfung der Anwendungsergebnisse für jedes Ausschlusskriterium erfolgt in einem internen Qualitätssicherungsverfahren. Die Prüfschritte umfassen insbesondere die Prüfung auf fachliche Plausibilität der Ergebnisse sowie auf eine korrekte Umsetzung der zuvor definierten Anwendungsmethoden.

5 Datenabfragen und Datenaufbereitung

5.1 Datenabfragen

Die Daten, die zur Anwendung der Ausschlusskriterien genutzt werden, wurden im Rahmen von zwei Datenabfragen im August 2017 sowie Februar 2018 bei den Bundes- und Landesbehörden abgefragt. Für die zweite Datenabfrage hat die BGE eine „Arbeitshilfe zu den Ausschlusskriterien“ (BGE 2018c) erstellt. Die „Arbeitshilfe zu den Ausschlusskriterien“ wurde in Form einer konkretisierten Abfrage von Daten Anfang Februar 2018 an die jeweiligen Behörden versendet. In dieser Arbeitshilfe zu den Ausschlusskriterien wurden allgemeine Anforderungen an die erbetenen Daten (z. B. Format) formuliert. Zusätzlich hat die BGE darin die für jedes Ausschlusskriterium benötigten Informationen spezifiziert.

Im Zuge der Sichtung und Auswertung der Daten wurden Nachfragen zu einigen Datensätzen an die Bundes- und Landesbehörden formuliert. Oftmals handelte es sich um Fragen zu Datenformaten oder zu Attributen der Daten (z. B. zum verwendeten Koordinatensystem). Außerdem wurden im Laufe des Verfahrens weitere Daten zu den Ausschlusskriterien bei den Behörden abgefragt, wenn sich dazu im Rahmen der Sichtung und Auswertung der Daten die Notwendigkeit ergab. Hierbei handelte es sich beispielsweise um Daten zu atektonischen Vorgängen (Ausschlusskriterium „aktive Störungszonen“) oder bergbaulicher Tätigkeit (Ausschlusskriterium „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit“).

Eine Übersicht der von der BGE getätigten Datenabfragen ist in Kapitel 4 des Datenberichtes zu den Ausschlusskriterien (BGE 2020i) in Form von Tabellen mit Angaben zu liefernder Behörde, Eingangsdatum und Inhalt der Datenlieferungen dargestellt. Eine kurze Zusammenfassung der zu den einzelnen Ausschlusskriterien an die BGE übermittelten Daten ist außerdem in diesem Bericht in den Kapiteln 6 bis 13 zu den jeweiligen Ausschlusskriterien enthalten.

5.2 Datenaufbereitung

Dieses Kapitel gibt einen zusammenfassenden Überblick über die Aufbereitung der im Zuge der Datenabfragen zu den Ausschlusskriterien bei der BGE eingegangenen Daten. Eine detaillierte Beschreibung der vorgenommenen Bearbeitungsschritte erfolgt in Kapitel 5 des Datenberichtes zu den Ausschlusskriterien (BGE 2020i).

Sämtliche, von den Behörden übermittelten Dokumentensendungen, die sich auf Daten beziehen oder diese enthalten, werden durch die BGE bearbeitet. Dabei erhält jede Datenlieferung einen Identifier, der beim Posteingang der BGE vergeben wird. Die Datenlieferung wird im elektronischen Dokumentenmanagementsystem archiviert.

Die gelieferten Daten werden zunächst unverändert gespeichert. Zur Datensicherung und auch im Hinblick auf die zeitlich begrenzte Lesbarkeit der Original-Speichermedien werden von allen Speichermedien unveränderbare ISO-9660- bzw. ISO-13346-kompatible Images (Archivdateien) erstellt und über einen Checksummenvergleich mit dem

Originaldatenträger verifiziert. Diese Images werden in einem Dokumentenmanagementsystem revisionssicher gespeichert.

Die Verwaltung der Datenlieferung (also des Schriftverkehrs sowie der mitgelieferten oder aus den Datenlieferungen erzeugten digitalen Daten) geschieht über die sogenannte ArbeitsDB – ein von der BGE speziell für diesen Zweck entwickeltes Datenbank- und Dokumentationssystem: Hier sind Angaben zur liefernden Behörde und zur Datenlieferung selbst (d. h. Angaben zu Datenträger, Anlagen, Downloads usw.) hinterlegt. Außerdem gibt es Schnittstellen mit dem Dokumentenmanagementsystem sowie der GIS-Plattform ArcGIS Enterprise. Jede Datenlieferung wird beurteilt, kommentiert und ihre weitere Bearbeitung dokumentiert.

Die an die BGE übermittelten Dateien werden zu ihrer weiterführenden Aufarbeitung einem von vier Bearbeitungswegen zugeordnet: GIS-Daten-Bearbeitung, 3D-Daten-Bearbeitung (geologische Modelle), Rasterkarten-Bearbeitung und Bearbeitung aller weiteren Dateien (z. B. Studien und Berichte).

Die Daten zu den Ausschlusskriterien wurden von den Bundes- und Landesbehörden bis auf wenige Ausnahmen als GIS-Daten an die BGE übermittelt. Die initial in Hinblick auf ihre Koordinatensysteme und Attributbezeichnungen heterogen vorliegenden GIS-Daten werden im Zuge der Datenaufbereitung homogenisiert. Dies erfordert ggf. eine Lagetransformation auf ein einheitliches Lagebezugssystem, die Zuordnung der Rohdaten zu den Ausschlusskriterien sowie die Überführung der Daten in ein einheitliches Datenmodell in der sogenannten EnterpriseDB (Teil der ArcGIS Enterprise Umgebung). Alle GIS-Daten, die im Rahmen der Anwendung der Ausschlusskriterien ausgewertet werden müssen, werden anhand individueller Attributzuordnungen mit einem ETL-Werkzeug (FME) in den homogenisierten GIS-Daten-Zustand überführt.

Gelieferte Dateien ohne georeferenzierte Inhalte (z. B. Berichte, Stellungnahmen, Bilder, Rasterdaten (Karten), Präsentationen, usw.), die den Gruppen Rasterkarten oder Sonstiges zugeordnet werden können, werden in der ArbeitsDB vorgehalten, gesichtet und geprüft, wobei nachträgliche Georeferenzierungen und Vektorisierungen ausgewählter Daten vorgenommen werden. Aufbereitungsschritte zu den 3D-Daten können dem Datenbericht „Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“ (BGE 2020I) entnommen werden.

6 Großräumige Vertikalbewegungen

6.1 Einführung

„(2) Die Ausschlusskriterien sind:

1. großräumige Vertikalbewegungen

es ist eine großräumige geogene Hebung von im Mittel mehr als 1 mm pro Jahr über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahren zu erwarten;

...“

§ 22 Abs. 2 Nr. 1 StandAG

Wird die in § 22 Abs. 2 Nr. 1 StandAG genannte Hebungsrate von 1 mm pro Jahr auf die nächsten eine Million Jahre (dem festgelegten Nachweiszeitraum) projiziert, so entspricht dies einem großflächigen Hebungsbetrag von einem Kilometer, der durch Hebungsbewegungen der Lithosphäre hervorgerufen wird.

In der Begründung des Gesetzentwurfs (BT-Drs. 18/11398) wird auf einen Zusammenhang zwischen Hebungsbewegungen, Erosion und einer möglichen Freilegung des Endlagers verwiesen: *„Durch das Kriterium werden Gebiete ausgeschlossen, in denen über den Nachweiszeitraum großräumige Hebungen zu erwarten sind. Bewertungsgrundlage für das Kriterium ist die zu erwartende Hebungsrate, also die entsprechend heutiger Prognosen zu erwartende Hebung der Erdoberfläche pro Jahr, die wiederum über den Nachweiszeitraum zu mitteln ist. Liegt diese Hebungsrate im Mittel über 1 mm pro Jahr, so wäre über den Nachweiszeitraum mit einer resultierenden Hebung von mehr als 1000 m zu rechnen. Für Gebiete, die derart großen Hebungen ausgesetzt sind, ist eine Prognose der geologischen Gesamtsituation nicht mit der erforderlichen Sicherheit möglich. Es ist nicht auszuschließen, dass an der Geländeoberfläche verstärkt Erosion auftritt, die die notwendige Schutzwirkung der Überdeckung des Endlagers beeinträchtigen oder diese Schichten vollständig abtragen kann.“*

Sowohl Hebungen als auch Senkungen sind Teil großräumiger Vertikalbewegungen. Hebungen lassen sich in Oberflächenhebung und Gesteinshebung unterteilen. Oberflächenhebungen sind Änderungen in der Höhe der Erdoberfläche relativ zu einem Referenzrahmen, zum Beispiel Normalhöhennull (NHN). Gesteinshebung entspricht der Positionsänderung einer bestimmten Gesteinseinheit relativ zu diesem Referenzrahmen. In der Regel führt eine Gesteinshebung von z. B. 1000 m nicht zu einer Oberflächenhebung des gleichen Betrags, denn zeitgleich wirken Abtragungsprozesse der Hebung der Erdoberfläche entgegen (England & Molnar 1990). Die Freilegung von Gesteinen, z. B. durch Erosion, wird unter dem Begriff Exhumation zusammengefasst (Ring et al. 1999). Dabei stehen die Begriffe Oberflächenhebung, Gesteinshebung und Exhumation in folgender Beziehung, die graphisch in Abbildung 2 dargestellt ist: Oberflächenhebung entspricht der Gesteinshebung abzüglich der Exhumation (England & Molnar 1990).

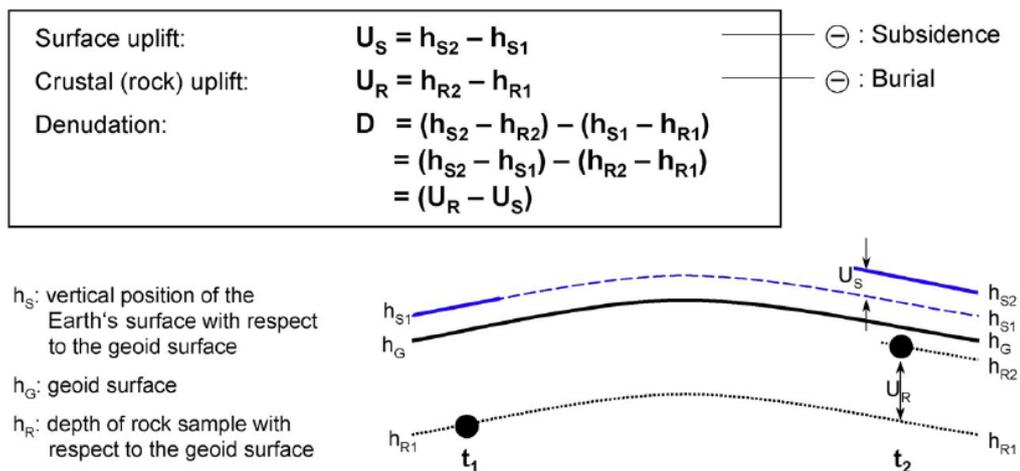


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Beziehung zwischen den verschiedenen Arten von Vertikalbewegungen. Dargestellt sind: Oberflächenhebung (U_S), Gesteinshebung (U_R) und Denudation bzw. Exhumation (D). Parameter, die zur Berechnung benötigt werden sind: Geoidoberfläche (h_G), Tiefe der Gesteinsprobe (h_R) sowie die vertikale Position der Erdoberfläche (h_S) (Jähne-Klingberg et al. 2019).

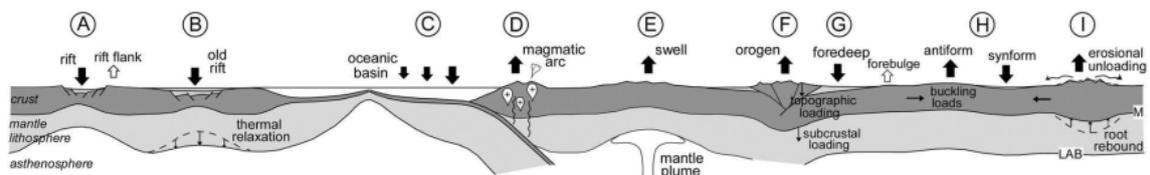
Sowohl in der folgenden Prozessbeschreibung von Vertikalbewegungen in Kapitel 6.1.1 als auch für die Bewertung dieses Ausschlusskriteriums findet keine scharfe Trennung zwischen Oberflächenhebung und Gesteinshebung statt. Beide Hebungsbegriffe dienen als Indiz, die zukünftige Entwicklung der Hebungsbewegungen von Gebieten zu bewerten. Eine Übersicht, welche Bestimmungsmethode zur Ermittlung welcher Hebungsgröße dient, findet sich in Jähne-Klingberg et al. (2019, Tabelle 2.1). Die Abtragung von Gesteinen durch Erosion ist unter dem Begriff „Exhumation“ subsummiert und wird in der Begründung des Gesetzentwurfs (BT-Drs. 18/11398) als Folge von Hebungsbewegungen beschrieben. Exhumation ist daher nicht Bewertungsgrundlage für dieses Ausschlusskriterium.

6.1.1 Fachliche Grundlagen

Eine wesentliche Ursache für Vertikalbewegungen an der Erdoberfläche sind Veränderungen im dynamischen Gleichgewichtszustand zwischen der starren Lithosphäre und dem darunterliegenden duktilen Erdmantel. Verändert sich die Dicke oder das Gewicht der Lithosphäre, kommt es zu sogenannten isostatischen Ausgleichsbewegungen. Prozesse, die zu großräumigen Vertikalbewegungen führen, sind schematisch in Abbildung 3 dargestellt. Im Folgenden werden davon diejenigen Prozesse näher beschrieben, die Hebungsbewegungen verursachen.

Eine gängige Ursache von Hebungsbewegungen ist die Verdickung der Erdkruste, sei es durch magmatische Materialzufuhr (Abbildung 3 (D)) oder gebirgsbildende Prozesse entlang konvergenter Plattengrenzen (Abbildung 3 (F)), (Teixell et al. 2009). In größeren Entfernungen zu aktiven Plattengrenzen können großräumige Hebungseignisse durch Faltung der Lithosphäre entstehen (Abbildung 3 (H)), (Cloetingh et al. 1999). Auch die

Dynamik des Erdmantels beeinflusst die Oberflächengestalt der Erde. So sind Mantelplumes, Gebiete mit heißem, aufsteigendem Mantelmaterial, eine wesentliche Ursache für Hebungen innerhalb tektonischer Platten (Abbildung 3 (E)), (Sleep 1990). Ein weiterer Grund für das Auftreten großräumiger Vertikalbewegungen sind topographische Lastenänderungen innerhalb von Lithosphärenplatten. Dabei führt eine Entlastung der Lithosphäre, etwa durch das Abschmelzen pleistozäner Gletscher, zu isostatischer Hebung (Mey et al. 2016). Äquivalent dazu bedingt das Wachstum eines Gletschers eine isostatische Senkung. Konzeptionell unterscheidet sich dieser Hebungsmechanismus von den vorher genannten Ursachen, denn für Zeiträume in der Größenordnung von einer Million Jahren ist durch Zyklen glazialer Krustenbelastung und -entlastung keine Nettohebung der Erdoberfläche zu erwarten. Ähnlich verhält es sich bei isostatischen Ausgleichsbewegungen als Folge großflächiger Erosion (Abbildung 3 (I)). Auch wenn Erosion ein Gebirge räumlich variabel abträgt, erfährt das gesamte Gebiet eine gleichmäßige isostatische Kompensation. Von der Erosion verschonte Gebiete können dabei über längere Zeiträume herausgehoben werden, jedoch wird die mittlere Erdoberfläche durch diesen Prozess keine großräumige Hebung erfahren (Teixell et al. 2009; Meschede 2018).



- (A) Crustal thinning by stretching
- (B) Thermal cooling of a thinned lithosphere
- (C) Cooling (thickening) of the oceanic lithosphere as it moves away from a ridge
- (D) Crustal thickening by magmatic addition
- (E) Impingement of a mantle upwelling or thermal plume to the base of the lithosphere
- (F) Crustal thickening by orogenic shortening
- (G) Flexure by topographic or subcrustal loading
- (H) Crustal/lithospheric folding
- (I) Erosionally-driven isostatic rebound

Abbildung 3: Prozesse, die Vertikalbewegungen der Lithosphäre auslösen (Teixell et al. 2009). (A) Senkung im Graben und Hebung an der Grabenschulter, (B) Thermische Senkung in einem Graben, (C) Senkung in einem Ozeanbecken, (D) Hebung aufgrund von magmatischen Prozessen, (E) Hebung durch Konvektionsbewegungen im Erdmantel, (F) Hebung durch gebirgsbildende Prozesse, (G) Senkung im Vorlandbecken und Ausbildung von Hebung (forebulge), (H) Hebung und Senkung durch großflächige Faltung, (I) Hebung durch Erosion und isostatische Ausgleichsbewegungen.

Zur Bestimmung von Vertikalbewegungen der Erdoberfläche werden geodätische und fernerkundliche Verfahren eingesetzt. Nivellementmessungen ermitteln Höhenunterschiede, wobei Präzisionsnivellements große Genauigkeiten aufweisen. Die Genauigkeit wird mit der Standardabweichung eines gemessenen Höhenunterschieds einer Hin- und

Rückmessung über einen Kilometer Nivellementstrecke angegeben und ist bei dem Präzisionsnivellement kleiner als 0,5 mm (Martin & Eiblmaier 2001a). GNSS-Messkampagnen (Globales Navigationssatellitensystem) bestimmen aus verschiedenen Satellitenkonstellationen Positionen an der Erdoberfläche (Martin & Eiblmaier 2000b). Die satellitengestützte Fernerkundung kann aus Wiederholungsmessungen die Oberflächenbewegung detektieren. Dabei senden Radarsatelliten Mikrowellen aus und empfangen die an der Erdoberfläche reflektierten Signale (Martin & Eiblmaier 2000a, 2000b). Wiederholungsmessungen aus geodätischen und fernerkundlichen Methoden liefern Zeitreihen, die nur wenige Dekaden umfassen und daher Hinweise über die in der Gegenwart ablaufenden eher kurzfristig wirkenden Prozesse geben können (Nagra 2002). Beispiele hierfür sind Schwankungen des Grundwasserspiegels (Nagra 2002) oder vulkanische und magmatische Prozesse, wie sie für die rezente Hebung der Eifel in Betracht gezogen werden (Kreemer et al. 2020).

Geowissenschaftliche Methoden liefern wertvolle Informationen zu Hebungs-, Exhumations- und Erosionsraten über große Zeiträume, die ein Verständnis von Hebungsbewegungen in der geologischen Vergangenheit ermöglichen. Ein wichtiges Instrument zur Quantifizierung von Exhumationsraten sind radiometrische Altersbestimmungen, wie (U-Th)/He-Abkühlalter und Spaltspuralter. Mit Hilfe von kosmogenen Nukliden können Erosionsraten der letzten 1000 bis etwa 100 000 Jahre ermittelt werden. Dieses Spektrum resultiert aus der Abhängigkeit der Zeitspanne von der Erosionsgeschwindigkeit (hohe Erosionsrate gleich kurze Zeitspanne und umgekehrt). Die Minimal- und Maximalwerte dieses Spektrums spiegeln damit eher Extremwerte wider. Aus Kartierungen ehemaliger Flussterrassen oder Küstenlinien lassen sich relative Gesteinshebungsbeiträge ableiten, wenn das Alter solcher Marker-Horizonte bekannt ist oder ermittelt werden kann (Ring et al. 1999; Ehlers & Farley 2003; von Blanckenburg 2005; Jähne-Klingberg et al. 2019).

Im Vergleich weichen die rezenten Hebungsraten, die mit geodätischen Verfahren ermittelt wurden, häufig von den mit geowissenschaftlichen Methoden ermittelten Hebungsraten, wie zum Beispiel in der Eifel, ab. So erreichen die rezenten Hebungsraten, die auf Basis von GNSS Messungen der letzten 20 Jahre für die Eifel ermittelt wurden, bis zu 1 mm pro Jahr, wohingegen die Höhenlagen alter Flussterrassen lediglich 0,06 bis 0,38 mm Hebung pro Jahr innerhalb der letzten 800 000 Jahre nachweisen (Meyer & Stets 2002; Kreemer et al. 2020).

6.1.2 Großräumige Vertikalbewegungen in Deutschland seit der Oberkreide

Vertikalbewegungen in Deutschland vor der Oberkreide äußern sich in weiten Teilen Norddeutschlands in Senkungsbewegungen durch die Grabenbildungsprozesse des Norddeutschen Beckens, während Süddeutschland über lange Zeiträume des Mesozoikums als Plattformgebiete weitgehend frei von Senkungs- oder Hebungsbewegungen war (Hejl et al. 1997; Thomson & Zeh 2000; Feist-Burkhardt et al. 2008). Dennoch treten auch in diesem Zeitraum regional Hebungs- und Exhumationsvorgänge mit relativ geringen Beträgen auf. Beispiele für prägnantere Exhumationsphasen wurden von Lange et

al. (2008) für das sächsische Grundgebirge mit maximal 100 m Exhumation innerhalb von einer Million Jahren zwischen der späten Trias und Kreide ermittelt. Zwischen Mitteljura und Oberjura bildet sich der thermische Nordseedom im deutschen Nordseeraum aus und weist maximal 2000 m Exhumation in einem Zeitraum von 30 Millionen Jahren auf (Graversen 2002).

Mit Beginn der Oberkreide veränderten sich die plattentektonischen Rahmenbedingungen und somit das seit dem späten Jura vorherrschende tektonische Regime in Mitteleuropa von Nordwest-Südost gerichteter Extension zu Nordnordost-Südsüdwest gerichteter Kompression (Kley & Voigt 2008). Dadurch kommt es insbesondere im Norddeutschen Becken und in Mitteldeutschland zu Einengungstektonik und Strukturinversionen. Dieser Wechsel wird der beginnenden Konvergenzbewegung zwischen Afrika, Iberia und Europa zugeschrieben (Kley & Voigt 2008; Dielforder et al. 2019). In Mittel- und Norddeutschland werden bestehende Ab- und Aufschiebungen reaktiviert. Der Harz, das Niedersächsische Bergland, der Thüringer Wald und die Lausitz sind durch erhöhte Hebungsbeiträge gekennzeichnet, weil sie als isolierte Bereiche Hebung entlang diskreter Aufschiebungen erfahren (Thomson & Zeh 2000; Kockel 2003; Lange et al. 2008). Im Harz werden, begünstigt durch starke Hebungsbewegungen, Erosionsraten von im Mittel 1000 m innerhalb von einer Million Jahren erreicht (von Eynatten et al. 2008). Über den Harz hinaus hält die oberkretazische Einengungsphase bis zum Beginn des Känozoikums an (Lange et al. 2008).

Im Eozän beginnt die bis heute anhaltende Gebirgsbildung der Alpen durch die Kollision zwischen dem Adriatischen und dem Europäischen Kontinent (Froitzheim et al. 2008). Nach Ergebnissen von Mey et al. (2016) sind die aktuellen Hebungsraten der Alpen von ein bis zwei mm pro Jahr primär auf isostatische Ausgleichsbewegungen nach Abschmelzen der Gletscher der letzten Eiszeit zurückzuführen (Abbildung 3 (I)). Sternai et al. (2019) sehen einen geringeren Anteil der glazialisostatischen Ausgleichsbewegungen an den gegenwärtigen Hebungsbewegungen der Alpen. Für die östlichen Alpen wird von Sternai et al. (2019) als Hebungsursache eine Kombination von Prozessen vorgeschlagen, die neben isostatischen Ausgleichsbewegungen nach Gletscherauflast und Erosion auch tektonische Krustenverdickung und Mantelkonvektion umfassen (siehe auch Abbildung 3 (E, F, I)).

Das kombinierte Wirken der Alpen und der Pyrenäenbildung sowie die Öffnung des Atlantiks haben vermutlich zur Bildung des Oberrheingrabens geführt (Reicherter et al. 2008). In den letzten 34 Millionen Jahren wurden an den Flanken des Oberrheingrabens der Schwarzwald und die Vogesen um insgesamt 2500 m herausgehoben (Meschede 2018).

In der Eifelregion werden für die beobachteten Hebungsraten verschiedene Ursachen diskutiert: thermische Mantelanomalien (Abweichende Wärmeverteilung im Erdmantel) (Ritter et al. 2001; Keyser et al. 2002) oder eine elastische Verbiegung der Erdkruste (Klein et al. 2016). Kreemer et al. (2020) ermitteln für die Jahre 2000 bis 2019 eine maximale Hebung von 1 mm pro Jahr in dieser Region. Klein et al. (2016) berichten für den

Zeitraum von 1983 bis 2007 durchschnittliche Hebungsraten von 0,75 bis 1,25 mm pro Jahr in der Eifel. Längerfristig gemittelte Hebungsraten über die letzten 800 000 Jahre ergeben jedoch geringere Hebungsraten von 0,06 – 0,38 mm pro Jahr (Meyer & Stets 2002). Diese längerfristig gemittelten Hebungsraten wurden durch den Höhenunterschied von bis zu 250 m der quartären Flussterrassen bestimmt. Die deutliche Abweichung zu den geodätisch bestimmten Hebungsraten verdeutlicht die Schwierigkeit, Hebungsraten, die über unterschiedlich lange Zeiträume gemittelt sind, richtig zu interpretieren. Denn obwohl geodätische Methoden sehr exakte Messwerte liefern, ist fraglich, ob diese innerhalb von vergleichsweise kurzen Zeiträumen erhobenen Werte geeignet sind, um geologische Prozesse zu beschreiben, die über Zeiträume von Millionen von Jahren ablaufen.

6.1.3 Prognosen zu großräumigen Vertikalbewegungen in Deutschland

In einer von der BGE in Auftrag gegebenen Studie beschreiben Jähne-Klingberg et al. (2019) Prognosemöglichkeiten von großräumigen Vertikalbewegungen für Deutschland. Dabei werden Ursachen von Vertikalbewegungen vorgestellt und in Hinblick auf ihre Relevanz und Wahrscheinlichkeit, Hebungsbeträge von 1000 m innerhalb der nächsten eine Million Jahre zu verursachen, diskutiert. Bei der Betrachtung von Prozessen, die zu Vertikalbewegungen in Deutschland führen können, beurteilen Jähne-Klingberg et al. (2019), ob Hebungsbeträge von 1000 m in einer Million Jahren im rezenten plattentektonischen Rahmen für Deutschland allein durch den jeweiligen Prozess vorstellbar sind. Bewertet wird dieses Kriterium in Form eines Ampelsystems in drei Kategorien (Tabelle 1).

Tabelle 1: Bewertungskategorien der Eintrittswahrscheinlichkeit von Hebungsbeträgen von 1000 m in einer Million Jahren im rezenten plattentektonischen Rahmen für Deutschland allein durch den jeweiligen Prozess (Jähne-Klingberg et al. 2019)

Farbgebung	Bewertung
Grün (I)	ja/ohne Einschränkungen im heutigen plattentektonischen Rahmen für Deutschland möglich
Gelb (II)	mit Einschränkungen/eher unwahrscheinlich/für Regionen nicht vollends auszuschließen
Rot (III)	unwahrscheinlich/aufgrund möglicher maximaler Prozessgeschwindigkeiten und anderer Einschränkungen

Außerdem wurden die Prozesse in Hinblick auf ihre Relevanz als Hebungsursache im Zeitraum vom Neogen bis heute in Deutschland beurteilt. Die Einteilungen sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: *Bewertungskategorien der Relevanz für die jeweilig untersuchten Prozesse als Hebungsursache im Zeitraum vom Neogen bis heute in Deutschland (Jähne-Klingberg et al. 2019)*

Farbgebung	Bewertung
Grün (I)	ja/Relevanz
Gelb (II)	theoretisches Konzept konkurrierend zu Anderen/für einzelne Regionen nicht ausschließbar
Rot (III)	keine Relevanz/nicht plausibel für Deutschland

Nach Jähne-Klingberg et al. (2019) können die Prognosen für Deutschland wie folgt zusammengefasst werden: Der Salzaufstieg in Salzdiapiren ist in Deutschland ein relevanter Hebungsprozess, wird aber in Hinblick auf das Potential, Hebungsbeträge von 1000 m in einer Million Jahren im rezenten plattentektonischen Rahmen zu erreichen, als „mit Einschränkungen/eher unwahrscheinlich/für Regionen nicht vollends auszuschließen“ eingestuft. Überschiebungen, Aufschiebungen, Transpressionen und tektonische Verkürzungen haben in Deutschland vom Neogen bis heute stattgefunden. Die Aussicht, dass diese Prozesse Hebungsbeträge von 1000 m innerhalb der nächsten eine Million Jahre in Deutschland verursachen, wird jedoch als eher unwahrscheinliches Szenario betrachtet (Kategorien II – III). Es ist ebenfalls unwahrscheinlich (Kategorie III), dass Faltung der Lithosphäre in Deutschland 1000 m Hebung in den nächsten eine Million Jahren erzeugen wird, auch wenn dieser Prozess für die Hebungsgeschichte seit dem Neogen durchaus eine Rolle gespielt hat. Auch Denudation, Erosion und glaziale Isostasie sind seit dem Neogen relevante Hebungsursachen in Deutschland, wobei Denudation und Erosion vermutlich keine Hebung von 1000 m in einer Million Jahren hervorrufen werden (Kategorie II). Glaziale Isostasie wird, wie bereits oben beschrieben, keine 1000 m Hebung in einer Million Jahren herbeiführen (Kategorie III). Mantelplumes und dynamische Topographie sind wichtige Prozesse in Deutschland, die seit dem Neogen ablaufen. Es ist unwahrscheinlich (Kategorie III), dass dynamische Topographie 1000 m Hebung in Deutschland innerhalb der nächsten eine Million Jahre erzeugt. Für Mantelplumes wird dieses Szenario jedoch nicht ausgeschlossen (Kategorie II).

Jähne-Klingberg et al. (2019) schlussfolgern, dass Hebungsraten von im Mittel mehr als 1 mm pro Jahr über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahren in Deutschland unwahrscheinlich sind. Begründet wird diese Einschätzung unter anderem mit der intrakontinentalen Lage Deutschlands und der geringen Wahrscheinlichkeit, dass sich das grundlegende geodynamische Umfeld innerhalb des Nachweiszeitraumes deutlich verändern wird. Eine Exhumation von 1000 m innerhalb der nächsten eine Million Jahre ist jedoch, z. B. in Teilen der Alpen, ein vorstellbares Szenario (Jähne-Klingberg et al. 2019).

Im Rahmen des Forschungsprojektes AnSichT wurden von Mrugalla (2014) und Stark (2014) eine Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager im Tongestein in

Deutschland erarbeitet. Dafür wurden Langzeitprognosen als Informationsgrundlage für die Beschreibung der geologischen Prozesse in der Szenarientwicklung für zwei generische Standortmodelle in Nord- und Süddeutschland ermittelt. Die Prognosen beurteilen die Geosphäre ohne den Einfluss eines Endlagers für einen Zeitraum von einer Million Jahren (Mrugalla 2014; Stark 2014).

Für die Untersuchungen in Norddeutschland wendet Mrugalla (2014) für die Prognosen das Aktualitätsprinzip an, bei dem zukünftige Bewegungen der Erdoberfläche aus vergangenen Bewegungen abgeleitet werden und schlussfolgert, dass Hebungen im Harz und nordwestlich des Harzes stattfinden könnten. Aussagen über zukünftige Raten können aufgrund der Datenlage nicht getroffen werden. In den nächsten eine Million Jahren wird es in Norddeutschland wiederholt zu Eiszeiten kommen. In allen Regionen, in denen Inlandsgletscher entstehen werden, wird es isostatische Ausgleichsbewegungen geben. Für die vorletzte Eiszeit (Saale) kann nicht mehr festgestellt werden, in welcher Größenordnung diese Ausgleichsbewegungen stattgefunden haben. Deshalb stellt Mrugalla (2014) fest, dass isostatische Ausgleichsbewegungen durch Eiszeiten nur einen geringen Anteil an den zukünftigen Vertikalbewegungen im Vergleich zu anderen Prozessen im geologischen Gesamtsystem haben werden (Mrugalla 2014).

Für die Prognose Süddeutschlands wird durch Stark (2014) die Entwicklung der Alpen und des Oberrheingrabens berücksichtigt. Die Angabe von exakten zukünftigen Raten ist nicht möglich. Es wird angenommen, dass sich die übergeordneten geodynamischen Mechanismen nicht verändern werden, sondern sich der allgemeine Bewegungstrend fortführen wird und sich in den nächsten eine Million Jahren großräumige Hebungsraten von unter 0,1 mm pro Jahr in Süddeutschland einstellen werden (Stark 2014).

Dieses Ergebnis stimmt mit den Erkenntnissen aus Studien für das Gebiet der Nordschweiz überein. Diese zeigen ebenfalls, dass Hebungsraten von mindestens 1 mm pro Jahr für die nächsten eine Million Jahre nicht zu erwarten sind und im Bereich von 0,1 mm pro Jahr liegen werden (Müller et al. 2002; Nagra 2002).

6.2 Datenabfragen und Datengrundlage

Am 2. August 2017 hat die BGE mit der ersten Datenabfrage zu den Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG bei den Geologischen Diensten der Bundesländer und bei den Bundesbehörden Daten zu großräumigen Hebungsraten sowie Prognosen für die folgenden eine Million Jahre abgefragt.

Im Rahmen der zweiten Datenabfrage im Februar 2018 konkretisierte die BGE ihre Abfrage und bat um Angaben zu Gebieten, in denen innerhalb der nächsten eine Million Jahre großräumige Hebungsraten zu erwarten sind und die zu erwartenden Hebungszeiträume. Es sollten außerdem Aussagen zu Flächenbezeichnungen und der Ursachen/Genesen der Hebung samt Angabe der dazugehörigen Literatur getroffen werden. Auch sollten vorliegende Informationen zu Gebieten, in denen keine Hebungen zu erwarten sind und in denen keine Prognosen getroffen werden können, übermittelt werden.

Die Informationslage zu großräumigen Vertikalbewegungen ist bei den Landes- und Bundesbehörden divers, meist wurden Hinweise auf Publikationen und digitalisierte Daten aus Publikationen zur Verfügung gestellt. Häufig wurde auf den Bodenbewegungsdienst verwiesen (Kalia et al. 2017). In einem Fall wurden der BGE Geschwindigkeitsänderungen aus Satelliten-Aufnahmen (ERS1/2) zur Verfügung gestellt. Das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) übermittelte der BGE auf Anfrage einen Bericht über aus Präzisionsnivelementmessungen abgeleitete Vertikalbewegungen in Deutschland während der letzten 60 Jahre mit den dazugehörigen Daten. Daten zu Prognosen von großräumigen Vertikalbewegungen liegen der BGE in Form der Studie „Prognosemöglichkeiten von großräumigen Vertikalbewegungen für Deutschland“ (Jähne-Klingberg et al. 2019) vor. Eine Übersicht über die eingegangenen Datentypen der Landes- und Bundesbehörden ist in Tabelle 3 zu sehen.

Tabelle 3: Übersichtstabelle über die von den Landes- und Bundesbehörden gelieferten Datentypen für das Ausschlusskriterium „großräumige Vertikalbewegungen“

Behörde	Datentyp
Landesbehörden	<ul style="list-style-type: none"> • Fachliteratur • GIS-Daten lokaler bergbaubedingter Bodenbewegungen • GIS-Daten rezenter Bodenbewegungen mit Fokus auf anthropogene Ursachen • Nivellement- und Satellitendaten
Bundesbehörden (BGR, BKG)	<ul style="list-style-type: none"> • Hebungsdaten der Tonstudie (Hoth et al. 2007) basierend auf Frischbutter & Schwab (2001) • Auszüge aus Studien • Höhenänderungen aus Nivellementdaten

6.3 Anwendungsmethode

Alle Gebiete, in denen eine Hebung der Erdoberfläche von mehr als 1000 m innerhalb der nächsten eine Million Jahre wahrscheinlich ist, werden zur Ermittlung ausgeschlossener Gebiete ausgewählt. Ein Ausschluss erfolgt für alle endlagerrelevante Tiefen (300 -1500 m unter GOK).

6.4 Ergebnisse

Die Studie „Prognosemöglichkeiten von großräumigen Vertikalbewegungen für Deutschland“ (Jähne-Klingberg et al. 2019) gibt den aktuellen Stand der Wissenschaft in Bezug auf die Prognose von großräumigen Vertikalbewegungen in Deutschland innerhalb der nächsten eine Million Jahre wieder und bildet die Grundlage für die Anwendung des

Ausschlusskriteriums. Die BGE schließt sich der Einschätzung von Jähne-Klingberg et al. (2019) an und kommt zu dem Ergebnis, dass auf Basis des aktuellen Prozessverständnisses in Deutschland innerhalb des Nachweiszeitraums von einer Million Jahren wahrscheinlich keine Hebungsbeiträge von 1000 m erreicht werden. Es werden daher auf Basis des Ausschlusskriteriums „großräumige Vertikalbewegungen“ keine Gebiete ausgeschlossen.

7 Aktive Störungszonen – tektonische Störungszonen

7.1 Einführung

„(2) Die Ausschlusskriterien sind:

[...]

2. aktive Störungszonen

in den Gebirgsbereichen, die als Endlagerbereich in Betracht kommen, einschließlich eines abdeckenden Sicherheitsabstands, sind geologisch aktive Störungszonen vorhanden, die das Endlagersystem und seine Barrieren beeinträchtigen können;

Unter einer „aktiven Störungzone“ werden Brüche in den Gesteinsschichten der oberen Erdkruste wie Verwerfungen mit deutlichem Gesteinsversatz sowie ausgedehnte Zerrüttungszonen mit tektonischer Entstehung, an denen nachweislich oder mit großer Wahrscheinlichkeit im Zeitraum Rupel bis heute, also innerhalb der letzten 34 Millionen Jahre, Bewegungen stattgefunden haben. Atektonische beziehungsweise aseismische Vorgänge, also Vorgänge, die nicht aus tektonischen Abläufen abgeleitet werden können oder nicht auf seismische Aktivitäten zurückzuführen sind und die zu ähnlichen Konsequenzen für die Sicherheit eines Endlagers wie tektonische Störungen führen können, sind wie diese zu behandeln.

[...]“

§ 22 Abs. 2 Nr. 2 StandAG

Gemäß § 22 Abs. 2 Nr. 2 StandAG ist ein Gebiet nicht als Endlagerstandort geeignet, wenn in den Gebirgsbereichen, die als Endlagerbereich in Betracht kommen, einschließlich eines abdeckenden Sicherheitsabstands, geologisch aktive Störungszonen vorhanden sind, die das Endlagersystem und seine Barrieren beeinträchtigen können.

Die im Gesetz genannten atektonischen Vorgänge werden aufgrund ihrer stark abweichenden Entstehungsprozesse in Kapitel 8 behandelt.

7.1.1 Fachliche Grundlagen

In der Geologie beschreibt der Begriff „Störung“ eine diskrete Fläche oder Zone, an der die ursprüngliche Lagerung des Gesteinskörpers durchtrennt wird und Gesteinskörper relativ zueinander versetzt werden (Fossen 2011). Das Auftreten von Störungen ist als mechanische Reaktion auf das vorherrschende Spannungsregime innerhalb der Lithosphäre zu verstehen. Die Spannungen in der Lithosphäre sind auf tektonische Kräfte wie Extension (Zugkraft), Kompression (Druckkraft) und Scherung zurückzuführen und werden durch die Bewegung entlang von Störungen abgebaut. Dies kann entweder seismisch (spontan) oder aseismisch als kontinuierliche Kriechbewegung erfolgen (Fossen 2011). Je nach Orientierung der Hauptspannungsrichtung entstehen entweder Aufschiebungen, Abschiebungen oder Seitenverschiebungen (vgl. auch Abbildung 4) (Anderson 1951).

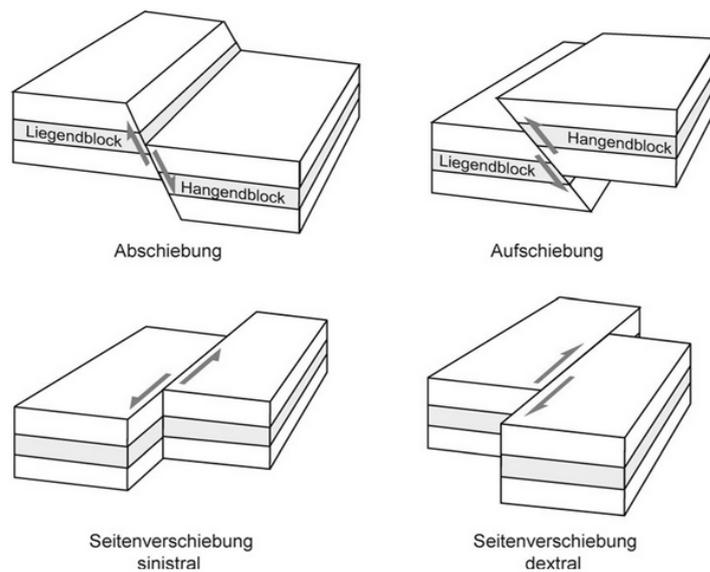


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Hauptverwerfungsarten (Reuther 2012)

Die räumliche Dimension von Störungen erstreckt sich über viele Maßstäbe und reicht vom Mikroskalenbereich, z. B. einem Versatz zwischen Kristallkörnern, bis hin zu Störungszonen, deren Versatz viele Kilometer betragen kann. Allgemein gilt, dass die Länge einer Störung mit deren Versatzbetrag positiv korreliert (Kim & Sanderson 2005; Torabi & Berg 2011). Zudem bilden Störungen bei größeren Versatzbeträgen subparallel angeordnete Klüfte und Sekundärstörungen aus, die als Zerrüttungszone bezeichnet werden und sich beidseitig der Störungsfläche befinden (Faulkner et al. 2010; Fossen 2011; Choi et al. 2016). In diesem Fall wird der Störungskern samt der Zerrüttungszone als Störungzone bezeichnet (Abbildung 5).

In der geologischen Fachliteratur findet keine deutliche Abgrenzung bei der Verwendung zwischen den Begriffen Störungzone und Störung statt. Ein Unterschied besteht jedoch darin, dass Störungszonen immer mit der Ausbildung von Zerrüttungszone um den Störungskern einhergehen. Dies setzt einen Mindestbetrag an Bewegung entlang der Störungzone voraus und deutet so auf den regionalen bzw. überregionalen Charakter einer Störungzone im Vergleich zu dem eher lokalen Charakter einer Störung hin. In diesem Sinne ist auch die Formulierung in § 22 Abs. 2 Nr. 2 StandAG zu verstehen. Demnach geht es bei der Anwendung des Ausschlusskriteriums „aktive Störungszonen – tektonische Störungszonen“ um tektonisch bedingte Verwerfungen mit deutlichem Gesteinsversatz sowie ausgedehnte Zerrüttungszone.

So wie die Länge einer Störungzone mit deren Versatzbetrag korreliert, nimmt auch die Breite der Zerrüttungszone mit dem Versatzbetrag zu, überschreitet aber selten Maximalbeträge von 100 m bis 200 m (Childs et al. 2009; Faulkner et al. 2010; Torabi et al. 2020). Die Bewegung einer Störungzone erfolgt hauptsächlich entlang des Störungskerns, welcher aus zerkleinertem Umgebungsgestein und Tonmineralen, Störungsbrekzien, Kataklasiten (durch bruchhafte Deformation und dynamische Rekristallisation entstandenes Gestein) oder einer Kombination dieser Komponenten bestehen kann (Vrolijk & van der Pluijm 1999; Crawford et al. 2008). Daher übt der

Störungskern gegenüber der Bewegung von Fluiden eher eine Barrierewirkung aus, wohingegen die Zerrüttungszone häufig eine höhere Gebirgsdurchlässigkeit als das ungestörte Umgebungsgestein besitzt (Faulkner et al. 2010). Die Ausprägung einer Störungszone in Hinblick auf ihre Orientierung, Permeabilität oder Breite der Zerrüttungszone wird neben dem Versatzbetrag und der Versatzrate auch von den Eigenschaften des Umgebungsgesteins bestimmt (Faulkner et al. 2010). Entlang einer einzelnen Störungszone können diese Faktoren räumlich sehr variabel ausgeprägt sein. Dies begründet sich zum einen darin, dass der Versatzbetrag im zentralen Teil einer Störung am höchsten ist und zum anderen, dass eine Störungszone in der Regel mehrere Gesteinseinheiten mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften durchstößt (Fossen 2011).

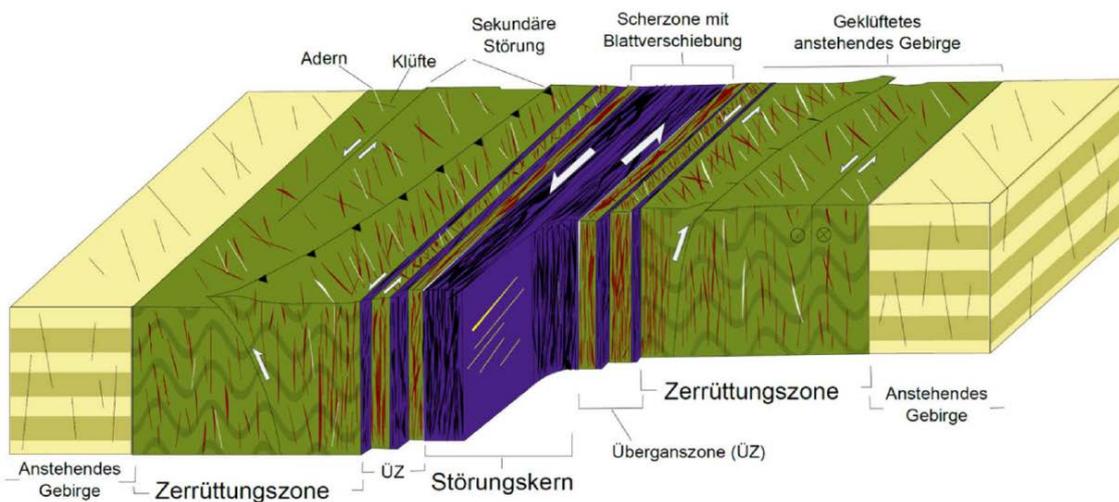


Abbildung 5: Schematischer Aufbau einer Störungszone, bestehend aus dem Störungskern und der umgebenden Zerrüttungszone (Agemar et al. 2017; Choi et al. 2016)

Das mechanische Verhalten von Steinsalz stellt in Bezug auf dessen Verformungsverhalten aus strukturenologischer Sicht einen Spezialfall dar. Denn aufgrund seiner Fließfähigkeit führen selbst hohe Spannungsbelastungen in Steinsalz, auch in geringen Tiefenlagen, in der Regel nicht zu spröder Deformation (Bruchbildung), sondern werden durch duktile Verformung des Salzes kompensiert (Stück et al. 2020). So setzen sich Störungszone im angrenzenden Festgestein in der Regel nicht innerhalb einer Salzstruktur (Salzdiapir oder Salzwall) fort. Dies betrifft zum einen Störungen, die sich im Deckgebirge einer Salzstruktur durch dessen Wachstumsdynamik bilden (Scheitelstörungen). Zum anderen führt das plastische Verhalten von Salz in flacher Lagerung häufig zu einer mechanischen Entkopplung zwischen über- und unterlagernden Gesteinseinheiten (Grund- und Deckgebirge), wodurch eine direkte Korrelation zwischen Störungen im Hangenden und Liegenden eines Salinarhorizontes erschwert wird (Brückner-Röhling et al. 2002).

7.1.2 Tektonische Entwicklung Deutschlands im Känozoikum

Um die jüngere tektonische Entwicklung der letzten 34 Millionen Jahre in Deutschland nachvollziehen zu können, umfasst dieses Kapitel auch den älteren Abschnitt des Känozoikums der letzten 65 Millionen Jahre, da sich innerhalb dieses Zeitraums die aktuellen plattentektonischen Rahmenbedingungen einstellten. Die regionalgeologischen Auswirkungen dieser übergeordneten plattentektonischen Prozesse werden in den Kapiteln 7.4.3.1 bis 7.4.3.8 im Detail beschrieben.

Aufgrund der intrakontinentalen Lage ist die tektonische Entwicklung Deutschlands während des Känozoikum zum großen Teil auf die Fernwirkung plattentektonischer Prozesse zurückzuführen, die in großer Entfernung zu Deutschland entlang von Plattengrenzen stattfinden. Im Känozoikum beeinflussen vor allem die Öffnung des Nordatlantiks seit dem späten Paläozän und die Kollision des europäischen mit dem afrikanischen Kontinent seit dem Eozän die tektonischen Verhältnisse in Deutschland (Holbrook et al. 2001; Rosenbaum et al. 2002). Das aus diesen Prozessen resultierende Spannungsfeld wirkt sich großräumig aus, wird aber regional auch von kleinräumigeren Prozessen, wie der Beeinflussung von Manteldiapiren (z. B. Eifelvulkanismus) und den quartären Vereisungsphasen, beeinflusst (Reicherter et al. 2008). In der Regel finden die daraus resultierenden Bewegungen an bereits existierenden Störungszonen statt, die in älteren Gebirgsbildungsphasen angelegt wurden (Schumacher 2002).

Während des Känozoikum ist die tektonische Entwicklung in Deutschland von zwei Phasen erhöhter tektonischer Aktivität geprägt, die mit der Änderung der Hauptspannungsrichtung von Nord–Süd nach Nordwest–Südost zusammenhängen. Die erste Phase fand während des späten Eozän und frühen Miozän statt. In diesem Zeitraum entstand das Europäische Känozoische Riftsystem (Rhone Graben, Oberrheingraben, Niederrheinische Bucht) durch Ost-West gerichtete Dehnung sowie die Absenkung des Molassebeckens in Folge der Nordwärtsbewegung der alpinen Deformationsfront (Dèzes et al. 2004; Reinecker et al. 2010). Die zweite Phase beginnt im späten Miozän mit dem Einsetzen der rezenten Nordwest–Südost gerichteten Hauptspannungsrichtung. Dadurch wird an den Nordwest–Südost verlaufenden Störungszonen der Niederrheinischen Bucht die Hauptabsenkungsphase initiiert (Knufinke & Kothen 1997).

7.2 Datenabfragen

Mit der ersten Datenabfrage zu den Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG von August 2017, die durch eine zweite Datenabfrage im Februar 2018 konkretisiert wurde, hat die BGE bei den Bundes- und Landesbehörden Daten zu aktiven Störungszonen abgefragt. Dabei wurden Störungszonen abgefragt, die in den letzten 34 Millionen Jahren, seit dem Rupel, aktiv waren oder sind. Neben den Koordinaten der tektonischen Störungszonen hat die BGE Angaben zum Aktivitätszeitraum der Störungszonen, zur Geometrie der Störungsflächen (Streichen, Einfallen, Tiefe), zu den Versatzbeträgen sowie den Namen der Störungszonen bei den Bundes- und Landesbehörden erbeten. Des Weiteren waren Informationen zu aktiven Störungszonen auch in einigen Daten

enthalten, die der BGE im Rahmen der Abfragen zu den Mindestanforderungen und den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien zugegangen sind.

Der Großteil der erhaltenen Datensätze sind digitale geologische und tektonische Karten. Diese beinhalten Informationen zu Störungszonen, die in Form von Störungsspuren den Verlauf von Störungszonen an der Erdoberfläche nachzeichnen. Informationen zur Raumlage der Störungszonen sind in der Regel nicht vorhanden. Die von den Bundes- und Landesbehörden bereitgestellten geologischen Karten liegen in unterschiedlichen Maßstäben vor. Diese reichen von geologischen Übersichtskarten der Maßstäbe 1 : 2 000 000, 1 : 500 000, 1 : 300 000, 1 : 200 000, 1 : 150 000 sowie 1 : 100 000 bis hin zu detaillierten geologischen Karten im Maßstab 1 : 25 000. Weitere Störungsspuren stammen aus Kartenwerken, die den Bau des Untergrundes beschreiben. Dazu gehören Niveauschnittkarten, die die geologischen Verhältnisse in unterschiedlichen Tiefenniveaus beschreiben, sowie Verbreitungskarten geologischer Horizonte im Untergrund. Zudem stammen einige der Datensätze zu aktiven Störungszonen aus wissenschaftlichen Studien und Dissertationen. Weitere Daten zu Störungszonen gehen auf Projektberichte zurück, die unterschiedliche Fragestellungen bezüglich der wirtschaftlichen Nutzung des tieferen Untergrundes untersuchen (zum Beispiel für Geothermie oder CO₂-Speicherung).

Zum 01. Juni 2020 lagen der BGE 93 Datensätze in Form von Shape-Dateien mit Informationen zu Störungszonen vor. Insgesamt beinhalten diese Daten ca. 600 000 Störungszonen bzw. Störungszonensegmente. Diese hohe Zahl wird unter anderem durch eine datensatzabhängige Segmentierung der Störungsspuren hervorgerufen, sodass die Anzahl der im Kartenbild abgebildeten Störungsspuren geringer ist. Zudem liegen aufgrund der Vielzahl an Datensätzen Störungsspuren teilweise doppelt vor.

7.3 Datengrundlage und Datenaufbereitung

In einem ersten Schritt wurden die Inhalte der erhaltenen Datensätze gesichtet und bewertet, ob die Störungszonen zusätzlich zum Verlauf weitere Informationen mitführen, die eine zeitliche Eingrenzung ihrer Aktivität zulassen. Neben der Aktualität von Datensätzen war dies das wesentliche Kriterium zur Auswahl geeigneter Daten in Bundesländern, wo der BGE mehrere Datensätze mit teilweise redundantem Informationsgehalt vorlagen.

Aus der in Kapitel 7.1.1 beschriebenen Unterscheidung zwischen den Begriffen Störung und Störungszonen folgt, dass mit der Verwendung des Begriffs „Störungszone“ sowie dessen Charakterisierung mit „deutlichem Gesteinsversatz“ in § 22 Abs. 2 Nr. 2 StandAG eine gewisse Größenvorstellung verbunden ist. Dabei ist aus geowissenschaftlicher Sicht zu beachten, dass eine Mindestgröße bzw. ein Mindestversatz, ab dem eine Verwerfung als Störungszone angesprochen wird, in der wissenschaftlichen Fachliteratur nicht exakt definiert ist. Allerdings muss der Versatzbetrag ausreichend groß sein, um zur Ausbildung einer Zerrüttungszone geführt zu haben. Da der Versatzbetrag positiv mit der Länge einer Verwerfung korreliert, folgt für die BGE aus diesem Zusammenhang, dass als Datengrundlage für dieses Ausschlusskriterium bevorzugt kleinmaßstäbliche

Karten und Datensätze verwendet werden, die eher einen regionalen oder bundeslandweiten Maßstab abdecken, gegenüber lokal begrenzten großmaßstäblichen Datensätzen (Tabelle 4). Dennoch folgt schon allein aus dem Umstand der unscharfen geowissenschaftlichen Abgrenzung der Begriffe „Störung“ und „Störungszone“, dass auch kleinmaßstäbliche geologische Karten nicht ausschließlich Verwerfungen vom Rang einer geologischen Störungszone enthalten, sondern auch geologische Störungen.

Innerhalb der in Kapitel 7.4.3 beschriebenen tektonisch aktiven Großstrukturen ist eine besonders hohe Dichte von aktiven Störungszone zu erwarten. Daher hat die BGE in diesen Gebieten bevorzugt Störungszone mit Informationen zur Raumlage verwendet und die im Rahmen der Datenabfragen zu den Ausschlusskriterien eingegangenen Informationen mit Daten aus Abfragen zu den Mindestanforderungen ergänzt. Verwendung fanden hier sowohl Daten aus geologischen Landesmodellen als auch 3D-Modelle aus wissenschaftlichen Projekten. Dies ermöglicht auch die Erfassung von Störungszone, die nicht an der Oberfläche aufgeschlossen sind, da gerade in junger, bisweilen rezenter tektonischer Aktivität in Grabensystemen wie dem Oberrheingraben, Störungszone in oberflächennahen Bereichen durch quartäre Sedimente überdeckt sind. Diese Störungszone sind daher häufig nicht in geologischen Karten verzeichnet. Weiterhin wurde bei tektonisch aktiven Großstrukturen, für deren Untergrund kein 3D-Modell vorliegt, geologische Karten (z. B. in Baden-Württemberg) verwendet.

Die Einzeldatensätze wurden hinsichtlich ihrer Attribute in eine homogene Datenstruktur überführt und in einem GIS-Projekt zur Auswertung bereitgestellt. Die Auswahl an Datensätzen, die zur Ausweisung aktiver Störungszone verwendet wurden, ist in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Datensätze, die für die Ausweisung aktiver Störungszone verwendet wurden

Bundesland	Datengrundlage
Baden-Württemberg	Störungsspuren: Geologische Landeskarte 1 : 50 000, Geologische Übersichtskarte 1 : 250 000; Störungsflächen: 3D-Modelle aus den Projekten „GeoMol“ und „GeORG“
Bayern	Störungsspuren: Geologische Übersichtskarte 1 : 250 000; Störungsflächen: 3D-Modelle aus dem Projekt „GeoMol“
Berlin	Keine aktiven Störungszone
Brandenburg	Störungsspuren: Ellenberg (1988), Stackebrandt & Beer (2010); Störungsflächen: Forschungsprojekt „Aktive Störungen Sachsen“
Bremen	Störungsspuren: Brückner-Röhling et al. (2002); Gast et al. (2012)

Bundesland	Datengrundlage
Hamburg	Störungsspuren: Brückner-Röhling et al. (2002); Gast et al. (2012)
Hessen	Störungsspuren: Geologische Übersichtskarte 1 : 250 000; Hessen: Geologische Übersichtskarte 1 : 300 000 (GÜK300); Störungsflächen: 3D-Modell aus dem Projekt „Hessen 3D“
Mecklenburg-Vorpommern	Störungsspuren: Quartärbasiskarte MV; Ellenberg (1988); Brückner-Röhling et al. (2002); Gast et al. (2012); von Goerne et al. (2016)
Niedersachsen	Störungsspuren: Geologische Übersichtskarte 1 : 200 000; Ellenberg (1988); Brückner-Röhling et al. (2002); Gast et al. (2012); von Goerne et al. (2016)
Nordrhein-Westfalen	Störungsspuren: Geologische Übersichtskarte 1 : 200 000; Geologische Übersichtskarte NRW 1 : 500 000; Geologische Übersichtskarte 1 : 250 000; Störungszonen Niederrheinische Bucht; Störungsflächen: Geologisches 3D-Landesmodell
Rheinland-Pfalz	Störungsspuren: Geologische Übersichtskarte 1 : 250 000; Störungsflächen: 3D-Modell des Projektes „GeORG“
Saarland	Störungsspuren: Geologische Übersichtskarte 1 : 250 000
Sachsen	Störungsspuren: Ellenberg (1988); Geologische Übersichtskarte 1 : 250 000; Forschungsprojekt „Aktive Störungszonen Sachsen“; Störungsflächen: Forschungsprojekt „Aktive Störungszonen Sachsen“
Sachsen-Anhalt	Störungsspuren: Ellenberg (1988); Brückner-Röhling et al. (2002); Aktive Störungen Sachsen-Anhalt; Geologische Übersichtskarte 1 : 250 000
Schleswig-Holstein	Störungsspuren: Brückner-Röhling et al. (2002); Gast et al. (2012); von Goerne et al. (2016); 3D-Modell GTA-3D
Thüringen	Störungsspuren: Ellenberg (1988); Geologische Übersichtskarte Thüringen 1 : 200 000; Geologische Übersichtskarte 1 : 250 000; Störungsflächen: Forschungsprojekt Aktive Störungen Sachsen.

7.4 Ausweisung aktiver Störungszonen

Die BGE konnte Vorschläge zur Aktivität von Störungsspuren innerhalb der letzten 34 Millionen Jahre bei ca. 1,6 % der Störungsspuren entweder aus dem Datensatz selbst ableiten oder erhielt dazu Hinweise aus den jeweiligen Begleitschreiben der Bundes- und Landesbehörden. Informationen zum Aktivitätszeitraum von Störungszonen gehen aus einem Großteil der an die BGE übermittelten Datensätze nicht hervor, da derartige Angaben den geologischen Diensten der Länder und des Bundes häufig nicht vorliegen.

Daher hat die BGE eine Bewertung von Störungszonen hinsichtlich ihrer Aktivität im Sinne des § 22 Abs. 2 Nr. 2 StandAG vorgenommen. Dazu wurden drei Ansätze verfolgt, die in den folgenden Kapiteln näher beschrieben werden:

- 1) Bewertung der Vorschläge der Bundes- und Landesbehörden zur Aktivitätseinschätzung von Störungszonen,
- 2) Identifizierung von Störungszonen, die Gesteinseinheiten mit einem Maximalalter von 34 Millionen Jahren versetzen und
- 3) Abgrenzung von tektonisch aktiven Großstrukturen.

Bei Datensätzen, die sich auf ein Bundesland beschränken, wurde auf mögliche Inkonsistenzen an den Bundeslandgrenzen, sowohl hinsichtlich des Verlaufs als auch der Aktivitätszuweisung der Störungsspuren, geachtet. In seltenen Fällen enden aktive Störungszonen an einer Bundeslandgrenze. In diesem Fall wurde deren Aktivität auf die im benachbarten Bundesland weiterverlaufende Störungszone übertragen.

7.4.1 Bewertung der Vorschläge der Bundes- und Landesbehörden

Ein Teil der erhaltenen Datensätze beinhaltet Störungszonen, die seitens der Bundes- und Landesbehörden als aktiv eingeschätzt wurden. Diese sind von der BGE hinsichtlich ihrer fachlichen Plausibilität überprüft worden. Die Einschätzung der jeweiligen Bundes- und Landesbehörden wurde als plausibel bewertet, wenn die BGE mit der fachlichen Begründung der Aktivitätseinschätzung übereinstimmt oder durch Anwendung der in Kapitel 7.4.2 und Kapitel 7.4.3 beschriebenen Methoden zu demselben Ergebnis kommt. Die fachlichen Begründungen der Bundes- und Landesbehörden wurde mit dem Kenntnisstand aus der wissenschaftlichen Literatur abgeglichen und bewertet. Störungszonen, für die Hinweise zur Aktivität während der letzten 34 Millionen Jahre als nicht gesichert erschienen, wurden nicht zur Erstellung ausgeschlossener Gebiete genutzt.

7.4.2 Ausweisung von aktiven Störungen in geologischen Einheiten jünger 34 Millionen Jahre

Die Anwendung dieser Methode verfolgt das Ziel, aktive Störungszonen auf Basis einer bundesweit einheitlichen Datengrundlage zu identifizieren und damit die in Tabelle 4 aufgeführten eher regional oder bundeslandbezogenen Datensätze zu ergänzen. Als Da-

tengrundlage dient daher die Geologische Übersichtskarte Deutschlands im Maßstab 1 : 250 000 (GÜK250). Die Ausweisung aktiver Störungszonen erfolgt durch die Verschneidung von Störungsspuren mit geologischen Einheiten, die ein Alter von 34 Millionen Jahren oder jünger aufweisen.

Störungsspuren, die in der GÜK250 mit dem Attribut „vermutet“ gekennzeichnet sind, werden nicht für die automatisierte Verschneidungsoperation in ArcGIS verwendet. Damit wird vermieden, dass Störungszonen ausgewählt werden, die in prä-oligozänen Einheiten auftreten und stellenweise unter quartärer Sedimentbedeckung liegen (Abbildung 6). Eine zeitliche Einordnung dieser Störungszonen ist in diesem Fall nicht möglich, da keine Informationen über einen potenziellen Versatz der quartären Sedimente vorliegen.

Durch die Automatisierung der Verschneidungsoperation in ArcGIS ist es möglich, eine große Anzahl aktiver Störungszonen zu identifizieren. Jedoch erfordert jedes automatisierte Vorgehen eine gründliche Qualitätsprüfung, um geologisch nicht sinnvolle Verschneidungsergebnisse zu korrigieren. So wurden bei der Verschneidungsoperation durch die Segmentierung kontinuierlicher Störungsspuren nur die Segmente als aktiv identifiziert, die entweder durch post-eozäne geologische Einheiten verlaufen oder diese begrenzen (Abbildung 6). Durch diesen Prozess entstehen innerhalb einer durchgängigen Störungsspur sowohl als aktiv als auch als inaktiv bewertete Segmente. Um hier zu einem geowissenschaftlich sinnvollen Ergebnis zu gelangen, erfolgte eine manuelle Vervollständigung der Aktivitätsbewertung. Diese Vorgehensweise ist beispielhaft in Abbildung 6 dargestellt. Grundsätzlich wurden bei diesem interpretativen Ansatz nur solche Segmente als aktiv ausgewählt, bei denen eine strukturelle Zugehörigkeit zu den auf Basis der Verschneidung als aktiv bewerteten Segmenten als sicher erscheint.

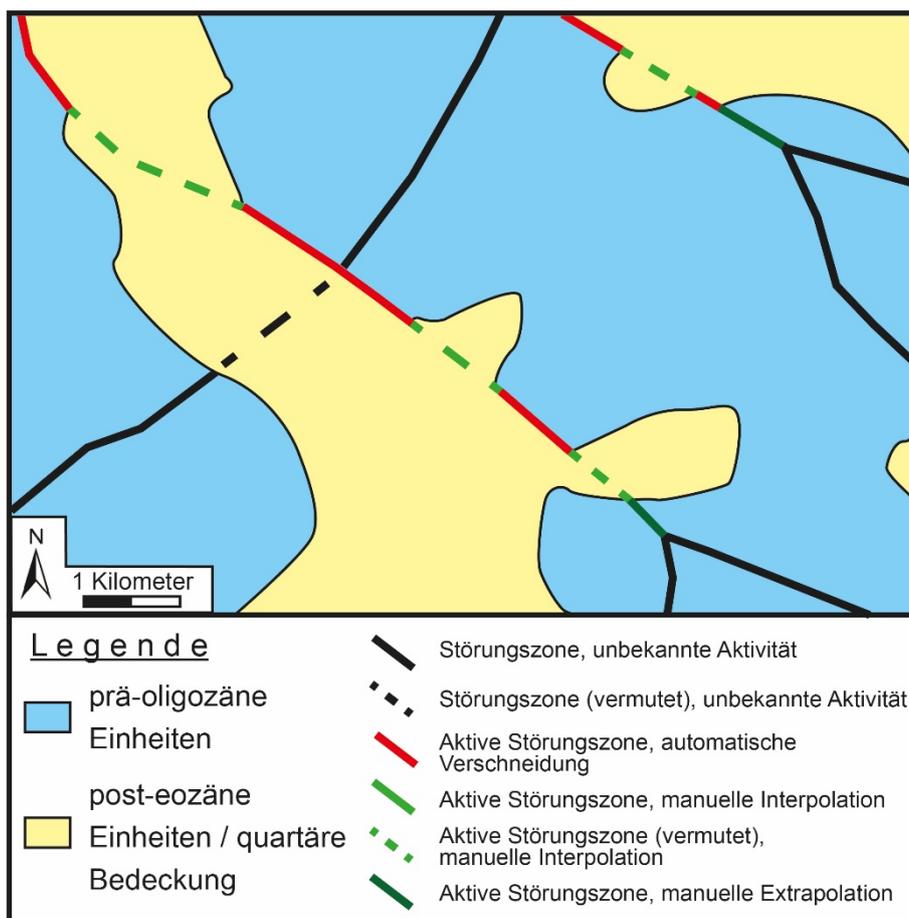


Abbildung 6: *Idealisierte geologische Karte, an der das Vorgehen der manuellen Ergänzung der Aktivitätszuweisung für Störungssegmente der post-Eozän-Verschneidung schematisch dargestellt ist. Gestrichelte Störungszone liegen unter quartärer Bedeckung. Schwarz gefärbte Spuren von Störungszone verlaufen innerhalb prä-oligozäner Einheiten (blaue Fläche), sodass die Aktivität nicht bestimmt werden kann. Rote Segmente wurden automatisch als aktive Störungszone erkannt, da sie post-eozäne Einheiten begrenzen (gelbe Fläche). Hellgrüne Segmente wurden nicht automatisch als aktive Störungszone erkannt, da sie sich unter quartärer Bedeckung befinden. Hier wurde die Aktivität durch manuelle Interpolation zwischen aktiven Segmente ausgewählt. Dunkelgrüne Segmente kennzeichnen manuell als aktiv ausgewählte Störungsspurensegmente, deren Aktivitätszuweisung bis zu Kreuzungspunkten mit anderen Störungszone fortgesetzt wurde.*

7.4.3 Ausweisung aktiver Störungszone in tektonisch aktiven Großstrukturen

Mit dem Begriff „tektonisch aktive Großstruktur“ werden tektonische Strukturen, wie z. B. geologische Grabensysteme in Deutschland, die nachweislich während der letzten 34 Millionen Jahre aktiv waren, beschrieben. Innerhalb dieser Strukturen ist daher in besonderem Maße mit dem Auftreten zahlreicher aktiver Störungszone zu rechnen. Die auf Basis der unten beschriebenen Abgrenzungsverfahren definierten tektonischen Großstrukturen sind nicht als ausgeschlossene Gebiete zu verstehen, sondern vielmehr

als Argumentationsgrundlage und Hilfsmittel zur Ausweisung aktiver Störungszonen in Deutschland.

Eine Kombination mehrerer Indikatoren wurde für die Ausweisung einer tektonisch aktiven Großstruktur herangezogen. So korreliert das Umfeld dieser Strukturen mit Erdbebenereignissen aus dem deutschen Erdbebenkatalog GERSEIS-INSPIRE (BGR 2018). Zudem weisen die Hauptstörungen innerhalb tektonisch aktiver Großstrukturen deutliche Versatzbeträge in der Größenordnung von mehreren Zehner Metern innerhalb der letzten 34 Millionen Jahre auf. Die geographische Ausdehnung dieser Strukturen wird auf Basis wissenschaftlicher Fachliteratur, insbesondere publizierten tektonischen Karten, definiert (Abbildung 7).

Wie in Kapitel 7.1.2 beschrieben, ist die jüngere tektonische Entwicklung Deutschlands vor allem durch die Gebirgsbildung der Alpen und die Entwicklung des Europäischen Känozoischen Riftsystems gekennzeichnet. Die sich daraus ergebenden tektonisch aktiven Großstrukturen werden im Folgenden kurz beschrieben.

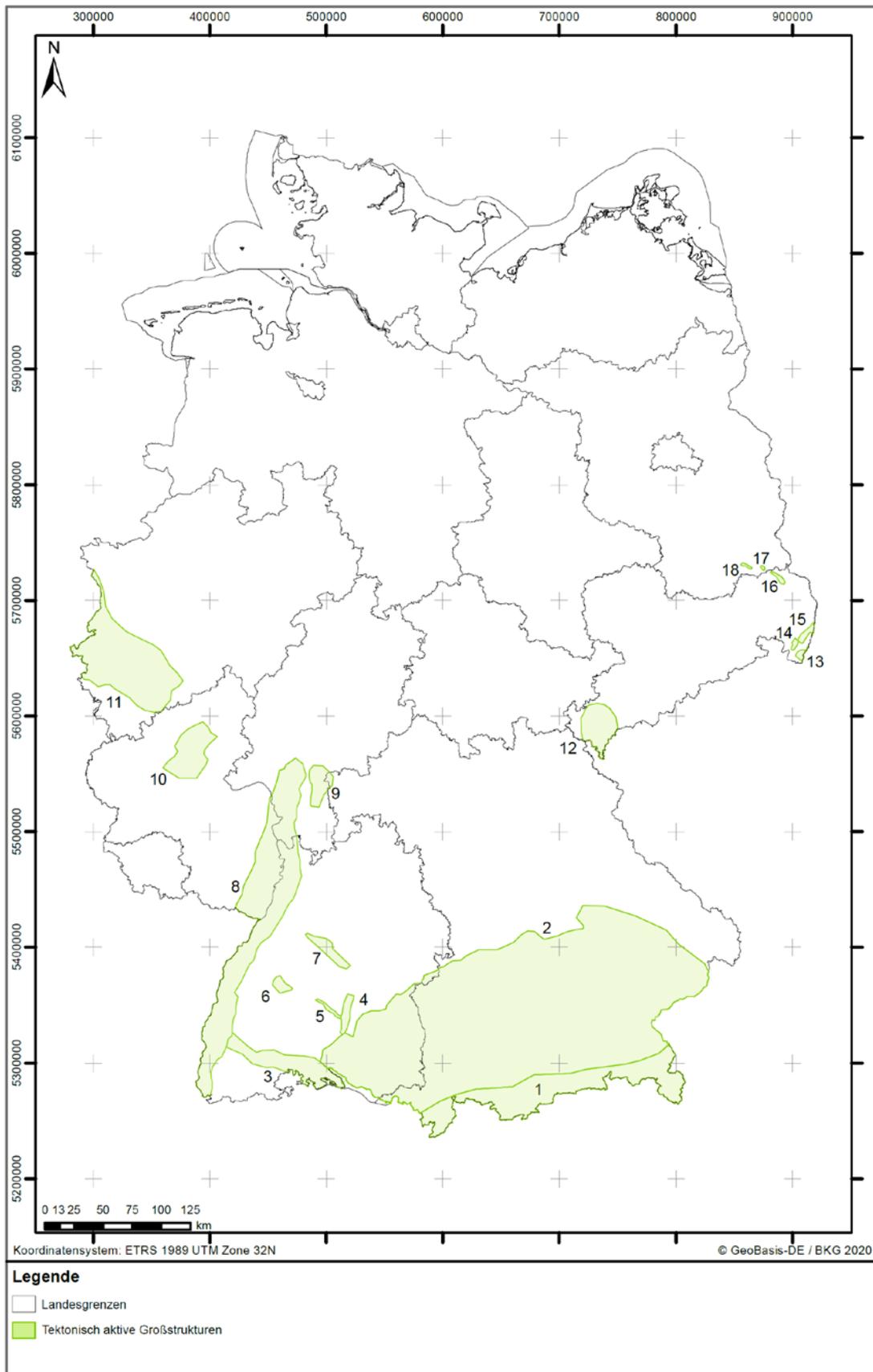


Abbildung 7: Von der BGE definierte Umrissse tektonisch aktiver Großstrukturen

1 = Bayrische Alpen; 2 = Molasse Becken; 3 = Freiburg-Bonndorf-Bodensee Scherzone; 4 = Lauchertgraben; 5 = Hohenzollerngraben; 6 = Freudenstadtgraben; 7 = Sindelfingengraben; 8 = Oberrheingraben; 9 = Hanauer Becken; 10 = Rheinisches Massiv und Neuwieder Becken; 11 = Niederrheinische Bucht; 12 = Vogtland; 13 = Zittau-Turow Becken; 14 = Odewitz Becken; 15 = Bernstadt-Berzdorf Becken; 16 = Nochten und Weißwasser Gräben; 17 = Spremberg Graben; 18 = Kauscher Graben.

7.4.3.1 Oberrheingraben und Hanauer Becken

In Deutschland setzt sich das Europäische Känozoische Riftsystem mit dem Oberrheingrabensystem mit dessen Randbecken Mainzer und Hanauer Becken sowie der Niederrheinischen Bucht fort (Abbildung 8).

Die Struktur des Nordnordost–Südsüdwest streichenden Oberrheingrabens wird im Süden von der Überschiebungsfrent des Schweizer Juras und im Norden von der Südrandstörung des Rheinischen Schiefergebirges begrenzt (Abbildung 8). Seitlich wird der Oberrheingraben von Staffelstörungen, die mit 55 ° bis 80 ° in Richtung des Grabenzentrums einfallen, begrenzt und von den herausgehobenen Grabenschultern getrennt (Brun et al. 1992). Der Verlauf des Grabens folgt dabei ererbten Strukturen, die schon während und nach der Variszischen Orogenese in Form von Nordnordwest streichenden Grabensystemen angelegt wurden (Ziegler et al. 2004). Die höchsten vertikalen Versatzbeträge entlang der östlichen Grabenrandstörungen treten mit maximal 5 km im nördlichen Teil (Raum Mannheim) des Oberrheingrabens auf, wohingegen im südlichen Teil des Oberrheingrabens die westliche Grabenrandstörung den höchsten Versatzbetrag aufweist (Reicherter et al. 2008). Der horizontale Dehnungsbetrag des Oberrheingrabens wird mit 7 km angegeben (Dèzes et al. 2004). Das Hanauer Becken ist ein Randbecken des Oberrheingrabens und besitzt mit den dominierenden Nord–Süd verlaufenden Grabenrandstörungen einen ähnlichen strukturellen Bau. Die Spessartrandverwerfung ist die östliche Grabenrandstörung mit einem maximalen Versatzbetrag von etwa 500 m und begrenzt das Hanauer Becken nach Osten zum Spessart (Lang 2007).

Die Bildung des Oberrheingrabens ist eine Reaktion auf die Alpenorogenese seit dem späten Eozän (Reicherter et al. 2008). Infolge des Nord–Süd gerichteten kompressiven Spannungsfeldes kam es zu Ost–West gerichteter Dehnung entlang des Oberrheingrabens (Dèzes et al. 2004). Die Hauptphase der Grabenbildung lässt sich auf das Oligozän eingrenzen (Schumacher 2002), in dem auch das Hanauer Becken entsteht (Lang 2007). Die Ost–West gerichtete Dehnung ändert sich ab dem frühen Miozän durch ein verändertes Spannungsfeld. Während im südlichen Teil des Oberrheingrabens großräumige Hebung, inklusive der Grabenschultern (Vogesen und Schwarzwald) durch Transpression einsetzt, herrscht im nördlichen Teil des Grabens weiterhin Subsidenz vor (Rotstein & Schaming 2011).

Die räumliche Abgrenzung der tektonisch aktiven Großstrukturen Oberrheingraben und Hanauer Becken erfolgt entlang der Hauptgrabenrandverwerfungen, die rezent aktiv

sind und die die quartären Beckensedimente deutlich von den gehobenen Grabenschul-tern trennen. Als Grundlage dienen die tektonischen Karten von Schwarz & Henk (2005), Peters & Van Balen (2007), Lang (2007) und Rotstein & Schaming (2011). Da die Störungs-zonen des Oberrheingrabens und des Hanauer Beckens von quartären Sedimen-ten überdeckt sind, stammen die verwendeten Störungs-zonen innerhalb der tektonisch aktiven Großstrukturen aus den 3D-Modellen der Projekte „GeORG“ und „Hessen 3D“. Die Störungs-zonen aus dem Projekt „GeORG“ decken dabei den baden-württembergi-schen und rheinland-pfälzischen Teil (von Süden bis in den Raum Neustadt) des Ober-rheingrabens ab, während im hessischen Teil des Oberrheingrabens und des Hanauer Beckens die Störungs-zonen aus dem Modell „Hessen 3D“ verwendet wurden (vgl. Ta-belle 4).

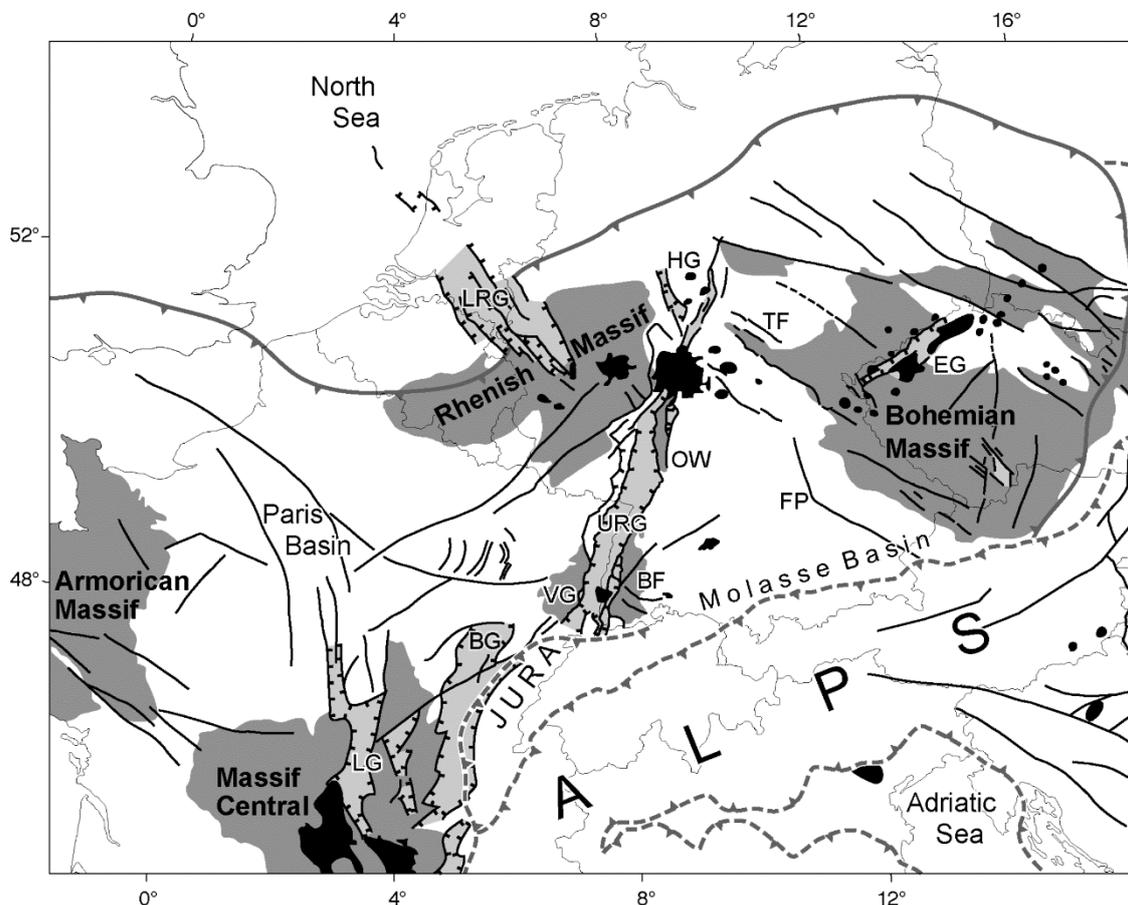


Abbildung 8: Die Grabensysteme des Europäischen Känozoischen Riftsystems (Ziegler et al. 2004).

Grabensysteme sind in hellgrau dargestellt. Die gestrichelte graue Linie zeigt den Verlauf der Deformationsfront der Alpen. Abkürzungen: BF = Schwarzwald; BG = Bresse Graben; EG = Eger Graben; FP = Fränkische Plattform; HG = Hessische Senke; LG = Limagne Graben; LRG = Niederrheinische Bucht; MC = Massif Central; OW = Odenwald; URG = Oberrheingraben; TF = Thüringer Wald; VG = Vogesen.

7.4.3.2 Niederrheinische Bucht

Wie im Oberrheingraben folgen die Hauptstrukturen der Niederrheinischen Bucht vorhandenen Störungssystemen, die bereits im späten Perm (vor etwa 250 Millionen Jahren) angelegt wurden. Im Gegensatz zum Oberrheingraben verlaufen die Störungen aber nicht in Nordnordost-Südsüdwest-Richtung, sondern in Nordwest-Südost-Richtung (Abbildung 8) (Zijerveld et al. 1992). Auch die Architektur unterscheidet sich vom Oberrheingraben. So besteht die Niederrheinische Bucht aus mehreren, entlang der Störungszonen nach Nordosten verkippten Blöcken, auf denen känozoische Sedimente in Form von Halbgräben abgelagert wurden (Abbildung 9) (Reicherter et al. 2008). In südlicher Richtung (im Übergang zum Rheinischen Schiefergebirge) verlieren die Störungszonen an Sprunghöhe, während in nördlicher Richtung die Strukturen der Niederrheinischen Bucht unter der deutsch-niederländischen Tiefebene abtauchen. Die höhere Lage des südlichen Teils der Niederrheinischen Bucht ist in der großräumigen Hebung der Eifel seit dem Pleistozän begründet (Meyer & Stets 2002).

Die jüngste tektonische Phase beginnt im späten Oligozän, auf die eine nochmals erhöhte Aktivität seit dem Quartär folgt (Houtgast & van Balen 2000; Schäfer et al. 2005). Der am tiefsten eingesunkene Teil der Niederrheinischen Bucht gehört zum etwa 130 km langen Rurtal Graben, wo im niederländischen Teil bis zu 2000 m känozoische Sedimente abgelagert wurden. Diese hohen Versatzbeträge erfolgten entlang der Grabenrandstörungen (Feldbiss- und Peelstörung) des Rurtal Grabens, deren Fortsetzung im deutschen Teil der Niederrheinischen Bucht die Erft- und Rurrandstörung darstellen. Auch wenn an allen der Niederrheinischen Bucht zugehörigen Störungszonen Bewegungen seit dem Oligozän nachgewiesen sind, stellen die Erft- und Rurrandstörung die aktivsten tektonischen Elemente des deutschen Teils der Niederrheinischen Bucht dar. Dort wurden die stärksten historischen Erdbeben mit Magnituden M_L kleiner als 6 anhand oberflächennaher Versätze im Holozän dokumentiert (Vanneste et al. 2001; Grützner et al. 2016; Van Balen et al. 2019).

Um die flächenmäßige Ausdehnung der tektonisch aktiven Großstruktur „Niederrheinische Bucht“ zu definieren, wurden die tektonischen Karten von Vanneste et al. (2013) und Kübler et al. (2016) verwendet. Als Datengrundlage zur Ausweisung aktiver Störungszonen innerhalb der tektonisch aktiven Großstruktur „Niederrheinische Bucht“ wurden die Störungsspuren des Datensatzes „Störungen_Niederrheinische_Bucht“ und die Störungsflächen des Geologischen 3D-Landesmodells von Nordrhein-Westfalen verwendet (Tabelle 4).

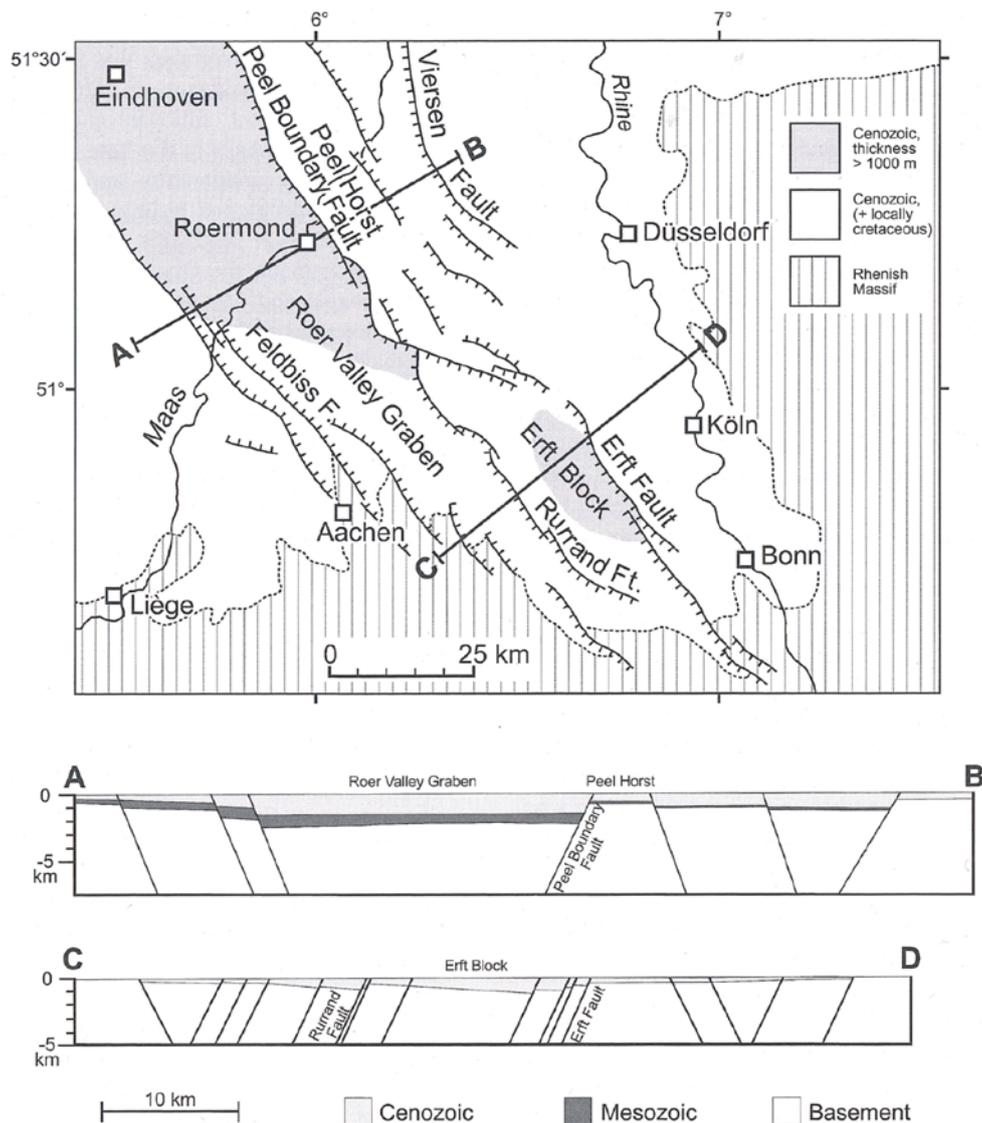


Abbildung 9: Tektonische Karte der Niederrheinischen Bucht (Reicherter et al. 2008).
 Die Profilschnitte verdeutlichen die in Richtung Nordwesten zunehmenden Absenkungsbeträge und die Zergliederung der Niederrheinischen Bucht in mehrere verkippte Schollen.

7.4.3.3 Rheinisches Massiv und Neuwieder Becken

Ausläufer der Nordwest–Südost verlaufenden Störungszonen der Niederrheinischen Bucht reichen bis in den nördlichen Teil des Rheinischen Massivs (Reicherter et al. 2008). Im Rheinischen Massiv führt ein komplexes Zusammenspiel aus magmatischen und tektonischen Prozessen seit dem Miozän zu einer Hebungsbewegung, die sich seit dem Pliozän noch einmal beschleunigt hat (Van Balen et al. 2002; Meyer & Stets 2002). Während die miozäne Hebungsbewegung auf tektonische Prozessen zurückgeht, korreliert die seit 0,7 Millionen Jahren andauernde Hebungsrates im zentralen Teil des Rheinischen Massivs zeitlich und räumlich mit dem Auftreten des Eifel-Plumes und dem damit hervorgerufenen Vulkanismus (van den Berg 1995; Ritter et al. 2001; Hensch et al.

2019). Die verschiedenen Höhenlagen der Flussterrassen (Jüngere Hauptterrasse) westlich des Neuwieder Beckens zeigen, dass die quartären Hebungsbewegungen auch entlang Südwest–Nordost streichender Abschiebungen aufgenommen wurden (Meyer & Stets 2002). Diese Nord–Süd verlaufenden Störungen treffen zwischen Koblenz und Andernach auf die Nordwest–Südost orientierten Störungen des Rheintroges. In der Folge hat sich in diesem Kreuzungsfeld das Neuwieder Becken seit dem Oligozän um maximal 350 m abgesenkt (Meyer 2013). Die Bewegungen entlang der begrenzenden Störungszonen halten bis heute an, wie rezente Erdbebenereignisse zeigen. Auswertungen der Erdbeben deuten im Neuwieder Becken auf ein Seitenverschiebungsregime hin (Hinzen 2003).

Zur Erstellung der tektonisch aktiven Großstruktur „Rheinisches Massiv und Neuwieder Becken“ wurde auf die tektonische Karte aus Meyer & Stets (2002) zurückgegriffen und die Störungspuren der Geologischen Übersichtskarte Deutschlands im Maßstab 1 : 250 000 verwendet.

7.4.3.4 Bayerische Alpen und Molassebecken

Die Bayrischen Alpen und das Molassebecken werden hier aufgrund ihrer gemeinsamen Entwicklung zusammen beschrieben. Das Molassebecken hat als Vorlandbecken der Alpen eine typische asymmetrische Struktur mit südwärts, in Richtung der Alpen einfallenden Schichten. Unmittelbar am Alpenrand erreicht das Becken die größten Tiefen (Abbildung 10) (Reinecker et al. 2010). Die Asymmetrie des Molassebeckens entsteht durch die Biegung der unteren Platte (Europäische Platte) unter der Auflast der überfahrenden oberen Platte (Adriatische Platte), wodurch ein Ablagerungsraum für die erodierten Sedimente der Alpen entsteht. Dieser Prozess begann durch die finale Schließung des Penninischen Ozeans während des Paläogens, der sich zwischen dem Europäischen und dem Adriatischen Kontinent befand (Frisch 1979). Die eigentliche Überfahung des europäischen Kontinentalrands und damit die Bildung des Molassebeckens, als Vorlandbecken der Alpen, durch die Biegung der Europäischen Platte, setzt zum Ende des Eozän ein, als die alpine Kollisionsfront weiter nach Norden fortschreitet (Sinclair & Allen 1992). Daher sind im südlichen Teil des Molassebeckens die Molassesedimente durch die nordwärts gerichtete Überfahung der Alpen stark gefaltet und intern überschoben. Dieser als subalpine Molasse bezeichnete Teil ist auf die undeformierten Molassesedimente überschoben (Ortner et al. 2015). Die Nordwärtsbewegung der alpinen Deformationsfront schwächt sich seit dem Miozän ab (Decker & Peresson 1996). Ursache ist die Kompensation der Nord-Süd Kontraktion durch das ostwärtige Ausweichen des zentralen Teils der Ostalpen entlang von großräumigen Seitenverschiebungszonen (Ratschbacher et al. 1989).

Das Störungsinventar des Molassebeckens spiegelt die flexurartige Biegung in Form von beckenparallelen Abschiebungen wider, die in Folge des alpinen Deckenvorschubs im Oligozän und Miozän angelegt wurden (Bachmann & Müller 1992; von Hartmann et al. 2016). Das Alter der Störungen korreliert mit der Nordwärtsverlagerung der alpinen De-

formationsfront, da im südlichen Teil des Molassebeckens die Störungszonen nicht jünger als das Oligozän sind, aber im nördlichen Teil des Molassebeckens auch spätmiozäne Sedimente der oberen Süßwassermolasse versetzen (Bachmann & Müller 1992). Die Störungszonen verlaufen dabei subparallel der Ost-West streichenden Grabenachse des Molassebeckens und weisen maximale Versatzbeträge von 100 bis 200 m auf (Bachmann & Müller 1992).

Die tektonisch aktiven Großstrukturen „Molassebecken und Bayrische Alpen“ wurden auf Grundlage der tektonischen Karten aus Bachmann & Müller (1992), Froitzheim et al. (2008) und Reinecker et al. (2010) erstellt. Für die Ausweisung aktiver Störungszonen der tektonisch aktiven Großstruktur „Bayrische Alpen und Molassebecken“ wurden unterschiedliche Datensätze verwendet. Da die Störungszonen des Molassebeckens zum großen Teil nicht an der Oberfläche kartiert sind, wurden die Störungszonen des 3D-Modells „GeoMol“ verwendet. Die Störungszonen dieses Datensatzes decken nahezu das gesamte Molassebecken ab. Für einen kleinen Teil des nordwestlichen Molassebeckens in Baden-Württemberg wurden die Störungsspuren der Geologischen Karte im Maßstab 1 : 50 000 verwendet. Für die Bayrischen Alpen wurden die Störungsspuren der Geologischen Übersichtskarte im Maßstab 1 : 250 000 verwendet.

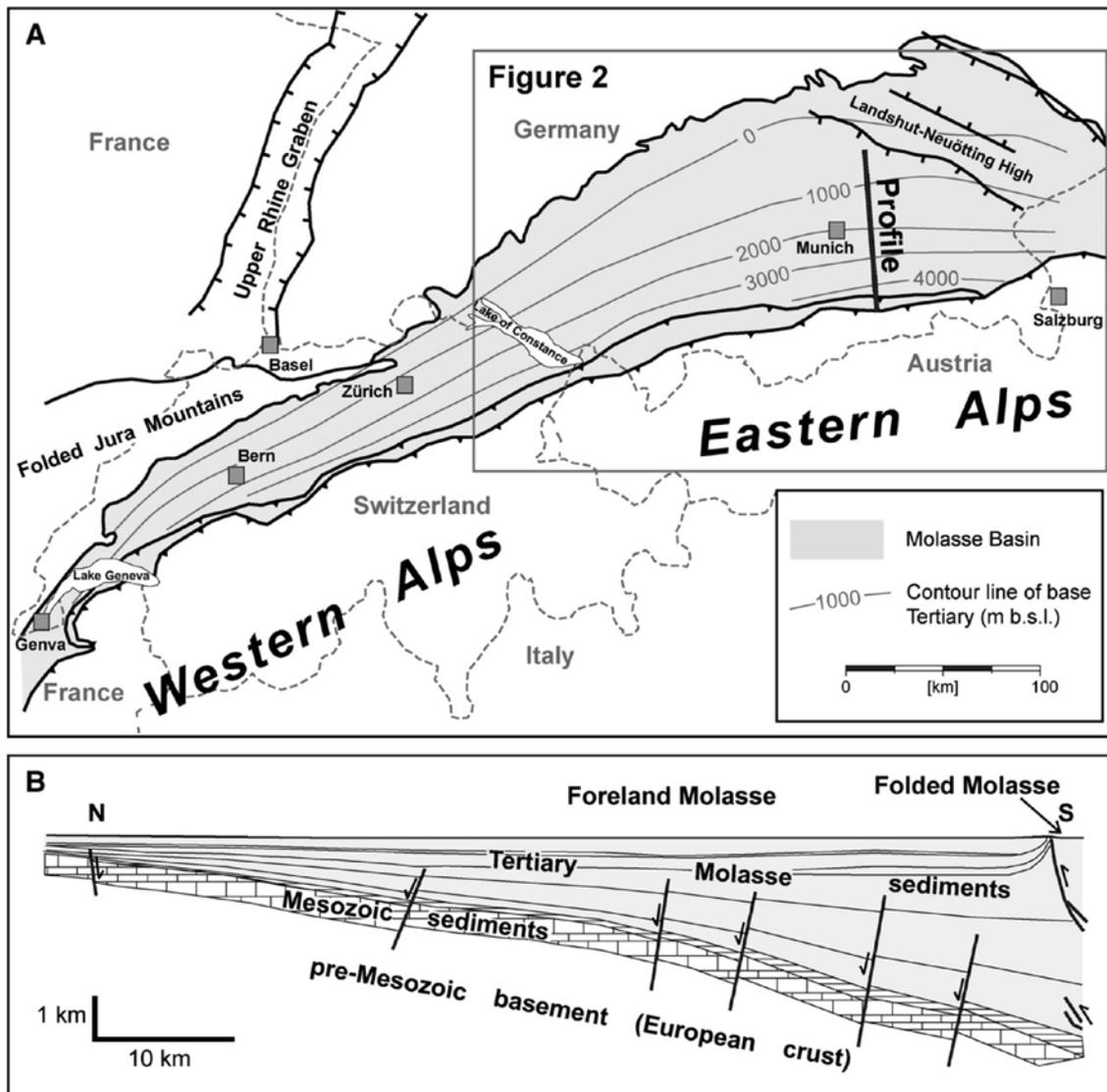


Abbildung 10: Vereinfachte Karte und geologisches Profil des Molassebeckens (Reinecker et al. 2010).
 Die Konturlinien geben die Tiefe der Basis der tertiären Molassesedimente an. Das geologische Profil zeigt die steil einfallenden Abschiebungen und die Überschiebungsfront der Sub-Molasse (Folded Molasse).

7.4.3.5 Albstadt Scherzone

Die Albstadt Scherzone ist eine seismisch aktive Zone, die entlang der westlichen Schwäbischen Alb in einem etwa 5 km breiten Korridor vom westlichen Bodensee bis Stuttgart in Nord-Süd-Richtung verläuft (Abbildung 11) (Wetzel & Franzke 2003). Die Albstadt Scherzone ist an der Erdoberfläche nicht erkennbar, sondern definiert eine Zone im Untergrund mit erhöhter seismischer Aktivität (vgl. Kapitel 11 zum Ausschlusskriterium „seismische Aktivität“). So treten Erdbebenereignisse vorwiegend in einer Tiefe von 6 bis 13 km auf, während oberflächennahe Ereignisse selten sind (Reicherter et al. 2008). Die Herdflächenlösungen der Erdbeben zeigen an, dass die Albstadt Scherzone als Seitenverschiebung im Untergrund aktiv ist. Als Erklärung für geringe Seismizität in

höheren Bereichen der Erdkruste wird eine mechanische Entkoppelung zwischen dem mesozoischen Deckgebirge und dem kristallinen Grundgebirge durch die Evaporithorizonte des Mittleren Muschelkalk und des Gipskeupers diskutiert (Reinecker & Schneider 2002). Alternativ schlagen Stange & Brüstle (2005) vor, dass die Entkoppelung zwischen kristallinem Grundgebirge und mesozoischem Deckgebirge, also etwas tiefer, stattfindet. Die relativ kleinräumigen Grabenstrukturen wie Sindelfingengraben, Freudenstadtgraben, Hohenzollerngraben und Lauchertgraben sind somit der strukturelle Ausdruck dieser Scherbewegung im Hangenden der Entkoppelungshorizonte (Abbildung 11) (Reicherter et al. 2008). Das Nordwest–Südost Streichen der Grabenrandstörungen ist damit schräg zum generellen Nord–Süd Streichen der Albstadt Scherzone orientiert, was typisch für eine sogenannte en-echelon Geometrie einer schräg wirkenden Zerrbewegung ist (Fossen 2011). Im Freudenstadtgraben und Hohenzollerngraben bewegen sich die vertikalen Versatzbeträge dieser Grabensysteme zwischen 100 bis 150 m (Reicherter et al. 2008). Neben der seismischen Aktivität, vor allem in der Umgebung des Hohenzollerngrabens, dokumentiert die Beeinflussung der quartären und pliozänen Flussterrassen der Donau im Lauchertgraben die anhaltende tektonische Aktivität der Albstadt Scherzone (Reicherter et al. 2008). Durch den Zusammenhang zwischen der Scherbewegung im Untergrund und der Entstehung der Grabenstrukturen, wird die pliozäne Alterseinstufung des Lauchertgrabens auch für die weiteren Grabensysteme angenommen, die im Zusammenhang mit der Albstadt Scherzone entstanden sind (Reinecker & Schneider 2002; Reicherter et al. 2008).

Da die räumliche Ausdehnung der Albstadt Scherzone als solches nicht genau bestimmt werden kann, werden die jeweils aus der Aktivität der Albstadt Scherzone hervorgegangenen einzelnen Grabensysteme auf Grundlage der tektonischen Karten aus Reinecker & Schneider (2002) und Reicherter et al. (2008) verwendet. Im Einzelnen ausgewiesen sind die Strukturen Sindelfingengraben, Freudenstadtgraben, Hohenzollerngraben und Lauchertgraben. Datengrundlage für die Ausweisung aktiver Störungszonen der Grabensysteme ist die geologische Landeskarte im Maßstab 1 : 50 000.

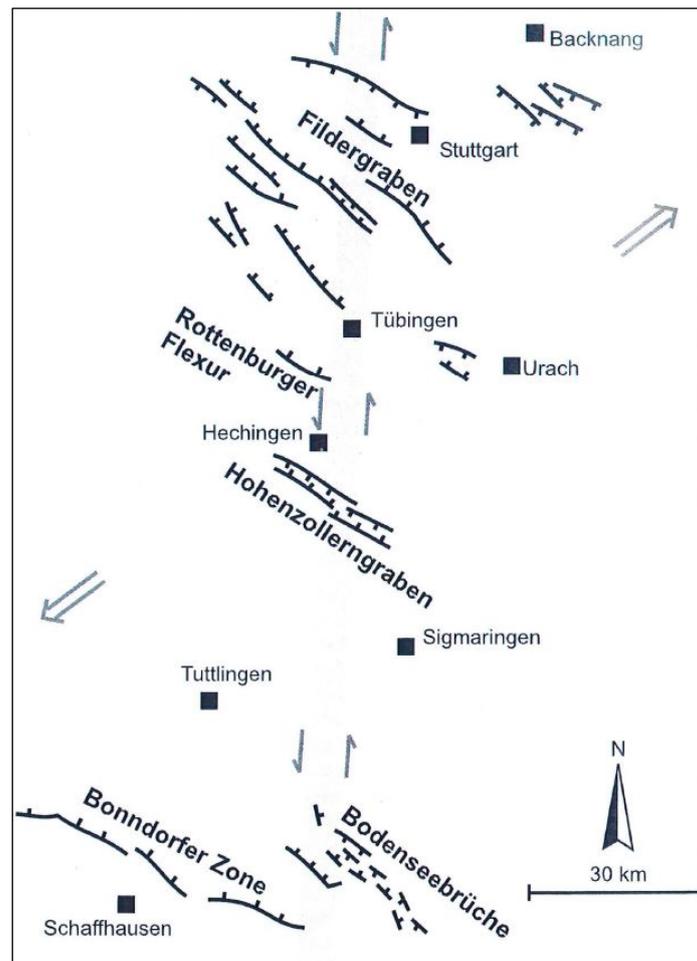


Abbildung 11: Orientierung der Grabensysteme der Albstadt Scherzone (Reinecker & Schneider 2002)

7.4.3.6 Freiburg-Bonndorf-Bodensee Scherzone

Die Freiburg-Bonndorf-Bodensee Scherzone (FBBS) ist eine etwa 10 bis 20 km breite Grabenstruktur mit aktiven Störungszonen, die im Westen vom südlichen Oberrheingraben begrenzt wird. Nach Südosten lässt sich die FBBS bis zum westlichen Bodensee verfolgen (Abbildung 12). Am westlichen wie östlichen Ende treffen die Nordwest-Südost streichenden Störungszonen der FBBS auf die Nord-Süd streichenden Störungszonen des Oberrheingrabens und der Albstadt Scherzone. Charakteristisch für diese Kreuzungsbereiche ist das Auftreten des miozänen Vulkanismus des Kaiserstuhls im Oberrheingraben und des Hegau Vulkanfelds westlich des Bodensees (Geyer et al. 2011). Innerhalb der FBBS treten vorwiegend Störungszonen mit Nordwest-Südost, Westnordwest-Ostsüdost und Ost-West Streichen auf, deren Orientierung auf reaktivierte paleozoische Störungszonen hindeuten (Egli et al. 2017). Herdflächenlösungen von rezenten seismischen Ereignissen in der Umgebung der FBBS zeigen Störungsbewegungen in Form von rechtshändigen Seitenverschiebungen und Abschiebungen (Deichmann et al. 2000). Durch die unterschiedliche Orientierung der Störungszonen äußert sich die Seitenverschiebungsbewegung des Gesamtsystems an einzelnen Störungszonen mit

abweichender Orientierung, sowohl als Seitenverschiebung als auch als Abschiebung (Egli et al. 2017). Die hauptsächlich miozäne tektonische Aktivität ist durch deformierte Molasse-Sedimente dokumentiert, die an einzelnen Störungszonen 200 bis 250 m versetzt wurden (Hofmann et al. 2000).

Die räumliche Begrenzung der tektonisch aktiven Großstruktur „FBBS“ wurde mit den tektonischen Karten von Reicherter et al. (2008) und Egli et al. (2017) erstellt. Innerhalb der tektonischen Großstruktur wurden die Störungsspuren der geologischen Landeskarte 1 : 50 000 verwendet.

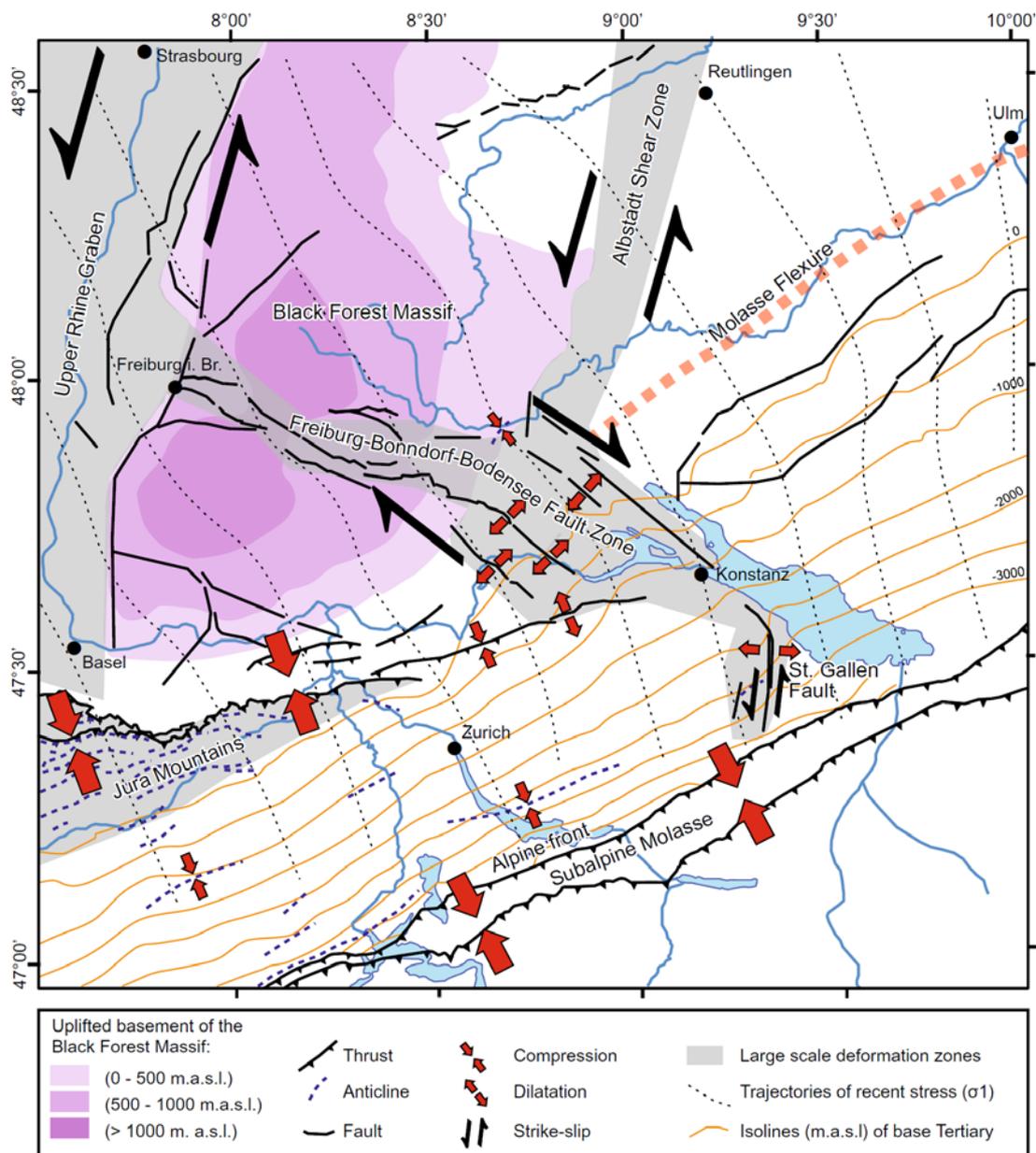


Abbildung 12: Vereinfachte tektonische Karte von Südwestdeutschland und der Nordschweiz (Egli et al. 2017)

7.4.3.7 Vogtland

Das Vogtland liegt am Rande des westlichen Böhmisches Massivs, dessen tektonische Aktivität im Neogen von zwei unterschiedlichen tektonischen Prozessen bestimmt wird. Zum einen verläuft durch den westlichsten Teil des Böhmisches Massivs (äußerster Westen Tschechiens und südliches Vogtland) die Regensburg-Leipzig-Rostock Zone. Diese Struktur beschreibt einen etwa Nord–Süd streichenden, 40 km breiten Korridor, der im Vergleich zur Umgebung durch erhöhte seismische Aktivität gekennzeichnet ist (Abbildung 13) (Bankwitz et al. 2003). Die Störungen dieser Zone sind durch Fotolineation aus Satellitenbildern und Bohrungen sowie aus dem Uranbergbau des westlichen Erzgebirges als Nord-Süd streichende Störungszonen bekannt (Bankwitz et al. 2003). Zum anderen befindet sich der zentrale Teil der Regensburg-Leipzig-Rostock Zone im Einflussbereich des nach Nordosten streichenden Egerriffs. In diesem Abschnitt fällt die Regensburg-Leipzig-Rostock Zone mit dem westlichsten Grabensystem des Eger Rifts, dem Cheb Becken, zusammen. Im Zusammenhang mit dieser Konfiguration ist die erhöhte seismische Aktivität und der quartäre Vulkanismus der Region zu sehen, deren genaue Zusammenhänge jedoch nicht abschließend geklärt sind (Ulrych et al. 2013; Fischer et al. 2014). Charakteristisch für die Erdbeben des Vogtlandes und des Cheb Beckens ist das Auftreten sogenannter Schwarmbeben. Diese Erdbebenereignisse zeichnen sich durch eine hohe Anzahl an Erdbeben mit geringer Magnitude in Tiefen zwischen 6 und 15 km aus (Horálek & Fischer 2010) und weisen auf Fluidmigration entlang von bestehenden Störungszonen hin (z. B. Weinlich 2014). Im Vogtland treten diese besonders häufig in der Umgebung der Hauptstörung des Cheb Beckens, der Nordnordwest streichenden Mariánské Lázně Störungszone sowie weiteren subparallel angeordneten Störungszonen auf (Fischer et al. 2014). Die Mariánské Lázně Störungszone lässt sich über etwa 100 km Länge verfolgen und reicht bis ins südliche Vogtland. Die neotektonische Aktivität dieser Störungszone ist durch vertikale Versätze von 0,4 m in holozänen Sedimenten, die in Erkundungsschurfen freigelegt wurden, nachgewiesen (Štěpančíková et al. 2019). Dieser Versatz entspricht einem Erdbebenereignis der Magnitude M_L 6,3 bis 6,5 und deutet an, dass die Erdbeben im Vogtland durchaus die moderaten Magnituden der Schwarmbeben übersteigen können (Štěpančíková et al. 2019).

Aufgrund der undeutlichen Ausdehnung nördlich des Vogtlandes wird dieser Teil der Rostock-Leipzig-Regensburg Zone bisher nicht mit als tektonisch aktive Großstruktur berücksichtigt, sondern nur der südliche Teil, der eine hohe seismische Aktivität aufweist und Ausläufer der Nord-Süd streichenden Störungszonen des Cheb-Beckens mit einschließt (Abbildung 13). Als Datengrundlage für die Ausweisung von aktiven Störungszonen innerhalb der tektonisch aktiven Großstruktur des Vogtlandes, werden die Störungszonen aus den Datenlieferungen des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie verwendet, da die Störungszonen dieses Datensatzes Informationen zur Raumlage enthalten.

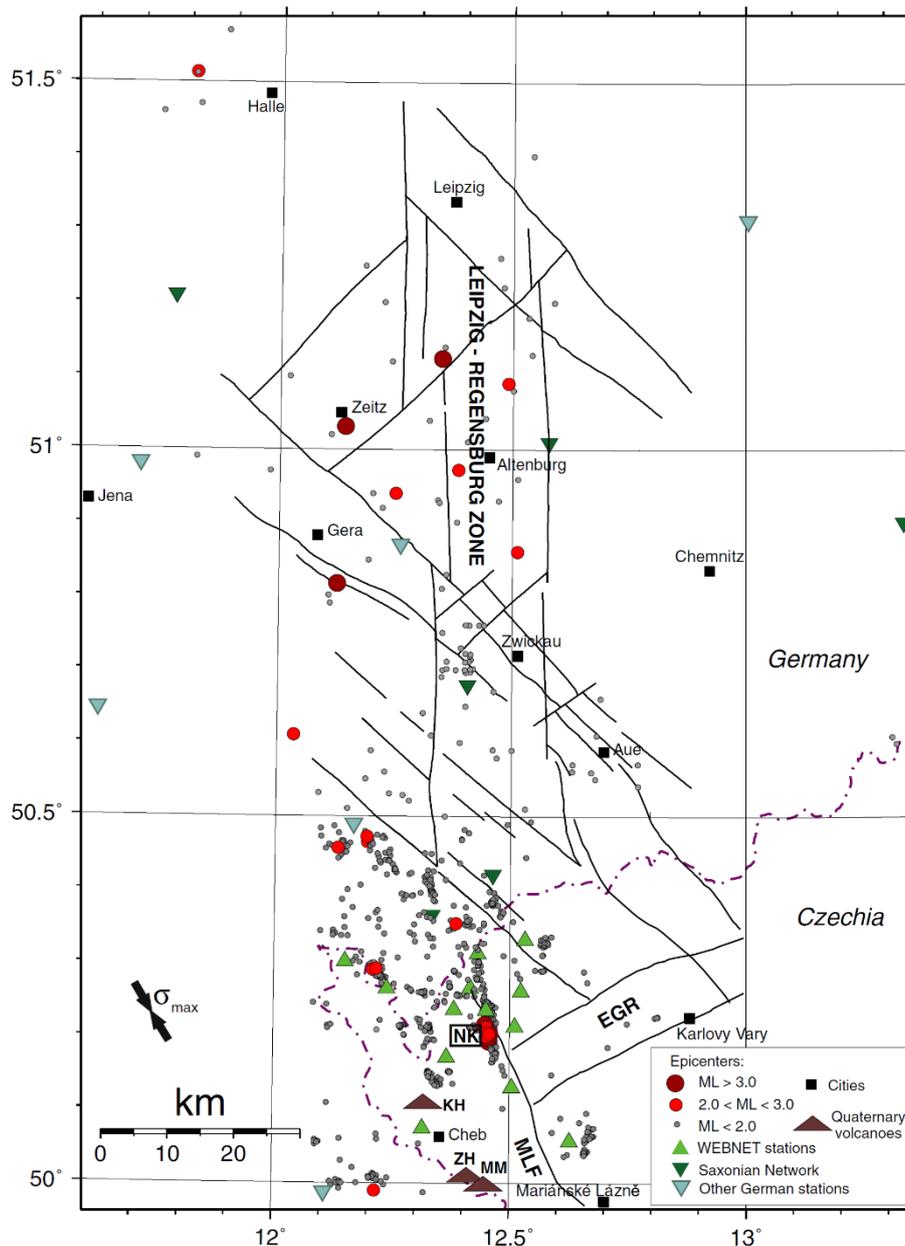


Abbildung 13: Vereinfachte tektonische Karte mit Störungszonen der Leipzig-Regensburg-Zone und des Eger Graben sowie eine Auswahl der Epizentren von Erdbeben zwischen 1991 und 2011 (Fischer et al. 2014)

7.4.3.8 Lausitzer Tertiärgräben

Die bestimmenden tektonischen Elemente der Lausitz sind die Nordwest-Südost streichenden Mitteldeutschen Hauptabbrüche. Diese Hauptabbrüche sind alte tektonische Elemente, die schon während der Variszischen Orogenese angelegt und in der Folge häufig reaktiviert wurden. Von Südwesten nach Nordosten sind dies die Lausitzer Überschiebung, die Innersudetische Hauptverwerfung und der Lausitzer Hauptabbruch (Abbildung 14 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Durch die Aufschlüsse der Lausitzer Braunkohleförderung sind die Störungszonen, die auch die mio-

Nordwesten dar und waren zwischen 28 und 17 Millionen Jahren aktiv (Stanek et al. 2016).

Die Abgrenzung der einzelnen Grabensysteme erfolgt durch die Verwendung der geologischen Karten aus Krentz & Lapp (2010) für die Niederlausitz sowie aus Stanek et al. (2016). Wie in der tektonisch aktiven Großstruktur „Vogtland“ werden für die Ausweisung aktiver Störungszonen die Störungszonen des Forschungsprojektes „aktive Störungen Sachsen“ verwendet, da dieser Datensatz Informationen zur Raumlage der Störungszonen enthält. Weiterhin wurden in der Niederlausitz, an der Grenze zu Brandenburg, die Störungsspuren aus dem Atlas der Geologie Brandenburgs aus Stackebrandt (2005) verwendet (Tabelle 4).

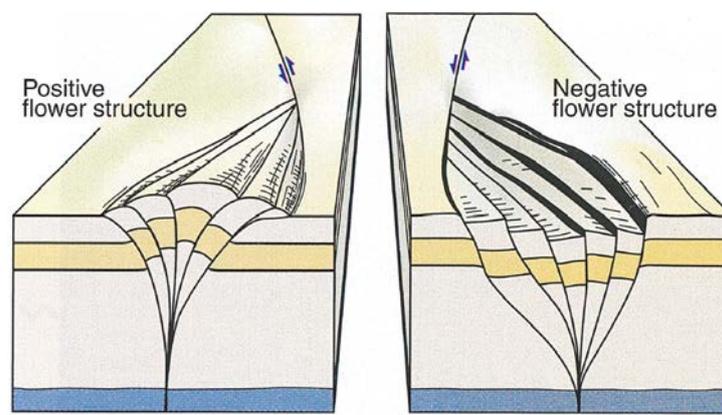


Abbildung 15: Schematische Darstellung positiver und negativer Blumenstrukturen in Seitenverschiebungssystemen (Fossen 2011)

7.4.4 Anwendungsmethode

Zur Ermittlung ausgeschlossener Gebiete werden Störungszonen ausgewählt, deren Aktivität in den letzten 34 Millionen Jahren mit den in den Kapiteln 7.4.1 bis 7.4.3 beschriebenen Methoden nachgewiesen werden konnte. Diese bilden unter Berücksichtigung des in der Begründung zum Gesetzentwurf des StandAG (BT-Drs. 18/11398) geforderten Sicherheitsabstandes von 1000 m beidseitig der Störungsfläche die ausgeschlossenen Gebiete. Der Sicherheitsabstand wird dabei als Saum um eine Störungszone verstanden, die bestehend aus einem Störungskern und einer Zerrüttungszone, selbst eine gewisse flächenhafte Ausdehnung hat. In der wissenschaftlichen Literatur wird die Breite von Zerrüttungszonen um einen Störungskern beschrieben. Diese Breite ist von mehreren Faktoren wie Gesteinstyp und Versatzbetrag einer Störung abhängig und reicht von einigen Zentimetern bis hin zu Maximalbeträgen von etwa 200 m (Childs et al. 2009; Faulkner et al. 2010). Im jetzigen Verfahrensschritt (Phase I, Schritt 1,) findet keine Einzelfallprüfung der jeweiligen Störungszonen hinsichtlich des Versatzbetrags oder der Breite der Zerrüttungszonen statt, sodass ein pauschal festzulegender Sicherheitsabstand um die als aktiv klassifizierte Störungszone zur Anwendung kommt. Die BGE zieht daher den in der Begründung zum Gesetzentwurf des StandAG genannten Sicherheitsabstand von 1000 m als Saum um die Störungsspur heran, was auch der fachlichen Einschätzung von Stück et al. (2020) für die erste Phase der Standortauswahl entspricht.

Ausgeschlossene Gebiete ergeben sich aus dem pauschalen Sicherheitsabstand um die als aktiv klassifizierte Störungszone. Dieses wird von der Geländeoberkante vertikal in alle endlagerrelevanten Tiefen projiziert. Sind Angaben zur Raumlage der Störungsfläche vorhanden, wird der Sicherheitsabstand parallel zur geneigten Störungsfläche angelegt. Um diese dreidimensionale Information auf einer Karte ausweisen zu können, wird dieses Volumen entlang der Störungsfläche vertikal an die Erdoberfläche projiziert (BGE 2020x).

Methodische Besonderheiten ergeben sich für Störungszonen, die im Deckgebirge von Salzstrukturen (z. B. Salzwälle und Salzdiapire) auftreten und auf deren halokinetische Wachstumsdynamik zurückzuführen sind. Im unmittelbar überlagernden Gebirge einer Salzstruktur kann dies unter anderem zu Extension und Dachbereichsaufwölbung führen (Abbildung 16) (Davison et al. 2000). Da sich Scheitelstörungen auf das Deckgebirge von Salzstrukturen beschränken (Stück et al. 2020), bleibt die Barrierewirksamkeit einer Salzstruktur erhalten. Für den betroffenen Bereich im Deckgebirge einer Salzstruktur gilt das Ausschlusskriterium als erfüllt, wenn die Störungszonen innerhalb der letzten 34 Millionen Jahre aktiv waren und der höchste Punkt der Salzstruktur unterhalb von 300 m unter GOK liegt. Damit wird auf die Ausweisung ausgeschlossener Gebiete verzichtet, die komplett oberhalb der Minimaltiefe des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches liegen. Die Datengrundlage zur Ausweisung von Störungszonen im Norddeutschen Becken basiert teilweise auf Datensätzen, die den Verlauf von Störungsflächen in verschiedenen Tiefenniveaus bzw. geologischen Horizonten im Untergrund widerspiegeln. Im Gegensatz zu 3D-Modellen, die den Verlauf einer Störungszone im Untergrund als Störungsfläche darstellen, ist bei den verwendeten Datensätzen der Verlauf der Störungszone im Untergrund als Störungsspur in unterschiedlichen Tiefenniveaus abgebildet. Dies äußert sich im Kartenbild als Zone mit mehreren subparallel verlaufenden Störungsspuren. Die Verwendung mehrerer Tiefenniveaus bietet verglichen zu einer einzelnen, an der Erdoberfläche aufgeschlossenen Störungsspur eine bessere Abschätzung des dreidimensionalen Verlaufs von Störungszonen im Untergrund.

Der Einfluss von Störungszonen auf flach lagernde Salinarhorizonte wurde in vorherigen Studien mittels seismischer Methoden erkundet (z. B. Stewart et al. 1996; Ten Veen et al. 2012), ist aber auch aus Aufschlüssen des Salzbergbaus in Mitteldeutschland bekannt (Knipping 1989; Herbert & Schwandt 2007; Schléder et al. 2008). Flach lagernde Salinarhorizonte führen durch ihren vergleichsweise geringen Verformungswiderstand zu einer mechanischen Entkopplung zwischen dem Gebirge im Hangenden und dem Gebirge im Liegenden des Salinarhorizontes, wodurch eine Korrelation zwischen den Störungszonen im Hangenden und Liegenden des Salinars erschwert wird (Brückner-Röhling et al. 2002). Der Grad der Entkopplung durch den Salinarhorizont ist vorwiegend von der Mächtigkeit des Salinarhorizontes und der Verformungsgeschwindigkeit entlang der angrenzenden Störungen abhängig (Stück et al. 2020). Beobachtungen aus dem Salzbergbau deuten darauf hin, dass Störungszonen im angrenzenden Gebirge (im Prä- und Postsalinar) auch zu ausgeprägten, teilweise bruchmechanischen Deformatio-

nen im Salinar selbst führen können (Herbert & Schwandt 2007). Die Deformationsausprägung reicht dabei von bruchtektonischem Verhalten in spröde reagierenden Gesteinen des Salinars, wie Salztonen, Anhydrit und Karbonaten, bis hin zu plastischer Deformation viskosen Stein- und Kalisalzes, die nur bei sehr hohen Verformungsgeschwindigkeiten Bruchflächen ausbilden. Störungszonen des Prä- und Postsalinars können somit Wasserwegsamkeiten in den karbonatischen und sulfatischen Gesteinen des Salinars führen und Salzlösungszutritte begünstigen (Herbert & Schwandt 2007). Durch diese Beobachtung von verstärktem Auftreten von Lösungszutritten in tektonisch beanspruchten Bereichen des Salinars wird das Ausschlusskriterium „aktive Störungszonen – tektonische Störungszonen“ bei flachlagernden Salinarhorizonten analog zu Gebieten ohne Salzvorkommen für den gesamten endlagerrelevanten Tiefenbereich angewandt.

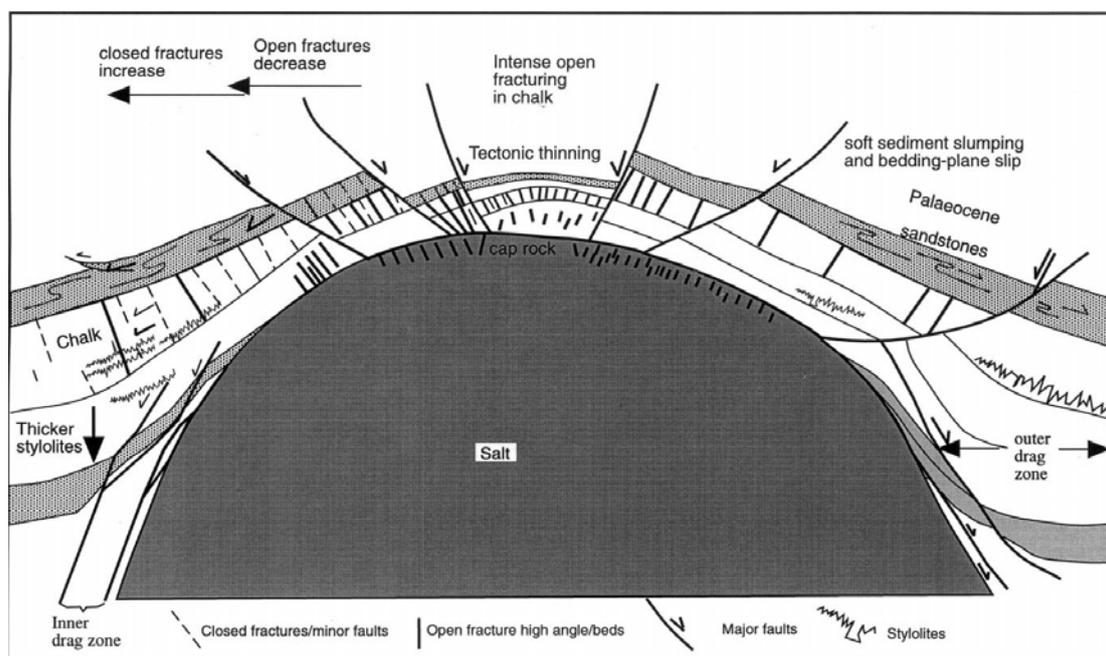


Abbildung 16: Darstellung von Deformationsprozessen im Dachbereich eines Salzdiapirs (Davison et al. 2000)

7.5 Ergebnisse

Nach Umsetzung der Anwendungsmethode ergeben sich die in Abbildung 17 dargestellten ausgeschlossenen Gebiete um aktive Störungszonen. Von den ca. 600 000 Störungssegmenten, die die BGE im Rahmen der Datenabfrage zum Ausschlusskriterium „aktive Störungszonen – tektonische Störungszonen“ erhalten und ausgewertet hat, konnten bei 30 780 Störungssegmenten Bewegungen seit dem Rupel identifiziert werden. Die in Abbildung 17 dargestellten Gebiete entsprechen der Projektion von ausgeschlossenen Volumen an der Erdoberfläche. Dabei wird farblich unterschieden zwischen ausgeschlossenen Gebieten, die aufgrund von als vertikal angenommenen Störungsflächen (dunkelblau) und solchen, die aufgrund geneigter Störungsflächen (hellblau) entstehen.

Abbildung 17 zeigt, dass die Umsetzung der Anwendungsmethoden, insbesondere der in Kapitel 7.4.2 und Kapitel 7.4.3 beschriebenen und bundeslandübergreifenden Methoden, zu einem bundesweit konsistenten Bild aktiver Störungszonen führt. Die Ergebnisse spiegeln die bekannten tektonischen und seismisch aktiven Elemente wider, wie zum Beispiel den Oberrheingraben, die Niederrheinische Bucht und die Grabensysteme der Albstadt Scherzone. Zusätzlich konnten durch die Verschneidung von Störungsspuren mit geologischen Einheiten, die ein Maximalalter von 34 Millionen Jahren aufweisen, viele aktive Störungszonen in Gebieten identifiziert werden, in denen bisher wenig über tektonische Aktivitäten innerhalb der letzten 34 Millionen Jahre bekannt ist. Dazu zählen insbesondere die deutschen Mittelgebirgsregionen, wo ohne die Verschneidungsmethode mit post-eozänen geologischen Einheiten in den meisten Fällen keine aktiven Störungszonen hätten ausgewiesen werden können. Die aus dieser Methode resultierenden Störungsspuren sind in der Regel relativ kurz, da sich Störungsspuren häufig kreuzen oder aufteilen. Eine strukturgeologisch sinnvolle Fortführung der Aktivitätszuweisung benötigt in diesem Fall eine Einzelfallbetrachtung. Im Gegensatz zu den relativ kurzen Störungsspuren der Mittelgebirge spiegeln die Nordwest-Südost verlaufenden, langen Störungsspuren in Nordost-Deutschland bekannte tektonische Störungszonen der sogenannten Mitteldeutschen Hauptabbrüche (u. a. das Allertal Lineament oder die Gardelegen Störungszone) wider. Die Ausweisung dieser Störungszonen basiert auf geodätisch nachgewiesenen Vertikalbewegungen, die dem Verlauf dieser Störungszonen folgen und damit deren rezente Aktivität belegen. Weiterhin treten in Nordwest- und Norddeutschland Störungsspuren auf, deren Verlauf mit dem Auftreten von Salzstrukturen wie Salzdiapiren und Salzwällen im Untergrund zusammenfällt. Diese Störungszonen treten besonders dort auf, wo intensive salztektonische Vorgänge das Deckgebirge noch im späten Känozoikum beeinflusst haben.

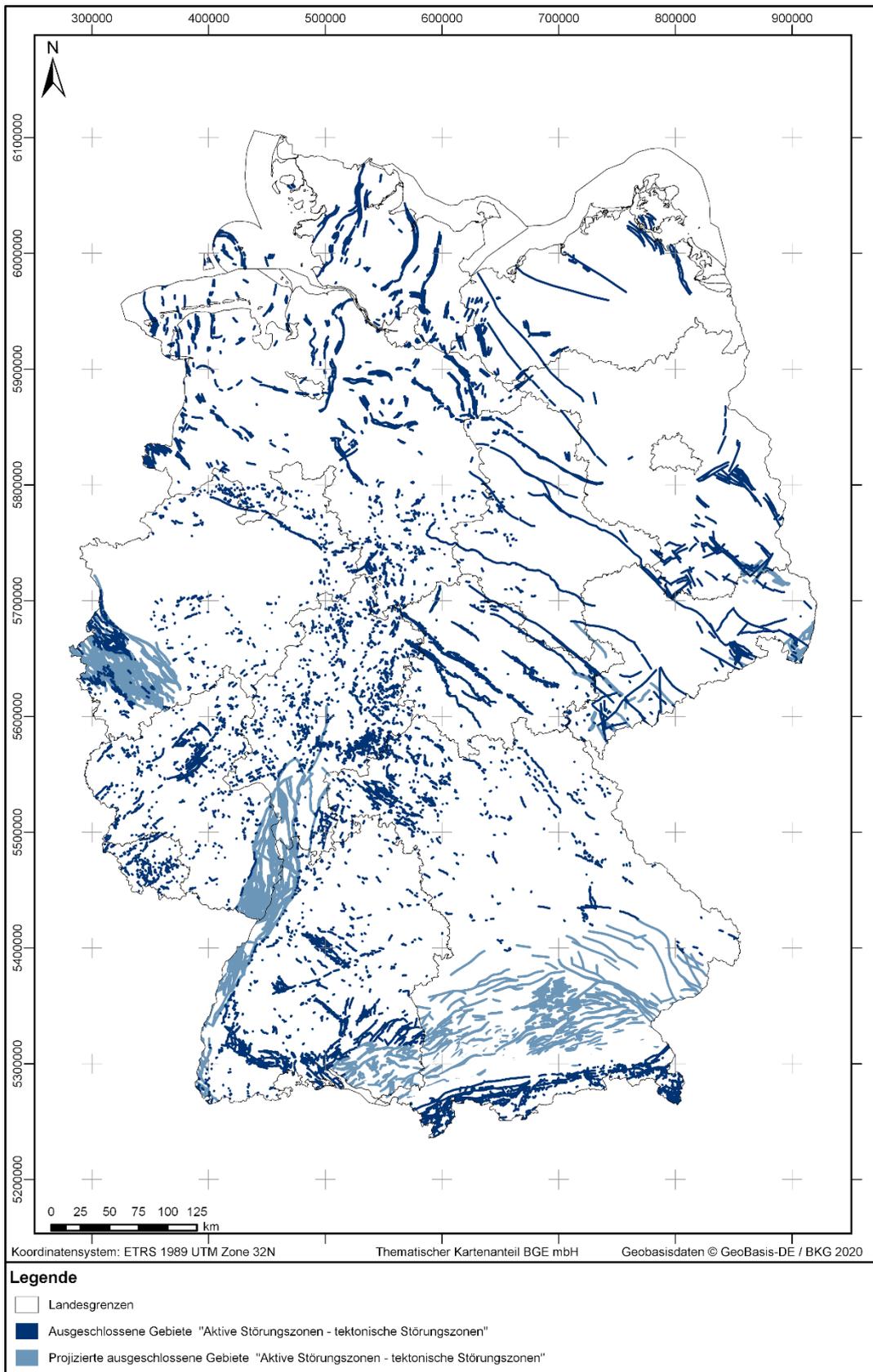


Abbildung 17: *Ausgeschlossene Gebiete nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „aktive Störungzonen – tektonische Störungzonen“*

8 Aktive Störungszonen – atektonische Vorgänge

8.1 Einführung

„(2) Die Ausschlusskriterien sind:

[...]

2. aktive Störungszonen

[...]

Atektonische beziehungsweise aseismische Vorgänge, also Vorgänge, die nicht aus tektonischen Abläufen abgeleitet werden können oder nicht auf seismische Aktivitäten zurückzuführen sind und die zu ähnlichen Konsequenzen für die Sicherheit eines Endlagers wie tektonische Störungen führen können, sind wie diese zu behandeln.

[...]“

§ 22 Abs. 2 Nr. 2 StandAG

Mit der Anwendung des Ausschlusskriteriums „aktive Störungszonen“ sollen neben aktiven Störungszonen, deren Entstehung und Aktivität auf tektonische Prozesse zurückzuführen ist (vgl. Kapitel 7 zum Ausschlusskriterium „aktive Störungszonen – tektonische Störungszonen“), auch atektonische Vorgänge betrachtet werden. Einige dieser Vorgänge können ebenfalls mit bruchhafter Deformation in endlagerrelevanten Tiefen verbunden sein und damit die Langzeitsicherheit eines Endlagers beeinträchtigen.

8.1.1 Fachliche Grundlagen

Für den Begriff atektonisch wird in der Geologie auch die Bezeichnung pseudotektonisch verwendet, womit nicht-endogen-tektonisch bedingte Gesteinsdeformationen gemeint sind. Hierzu gehören Setzungserscheinungen und Deformationen durch Diagenese (z. B. durch die Mobilisierung von Porenwässern), Senkungen und Einstürze über Lösungshohlräumen (Karst, Salze), subaerische und subaquatische Rutschungen und Gesteinsdeformationen durch Gletscherwirkung oder Kryoturbation (Murawski & Meyer 2010). Auch Impaktereignisse zählen zu den atektonischen Vorgängen (Stück et al. 2020). Atektonische Vorgänge können die Barrieremächtigkeit eines Endlagersystems reduzieren oder petrophysikalische Eigenschaften und hydraulische Parameter der geologischen Barriere verändern (Stück et al. 2020). Nachfolgend werden die einzelnen atektonischen Vorgänge hinsichtlich ihrer Bildungsmechanismen näher erläutert. In Kapitel 8.1.2 sind die atektonischen Vorgänge dargestellt, die die geologische Barriere eines Endlagers beeinflussen können.

8.1.1.1 Deformationen durch Diagenese

Diagenese bezeichnet die Umbildung von Lockersedimenten zu Festgesteinen infolge von Druck- und Temperatureinwirkung sowie chemischer Lösung und Abscheidung (Burley et al. 1985; Murawski & Meyer 2010). Der Diagenese zugrundeliegende Pro-

zesse sind die Kompaktion von unkonsolidiertem Sediment infolge des Gewichts überlagernder Gesteine sowie Dehydratation durch hohe Temperaturen. Beide Faktoren führen zu einer Volumenverringerng des Sediments durch Verringerung des verfügbaren Porenraums (Worden & Burley 2003). Deformationsstrukturen in klastischen Sedimenten werden häufig durch plötzliche Kompaktionsprozesse in Folge schneller Erhöhung der Sedimentauflast, z. B. durch subaquatische Massenbewegungen wie Turbidite oder Rutschungen oder durch seismische Ereignisse (Erdbeben) hervorgerufen. Die daraus resultierenden Deformationsstrukturen wie z. B. polygonale Störungssysteme, sind äußerst vielfältig und gehen häufig auf Fluidmigration in Folge der Porenraumverringerng bei Kompaktionsprozessen zurück (Mills 1983). Polygonale Störungssysteme sind bisher vor allem Offshore beschrieben und in Deutschland in eozänen und oligozänen Sedimenten der Nordsee bekannt (Stück et al. 2020). Eine hinreichende Studienlage zum Auftreten von polygonalen Störungssystemen an Land existiert bisher nur für einige Aufschlüsse in paläogenen Tonen in Belgien (Verschuren 1992) und an oberkretazischen Kalksteinen in Großbritannien und Frankreich (Hibsch et al. 2003). Ein ausreichendes Systemverständnis bezüglich der initialen Bildungsmechanismen, dem Auftreten polygonaler Störungssysteme auf deutschem Festland sowie der Folgen bezüglich der Auswirkungen auf geologische Barrieren, kann mit dem aktuellen Wissensstand nicht erlangt werden (Goultly 2008; Stück et al. 2020).

8.1.1.2 Senkungen und Einstürze über Lösungshohlräumen

Lösungshohlräume im Untergrund entstehen durch Materialverluste aufgrund der lösenden Wirkung des Wassers oder durch Ausspülung von unkonsolidierten Sedimenten. Maßgebende Faktoren für die Entstehung von Lösungshohlräumen durch Lösungsprozesse sind die Lösungsfähigkeit des Gesteins, das Trennflächengefüge, die Qualität und Menge der Niederschläge, die hydrogeologischen Verhältnisse sowie das Relief, der Faktor Zeit und Veränderungen durch menschliche Eingriffe (Prinz & Strauß 2011). Weitere kontrollierende Faktoren sind laut Zötl (1974) das Klima und das Kluftsystem, das vor allem die Lösungsprozesse durch meteorische Wässer innerhalb des Gebirgskörpers ermöglicht.

Der slowenische Begriff Karst (steiniger Boden) (Martin & Eiblmaier 2001a) hat sich dabei etabliert und wird für alle Landschaften der Erde verwendet, die über wasserlösliche Gesteine und einen unterirdischen Abfluss verfügen (Prinz & Strauß 2011). Unterschieden werden hierbei nackter, bedeckter und überdeckter Karst. Als nackter Karst werden Karstgebiete ohne Boden- und Vegetationsdecke bezeichnet. Das Gegenteil ist der bedeckte Karst. Bei einem überdecktem Karstgebiet überlagern jüngere Ablagerungen, z. B. tertiäre Sedimente, eine alte Karstoberfläche (Zötl 1974).

Karst wird in drei Typen unterteilt: epigener, hypogener und Mischwasser „mixing zone“-Karst. Epigener Karst erfährt seine Lösung durch meteorische Grundwässer, während bei hypogenem Karst die Gesteine durch diffus aufsteigendes tiefes Grundwasser gelöst werden und damit größere Tiefen betroffen sind. Mischwasser „mixing zone“-Karst tritt dagegen nur an Küsten auf, wo Salzwasser mit Süßwasser (meteorisches Grundwasser)

vermischt wird (Jeannin et al. 2015). Die hypogene Höhlenentwicklung ist bisher wenig bekannt. Kempe (2005) hat eine Liste von 50 Schauhöhlen in Deutschland zusammengestellt, von denen sieben Höhlen vermutlich hypogen entstanden sind.

Karstlandschaften sind durch vielfältige typische Erscheinungsformen geprägt (Abbildung 18). Die beim Einbruch von Hohlräumen in Kalkstein oder Dolomit entstehenden Senkungen an der Erdoberfläche werden Einsturzdoline oder Erdfall genannt (Prinz & Strauß 2011; Grotzinger & Jordan 2017). Wenn sich Dolinen vergrößern, können sie sich zu großen, flachen Hohlformen (Karstwannen), länglich bis unregelmäßig geformten Hohlformen (Uvalas) oder zu mehreren Quadratkilometer großen Poljen entwickeln (Martin & Eiblmaier 2001b; Pfeffer 2003; Grotzinger & Jordan 2017). Poljen sind geschlossene Becken mit elliptischer oder polygonaler Kontur, die meist durch steile Wände und einen ebenen Aufschüttungsboden geprägt sind (Murawski & Meyer 2010). Die Poljenböden sind unter anderem geprägt von Estavellen und Ponoren. Estavellen sind laut Murawski & Meyer (2010) Wasserspeilöcher, in denen gelegentlich auch Wasser versinken kann. Als Ponore werden trichter- oder schachtförmige Löcher im Karst bezeichnet, in die das Oberflächenwasser in unterirdische Karsthohlräume verschwindet (Martin & Eiblmaier 2001b; Murawski & Meyer 2010). Da kleinere Flüsse in Karstlandschaften meist im Untergrund verschwinden, sind Karstlandschaften oft durch Trockentäler geprägt (Grotzinger & Jordan 2017).

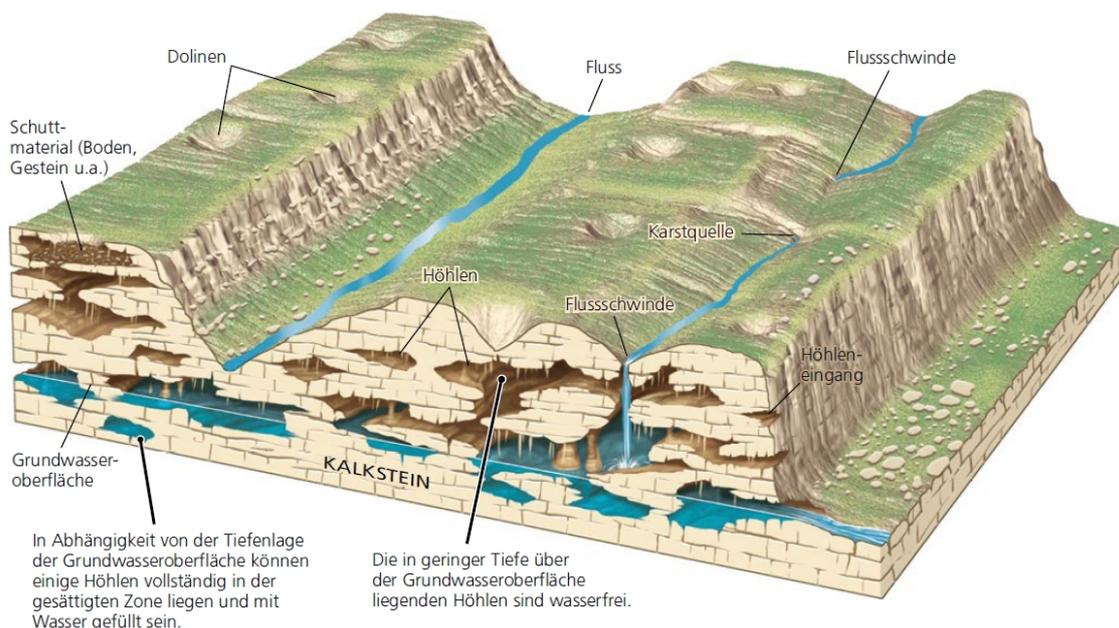


Abbildung 18: *Typische Erscheinungsformen der Karstmorphologie (Grotzinger & Jordan 2017)*

Die löslichen Gesteine werden unterschieden in Evaporite (Gips, Anhydrit, Kalisalz, Steinsalz) und Karbonate (Kalkstein, Dolomit) (Filipponi et al. 2012). Für die Lösung von Evaporiten werden auch die Begriffe Subrosion oder Auslaugung verwendet. Die Lösung von Karbonaten wird als Verkarstung bezeichnet und ist ein chemischer Prozess, wohingegen die Lösung von Evaporiten physikalisch verläuft (Zötl 1974). Zur Lösung von

Karbonaten ist neben der Anwesenheit von Wasser Kohlendioxid notwendig. Die Löslichkeit der Karbonate steigt dabei mit zunehmendem CO₂-Partialdruck und nimmt mit zunehmender Wassertemperatur ab (Martin & Eiblmaier 2001a). Lösungsfähige Gesteine weisen sehr unterschiedliche Lösungsgeschwindigkeiten auf, wobei Lösungsprozesse in Karbonaten am langsamsten sind und in Chloriden (Kalisalz, Steinsalz) am schnellsten ablaufen (Reuter et al. 1992). Dementsprechend sind Chloride, vor Sulfaten (Gips, Anhydrit) und Karbonaten, zuerst von Lösungserscheinungen betroffen.

Die durch Karstprozesse entstandenen Hohlräume sind in ihrer Größe sehr unterschiedlich. Durch die Standfestigkeit von Kalkstein können Hohlräume in Karbonaten beeindruckende räumliche Dimensionen erreichen, während Hohlräume in Sulfatgesteinen wie Gips kleinere Dimensionen erreichen und durch Nachbrechen der Hangendschichten zu Erdfällen werden (Prinz & Strauß 2011). Im Gegensatz zu Dolinen, deren Deformation im Deckgebirge relativ kleinräumig und klar abgrenzbar ist, zeichnen sich Senkungsbebewegungen durch Subrosion von Chloriden häufig durch flächenhafte Senkungserscheinungen aus (Reuter et al. 1992). Stabile Hohlräume im Salz sind ab 200 m Überlagerung aufgrund der kriechenden Verformung des Steinsalzes unwahrscheinlich (Prinz & Strauß 2011). Beschleunigte Subrosionsprozesse treten vor allem an solchen Salzstrukturen auf, die durch Veränderungen der hydrogeologischen Verhältnisse in Kontakt mit ungesättigtem Grundwasser stehen (Prinz & Strauß 2011). Laut Prinz & Strauß (2011) kann auch unter mehreren 100 m Deckgebirge eine Verbindung mit dem Grundwasser erhalten sein, sodass saline Auslaugungen möglich sind. In Extremfällen kann die Subrosion von Salz bis in 1000 m Tiefe reichen (Buurman 2010).

8.1.1.3 Subaerische und subaquatische Rutschungen

Als Rutschungen werden gravitativ bedingte und hangabwärts gerichtete bruchhafte oder bruchlose Transportvorgänge von Gesteins- oder Bodenmaterial bezeichnet (Prinz & Strauß 2011). Subaerische Rutschungen treten an der Erdoberfläche auf und werden maßgeblich durch Faktoren wie Hangneigung, Zusammensetzung des Untergrundes und dessen Wassergehalt beeinflusst. Dabei treten Rutschungen immer dann auf, wenn die mechanische Festigkeit des Hangmaterials durch die Hangabtriebskraft überwunden wird (Dikau et al. 1996; Grotzinger & Jordan 2017). Die Rutschmasse bewegt sich in einer geschlossenen Einheit auf einer Gleitfläche und hinterlässt an ihrem Entstehungsort eine Abrissnarbe (Grotzinger & Jordan 2017). Prinz & Strauß (2011) unterteilen Rutschungen anhand der Tiefenlage ihrer Gleitfläche (Tabelle 5).

Tabelle 5: Unterteilung von Rutschungen nach der Tiefenlage der Gleitfläche (nach Prinz & Strauß 2011)

Rutschungsart	Tiefenlage der Gleitfläche
Oberflächenrutschungen	bis 1,5 m
Flache Rutschungen	5 – 10 m
Tiefe Rutschungen	10 – 20 m
Sehr tiefe Rutschungen	größer als 20 m

Subaquatische Rutschungen treten unter dem Wasserspiegel auf. Hierbei werden gering verfestigte Sedimente auf schrägem Untergrund gravitativ den Hang abwärts bewegt und aufgestaucht, gefaltet oder verwirbelt (Murawski & Meyer 2010). Weitere gravitative Massenverlagerungen sind nach Bahlburg & Breitzkreuz (2017) Gleitungen, Steinschläge, Bergstürze, Körner-, Trümmer- und verflüssigte Sedimentströme sowie Suspensionsströme.

8.1.1.4 Glazialtektonik und Kryoturbation

Der Begriff Glazialtektonik umfasst Prozesse, bei denen durch bewegte Eismassen (Gletscher oder Inlandseis) Lagerungsstörungen, wie z. B. Falten, Überschiebungen, Schuppen, Aufpressungs- und Zerrungsstrukturen in den Eismassen unterlagernden Gesteinen erzeugt werden sowie Deformationen im Untergrund durch Eisauflast (Murawski & Meyer 2010).

Glazialtektonik betrifft überwiegend den flachen Untergrund bis in Tiefen von weniger als 300 m unter GOK (Aber & Ber 2007). Kupsch (1962) nennt strukturelle Veränderungen im Gesteinsverband bis in eine Tiefe von 200 m unter dem Eis. Brinkmann (1953) beschreibt diluviale (eiszeitliche) Glazialtektonik in mehreren Regionen in Norddeutschland, wobei glazialtektonische Lagerungsstörungen bis in 150 m Tiefe unter der Gletschersohle reichen. In der Nordsee sind Deformationen durch Glazialtektonik in Tiefen von kleiner als 250 m unter GOK (Huuse & Lykke-Andersen 2000) und 200 – 240 m unter dem Meeresspiegel bekannt (Winsemann et al. 2020).

Erwähnt werden soll auch der Vorgang der Kryoturbation, obwohl seine Wirkung nur wenige Meter in die Tiefe reicht (Eissmann 1978, 1987). Es handelt sich dabei um eine durch Frostdynamik gesteuerte Materialverlagerung innerhalb der Auftauzone eines Permafrostgebietes (Martin & Eiblmaier 2001a). Hierbei entstehen z. B. durch unregelmäßige Stauchungen oder Verfaltungen oberflächennaher Bodenschichten verschiedene Frostmusterböden (Murawski & Meyer 2010).

8.1.1.5 Impaktereignisse

Bei einem Impaktereignis schlagen Meteoriten auf einem Planeten oder einem Mond ein und verursachen dabei konzentrische Impaktkrater, Impaktite und Gesteinszertrümmerungen im Untergrund (Martin & Eiblmaier 2000b; Reimold & Jourdan 2012). Die Einwirkungstiefe von Impaktereignissen ist sehr groß und kann mehrere Kilometer erreichen (Martin & Eiblmaier 2000b; Stöffler et al. 2013). Bei der Kollision kommt es zu einer Umwandlung von Energie (Masse und Geschwindigkeit des Meteoriten) in Wärme und Stoßwellen, die zur Impakt- bzw. Stoßwellenmetamorphose des betroffenen Gesteins führt. Die Minerale der Gesteine sind kurzzeitig extrem hohen Drücken und hohen Temperaturen ausgesetzt, wodurch es zur Umwandlung des Mineralbestands, Rissbildung oder auch Druckzwillingsbildung kommt (Grotzinger & Jordan 2017).

Beim Aufprall wird der Meteorit in der Regel vollständig zerstört, sodass keine Reste des Meteoriten im oder in der Umgebung des Impaktkraters zu finden sind (Grotzinger & Jordan 2017). Die Auswurfsmassen fallen beim Impakt zum Teil zurück in den Krater oder bilden einen Wall um den Kratertrand (Martin & Eiblmaier 2000b).

8.1.2 Potenzielle Beeinflussung des endlagerrelevanten Bereiches

Atektonische Vorgänge treten vor allem oberflächennah auf, sodass bei einem Großteil der in Kapitel 8.1.1 beschriebenen Prozesse von keiner direkten Beeinflussung des endlagerrelevanten Bereiches auszugehen ist. Dieser beginnt in Tiefen größer gleich 300 m unter GOK (Mindesttiefe des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches nach § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG). Tiefer wirkende atektonische Vorgänge sind z. B. Impaktereignisse und Subrosionsprozesse. In Tabelle 6 ist eine Zusammenstellung der in Kapitel 8.1.1 beschriebenen atektonischen Prozesse hinsichtlich ihrer maximalen Einwirkungstiefe sowie einer potentiellen Beeinflussung des endlagerrelevanten Bereiches dargestellt.

Tabelle 6: Zusammenstellung verschiedener atektonischer Vorgänge und ihrer potenziellen Beeinflussung des endlagerrelevanten Bereiches (größer gleich 300 m unter GOK)

Atektonische Vorgänge	Maximale Einwirkungstiefe des Prozesses	Potenzielle Beeinflussung des endlagerrelevanten Bereiches (≥ 300 m unter GOK)
Deformation durch Diagenese (polygonale Störungssysteme)	Basis der Gesteinsformation, in der die Kompaktion auftritt (Goultly 2008)	nicht völlig auszuschließen
Senkungen und Einstürze über Lösungshohlräume	< 1000 m (Buurman 2010)	ja

Atektonische Vorgänge	Maximale Einwirkungstiefe des Prozesses	Potenzielle Beeinflussung des endlagerrelevanten Bereiches (≥ 300 m unter GOK)
Subaerische und subaquatische Rutschungen	> 20 m (Prinz & Strauß 2011)	nein
Glazialtektonik	150 m (Brinkmann 1953), 200 m (Kupsch 1962), 200 – 240 m unter der Meeresoberfläche (Winsemann et al. 2020), 100 – 250 m (Huse & Lykke-Andersen 2000), < 300 m (Aber & Ber 2007)	nein
Kryoturbation	wenige Meter (Eissmann 1978, 1987)	nein
Impaktereignisse	mehrere Kilometer (Martin & Eiblmaier 2000b; Stöffler et al. 2013)	ja

Literaturstudien zeigen, dass durch subaerische und subaquatische Rutschungen, Glazialtektonik sowie Kryoturbation keine potenzielle Beeinflussung des endlagerrelevanten Bereiches zu erwarten ist (vgl. Tabelle 6). Die maximale Einwirkungstiefe von durch Diagenese bedingten Deformationen kann nicht konkret benannt werden, da z. B. bei polygonalen Störungssystemen die Mächtigkeit der Formation, die von der Kompaktion betroffen ist, maßgebend für die Einwirktiefe ist (Goultly 2008). Eine potenzielle Beeinflussung des endlagerrelevanten Bereiches ist für Deformationen durch Diagenese daher nicht völlig auszuschließen.

Impaktereignisse sind in der Lage, den endlagerrelevanten Bereich vollständig zu zerstören. So zeigt zum Beispiel das Impaktereignis des Nördlinger Rieses unterschiedlich stark zertrümmertes Gestein bis in mehrere Kilometer Tiefe (Stöffler et al. 2013). Forschungsbohrungen, die den Rieskrater in den siebziger Jahren untersucht haben, zeigen stark zertrümmertes Gestein bis in 1,2 km Tiefe (Gudden 1974; Vidal 1974).

Subrosionsprozesse können Zutrittmöglichkeiten für Fluide schaffen und durch Verbruch von Lösungshohlräumen den endlagerrelevanten Bereich schädigen. Hinsichtlich der verschiedenen Lösungsprozesse besteht beispielsweise laut Jeannin et al. (2015) das größte Risiko für die Errichtung eines Endlagers in der hypogenen Verkarstung des Muschelkalks, die den Nachbruch der hangenden Schichten bewirken und damit das Wirtsgestein Opalinuston erfassen könnte. Zur Abschätzung der Gefährdung durch Einbrüche über Lösungshohlräumen im Kalkstein nennen Jeannin et al. (2015) folgende Parameter:

- die Lage der potenziellen Hohlräume
- die Größe der Hohlräume
- die Geometrie der Hohlräume
- die Festigkeit der Kalkdecke und der überlagernden Schichten
- der Wasserdurchfluss durch den Hohlraum
- die potenzielle Mischung von tiefen und untiefen Wässern
- die Dauer (Alter des Hohlraumes)

Bei Verkarstungserscheinungen in Karbonaten und Ablaugungsprozessen von flachlagernden Salzen können die Lösungsprozesse sowohl am Top (Schichtoberseite) als auch an der Basis (Schichtunterseite) des stratigraphischen Entstehungshorizontes auftreten – besonders im Salzhangbereich durch laterale Grundwasserbewegung im Hangenden und Liegenden des Salinars (Prinz & Strauß 2011). Bei Subrosionserscheinungen an Salzstöcken und Salzkissen finden die Lösungsprozesse primär lokal und im obersten Bereich der Salzstruktur statt (Buurman 2010). Die Subrosion von Salz kann laut Buurman (2010) zwischen 200 und 500 m unter GOK reichen und erreicht in Ausnahmefällen 1000 m Tiefe.

Für die Anwendung des Ausschlusskriteriums „aktive Störungszonen – atektonische Vorgänge“ werden die atektonischen Vorgänge als relevant erachtet, für die eine Beeinflussung des endlagerrelevanten Bereichs zu erwarten ist. Zu diesen Vorgängen zählen gemäß Tabelle 6 die Prozesse Senkungen und Einstürze über Lösungshohlräumen und Impaktereignisse. Im folgenden Kapitel 8.1.3 werden atektonische Deformationserscheinungen durch Impaktereignisse, Senkungen und Einstürze über Lösungshohlräumen in Deutschland beschrieben.

8.1.3 Atektionische Deformationserscheinungen in Deutschland

In Deutschland sind vor ca. 14,8 Millionen Jahren (Vidal 1974; Schmieder et al. 2018) die Impaktkrater Nördlinger Ries und Steinheimer Becken mit Durchmessern von 26 km (Stöffler et al. 2013) bzw. 3,8 km (Buchner & Schmieder 2013) entstanden. Das Steinheimer Becken befindet sich in der Schwäbischen Alb, während das Nördlinger Ries ca. 42 km weiter nordöstlich (Buchner & Schmieder 2013) im Grenzgebiet zwischen der

Schwäbischen Alb und der Fränkischen Alb liegt. Beide Krater sind durch dasselbe Impaktereignis entstanden (Hüttner & Schmidt-Kaler 1999). Buchner & Schmieder (2013) untersuchten einen Bohrkern aus dem Jahr 1970, der aus dem Zentrum des Zentralhügels des Steinheimer Beckens aus einer Tiefe von 603 m unter GOK stammt und stieß auf intensiv zerbrochenes Gestein. Das Impaktereignis des Nördlinger Ries wurde im Jahr 1973/74 mit der Forschungsbohrung Nördlingen 1973 nordwestlich von Nördlingen untersucht (Vidal 1974). Im Bereich von 606 – 1206 m unter GOK stieß die Bohrung auf unterschiedlich stark zertrümmertes Kristallingestein (Gudden 1974). Laut Stöffler et al. (2013) wurden Deformationen bis in mehrere Kilometer Tiefe nachgewiesen. Weitere Zeugen des Impaktereignisses sind herausgeschleuderte Bereiche des kristallinen Grundgebirges, welches ehemals von ca. 750 m mesozoischen Einheiten bedeckt war, sowie mehrere hunderttausend Jahre anhaltende hydrothermale Aktivität (Arp et al. 2013).

Die Karstgebiete Deutschlands können auf Grundlage der verkarsteten stratigraphischen und lithologischen Einheiten laut Pfeffer (2003) und Kempe (2005) in sieben Regionen unterteilt werden und sind in der Abbildung 19 dargestellt:

1. Weserbergland und Umrahmung des Münsterländer Beckens (Kreide und Jura-kalke)
2. Rheinisches Schiefergebirge und Harz (Devonische Kalke)
3. Randbereiche der variskischen Gebirgsrumpfe (Kalke, Dolomite, Anhydrit-/Gips-gesteine des Zechsteins)
4. Gebiet zwischen Hannover, Halle und Basel (Muschelkalk und Keuperkalke)
5. Fränkische Alb (malmzeitliche Kalke und Dolomite)
6. Schwäbische Alb (malmzeitliche Kalke und Dolomite)
7. Bayerische Alpen (triassische und kreidezeitliche Kalke)

Einen umfassenden Überblick über zu Verkarstung neigende Gesteine, ihrer geologischen Formationszuordnung und ihrer regionalen Verbreitung in Deutschland ist in Prinz & Strauß (2011) gegeben: Wie auch in den oben genannten sieben Regionen beschrieben, tritt Karbonatkarst weit verbreitet in fast allen geologischen Formationen Deutschlands auf. Sulfatkarstgebiete liegen in Nord-, Mittel- und Westdeutschland und betreffen Gesteine des Zechstein, des Oberen Buntsandstein, des Muschelkalk und des Oberjura. In Süddeutschland und im Thüringer Becken sind dagegen Sulfatgesteine des Mittleren Muschelkalk und des Mittleren Keuper verkarstet. Chloridkarst tritt in Salzgesteinen des Oberen Jura im Weser-Ems-Gebiet auf, sowie in Zechsteinsalzen am südlichen Harzrand. Zudem sind Triassische und Permische Steinsalze in Norddeutschland von Subrosion betroffen (Prinz & Strauß 2011).

Nach Krawczyk et al. (2019) kommt es in Deutschland zu mehreren Hundert Erdfallereignissen pro Jahr. Erdfälle, ausgelöst durch tiefliegenden Karbonatkarst, sind laut (Prinz & Strauß 2011) kaum bekannt. Auch in den bekannten Karbonatkarstgebieten

Fränkische und Schwäbische Alb treten Erdfälle selten auf. Sie sind jedoch die höhlenreichsten und größten zusammenhängenden Karstgebiete Deutschlands (Kempe 2005). Ursache für die häufigsten Erdfälle durch Karbonatkarst sind Verkarstungserscheinungen in den Kalksteinen und Mergelkalksteinen der Oberkreide wie z. B. in der Paderborner Hochfläche. Eines der bekanntesten, durch Sulfatkarst ausgelösten Erdfallgebiete Deutschlands ist der Südharter Zechsteingürtel. Subrosionsbedingte Erdfälle sind vor allem im Werra-Fulda-Becken durch Auslaugung von Zechsteinsalzen weit verbreitet (Prinz & Strauß 2011). In Norddeutschland liegen Erdfallgebiete meist auf Salz-Hochlagen (Krawczyk et al. 2019). Das nördliche Münsterland ist im Gebiet des „Heiligen Feldes“ durch zahlreiche Subrosionstrichter gekennzeichnet. Ursache ist hier die Auslaugung des Münder-Mergel (Oberjura-Unterkreide) (Dölling & Stritzke 2009).

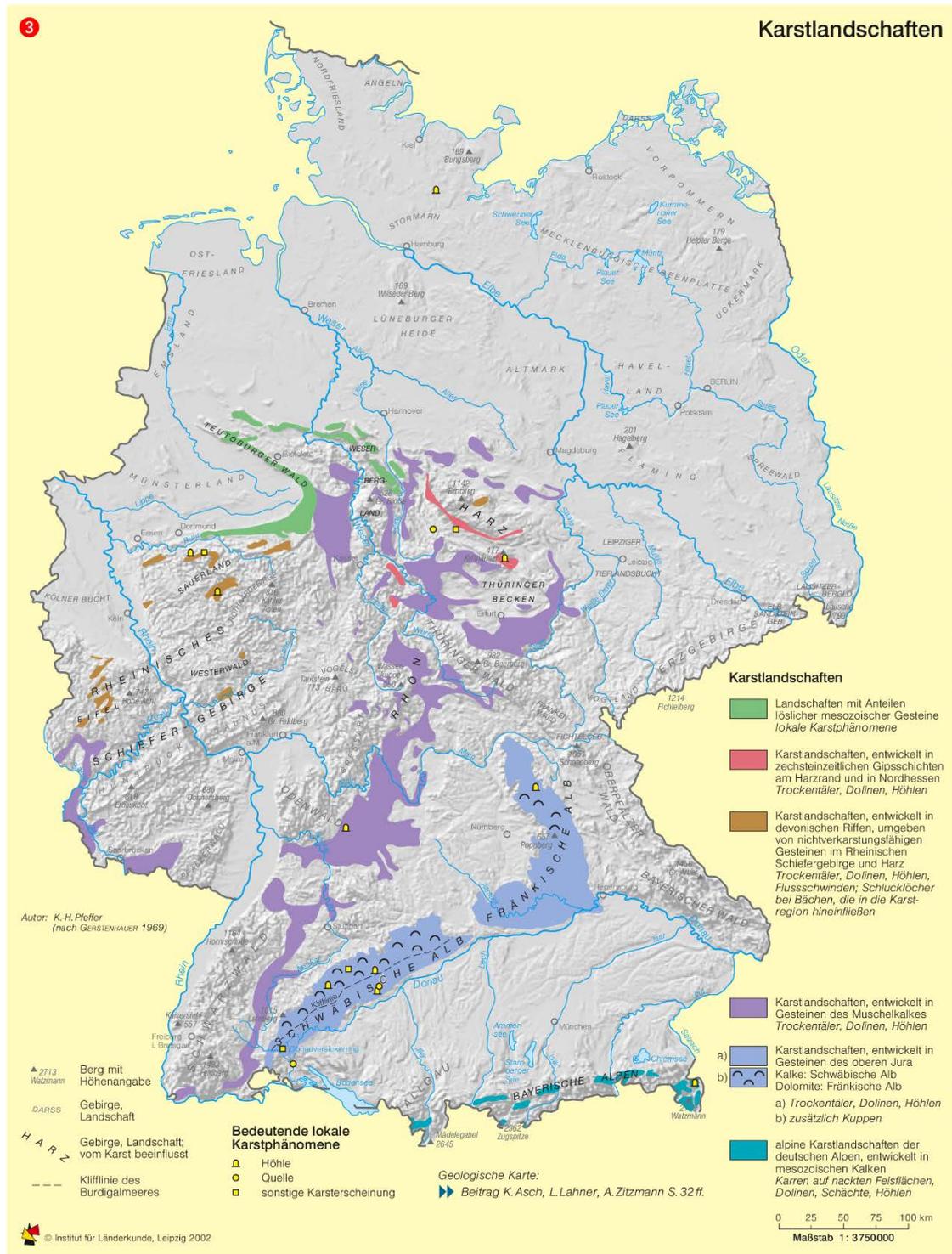


Abbildung 19: Verbreitung der Karstlandschaften Deutschlands und ihre verkarsteten stratigraphischen und lithologischen Einheiten (Pfeffer 2003)

8.2 Datenabfragen und Datengrundlage

Bei der zweiten Datenabfrage zu den Ausschlusskriterien vom Februar 2018 wurden die Geologischen Dienste der Bundesländer und die BGR um Übersendung von Daten zu

linearen und flächenhaften Objekten von atektonischen Vorgängen gebeten. Im November 2018 wurde diese nach Sichtung der bisherigen Dateneingänge weiter konkretisiert und in einer Nachfrage vom November und Dezember 2018 weitere Daten zu atektonischen Vorgängen abgefragt. Es wurde um Übersendung von Daten zu nicht-endo-gen-tektonisch bedingten Gesteinsdeformationen, z. B. Senkungen und Einstürzen über Lösungshohlräumen, subaerischen und subaquatischen Rutschungen und Deformationen der Gesteine durch Gletscherwirkung und Kryoturbation, gebeten. Von besonderem Interesse waren hierbei Angaben zur Aktivität und zur Entstehungstiefe dieser atektonischen Vorgänge.

Zu den Datenabfragen wurden der BGE Daten zu folgenden atektonischen Vorgängen übermittelt:

- Karsterscheinungen (u. a. Subrosionssenken, Erdfälle, Ponore)
- Massenbewegungen
- Glazitektonische Vorgänge (u. a. Stauchungskomplexe, Verschuppungen)

Insgesamt hat die BGE von den geologischen Landesbehörden über 70 Shape-Dateien mit knapp 200 000 atektonischen Vorgängen deutschlandweit erhalten, die in die Datenauswertung mit einbezogen wurden. Ähnlich zu den tektonischen Störungszonen ist auch bei den atektonischen Vorgängen die Datenbasis bei den geologischen Diensten der Bundesländer sehr heterogen. Die Daten stammen aus Geologischen Karten verschiedenster Maßstäbe, aus der Tektonischen Karte im Maßstab von 1 : 25 000, den Glazitektonischen Karten im Maßstab von 1 : 500 000 und 1 : 400 000 sowie der Gefahrenhinweiskarte im Maßstab von 1 : 50 000. Auch andere Kartenwerke dienen als Datengrundlage wie Hydrogeologische Karten, die Karte der Geologischen Eisrandlagen im Maßstab von 1 : 50 000 und die Karte der Erdfallhäufungsgebiete im Maßstab von 1 : 50 000. Weitere der BGE zur Verfügung gestellte Daten zu atektonischen Vorgängen basieren auf Subrosionskatastern, Veröffentlichungen der geologischen Dienste, analog vorliegenden Berichten und dem Geotektonischen Atlas (Müller et al. 2016). Eine weitere Datengrundlage sind Publikationen und Berichte zu verschiedenen Projekten, die sich unter anderem mit der Erforschung von Verkarstungen und weiterer Geogefahren beschäftigen.

Es wurden der BGE keine Daten zu den Impaktereignissen Nördlinger Ries und Steinheimer Becken übermittelt. Daher hat die BGE die Linie Rieskraterrand aus der Hydrogeologischen Karte von Bayern im Maßstab 1 : 100 000 (LfU 2019) mit der Software ArcGIS Pro vektorisiert und in Baden-Württemberg mit den Umrissen der Einheit Riessee-Formation ergänzt, um ein Polygon für den Meteoritenkrater Nördlinger Ries zu erstellen. Das Polygon des Steinheimer Beckens wurde als Umriss der Einheit Steinheimer-Kratersee-Formation aus der Geologischen Karte von Baden-Württemberg im Maßstab 1 : 50 000 (LGRB 2015) vektorisiert.

8.3 Datenaufbereitung

In Vorbereitung der Anwendung der in Kapitel 8.4 beschriebenen Anwendungsmethode hat die BGE zunächst die gelieferten Daten, zu denen ein Hinweis vorlag, dass es sich um vermutete oder nicht überprüfte Angaben handelt, aussortiert. Dies bedeutet, diese wurden nicht für die Ermittlung von ausgeschlossenen Gebieten verwendet.

Weiterhin sind Angaben zur Entstehungstiefe der atektonischen Vorgänge notwendig, um die Daten in atektonische Vorgänge mit Entstehungstiefen größer als 300 m unter GOK und kleiner als 300 m unter GOK einteilen zu können. Dadurch werden oberflächennahe Strukturen von den Strukturen unterschieden, die den endlagerrelevanten Bereich beeinflussen. Der BGE sind für nur 0,5 Prozent der atektonischen Vorgänge Informationen zur Entstehungstiefe bekannt. Für 14 Prozent der Objekte liegen jedoch Informationen zum stratigraphischen Entstehungshorizont vor. Diese können verwendet werden um Entstehungstiefen zu ermitteln. Der Arbeitsprozess zur Übersetzung der in den Daten enthaltenen Entstehungshorizonte in für die Auswertung der BGE benötigten Entstehungstiefen sah wie folgt aus:

Zunächst erfolgte eine Plausibilitätsprüfung der übermittelten stratigraphischen Entstehungshorizonte, indem auf Basis wissenschaftlicher Literatur überprüft wurde, ob im angegebenen Gebiet Erdfälle im Bereich solcher Entstehungshorizonte bekannt sind. Anschließend wurden aus den der BGE vorliegenden geologischen 3D-Ländermodellen die Entstehungshorizonte inklusive Tiefeninformation exportiert. Mit dem Werkzeug „Räumliche Verbindung“ im Geoinformationssystem ArcGIS Pro wurden die Punkt- bzw. Polygondaten von Erdfallflächen mit den jeweiligen Schichtoberseiten der Entstehungshorizonte aus den 3D-Modellen verschnitten, wodurch Entstehungstiefen zu jedem Erdfall generiert wurden. War die Schichtoberseite nicht verfügbar, wurde die Schichtunterseite des darüber lagernden Horizonts verwendet, da die beiden identisch sind. Für dieses Vorgehen wird im Folgenden die verwendete Datengrundlage beschrieben.

Für atektonische Vorgänge, deren Entstehungsursache die Lösung flachlagernder Salze ist, wurde zur Ermittlung von Entstehungstiefen die Tiefe des Zechsteintops aus geologischen 3D-Modellen extrahiert. Verwendet wurden das GTA3D-Modell von Niedersachsen, das 3D-Modell der geothermischen Tiefenpotenziale von Hessen und das 3D-Übersichtsmodell des Thüringer Beckens.

In Nordrhein-Westfalen sind die Entstehungshorizonte der Erdfälle und Subrosionssensken der Mittlere Muschelkalk und der Mittlere Keuper. Zur Tiefenermittlung dieser stratigraphischen Horizonte wurde das Landesmodell des Geologischen Dienstes Nordrhein-Westfalen herangezogen. Da in dem Landesmodell die Schichtoberseiten der notwendigen Horizonte nicht verfügbar sind, wurde die Schichtunterseite des darüber lagernden Jurahorizonts verwendet.

Als Grundlage zur Tiefenermittlung des steil lagernden Zechsteinhorizontes in Niedersachsen wurden anstelle eines 3D-Modells die Salzstruktur-Polygone aus dem Projekt „InSpEE“ (von Goerne et al. 2016) verwendet. Dabei wurde die Tiefenermittlung auf Basis der Datenblätter oder Niveauschnitte aus dem Projekt „InSpEE“ durchgeführt. Eine

Einschätzung, ob Salzstrukturen die Entstehungsursache nahegelegener Erdfälle sind, erfolgte auf Basis einer visuellen Clusterbildung. Von einem kausalen Zusammenhang wurde ausgegangen, wenn die Anordnung von Erdfällen räumlich der Geometrie des Salzstocks folgt.

Es erfolgte keine Übersetzung in die Entstehungstiefe, wenn der Top des Entstehungshorizontes laut der Geologischen Übersichtskarte (BGR 2019b, Maßstab 1:250.000) an der Erdoberfläche liegt. In diesem Fall konnte keine stratigraphische Tiefenzuordnung erfolgen und es wurde von einer oberflächennahen Struktur ausgegangen.

8.4 Anwendungsmethode

Die Ermittlung von ausgeschlossenen Gebieten erfolgt für atektonische Vorgänge, deren Entstehungstiefe bzw. Einwirkungstiefe bekannt ist bzw. durch die BGE ermittelt wurde und mindestens 300 m unter GOK liegt, analog zu aktiven Störungszonen, indem ein Sicherheitsabstand von 1000 m auf die jeweiligen atektonischen Vorgänge addiert wird. Dieses Vorgehen beschränkt sich auf die in Tabelle 6 genannten atektonischen Vorgänge, die den endlagerrelevanten Bereich potenziell beeinflussen können (Senkungen und Einstürze über Lösungshohlräume und Impaktereignisse).

Der Ausschluss erfolgt für sämtliche endlagerrelevanten Tiefen, wenn Verkarstungserscheinungen in Karbonaten (Kalkstein, Dolomit), Ablaugungsprozesse von flachlagernden Salzen oder Impaktereignisse (Meteoritenkrater) vorliegen. Bei Subrosionserscheinungen an Salzstöcken und Salzkissen erfolgt der Ausschluss bis zum Top-Salz, da die Lösungsprozesse primär lokal und im obersten Bereich der Salzstruktur stattfinden (Buurman 2010). Da bei epigenem Karst die Lösungsprozesse durch Einwirkung meteorischer Wässer an der Schichtoberseite beginnen (Jeannin et al. 2015) und die genaue Lage der Subrosions- und Verkarstungserscheinungen innerhalb des Entstehungshorizontes unbekannt ist, erfolgt ein Ausschluss nur, wenn sich die Schichtoberseite in Tiefen von mindestens 300 m unter GOK befindet. Hypogener Karst, bei dem die Lösungsprozesse durch aufsteigende Tiefenwässer initiiert werden (Jeannin et al. 2015), wurden in diesem Verfahrensschritt aufgrund fehlender Daten nicht betrachtet.

8.5 Ergebnisse

Insgesamt wurden 582 atektonische Vorgänge als relevant bewertet. Eine nach Bundesländern sortierte Übersicht ist in Tabelle 7 zu finden. Die für atektonische Vorgänge ermittelten ausgeschlossenen Gebiete sind in Abbildung 20 dargestellt.

Tabelle 7: *Relevante atektonische Vorgänge für die Ermittlung von ausgeschlossenen Gebieten*

Bundesland	Anzahl atektonischer Vorgänge	Datengrundlage
Baden-Württemberg	1	Meteoritenkrater: Umriss der Steinheim-Kratersee-Formation aus der Geologischen Karte von Baden-Württemberg im Maßstab 1 : 50 000 (LGRB 2015)
Bayern	1	Meteoritenkrater: Rieskraterrand aus der digitalen Hydrogeologischen Karte von Bayern im Maßstab 1 : 100 000 (LfU 2019) und Riessee-Formation aus der Geologischen Karte von Baden-Württemberg im Maßstab 1 : 50 000 (LGRB 2015)
Hessen	193	Erdfälle: Topographische Karte im Maßstab 1 : 25 000; Veröffentlichungen und Beschreibungen im Gelände
Niedersachsen	377	Erdfälle: Gefahrenhinweiskarten im Maßstab 1 : 50 000
Nordrhein-Westfalen	9	Erdfälle, Subrosionssenken: Auskunftssystem „Gefährdungspotenziale des Untergrundes in Nordrhein-Westfalen“
Thüringen	1	Subrosionssenke: Subrosionskataster

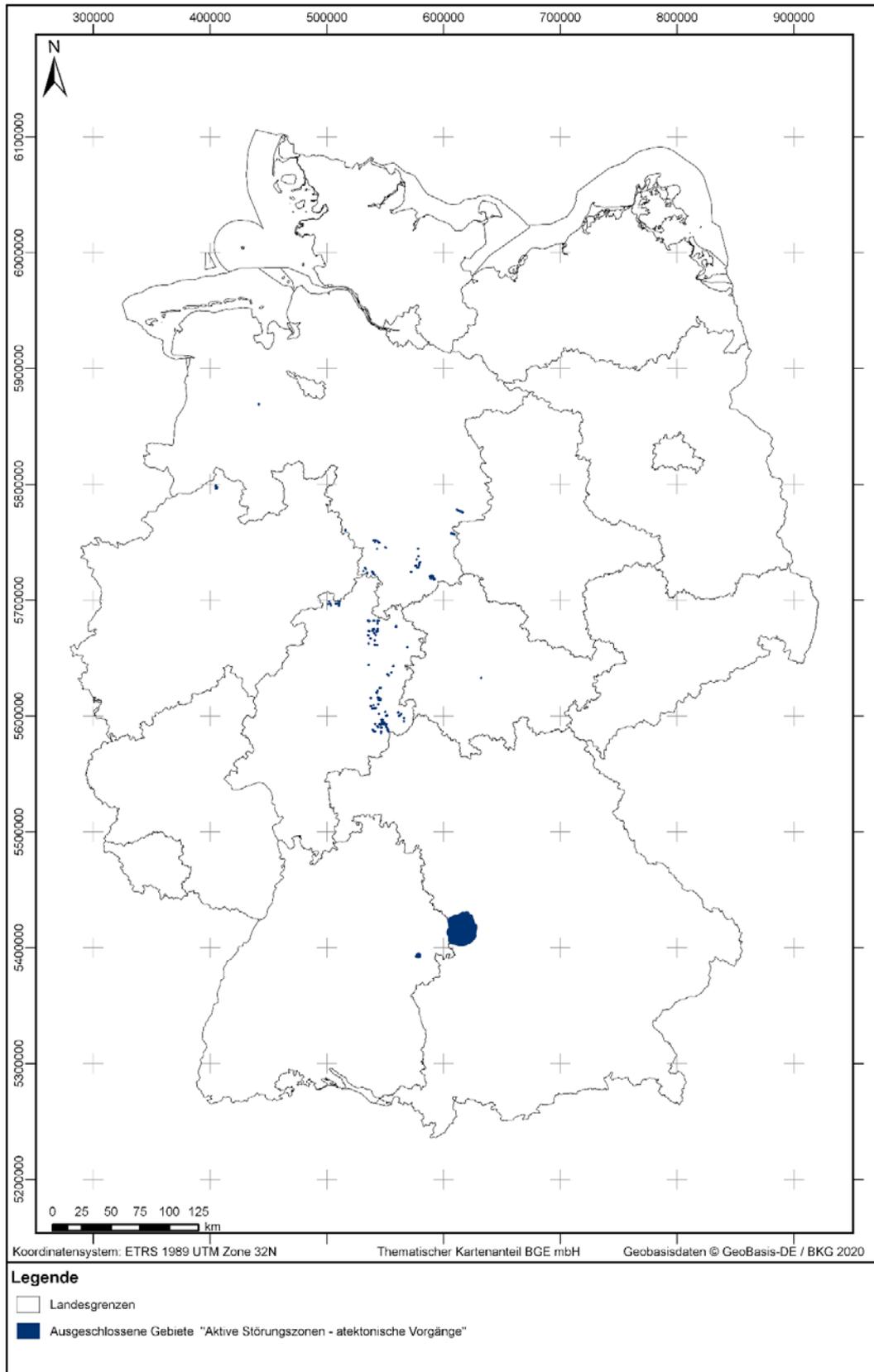


Abbildung 20: Ausgeschlossene Gebiete nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „aktive Störungszonen – atektonische Vorgänge“

Im Norddeutschen Becken Niedersachsens werden 35 Erdfallflächen als relevant bewertet, die ihre Ursache in Subrosionsvorgängen des Salzstocks Harliberg (Top 333 m unter GOK) haben. Der Salzstock Harliberg liegt an der Grenze zu Sachsen-Anhalt. Von den 35 Erdfällen ereigneten sich 27 Erdfälle direkt über dem Salzstock und acht Erdfälle einige Meter westlich und östlich lateral davon entfernt. 144 Erdfallflächen wurden über dem Salzstock Asse (Top 15 m) und über bzw. im Nahbereich eines Salzkissens identifiziert, dessen Top unterhalb 300 m unter GOK liegt. Die Erdfälle über dem Salzstock Asse folgen dem Verlauf des Salzstocks und des angrenzenden Salzkissens. Die Erdfälle bilden daher ein Cluster und können einem Entstehungsgebiet zugeordnet werden. Zwei weitere Erdfallflächen befinden sich über einem Salzkissen, das südlich von Oldenburg in Nordwest-Niedersachsen liegt. Subrosionsvorgänge flachlagernder Zechsteinformationen sind Ursache weiterer Erdfälle, die in Niedersachsen als relevant bewertet werden: Am Zechsteinsaum des südlichen Harzrandes ereigneten sich 141 Erdfälle, deren Flächen aufgrund ihrer Entstehungstiefe von tiefer 300 m unter GOK zur Ermittlung ausgeschlossener Gebiete herangezogen wurden. Weitere ausgeschlossene Gebiete befinden sich im Pyrmonter Bergland, wo fünf Erdfallflächen identifiziert wurden sowie im Weserbergland in der Umgebung von Holzminden und Höxter, wo weitere 50 Erdfallflächen liegen.

In Nordrhein-Westfalen wurden ausgeschlossene Gebiete auf Basis von sechs Erdfallflächen und drei Subrosionssenken ermittelt, deren Entstehungshorizonte im Mittleren Muschelkalk sowie im Mittleren Keuper liegen. Diese Strukturen liegen im Bereich des Uffeler Moores und des Herthasees nahe der nordwestlichen Grenze zu Niedersachsen.

Im Hessischen Zechstein-Becken sind 193 Erdfallflächen Ursache ausgeschlossener Gebiete. Im Thüringer Becken ergibt sich ein ausgeschlossenes Gebiet durch eine Subrosionssenke, die durch Subrosion des Zechsteinsalzes entstanden ist.

In Süddeutschland wurden zudem die Impaktkrater des Nördlinger Ries (Bayern) und des Steinheimer Beckens (Baden-Württemberg) zur Ermittlung ausgeschlossener Gebiete herangezogen.

Das Ausschlusskriterium „aktive Störungszonen“ umfasst sowohl atektonische Vorgänge als auch die im Kapitel 7 erläuterten tektonischen Störungszonen. In Abbildung 21 sind aus diesem Anlass zusammenfassend die nach § 22 Abs. 2 Nr. 2 StandAG in Phase I, Schritt 1 des Standortauswahlverfahrens ausgeschlossenen Gebiete dargestellt.

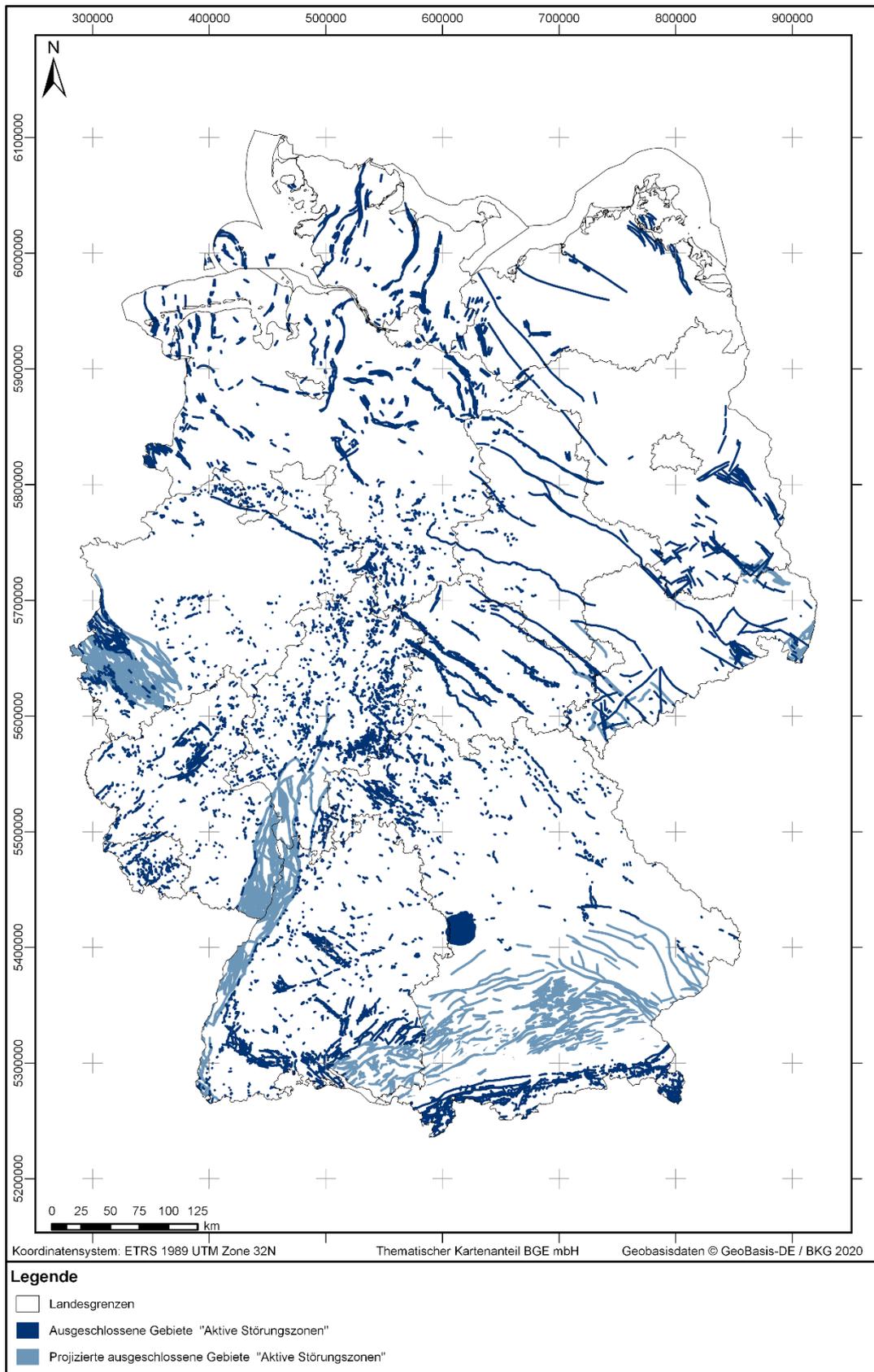


Abbildung 21: Ausgeschlossene Gebiete nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „aktive Störungszonen“

9 Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bohrungen

9.1 Einführung

„(2) Die Ausschlusskriterien sind:

[...]

3. Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit

das Gebirge ist durch gegenwärtige oder frühere bergbauliche Tätigkeit so geschädigt, dass daraus negative Einflüsse auf den Spannungszustand und die Permeabilität des Gebirges im Bereich eines vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs oder vorgesehenen Endlagerbereichs zu besorgen sind; vorhandene alte Bohrungen dürfen die Barrieren eines Endlagers, die den sicheren Einschluss gewährleisten, in ihrer Einschlussfunktion nachweislich nicht beeinträchtigen;

[...]“

§ 22 Abs. 2 Nr. 3 StandAG

In dem Ausschlusskriterium „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit“ sind die drei Bergbauarten nach Reuther (1989), Tiefbau, Tagebau und Bohrlochbergbau, zusammengefasst. Die BGE unterscheidet dabei nicht zwischen Bohrungen zum Zweck bergbaulicher Tätigkeiten und sonstigen Bohrungen im Sinne von § 127 BbergG (BbergG, Stand 19.06.2020), sondern behandelt im ersten Verfahrensschritt der Standortauswahl alle Bohrungen gleichermaßen. Da sich die Vorgehensweisen, angefangen von der Datenerhebung und -haltung bis hin zur Anwendungsmethode des Ausschlusskriteriums bei Bergwerken und Bohrungen stark voneinander unterscheiden, werden Bergwerke und Bohrungen in diesem Bericht separat erläutert. In diesem Kapitel wird das Thema „Bohrungen“ behandelt. Der Umgang mit Bergwerken wird im Kapitel 10 „Ausschlusskriterium Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bergwerke“, dargelegt.

9.2 Fachliche Grundlagen

Dieses Kapitel dient der allgemeinen Einführung in das Thema Bohrungen. Es soll den Einstieg in die Thematik erleichtern, ohne einen Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben. Weiterführende Informationen sind in der entsprechenden Fachliteratur nachzulesen, z. B. Inglis (1987), Buja (2009, 2014), Reich (2015).

Eine Bohrung ist ein vertikales, horizontales oder schräg gerichtetes Bohrloch, welches von seinem Ansatzpunkt aus, der sich auf der Geländeoberkante oder innerhalb von Grubenbauen befinden kann, mittels mechanischer Vorrichtung vorangetrieben wird. Bohrungen finden in den unterschiedlichsten Bereichen Anwendung. Neben dem Einsatz bei der Suche und Erkundung von Bodenschätzen spielen Bohrungen u. a. bei der hydrologischen Erkundung und Brunnenbau, bei Baugrunduntersuchungen, bei der Bergwerksplanung, bei der Erkundung und Erstellung von Untergrundspeichern, bei der

Herstellung von Pfahlgründungen für Bauwerke, beim Schachtbau oder auch im Tunnelbau eine wichtige Rolle (Düring 1983).

Die Ursprünge der Bohrtechnik reichen bis ins Neolithikum (5000 – 2000 vor Christus) zurück. So wurden bereits für die Herstellung von Steinwerkzeugen Bohrungen genutzt (Marx 1999). Bei Ausgrabungen in Ägypten wurden Nachweise gefunden, die zeigen, dass beim Bau der Pyramiden (2550 – 2315 vor Christus) Diamanten bei Gesteinsbohrungen Verwendung fanden. Zudem ist aus Berichten bekannt, dass in China bereits zwischen 600 und 260 vor Christus bis zu 600 m tiefe Bohrungen abgeteuft wurden. Die Entwicklung der Bohrtechnik in Europa begann nachweislich erst Ende des Mittelalters (Buja 2009).

Bis zum Ende des 19. Jahrhunderts war die Schlagbohrtechnik das ausschließlich angewandte Bohrverfahren. Dieses kam bei dem Bedarf nach immer größeren Bohrtiefen jedoch an seine Grenzen. Seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts ist das Rotary-Bohrverfahren zum neuen Standard der Bohrtechnik geworden. Dabei handelt es sich um ein Drehbohrverfahren, mit dem die Erkundung des Untergrunds oder die Aufsuchung und Gewinnung von Rohstoffen mit Hilfe von Rollenmeißeln bis in eine Tiefe von 10 km möglich ist. Dieses Verfahren findet vor allem im Erdöl- und Erdgasbereich, aber auch in der Tiefengeothermie Anwendung. Durch eine speziell eingebrachte Spülung mit konstanter Zirkulationsrate wird die Bohrsohle gereinigt, das Bohrklein über den Ringraum ausgelesen und das Bohrloch temporär stabilisiert (Marx 1999).

Die erste Aufzeichnung einer bewusst gerichtet ausgeführten Bohrung stammt aus den frühen 1930er Jahren in Kalifornien (Inglis 1987). Diese neue Bohrtechnik ermöglichte es, Bohrungen nicht nur vertikal zu teufen, sondern gerichtete Bohrpfade zu planen und beabsichtigte Bohrziele anzusteuern. Diese Technik zur Beherrschung des Bohrlochverlaufs wurde stetig weiterentwickelt und verbessert, insbesondere im Zuge der Erschließung von Erdöl- und Erdgasfeldern. Durch eine permanente Ortsbestimmung des Meißels während des Bohrvorgangs ist eine zielgerichtete Navigation möglich. Die Messtechnik während des Bohrvorgangs, ohne Unterbrechung des Bohrprozesses, wird MWD-Technik (Measuring While Drilling – Bohrlochvermessung während des Bohrens) genannt. Neben Angaben zur Ortsbestimmung können weitere Messungen zum Meißelndruck, Drehmoment, der Temperatur usw. durchgeführt werden (Teodoriu & Falcone 2014). Die Qualität der Messergebnisse hat über die Jahre stetig zugenommen, sodass mittlerweile z. B. der Bohrfad sehr exakt vermessen werden kann.

Aus Deutschland ist bekannt, dass die erste Salzbohrung im Jahr 1820 abgeteuft wurde. Die erste, noch erfolglose Erdölbohrung in Deutschland ist auf das Jahr 1858 in Wietze bei Celle datiert. Ziel der Bohrung war ursprünglich die Erkundung von Braunkohlevorkommen. Als besonderes Ereignis galt die Überschreitung der 1000 m-Tiefengrenze in der Bohrung Sperenberg im Jahre 1871 (Düring 1983). Die erste deutsche Rotary Ölbohrung wurde im Jahr 1925 in Nienhagen durchgeführt (Buja 2009).

In den Jahren von 1987 bis 1995 wurde das Kontinentale Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland (KTB) bei Windischeschenbach durchgeführt. Mit einer vertikalen Tiefe von 9101 m ist sie die tiefste Bohrung Deutschlands und zählt zu einer der tiefsten Bohrungen weltweit (Buja 2009).

Es existieren mehrere Ansätze, Bohrungen zu klassifizieren. Eine fachübergreifende Definition, Bohrungen anhand ihrer Endtiefe in Gruppen einzuordnen, besteht jedoch nicht. Für Brunnenbauer z. B. beginnt eine Tiefbohrung bei einer Tiefe von 1000 m, wohingegen in der Erdöl- und Erdgaserkundung Bohrungen bereits ab 500 m Tiefe als Tiefbohrung gelten (Teodoriu & Falcone 2014). In der Geothermie wird erst ab einer Tiefe von 3000 m von Tiefbohrungen gesprochen (Teodoriu & Falcone 2014).

Bohrungen können anhand ihrer Zielsetzung klassifiziert werden. Dazu zählen Such- und Erkundungsbohrungen, die Erkenntnisse über den Untergrund liefern und u. a. bei der Erkundung potenzieller Lagerstätten eingesetzt werden. Eine weitere Bohrart sind Produktionsbohrungen, die der Förderung von Erdgas und Erdöl sowie Thermalwasser dienen. Injektionsbohrungen wiederum werden zur Versenkung, Verpressung oder Injektion von Fluiden im Untergrund genutzt (Teodoriu & Falcone 2014).

Die Durchführung einer Bohrung erfordert eine Reihe technischer Arbeitsschritte. Eine Bohrung beginnt mit dem Setzen des Standrohrs. Dadurch soll verhindert werden, dass die oberen lockeren Erdschichten ins Bohrloch fallen (Buja 2014). Im Anschluss wird mit der Herrichtung des Bohrplatzes fortgefahren. Nach Aufbau der Bohranlage kann mit dem Einbau der Ankerrohrtour begonnen werden. Die Ankerrohrtour reicht oftmals bis ins Festgestein und muss im Bohrloch fest verankert sein. Sie soll Spülungsverluste und Nachfall des lockeren Erdreichs verhindern. Des Weiteren muss sie die Lasten nachfolgender Rohrfahrten aufnehmen. Auf ihr ist zudem der Blowout Preventer montiert (Buja 2014), eine Kombination verschiedener Sicherheitsventile zum Verschließen der Bohrung, um einen unkontrollierten Gasaustritt zu verhindern. Im Fall einer drohenden Eruption muss die Ankerrohrtour die dabei entstehenden, nach oben gerichteten Zugkräfte aufnehmen (Düring 1983). Je nach Nutzung und Länge des Bohrlochs folgen darauf eine bis mehrere Zwischenrohr Touren (Technische Rohrtour) oder Liner (d. h. die Rohrtour wird nicht bis zutage eingebaut). Ein vereinfachtes Verrohrungsschema ist in Abbildung 22 dargestellt. Die jeweiligen Rohrtouren werden zementiert, um das Bohrloch zu stabilisieren und die Rohre im Bohrloch zu befestigen. Zudem sollen durch die Zementation der Ein- und Austritt von Fluiden vermieden sowie die Trennung unterschiedlicher geologischer bzw. produzierender Horizonte gewährleistet werden (Buja 2014).

Während des eigentlichen Bohrvorgangs wird mit einer Bohrspülung gearbeitet. Sie ist von entscheidender Bedeutung beim Abteufen einer Bohrung. Bohrspülungen dienen u. a. der Kühlung der Bohrwerkzeuge und des Bohrstrangs, der Austragung des Bohrkleins aus dem Bohrloch, der Stabilisierung der Bohrlochwand, der Vermeidung unkontrollierter Gasaustritte oder der Übertragung der Messdaten während des Bohrvorgangs. Bei Tiefbohrungen wird eine an die jeweilige Geologie angepasste schwere Bohrspülung verwendet, in der Regel ein Bentonit-Wasser-Gemisch.

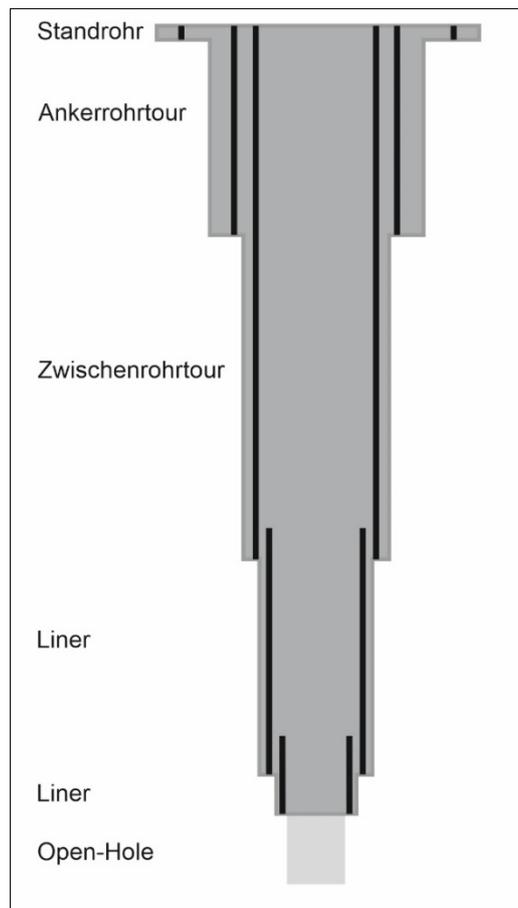


Abbildung 22: Vereinfachte Darstellung eines Verrohrungsschemas einer Tiefbohrung

Durch den Bohrvorgang sowie durch die eingebrachte Bohrspülung wird das umgebende Gestein im Bereich des Bohrlochs mechanisch, hydraulisch, thermisch und chemisch beeinflusst. Dabei kommt es zu Änderungen im lokalen Spannungsfeld und zu lokalen Permeabilitätsveränderungen im Gebirge, z. B. durch Rissbildung sowie Ausbrüche in Bohrlochnähe. Der Einwirkungsbereich, in dem von einer dauerhaften Schädigung des Gebirges durch den Bohrvorgang ausgegangen werden kann, wird nach Literaturangaben auf ca. einen Meter um das Bohrloch herum abgeschätzt (Zoback 2009; Gudmundsson 2011). Dieser Schädigungsbereich hängt jedoch stark von den Eigenschaften des umgebenden Gebirges und der Art bzw. der Nutzung der Bohrung ab. Insbesondere bei Bohrungen, die zur Förderung von Kohlenwasserstoffen oder Thermalwässern genutzt werden, ist von einem deutlich größeren Schädigungsbereich im entsprechenden Tiefenbereich der Förderung oder Injektion auszugehen. Nach Bohrende werden häufig vielfältige Tests durchgeführt und die Bohrungen hydraulisch oder chemisch stimuliert.

Nach Abschluss der Bohrarbeiten findet die Komplettierung, sprich der Endausbau der Bohrung, statt. Die Bohrung wird mit den technischen Einrichtungen ausgebaut, die zur

Instandhaltung der Bohrung und Förderung des Rohstoffs benötigt werden. Die Komplettierungsmaßnahmen werden dabei an die vorliegenden geologischen Verhältnisse und den Zweck der Bohrung angepasst.

In Deutschland sind Bohrungen, die nicht weiter genutzt werden, rückzubauen. Dies bedeutet u. a., dass das Bohrloch verfüllt wird. Diese Maßnahmen haben jedoch keinen bzw. nur einen geringen Einfluss auf den geschädigten Gebirgsbereich. Es kann dadurch lediglich eine weitere Schädigung verhindert werden.

9.3 Datenabfragen und Datengrundlage

Im Rahmen der Datenabfrage zum Ausschlusskriterium „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bohrungen“ bat die BGE die zuständigen Bundes- und Landesbehörden um Zusendung der Bohrdaten für den Tiefenbereich von 100 m bis 1500 m, unter anderem mit Angaben zum Bohransatz- und Bohrendpunkt, zur Länge und Verlauf des Bohrlochs sowie zur Bezeichnung, Nutzung und zum Zustand des Bohrlochs. Das abgefragte Tiefenintervall ist auf § 21 Abs. 2 StandAG zurückzuführen, in dem geplante Vorhaben ab einer Endtiefe von 100 m unter GOK eine gesonderte Zulassung benötigen, um schädliche Auswirkungen auf einen Endlagerstandort zu vermeiden.

Eine weitere Abfrage nach Bohrdaten erfolgte im Rahmen der Datenbeschaffung für die Anwendung der Mindestanforderungen am 6. Juni 2019. Der Fokus dieser Abfrage lag auf Schichtenverzeichnissen bzw. kompletten Bohrakten für Bohrungen tiefer 300 m unter GOK, um den endlagerrelevanten Bereich besser abbilden zu können.

Die durch die Bundes- und Landesbehörden zur Verfügung gestellte Datengrundlage der Bohrungen ist sehr heterogen. Die Bandbreite an Datenlieferungen reicht von Informationen, die sich nur auf die Stammdaten von Bohrungen beziehen (Ansatzpunkt und Bohrlochlänge), bis hin zu sehr ausführlichen Bohrdokumentationen.

Des Weiteren wurden die der BGE bereitgestellten Bohrdaten in verschiedenen Dateiformaten (z. B. .shp, .xlsx, .txt, .pdf etc.) übermittelt. Neben Bohrdaten von einzelnen Landesbehörden wurde der BGE zusätzlich ein Auszug aus der Kohlenwasserstoff-Datenbank (KW-Datenbank) durch das LBEG in Hannover zur Verfügung gestellt. Diese bundeslandübergreifende Datenbank liefert neben Schichtenverzeichnissen und geophysikalischen Bohrlochmessungen auch Informationen zu den Stammdaten und Bohrpfeilen von Bohrungen.

Zur Vervollständigung des Bohrdatensatzes mit Bohrungen mit einer Endtiefe größer oder gleich 100 m hat die BGE die Datenlieferungen, die im Zuge der Abfrage der Ausschlusskriterien geliefert wurden, mit allen weiteren Datenlieferungen abgeglichen. Ein wesentlicher Fokus dieses Abgleichs lag dabei auf Datenlieferungen mit digitalen Schichtenverzeichnissen und der KW-Datenbank. Ein Teil der Bohrungen konnte über eine eindeutige Identifikationsnummer innerhalb der verschiedenen Datenlieferungen zugeordnet werden, ein weiterer Teil über Namensbezeichnungen. Für den Fall, dass diese Informationen nicht vorlagen, wurde der Abgleich über eine Übereinstimmung der

Lage der Bohrungen sowie deren Attribute (Ansatzhöhe, Bohrlochlänge und Namensteile) vorgenommen. Im Ergebnis wurde der Gesamtdatensatz, den die BGE im Zuge der Datenabfrage zu den Ausschlusskriterien enthalten hat, um weitere 1839 Bohrdatensätze bzw. zusätzliche Angaben zu Bohrpfadern ergänzt.

Insgesamt wurden circa 250 000 Bohrungen mit einer Bohrlochlänge ab 100 m an die BGE geliefert, von denen ca. 50 000 Bohrungen eine Bohrlochlänge von größer 275 m aufweisen. Nur für ca. 15 % der Bohrungen wurde dabei ein Bohrpfad angegeben bzw. war der Bohrpfad aus den gelieferten Informationen zu Dip, Azimut oder Abweichstrecke und Teufenverlust mittels Minimum Curvature- (Inglis 1987) oder Linearem Interpolationsverfahren (Verbindung zweier Punkte durch eine gerade Linie) ermittelbar. Für die überwiegende Zahl der Bohrungen (ca. 85 %) wurden keine Daten zum Bohrpfad an die BGE übergeben. In diesen Fällen wird von einem vertikalen Bohrlochverlauf ausgegangen.

9.4 Datenaufbereitung

Die von den Bundes- und Landesbehörden zur Verfügung gestellten Bohrdaten sind in den unterschiedlichsten Koordinatensystemen angegeben, sodass der Lagebezug auf das von der BGE verwendete Koordinatensystem ETRS 1989 UTM Zone 32 (WKID 25832) vereinheitlicht werden musste. Die anschließende Homogenisierung der neben dem Bohransatz- und Bohrendpunkt gelieferten Zusatzinformationen zu den Bohrungen führte zu dem Ergebnis, dass der BGE nun ein bundesweit einheitlicher und vergleichbarer Bohrdatensatz für die Anwendung des Ausschlusskriteriums „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bohrungen“ nach Methode der BGE, vorliegt.

Der aufbereitete Bohrdatensatz wurde auf Plausibilität geprüft. Bohrungen, deren Angaben nicht plausibel erschienen (z. B. Ansatzhöhe gleich 9000 m NHN), wurden mit einem entsprechenden Vermerk gekennzeichnet und nicht weiter berücksichtigt.

Um die in Kapitel 9.5 von der BGE beschriebene Anwendungsmethode umsetzen zu können, wurden weiterhin die von den Bundes- und Landesbehörden gelieferten Angaben zum Bohransatzpunkt und zur Bohrlochlänge in Bohrlochtiefe (m unter GOK) umgerechnet. Dadurch kann gewährleistet werden, dass alle Bohrungen innerhalb des endlagerrelevanten Tiefenbereichs zwischen 300 m unter GOK und 1500 m unter GOK bei der Umsetzung der Anwendungsmethode erfasst werden – auch Bohrungen aus Grubengebäuden heraus oder Ablenkbohrungen, deren Ansatzpunkt sich oftmals unterhalb der Geländeoberkante befindet.

Im Zuge der Datenabfragen bei den Bundes- und Landesbehörden sind der BGE einige Datenlieferungen mehrfach zugegangen. Daher hat die BGE auf Basis der homogenisierten Bohrdatenbank eine Prüfung auf Dubletten durchgeführt, um doppelt aufgeführte Bohrdatensätze zu bereinigen.

Die Dublettenprüfung wurde bundeslandweise durchgeführt. Zur Umsetzung der Dublettenprüfung wurden Kriterien definiert, auf deren Basis eine Identifizierung und Entfernung doppelt vorhandener Bohrdatensätze erfolgte. Eine besondere Herausforderung lag dabei in der Identifikation derjenigen Bohrungsdubletten, die unterschiedliche Bohrbezeichnungen und zum Teil sogar Lageabweichungen im Bohransatzpunkt aufweisen.

Anlehnend an den in Kapitel 9.5 dargestellten Sicherheitsabstand von 25 m um eine Bohrung, wird bei der Dublettenprüfung ein Abstand von 25 m zwischen den Bohrungen von der BGE als Entscheidungskriterium zum Ausweisen von Dubletten festgelegt. Bohrungen mit einem Abstand von weniger als 25 m zueinander und mit übereinstimmenden Attributen zur Bohrbezeichnung, Ansatzhöhe und Bohrlochlänge werden als Dublette klassifiziert. Eine Ausnahme sind Dubletten im Bundesland Bayern, da in der Landesbohrdatenbank andere Kennungen als in der KW-Datenbank Verwendung finden. Hier wurden Dubletten neben der Lokation der Bohrung ausschließlich über Angaben zur Ansatzhöhe und zur Bohrlochlänge erkannt.

Die Entscheidung, welche der identifizierten Bohrungsdubletten im weiteren Verfahren Berücksichtigung findet, erfolgt für Bohrungen mit Abständen unter 25 m zueinander unabhängig ihrer Lage. Daher wurden folgende, lageunabhängige Kriterien zur Dublettenentfernung herangezogen: Bohrungen, die über Angaben zum Bohrfad verfügen, wurden im Vergleich zu Bohrungen ohne Angaben zum Bohrfad bevorzugt berücksichtigt. Bei Dubletten, die auf verschiedene Datenlieferanten zurückgehen, wurde der Datensatz der Behörde ausgewählt, die für das entsprechende Bundesland zuständig ist. Bei Dubletten desselben Lieferanten, wurde die zuletzt bei der BGE eingegangene Datenlieferung bevorzugt, es sei denn, die Abweichung der Bohrlochlänge überstieg einen Wert von einem Meter. In diesem Fall wurde die längere Bohrung als Dublette markiert.

Beträgt der Abstand zwischen zwei Bohrungen mit übereinstimmender Bohrbezeichnung, Ansatzhöhe und Bohrlochlänge mehr als 25 m, ist ebenfalls von einer Dublette auszugehen. Bei solch größeren, teilweise im Kilometerbereich liegenden Abständen zwischen zwei Bohrungen kann jedoch keine lageunabhängige Dublettenentfernung erfolgen. Gleichzeitig ist eine Bewertung der „korrekten“ und „inkorrekten“ Lage der Bohrungen auf Basis der vorliegenden Datenlage nicht möglich. Diese Bohrdatensätze entsprechen daher nicht dem Anspruch an Plausibilität, der der Datenauswertung zugrunde liegt, und wurden mit einem entsprechenden Vermerk aus dem Datensatz zur Ermittlung von ausgeschlossenen Gebieten entfernt. Mit den verschiedenen Prüfverfahren wurden insgesamt 902 Bohrdatensätze mit nicht plausiblen Angaben zur Lage oder nicht eindeutige Namensbezeichnungen identifiziert.

9.5 Anwendungsmethode

Zur Ermittlung von ausgeschlossenen Gebieten werden Bohrungen verwendet, deren Einwirkungsbereich den endlagerrelevanten Bereich von 300 bis 1500 m unter GOK erreicht. Die ausgeschlossenen Gebiete werden durch Erzeugung von Sicherheitsabstän-

den mit einem Radius von 25 m um die Bohrpfade generiert, sowohl radial um die Bohrpfade als auch in Richtung des jeweiligen Bohrverlaufs (kuppelartig um die Bohrendpunkte).

In der ersten Phase des Standortauswahlverfahrens ist für die Anwendungsmethode der BGE einzig die Lage der Bohrung im Raum ausschlaggebend. Der Ausschluss erfolgt unabhängig vom Zweck der Bohrungen. Mit der Festlegung durch die BGE, einen 25 m Sicherheitsabstand um jedes Bohrloch zu ziehen, sollen mögliche Lageungenauigkeiten der Bohrung erfasst werden. Dazu zählen Koordinatenungenauigkeiten des Bohransatzpunkts sowie die unterschiedliche Qualität der Bohrfadvermessungen (z. B. Anzahl der Messpunkte). Des Weiteren soll der Sicherheitsabstand den Einwirkungsbereich der Bohrung in das umliegende Gebirge berücksichtigen. Möglicherweise werden die beeinflussten Gebirgsbereiche um Bohrungen in einigen Fällen deutlich größer sein, insbesondere, wenn das Gebirge hydraulisch oder chemisch stimuliert wurde.

Das hier verwendete pauschale Vorgehen ist im Umgang mit ca. 50 000 Bohrungen begründet und im Hinblick auf seinen Detaillierungsgrad für diesen ersten Schritt der Phase I des Standortauswahlverfahrens angemessen.

Abweichend von der oben erläuterten Anwendungsmethode werden bergbauliche Aktivitäten zur Erkundung von Endlagerstandorten behandelt. Gemäß § 22 Abs. 3 StandAG bleiben „*Folgen von Maßnahmen zur Erkundung potenzieller Endlagerstandorte [...] bei der Anwendung des Kriteriums nach Absatz 2 Nummer 3 außer Betracht.*“ Demnach werden die zur Erkundung des Salzstocks Gorleben als potentieller Endlagerstandort durchgeführten bergbaulichen Tätigkeiten und der dabei entstandenen über- und untertägigen Infrastruktur bei der Anwendung des Ausschlusskriteriums „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit“ nicht berücksichtigt. Eine nähere Erläuterung erfolgt im Bericht „Zusammenfassung der bisherigen Studien zum Salzstock Gorleben im Kontext des Standortauswahlgesetzes“ (BGE 2020p).

Für die 2D-Visualisierung der um die Bohrungen erzeugten ausgeschlossenen Volumen muss zwischen vertikalen und abgelenkten bzw. gerichteten Bohrungen unterschieden werden. In den Fällen, in denen der Bohrverlauf nicht senkrecht ist, ist das ausgeschlossene Gebiet nur im 3D-Raum vollständig darstellbar, da der Sicherheitsabstand dem gesamten Bohrfad folgt. Um dies jedoch auch in den Ergebniskarten zu visualisieren, wurde folgendermaßen vorgegangen:

- Für vertikale Bohrungen, die den endlagerrelevanten Tiefenbereich von 300 m unter GOK bis einschließlich 1500 m unter GOK vollständig durchdringen, wurde ein 2D-Polygon mit einem 25 m Sicherheitsabstand um den Bohransatzpunkt erzeugt. Aufgrund des 25 m Puffers unterhalb des Bohrendpunkts ist eine vollständige Durchdringung des endlagerrelevanten Bereichs bereits für Bohrungen mit einer Endtiefe ab 1475 m unter GOK gegeben. Die ausgewiesenen Flächen sind mit der Bezeichnung „ausgeschlossene Gebiete“ in Abbildung 23 visualisiert.

- Für vertikale Bohrungen, die den endlagerrelevanten Bereich von 300 m unter GOK bis einschließlich 1500 m unter GOK nur teilweise durchteufen, d. h. aufgrund des Sicherheitsabstands um den Bohrendpunkt im Tiefenintervall zwischen 275 und 1475 m unter GOK enden, wurde ebenfalls ein 2D-Polygon mit einem 25 m Sicherheitsabstand um den Bohransatzpunkt erstellt. In diesem Fall wurden die erzeugten 2D-Flächen in Abbildung 23 mit der Bezeichnung „projizierte ausgeschlossene Gebiete“ visualisiert.
- Bei Bohrungen mit abgelenktem bzw. gerichtetem Bohrverlauf wurde der den Bohrfad zwischen Geländeoberkannte bis 1500 m unter GOK umgebende Sicherheitsabstand an die Erdoberfläche projiziert. Dieses 2D-Polygon wird in Abbildung 23 mit der Bezeichnung „projizierte ausgeschlossene Gebiete“ visualisiert.

Bei den in der Karte abgebildeten ausgeschlossenen Gebieten handelt es sich um 2D-Darstellungen von 3D-Objekten im Untergrund. Die Bezeichnung „ausgeschlossenes Gebiet“ zeigt an, dass die in der 2D-Karte dargestellten Flächen dem tatsächlichen ausgeschlossenen Gebiet im Untergrund entsprechen. Das ausgeschlossene Gebiet zieht sich, ausgehend von den abgebildeten Flächen, senkrecht durch den gesamten endlagerrelevanten Bereich. Bei dem „projizierten ausgeschlossenen Gebiet“ handelt es sich hingegen um eine 2D-Darstellung eines 3D-Objekts im Untergrund. Die Darstellung des „projizierten ausgeschlossenen Gebiets“ in der Karte weist darauf hin, dass sich an der ausgewiesenen Stelle der Karte im Untergrund ein ausgeschlossenes Gebiet befindet, dessen Lage im Raum sich nur mit Hilfe einer 3D-Software visualisieren lässt. In diesen abgebildeten Gebieten sind im Untergrund sowohl ausgeschlossene Gebiete als auch potenzieller Raum für Wirtsgesteine innerhalb des endlagerrelevanten Tiefenbereichs vorhanden.

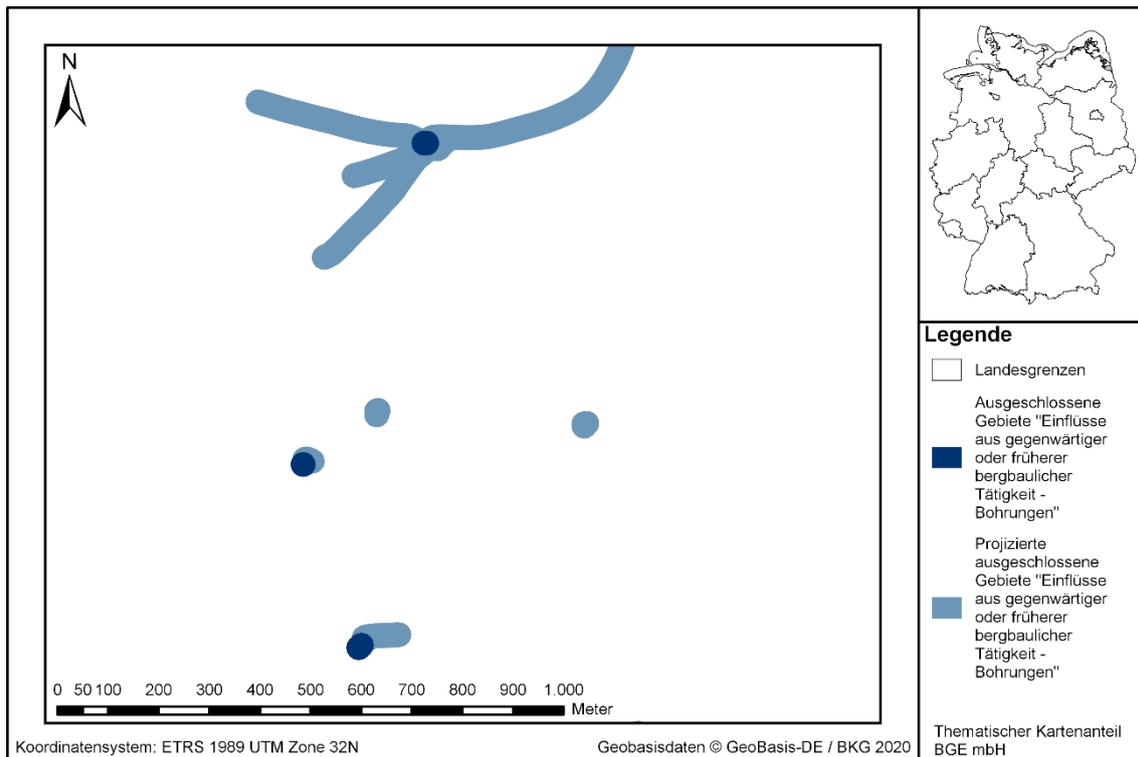


Abbildung 23: *Beispiel der Visualisierung ausgeschlossener Gebiete um vertikale, abgelenkte und gerichtete Bohrungen*

9.6 Ergebnisse

Die BGE-interne Bohrdatenbank enthält nach der Homogenisierung der auszuwertenden Bohrdaten 248 473 Bohrdatensätze. Davon bilden 48 549 Datensätze ein ausgeschlossenes Gebiet, da die entsprechenden Bohrungen den endlagerrelevanten Bereich vollständig oder teilweise durchteufen. Die ausgeschlossenen Gebiete sind in Abbildung 24 im Verhältnis zur Karte stark vergrößert visualisiert.

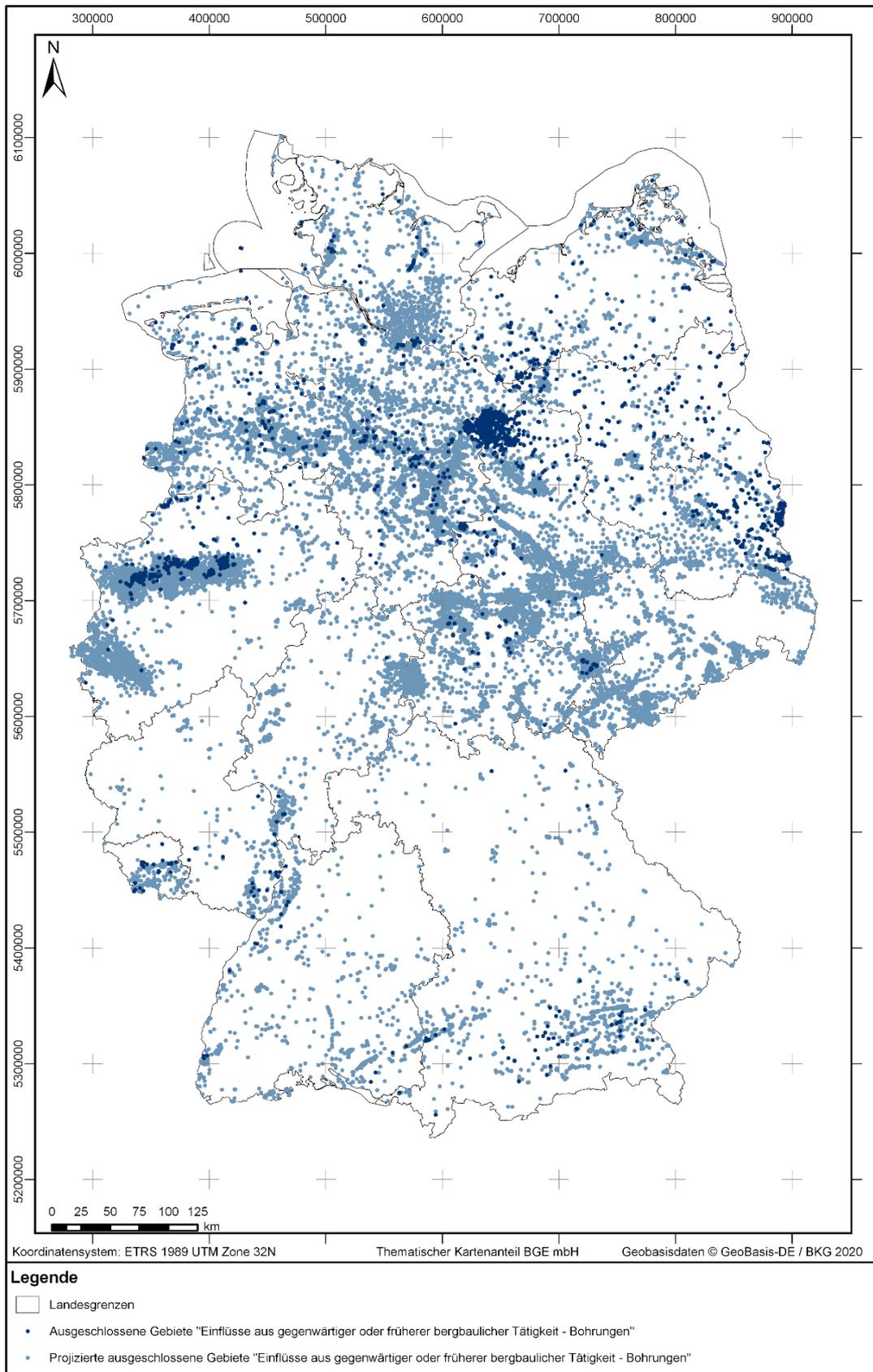


Abbildung 24: *Ausgeschlossene Gebiete nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bohrungen“.*

Es wird darauf hingewiesen, dass die Darstellung der ausgeschlossenen Gebiete in dieser Karte nicht maßstabsgerecht ist, um eine Visualisierung in dem verwendeten Kartenformat zu ermöglichen.

Es zeigt sich, dass die Anzahl der Bohrungen im endlagerrelevanten Tiefenbereich ungleichmäßig über Deutschland verteilt ist. In Regionen mit Rohstoffverkommen ist eine Häufung an Bohrungen aufgrund der Lagerstätten erkundung und Rohstoffgewinnung zu verzeichnen. Das betrifft vor allem Gebiete in Nord- und Mitteldeutschland. In Süddeutschland fanden verstärkte Bohraktivitäten im Bayerischen Molassebecken aufgrund von Erdöl- und Erdgasvorkommen sowie der Tiefengeothermie statt. In den Gebieten mit einer geringen Bohrungsdichte, wie in Teilen von Sachsen, dem nördlichen Bayern, Baden-Württemberg oder Rheinland-Pfalz wurden in der Vergangenheit keine bzw. wenige Erkundungsarbeiten des tieferen Untergrundes durchgeführt. Daher liegen für diese Regionen kaum Bohrdaten vor.

10 Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bergwerke

10.1 Einführung

„(2) Die Ausschlusskriterien sind:

[...]

3. Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit

das Gebirge ist durch gegenwärtige oder frühere bergbauliche Tätigkeit so geschädigt, dass daraus negative Einflüsse auf den Spannungszustand und die Permeabilität des Gebirges im Bereich eines vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs oder vorgesehenen Endlagerbereichs zu besorgen sind; vorhandene alte Bohrungen dürfen die Barrieren eines Endlagers, die den sicheren Einschluss gewährleisten, in ihrer Einschlussfunktion nachweislich nicht beeinträchtigen;

[...]“

§ 22 Abs. 2 Nr. 3 StandAG

Der Ausschluss von Bergwerken und Bohrungen wird im StandAG mit dem Ausschlusskriterium „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit“ geregelt. Aufgrund des unterschiedlichen Hohlraumvolumens und den damit verbundenen gebirgsmechanischen Konsequenzen von Bohrungen und Bergwerken ist ein separater Umgang für den Ausschluss dieser Objekte erforderlich. Aus diesem Anlass wird in Kapitel 9 die Anwendungsmethode für Bohrungen vorgestellt, denen ebenfalls die Förder- und Porenspeicherbohrungen zugeordnet sind. Im Folgenden wird ausschließlich auf bergbauliche Tätigkeiten im Sinne von Bergwerken und Kavernen eingegangen.

10.1.1 Fachliche Grundlagen

Eine bergbauliche Tätigkeit umfasst die Aufsuchung, Erschließung und Gewinnung (Reuther 1989) von Bodenschätzen aus der Erdkruste, um den Bedarf des Menschen an Rohstoffen und Energie zu decken. Insbesondere die Gewinnung eines Bodenschatzes ist dabei immer vom Ort seiner natürlichen Anreicherung abhängig, der sogenannten Lagerstätte. Aufgrund der geologischen Gegebenheiten ist ein Bergwerk stets standortgebunden (Wirtschaftsvereinigung Bergbau 1994) und muss sowohl an die örtlichen Bedingungen im Untergrund als auch an die Bedingungen an der Tagesoberfläche angepasst werden. So kann der Abbau je nach Tiefenlage (bergmännisch: „Teufe“) des Rohstoffs übertägig oder auch in mehreren hundert bis tausend Metern unter der Erdoberfläche erfolgen. Abhängig vom Bedarf und der Verfügbarkeit eines Rohstoffs prägt der Bergbau das Landschaftsbild und die wirtschaftliche Entwicklung ganzer Regionen.

Bei einem Bergwerk zum Abbau von festen Rohstoffen wird in übertägige (Tagebaue, siehe Abbildung 25) und untertägige Gewinnungsbetriebe unterschieden (siehe Abbildung 26). Nach der Beräumung, der Freilegung des zukünftigen Abbaufeldes, werden im Tagebau alle Bodenschichten abgetragen, die sich über der Lagerstätte befinden

(Abraum). Von der Erdoberfläche aus (über Tage) wird dadurch der eigentliche Bodenschatz zugänglich. Dabei dürfen die am Rand des Tagebaus entstehenden Böschungsneigungen gewisse Grenzwinkel nicht überschreiten und müssen immer individuell an die geomechanischen Randbedingungen angepasst werden. Daraus resultierend wird umso mehr Fläche für die bergbauliche Maßnahme in Anspruch genommen, je tiefer im Untergrund sich ein Rohstoff befindet. Es muss mehr Material verkippt (umgelagert) werden und ggf. ist zusätzlich eine Absenkung des Grundwasserspiegels notwendig. Um in diesen zur bergbaulichen Nutzung geplanten Flächen die Rohstoffgewinnung zu ermöglichen, sind vielfältige vorbereitende Maßnahmen notwendig. Dazu zählen beispielsweise Straßenverlegungen, Umsiedlungen oder Ausgleichsmaßnahmen für Landschaft und Natur. Auch aus diesen Gründen werden im Tagebau vorrangig oberflächennahe Bodenschätze abgebaut, sodass der Flächeneingriff möglichst geringgehalten wird.

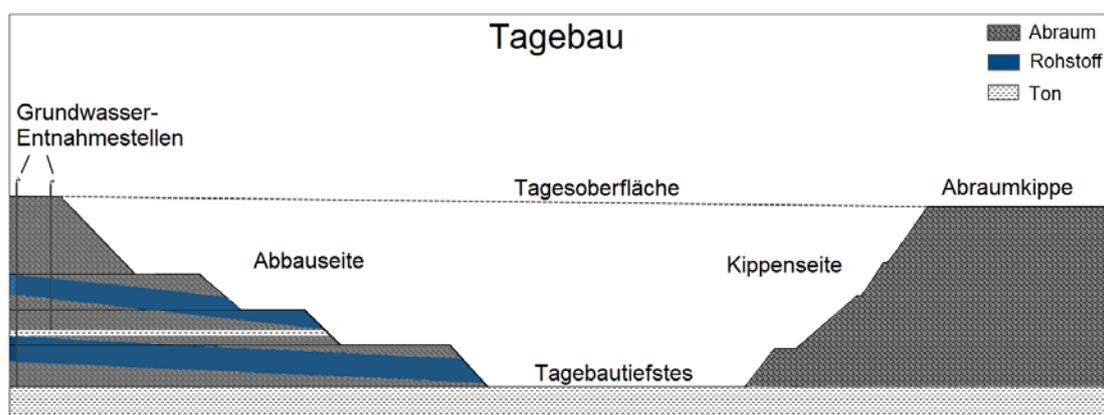


Abbildung 25: Vereinfachtes, schematisches Beispiel eines Tagebaus im Lockergestein.
Im Tagebauvorfeld (links) wurden Grundwasser-Entnahmestellen errichtet, um ein Eindringen von Wasser in den Tagebau zu minimieren.

Beim Untertagebergbau oder Tiefbau wird die Lagerstätte erschlossen, indem unterirdische Hohlräume, sogenannte Grubenbaue, geschaffen werden. Der Zugang zum Rohstoff erfolgt somit ohne ein Abtragen des darüber befindlichen Deckgebirges. Ein untertägliches Bergwerk besteht meist aus mehreren Sohlen (Stockwerken) in unterschiedlichen Tiefen, die miteinander verbunden sind. Eine Verbindung zur Erdoberfläche erfolgt üblicherweise durch mindestens zwei Tagesöffnungen wie z. B. Schächte oder Stollen. Weltweit werden im untertägigen Rohstoffabbau bereits Tiefen von bis zu 3900 m erreicht (Giesen 2013). In Abbildung 26 ist ein vereinfachtes, schematisches Beispiel eines Tiefbaus dargestellt. Hier wird unter anderem gezeigt, wie vom Stollen ausgehend für Explorationszwecke ein Blindschacht (Schacht ohne Anbindung zur Tagesoberfläche) aufgefahren wurde.

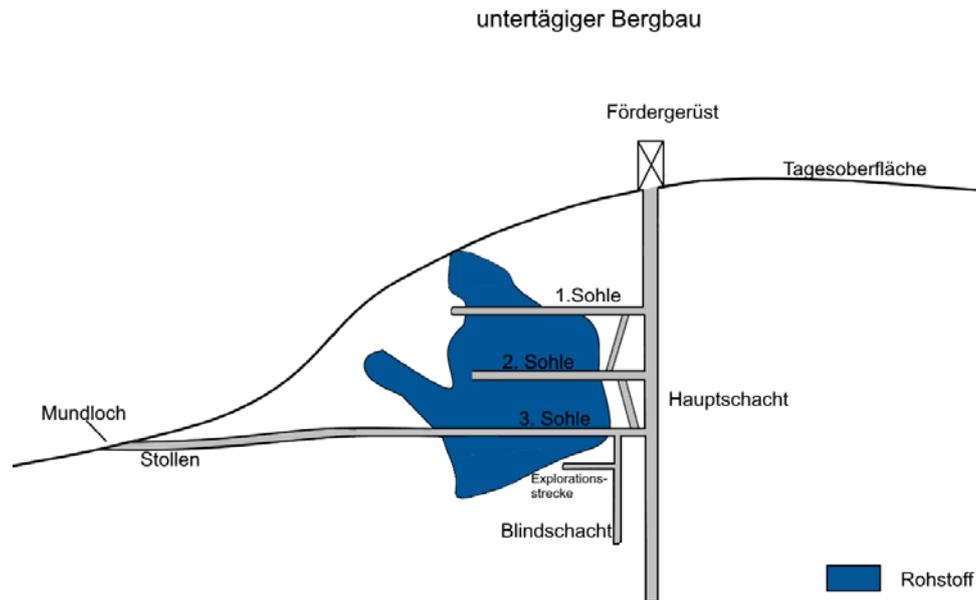


Abbildung 26: Vereinfachtes, schematisches Beispiel eines Erztiefbaus

Neben Bergwerken zur Gewinnung von festen, mineralischen Rohstoffen werden für das Ausschlusskriterium „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bergwerke“ ebenfalls sogenannte Kavernenspeicher in Salzstöcken betrachtet. Eine Kaverne bezeichnet hierbei einen infolge der Salzgewinnung großen unterirdischen und künstlich geschaffenen Hohlraum, der anschließend überwiegend als Fluidspeicher genutzt wird.

Durch bergbauliche Tätigkeit, bei der ein unterirdisches Grubengebäude aufgefahren wird, kommt es, wie in Prinz & Strauß (2011) beschrieben, mit zunehmender Tiefe aufgrund des steigenden Gebirgsdrucks zu Lastumlagerungen im umliegenden Gebirge. Infolge von Spannungsumlagerungen finden Konvergenzbewegungen des umgebenden Gebirges in Richtung des Hohlraumes statt, die zu einem vollständigen Verschließen der geschaffenen Hohlräume führen können. Werden dabei die Gesteinsfestigkeiten des umliegenden Gebirges überschritten, so können Risse entstehen. Solche Veränderungen, insbesondere, wenn dadurch potenzielle Fluidwegsamkeiten entstehen, reduzieren die Barrierewirksamkeit der grubennahen Gesteinsformation. Die Reichweite der gebirgsmechanischen Auswirkungen des Bergbaus auf das umliegende Gebirge ist von unterschiedlichen Faktoren wie z. B. der Größe, Form und Tiefe des Hohlraumes, der Beschaffenheit des Gebirges (z. B. mechanische Eigenschaften) sowie den gewählten Gebirgsausbaumaßnahmen abhängig (Prinz & Strauß 2011). Im Folgenden wird der von diesen Auswirkungen betroffene Gebirgsbereich mit dem Begriff „Beeinflussungsbe reich“ beschrieben.

10.1.2 Bergbau in Deutschland

Der historische Bergbau auf dem heutigen Gebiet der Bundesrepublik Deutschland begann bereits weit vor Christi Geburt und erfolgt seither nahezu ununterbrochen in unterschiedlich starker Ausprägung. Der vermehrte Rohstoffabbau in größeren Tiefen wurde

ab dem 18. Jahrhundert mit der Einführung der Dampfmaschine zur Wasserhebung sowie vieler weiterer technischer Innovationen in den Folgejahren möglich. Im Westerzgebirge erreichte der bis 1990 andauernde Uranerzbergbau Abbauhorizonte im Tiefbau bis ca. 1800 m (Bracke & Satir 1994).

Auch heute noch bildet die Förderung mineralischer Rohstoffe hierzulande mit über 600 Millionen Tonnen allein im Jahr 2018 einen wichtigen Industriezweig (BGR 2019a). In Deutschland werden und wurden hauptsächlich Steine und Erden, Braun- und Steinkohle, Kali- und Steinsalz, Gips sowie Erze gefördert (Prinz & Strauß 2011). Wird speziell der tiefe Bergbau mit Abbautiefen von größer gleich 300 m unter GOK beleuchtet, so betrifft dies insbesondere die Rohstoffe Steinkohle, Kali- und Steinsalz sowie Erze. Die aktive Steinkohlenförderung endete in Deutschland Ende 2018 und wurde bis dahin vor allem im Ruhrgebiet in Nordrhein-Westfalen und im Saarland, jedoch früher auch in Sachsen und im Münsterland betrieben. Erzbergbau erfolgt in weiten Teilen Deutschlands, wovon die heute bekanntesten Regionen das Erzgebirge und der Harz sind. Die Gewinnung von Kali- und Steinsalz sowie der Bau von Kavernenspeichern findet hauptsächlich im Zechstein-Salinar in Nord- und Mitteldeutschland (v. a. Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen) statt. Auch im Süden Deutschlands (Baden-Württemberg, Bayern) existieren lokal bedeutende Salzbergwerke. Eine genaue Übersicht kann dem Dokument „Der Bergbau in der Bundesrepublik Deutschland“ (BMWI 2016) entnommen werden.

Kavernenspeicher sind in Deutschland lediglich im Steinsalz zu finden und werden für Erdgas und Flüssigkeiten (Butan, Propan, Rohöl und Mineralölprodukte, Benzin, Heizöl, Ethylen, Propylen) genutzt. Diese Speichersysteme sind in Brandenburg, Bremen, Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen sowie Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein zu finden (BMWI 2016).

10.1.3 Bergrechtliche Aspekte

Seit 1980 existiert das BBergG, das am 01.01.1982 in Kraft getreten ist (BGBl. I S. 1310). Dieses stellt für den Bergbau in Deutschland erstmals einen bundesweit einheitlich gültigen Rechtsrahmen bereit. Darauf aufbauend existiert ein länderspezifisches untersetzendes Regelwerk. Für die Ausführung des BBergG sind die Länder zuständig. Die Zuständigkeit der Aufsichts- und Zulassungsbehörden richtet sich daher nach dem jeweiligen Landesrecht (§ 142 BBergG). Eine bundesweite Erfassung sowohl gegenwärtiger als auch früherer bergbaulicher Tätigkeiten erfordert folglich eine Zusammenarbeit mit den Bergaufsichtsbehörden aller Bundesländer.

Im BBergG wird geregelt, dass für bestimmte bergbauliche Vorhaben Bergbauberechtigungen vorausgesetzt werden. Eine Berechtigungsgrenze beschreibt hierbei ein Gebiet, innerhalb dessen einem Bergbaubetreibenden die Nutzungsrechte zur Aufsuchung oder Gewinnung von bestimmten Rohstoffen, also der Durchführung bergbaulicher Tätigkeiten erteilt werden.

Die behördliche Bergaufsicht für eine bergbauliche Tätigkeit beginnt mit der Aufnahme der bergbaulichen Tätigkeit und endet üblicherweise nach der Durchführung eines Abschlussbetriebsplanes (§ 69 Abs. 2 BBergG). Dies bedeutet, dass nach Beendigung des aktiven Abbaus das übertägige Gelände als auch das untertägige Grubengebäude bzw. dessen Tagesöffnungen so hergerichtet werden müssen, dass unter anderem keine Gefahr mehr für die Nachwelt zu erwarten ist. Wurden diese Maßnahmen umgesetzt, endet in der Regel die behördliche Bergaufsicht. Die Zuständigkeit für die Gefahrenabwehr geht dann auf die allgemeinen Ordnungsbehörden über. Der Begriff des Altbergbaus wird unterschiedlich verwendet. Im Rahmen dieses Berichts wird er allgemein für die Bezeichnung bergbaulich nicht mehr genutzter Tagebaue und Grubenbaue genutzt.

Ein Risswerk stellt die wesentliche Dokumentationsgrundlage der bergbaulichen Tätigkeiten dar. Zum Risswerk zählen das Grubenbild und sonstige Unterlagen wie Risse, Karten und Pläne (§ 63 Abs. 2 BBergG). Ein Riss ist eine zeichnerische Darstellung von dem jeweiligen Zustand des Bergbaubetriebes unter und über Tage. Die sogenannte Behördenausfertigung eines Risswerkes wird dem zuständigen Amt überwiegend in analoger Form übergeben und archiviert. Dies hat zur Folge, dass die von der BGE angefragten Informationen fast ausschließlich in Papierform archiviert vorliegen. Viele der deutschen Bergbehörden haben in den letzten Jahren begonnen, diesen analogen Datenbestand in eine digitale Form zu überführen. Der Transformationsprozess ist bundesweit jedoch noch nicht abgeschlossen und wird voraussichtlich noch mehrere Jahre andauern.

10.2 Datenabfragen

Die BGE hat im August/September 2017 die erste Datenabfrage an die zuständigen geologischen Dienste und Bergbehörden der Bundesländer versendet. Für die Anwendung des Ausschlusskriteriums „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bergwerke“ gemäß § 22 Abs. 2 Nr. 3 StandAG wurde zunächst die räumliche Lage und Erstreckung früherer und gegenwärtiger bergbaulicher Aktivitäten angefordert. Eine darauffolgende konkretisierte Abfrage im Januar und Februar 2018 bezog sich auf bergbauliche Tätigkeiten für den Tiefenbereich von 100 bis 1500 m unter GOK. Das abgefragte Tiefenintervall ist auf § 21 Abs 2 StandAG zurückzuführen, in dem geplante Vorhaben ab einer Endtiefe von 100 m unter GOK eine gesonderte Zulassung benötigen. Gegenstand der Abfrage waren ferner die bergbaulichen Aktivitäten mit bestehenden Berechtsamen zur Ermittlung der Berechtsamsgrenzen sowie (früherer) bergbaulicher Aktivitäten mit aufgegebenen Berechtsamen in Form ihrer lateralen Erstreckung, projiziert an die Tagesoberfläche. Eine Spezifizierung der Datenabfrage erfolgte u. a. in Bezug auf die Bezeichnung der Grubengebäude und dazugehöriger Berechtsame, Koordinaten zur räumlichen Ausdehnung bergbaulicher Tätigkeiten (inklusive des Tiefenbereichs des Grubengebäudes mit Abbauen) sowie der Art des Bergbaus (z. B. Tagebau, Solbergbau, Tiefbau). Die von den Behörden erhaltenen Datenlieferungen umfassten nach den beiden Datenabfragen insgesamt ca. 3500 Shape-Dateien, die mit GIS darstellbar sind sowie ca. 4150 Raster-, Text-, Excel-Dateien und sonstige Formate.

Nach Prüfung der auf Basis der ersten und zweiten Datenabfrage übermittelten Geodaten wurde ersichtlich, dass eine Anpassung bzw. Weiterentwicklung der bisherigen Anwendungsmethode erforderlich war (vgl. Kapitel 14 „Entwicklung der Anwendungsmethode“). Die aus den ersten beiden Datenabfragen erhaltenen Berechtsamsflächen wurden nur dann zur Ermittlung ausgeschlossener Gebiete herangezogen, wenn seitens der Bergbehörde eine Bestätigung vorlag, dass die laterale Ausdehnung der Berechtsamsfläche der Ausdehnung des aufgefahrenen Grubenhohlraums entspricht.

Aufgrund der Anpassung der Anwendungsmethode lagen der BGE nach den ersten zwei Datenabfragen nicht für alle Bundesländer die benötigten Daten vor, um die in Kapitel 10.4 beschriebene Anwendungsmethode umzusetzen. Daher kam es in einigen Bundesländern im September 2019 zu einer weiteren Datenabfrage, mit dem Fokus auf Angaben zur Ausweisung des durch die bergbauliche Tätigkeit geschädigten Gebirgsbereiches. Für die Umsetzung der Anwendungsmethode wurden nun unter anderem die folgenden Informationen erbeten: die Bezeichnung der bergbaulichen Tätigkeit (bzw. des Bergwerks), die Angabe der maximalen Teufe (z. B. tiefste Sohle) und die Umgrenzung der maximalen lateralen Ausdehnung des an die Oberfläche projizierten Grubengebäudes einschließlich dessen Einwirkungsbereich auf das umliegende Gebirge. Infolge der aktualisierten Abfrage wurden der BGE weitere ca. 4110 Shape-Dateien sowie ca. 13 970 Raster-, Text-, und Excel-Dateien übermittelt.

10.3 Datengrundlage und Datenaufbereitung

Die von den Behörden zur Verfügung gestellten Datenlieferungen umfassten verschiedenartige Dateiformate. Dazu gehörten:

- Shape Dateien, die mit dem Geoinformationssystem ArcGIS Pro lesbar sind
- Rasterdaten
- Textdateien
- Excel-Dateien
- Datenbanken
- Sonstige Daten

Die an die Behörden gerichteten Datenabfragen zielten darauf ab, digitalisierte, georeferenzierte oder georeferenzierbare sowie vektorisierte Dokumente zu erhalten, um die Außengrenze von Grubenhohlräumen und Beeinflussungsbereichen mittels eines Geoinformationssystems zu visualisieren. Den Bergbehörden einiger Bundesländer lagen die Risswerkdarstellungen zu den Grubengebäuden jedoch nicht vollständig digital vor. In diesen Fällen mussten die benötigten Informationen je nach Datenbestand zunächst aus mehreren verschiedenen Datenquellen (z. B. Tabellen, Text-Dateien, Rissblätter) extrahiert und aufbereitet werden. Dies geschah in Form einer Digitalisierung, Georeferenzierung und ggf. Vektorisierung der bei den Behörden archivierten, analogen Risswerksblätter zur Ermittlung der Grubenumhüllenden sowie deren maximaler Tiefe

unter GOK. Tabelle 8 gibt eine Übersicht der von jedem Bundesland zur Umsetzung der Anwendungsmethode verwendeten Datengrundlage.

Tabelle 8: Übersicht über die für die jeweiligen Bundesländer verwendete Datenbasis zur Anwendung des Ausschlusskriteriums „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bergwerke“

Bundesland	Verwendete Datenbasis zur Anwendung des Ausschlusskriteriums
Baden-Württemberg	Digitalisierte Rissblätter
Bayern	Digitale Grubengebäudeumhüllende, analoge Rissblätter, Textdateien (zur Ermittlung der Tiefe unter GOK)
Berlin, Brandenburg	Gescannte Rissblätter (Grundriss), digitale Beeinflussungsbereiche zu Kavernen
Hessen	Digitalisierte Rissblätter, digitale Grubengebäudeumhüllende, PDF-Dokumente
Mecklenburg-Vorpommern	Excel- Tabellen und Textdateien zu Beeinflussungsbereichen, digitale Beeinflussungsbereiche, gescannte Rissblätter
Niedersachsen, Hamburg, Bremen	Digitale Beeinflussungsbereiche, digitale Gruben- umrisse, digitalisierte Rissblätter
Nordrhein-Westfalen	Digitale Rissblattumhüllende zum Steinkohlenbergbau
Rheinland-Pfalz	Datenbank digitalisierter Rissblätter
Saarland	Digitale Umhüllende des gesamten Steinkohlenbergbaus im Bundesland
Sachsen	Digitale Grubengebäudeumhüllende, analoge Unterlagen wie z. B. bergschadenkundliche Analysen
Sachsen-Anhalt	Digitale Grubengebäudeumhüllende und Berechtigungsbereiche, digitalisierte Rissblätter
Schleswig-Holstein	Digitale Beeinflussungsbereiche
Thüringen	Digitalisierte Rissblätter

Im Saarland wurde zur Anwendung des Ausschlusskriteriums in Phase I, Schritt 1 des Standortauswahlverfahrens einzig der Steinkohlenbergbau betrachtet. Dieser Schritt begründet sich in der Datenabfrage bei den Behörden, wonach im Saarland lediglich der Steinkohlenbergbau Tiefen von 300 m unter GOK und mehr erreicht (vgl. Kapitel 10.4.2).

Auch im Bundesland Nordrhein-Westfalen beruht die verwendete Datenbasis auf dem Steinkohlenbergbau. Die Beschreibung der Anwendungsmethode auf Basis sogenannter Rissblattumhüllender erfolgt in Kapitel 10.4.3. Zusätzlich existieren im Bundesland weitere bergbauliche Tätigkeiten des Nichtsteinkohlenbergbaus, für die eine Anwendung des Ausschlusskriteriums erforderlich ist. Bis zum Stichtag eines möglichen Dateneingangs zum 1. Juni 2020 wurden der BGE jedoch keine Unterlagen der zuständigen Bergbehörde zur Verfügung gestellt, um eine Anwendung des Ausschlusskriteriums zu ermöglichen. Der Umgang mit fehlenden Daten wird im Kapitel 10.4.4 näher beschrieben.

Zusätzlich zu den Unterlagen der Landesbergbehörden erhielt die BGE Unterlagen zu 15 bergbaulichen Tätigkeiten in Form von Shape-Dateien (Grubengebäudeumhüllende) von der Lausitzer und Mitteldeutschen Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV). Diese befinden sich in den Bundesländern Thüringen, Sachsen-Anhalt und Sachsen. Die BGE ist an die LMBV herangetreten, da seitens der Landesbergbehörden in Bezug auf analoge behördliche Rissblätter darauf verwiesen wurde, dass voraussichtlich bestimmte bergbauliche Tätigkeiten in einer digital aufbereiteten Version bei der LMBV vorliegen könnten.

Im Hinblick auf die Erfassung aller früheren und gegenwärtigen bergbaulichen Tätigkeiten in Deutschland, wurde von den Landesbergbehörden darauf hingewiesen, dass insbesondere beim Altbergbau (vgl. Kapitel 10.1.3) keine lückenlose Dokumentation über alle jemals im Verwaltungsgebiet erfolgten (alt-)bergbaulichen Tätigkeiten vorliegt. Dies begründet sich einerseits im Zuständigkeitsbereich der Bergbehörde, der nach § 69 Abs. 2 BBergG mit der Entlassung aus der Bergaufsicht endet. Zudem herrscht bundeslandspezifisch, aufgrund der in der Vergangenheit erfolgten strukturellen Änderungen der Bergverwaltung, eine unterschiedliche Dokumentationslage im Hinblick auf die Unterlagenqualität als auch -verfügbarkeit. In Bezug auf die Datenabfragen digitaler Unterlagen bei den Landesbergbehörden ist die Verfügbarkeit bei modernen bergbaulichen Tätigkeiten ebenfalls vereinzelt unvollständig. Die zuständigen Behörden haben den Digitalisierungsprozess der vom Bergbaubetreiber übergebenen, analogen Unterlagen in diesen Fällen noch nicht abgeschlossen.

Die bei der BGE eingegangenen Datensätze wurden gesichtet und im Hinblick auf ihre Lagebezugssysteme und Datenattribute homogenisiert. Im Ergebnis steht der BGE nun ein bundesweit zusammengeführter Datensatz zur Anwendung des Ausschlusskriteriums zur Verfügung.

10.4 Anwendungsmethode

10.4.1 Allgemeine Verfahrensweise

Auszuschließen sind nach § 22 Abs. 2 Nr. 3 StandAG Gebiete, in denen aufgrund bergbaulicher Tätigkeit „[...] *negative Einflüsse auf den Spannungszustand und die Permeabilität [...] zu besorgen sind*“. Um den Grenzbereich dieser Einflüsse im bergwerksfernen Gebirge individuell abschätzen zu können, müssen Faktoren wie z. B. geologische Parameter, Hohlraum-Geometrien, Vortriebs- und Abbauverfahren für jedes Bergwerk einzeln abgeschätzt und für eine Gesamtbewertung berücksichtigt werden. Je genauer eine räumliche Abschätzung des Einflusses einer bergbaulichen Tätigkeit im umgebenden Gebirge erfolgen soll, desto mehr Parameter müssen betrachtet werden. Eine solch detaillierte Datengrundlage liegt jedoch insbesondere für Altbergbau-Objekte häufig nicht vor. Im Rahmen von Schritt 1 der Phase I des Standortauswahlverfahrens erarbeitete die BGE daher einen vereinfachten Umgang mit diesem Ausschlusskriterium, welcher auf Basis grundlegender, verfügbarer geometrischer Kriterien eine bundesweite Anwendung trotz heterogener Datenbestände erlaubt.

In Deutschland existieren neben den klassischen Gewinnungsbetrieben und Kavernen sogenannte Porenspeicher. Hier werden die Mikrohohlräume in porösen Gesteinsschichten genutzt, um darin fluide Stoffe wie z. B. Erdgas zu speichern. Solche geologischen Formationen werden durch Bohrungen von der Tagesoberfläche aus erschlossen. Somit hat sich die BGE in Phase I, Schritt 1 des Standortauswahlverfahrens dazu entschieden, diese Art von Untergrundspeichern den Bohrungen zuzuordnen.

Gemäß § 22 Abs. 3 StandAG bleiben „*Folgen von Maßnahmen zur Erkundung potenzieller Endlagerstandorte [...] bei der Anwendung des Kriteriums nach Absatz 2 Nummer 3 außer Betracht.*“ Demnach werden die im Salzstock Gorleben im Rahmen der Erkundung potenzieller Endlagerstandorte durchgeführten bergbaulichen Tätigkeiten und der dabei entstandenen über- und untertägigen Infrastruktur bei der Anwendung des Ausschlusskriteriums „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit“ nicht berücksichtigt. Eine nähere Erläuterung erfolgt im Bericht „Zusammenfassung der bisherigen Studien zum Salzstock Gorleben im Kontext des Standortauswahlgesetzes“ (BGE 2020p).

10.4.2 Anwendungsmethode

Zur Ermittlung ausgeschlossener Gebiete werden ausschließlich bergbauliche Tätigkeiten betrachtet, deren aufgefahrene Hohlräume den endlagerrelevanten Tiefenbereich von 300 bis 1500 m unter GOK verritzen. Diese Begrenzung der Tiefe stellt eine für Phase I, Schritt 1 des Standortauswahlverfahrens angemessene Reduzierung des Detaillierungsgrads dar, wodurch auf eine Bewertung einer Vielzahl kleiner Hohlräume, Tagebau oder alter oberflächennaher Stollen, verzichtet werden kann. Mit dieser Einschränkung des Tiefenbereichs wird sichergestellt, dass ausgeschlossene Gebiete nur auf Basis von Objekten ermittelt werden, die tatsächlich zu einer negativen Beeinflussung des Gebirges innerhalb des endlagerrelevanten Tiefenbereichs führen. Damit ist

jedoch nicht ausgeschlossen, dass das Gebirge unterhalb von Bergwerken, deren maximale Tiefe flacher als 300 m unter GOK ist, ebenfalls negativ beeinflusst ist.

Zur Überprüfung, ob ein Bergwerk den endlagerrelevanten Tiefenbereich vertritt, wurde in einem ersten Schritt die maximale Tiefe einer bergbaulichen Tätigkeit ermittelt. Je nach vorhandener Datenlage wurde dieser Wert entweder von der Behörde bereitgestellt oder von der BGE auf Basis verschiedener Unterlagen (z. B. Tabellen, Text-Dateien und Rissblätter) ermittelt. Der tiefste Punkt eines Bergwerkes wird z. B. durch das Schachtiefste oder die tiefste Sohle und bei Kavernen durch das so genannte Kavernentiefste repräsentiert.

Die Abgrenzung ausgeschlossener Gebiete erfolgt anhand der Beeinflussungsbereiche, die die bergmännisch aufgefahrenen Hohlräume im Untergrund umgeben. Diese werden an die Tagesoberfläche projiziert und vertikal über die gesamte endlagerrelevante Tiefe hinweg ausgeschlossen.

Aufgrund der heterogenen und landesspezifisch unterschiedlichen Datenlage ist es nötig, zwei verschiedene Herangehensweisen für die Ausweisung von „Beeinflussungsbereichen“ zu unterscheiden. Beide Ansätze sind dahingehend konsistent, dass sie sich vorrangig auf Auswirkungen des Bergbaus an der Tagesoberfläche beziehen.

1. Die BGE hat ausgewiesene Beeinflussungsbereiche von den Berg- und Landesbehörden erhalten:

Die seitens der Berg- und Landesbehörden digital an die BGE übermittelten Beeinflussungsbereiche stellen oft Linien gleicher Bodenabsenkung über Grubenhohlräumen basierend auf der Einwirkungsbereichs-Bergverordnung (EinwirkungsbV) dar. Für den Altbergbau wurden Beeinflussungsbereiche auch auf Grundlage von z. B. bergschadenkundlichen Analysen oder vergleichbaren Dokumenten ausgewiesen.

2. Durch die BGE abgeschätzte Beeinflussungsbereiche:

Sofern bei den Berg- und Landesbehörden keine Informationen zu den Bergwerken oder Kavernen umgebenden Beeinflussungsbereichen vorlagen, erarbeitet die BGE die Ausdehnung dieser Bereiche selbst anhand geometrischer Informationen. Grundlage hierfür bildet die maximale laterale Erstreckung des Grubengebäudes, welche der horizontalen Ausdehnung der bergmännisch aufgefahrenen Hohlräume entspricht (siehe Abbildung 27). Diese Informationen wurden der BGE entweder direkt durch die jeweiligen Behörden zur Verfügung gestellt oder seitens der BGE auf Basis von Risswerken digitalisiert. Entlang der Außengrenze der maximalen lateralen Erstreckung wird ein sogenannter Grenzwinkel angelegt und von der ermittelten maximalen Tiefe ausgehend bis an die Tagesoberfläche projiziert. Innerhalb des daraus resultierenden trichterförmigen Gebildes ist eine Gebirgsschädigung mit hoher Wahrscheinlichkeit zu erwarten. Die Breite des von der BGE konstruierten Beeinflussungsbereichs ergibt sich nun aus der Schnittstelle des Grenzwinkels mit der Tagesoberfläche (siehe Abbildung 28). Um bei einer pauschalen Abschätzung eines Grenzwinkels keine zu großen Bereiche auszuweisen (vgl. Kapitel 4 „Verfahrensgrundsätze“), verwendet die BGE einen Grenzwinkel, der

dem steilsten in der EinwirkungsBergV aufgeführten Winkel der Bergbauzweige von 85 Gon (76,5 Grad) entspricht. Dies würde beispielsweise einem lateralen Sicherheitsabstand von 72 m um das Grubengebäude bei Bergwerken mit einer Tiefe von maximal 300 m unter GOK und einem Sicherheitsabstand von 360 m bei Bergwerken mit einer maximalen Tiefe von 1500 m unter GOK entsprechen.

Dieses Vorgehen ist für eine Vergleichbarkeit an die bundesweit gültige EinwirkungsBergV angelehnt. Demnach werden an der Tagesoberfläche Bereiche ausgewiesen, in denen eine bruchhafte Veränderung im Gebirge auftritt oder zu erwarten ist. Dies geht in der Regel mit Hebungen oder Senkungen an der Erdoberfläche einher. Die beschriebene Abschätzung von Beeinflussungsbereichen erfolgt immer unter Zuhilfenahme dieses definierten Grenzwinkels. Der BGE ist dabei bewusst, dass eine Ermittlung von individuell an die jeweilige bergbauliche Tätigkeit angepasste Grenzwinkel möglich ist. Für die Ermittlung von Teilgebieten wird jedoch ein schematisches Vorgehen verfolgt, welches den Umgang mit großen Datenmengen erlaubt.

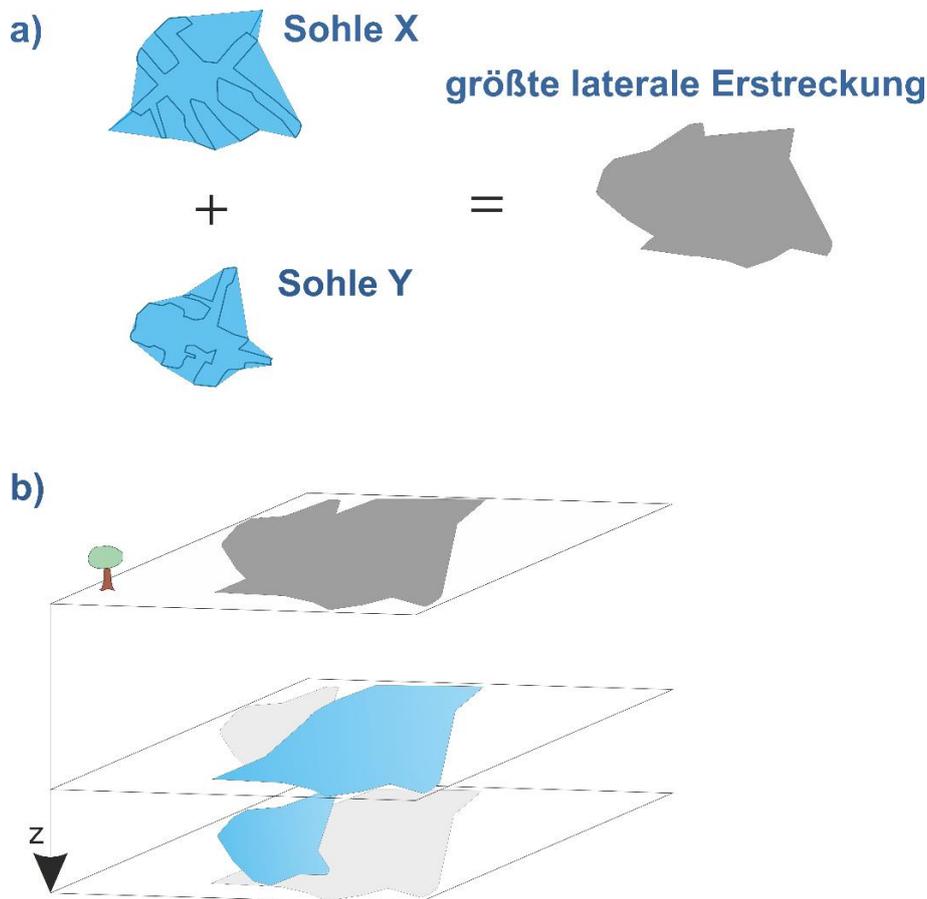


Abbildung 27: Graphische Darstellung zur Ermittlung der größten lateralen Erstreckung eines Bergwerks.
a) Die größte laterale Erstreckung eines Bergwerks ergibt sich durch ein „Übereinanderlegen“ der Umhüllenden einzelner Grubenbaue.
b) Die so bestimmte maximale laterale Ausdehnung eines Bergwerks wird an die Erdoberfläche projiziert.

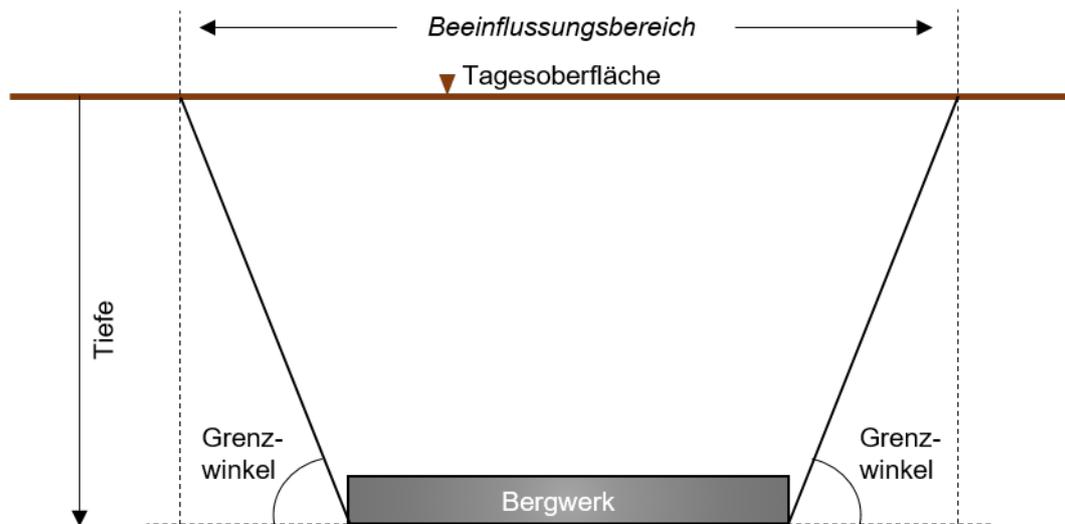


Abbildung 28: Schematische Darstellung der Ausweisung des Beeinflussungsbereichs um die größte laterale Erstreckung des Bergwerkes anhand der Tiefe und dem Grenzwinkel

Die an die Tagesoberfläche projizierte maximale laterale Ausdehnung des Grubengebäudes zusammen mit dem umgebenden Beeinflussungsbereich (durch BGE oder Behörde ausgewiesen) bilden die laterale Abgrenzung ausgeschlossener Gebiete durch das Ausschlusskriterium „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bergwerke“. Vertikal wird das ausgeschlossene Gebiet von der Ober- und Untergrenze des endlagerrelevanten Tiefenbereichs begrenzt (300 – 1500 m unter GOK). Dieses Vorgehen wurde gewählt, da die vom Bergbau induzierten Einflüsse auf den Spannungszustand und die Permeabilität des Gebirges neben der lateralen Ausdehnung auch in weitreichender vertikaler Erstreckung zu besorgen sind. Die BGE geht davon aus, dass die Errichtung eines Endlagers unter Ausweisung und Berücksichtigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches unterhalb eines z. B. 400 m tiefen Bergwerkes vor dem Hintergrund der in § 22 Abs. 2 Nr. 3 StandAG gewählten Formulierung „dass [...] negative Einflüsse auf den Spannungszustand und die Permeabilität des Gebirges [...] zu besorgen sind“ nicht möglich ist. Denn im Gebirgsbereich, der ein Bergwerk umgibt, ist allseitig eine Veränderung im Spannungszustand und ggf. sogar Schädigung zu erwarten. Dies betrifft auch den Gebirgsbereich unterhalb des Bergwerkes, wodurch Endlagerstandorte mit überlagernden Bergwerken immer nachrangig gegenüber anderen Gebieten zu bewerten sind. Die folgende Abbildung 29 zeigt schematisch Spannungsänderungen im Gebirge unterhalb eines Abbaustoßes. Ausgehend von der primären Spannungskontur ist anhand der dargestellten Isolinien in Abbaurichtung der Bereich erhöhter Drücke mit einem Verhältnis vom Spannungszustand durch den Abbaustoß zum Ausgangsspannungszustand größer 1 sowie in Richtung des bereits abgebauten Bereiches ein druckentspannter Bereich mit einem Verhältnis kleiner 1 erkennbar.

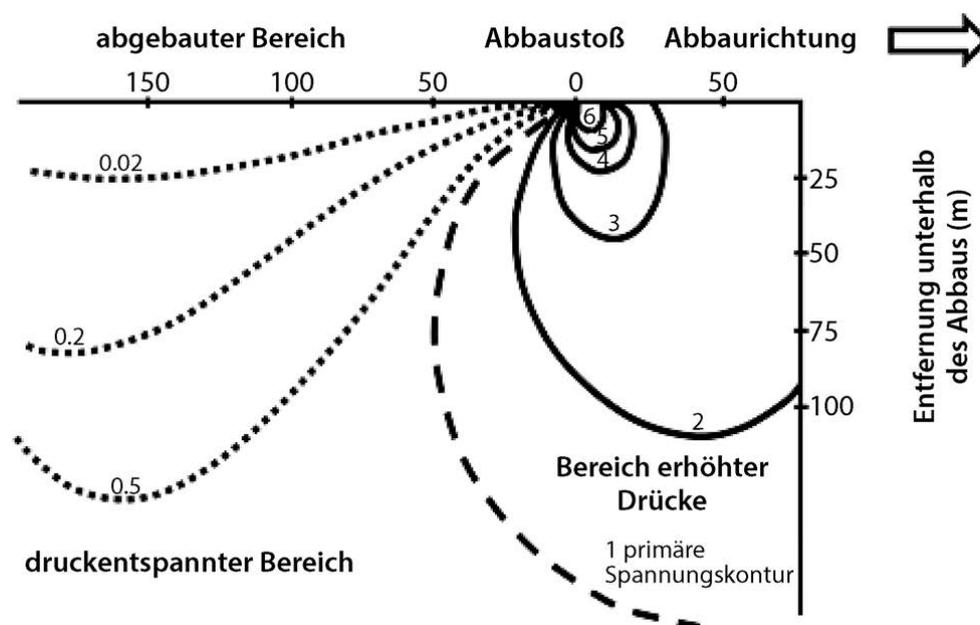


Abbildung 29: Beispiel einer Spannungsänderung unterhalb eines Abbaustoßes (Wagner 2017)

Die oben beschriebene allgemeine Anwendungsmethode erfolgt ebenfalls für Tagebaue, die eine Abbautiefe von mindestens 300 m unter GOK erreichen. Zur Beschreibung der lateralen Ausdehnung und maximalen Tiefe wird hierbei stellvertretend der Bereich des Tagebautiefsten genutzt. Hintergrund ist der bei jedem Tagebau individuelle Böschungswinkel (inkl. Strossen). Mit zunehmender Tiefe muss entsprechend mehr Material abgetragen bzw. umgelagert werden, was wiederum eine Veränderung des Spannungszustands im darunter befindlichen Gebirge hervorruft. Insbesondere bei tiefen Tagebauen und im Lockergestein beträgt die Distanz zwischen Tagebautiefstem und dem Tagebau- rand häufig mehrere hundert Meter. Um auch bei einem Tagebau eine Überdimensionierung der ausgeschlossenen Gebiete zu vermeiden, wird deshalb ausschließlich das Tagebautiefste betrachtet. Anschließend wird dieser Bereich über den gesamten endlagerrelevanten Tiefenbereich hinweg projiziert und als ausgeschlossenes Gebiet definiert. Aus dem Tief- und Tagebau resultierende Halden werden nicht näher betrachtet.

10.4.3 Umgang mit dem Steinkohlenbergbau in Nordrhein-Westfalen

Die Bewertung der Datenlage und -menge zu den Regionen des Steinkohlenbergbaus in Nordrhein-Westfalen erfordert ein methodisches Vorgehen, das von der in Kapitel 10.4.2 beschriebenen Anwendungsmethode abweicht.

Der Steinkohlenbergbau in Nordrhein-Westfalen, insbesondere des Ruhrgebiets, nimmt aufgrund des jahrhundertelangen Bergbaus eine Sonderstellung in Deutschland ein, da im Ruhrgebiet die Dichte von Bergwerken besonders hoch ist. Die Konzentration hunderter Bergwerke auf diesem Gebiet führt zu einer großflächigen Überlagerung und gegenseitigen Beeinflussung der bergbaulichen Einwirkungsbereiche.

Die zuständige Bergbehörde führt in einem GIS-basierten Dokumentationssystem die vektorisierten und georeferenzierten Ränder aller vorhandenen analogen Rissblätter

bergbaulicher Tätigkeiten. Auch die Steinkohlenbergwerke sind in Nordrhein-Westfalen auf Basis dieser sogenannten „Rissblattumhüllenden“ digital erfasst. Auf einer digitalen Landkarte werden sie in Form eines Rechtecks dargestellt, da ein Grubenrissblatt üblicherweise auf einem Blatt im DIN-Format erstellt wird. Je nach Größe dieses Blattes (z. B. DIN A1) und des Maßstabs des abgebildeten Grubengebäudes erstreckt sich diese Rissblattumhüllende über eine bestimmte Fläche, siehe Abbildung 30.

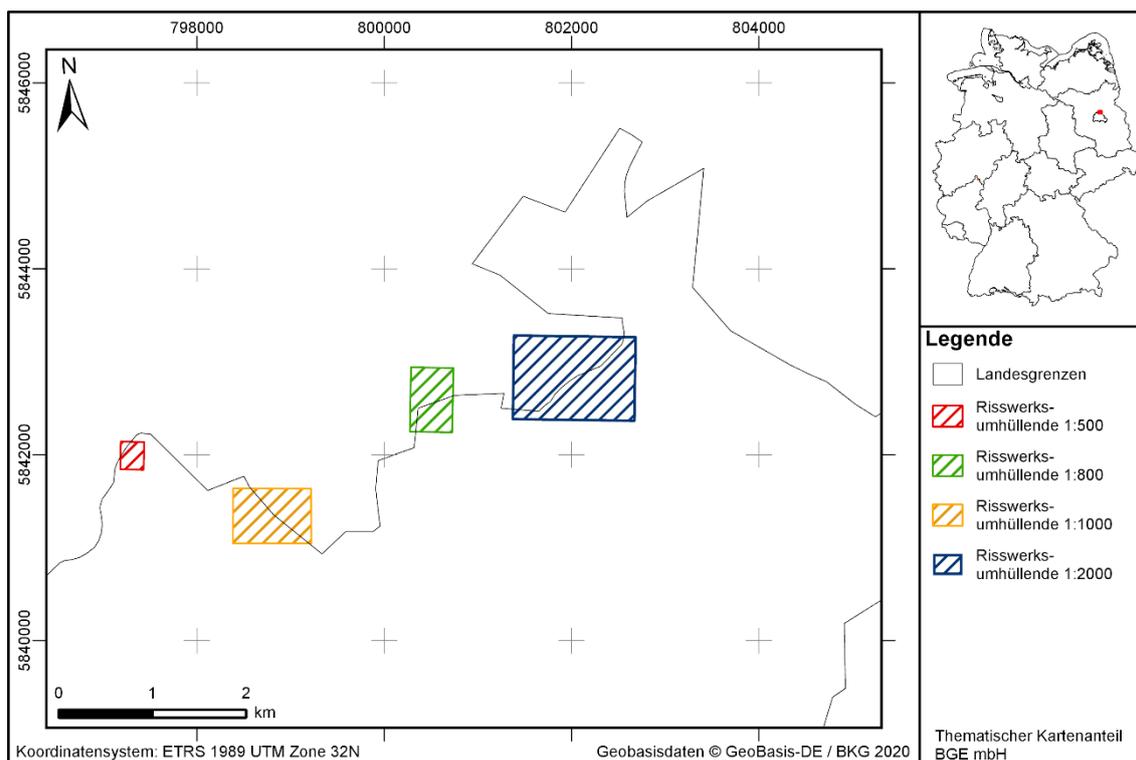


Abbildung 30: *Schematische Beispiele mehrerer Rissblattumhüllenden in verschiedenen Maßstäben.*
Als Größenreferenz wurde die nördliche Landesgrenze von Berlin gewählt. Diese fiktiven Beispiele dienen lediglich der Darstellung von möglichen Kartenblattgrößen.

Zu einem Bergwerk existieren häufig mehrere Rissblätter, um beispielsweise die verschiedenen Sohlen oder ein fortschreitendes Abbaufeld wiederzugeben. In diesen Fällen gibt es in der Datenbank der Bergbehörde von Nordrhein-Westfalen folglich auch mehrere Rissblattumhüllende. Durch das Übereinanderlegen und Zusammenführen sämtlicher zu einem Bergwerk gehörender Kartenränder entsteht eine Fläche (aus vielen Rechtecken zusammengesetzt), die das darunterliegende Grubengebäude eines Bergwerkes in Hinblick auf seine laterale Ausdehnung abdeckend erfasst. Der Abstand zwischen Rissblattumhüllender (also dem Kartenrand des Rissblattes) und der tatsächlichen lateralen Erstreckung eines Bergwerks reicht von einigen Metern bis hin zu wenigen Kilometern.

Würde nun diese Rissblattumhüllende eine Fläche abbilden, die größer als der Beeinflussungsbereich der bergbaulichen Tätigkeit ist, so führt ein Ausschluss auf Basis dieser Rissblattumhüllenden zu einer Überschätzung ausgeschlossener Gebiete. Solch eine

Überschätzung ist aufgrund der hohen Bergwerksdichte lediglich im Randbereich der Steinkohlenreviere in Nordrhein-Westfalen denkbar. Hier muss eine nähere Betrachtung erfolgen, um den geometrischen Zusammenhang zwischen der maximalen lateralen Ausdehnung des Grubengebäudes inklusive umgebenden Beeinflussungsbereich und der dazugehörigen Rissblatthüllenden zu ermitteln.

Hierfür wurde von der BGE eine Stichprobe von fünf Bergwerken (Auguste-Victoria, Westfalen, Friedrich-Heinrich, Walsum, Stock und Scherenberg) untersucht, die im Randbereich des Ruhrgebiets angesiedelt sind. Ziel war die Überprüfung der Arbeitshypothese, dass auf Basis von Rissblatthüllenden keine Überschätzung ausgeschlossener Gebiete erfolgt. Dabei wird die Annahme zugrunde gelegt, dass das Bewertungsergebnis der Stichprobe für den gesamten Steinkohlenbergbau in Nordrhein-Westfalen repräsentativ ist. Zur Überprüfung oben genannter Arbeitshypothese soll die räumliche Distanz zwischen Rissblatthüllender und der Ausdehnung von Beeinflussungsbereichen anhand der Stichprobe ermittelt werden. Dafür wurden in einem ersten Schritt detaillierte Risswerke zu den fünf Bergwerken bei der Bergbehörde in Nordrhein-Westfalen angefragt und seitens der BGE in Hinblick auf die laterale Ausdehnung der Grubengebäude digitalisiert (wie in Abbildung 27 dargestellt). Für die individuelle Bewertung der Beeinflussungsbereiche dieser Objekte hat die BGE, abweichend von dem zuvor beschriebenen Vorgehen, den Begriff Beeinflussungsbereich gegenüber der allgemeinen Verfahrensweise näher am StandAG ausgelegt, wonach „*negative Einflüsse auf den Spannungszustand und die Permeabilität des Gebirges [...] zu besorgen sind*“ (vgl. § 22 Abs. 2 Nr. 3 StandAG).

Zur Abschätzung des „Beeinflussungsbereiches bergbaulicher Tätigkeiten“ wurden ein analytisches sowie ein numerisches Verfahren verwendet (BGE 2020w). Beide Verfahren zielen darauf ab, Änderungen des Spannungszustandes im Gebirge zu erfassen und sie in Abhängigkeit des Abstandes zum Abbaubereich zu quantifizieren. Es werden lediglich mechanische Auswirkungen betrachtet. Eine hydraulische/hydromechanische Beeinflussung des angrenzenden Gebirges durch den Bergbau war nicht Gegenstand der Berechnungen. Das analytische Verfahren zur Abschätzung der Spannungsänderungen im bergwerksfernen Gebirge basiert auf dem Prinzip von St. Venant und der Elastizitätstheorie. Die numerischen Berechnungen zur Abschätzung wurden mittels 2D-Modellen mit ebenem Verzerrungszustand („Scheibe“) durchgeführt und die Vereinfachungszulässigkeit anhand einer Vergleichsberechnung mit einem 3D-Modell überprüft. Die Abschätzung auf Basis einer numerischen Modellierung ermöglicht gegenüber der analytischen Abschätzung zusätzlich die Berücksichtigung der lateralen Ausdehnung, verschiedener geometrischer Konstellationen sowie eines elasto-plastischen Materialverhaltens. Durch die vereinfachten analytischen Lösungen wird die Plausibilität der numerischen Ergebnisse abgeschätzt. Verwendet wurde das Programm FLAC3D auf Basis der Methode der Finiten Differenzen. Bewertet wurden die Änderungen der folgenden Zustandsgrößen/Indikatoren gegenüber dem initialen Spannungszustand:

- Änderung der kleinsten Hauptspannung $\Delta\sigma_3$

- Änderung der von-Mises-Vergleichsspannung $\Delta\sigma_{\text{eqv}}$ (Maß für die deviatorische Beanspruchung des Gebirges)

Zur Abgrenzung von potenziell negativ beeinflussten zu unbeeinflusstem Gebirge wird im Folgenden die äußere Grenze des beeinflussten Gebirgsbereiches (EdZ, excavation disturbed zone) herangezogen, in welchem zwar keine Veränderung der mechanischen Eigenschaften oder strukturelle Schädigung eintritt, jedoch eine Veränderung des mechanischen Gebirgsspannungszustandes erfolgt. So wird im Hinblick auf den vorsorgenden Schutzgedanken der Formulierung des StandAG Rechnung getragen, dass auch potenzielle negative Einflüsse zu berücksichtigen sind. Diese Grenze wird hier durch eine Veränderung des Spannungszustandes um 5 % verglichen mit dem initialen Zustand definiert. Die Ausdehnung des Beeinflussungsbereichs ergibt sich nun aus der Entfernung ab „Abbaukante“, in der eine Änderung im Spannungszustand um 5 % eintritt. Jenseits dieser „Grenze“ wird unterstellt, dass das Gebirge (mechanisch) weitestgehend ungestört ist und die Spannungen gegenüber dem initialen Spannungszustand nahezu unverändert sind. Die Beeinflussung der Gebirgsbereiche oberhalb 300 m unter GOK wird nicht betrachtet.

Auf Grundlage der im Bericht der BGE (BGE 2020w) beschriebenen Ergebnisse ist festzuhalten, dass die Ausdehnung der Beeinflussungsbereiche für die untersuchten Bergwerke im Osten, Norden und Westen des Ruhrgebiets (Auguste-Victoria, Westfalen, Friedrich-Heinrich und Walsum) 3050 m bis 3650 m beträgt. In diesen Fällen gehen die Rissblatthüllenden vollständig in der räumlichen Ausdehnung der ermittelten Beeinflussungsbereiche auf und würden nicht zu einer Überschätzung von ausgeschlossenen Gebieten führen.

Bei dem im südlichsten Teil des Ruhrgebiets angesiedelten Bergwerks „Stock und Scherenberg“ würde die Rissblatthüllende den Beeinflussungsbereich mit einer Ausdehnung von 500 m um bis zu 1500 m überschätzen. Dieser deutlich kleinere Beeinflussungsbereich gegenüber den anderen untersuchten Bergwerken begründet sich in der geringeren maximalen Tiefe sowie lateralen Ausdehnung des Grubengebäudes. Ferner existieren für dieses Bergwerk Rissblatthüllende, die aufgrund ihrer rasterartigen Anordnung im Randbereich des Grubengebäudes große Flächen mit unverritztem Gebirge enthalten. Allerdings wird der das Grubengebäude umgebende Bereich von mehreren benachbarten Bergwerken überlagert. Die BGE geht daher davon aus, dass es in diesem Fall zu einer Überlagerung der jeweiligen Beeinflussungsbereiche kommt, so dass die oben genannte Überschätzung relativiert wird.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei 4 von 5 Bergwerken keine Überschätzung der ausgeschlossenen Gebiete auf Basis von Rissblatthüllenden zu erwarten ist. Dies ist stellvertretend auf das nördliche Ruhrgebiet zu übertragen. Bei oberflächennahen und im Verhältnis zu anderen Steinkohlenbergwerken in Nordrhein-Westfalen kleineren Objekten kann hingegen in vereinzelten Bereichen eine Überschätzung von ausgeschlossenen Gebieten eintreten. Solche Bergwerke befinden sich überwiegend im südlichen Teil des Ruhrgebiets, sodass die Möglichkeit einer Überschätzung von ausgeschlossenen

Gebieten fast ausschließlich in diesen Bereichen zu erwarten ist. Im Ergebnis hat sich die BGE auf Grundlage dieser Untersuchungen entschieden, die Rissblatthüllenden des Steinkohlenbergbaus in Nordrhein-Westfalen für die Anwendung des Ausschlusskriteriums zu verwenden.

Durch die objektspezifische Ermittlung von Beeinflussungsbereichen liegen der BGE für die oben genannten Bergwerke Beeinflussungsbereiche vor, die zur Ermittlung ausgeschlossener Gebiete gegenüber den Rissblatthüllenden zu bevorzugen sind. Ein Ausschluss der fünf spezifisch untersuchten Bergwerke erfolgt somit auf Basis der durch numerische Berechnungen präzisierten Beeinflussungsbereiche.

10.4.4 Umgang mit fehlenden Daten und einzelstehenden Schächten

Zur Anwendung des hier beschriebenen Ausschlusskriteriums wurden sämtliche Unterlagen berücksichtigt, die der BGE bis einschließlich 1. Juni 2020 zugegangen sind. In einigen Fällen liegen der BGE Daten vor, die Hinweise auf bergbauliche Tätigkeiten geben, deren Informationsgehalt jedoch keine Anwendung der Anwendungsmethode erlaubt.

In solchen Fällen werden die entsprechenden Objekte in einer gesonderten Darstellung als „vorgemerkte bergbauliche Tätigkeit“ dargestellt. Vorgemerkte bergbauliche Tätigkeiten erfüllen eine rein informative Funktion und führen im Rahmen des Zwischenberichts Teilgebiete nicht zu einem ausgeschlossenen Gebiet.

Vereinzelt wurden der BGE zudem Tagesöffnungen in Form von Schächten größer gleich 300 m Tiefe unter GOK übermittelt, zu denen keine weiteren Unterlagen über ein dazugehöriges Grubengebäude vorhanden sind. Diese außerhalb ausgeschlossener Gebiete gelegenen, einzelstehenden Schächte werden für das weitere Verfahren vermerkt. Somit ist der BGE bekannt, dass an diesen Stellen wahrscheinlich bergbauliche Tätigkeiten erfolgt sind. Eine Darstellung dieser Punktkoordinaten erfolgt an dieser Stelle nicht, um einen unbefugten Zutritt zu den Tagesöffnungen im Sinne eines vorsorgenden Schutzgedankens zu unterbinden. Bei der Anwendung der Mindestanforderungen wurden vorhandene einzelstehende Schächte innerhalb identifizierter Gebiete in den Modellierprotokollen textlich vermerkt (BGE 2020j, 2020i).

10.4.5 Umgang mit Bestandsbergwerken der BGE

Die BGE ist seit April 2017 Betreiberin der Endlager Konrad und Morsleben sowie der Schachanlage Asse II, nachfolgend Bestandsbergwerke, genannt. Die konkreten Aufgaben ergeben sich aus § 9a Abs. 3 S. 2 2. Hs. AtG. Demnach liegt es in der Verantwortung des Bundes, Endlager für radioaktive Abfälle zu errichten und zu betreiben. Die durch den Bund auf die BGE übertragenen Aufgaben umfassen die Offenhaltung des Bergwerkes und den sicheren Betrieb des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) (ohne Einlagerung) sowie die Planung der Stilllegung und dessen spätere Umsetzung. Zudem ist die BGE verantwortlich für die Stilllegung der Schachanlage Asse II nach vorheriger Rückholung aller radioaktiven Abfälle nebst zugehöriger Notfallvorsorge

für den Fall eines möglichen Absaufens der Schachanlage. Zu den Aufgaben der BGE gehört außerdem die Errichtung des Endlagers Konrad sowie der Betrieb und spätere Stilllegung.

Bei dem ERAM sowie dem Endlager Konrad handelt es sich um Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle. Für alle genannten Bestandsbergwerke erfolgt eine individuelle Ermittlung ausgeschlossener Gebiete, die in den folgenden drei Kapiteln näher beschrieben wird. Dieses gesonderte Vorgehen ist darin begründet, dass ein wesentlicher Aspekt für die Genehmigung der Errichtung und/oder des Betriebs der Bestandsbergwerke der BGE Langzeitsicherheitsbewertungen sind, die z. T. einen erheblichen Teil des umgebenden Gebirges einbeziehen.

10.4.5.1 Ausgeschlossenes Gebiet Endlager Konrad

Das ausgeschlossene Gebiet Konrad ist identisch mit dem Modellgebiet der Langzeitsicherheitsanalyse von 1986 (Storck et al. 1986) und beträgt 657 km² mit einer West-Ost-Ausdehnung von 13,5 km sowie einer Nord-Süd-Ausdehnung von 48 km (Abbildung 31). Definiert ist das Modellgebiet in Hinblick auf die modellierte Grundwasserbewegung im Bereich des Endlagers Konrad und daraus resultierende Ausbreitungswege für Radionuklide. Dabei bilden die Wasserscheiden auf dem Salzgitter-Höhenzug sowie der Verlauf der Aller als regionaler Vorfluter die südliche und nördliche Grenze des Modellgebietes. Die westliche und östliche Begrenzung orientiert sich an der Lage von Salzstöcken und Wasserscheiden (Storck et al. 1986). Der Planfeststellungsbeschluss Konrad hat das Modellgebiet als einen Betrachtungsraum, in welchem Wechselwirkungen zwischen endgelagerten Abfällen und Umfeld möglich sind, übernommen (Niedersächsisches Umweltministerium 2002).

Dieser, im Planfeststellungsverfahren ermittelte Einflussbereich des Endlagers Konrad, entspricht dem im Abbildung 31 dargestellten ausgeschlossenen Gebiet. Dieses Vorgehen ist darin begründet, dass die für eine Erkundung von Standortregionen oder Standorten erforderlichen Maßnahmen Rückwirkungen auf die Ergebnisse der Sicherheitsuntersuchungen Konrad haben können. Dies betrifft insbesondere Fragen der Langzeitsicherheit, die neu bewertet werden müssten. Solche Maßnahmen können das Abteufen von Bohrungen nebst Erkundungsmaßnahmen, die im Bohrloch durchgeführt werden, oder eine Errichtung eines Erkundungsbergwerks nebst den untertägigen Erkundungsmaßnahmen sein. Auch Maßnahmen, welche ggf. im Rahmen einer periodischen Sicherheitsüberprüfung des Endlagers Konrad künftig als erforderlich angesehen werden, könnten wiederum Auswirkungen auf ein künftiges Endlager für hochradioaktive Abfälle entfalten. Ferner könnten sich ein Endlager für hochradioaktive Abfälle im Modellgebiet Konrad und das Endlager Konrad gegenseitig beeinflussen. Dies erhöht auch für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle die Komplexität der Sicherheitsuntersuchungen und späteren periodischen Sicherheitsüberprüfungen deutlich.

10.4.5.2 Ausgeschlossenes Gebiet Schachanlage Asse II

Das ausgeschlossene Gebiet für die Schachanlage Asse II erstreckt sich über ca. 4 km in Längsrichtung der Salzstruktur und über ca. 1 km quer dazu (Abbildung 31). In Nord-Süd-Richtung umfasst dieser die Salzumhüllende einschließlich eines Sicherheitsbereichs im Deckgebirge. Für die Grenzen nach Westen und Osten werden die ungefähren Modellgrenzen des hydrogeologischen Deckgebirgsmodells herangezogen (AF-Colenco AG Grundwasserschutz und Entsorgung 2009).

Diese Grenzen sind durch Exfiltrationsgebiete mit potenzieller Bedeutung für die Ausbreitung von Grubenlösung und den Transport von Schadstoffen im Deckgebirge gekennzeichnet und werden daher, der Argumentation in Kapitel 10.4.5.1 folgend, zur Ermittlung des ausgeschlossenen Gebiets herangezogen.

10.4.5.3 Ausgeschlossenes Gebiet für das Endlager Morsleben

Das ausgeschlossene Gebiet für das Endlager Morsleben ist mit den Eckpunkten des Schutzgebietes der Dauerbetriebsgenehmigung (SAAS 1986) identisch und umfasst ca. 11 km² (Abbildung 31).

Anlage 3 Teil II Nr. 4.2 der Dauerbetriebsgenehmigung des Endlagers Morsleben sieht im Bereich der Gruben Bartensleben und Marie für fremde bergbauliche Arbeiten sowie hydrologische und wasserwirtschaftliche Maßnahmen die Beachtung des vorgenannten Schutzgebietes vor. Unabhängig von den tatsächlichen Einwirkungen auf das Endlager Morsleben oder seinen potentiellen Auswirkungen ist diese Fläche durch die Genehmigung als Schutzgebiet deklariert.

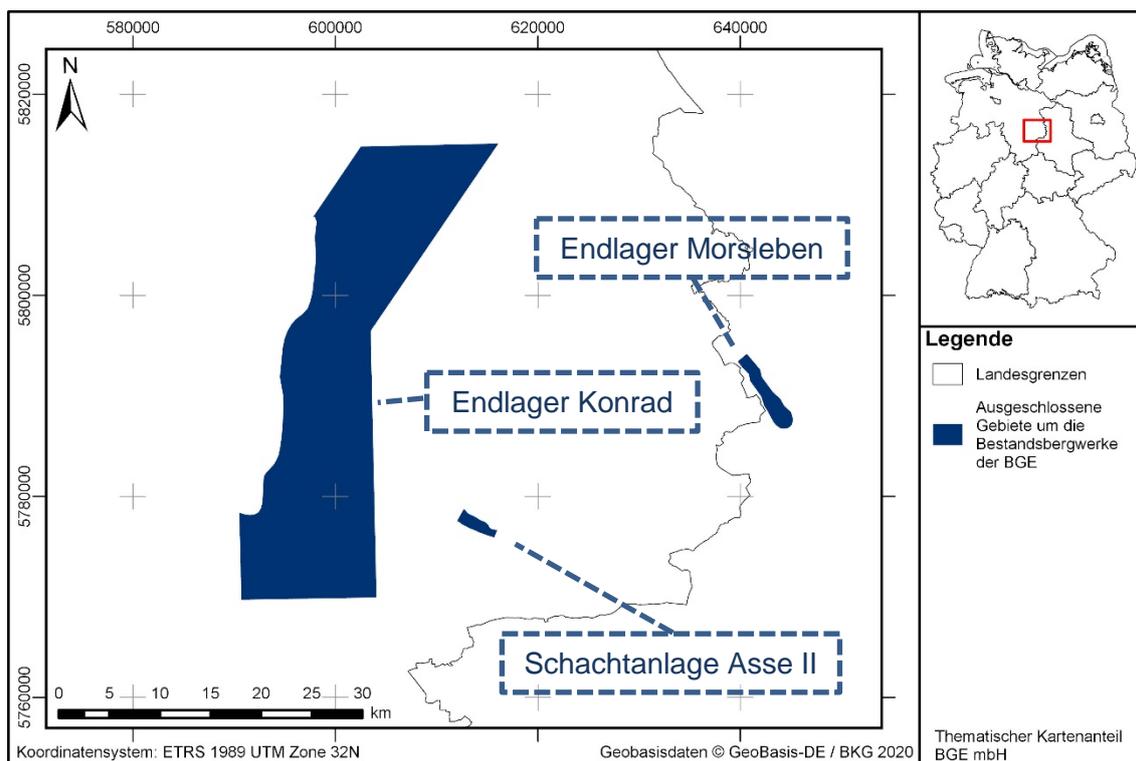


Abbildung 31: Kartendarstellung der ausgeschlossenen Gebiete um die Bestandsbergwerke der BGE

10.5 Ergebnisse

10.5.1 Ausgeschlossene Gebiete

Nach Umsetzung der Anwendungsmethode wurden 686 Bergwerke und Kavernen als ausgeschlossene Gebiete ermittelt. Dabei handelt es sich in erster Linie um Objekte des untertägigen Bergbaus. Einzig der Tagebau Hambach wurde als übertägiger Gewinnungsbetrieb mit einem Tagebautiefsten von mindestens 300 m unter GOK als ausgeschlossenes Gebiet identifiziert.

Tabelle 9 ist die Anzahl sowie Fläche der für jedes Bundesland als ausgeschlossen ermittelten Gebiete zu entnehmen, eine Kartenansicht ist in Abbildung 32 dargestellt. Eine Besonderheit stellt dabei der Datensatz des Saarlandes dar. Das dortige Oberbergamt führt eine digitale GIS-Übersichtskarte zum ehemaligen Steinkohlenbergbau für sein Verwaltungsgebiet. Dieser Datensatz differenziert keine einzelnen Objekte, sondern stellt die Gesamtgrubengebäudeumhüllende inklusive des Einwirkungsbereichs aller Bergwerke auf Grundlage der EinwirkungBergV dar. Damit entspricht dieser Datensatz der für die Umsetzung der Anwendungsmethode benötigten Informationsgrundlage.

Tabelle 9: *Überblick über die Anzahl und Flächen der ausgeschlossenen Gebiete pro Bundesland für das Ausschlusskriterium „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bergwerke“*

Bundesland	Anzahl der ausgeschlossenen Bergwerke und Kavernen	Ausgeschlossene Gebiete inkl. Beeinflussungsbereich in km ²
Baden-Württemberg	4	16,24
Bayern	8	125,48
Berlin, Brandenburg	2	7,21
Hessen	7	300,57
Mecklenburg-Vorpommern	5	8,10
Niedersachsen, Hamburg, Bremen	82	832,34
Nordrhein-Westfalen	420	3557,96
Rheinland-Pfalz	24	64,95
Saarland	nicht spezifiziert	393,17
Sachsen	55	337,38
Sachsen-Anhalt	63	752,14
Schleswig-Holstein	2	1,42
Thüringen	14	425,85
Summe	686	6822,81

Das Ausschlusskriterium „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit“ umfasst sowohl Bergwerke einschließlich Kavernen, als auch die im Kapitel 9 erläuterten Bohrungen. In Abbildung 33 sind aus diesem Anlass zusammenfassend die nach § 22 Abs. 2 Nr. 3 StandAG in Phase I, Schritt 1 des Standortauswahlverfahrens ausgeschlossenen Gebiete dargestellt.

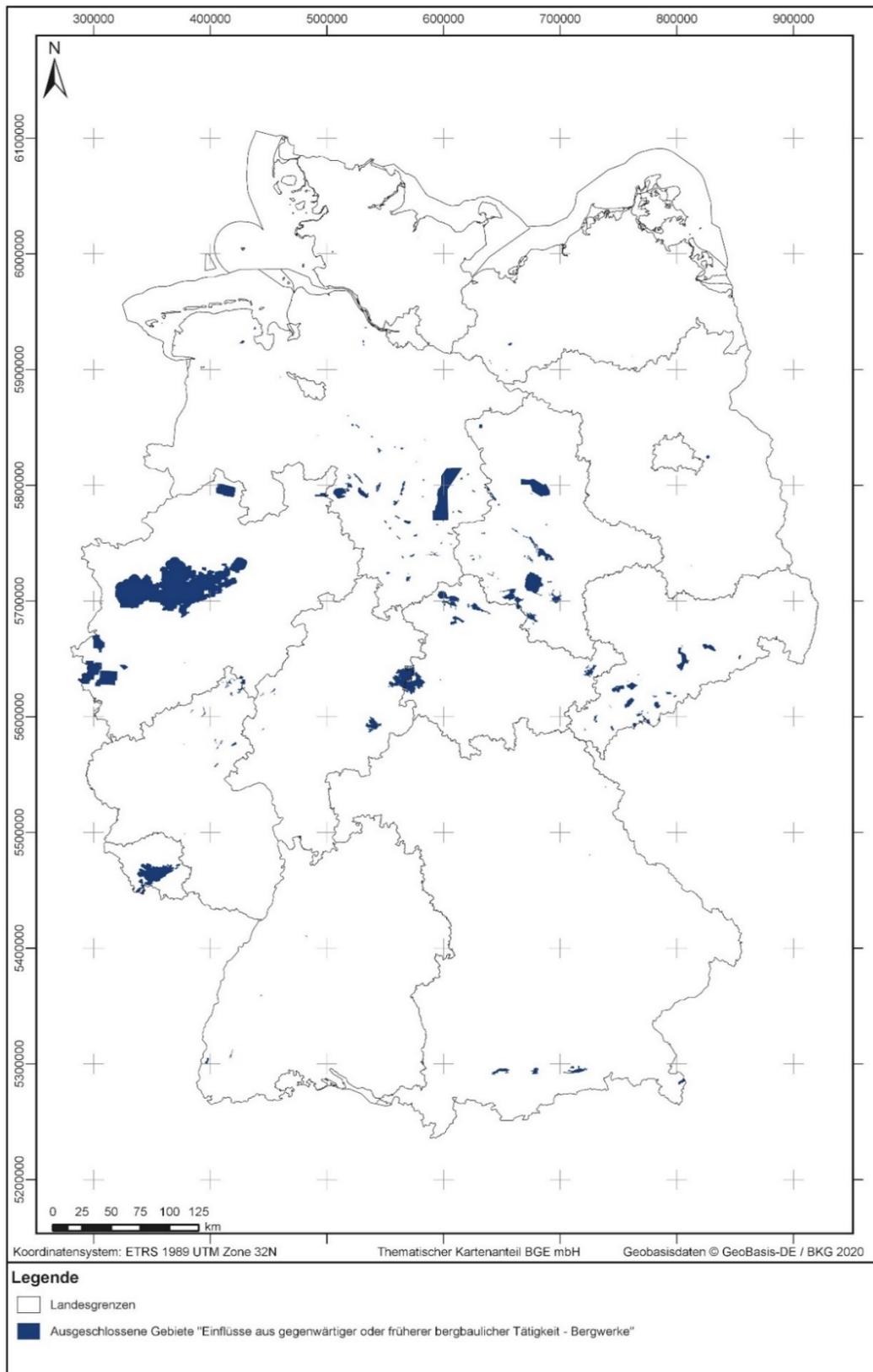


Abbildung 32: *Ausgeschlossene Gebiete nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit“ – Bergwerke“. In Folge der maßstabsgetreuen Darstellung der ausgeschlossenen Gebiete sind Objekte mit geringer lateraler Erstreckung nicht erkennbar.*

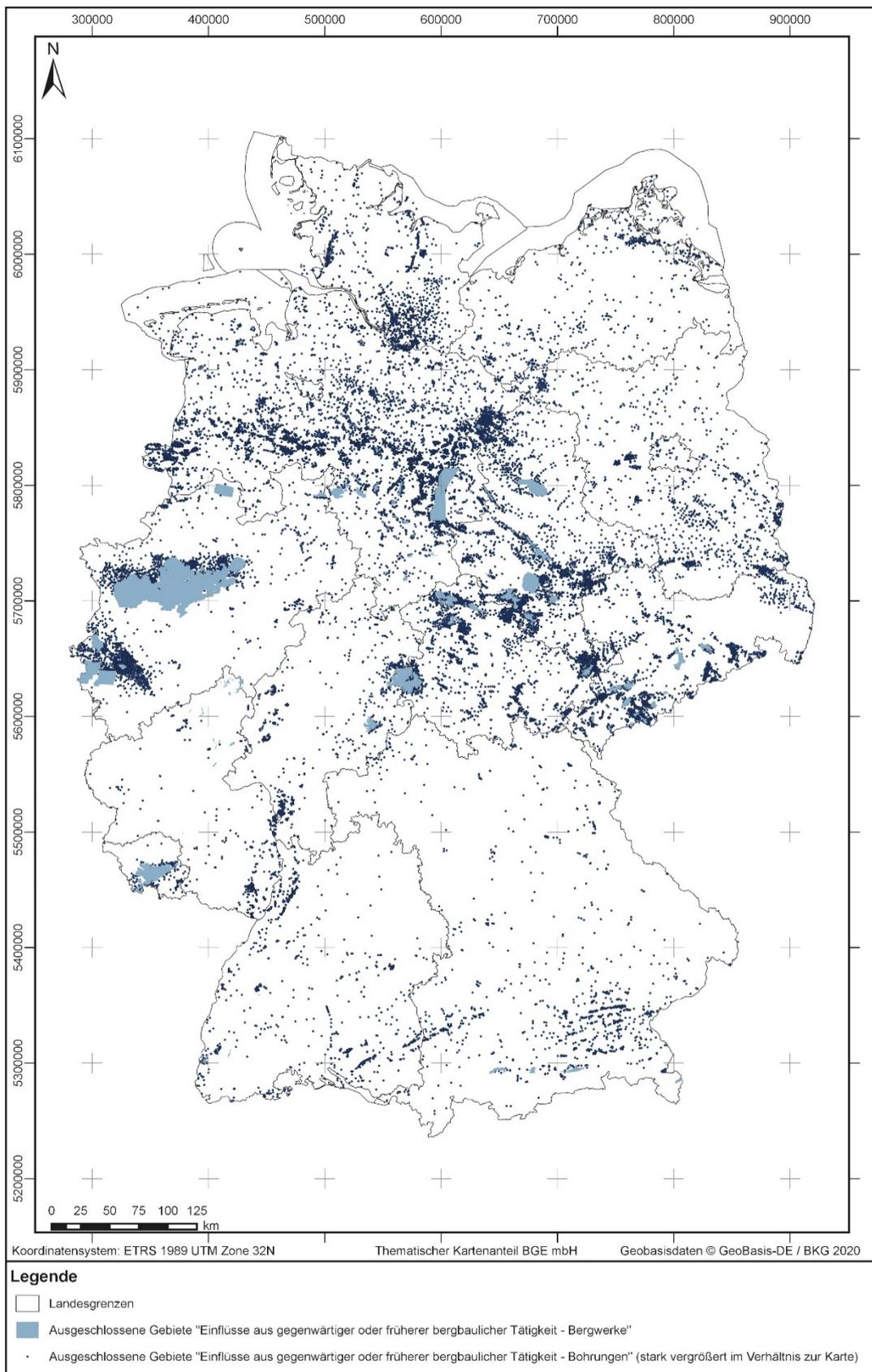


Abbildung 33: *Ausgeschlossene Gebiete nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit“.*

Es wird darauf hingewiesen, dass die Darstellung der ausgeschlossenen Gebiete für das Ausschlusskriterium „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bohrungen“ in dieser Karte nicht maßstabsgerecht ist, um eine Visualisierung in dem verwendeten Kartenformat zu ermöglichen. In Folge der maßstabsgetreuen Darstellung der ausgeschlossenen Gebiete für das Ausschlusskriterium „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Berwerke“ sind Objekte mit geringer lateraler Erstreckung nicht erkennbar.

10.5.2 Vorgemerkte bergbauliche Tätigkeiten

Zusätzlich zu den ausgeschlossenen Gebieten liegen der BGE für drei Bundesländer Unterlagen zu weiteren bergbaulichen Tätigkeiten vor, die sich mit hoher Wahrscheinlichkeit im endlagerrelevanten Tiefenbereich befinden, jedoch eine Umsetzung der Anwendungsmethode anhand der vorliegenden Daten aufgrund einer oder mehrerer der folgenden Punkte nicht möglich ist:

- Es ist keine genaue Abgrenzung des Grubengebäudes und des umgebenden Gebirgsbeeinflussungsbereiches möglich
- Eine Georeferenzierung ist nicht möglich (die genaue Lage des Objektes ist nicht bestimmbar)
- Die maximale Tiefe wurde nicht übermittelt oder ist nicht vorhanden, die BGE erwartet jedoch eine Tiefe von mindestens 300 m unter GOK
- Die Existenz einer bergbaulichen Tätigkeit ist der BGE bekannt. Die für eine Umsetzung der Anwendungsmethode notwendigen Daten liegen der BGE jedoch nicht vor.

In Abbildung 34 werden alle vorgemerkten bergbaulichen Tätigkeiten dargestellt, für die dennoch eine genaue Lagebestimmung anhand vorliegender Daten möglich ist. Im Bundesland Nordrhein-Westfalen wurden alle Objekte des Nichtsteinkohlenbergbaus (exklusive Braunkohlentagebau Hambach), die außerhalb von den in Abbildung 32 dargestellten ausgeschlossenen Gebieten liegen, näherungsweise anhand ihrer Rissblattumhüllenden wiedergegeben. In Thüringen ist das Kavernenfeld Dörnfeld anhand seiner Bereichsgrenzen dargestellt.

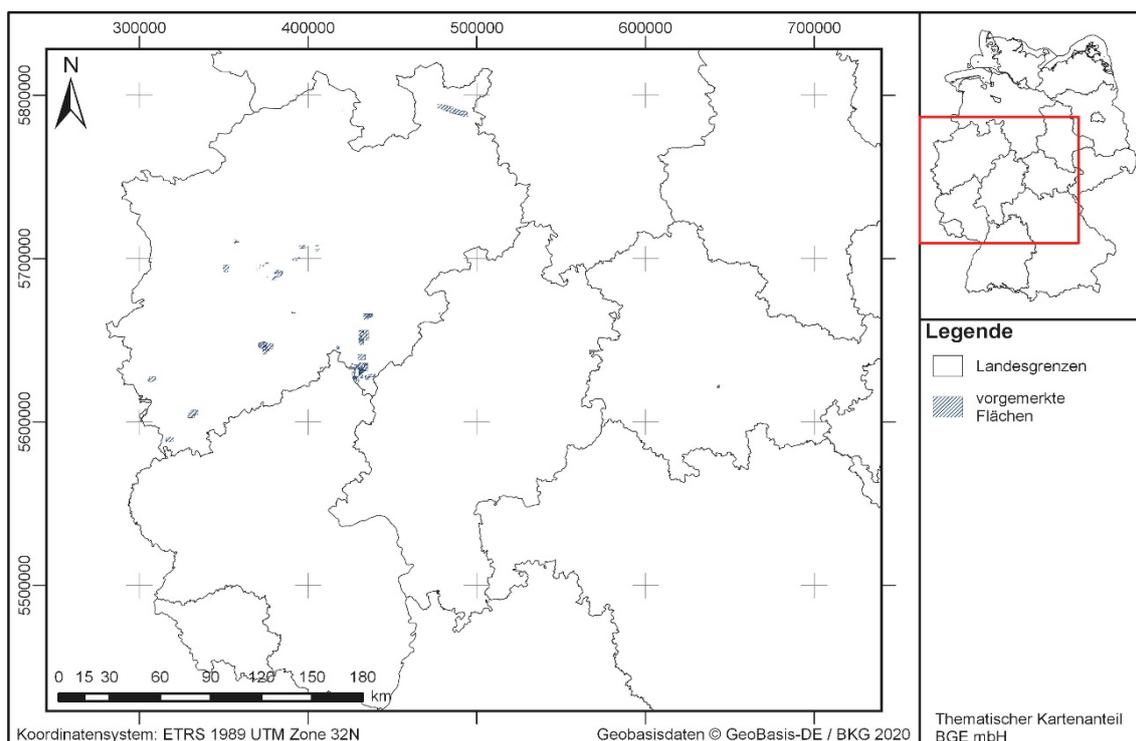


Abbildung 34: Kartendarstellung vorgemerkter ausgeschlossener Gebiete.
 Die Karte zeigt die Rissblattumhüllenden in Nordrhein-Westfalen und die Berechtigungsgrenze des Kavernenfeldes Dörnfeld in Thüringen.

Sämtliche weitere in Phase I, Schritt 1 vorgemerkten Bergwerke und Kavernen werden in Tabelle 10 aufgelistet:

Tabelle 10: Übersicht über vorgemerkte Bergwerke und Kavernen für das Ausschlusskriterium „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbau-licher Tätigkeit – Bergwerke“

Nr.	Bundesland	Name	Lage
1	Thüringen	Kavernenfeld Kehmstedt	Ortschaft Kehmstedt
2	Thüringen	Gewerkschaften Hüpstedt, Beberstedt und Felsenfest	bei Hüpstedt
3	Thüringen	Steinsalzbergwerk Ilversgehofen (Erfurt)	bei Erfurt
4	Thüringen	Hain I und II	Nördlich von Sondershausen
5	Thüringen	Schwarzburg	Ortschaft Seega
6	Thüringen	Kalibergwerk Oldisleben	bei Oldisleben
7	Thüringen	Salzbergwerk Heldrungen II	bei Oberheldrungen

Nr.	Bundesland	Name	Lage
8	Thüringen	Kaliwerke Gewerkschaft Walter und Irmgard	bei Hauteroda
9	Niedersachsen	Eisenerzbergwerk Peine	bei Peine
10	Niedersachsen	Eisenerzbergwerk Haverlahwiese	Bei Lichtenberg (Salzgitter)
11	Niedersachsen	Grubenkomplex Eisenerzbergwerke Galberg, Gitter, Finkenkuhle, Georg, Ida	Östlich Ortschaft Gitter (Salzgitter)
12	Niedersachsen	Eisenerzbergwerk Hannoversche Treue	Bei Salzgitter Bad
13	Niedersachsen	Eisenerzbergwerk Hüggel	Südlich Ortschaft Hasbergen

11 Seismische Aktivität

11.1 Einführung

„(2) Die Ausschlusskriterien sind:

[...]

4. seismische Aktivität

die örtliche seismische Gefährdung ist größer als in Erdbebenzone 1 nach DIN EN 1998-1/NA 2011-01;

[...]“

§ 22 Abs. 2 Nr. 4 StandAG

In § 22 Abs. 2 Nr. 4 des StandAG wird geregelt, dass ein Gebiet nicht als Endlagerstandort geeignet ist, wenn die örtliche seismische Gefährdung größer ist als in Erdbebenzone 1 nach DIN EN 1998-1/NA:2011-01.

11.1.1 Fachliche Grundlagen

Unter Seismizität versteht man die geographische, zeitliche und energetische Verteilung von Erdbeben in einem Gebiet (Murawski & Meyer 2010). Informationen zu Erdbebenhäufigkeit und -stärke sowie der zugrundeliegenden Mechanik von Erdbeben lassen sich durch Aufzeichnungen an seismischen Messstationen mit sogenannten Seismographen oder Seismometern gewinnen.

Ursache natürlicher Erdbeben sind in erster Linie Bewegungen der Erdkruste. Durch Verschiebung tektonischer Platten bauen sich Spannungen im Untergrund auf. Solche Spannungen werden durch aseismische Kriechbewegungen oder durch eine plötzliche Verschiebung von Gesteinsblöcken entlang von Störungen (bruchhafte Verformung des Gesteinsverbandes; siehe Kapitel 7 zum Ausschlusskriterium „aktive Störungszonen – tektonische Störungszonen“) abgebaut. Im letzteren Fall baut sich die elastische Gesteinsdeformation auf, bis der Reibungswiderstand an einer Stelle der Störung überwunden wird und es zum Bruch und der Ausbreitung von Bodenschwingungen kommt (Grünthal 2004; Press & Siever 2008). Die Blöcke in diesem Bereich der Störung verschieben sich und werden gegeneinander versetzt. Der Punkt, an dem die Verschiebung einsetzt, wird als Hypozentrum (auch Erdbebenherd genannt) bezeichnet (Press & Siever 2008; Murawski & Meyer 2010). Die Erdbebenwellen breiten sich vom Hypozentrum konzentrisch im Untergrund aus (Abbildung 35).

Seismische Wellen werden mithilfe eines Seismographen aufgezeichnet. Dieser besteht aus einem Registrier- und einem Aufzeichnungssystem, wobei beide Funktionen heute meist technisch getrennt werden. Das Seismometer als Teil des Seismographen ist ein elektromechanisches Instrument zur Registrierung der Bodenbewegung und deren Wandlung in ein elektrisches Signal. Es besteht aus einer trägen Masse, meist ein Magnet oder eine Spule, die nahezu entkoppelt vom Erdboden, z. B. an einer Spiralfeder

oder einem Scharnier, aufgehängt wird. Dies ermöglicht eine Übertragung der Bodenbewegung auf das Gestell ohne die Masse in Schwingungen zu versetzen (Press & Siever 2008). Die gemessenen Werte sind, abhängig vom Seismometertyp, proportional zur Verschiebung, Geschwindigkeit oder Beschleunigung der Bodenbewegung und werden als Funktion der Zeit in einem Seismogramm aufgezeichnet. Heutzutage erfolgt die Übertragung der Signale zum Registriergerät über Kabel- oder Funkverbindung. Oftmals werden die Analogsignale bereits im Seismometer selbst in digitale Signale umgewandelt und auf Magnetband oder Festplatte gespeichert (Berckhemer 2005).

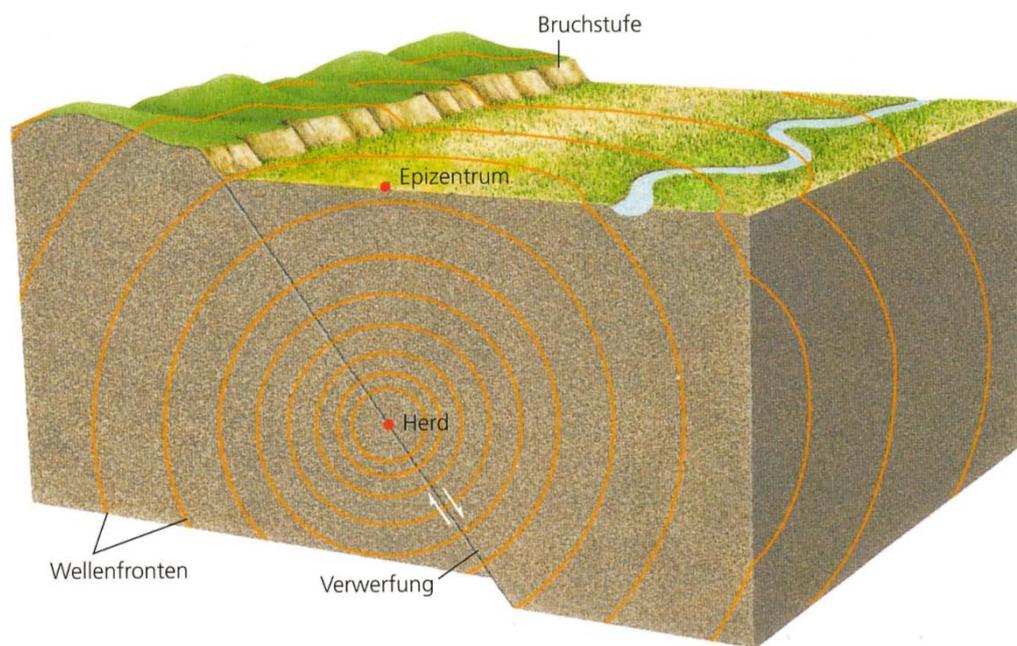


Abbildung 35: Ausbreitung seismischer Wellen vom Erdbebenherd (Press & Siever 2008).

Kommt es zum Bruch, dem Erdbeben, breiten sich die seismischen Wellen vom Hypozentrum konzentrisch im Untergrund aus. Das über dem Hypozentrum an der Erdoberfläche liegende Gebiet wird als Epizentrum bezeichnet (Press & Siever 2008).

In Deutschland werden hauptsächlich zwei Skalen verwendet, um Erdbeben nach ihrer Stärke zu klassifizieren: Die makroseismische Intensitätsskala und die Magnitudenskala (Grünthal 2004). Die makroseismische Intensität klassifiziert die Stärke der Erschütterungen an einem beliebigen Ort, z. B. einer Stadt, auf Basis beobachteter Effekte, also Erschütterungswahrnehmungen durch den Menschen und den Grad der Erdbebenschäden an Gebäuden und sonstigen Bauwerken (Grünthal 2004; Kaiser & Spies 2020). Sie unterteilt die Stärke eines Erdbebens in 12 Klassen, die meist anhand von römischen Ziffern angegeben werden (Berckhemer 2005; Murawski & Meyer 2010). In Europa wurde die Europäische Makroseismische Skala EMS-98 verbindlich eingeführt (Grünthal 1998, 2004).

Die Magnitudenskala kann wiederum in die Lokalmagnitudo M_L und die Momentmagnitudo M_W unterschieden werden. Die Lokalmagnitudo M_L ist ein instrumentelles Maß für

die gesamte beim Erdbeben freigesetzte seismische Energie und geht auf die Originaldefinition von Charles Richter zurück („Richterskala“) (Grünthal 2004). Sie beruht nicht auf Erschütterungs- und Schadenberichten, sondern wird aus dem Logarithmus des maximalen Ausschlags von Seismometern (Bodenschwingung) unter Berücksichtigung der Entfernung vom Hypozentrum bestimmt und aus den Seismogrammen einer Erdbebenstation berechnet (Grünthal 2004; Berckhemer 2005).

Die Momentmagnitude M_W ist ein physikalisch begründetes, quantitatives Stärkemaß auf Grundlage eines mechanischen Modells einer abrupt aktivierten Verwerfung als Reaktion auf einen Spannungsabbau (Grünthal 2004). M_W ist proportional zum Logarithmus des seismischen Moments, welches aus den Seismogrammen des Erdbebens berechnet wird (Kaiser & Spies 2020). Zwischen den beiden Magnitudenarten und auch der makroseismischen Intensitätsskala (z. B. Mercalli-Intensitätsskala) bestehen Umrechnungsbeziehungen. Vor allem können so auch historische Beben, bei denen lediglich Angaben zur beobachteten Schadenwirkung vorliegen, nach den Magnitudenskalen klassifiziert werden. Grünthal & Wahlström (2003) stellen empirische Beziehungen zwischen M_L und M_W vor.

11.1.2 Seismizität in Deutschland

In Deutschland ist die Seismizität vergleichsweise gering, aber dennoch nicht zu vernachlässigen (Grünthal 2004; Grünthal et al. 2018b). Obwohl Erdbeben mit katastrophalen Ausmaßen (Intensität größer EMS-98 VIII) in historischer Zeit in Deutschland nicht stattgefunden haben und auch nach heutiger Kenntnis der tektonischen Verhältnisse in der Zukunft wenig wahrscheinlich sind, ist die Seismizität in bestimmten Regionen des Landes, verglichen mit anderen Teilen Europas, erhöht (Grünthal 2004; Grünthal et al. 2018b). Zu nennen sind besonders das Alpenvorland, die Schwäbische Alb sowie nach Norden angrenzende Gebiete um Tübingen, Teile der Fränkischen Alb, das Vogtland sowie nach Norden angrenzende Gebiete, die Niederrheinische Bucht, der Oberrheingraben, Teile des Schwarzwalds sowie das mittlere Rheintal (Abbildung 36). Erdbeben treten in Deutschland in Tiefen von 5 – 20 km auf (Grünthal 2004). Außer den beschriebenen Zonen erhöhter Seismizität in Deutschland, tritt in den übrigen Teilen Deutschlands eine diffuse seismische Aktivität auf, weshalb kein Gebiet in Deutschland per se als aseismisch definiert werden kann (Grünthal et al. 2018b).

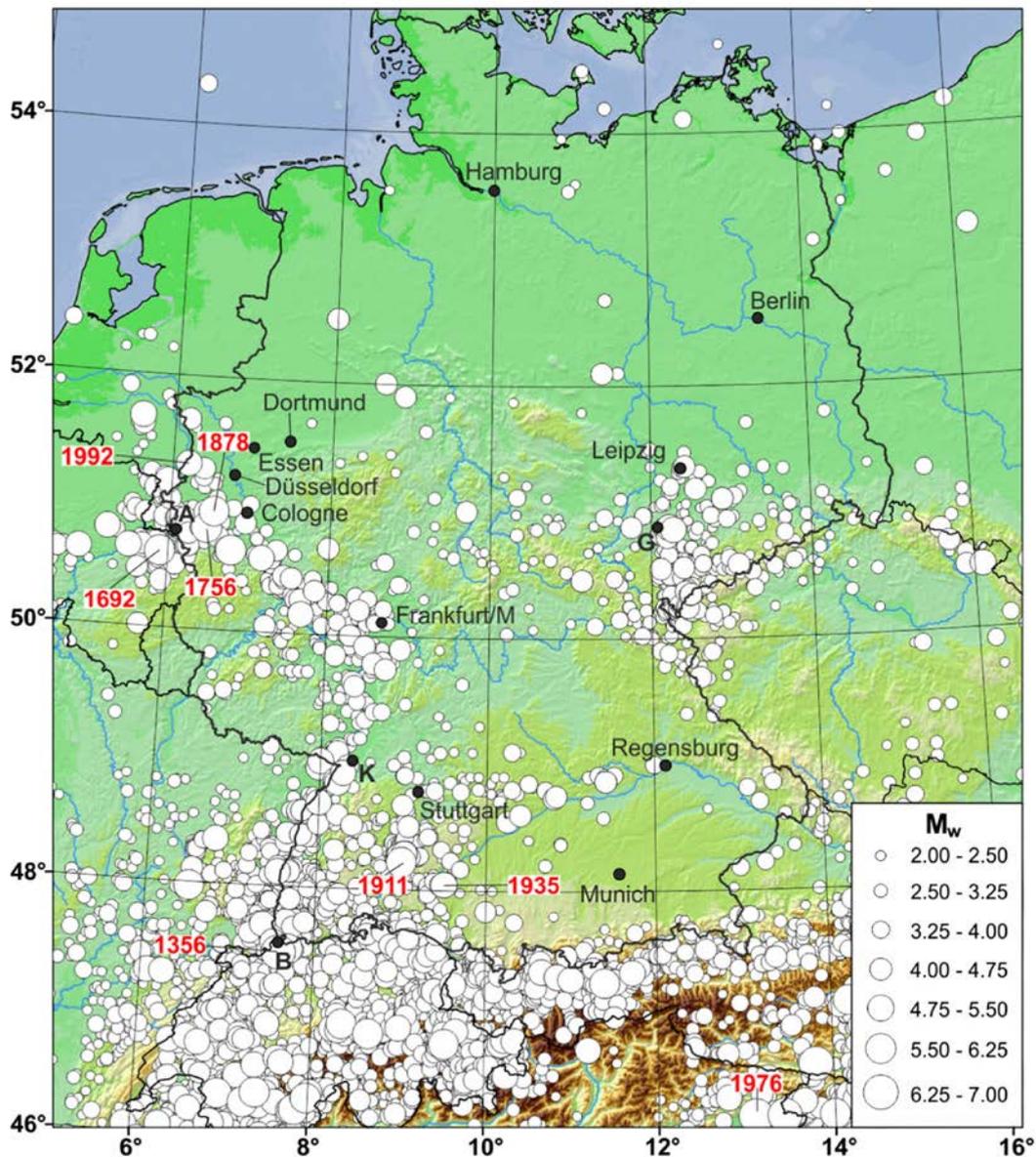


Abbildung 36: Darstellung der Verteilung der natürlichen seismischen Ereignisse in Deutschland (Grünthal et al. 2018b).

Vor- und Nachbeben sind nicht dargestellt. Die Jahreszahlen beschreiben wichtige Schadenbeben in historischer Zeit in Deutschland. (A) Aachen, (B) Basel, (G) Gera, (K) Karlsruhe.

Erdbeben entstehen vor allem an bereits bestehenden, aktiven Störungen und Brüchen, d. h. die Seismizität wird durch die großräumige tektonische Architektur der Erdkruste und das rezente krustale Spannungsfeld gesteuert (Grünthal et al. 2018b). Durch seine intrakontinentale Lage wird die tektonische Entwicklung Deutschlands im Känozoikum vor allem durch die Fernwirkung großräumiger plattentektonischer Prozesse beeinflusst. Hier ist vor allem die Kollision des europäischen und afrikanischen Kontinents und die anschließende Auffaltung der Alpen zu nennen (Grünthal et al. 2018b). Die tiefreichenden Störungszonen wurden meist im Känozoikum reaktiviert, wobei sich die Bewegungen bis in die Gegenwart fortsetzen können (Henningesen & Katzung 2006). Für einen

Überblick über die tektonischen Ursachen erhöhter seismischer Aktivität in einigen der oben genannten Gebiete in Deutschland, wird auf Kapitel 7 zum Ausschlusskriterium „aktive Störungszonen – tektonische Störungszonen“ verwiesen.

Angaben zum tektonischen Regime, z. B. zu seismotektonischen Zonen in Deutschland und zum rezenten krustalen Spannungsfeld in Deutschland und Europa, sind wichtige direkte Eingabeparameter für die probabilistische Gefährdungsanalyse (siehe Kapitel 11.1.3). Daher ist das Verständnis von Störungsmustern und des krustalen Spannungsfeldes ein wichtiger Schlüssel zum Verständnis der räumlichen Verteilung von Erdbeben und ein Fokus von aktuellen Forschungsarbeiten in der Seismologie (Plenefisch & Bonjer 1997; Hinzen 2003; Cornu et al. 2007).

Regional können neben großräumigen plattentektonischen Prozessen auch kleinräumigere Prozesse zu erhöhter Seismizität führen. Hier ist als Besonderheit die Region Vogtland zu nennen, da neben tektonischen Störungszonen auch quartärer Vulkanismus als Ursache für die erhöhte Seismizität eine wichtige Rolle spielt (siehe auch Kapitel 12 zum Ausschlusskriterium „vulkanische Aktivität“). Im Vogtland treten regelmäßig Schwarmbeben mit Stärken von M_L kleiner als 2.0 und vereinzelt Erdbeben mit Lokalmagnituden zwischen 2.1 und 2.9 auf (Korn et al. 2008; Fischer et al. 2014). Diese konzentrieren sich auf ein Gebiet, in dem sich der Egergraben und die Mariánské Lázně/Marktredwitz-Störung kreuzen (Fischer et al. 2014) und sind für den Menschen generell nicht spür- aber messbar. Außerdem treten vereinzelt Erdbeben mit Lokalmagnituden größer als 3.0 (diese sind spürbar; ab M_L größer gleich 4.0 bewegen sich sichtbar Zimmergegenstände) etwa 30 – 40 km nördlich im Raum Zeitz/Gera auf, wo die Nord-Süd-streichende Leipzig-Regensburg-Rostock-Störung verläuft. Diese ist in ihrem mittleren Teil zwischen Leipzig und Mariánské Lázně/Marktredwitz seismisch aktiv (Bankwitz et al. 2003). Es wird vermutet, dass entlang von Störungszonen in der Erdkruste aufsteigende Fluide und Gase die Schwarmbeben auslösen. In der Region Vogtland und Westböhmen entlang des Egergrabens wurden auf tschechischer Seite insgesamt drei Vulkane mit einem Alter von 0.78 – 0.12 Millionen Jahren datiert (Mrlina et al. 2009; Fischer et al. 2014). Der Austritt von CO_2 -reichen Mineralwässern und trockenen und nassen Mofetten in einigen Lokationen mit hohen $^3He/^4He$ -Verhältnissen belegen einen Mantelursprung dieser Fluide und Gase (Fischer et al. 2014; Weinlich 2014). Auf deutscher Seite wurde in den letzten Jahren ein weiteres quartäres Maar entdeckt (Rohrmüller et al. 2018).

11.1.3 Aktuell gültiger Nationaler Anhang DIN EN 1998-1/NA:2011-01

Durch das Ausschlusskriterium „seismische Aktivität“ werden Gebiete ausgeschlossen, in denen seismische Aktivitäten zu erwarten sind, die die Sicherheit eines Endlagers beeinträchtigen können (BT-Drs. 18/11398). Bewertungsgrundlage für die Abgrenzung von erdbebengefährdeten Gebieten in Deutschland bildet die Karte „Schematische Darstellung der Erdbebenzonen der Bundesrepublik Deutschlands“ Abbildung 37 (DIN EN 1998-1/NA:2011-01, Bild NA.1). In dieser Karte wird Deutschland in vier Erdbebenzonen eingeteilt, beginnend bei Erdbebenzone 0 bis maximal Erdbebenzone 3. Dabei wird je-

der Erdbebenzone eine Intensität sowie ein Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung a_{gR} zugeordnet. Diese Zuordnung ist in Tabelle 11 wiedergegeben. Gebiete innerhalb der Erdbebenzone 0 sowie Gebiete, die nach DIN EN 1998-1/NA:2011-01 keiner Erdbebenzone zugeordnet werden, z. B. Norddeutschland, werden als Gebiete mit sehr geringer Seismizität eingestuft. Dies bedeutet, dass das Ausschlusskriterium seismische Aktivität für Gebiete mit einer Intensität größer gleich 7 greift. Nichttektonische, induzierte seismische Ereignisse, z. B. bergbaubedingte Einsturzereignisse, werden im Rahmen der DIN EN 1998-1/NA:2011-01 nicht berücksichtigt.

Die Erdbebenzone 1 (geringe Gefährdung) wird in DIN EN 1998-1/NA:2011-01 durch das Intensitätsintervall von $6,5 \leq I < 7$ und einen Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung (a_{gR}) von $0,4 \text{ m/s}^2$ definiert (vgl. Tabelle 11). Bei Erdbeben mit einer Intensität von 7 (größer als Erdbebenzone 1) treten merkliche Schäden an Gebäuden auf, wogegen Beben mit kleineren Intensitäten nur geringe oder keinerlei Gebäudeschäden verursachen. Im Vergleich zu Oberflächenbauwerken werden die Auswirkungen von Erdbeben auf Untertagebauwerke im Allgemeinen als geringer eingeschätzt (AkEnd 2002).

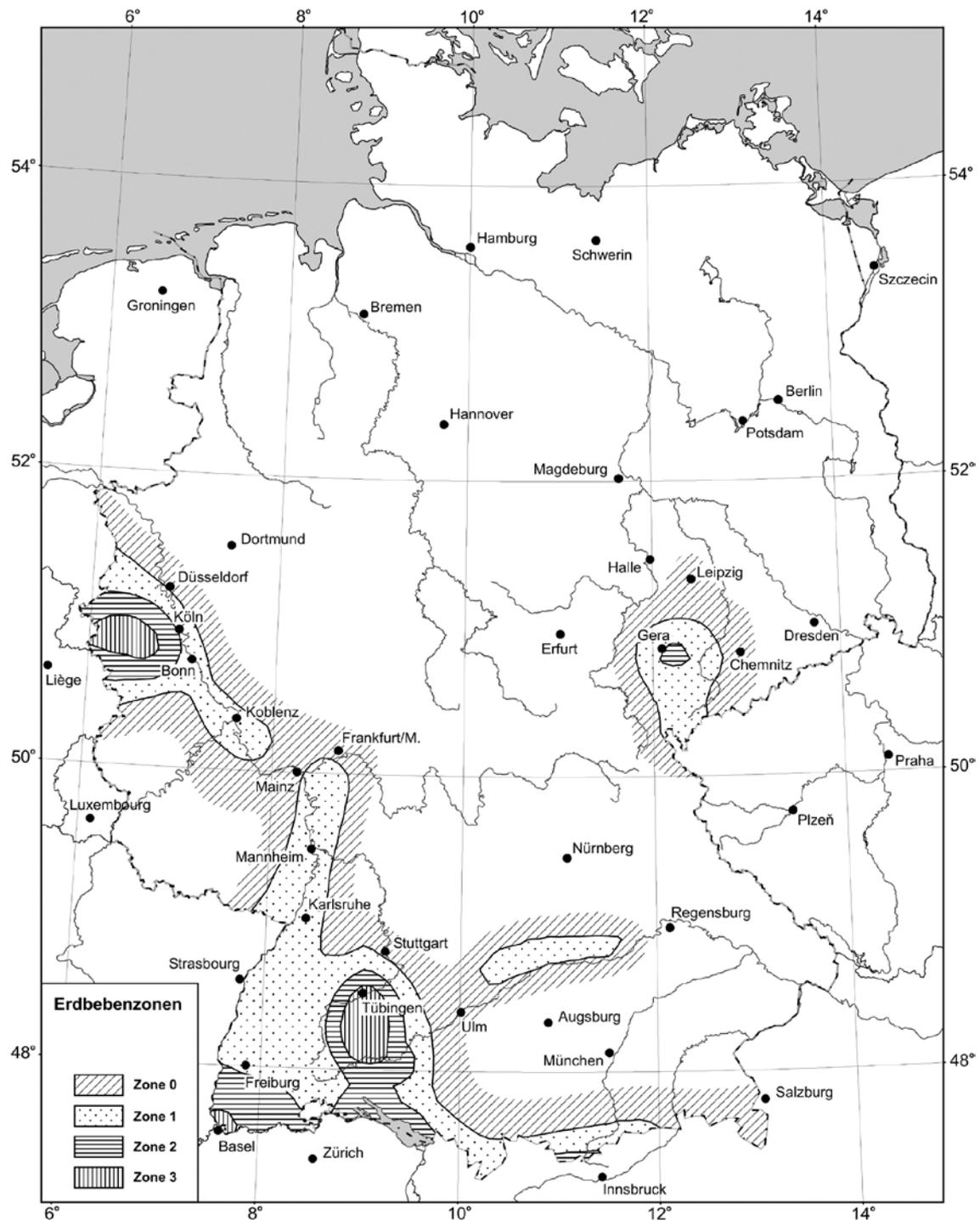


Abbildung 37: Schematische Darstellung der Erdbebenzonen der Bundesrepublik Deutschland (DIN EN 1998-1/NA:2011-01, Bild NA.1)

Tabelle 11: Zuordnung von Intensitätsintervallen und Referenz-Spitzenwerten der Bodenbeschleunigung a_{gR} zu den Erdbebenzonen gemäß DIN EN 1998-1/NA: 2011-01.
I beschreibt jeweils die Intensität.

Erdbebenzone	Intensitätsintervall	Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung a_{gR} in m/s^2
0	$6 \leq I < 6,5$	-
1	$6,5 \leq I < 7$	0,4
2	$7 \leq I < 7,5$	0,6
3	$7,5 \leq I$	0,8

Die Karte „Schematische Darstellung der Erdbebenzonen der Bundesrepublik Deutschlands“ basiert auf einer probabilistischen seismischen Gefährdungsanalyse aus den 1990er Jahren. Die verwendete Datengrundlage, die Berechnungsmethoden sowie die Ergebnisdarstellung können in Grünthal & Bosse (1996) nachvollzogen werden.

Im Wesentlichen wurden Zonen basierend auf den mit einer Wiederkehrperiode von 475 Jahren maximal zu erwartenden Erdbebenintensitäten abgegrenzt (Abbildung 37). Dies bedeutet, dass in dieser Zeitspanne (475 Jahre) ein Erdbebenereignis gemäß der gewählten Wahrscheinlichkeit des Überschreitens von 10 % in 50 Jahren im Durchschnitt einmal vorkommt. Wichtige Eingangsparameter waren u. a. die Einteilung Deutschlands in seismische Quellregionen, die auf Basis der Erdbebenaktivität und der seismotektonischen Gegebenheiten Deutschlands festgelegt wurden, die Intensitäts-Häufigkeitsbeziehung, die Dämpfungsrelation und die charakteristische Herdtiefe (Grünthal & Bosse 1996).

Für die Berechnung der Erdbebengefährdung wurden die damals aktuellsten Erdbebenkataloge der Bundesrepublik Deutschland und weiterer europäischer Länder, z. B. Belgien, Italien, Großbritannien, Österreich, usw. verwendet (Grünthal & Bosse 1996). Die verschiedenen Erdbebenkataloge mussten zur Erstellung einer einheitlichen Datengrundlage für die Berechnung der Erdbebengefährdung einer umfangreichen Bearbeitung unterzogen werden. Die wichtigsten Bearbeitungsschritte umfassen u. a. die kritische Prüfung insbesondere historischer Schadenbeben und ggf. das Vornehmen einer Neuinterpretation, das Aussortieren von Scheinbeben sowie die Aufnahme bisher nicht katalogisierter Schadenbeben. Da es bei der Verwendung von multiplen Erdbebenkatalogen häufig zu doppelten Einträgen kommt, wurde jeweils die zuverlässigste Interpretation eines Erdbebenereignisses für die Gefährdungsberechnung verwendet. Weiterhin wurden für die Gefährdungsberechnung nur die jeweiligen Hauptbeben (nicht etwaige Vor- und Nachbeben) sowie bei Schwarmbeben das jeweils stärkste Ereignis berücksichtigt (Grünthal & Bosse 1996). Insgesamt wurden in die Erdbebengefährdungsanalyse 27 000 Erdbebenereignisse ab dem Jahre 1000 nach Christus einbezogen (Grünthal & Bosse 1996).

11.2 Datenabfragen und Datengrundlage

Mit der Datenabfrage von August 2017, konkretisiert durch eine zweite Datenabfrage im Februar 2018, hat die BGE bei den zuständigen Bundes- und Landesbehörden Gebiete abgefragt, in denen seismische Aktivitäten zu erwarten sind, die gemäß DIN EN1998-1/NA:2011-01 in die Erdbebenzone 2 oder 3 einzustufen sind.

Die Datenlieferungen der Bundes- und Landesbehörden waren sehr heterogen und enthielten bei den durch die Erdbebenzonen betroffenen Bundesländern meist thematisch verwandte aber nur in wenigen Fällen die konkret erfragten Informationen. Einige Behörden übersandten Erdbebenereignisse aus den (historischen) Erdbebenkatalogen, Verweise auf Erdbebenkataloge oder Hinweise auf Daten bei Forschungseinrichtungen oder in Archiven.

In einigen Fällen übersandten Behörden GIS-fähige Dateien mit Erdbebenzonen aus DIN EN 1998-1/NA:2011-01 oder DIN 4149:2005-04 (DIN 4149:2005-04) (der Vorgängerversion des aktuell gültigen Nationalen Anhangs der DIN EN 1998-1). Diese sind zum großen Teil an Verwaltungseinheiten im Geltungsbereich der Landesbauordnungen orientiert.

Daher hat die BGE entschieden, die auszuschließenden Bereiche direkt aus der „Karte der Erdbebenzonen“ in DIN EN 1998-1/NA:2011-01 zu vektorisieren. Eine Digitalisierung der Konturlinie zwischen Erdbebenzone 1 und 2 erfolgte mithilfe der Software ArcGIS Pro. Die Erdbebenzonengrenze ist in Abbildung 37 (DIN EN 1998-1/NA:2011-01, Bild NA.1) durch eine Linie mit einer bestimmten Breite dargestellt. Daraus ergibt sich für das Digitalisierungsergebnis eine von der Linienbreite abhängige Unschärfe von etwa 2 – 3 km. Diese Unschärfe wurde bei der Digitalisierung dahingehend berücksichtigt, dass die Linienerstellung der BGE sich möglichst nah entlang der Erdbebenzone 2-nahen Seite der Erdbebenzonengrenzlinie orientierte, um eine flächenmäßige Überschätzung der ausgeschlossenen Gebiete zu vermeiden.

11.3 Anwendungsmethode

Die BGE hat, wie in § 22 Abs. 2 Nr. 4 StandAG vorgegeben, alle Gebiete mit einer örtlichen seismischen Gefährdung (nach DIN EN 1998-1/NA:2011-01) größer als Erdbebenzone 1 ausgewählt und in alle endlagerrelevanten Tiefen projiziert. Die dadurch entstehenden Volumenkörper stellen das ausgeschlossene Gebiet dar.

11.4 Ergebnisse

Die aufgrund der vom StandAG vorgegebenen Methode von der BGE ausgeschlossenen Gebiete umfassen 5 Regionen in Deutschland. Diese befinden sich in der Niederrheinischen Bucht in Nordrhein-Westfalen westlich von Köln, im Vogtland im Grenzgebiet zwischen Thüringen und Sachsen, in Bayern im Alpenvorland sowie in Baden-Württemberg im Schwarzwald, in der Schwäbischen Alb um Tübingen sowie im Alpenvorland am Bodensee (siehe Abbildung 38). Die ausgeschlossenen Gebiete umfassen jeweils eine Fläche zwischen 130 km² und 5500 km².

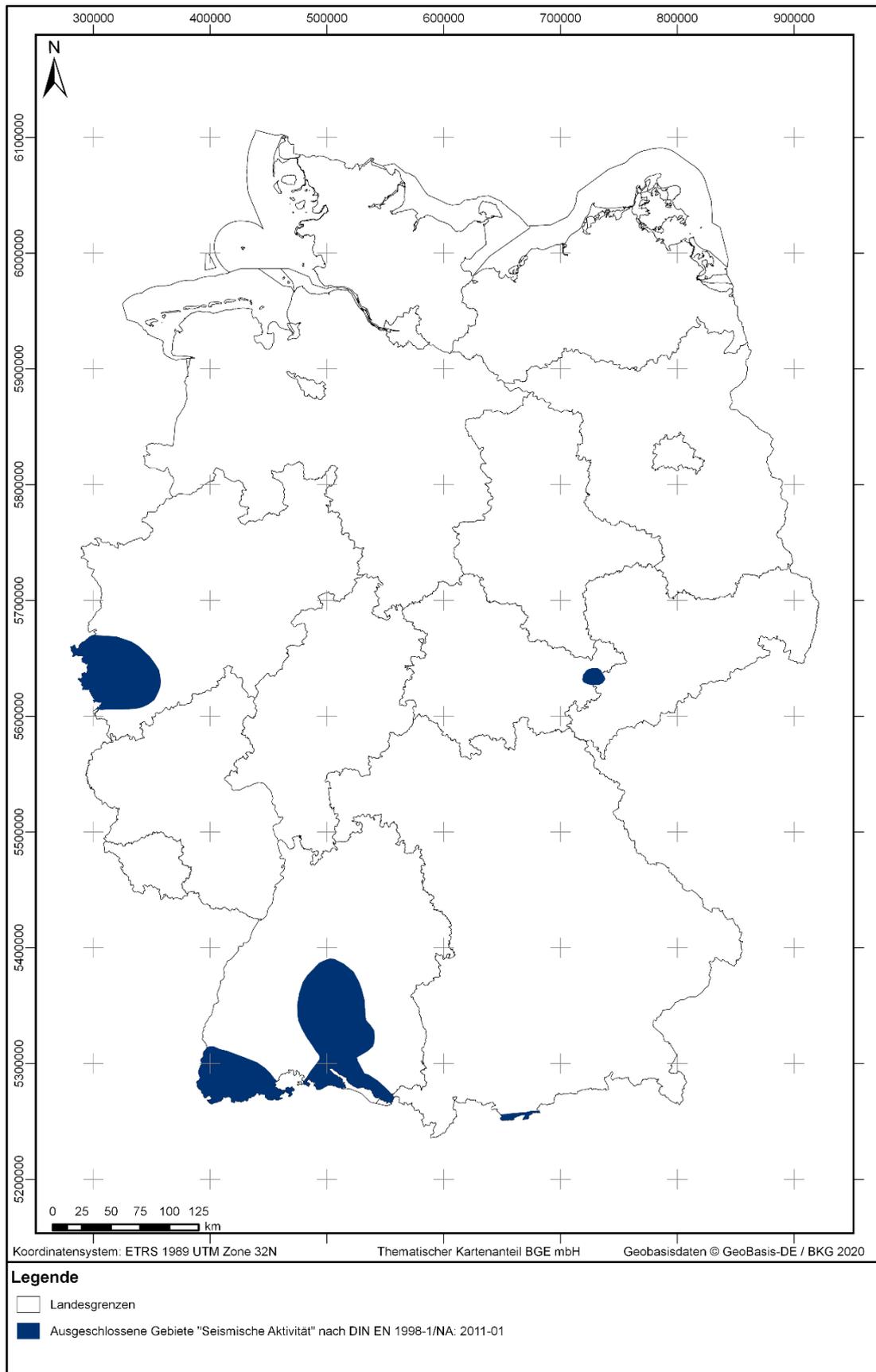


Abbildung 38: *Ausgeschlossene Gebiete nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „seismische Aktivität“ durch die BGE.*

Die ausgeschlossenen Gebiete umfassen 5 Regionen in der Niederrheinischen Bucht in Nordrhein-Westfalen, im Vogtland im Grenzgebiet zwischen Thüringen und Sachsen, in Bayern im Alpenvorland sowie in Baden-Württemberg im Schwarzwald, in der Schwäbischen Alb um Tübingen sowie im Alpenvorland am Bodensee.

11.5 Ausblick

Für die Anwendung des Ausschlusskriteriums „seismische Aktivität“ wird im Standortauswahlgesetz auf den Nationalen Anhang zur DIN EN 1998-1 (DIN EN 1998-1/NA:2011-01) verwiesen. Durch die statische Verweisung auf den nationalen Anhang teilt diese Rang und Qualität des StandAG. Die Anwendung des Ausschlusskriteriums erfolgt daher gemäß § 22 Abs. 2 Nr. 4 StandAG anhand der DIN EN 1998-1/NA 2011-01.

Der Stand der Wissenschaft zur probabilistischen seismischen Gefährdungsanalyse hat sich jedoch inzwischen weiterentwickelt. Auf Grundlage einer Neueinschätzung der Erdbebengefährdung Deutschlands (Grünthal et al. 2018a, 2018b) befindet sich der Nationale Anhang der DIN EN 1998-1 aktuell in einem Überarbeitsverfahren, welches noch nicht abgeschlossen ist. Ein Entwurf mit Stand Mai 2020 liegt bereits vor (DIN EN 1998-1/NA:2020-05).

Die zugrundeliegenden Erdbebenkataloge (Grünthal et al. 2009; Grünthal & Wahlström 2012) wurden für die Berechnung des neuen Nationalen Anhangs grundlegend überarbeitet, in Momentmagnituden M_W harmonisiert und für das Vorhaben mit Daten von 1000 nach Christus bis ins Jahr 2014 weitergeführt (Grünthal et al. 2018a, 2018b). Des Weiteren wurden bei der Einteilung Deutschlands in seismische Quellregionen Ungewissheiten mit Hilfe eines logischen Baumes in den Berechnungen berücksichtigt (Grünthal et al. 2018a, 2018b).

Der Nationale Anhang von 2011 (DIN EN 1998-1/NA:2011-01) und die Ergebnisse der Neueinschätzung der Erdbebengefährdung Deutschlands (Grünthal et al. 2018a, 2018b) unterscheiden sich deutlich sowohl in der Datengrundlage als auch in den verwendeten Berechnungsmethoden.

Außerdem ergeben sich Unterschiede bei den verwendeten Parametern der Bodenbewegung: Die seismische Gefährdungsanalyse im zurzeit gültigen Nationalen Anhang wurde mit dem Parameter der makroseismischen Intensität durchgeführt, im Entwurf des neuen Nationalen Anhangs (DIN EN 1998-1/NA:2020-05) sowie in Grünthal et al. (2018a, 2018b) mit dem Parameter der spektralen Antwortbeschleunigung im Plateaubereich $S_{ap,R}$. In Grünthal et al. (2018a) wird dieser Wert als „Mittelwert der Amplituden des Antwortspektrums“ bezeichnet. Die spektrale Antwortbeschleunigung beschreibt die frequenzabhängige maximale Beschleunigung eines beliebigen Bauwerks oder einer Struktur auf ein Erdbeben. Weitere Unterschiede ergeben sich u. a. in der Verwendung der seismischen Bodenbewegungsmodelle und der Berücksichtigung von Ungewissheiten. Diese können in Grünthal & Bosse (1996) und Grünthal et al. (2018a, 2018b) nach-

vollzogen werden. Eine Gegenüberstellung der Unterschiede der jeweiligen Datengrundlagen, Berechnungsmethoden und ingenieurseismologischen Kenngrößen gibt ein Bericht der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, der im Auftrag der BGE angefertigt wurde (Kaiser & Spies 2020).

Sobald ein neuer Nationaler Anhang gilt und alle erforderlichen Voraussetzungen gegeben sind, wird die BGE diesen im Standortauswahlverfahren berücksichtigen.

12 Vulkanische Aktivität

12.1 Einführung

„(2) Die Ausschlusskriterien sind:

[...]

5. vulkanische Aktivität

es liegt quartärer Vulkanismus vor oder es ist zukünftig vulkanische Aktivität zu erwarten;

[...]“

§ 22 Abs. 2 Nr. 5 StandAG

In § 22 Abs. 2 Nr. 5 StandAG wird geregelt, dass ein Gebiet nicht als Endlagerstandort geeignet ist, wenn quartärer Vulkanismus vorliegt oder zukünftig vulkanische Aktivität über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahren zu erwarten ist.

12.1.1 Fachliche Grundlagen

Als Vulkanismus werden sämtliche Prozesse und Erscheinungsformen bezeichnet, die mit dem Austritt von heißen, flüssigen Gesteinsschmelzen und Gasen an der Erdoberfläche verbunden sind (Murawski & Meyer 2010). Explosives Herausschleudern von Magma (explosive Eruption) (siehe Abbildung 39) wird dabei von ruhigem Ausfließen (effusive Eruption) unterschieden (Martin & Eiblmaier 2002). Durch beide Formen vulkanischer Aktivität bestehen erhebliche Risiken (Schmincke 2013), auch für die Sicherheit eines Endlagers (Röthemeyer & Viehl 1989; Jentzsch 2001).

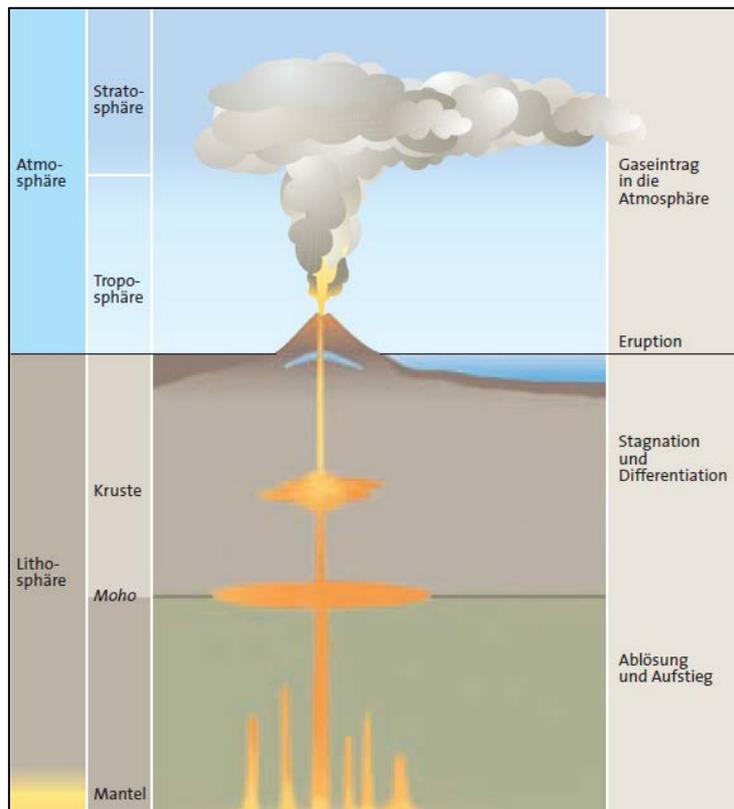


Abbildung 39: Schematisches Vulkan-Magma-System (verändert nach Schmincke (2013), um magmatische Vorgänge in der Lithosphäre darzustellen). Gesteinsschmelzen entstehen in einer Tiefe von 35 – 2 km und steigen durch ihre geringere Dichte dem Umgebungsgestein gegenüber nach oben (Winter 2001). An der Moho (Mohorovičić-Diskontinuität; definiert durch eine Diskontinuität der Laufgeschwindigkeit von Erdbebenwellen) genannten Grenze zwischen Kruste und Mantel sammeln sich die Schmelzen. Ein Teil der Schmelzen steigt bis in die Kruste auf und bildet dort Magmenreservoirs. Aus diesen dringt ein kleiner Teil bis zur Oberfläche, wo es zu magmatischen Eruptionen kommt (Schmincke 2013).

Das Auftreten von Vulkanismus ist in den überwiegenden Fällen eine Folge plattentektonischer Prozesse. Daher tritt Vulkanismus vermehrt an Plattenrändern auf, zum Beispiel an Mittelozeanischen Rücken, wo neue ozeanische Kruste gebildet wird oder an Subduktionszonen, wo alte ozeanische Kruste unter älterer ozeanischer oder kontinentaler Kruste abtaucht (Schmincke 2013; Jicha & Jagoutz 2015). Ein bekanntes Beispiel für Vulkanismus entlang von aktiven Plattengrenzen ist der Pazifische Feuerring, wo ozeanische Kruste unter kontinentale Kruste, z. B. entlang der Westküste Südamerikas, absinkt (Schmincke 2013; Wörner et al. 2018) oder im Westpazifik, wo intensiver Vulkanismus für die Entstehung eines Inselbogens verantwortlich ist (Karig 1974). Vulkanismus kann jedoch auch weit entfernt von aktiven Plattenrändern auftreten, wenn Kontinente Dehnungskräften (passiver Riftprozess) oder aufsteigendem Mantelmaterial (aktiver Riftprozess) ausgesetzt sind (z. B. Miller 1992; Ferguson et al. 2010), z. B. im Egergraben (Kämpf et al. 2005) oder im Oberrheingraben. Außerdem kann aufsteigendes Mantelmaterial in Form eines Mantelplume die Lithosphäre erreichen und Inselketten

wie Hawaii oder die Kanarischen Inseln bilden (Wilson 1963; White & McKenzie 1995; Carracedo et al. 1998).

Die Vielfalt vulkanischer Typen geht weit über das typische Bild eines Schichtvulkans wie des Vesuv hinaus. Verschiedene chemische und physikalische Einflussfaktoren prägen die Eigenschaften der zu eruptierenden Magmen. Davon hängt ab, in welcher Form Vulkanausbrüche stattfinden und welche Spuren sie an der Erdoberfläche hinterlassen (Cassidy et al. 2018).

Die bekanntesten Vulkantypen sind Schichtvulkane, bei denen hochviskoses (zähflüssiges) Magma steile Hänge formt sowie Schildvulkane, deren sehr flache Hänge durch niedrigviskoses (dünnflüssiges) Magma gebildet werden. Schichtvulkane kommen typischerweise an Subduktionszonen vor (Fuji, Mt. Hood), während Schildvulkane meistens an *Hotspots*, also über aufsteigendem Mantelmaterial (z. B. Mauna Loa), entstehen (de Silva & Lindsay 2015). Die in Deutschland verbreitetsten Formen von Vulkanen sind Schlackenkegel und Maare. Schlackenkegel werden innerhalb von kurzen Zeiträumen gebildet und sind in der Regel weniger als ein Jahr aktiv. Beim Ausbruch wird zunächst während der initialen, häufig aktiven Phase hauptsächlich Lockermaterial (Asche, Tephra) gefördert. Darauf folgt eine Phase mit effusivem Vulkanismus mit Eruption von Lavaströmen (Schmincke 2013). Als Maar wird ein Trichter bezeichnet, der durch eine heftige Explosion entsteht (phreatomagmatische Eruption). Ursache dafür ist das Aufeinandertreffen von aufsteigendem Magma und Grundwasser. Weiterhin können Vulkane als Caldera (Krater) auftreten, wenn die Decke einer entleerten Magmenkammer nach einem Ausbruch einstürzt (Yellowstone, Teide, Laacher-See-Vulkan) (Schmincke 2013).

Wie im vorangegangenen Absatz angedeutet, ist der Vulkanbau maßgeblich von der Art des Vulkanausbruchs abhängig. So gibt es, neben den bereits beschriebenen phreatomagmatischen Eruptionen, nach Typvulkanen benannte Eruptionformen, die nachfolgend, nach zunehmender Explosivität sortiert, aufgezählt werden: Hawaiianische Eruptionen (Ausfließen von niedrigviskoser Magma an Schildvulkanen, typische Ausbruchform der Vulkane auf Hawaii), Strombolianische Eruptionen (regelmäßiger Auswurf von Lava oder Asche über einen sehr langen Zeitraum, benannt nach dem Stromboli), Vulkanianische Eruptionen (viele Explosionen und hohe Ascheförderung, benannt nach dem Vulkan Vulcano in Süditalien), Surtseyanische Eruptionen (Wechselwirkung zwischen Magma und Wasser mit dem Auswurf von Asche, Schlamm, Wasser und Wasserdampf, wie bei der Entstehung der Insel Surtsey in Island), Peleeanische Eruptionen (benannt nach der Eruption Pelee von 1902 mit dem Einsturz vom Lavadom am Gipfel, durch welche pyroklastische Ströme entstehen) und Plinianische Eruptionen, bei denen durch explosive Ausbrüche ein hoher Anteil an Trockenmaterial gefördert wird (benannt nach der Beschreibung des Ausbruchs des Vesuv 79 nach Christus von Plinius dem Jüngeren) (Siebert et al. 2015). Weiterhin gibt es besondere Bezeichnungen für Vulkanausbrüche, die unter der Meeresoberfläche (submarine Eruptionen) oder unter Gletschern (subglaziale Eruptionen) stattfinden (Siebert et al. 2015).

12.1.2 Vulkanismus in Deutschland

Innerhalb Deutschlands gibt es an verschiedenen Stellen Nachweise für vulkanische Aktivität aus der jüngeren Erdgeschichte (Meschede 2018). Die quartären (vor 2.6 Millionen

Jahren bis heute) und tertiären (vor 66 – 2.6 Millionen Jahren) Vulkanfelder liegen in Eifel, Westerwald, Vogelsberg, Rhön, Egergraben und in einigen südlichen Regionen in Baden-Württemberg (Kaiserstuhl, Hegau, Urach) (Abbildung 40). Auf dem Staatsgebiet der heutigen Bundesrepublik Deutschland hat es in der geologischen Vergangenheit schätzungsweise zwischen 5000 und 8000 Eruptionen gegeben (Hofbauer 2016). Die ältesten Nachweise vulkanischer Aktivität sind an Einzelvorkommen, wie z. B. dem Neuerburger Kopf (Unterkreide; Meyer 2013) oder dem Katzenbuckel (Oberkreide; Hofbauer 2016) getätigt worden. Tertiärer Vulkanismus (Abbildung 40) trat dagegen flächendeckender auf und ist in allen oben genannten Gebieten nachgewiesen.

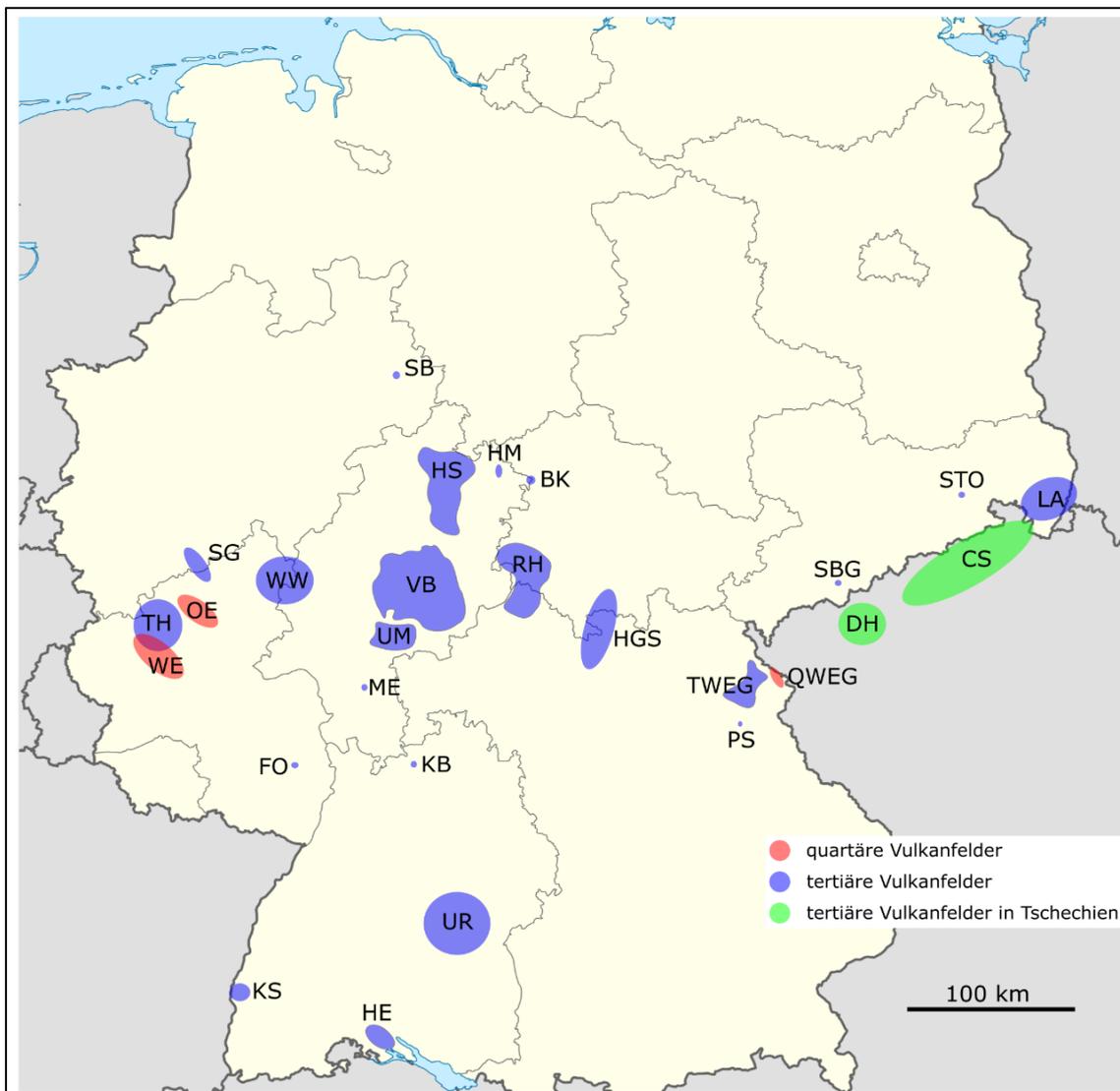


Abbildung 40: Übersichtskarte über quartäre und tertiäre Vulkanfelder in Deutschland sowie im tschechischen Teil des Egergrabens (Basiskarte nach Nord-NordWest (2008), Lokaltäten nach Hofbauer (2016) hinzugefügt). Quartäre Vulkanfelder: Westeifel (WE), Osteifel (OE), Quartärer westlicher Egergraben (QWEG); Tertiäre Vulkanfelder: Tertiäre Hocheifel (TH), Siebengebirge (SG), Westerwald (WW), Vogelsberg (VB), Hessische Senke (HS), Rhön (RH), Heldburger Gangschar (HGS), Tertiärer westlicher Egergraben (TWEG), Lausitz (LA), Erzgebirge um Scheibenberg (SBG), Urach (UR), Hegau (HE), Kaiserstuhl (KS); im tschechischen Teil des Egergrabens gelegene tertiäre Vulkanfelder: České středohoří (Böhmisches Mittelgebirge) (CS), Duppauvé hory (Duppauer Gebirge) (DH); punktförmige tertiäre und prätertiäre Vorkommen: Blaue Kuppe (BK), Forst (FO), Hoher Meißner (HM), Katzenbuckel (KB), Messel (ME), Parkstein (PS), Sandebeck (SB), Stolpen (STO), Untermain-Trapp (UM).

Quartäre vulkanische Aktivität trat nur in der Eifel und im Vogtland bzw. Egergraben auf (Meyer 2013; Hofbauer 2016) (Abbildung 40).

Die Eifel ist bereits seit einem langen Zeitraum (Eozän bis heute) vulkanisch aktiv. Obwohl bekannt ist, dass es sich um Hotspot-Vulkanismus handelt, ist derzeit allerdings noch unbekannt, ob die Vulkanfelder der Ost- und Westeifel zusammenhängend einer größeren Plumestruktur (aus dem Erdmantel gespeister Aufstrom heißen Gesteinsmaterials) entstammen oder ob mehrere kleinräumige Plumestrukturen für den Vulkanismus verantwortlich sind (Schmincke 2013). Gesichert ist dagegen, dass es mehrere Magmenkammern unter der Eifel gibt. In der kleineren Osteifel befinden sich, im Gegensatz zur Westeifel, auch Magmenkammern in der höheren Kruste, die Ursache für die gasreichen, plinianischen Eruptionen sind. Solche Eruptionen haben dazu beigetragen, dass in der Osteifel vergleichsweise mehr Magma gefördert wurde (Hofbauer 2016). CO₂-Ausgasungen, die auch heute noch in der Eifel beobachtet werden können, deuten auf gegenwärtig andauernde vulkanische Aktivität von tieferliegenden Magmenkammern hin (Schmincke 2013).

Am Egergraben dagegen tritt vulkanische Aktivität entlang eines sich während des späten Eozän gebildeten Grabensystems auf (Kämpf et al. 2005). Dieses ist mittlerweile zwar inaktiv, jedoch wurde durch die für die Grabenbildung ursächlichen Spannungen in der Lithosphäre vulkanische Aktivität im Egergraben (ähnlich wie auch beispielsweise im Oberrheingraben) begünstigt (Hofbauer 2016). Der westliche Bereich des Egergrabens, das Becken von Cheb, welches im späten Tertiär gebildet wurde, ist bis heute auch seismisch aktiv (Bankwitz et al. 2003). Das zeigt sich im Auftreten von Schwarmbeben entlang des Ostrands des Beckens (Fischer & Horálek 2003), die zusammen mit den auch im Egergraben auftretenden charakteristischen CO₂-Ausgasungen (Bräuer et al. 2003) auf eine immer noch anhaltende vulkanische Aktivität hindeuten (Hofbauer 2016).

Die jüngsten Vulkanausbrüche in Deutschland gab es vor wenigen tausend Jahren in der Eifel, der jüngste Ausbruch ist der des Ulmener Maars vor ca. 10 895 Jahren (Zolitschka et al. 1995). Der heftigste Ausbruch dagegen war der des Laacher-See-Vulkans (Abbildung 41), welcher auf ein Alter von 12 900 Jahren datiert ist (van den Bogaard 1995). Die vulkanischen Ausprägungen an der Erdoberfläche reichen von großflächig auftretenden basaltischen Vulkaniten (Ergussgesteinen) in mächtigen Schichten bis hin zu durch hochexplosiven Vulkanismus entstandene Maare mit weit verbreiteten pyroklastischen Ablagerungen (Auswurfgesteine; Meschede 2018). In der Eifel sind ca. 330 quartäre Vulkankegel und Maare mit, zumindest in der Westeifel, oftmals mehreren Ausbruchszentren bekannt (Meyer 2013). In der Region Vogtland/Egergraben ist aktuell nur ein quartäres Maar auf deutschem Boden bekannt (Rohrmüller et al. 2018). Drei weitere Eruptionszentren sind auf tschechischer Seite zu finden (Mrlina et al. 2009; Hofbauer 2016). Nach Rohrmüller et al. (2018) existiert im Gebiet um Bad Neualbenreuth noch eine Struktur, bei der es sich potentiell um ein weiteres Eruptionszentrum handeln könnte.



*Abbildung 41: Luftbild des Laacher-See-Vulkans (Df1paw 2017).
Der Ausbruch dieses Vulkans vor 12 900 Jahren gilt als heftigster Ausbruch der Eifel; gut zu erkennen ist die nach dem Ausbruch entstandene Caldera-Struktur.*

12.1.3 Prognosen vulkanischer Aktivität in Deutschland

Erste Vorschläge für eine Prognose zukünftiger vulkanischer Aktivität in Deutschland wurden von Jentsch (2001) auf Basis einer Expertenbefragung erarbeitet. Demnach ist eine erneute vulkanische Aktivität in der Eifel in den nächsten eine Million Jahren als sicher anzunehmen, während im Vogtland und in Nordwestböhmen eine Wahrscheinlichkeit von etwa 50 % für ein solches Ereignis besteht.

In einer von der BGE in Auftrag gegebenen Studie beschreibt May (2019) Möglichkeiten, die zukünftige vulkanische Aktivität in Deutschland qualitativ basierend auf geologischen, geophysikalischen und petrologischen Indikatoren vorherzusagen. Quantitative Vorhersagen zur Ausbruchshäufigkeit während der nächsten eine Million Jahre können nach May (2019) auf Grundlage des derzeitigen Prozessverständnisses nicht getätigt werden. Eine andauernde Aktivität quartärer Vulkangebiete in der Eifel und in der Region Vogtland-Oberpfalz gilt als wahrscheinlich, da die mehrere Millionen Jahre andauernde Aktivitätsdauer der tertiären Vulkanfelder auch für die quartären Felder angenommen werden kann (May 2019).

In Hinblick auf Eintrittswahrscheinlichkeiten zukünftiger vulkanischer Aktivität ist nach May (2019) folgende regionale Differenzierung möglich:

a) Erwartete Aktivität: In der Eifel und in der Region Vogtland-Oberpfalz ist eine erneute vulkanische Aktivität innerhalb des Nachweiszeitraumes von einer Million Jahren zu erwarten.

b) Mögliche Aktivität: In tertiären Vulkanfeldern wie dem Vulkanfeld-Gürtel zwischen Eifel und Lausitz, im Kaiserstuhl und im Urach-Kirchheimer Gebiet besteht die Möglichkeit vulkanischer Aktivität innerhalb der nächsten eine Million Jahre.

c) Nicht auszuschließende Aktivität: Weitere Gebiete um den tertiären Vulkanfeld-Gürtel, zu denen es Hinweise auf magmatische Aktivität gibt (insbesondere Temperaturanomalien im Erdmantel, Mofetten und Säuerlinge, Mantelgasaustritte) wurden mit einer geringen Wahrscheinlichkeit für zukünftige vulkanische Aktivität eingestuft.

12.2 Datenabfragen und Datengrundlage

Mit der Datenabfrage von August 2017, konkretisiert durch eine zweite Datenabfrage im Februar 2018, hat die BGE bei den Geologischen Diensten der Bundesländer sowie bei der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) Gebiete abgefragt, in denen a) seit Beginn des Quartärs vulkanische Aktivitäten stattfanden bzw. stattfinden oder b) innerhalb der nächsten eine Million Jahre vulkanische Aktivität erwartet wird.

Aufgrund des regional begrenzten Auftretens quartärer vulkanischer Aktivität wurden der BGE nur von wenigen Bundesländern Daten übersandt. Ausgenommen von dem aus der Tonstudie der BGR (Hoth et al. 2007) stammenden und bereits von Jentzsch (2001) diskutierten Prognoseaspekt, liegt aus keinem Bundesland eine Prognose über zukünftigen Vulkanismus vor.

Von drei Bundesländern und der BGR wurden der BGE Daten zu quartärer vulkanischer Aktivität bereitgestellt. Diese variieren von einfachen Koordinaten über digitale Polygone, die die Verteilung quartärer Vulkanite an der Erdoberfläche zeigen, bis hin zu den aus Hoth et al. (2007) stammenden Polygonflächen, die die Vulkangebiete umhüllen und bereits den Gefährdungsbereich einschließen.

Die Verteilung quartärer Vulkanite beinhaltet auch Vorkommen von Tuff und Tephra, die als Auswurfgesteine anstehend in Gebieten mit Größen von vielen hundert Quadratkilometern um das Eruptionszentrum herum auftreten können (Schmincke et al. 1999). Die Asche des Laacher-See-Vulkans wurde sogar in bis zu 1100 km Entfernung vom Ausbruchsort gefunden (van den Bogaard & Schmincke 1985). Zur Ermittlung von Gebieten, in denen quartärer Vulkanismus vorkommt, wurde daher nicht das Vorkommen quartärer Vulkanite, sondern die Verteilung quartärer Eruptionszentren herangezogen. Dazu hat die BGE die Datengrundlage aus Hoth et al. (2007, S. 43) aktualisiert und quartäre Eruptionszentren auf Basis von Duda & Schmincke (1978), Büchel & Mertes (1982), Mrlina et al. (2009), Meyer (2013), Hofbauer (2016), Rohrmüller et al. (2018), Lange et al. (2019) und May (2019) zusammengestellt.

Zu den meisten Eruptionszentren sind in der Literatur Koordinaten angegeben. Diese wurden für den Eifelvulkanismus anhand der zusätzlichen detaillierten Lagebeschreibung in der Literatur mit Hilfe der amtlichen Geologischen Karten des Landes Rheinland-Pfalz (Becker 2019) und für den Vulkanismus im Egergraben über die oben angegebene Originalliteratur verifiziert. Zu einigen wenigen Eruptionszentren existiert in der oben genannten Literatur dagegen lediglich eine Lagebeschreibung. In diesem Fall wurde die

Lage der Lokationen mithilfe der oben erwähnten Geologischen Karten bestimmt und die Koordinaten in Gauß-Krüger erhoben. Bei Vulkanen wurde dabei der höchste Punkt gewählt, bei Maaren und Calderen der Mittelpunkt der Senke. Die Unsicherheit, die exakte Lokation des Eruptionszentrums zu identifizieren, liegt im Mittel bei ca. 250 m, in Ausnahmefällen bei maximal 1500 m. Sie kommt dadurch zustande, dass die tatsächliche Lage der Eruptionszentren nicht immer dem in der amtlichen Geologischen Karte markierten höchsten Punkt entspricht, bei Maaren und Calderen das Eruptionszentrum nicht in der Mitte liegen muss oder die in der Literatur benannten Eruptionszentren nicht genau markiert sind. Die so bestimmte Unsicherheit entspricht im Mittel 2,5 % (max. 15 %) des von AkEnd (2002) empfohlenen Sicherheitsabstandes von 10 km.

12.3 Anwendungsmethode

Die BGE ermittelt, konsistent mit § 22 Abs. 2 Nr. 5 StandAG, ausgeschlossene Gebiete dort, wo quartärer Vulkanismus bekannt ist oder innerhalb des Nachweiszeitraums von einer Million Jahren eine erneute vulkanische Aktivität zu erwarten ist. Da nach aktuellem Wissensstand (vgl. Jentzsch 2001; May 2019) eine Wiederkehr vulkanischer Aktivität in tertiären Vulkanfeldern innerhalb des Nachweiszeitraums nicht als erwartbar anzusehen ist, wird diese daher nicht berücksichtigt. Datengrundlage zur Erstellung ausgeschlossener Gebiete ist die Zusammenstellung quartärer Eruptionszentren. Die Prognose einer erneuten vulkanischen Aktivität innerhalb des Nachweiszeitraums wird in diesem ersten Verfahrensschritt dahingehend berücksichtigt, dass angenommen wird, dass in den Gebieten mit quartären Eruptionszentren nach May (2019) auch eine erneute vulkanische Aktivität zu erwarten ist. Diese potentiellen Gefährdungsgebiete werden gemäß der Empfehlung des AkEnd (2002), des Abschlussberichts der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016) und der Begründung des Gesetzentwurfs (BT-Drs. 18/11398) mit einem Sicherheitssaum von 10 km um vulkanische Eruptionszentren in der Eifel und der Region Vogtland-Oberpfalz abgegrenzt. Damit ist nicht nur der untertägige Schädigungsbereich eines erneuten Vulkanausbruchs (ca. 1 km) berücksichtigt, sondern vor allem auch das übertägige Gebiet, das durch Druckwellen und Lavaströme beeinflusst werden kann (Freundt & Schmincke 1986; Jentzsch 2001).

Die BGE geht davon aus, dass die aus der oben beschriebenen Vorgehensweise resultierenden ausgeschlossenen Gebiete flächenmäßig eher unter- als überschätzt wurden. So findet z. B. eine mögliche räumliche Verlagerung zukünftiger vulkanischer Aktivität in dem oben genannten Sicherheitssaum von 10 km keine Berücksichtigung. Eine belastbare Abschätzung solcher, in der Zukunft liegender Prozesse ist aufgrund der aktuellen Daten- und Literaturgrundlage nicht möglich.

12.4 Ergebnisse

Die von der BGE erstellte Datengrundlage umfasst 352 quartäre Eruptionspunkte (247 in der Westeifel, 101 in der Osteifel, 4 im Egergraben). Drei dieser Eruptionspunkte liegen zwar in der Tschechischen Republik, jedoch innerhalb von 10 km zur deutschen

Grenze, sodass auch sie Auswirkungen auf die Grenzziehung von ausgeschlossenen Gebieten haben.

Die um jeden Eruptionspunkt gelegten Sicherheitsradien überlappen sich aufgrund der geographischen Nähe der Eruptionspunkte zum Teil stark. Die ausgeschlossenen Gebiete (Abbildung 42) bilden daher die maximale Erstreckung dieser Sicherheitsradien ab. Dadurch entstehen ausgeschlossene Gebiete mit einer Größe von 4446 km² in der Eifel und 222 km² im deutschen Teil des Egergrabens.

Ein Vergleich der von der BGE ermittelten ausgeschlossenen Gebiete mit denen aus Jentzsch (2001) zeigt, dass sich die Bereiche in der Eifel größtenteils überlagern (Abbildung 43). Im Norden, Osten und Süden der Osteifel wurde das Gebiet der BGE durch zusätzliche Eruptionspunkte erweitert. Es fällt allerdings auf, dass im Norden der Westeifel das Gebiet der BGE verglichen mit Jentzsch (2001) deutlich kleiner ausfällt. Dort liegt ein isolierter Vulkan, der „Hohfuß“, der nach Büchel & Mertes (1982) vermutlich zuletzt im Tertiär aktiv war. In einer späteren Studie haben Müller-Sohnius et al. (1989) den „Hohfuß“ auf $90,2 \pm 3,2$ Ma datiert (Oberkreide), weswegen er von der BGE nicht für die Erstellung von ausgeschlossenen Gebieten berücksichtigt wurde.

Die von der BGE ausgeschlossenen Gebiete im Vogtland (Abbildung 44) sind deutlich kleiner als die von Jentzsch (2001) auf Grundlage von Bräuer et al. (1997) erstellten. Das resultiert daraus, dass Jentzsch (2001), wie auch von May (2019) angemerkt, den Gefährdungsbereich nicht auf Basis von Eruptionspunkten, sondern unter Einbeziehung von Ausgasungen (Mofetten) definiert. Die Anwendungsmethode der BGE geht dagegen von den Eruptionspunkten im Egergraben aus.

Um differenzierte Aussagen über die Verlagerung vulkanischer Aktivität, wie sie auch Mertz et al. (2015) beschrieben hat, treffen zu können, sind weitere, vor allem geophysikalische, Untersuchungen mit einzubeziehen. May (2019) führt an, dass beispielsweise Anomalien in der Geschwindigkeit seismischer Wellen (Wüllner et al. 2006), Anomalien der Wärmestromdichte (Chapman & Rybach 1985) oder das Auftreten von tiefen niedrigfrequenten Erdbeben (Hensch et al. 2019) zur Bestimmung und Abgrenzung von Gefährdungsgebieten herangezogen werden können. Weiterhin gibt es auch konkrete geodätische Hinweise auf einen Mantelplume unter der Eifel, der Hebungsbewegungen (ungefähr 1 mm/Jahr) verursacht, die eine größere Fläche umfassen als die des quartären Vulkanfelds (Kreemer et al. 2020). Für die Einordnung von solchen Untersuchungen hat die BGE ein Forschungsprojekt an Professor Jentzsch (Universität Jena) und Professor Schreiber (Universität Duisburg-Essen) vergeben. Darin sollen Lokationen mit einem Risiko vulkanischer Aktivität identifiziert, eine genauere Gefährdungsanalyse für die einzelnen Gebiete durchgeführt und damit ein individuell angepasster Sicherheitssaum bestimmt werden. Dabei werden auch Gebiete, die in Schritt 1 der Phase I nicht ausgeschlossen werden, genauer betrachtet, z. B. tertiäre Eruptionspunkte oder Mofetten.

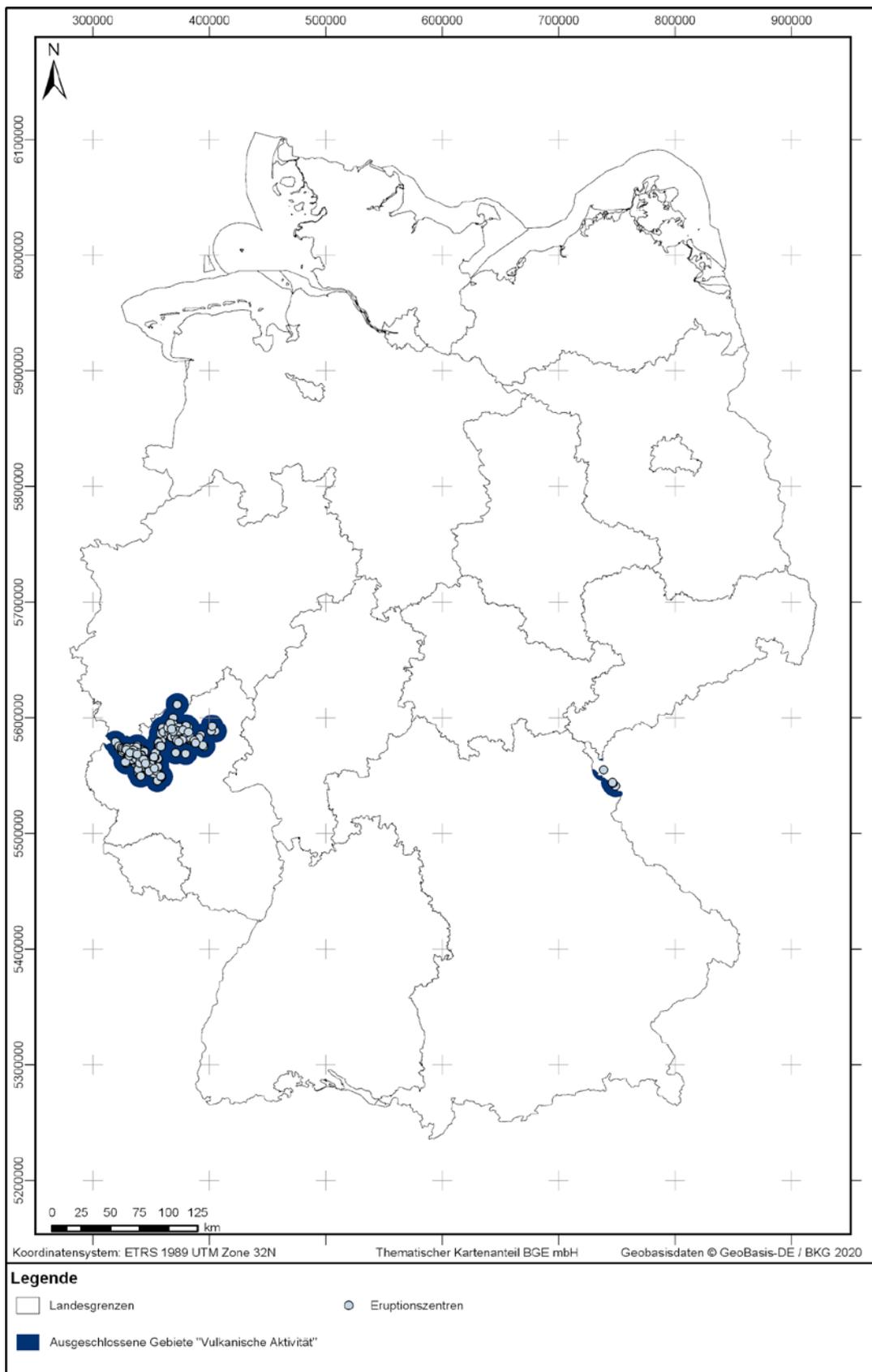


Abbildung 42: Eruptionen (grau) und durch die BGE ausgeschlossene Gebiete (blau) nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „vulkanische Aktivität“.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Darstellung der Eruptionzentren in dieser Karte nur eine Lageangabe darstellt und nicht die tatsächliche Größe der quartären Eruptionzentren repräsentiert.

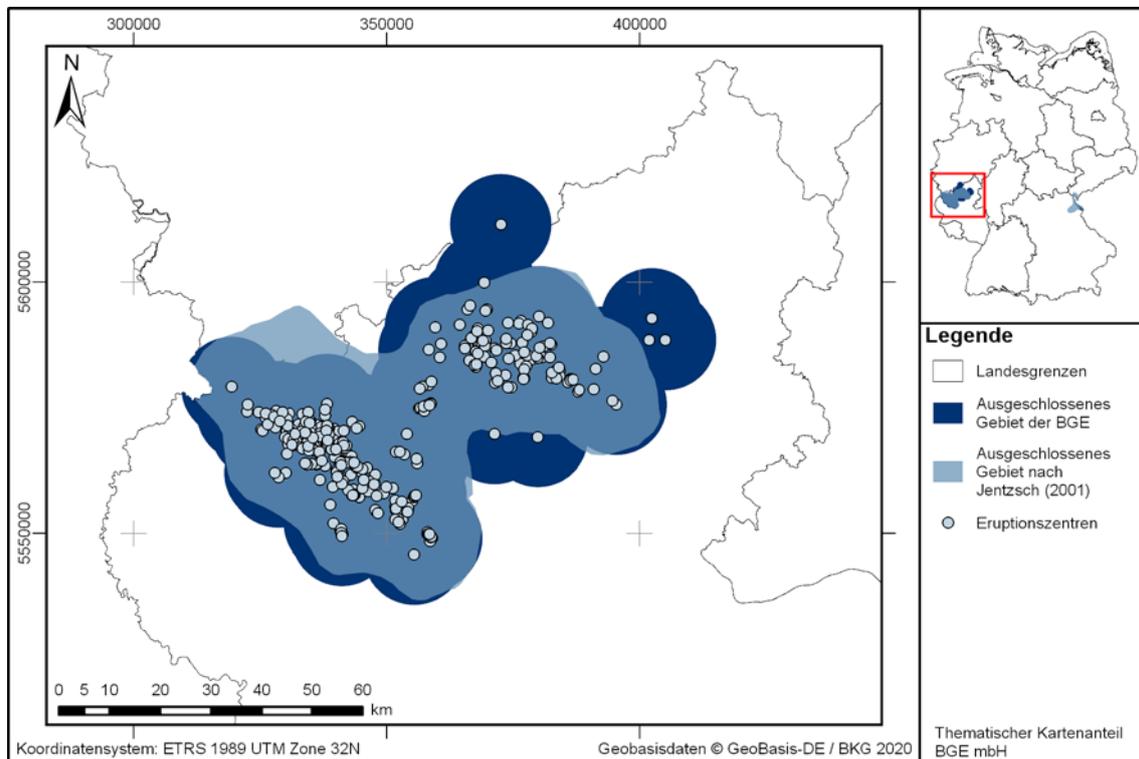


Abbildung 43: *Eruptionzentren (grau) und ausgeschlossene Gebiete in der Eifel der BGE (blau) verglichen mit den in Jentzsch (2001; hellblau) dargestellten Gebieten.*

Es wird darauf hingewiesen, dass die Darstellung der Eruptionzentren in dieser Karte nur eine Lageangabe darstellt und nicht die tatsächliche Größe der quartären Eruptionzentren repräsentiert.

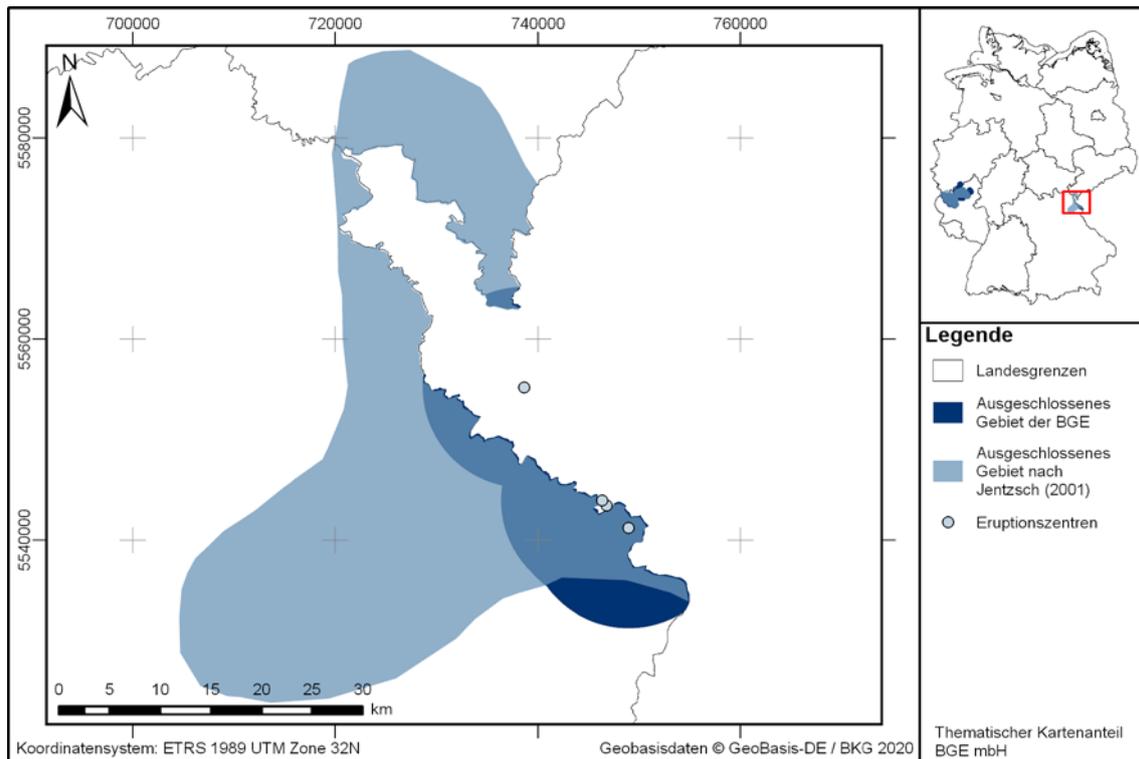


Abbildung 44: Eruptionen (grau) und ausgeschlossene Gebiete im Vogtland/Egergraben der BGE (blau) verglichen mit den in Jentzsch (2001; hellblau) dargestellten Gebieten
Es wird darauf hingewiesen, dass die Darstellung der Eruptionen in dieser Karte nur eine Lageangabe darstellt und nicht die tatsächliche Größe der quartären Eruptionen repräsentiert.

13 Grundwasseralter

13.1 Einführung

„(2) Die Ausschlusskriterien sind:

[...]

6. Grundwasseralter

in den Gebirgsbereichen, die als einschlusswirksamer Gebirgsbereich oder Einlagerungsbereich in Betracht kommen, sind junge Grundwässer nachgewiesen worden.

[...]“

§ 22 Abs. 2 Nr. 6 StandAG

In § 22 Abs. 2 Nr. 6 StandAG ist festgelegt, dass ein Gebiet nicht als Endlagerstandort geeignet ist, wenn „[...] *in den Gebirgsbereichen, die als einschlusswirksamer Gebirgsbereich oder Einlagerungsbereich in Betracht kommen, [...] junge Grundwässer nachgewiesen [wurden]*“.

13.2 Fachliche Grundlagen

Als Grundwasser bezeichnet man in Anlehnung an DIN 4049-3:1994-10 (DIN 4049-3:1994-10) Wasser, welches im Zuge von Versickerungs- bzw. Versinkungsprozessen in den Untergrund gelangt, dort Gesteinshohlräume (Poren, Klüfte, Karsthohlräume) geschlossen ausfüllt und sich maßgeblich auf Basis der Schwerkraft bewegt (Murawski & Meyer 2010). Gemäß den Begriffsbestimmungen des § 3 des Gesetzes zur Ordnung des Wasserhaushalts (WHG) ist Grundwasser das Wasser in der Sättigungszone, das in unmittelbarer Berührung mit dem Boden oder dem Untergrund steht. Im Ergebnis stellt somit prinzipiell sämtliches Wasser in endlagerrelevanten Tiefenbereichen Grundwasser dar. Ein schematisches Blockmodell eines natürlichen hydrologischen Systems mit Illustration verschiedener Zu- und Abflusspfade sowie Angaben zu Verweilzeiten des Wassers im Untergrund ist in Abbildung 45 dargestellt.

Hinsichtlich der Fähigkeit eines Gesteinsmediums, Wasser zu leiten, wird zwischen Grundwasserleitern (Aquiferen), Grundwassergeringleitern bzw. Grundwasserhemmern (Aquitarden) und Grundwassernichtleitern (Aquifugen) unterschieden (Murawski & Meyer 2010; Hölting & Coldewey 2019). Während sich Grundwasser in Aquiferen bedingt durch deren verbundenen Hohlraumanteil gut fortbewegen kann, ist die Grundwasserbewegung innerhalb eines Grundwassergeringleiters aufgrund der verhältnismäßig niedrigen Durchlässigkeit nur eingeschränkt möglich (Hölting & Coldewey 2019). Aufgrund der vom StandAG vorgegebenen minimalen Gebirgsdurchlässigkeit eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs von weniger als 10^{-10} m/s (vgl. § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG), lässt sich diese allgemeine Klassifizierung allerdings nur eingeschränkt auf die Fragestellung der Endlagersuche übertragen.

Das Ausschlusskriterium „Grundwasseralter“ geht auf die Arbeiten des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd 2002) sowie der Endlagerkommission

(Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe 2016) zurück, nach denen das Auftreten junger Grundwässer in endlagerrelevanten Tiefenbereichen auf eine Teilnahme des angetroffenen Grundwassers am aktiven hydrologischen Kreislauf und damit auf einen unmittelbaren Austausch mit der Erdoberfläche und somit der Biosphäre hindeutet. Grundwasser kann prinzipiell ein sehr hohes Alter (größer als Jahrtausende) aufweisen (Appelo & Postma 2005; Hölting & Coldewey 2019; Neukum et al. 2020), wobei „Grundwasseralter“ als Zeitraum seit der Grundwasserneubildung verstanden werden kann. Im Standortauswahlgesetz selbst findet sich keine Definition für den Begriff „junge Grundwässer“. Hinweise liefert dagegen die Gesetzesbegründung (BT-Drs. 18/11398), aus der hervorgeht, dass als Bewertungsgrundlage für das Ausschlusskriterium „Grundwasseralter“ die Konzentration der radioaktiven Isotope Tritium (^3H) und Kohlenstoff-14 (^{14}C) im Grundwasser herangezogen werden kann.

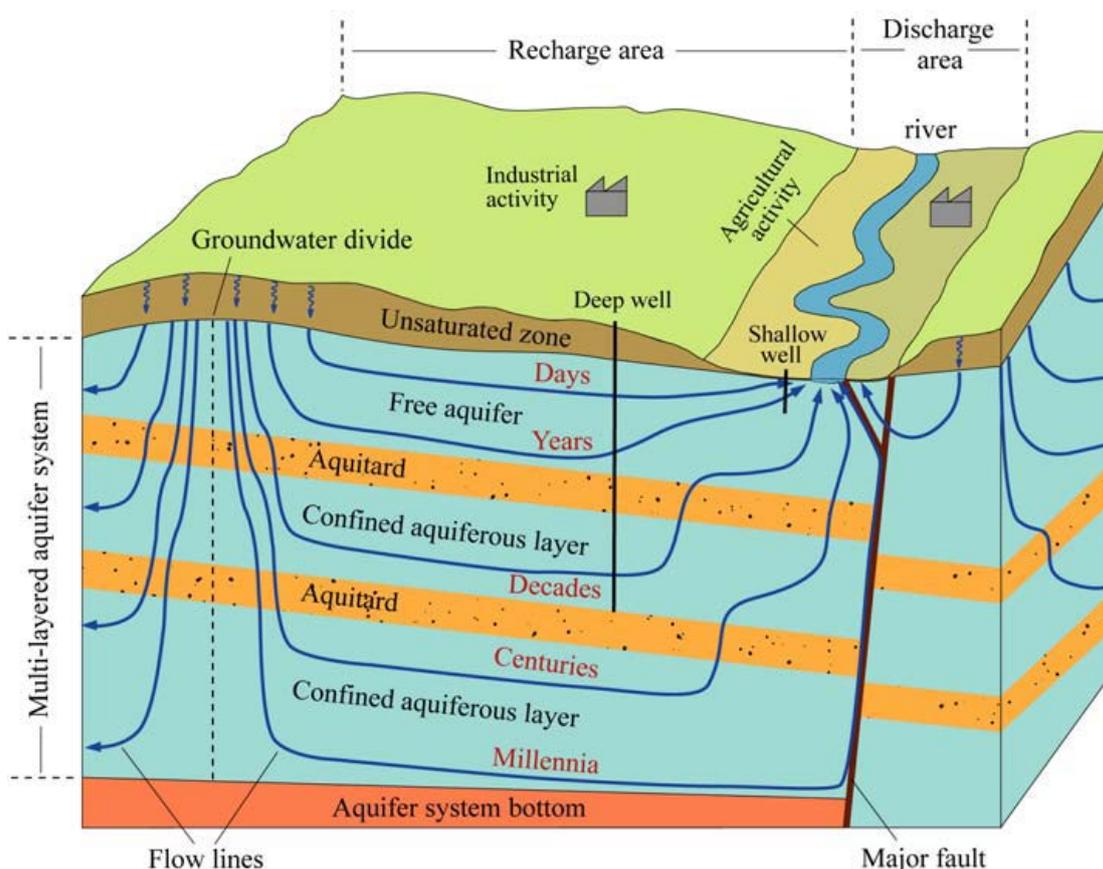


Abbildung 45: Schematisches Modell eines natürlichen hydrologischen Systems mit Veranschaulichung verschiedener Zu- und Abflusspfade sowie Verweilzeiten von Wasser im Untergrund (Cornaton 2003). Die Abbildung zeigt einen Wechsel von Grundwasserleitern (Aquifere) und Grundwasserhemmern (Aquitarden) und illustriert verschiedene Grundwasserfließpfade, wobei die Verweilzeiten des Wassers (Tage bis Jahrtausende) mit steigender Tiefe tendenziell zunehmen.

Sowohl ^3H , als auch ^{14}C kommen natürlich auf der Erde vor und entstehen durch den Einfluss kosmischer Strahlung in der Erdatmosphäre. Neben der natürlichen, auf kosmische Strahlung zurückzuführenden Entstehung, wurden größere Mengen beider Isotope

auch im Zuge von Kernwaffenversuchen in der Mitte des vergangenen Jahrhunderts freigesetzt (Geyh 1971; Kozák et al. 1989; Neukum et al. 2020). Zusätzlich zum Eintrag signifikanter Mengen an ^3H in die Hydrosphäre (Münnich 1963; Sültenfuß & Massmann 2004) wurde auch das natürliche ^{14}C -Signal der Erdatmosphäre nachhaltig beeinflusst (Nydal & Lövseth 1970; Plummer & Glynn 2013). ^3H und ^{14}C unterscheiden sich in ihren Halbwertszeiten (Zeit, die vergeht, bis die Hälfte einer Probe einer radioaktiven Substanz zerfallen ist (Mortimer & Müller 2010), auch wenn diese, verglichen mit dem Nachweiszeitraum von einer Million Jahren, sehr kurz sind. Während ^3H eine Halbwertszeit von 12,43 Jahren besitzt, beträgt die Halbwertszeit von ^{14}C 5730 Jahre, was für ^3H in Bezug auf Grundwässer Datierungszeiträume von ca. 50 Jahren und für ^{14}C von ca. 30 000 Jahren ermöglicht (Appelo & Postma 2005). Dadurch wird nur ein geringer Teil des für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle relevanten Zeitraums von einer Million Jahren abgedeckt. Daher ist die Nichterfüllung des Ausschlusskriteriums „Grundwasseralter“ (im Sinne keiner nachgewiesenen Konzentration von ^3H oder ^{14}C) nicht als Beleg für ein ausreichend hohes Grundwasseralter zu verstehen (AkEnd 2002). Neben der Altersdatierung mittels ^3H und ^{14}C existieren weitere Methoden zur Bestimmung des Grundwasseralters (Neukum et al. 2020). Solche könnten in späteren Phasen des Standortauswahlverfahrens potenziell von Bedeutung sein.

13.3 Datenabfragen und Datengrundlage

Zur Anwendung des Ausschlusskriteriums „Grundwasseralter“ hat die BGE Daten bei den zuständigen Bundes- und Landesbehörden abgefragt. In einer ersten Datenabfrage zu den Ausschlusskriterien von August 2017 wurde dabei u. a. um Informationen zum Grundwasseralter, insbesondere zu ^3H - und ^{14}C -gehalten, im Tiefenbereich größer gleich 300 m unter GOK gebeten.

Eine Konkretisierung der ersten Datenabfrage erfolgte im Rahmen eines zweiten Abfragegeschreibens zu den Ausschlusskriterien im Februar 2018. In Bezug auf das Ausschlusskriterium Grundwasseralter wurde in diesem Zusammenhang um Informationen über Gebiete gebeten, in denen im Bereich zwischen 300 m und 1500 m Tiefe junge Grundwässer festgestellt wurden. Konkret wurde für die jeweiligen Probenahmestellen die Lage und der Tiefenbereich der Probenahme, die Lage, Dimension und Bezeichnung der charakterisierten hydrogeologischen Einheit, das ^{14}C -Modellalter und die zugehörigen Namen der verwendeten Modelle sowie potenzielle weitere Altersbestimmungen mit Angabe der Methodik abgefragt.

Ergänzend dazu wurden im Zuge der Bearbeitung der zur Verfügung gestellten Daten bei Bedarf weitere Abfragen mit gleichem Inhalt oder sachbezogene Rückfragen zu einzelnen Datensätzen gestellt.

Neben einer Vielzahl von Mitteilungen über das Nichtvorhandensein von Daten zum Grundwasseralter bzw. zu Gehalten von ^3H oder ^{14}C im Grundwasser im Tiefenbereich größer gleich 300 m unter GOK („Fehlanzeigen“), wurden der BGE dennoch eine Reihe von Daten und Zusatzinformationen für die Anwendung des Ausschlusskriteriums Grundwasseralter zur Verfügung gestellt. Es handelt sich dabei größtenteils um Tabellen

mit Messpunkten für ^3H und/oder ^{14}C mit Angaben zu deren räumlicher Lage, Messergebnissen sowie z. T. weiteren zugehörigen Informationen. Zusätzliche Angaben, beispielsweise zur Bedeutung einzelner Tabellenspalten, wurden häufig als separate Begleitdokumente übermittelt.

Die Bearbeitung und Auswertung der Daten erfolgte mit der Software ArcGIS Pro. Nach Eingang der Daten und Begleitinformationen wurden diese zunächst gesammelt, dokumentiert und gesichtet. Im Zuge der Sichtung wurden die Daten auf Plausibilität und Duplikate geprüft und anschließend in eine homogenisierte Auswerteversion mit einheitlicher Datenstruktur und einheitlichem Koordinatensystem (ETRS 1989 UTM Zone 32N, EPSG-Code 25832) überführt. Bei der Plausibilitätskontrolle wurde dabei im Wesentlichen die Konsistenz der zur Verfügung gestellten Daten zu den Abfragen der BGE beurteilt und geprüft, ob diese innerhalb Deutschlands liegen und die Angaben für ^3H und/oder ^{14}C insgesamt plausibel erschienen, d. h. in ihrer Gesamtheit keine stark abweichenden Werte enthielten. Duplikate entsprechen in diesem Zusammenhang Dopplungen, die beispielweise im Rahmen unterschiedlicher Datenlieferungen mehrmals zur Verfügung gestellt und dadurch in separaten elektronischen Akten erfasst wurden, im Grunde aber identisch sind. Im Falle des Vorliegens von Duplikaten wurde jeweils nur ein Datensatz in die Auswerteversion importiert. Zwar importiert, aber nicht berücksichtigt werden konnten Grundwasseralter-Datenpunkte ohne Angabe einer Probenahmetiefe bzw. eines Probenahmetiefenbereichs sowie solche, die sich in einer Entfernung von mehr als 25 m von einem Datenpunkt bergbaulicher Tätigkeit befinden und sich dadurch nicht mehr eindeutig zuordnen ließen.

Aufgrund der Heterogenität der eingegangenen Daten und unterschiedlicher Datentypen, war es beim Import der Daten in die Auswerteversion z. T. erforderlich, mit selbst definierten Konventionen zu arbeiten, beispielsweise beim Mess-/Probedatum, wo Originalangaben wie z. B. „vor 1980“ mit „31.12.1979“ und „Nov. 1983“ mit „01.11.1983“ übersetzt wurden. Relevante Originalangaben wurden i. d. R. im Bemerkungsfeld dokumentiert. Daneben wurden eventuelle, durch unterschiedliche Einheiten bedingte Höhenunterschiede der Probenahmetiefe, durch Beachtung einer im Datensatz selbst angegebenen Bezugshöhe oder Hinzunahme eines digitalen Geländemodells korrigiert und die Angaben in die Zieleinheit m unter GOK umgewandelt.

13.4 Anwendungsmethode

Das Ausschlusskriterium „Grundwasseralter“ bezieht sich gemäß § 22 Abs. 2 Nr. 6 StandAG auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich oder Einlagerungsbereich. Da zu deren räumlicher Ausdehnung zum Zeitpunkt der Anwendung des Ausschlusskriteriums noch keine Informationen vorlagen, ist ein großräumigerer Ausschluss von Gebieten auf Basis des Ausschlusskriteriums „Grundwasseralter“ nicht zielführend. So wird bereits in AkEnd (2002) betont, dass das Ausschlusskriterium „Grundwasseralter“ im Prinzip „eine umfassende Gesamtinterpretation der hydrochemischen und isotopenhydrologischen Grundwasserverhältnisse an einem Standort“ erfordert. Dies ist in der aktuellen, frühen Phase des Standortauswahlverfahrens nicht möglich.

Daher erfolgt eine punktuelle Ermittlung ausgeschlossener Gebiete basierend auf den zur Verfügung gestellten Messpunkten mit Angaben zu ^3H - und/oder ^{14}C -Gehalten. In Anlehnung an die Ausführungen in AkEnd (2002), führt dabei die bloße Existenz, also der Nachweis von ^3H und/oder ^{14}C im Grundwasser zum Ausschluss. Dabei muss dem Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016) zufolge für beide Isotope ein natürliches Hintergrundniveau beachtet werden. Als solches, welches auch als Nachweisgrenze der verwendeten Analytik verstanden werden kann, wurde, sofern in den zur Verfügung gestellten Informationen nicht explizit vermerkt, etablierter Analytik folgend, 0,5 TU („Tritium Units“) für ^3H und 1 % modern (pMC, „percent modern Carbon“) für ^{14}C angenommen (Griffault et al. 2003). Originalwerte, welche mit den Vorzeichen „<“ (kleiner als) oder „≤“ (kleiner gleich) versehen wurden, wurden so interpretiert, als dass diese unterhalb der Nachweisgrenze der Originalanalytik lagen und somit das betreffende Isotop nicht nachgewiesen werden konnte. Bei Angabe der ^3H -Werte in der Einheit Bq/kg ohne Hinweis zur Umrechnung in TU wurde der Umrechnungsfaktor 0,118 (1 TU = 0,118 Bq/kg) verwendet.

Die Anwendung des Ausschlusskriteriums „Grundwasseralter“ führt zum jetzigen Zeitpunkt nicht zu einer Festlegung von einschlusswirksamen Gebirgsbereichen oder Einlagerungsbereichen. Anstelle von einschlusswirksamen Gebirgsbereichen oder Einlagerungsbereichen, wurden im Zusammenhang mit dem Ausschlusskriterium „Grundwasseralter“ für diesen Bericht lediglich pauschal potenziell endlagerrelevante Tiefenbereiche tiefer 300 m unter GOK betrachtet.

Bei Probenahmestellen für Grundwasserproben im Tiefenbereich von mehr als 300 m unter GOK handelt es sich entweder um Bohrungen oder Bergwerke. Da jedoch sowohl Bohrungen, als auch Bergwerke bereits durch das Ausschlusskriterium „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit“ (vgl. § 22 Abs. 2 Nr. 3 StandAG) zu ausgeschlossenen Gebieten führen, erfolgt in Phase I, Schritt 1 des Standortauswahlverfahrens aufgrund der punktuellen Anwendungsmethode für das Ausschlusskriterium „Grundwasseralter“ kein zusätzlicher Ausschluss.

Des Weiteren ist davon auszugehen, dass der weit überwiegende Teil der eingegangenen Isotopenmessungen aus Grundwasserleitern stammt, wohingegen in Bezug auf einschlusswirksame Gebirgsbereiche oder Einlagerungsbereiche vorwiegend Werte aus Grundwasserringering- bzw. Grundwassernichtleitern sowie ggf. Informationen über deren räumliche Lage in Bezug auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich oder Einlagerungsbereich und umliegender Grundwasserleiter von Bedeutung sein werden.

13.5 Ergebnisse

Alle zu einem Ausschluss führenden Datenpunkte sind mit Bohrungen korreliert. Es wurden, basierend auf den angegebenen Probenahmepositionen, insgesamt 58 Datenpunkte und 96 Linien generiert, die die ausgeschlossenen Gebiete bilden. Linien bedingen sich dabei durch die Angabe eines Probenahmebereichs im Originaldokument, also z. B. einer Probenahme zwischen 315 und 320 m unter GOK. Die Ergebnisse der Anwendung sind zweidimensional in Abbildung 46 dargestellt. Datenpunkte und Linien, die

die ausgeschlossenen Gebiete bilden, befinden sich in Schleswig-Holstein, Hamburg, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Hessen, Sachsen, Bayern und dem Saarland. Bedingt durch z. T. mehrere Messungen mit Nachweis von ^3H und/oder ^{14}C an ein und derselben Lokation und in der gleichen Tiefe, ergaben sich vereinzelt auch mehrere, übereinanderliegende Datenpunkte und Linien.

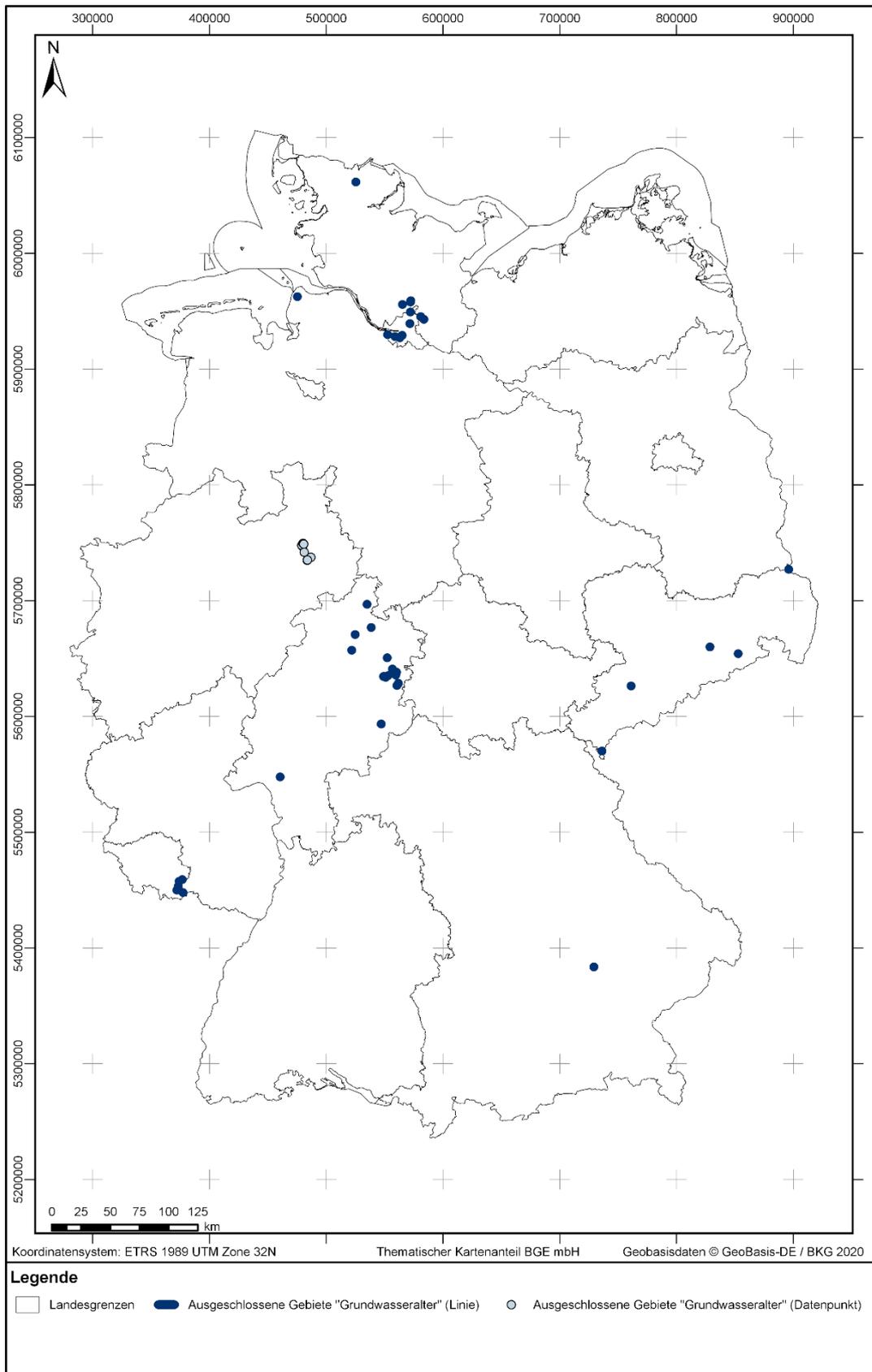


Abbildung 46: Ausgeschlossene Gebiete nach Anwendung des Ausschlusskriteriums „Grundwasseralter“.

Es wurden insgesamt 58 Datenpunkte (grau) und 96 Linien (blau) identifiziert, die die ausgeschlossenen Gebiete bilden. Aufgrund der zweidimensionalen Kartendarstellung sind die Linien ebenfalls als Punkte dargestellt. Es wird darauf hingewiesen, dass die Darstellung der ausgeschlossenen Gebiete in dieser Karte nicht maßstabsgerecht ist, um eine Visualisierung in dem verwendeten Kartenformat zu ermöglichen.

14 Entwicklung der Anwendungsmethoden zu den Ausschlusskriterien

Die Entwicklung kriterienspezifischer Anwendungsmethoden bildet die methodische Grundlage zum Umgang mit den Ausschlusskriterien. Seit dem Start des Standortauswahlverfahrens im Jahr 2017 wurde an dem methodischen Vorgehen für die gesetzeskonforme Anwendung der Ausschlusskriterien gearbeitet. Im Sommer 2018 wurde mit der Auswertung der in Folge der Datenabfragen aus August 2017 und Februar 2018 eingegangenen Daten und der Entwicklung der Anwendungsmethoden begonnen. Zu jedem Ausschlusskriterium wurde der aktuelle Kenntnis- und Sachstand unter Berücksichtigung der nunmehr vorliegenden Datenlage reflektiert, ausgewertet und eine erste testweise Anwendungsmethode entwickelt.

Im Laufe des Verfahrens hat sich herausgestellt, dass für einige Ausschlusskriterien eine Weiterentwicklung der Anwendungsmethode vorzunehmen war. Dies ergab sich vor allem durch den im Laufe des Verfahrens steigenden Kenntnisstand der BGE zu den einzelnen Ausschlusskriterien als auch durch eine Vielzahl von konstruktiven Gesprächen mit Fachexperten, u. a. aus den Bundes- und Landesbehörden. Auch die Diskussionsergebnisse der Anwendungsmethoden zu den Ausschlusskriterien mit der Öffentlichkeit via Onlinekonsultation in der ersten Hälfte des Jahres 2020 wurden für eine mögliche Aktualisierung der Anwendungsmethode herangezogen (BGE 2020ae). Die Entwicklung der Anwendungsmethoden zu den einzelnen Ausschlusskriterien werden im Folgenden beschrieben.

Für das Ausschlusskriterium „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bergwerke“ (im Folgenden als „bergbauliche Tätigkeit – Bergwerke“ bezeichnet) wurden zunächst in zwei Datenabfragen Daten zu Berechtsamen wie Berechtigungsgrenzen und Informationen zu z. B. Bezeichnungen, Art des Bergbaus und Name des Unternehmers abgefragt. Diese Daten liegen bei den Behörden digital vor und sollten eine Abschätzung ermöglichen, welche Untergrundbereiche in Deutschland von bergbaulicher Tätigkeit betroffen sind. Im Zuge der Auswertung der bei der BGE eingegangenen Daten wurde festgestellt, dass die Berechtsamen deutlich größere Gebiete darstellen als zuvor angenommen. Diese Gebiete weisen oft keinen direkten Bezug zu den bergmännisch aufgefahrenen Hohlräumen im Untergrund auf und eignen sich daher nicht zur Anwendung des oben genannten Ausschlusskriteriums. Im Jahr 2019 wurden daher für einige Bundesländer weitere Daten zur Anwendung des Ausschlusskriteriums „bergbauliche Tätigkeit – Bergwerke“ abgefragt. Der Fokus lag auf Angaben zur Ausweisung des durch die bergbauliche Tätigkeit geschädigten Gebirgsbereiches, z. B. Angaben zur maximalen Tiefe sowie der Umgrenzung der maximalen lateralen Ausdehnung des an die Oberfläche projizierten Grubengebäudes einschließlich dessen Einwirkungsbereich auf das umliegende Gebirge (vgl. auch Kapitel 10 zum Ausschlusskriterium „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bergwerke“).

Eine weitere besondere Herausforderung im Umgang mit diesem Ausschlusskriterium ergab sich durch die eingeschränkte Verfügbarkeit digitaler Daten, insbesondere für den

tiefen Altbergbau. Daher hat die BGE im Herbst 2019 begonnen, den digitalen Datenbestand durch eigene Digitalisierungsarbeiten in den Archiven der Bergbehörden zu erweitern. Für die Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern, Brandenburg (einschließlich Berlin), Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen (einschließlich Schleswig-Holstein, Hamburg und Bremen), Rheinland-Pfalz, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen wurden u. a. Tiefen von bergbaulichen Tätigkeiten ermittelt und Grubengebäude sowie Beeinflussungsbereiche von bergbaulichen Tätigkeiten georeferenziert und vektorisiert. Insgesamt wurden etwa 3700 Bergwerke und Kavernen bearbeitet.

Darüber hinaus wurden weitere Datenabfragen und -nachfragen bei den Landesämtern und Bergbehörden sowie der LMBV durch die BGE getätigt, um Daten zu den einzelnen Bergwerken zu sammeln bzw. zu ergänzen. Letztendlich hat sich die BGE für eine Anwendungsmethode, basierend auf der maximalen Tiefe und dem Beeinflussungsbereich der bergbaulichen Tätigkeiten, entschieden, die eine bundesweite Anwendung erlaubt (vgl. Kapitel 10 zum Ausschlusskriterium „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bergwerke“). Für das Bundesland Nordrhein-Westfalen ergibt sich ein gesondertes Vorgehen. Hier werden Gebiete des Steinkohlenbergbaus anhand von sogenannten Rissblattumhüllenden ausgeschlossen (vgl. Kapitel 10 zum Ausschlusskriterium „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bergwerke“).

Anpassungen der Anwendungsmethode wurden auch bei den Ausschlusskriterien „vulkanische Aktivität“ und „großräumige Vertikalbewegungen“ vorgenommen, die eine Prognose über den Nachweiszeitraum erfordern. Für das Ausschlusskriterium „vulkanische Aktivität“ war zunächst ein Ausschluss auf Basis der Gefährdungsbereiche in der Eifel und im Vogtland/Egergraben aus dem Bericht des AkEnd (AkEnd 2002) geplant. Dort galt auf Basis einer Expertenbefragung ein Wiederaufleben des Vulkanismus als sicher (Eifel) bzw. wahrscheinlich (Vogtland/Egergraben) (Jentzsch 2001). Ergänzend sollten anstehende quartäre Vulkanite erfasst und mit einem 10 km-Radius versehen ausgeschlossen werden. Durch einen von der BGR im Auftrag der BGE erstellten Bericht (May 2019) wurde deutlich, dass es weitere zu berücksichtigende Eruptionszentren gibt, die in der bisherigen Datengrundlage nicht enthalten waren (vgl. Kapitel 12 zum Ausschlusskriterium „vulkanische Aktivität“). Daher hat die BGE ihre Methode zur Anwendung des Ausschlusskriteriums angepasst und auf Basis von Literatur selbst quartäre Eruptionszentren zusammengestellt und diese mit einem Sicherheitssaum von 10 km versehen (vgl. Kapitel 12 zum Ausschlusskriterium „vulkanische Aktivität“).

Die Anwendungsmethode für das Ausschlusskriterium „großräumige Vertikalbewegungen“ fokussierte zunächst stark auf rezente Hebungsraten größer 1 mm/Jahr. Im Verlauf des Verfahrens setzte sich die BGE stärker mit den Prozessen, die zu Hebungsbewegungen führen, und dem Prognoseaspekt des Ausschlusskriteriums auseinander. Wichtig waren dabei sowohl eigene Literaturstudien als auch ein Bericht der BGR, den die BGE im Jahr 2018 in Auftrag gab (Jähne-Klingberg et al. 2019). Daraufhin wurde die aktuelle Anwendungsmethode entwickelt, wonach alle Gebiete ausgeschlossen werden, in denen eine Hebung der Erdoberfläche von mehr als 1000 m innerhalb der nächsten

eine Million Jahre wahrscheinlich ist (vgl. Kapitel 6 zum Ausschlusskriterium „großräumige Vertikalbewegungen“). Aktuell gibt es in der Bundesrepublik Deutschland keine Gebiete, die dieses Ausschlusskriterium erfüllen (vgl. Kapitel 6 zum Ausschlusskriterium „großräumige Vertikalbewegungen“).

Für das Ausschlusskriterium „seismische Aktivität“ war zunächst vorgesehen, abgeschlossene Gebiete auf Basis der für erdbebengerechte Bauvorhaben verbindlichen Zuordnung von Gemarkungsgebieten zu Erdbebenzonen durch die zuständigen behördlichen Einrichtungen der Bundesländer zu ermitteln. Eine solche Vorgehensweise bei der Anwendung des Ausschlusskriteriums „seismische Aktivität“ wurde wieder verworfen, da dieses nicht den Ergebnissen der Berechnung der Erdbebengefährdung in den jeweiligen Gebieten entspricht und die Zugehörigkeit zu einer Gemeinde über den Ausschluss entscheiden könnte. Die BGE hat daraufhin entschieden, die Erdbebenzonen größer 1 selbst aus der Karte der Erdbebenzonen der DIN EN 1998-1/NA:2011-01 zu vektorisieren (vgl. Kapitel 11 zum Ausschlusskriterium „seismische Aktivität“).

Die Anwendungsmethode sämtlicher Ausschlusskriterien wurde in der ersten Hälfte des Jahres 2020 der Öffentlichkeit via Onlinekonsultation für mindestens sechs Wochen zur Diskussion gestellt (BGE 2020aa, 2020ab, 2020ac, 2020ad, 2020e, 2020f, 2020x, 2020y, 2020z). Die Diskussionsergebnisse der Onlinekonsultation wurden für eine mögliche Aktualisierung der Anwendungsmethode der Ausschlusskriterien herangezogen und liegen in BGE (2020ae) vor. Beispielsweise war die BGE bei dem Ausschlusskriterium „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bohrungen“ (im Folgenden als „bergbauliche Tätigkeit – Bohrungen“ bezeichnet) zunächst davon ausgegangen, einen horizontalen Ausschlussradius von 25 m um den Bohrfad bei Bohrungen anzuwenden, die eine Tiefe von 300 m oder mehr erreichen. In der Onlinediskussion zum Ausschlusskriterium „bergbauliche Tätigkeit – Bohrungen“ wurde der Hinweis eingebracht, dass ein Ausschlussradius von 25 m um den Bohrfad auch in vertikale Richtung anzusetzen sei. Dadurch wäre der endlagerrelevante Bereich bereits durch Bohrungen ab einer Tiefe von 276 m unter GOK betroffen, weshalb auch diese für einen Ausschluss heranzuziehen seien. Die BGE stimmte diesem Hinweis zu und hat die Anwendungsmethode für das Ausschlusskriterium „bergbauliche Tätigkeit – Bohrungen“ daraufhin angepasst (vgl. Kapitel 9 „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bohrungen“).

Bei der Onlinediskussion zu dem Ausschlusskriterium „aktive Störungszonen“ wurden die Fragen, ob die BGE die Klassifizierung der Aktivität der Störungszonen der Bundes- und Landesbehörden übernimmt und ob die BGE selbst aktive Störungszonen ausweist, besonders kritisch diskutiert. Daraufhin hat die BGE ausgeführt, dass sie alle eingegangenen Vorschläge der Behörden zur Aktivität der Störungszonen auf wissenschaftliche Plausibilität prüft und diese keinesfalls ungeprüft übernimmt. Weiterhin hat die BGE eine Ergänzung des Steckbriefs zum Ausschlusskriterium „aktive Störungszonen“ vorgestellt, in dem ein erweitertes Verfahren zum Ausweisen aktiver Störungszonen beschrieben wird. Dieses basiert auf der Ausweisung von tektonisch aktiven Großstrukturen, z. B. Grabensysteme, die nachweislich während der letzten 34 Millionen Jahre aktiv waren.

Störungszonen, die sich innerhalb dieser Großstrukturen befinden, werden als aktiv klassifiziert und zur Ermittlung ausgeschlossener Gebiete belastet (vgl. Kapitel 7 zum Ausschlusskriterium „aktive Störungszonen – tektonische Störungszonen“).

15 Zusammenfassung

Dieser Bericht enthält die Ergebnisse der Anwendung der Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG. Demnach ist ein Gebiet nicht als Endlagerstandort geeignet, wenn mindestens eines der Ausschlusskriterien in diesem Gebiet erfüllt ist (§ 22 Abs. 1 StandAG).

Die Anwendung der Ausschlusskriterien erfolgt auf Basis der von den Bundes- und Landesbehörden zur Verfügung gestellten Daten durch die BGE. Dafür hat die BGE in zwei Datenabfragen im August 2017 und Februar 2018 Daten zur Anwendung der Ausschlusskriterien bei den zuständigen Bundes- und Landesbehörden abgefragt. Weitere Nachfragen zu Datenlieferungen sowie ergänzende Datenabfragen wurden z. B. zu den Ausschlusskriterien „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bergwerke“ sowie „aktive Störungszonen – atektonische Vorgänge“ im Laufe des Verfahrens durchgeführt.

Die gelieferten Daten werden zur weiteren Bearbeitung und Auswertung in verschiedene Datenbanken überführt. Jede Datenlieferung wird beurteilt, kommentiert und ihre weitere Bearbeitung dokumentiert. Die Auswertung der Daten zu den Ausschlusskriterien erfolgt in einer GIS-Umgebung. Um die Auswertung der Daten vornehmen zu können, werden die an die BGE übermittelten Daten im Zuge der Datenaufbereitung homogenisiert. Dies erfordert z. B. eine Lagetransformation auf ein einheitliches Lagebezugssystem sowie die Überführung der Daten in ein einheitliches Datenmodell. Ergebnis der Datenhomogenisierung ist ein bundesweit homogenisierter Datensatz zu den Ausschlusskriterien.

Die Anwendung der Ausschlusskriterien erfolgt auf Basis von kriterienspezifischen Anwendungsmethoden. Diese wurden seit dem Start des Standortauswahlverfahrens im Jahr 2017 erarbeitet und fortlaufend an den jeweiligen Wissensstand angepasst. Die jeweilige Anwendungsmethode soll bundesweit möglichst einheitlich sein, soweit es auf Grundlage der von den Bundes- und Landesbehörden gelieferten Daten möglich ist. Des Weiteren werden alle Ausschlusskriterien unabhängig voneinander deutschlandweit angewendet. Die Anwendungsmethoden sämtlicher Ausschlusskriterien wurde in der ersten Hälfte des Jahres 2020 der Öffentlichkeit via Onlinekonsultation für mindestens sechs Wochen zur Diskussion gestellt. Die Diskussionsergebnisse der Onlinekonsultation wurden für eine mögliche Aktualisierung der Anwendungsmethode der Ausschlusskriterien herangezogen.

Das Ergebnis der Anwendung der sechs Ausschlusskriterien sind ausgeschlossene Gebiete, die für die Anwendung von §§ 23 und 24 StandAG keine Berücksichtigung finden und somit als potentieller Standort für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle im weiteren Verlauf des Verfahrens nicht weiter betrachtet werden. Neben einigen großflächig ausgeschlossenen Gebieten, die auf die Ausschlusskriterien „vulkanische Aktivität“ und „seismische Aktivität“ zurückgehen, ergibt sich eine Vielzahl kleinerer Flächen, die primär den Ausschlusskriterien „aktive Störungszonen“ und „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit“ zuzuordnen sind.

Die Ausschlusskriterien werden in jeder Phase des Standortauswahlverfahrens auf Basis der neu zur Verfügung stehenden Daten entsprechend der gesetzlichen Grundlage erneut angewandt. Daher ist im Laufe des Verfahrens mit einer Anpassung der Anwendungsmethode zur Anwendung der Ausschlusskriterien und einem steigenden Detaillierungsgrad bei der Anwendung der Ausschlusskriterien zu rechnen.

16 Literaturverzeichnis

- Aber, J. S. & Ber, A. (2007): Glaciotectonism. Developments in Quaternary Science, Amsterdam: Elsevier ISBN 0444529438
- AF-Colenco AG Grundwasserschutz und Entsorgung (2009): Modellierung der Grundwasserbewegung im Deckgebirge der Schachanlage Asse II. Teil 1 und Teil 2 (Bericht-Nr. 1496/09). AF-Colenco AG. Baden (AG), Schweiz
- Agemar, T., Hese, F., Moeck, I. S. & Stober, I. (2017): Kriterienkatalog für die Erfassung tieferreichender Störungen und ihrer geothermischen Nutzbarkeit in Deutschland. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 168, S. 285-300. ISSN 18601804. DOI: 10.1127/zdgg/2017/0084
- AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte: Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. Köln
- Anderson, E. M. (1951): The dynamics of faulting and dyke formation with applications to Britain. 2. Aufl., Edinburgh: Oliver and Boyd
- Appelo, C. A. J. & Postma, D. (2005): Geochemistry, groundwater and pollution. 2. Aufl., Leiden: Balkema. ISBN 0415364280
- Arp, G., Kolepka, C., Simon, K., Karius, V., Nolte, N. & Hansen, B. T. (2013): New evidence for persistent impact-generated hydrothermal activity in the Miocene Ries impact structure, Germany. Meteoritics & Planetary Science, Bd. 48, S. 2491-2516. ISSN 10869379. DOI: 10.1111/maps.12235
- AtG: Atomgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), das zuletzt durch Artikel 239 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist
- Bachmann, G. H. & Müller, M. (1992): Sedimentary and structural evolution of the German Molasse Basin. Eclogae Geologicae Helvetiae, Bd. 85, S. 519-530. ISSN 00129402
- Bahlburg, H. & Breitzkreuz, C. (2017): Grundlagen der Geologie. Berlin, Deutschland: Springer. ISBN 9783662549308
- Bankwitz, P., Schneider, G., Kämpf, H. & Bankwitz, E. (2003): Structural characteristics of epicentral areas in Central Europe: study case Cheb Basin (Czech Republic). Journal of Geodynamics, Bd. 35, S. 5-32. ISSN 02643707 DOI: 10.1016/s0264-3707(02)00051-0
- BBergG: Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), das zuletzt durch Artikel 237 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist
- Becker, A. (2019): Digitale Topographische Karte von Rheinland-Pfalz. 1:5000. Koblenz: Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz. Digitale Topografische Landeskartenwerke
- Berckhemer, H. (2005): Grundlagen der Geophysik. 2. Aufl., Frankfurt am Main: Institut für Meteorologie und Geophysik, Arbeitsbereich Geophysik
- BGE (2018c): Arbeitshilfe "Ausschlusskriterien". Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE).

- https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Grundlagentexte/20180205_Arbeitshilfen_Ausschlusskriterien.pdf
- BGE (2020aa): Methodensteckbrief - Ausschlusskriterium „Grundwasseralter“ (Onlinekonsultation). Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. <https://forum-bge.de/attachment.php?aid=21>
- BGE (2020ab): Methodensteckbrief - Ausschlusskriterium „Seismische Aktivität“ (Onlinekonsultation). Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. <https://forum-bge.de/attachment.php?aid=15>
- BGE (2020ac): Methodensteckbrief - Ausschlusskriterium „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit“ – Bohrungen (Onlinekonsultation). Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. <https://forum-bge.de/attachment.php?aid=6>
- BGE (2020ad): Methodensteckbrief - Ausschlusskriterium „Vulkanismus“ (Onlinekonsultation). Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. <https://forum-bge.de/attachment.php?aid=14>
- BGE (2020ae): Zusammenfassung der Onlinediskussion der Anwendungsmethoden. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- BGE (2020af): Glossar der BGE zum Standortauswahlverfahren. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- BGE (2020e): Methodensteckbrief - Ausschlusskriterium „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit“ – Bergbau (Onlinekonsultation). Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodensteckbriefe_fuer_Forum/20200407_Endfassung_Steckbrief_AK_Bergbau.pdf
- BGE (2020f): Ergänzungen zum Steckbrief für das Ausschlusskriterium „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit“ (Onlinekonsultation). Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodensteckbriefe_fuer_Forum/20200707_Ergaenzung_Steckbrief_Bergbauliche_Taetigkeiten_ReS.pdf
- BGE (2020i): Datenbericht Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- BGE (2020j): Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- BGE (2020k): Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- BGE (2020l): Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- BGE (2020p): Zusammenfassung der bisherigen Studien zum Salzstock Gorleben im Kontext des Standortauswahlgesetzes. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH

- BGE (2020w): Ausschlusskriterium Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bergwerke. Erläuterung zur Anwendungsmethode in Nordrhein-Westfalen. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- BGE (2020x): Methodensteckbrief - Ausschlusskriterium „Aktive Störungszonen“ (Onlinekonsultation). Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. <https://forum-bge.de/attachment.php?aid=30>
- BGE (2020y): Ergänzungen zum Steckbrief für das Ausschlusskriterium „Aktive Störungszonen“ (Onlinekonsultation). Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodensteckbriefe_fuer_Forum/20200430_Endfassung_-_Ergaenzung_Steckbrief_Aktive_Stoerungszonen.pdf
- BGE (2020z): Methodensteckbrief - Ausschlusskriterium „Großräumige Vertikalbewegungen“ (Onlinekonsultation). Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. <https://forum-bge.de/attachment.php?aid=24>
- BGR (2018): GERSEIS-INSPIRE. [Geodatensatz]. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Letzte Aktualisierung am: 13/01/2020. Zugriff am: 04/08/2020. <https://services.bgr.de/inspire/gerseis>
- BGR (2019a): Deutschland- Rohstoffsituation 2018. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
- BGR (2019b): Geologische Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:250.000 (GÜK250). 1:250.000. 2. Aufl. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).
- BMWI (2016): Der Bergbau in der Bundesrepublik Deutschland- Bergwirtschaft und Statistik 2016. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Berlin
- Bracke, G., Hartwig-Thurat, E., Larue, J., Meleshyn, A. & Weyand, T. (2019): Untersuchungen zu den „maximalen physikalisch möglichen Temperaturen“ gemäß § 27 StandAG im Hinblick auf die Grenztemperatur an der Außenfläche von Abfallbehältern. Bericht GRS-A-3948. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Köln
- Bracke, G. & Satir, M. (1994): Anthropogenes Blei in der Umwelt von Schlemma (Sachsen)- Identifizierung durch Pb-Isotopie. In: J. Matschullat (Hrsg.): Geowissenschaften und Umwelt. S. 364, Berlin: Springer. ISBN 354058028X
- Bräuer, K., Kämpf, H., Strauch, G. & Weise, S. M. (2003): Isotopic evidence (3He/4He, 13CCO2) of fluid-triggered intraplate seismicity. Journal of Geophysical Research, Bd. 108, S. ESE3.1-ESE3.11. ISSN 01480227. DOI: 10.1029/2002jb002077
- Bräuer, K., Strauch, G., Kämpf, H., Weise, S., Weinlich, F. & Kohl, T. (1997): Modellierung und Bewertung des konvektiven Wärmeflusses zur KTB-Lokation über die Quantifizierung des Gasflusses im Umfeld der KTB sowie seine chemische und isotopische Charakterisierung : Abschlußbericht zu den Forschungsvorhaben Br 1396/3, Ka 902/6, Str 376/4 und We 1546/2 ; Schwerpunktprogramm Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland DFG-Abschlussbericht. Deutsche Forschungsgemeinschaft. Bonn
- Brinkmann, R. (1953): Über die diluvialen Störungen auf Rügen. Geologische Rundschau, Bd. 41, S. 231-241. ISSN 00167835

- Brückner-Röhling, S., Espig, M., Fischer, M., Fleig, S., Forsbach, H., Kockel, F., Krull, P., Stiewe, H. & Wirth, H. (2002): Standsicherheitsnachweise Nachbetriebsphase: Seismische Gefährdung - Teil 1: Strukturgeologie. BGR-Bericht. Stuttgart: Schweizerbart
- Brun, J. P., Gutscher, M.-A. & deKORP-ECORS teams (1992): Deep crustal structure of the Rhine Graben from DEKORP-ECORS seismic reflection data: A summary. *Tectonophysics*, Bd. 208, S. 139-147. ISSN 00401951 DOI: 10.1016/0040-1951(92)90340-C
- BT-Drs. 18/11398: Gesetzentwurf der Fraktionen CDU/CSU, SPD und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN: Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze, Deutscher Bundestag, Drucksache 18/11398 vom 07.03.2017
- Büchel, G. & Mertes, H. (1982): Die Eruptionszentren des Westeifeler Vulkanfeldes. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, Bd. 133, S. 409-429
- Buchner, E. & Schmieder, M. (2013): Der Steinheimer Suevit – schmelzeführende Impaktite aus dem Steinheimer Becken, Südwestdeutschland. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, Bd. 164, S. 471-490. DOI: 10.1127/1860-1804/2013/0006
- Buja, H.-O. (2009): *Handbuch der Baugrunderkennung*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner. ISBN 9783834805447. DOI: 10.1007/978-3-8348-9994-1
- Buja, H.-O. (2014): *Handbuch der Bohrtechnik*. 2. Aufl., Norderstedt: Books on Demand. ISBN 9783735734099
- Burley, S. D., Kantorowicz, J. D. & Waugh, B. (1985): Clastic diagenesis. In: P. J. Brenchley & B. P. J. Williams (Hrsg.): *Sedimentology: Recent and Applied Aspects* Bd. 18, S. 189-226, Oxford: Blackwell Scientific Publications. ISBN 0632011920 DOI: 10.1144/GSL.SP.1985.018.01.10
- Buurman, N. (2010): Charakterisierung von Zirkularstrukturen im geologischen Untergrund Hamburgs zur Abgrenzung verkarstungsgefährdeter Bereiche. Dissertation, Universität Hamburg, Geowissenschaften, S. 279, Hamburg,
- Carracedo, J. C., Day, S., Guillou, H., Rodríguez Badiola, E., Canas, J. A. & Pérez Torrado, F. J. (1998): Hotspot volcanism close to a passive continental margin: the Canary Islands. *Geological Magazine*, Bd. 135, S. 591-604. ISSN 00167568. DOI: 10.1017/S0016756898001447
- Cassidy, M., Manga, M., Cashman, K. & Bachmann, O. (2018): Controls on explosive-
effusive volcanic eruption styles. *Nature Communications*, Bd. 9, S. 1-16. ISSN 20411723. DOI: 10.1038/s41467-018-05293-3
- Chapman, D. S. & Rybach, L. (1985): Heat flow anomalies and their interpretation. *Journal of Geodynamics*, Bd. 4, S. 3-37. ISSN 02643707. DOI: 10.1016/0264-3707(85)90049-3
- Childs, C., Manzocchi, T., Walsh, J. J., Bonson, C. G., Nicol, A. & Schöpfer, M. P. J. (2009): A geometric model of fault zone and fault rock thickness variations. *Journal of Structural Geology*, Bd. 31, S. 117-127. ISSN 01918141
- Choi, J.-H., Edwards, P., Ko, K. & Kim, Y.-S. (2016): Definition and classification of fault damage zones: A review and a new methodological approach. *Earth-Science Reviews*, Bd. 152, S. 70-87. ISSN 00128252. DOI: 10.1016/j.earscirev.2015.11.006

- Cloetingh, S., Burov, E. & Poliakov, A. (1999): Lithosphere folding: Primary response to compression? (from central Asia to Paris basin). *Tectonics*, Bd. 18, S. 1064-1083. ISSN 02787407. DOI: 10.1029/1999tc900040
- Cornaton, F. M. (2003): Deterministic models of groundwater age, life expectancy and transit time distributions in advective-dispersive systems. Dissertation, Université de Neuchâtel, Faculté des sciences, Neuchâtel,
- Cornu, T., Lopes Cardozo, G., Cloetingh, S. & Beekman, F. (2007): A structural model from local earthquake tomography: Application to present-day tectonics of the Upper Rhine Graben. *Global and Planetary Change*, Bd. 58, S. 270-286. ISSN 09218181. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2007.03.008
- Crawford, B. R., Faulkner, D. R. & Rutter, E. H. (2008): Strength, porosity, and permeability development during hydrostatic and shear loading of synthetic quartz-clay fault gouge. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Bd. 113. ISSN 01480227. DOI: 10.1029/2006jb004634
- Davison, I., Alsop, G. I., Evans, N. G. & Safaricz, M. (2000): Overburden deformation patterns and mechanisms of salt diapirpenetration in the Central Graben, North Sea. *Marine and Petroleum Geology*, Bd. 17, S. 601-618. DOI: 10.1016/S0264-8172(00)00011-8
- de Silva, S. & Lindsay, J. M. (2015): Primary Volcanic Landforms. In: H. Sigurdsson (Hrsg.): *The Encyclopedia of Volcanoes 2.Aufl.*, S. 273-297, Amsterdam: Academic Press. ISBN 9780123859389. DOI: 10.1016/B978-0-12-385938-9.00015-8
- Decker, K. & Peresson, H. (1996): Tertiary kinematics in the Alpine-Carpathian-Pannonian system: links between thrusting, transform faulting and crustal extension. In: G. Wessely & W. Liebl (Hrsg.): *Oil and Gas in Alpidic Thrustbelts and Basins of Central and Eastern Europe*. Bd. 5, S. 69-77, Vienna (Austria): EAGE Spec. Publ. ISBN 189779973X
- Deichmann, N., Ballarin Dolfi, D. & Kastrup, U. (2000): Seismizität der Nord- und Zentralschweiz. Technischer Bericht NTB 00-05. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Wettingen, Switzerland
- Dèzes, P., Schmid, S. M. & Ziegler, P. A. (2004): Evolution of the European Cenozoic Rift System: interaction of the Alpine and Pyrenean orogens with their foreland lithosphere. *Tectonophysics*, Bd. 389, S. 1-33. ISSN 00401951. DOI: 10.1016/j.tecto.2004.06.011
- Df1paw (2017): Laacher See - Luftaufnahme. [Luftaufnahme]. o. O.: Wikimedia Commons. Letzte Aktualisierung am: 30.06.2020. Zugriff am: 22.07.2020. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Laacher_See_-_Luftaufnahme.jpg
- Dielforder, A., Frasca, G., Brune, S. & Ford, M. (2019): Formation of the Iberian-European Convergent Plate Boundary Fault and Its Effect on Intraplate Deformation in Central Europe. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Bd. 20, S. 2395-2417. ISSN 15252027. DOI: 10.1029/2018gc007840
- Dikau, R., Brunsten, D., Lothar Schrott, L. & Ibsen, M.-L. (1996): *Landslide Recognition: identification, movement, and causes*. Chichester: John Wiley & Sons. ISBN 9780471964773
- DIN 4049-3:1994-10: Hydrologie - Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie. Berlin: Beuth

- DIN 4149:2005-04: Bauten in deutschen Erdbebengebieten - Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten. Berlin: Beuth
- DIN EN 1998-1/NA:2011-01: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbau. Berlin: Beuth
- DIN EN 1998-1/NA:2020-05: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten. Berlin: Beuth
- Dölling, M. & Stritzke, R. (2009): Geowissenschaftliche Untersuchungen im Subrosionsgebiet des Heiligen Feldes (nördliches Münsterland, Nordwestdeutschland). Geologie und Paläontologie in Westfalen, Bd. 72, S. 31-69. ISSN 0176148X
- Duda, A. & Schmincke, H.-U. (1978): Quaternary basanites, melilite nephelinites and tephrites from the Laacher See area (Germany). Neues Jahrbuch für Mineralogie - Abhandlungen, Bd. 132, S. 1-33. ISSN 00777757
- Düring, P.-H. (1983): Band 1: Bohrtechnik und Technologie. Geologische Bohrungen Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie
- Egli, D., Mosar, J., Ibele, T. & Madritsch, H. (2017): The role of precursory structures on Tertiary deformation in the Black Forest-Hegau region. International Journal of Earth Sciences, Bd. 106, S. 2297-2318. ISSN 14373262. DOI: 10.1007/s00531-016-1427-8
- Ehlers, T. A. & Farley, K. A. (2003): Apatite (U–Th)/He thermochronometry: methods and applications to problems in tectonic and surface processes. Earth and Planetary Science Letters, Bd. 206, S. 1-14. ISSN 0012821X. DOI: 10.1016/S0012-821X(02)01069-5
- EinwirkungsBergV: Einwirkungsbereichs-Bergverordnung vom 11. November 1982 (BGBl. I S. 1553, 1558), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 18. Oktober 2017 (BGBl. I S. 3584) geändert worden ist
- Eissmann, L. (1978): Mollisoldiapirismus. Zeitschrift für angewandte Geologie, Bd. 24, S. 130-138. ISSN 00442259
- Eissmann, L. (1987): Lagerungsstörungen im Lockergebirge: exogene und endogene Tektonik im Lockergebirge des nördlichen Mitteleuropa. Geophysik und Geologie, Bd. 3, S. 7- 77
- Ellenberg, J. (1988): Rezente vertikale Erdkrustenbewegungen als geologischer Prozess Dissertation, Akademie der Wissenschaften der DDR, S. 141, Berlin,
- England, P. & Molnar, P. (1990): Surface uplift, uplift of rocks, and exhumation of rocks. Geology, Bd. 18, S. 1173-1177. DOI: 10.1130/0091-7613(1990)018<1173:SUUORA>2.3.CO;2
- Faulkner, D. R., Jackson, C. A. L., Lunn, R. J., Schlische, R. W., Shipton, Z. K., Wibberley, C. A. J. & Withjack, M. O. (2010): A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. Journal of Structural Geology, Bd. 32, S. 1557-1575. ISSN 01918141. DOI: 10.1016/j.jsg.2010.06.009
- Feist-Burkhardt, S., Götz, A. E., Szulc, J., Borkhataria, R., Geluk, M., Haas, J., Hornung, J., Jordan, P., Kempf, O., Michalík, J., Nawrocki, J., Reinhardt, L., Ricken, W., Röhling, H.-G., Rüffer, T., Török, Á. & Zühlke, R. (2008): Triassic. In: T. McCann

- (Hrsg.): The Geology of Central Europe. Bd. 2: Mesozoic and Cenozoic, S. 749-821, London: The Geological Society. ISBN 9781862392656
- Ferguson, D. J., Barnie, T. D., Pyle, D. M., Oppenheimer, C., Yirgu, G., Lewi, E., Kidane, T., Carn, S. & Hamling, I. (2010): Recent rift-related volcanism in Afar, Ethiopia. *Earth and Planetary Science Letters*, Bd. 292, S. 409-418. ISSN 0012821X. DOI: 10.1016/j.epsl.2010.02.010
- Filipponi, M., Parriaux, A., Schmassmann, S. & Jeannin, P.-Y. (2012): KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von Karstspezifischen Gefahren im Untertagebau. Forschungsauftrag FGU2009/003. Schweiz. Bundesamt für Straßen. Zürich
- Fischer, T. & Horálek, J. (2003): Space-time distribution of earthquake swarms in the principal focal zone of the NW Bohemia/Vogtland seismoactive region: Period 1985-2001. *Journal of Geodynamics*, Bd. 35, S. 125-144. DOI: 10.1016/S0264-3707(02)00058-3
- 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*, Bd. 611, S. 1-27. ISSN 00401951. DOI: 10.1016/j.tecto.2013.11.001
- Fossen, H. (2011): *Structural geology*. Cambridge Cambridge University Press. ISBN 9780521516648
- Freundt, A. & Schmincke, H.-U. (1986): Emplacement of small-volume pyroclastic flows at Laacher See (East-Eifel, Germany). *Bulletin of Volcanology*, Bd. 48, S. 39-59. ISSN 02588900. DOI: 10.1007/BF01073512
- Frisch, W. (1979): Tectonic progradation and plate tectonic evolution of the Alps. *Tectonophysics*, Bd. 60, S. 121-139. ISSN 00401951. DOI: 10.1016/0040-1951(79)90155-0
- Frischbutter, A. & Schwab, G. (2001): Recent vertical movements (map 4). In: R. G. Garetsky, A. O. Ludwig, G. Schwab & W. Stackebrandt (Hrsg.): *Neogeodynamics of the Baltic Sea depression and adjacent areas: Results of IGCP project 346*. Brandenburgische Geowiss. Beitr. Bd. 8, 1, S. 27-31, Kleinmachnow: Landesamt für Geowiss. und Rohstoffe Brandenburg
- Froitzheim, N., Plašienka, D. & Schuster, R. (2008): Alpine tectonics of the Alps and Western Carpathians. In: T. McCann (Hrsg.): *The Geology of Central Europe*. Bd. 2: Mesozoic and Cenozoic, S. 1141-1232, London: The Geological Society of London. ISBN 9781862392656. DOI: 10.1144/cev2p.6
- Gast, S., Wirth, H., Fischer, M. & Weber, K. (2012): *Planungsgrundlagen und geologische Informationen für die Entwicklung potenzieller CO₂-Speichervorhaben*. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
- Geyer, M., Nitsch, E. & Simon, T. (Hrsg.) (2011): *Geologie von Baden-Württemberg*. 5. Aufl. Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652679
- Geyh, M. A. (1971): *Die Anwendung der 14C-Methode und anderer radiometrischer Datierungsverfahren für das Quartär* Clausthaler tektonische Hefte Clausthal-Zellerfeld: Pilger
- Giesen, M. (2013): *Die zehn tiefsten Bergwerke der Welt*. hanseatic stock publishing UG. Zugriff am: 13.07.2020. <https://www.miningscout.de/blog/2013/10/10/die-zehn-tiefsten-bergwerke-der-welt/>

- Goultly, N. R. (2008): Geomechanics of polygonal fault systems: a review. *Petroleum Geoscience*, Bd. 14, S. 389-397. DOI: 10.1144/1354-079308-781
- Graversen, O. (2002): A structural transect between the central North Sea Dome and the South Swedish Dome: Middle Jurassic-Quaternary uplift-subsidence reversal and exhumation across the eastern North Sea Basin. In: A. G. Doré, J. A. Cartwright, M. S. Stoker, J. P. Turner & N. White (Hrsg.): *Exhumation of the North Atlantic Margin: Timing, Mechanisms and Implications for Petroleum Exploration*. Bd. 196, S. 67-83, London: Geological Society, London, Special Publications. ISBN 1862391122. DOI: 10.1144/gsl.Sp.2002.196.01.05
- Griffault, L., Bauer, C., Waber, H. N., Pearson, F. J., Fierz, T., Scholtis, A., Degueldre, C. & Eichinger, L. (2003): Water sampling and analyses for boreholes and seepages. Mont Terri Project - Geochemistry of water in the Opalinus Clay Formation at the Mont Terri Rock Laboratory. Report 5. Federal Office for Water and Geology, Geology Series. Bern. ISBN 3906723593
- Grotzinger, J. & Jordan, T. (2017): *Press-Siever Allgemeine Geologie*. 7. Aufl., Berlin: Springer-Verlag. ISBN 9783662483411. DOI: 10.1007/978-3-662-48342-8
- Grünthal, G. (1998): European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98). *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie Report 15*. Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. Luxembourg. ISBN 2879770084
- Grünthal, G. (2004): Erdbeben und Erdbebengefährdung in Deutschland sowie im europäischen Kontext. *Geographie und Schule*, Bd. 151, S. 14-23
- Grünthal, G. & Bosse, C. (1996): Probabilistische Karte der Erdbebengefährdung der Bundesrepublik Deutschland–Erdbebenzonenkarte für das Nationale Anwendungsdokument zum Eurocode 8. Scientific Technical Report 96/10. Deutsches GeoForschungszentrum Potsdam. DOI: 10.2312/GFZ.b103-96103
- Grünthal, G., Stromeier, D., Bosse, C., Cotton, F. & Bindi, D. (2018a): Neueinschätzung der Erdbebengefährdung Deutschlands–Version 2016–für DIN EN 1998-1/NA. *Bautechnik*, Bd. 95, S. 371-384. ISSN 09328351. DOI: 10.1002/bate.201700098
- Grünthal, G., Stromeier, D., Bosse, C., Cotton, F. & Bindi, D. (2018b): The probabilistic seismic hazard assessment of Germany-version 2016, considering the range of epistemic uncertainties and aleatory variability. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Bd. 16, S. 4339-4395. ISSN 15731456. DOI: 10.1007/s10518-018-0315-y
- Grünthal, G. & Wahlström, R. (2003): An earthquake catalogue for central, northern and northwestern Europe based on MW magnitudes. Scientific technical report 03/02. Deutsches GeoForschungszentrum Potsdam. DOI: 10.2312/GFZ.b103-030104
- Grünthal, G. & Wahlström, R. (2012): The European-Mediterranean Earthquake Catalogue (EMEC) for the last millennium. *Journal of Seismology*, Bd. 16, S. 535-570. ISSN 1573157X. DOI: 10.1007/s10950-012-9302-y
- Grünthal, G., Wahlström, R. & Stromeier, D. (2009): The unified catalogue of earthquakes in central, northern, and northwestern Europe (CENEC)—updated and expanded to the last millennium. *Journal of Seismology*, Bd. 13, S. 517-541. ISSN 1573157X. DOI: 10.1007/s10950-008-9144-9
- Grützner, C., Fischer, P. & Reicherter, K. R. (2016): Holocene surface ruptures of the Rurrand Fault, Germany - insights from paleoseismology, remote sensing and shallow geophysics. *Geophysical Journal International*, Bd. 204, S. 1662-1677. DOI: 10.1093/gji/ggv558

- Gudden, H. (1974): Die Forschungsbohrung Nördlingen 1973. Durchführung und erste Befunde. *Geologica Bavaria*, Bd. 72, S. 11-31
- Gudmundsson, A. (2011): *Rock Fractures in Geological Processes*. New York: Cambridge University Press. ISBN 0521863929
- Hejl, E., Coyle, D., Lal, N., Van den Haute, P. & Wagner, G. A. (1997): Fission-track dating of the western border of the Bohemian massif: thermochronology and tectonic implications. *Geologische Rundschau*, Bd. 86, S. 210-219. ISSN 14321149. DOI: 10.1007/s005310050133
- Henningsen, D. & Katzung, G. (2006): *Einführung in die Geologie Deutschlands*. 7. Aufl., München: Springer Spektrum ISBN 9783827415868
- 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*, Bd. 216, S. 2025-2036. DOI: 10.1093/gji/ggy532
- Herbert, H. J. & Schwandt, A. (2007): *Salzlösungszuflüsse im Salzbergbau Mitteldeutschlands*. GRS-226. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit(GRS) mbH. Köln. ISBN 9783939355007
- Hibsch, C., Cartwright, J. A., Hansen, D. M., Gaviglio, P., André, G., Cushing, E. M., Bracq, P., Juignet, P., Benoit, P. & Allouc, J. (2003): Normal faulting in chalk: Tectonic stresses vs. compaction-related polygonal faulting. *Geological Society, London, Special Publications*, Bd. 216, S. 291-308. DOI: 10.1144/GSL.SP.2003.216.01.19
- Hinzen, K.-G. (2003): Stress field in the Northern Rhine area, Central Europe, from earthquake fault plane solutions. *Tectonophysics*, Bd. 377, S. 325-356. ISSN 00401951. DOI: 10.1016/j.tecto.2003.10.004
- Hofbauer, G. (2016): *Vulkane in Deutschland*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft (WBG) ISBN 9783534268245
- Hofmann, F., Schlatter, R. & Weh, M. (2000): Blatt 1011 Beggingen (Südhälfte) mit SW-Anteil von Blatt 1012 Singen (Atlasblatt 97), Erläuterungen. 1:25.000. Bern Hallwag Kümmerly+Frey. *Geologischer Atlas der Schweiz*. ISBN 9783906723372
- Holbrook, W. S., Larsen, H. C., Korenaga, J., Dahl-Jensen, T., Reid, I. D., Kelemen, P. B., Hopper, J. R., Kent, G. M., Lizarralde, D., Bernstein, S. & Detrick, R. S. (2001): Mantle thermal structure and active upwelling during continental breakup in the North Atlantic. *Earth and Planetary Science Letter*, Bd. 190, S. 251-266
- Höltling, B. & Coldewey, W. G. (2019): *Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie*. 8. Aufl., Springer eBooks, Berlin: Springer Spektrum. ISBN 9783662596678
- Horálek, J. & Fischer, T. (2010): Intraplate earthquake swarms in West Bohemia/Vogtland (Central Europe). *Jökull*, Bd. 60, S. 67-87. ISSN 04490576
- Hoth, P., Wirth, H., Reinhold, K., Bräuer, V., Krull, P. & Feldrappe, H. (2007): *Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen*. Berlin / Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
- Houtgast, R. F. & van Balen, R. T. (2000): Neotectonics of the Roer Valley Rift System, the Netherlands. *Global and Planetary Change*, Bd. 27, S. 131-146. ISSN 09218181. DOI: 10.1016/S0921-8181(01)00063-7

- Hüttner, R. & Schmidt-Kaler, H. (1999): Meteoritenkrater Nördlingen Ries. 1. Aufl., Wanderungen in die Erdgeschichte München: Dr. Friedrich Pfeil. ISBN 393151658X
- Huuse, M. & Lykke-Andersen, H. (2000): Large-scale glaciotectonic thrust structures in the eastern Danish North Sea. Geological Society, London, Special Publications, Bd. 176, S. 293-305. DOI: 10.1144/GSL.SP.2000.176.01.22
- Inglis, T. A. (1987): Directional Drilling. Petroleum Engineering and Development Studies, Dordrecht: Springer Netherlands. ISBN 9789401712705
- Jähne-Klingberg, F., Stück, H., Bebiolka, A., Bense, F. & Stark, L. (2019): Prognosemöglichkeiten von großräumigen Vertikalbewegungen für Deutschland. Abschlussbericht. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
- Jeannin, P. Y., Malard, A. & Eichenberger, U. (2015): Grundlagen zur Beurteilung von Tiefenlagerprojekten im Hinblick auf Karstphänomene. Expertenbericht. Schweizerisches Institut für Speläologie und Karstforschung (SISKA). La Chaux-de-Fonds
- Jentzsch, G. (2001): Vulkanische Gefährdung in Deutschland. Entwicklung eines Kriteriums zum Ausschluss von Gebieten für die weitere Untersuchung hinsichtlich der Eignung als Standort eines Endlagers für radioaktive Abfälle. K-MAT 12-14. Institut für Geowissenschaften, Friedrich-Schiller-Universität. Jena
- Jicha, B. R. & Jagoutz, O. (2015): Magma Production Rates for Intraoceanic Arcs. Elements, Bd. 11, S. 105-111. DOI: 10.2113/gselements.11.2.1
- Kaiser, D. & Spies, T. (2020): Anwendung des Ausschlusskriteriums Seismische Aktivität. Zwischenbericht. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
- Kalia, A. C., Frei, M. & Lege, T. (2017): A Copernicus downstream-service for the nationwide monitoring of surface displacements in Germany. Remote Sensing of Environment, Bd. 202, S. 234-249. ISSN 00344257. DOI: 10.1016/j.rse.2017.05.015
- Kämpf, H., Peterek, A., Rohrmüller, J., Kümpel, H.-J. & Geissler, W. (2005): The KTB Deep Crustal Laboratory and the western Eger Graben. In: R. Koch & H.-G. Röhlings (Hrsg.): GeoErlangen 2005: System Earth - Biosphere Coupling/Regional Geology of Central Europe Erlangen, 24.-29.09.2005. Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften Bd. 40, S. 37-107
- Karig, D. E. (1974): Evolution of Arc Systems in the Western Pacific. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Bd. 2, S. 51-75. DOI: 10.1146/annurev.ea.02.050174.000411
- Kempe, S. (2005): Karstgebiete und Höhlen in Deutschland. Geographische Rundschau, Bd. 57, S. 44-52
- Keyser, M., Ritter, J. R. R. & Jordan, M. (2002): 3D shear-wave velocity structure of the Eifel plume, Germany. Earth and Planetary Science Letters, Bd. 203, S. 59-82. DOI: 10.1016/S0012-821X(02)00861-0
- Kim, Y.-S. & Sanderson, D. J. (2005): The relationship between displacement and length of faults: a review. Earth-Science Reviews, Bd. 68, S. 317-334. ISSN 00128252. DOI: 10.1016/j.earscirev.2004.06.003
- Klein, W., Krickel, B., Riecken, J. & Salamon, M. (2016): Eine interdisziplinäre Betrachtung der vertikalen Bodenbewegungen in der Eifel. Zeitschrift für

- Geodäsie Geoinformation und Landmanagement, Bd. 141, S. 27-34. DOI: 10.12902/zfv-0103-2015
- Kley, J. & Voigt, T. (2008): Late Cretaceous intraplate thrusting in central Europe: Effect of Africa-Iberia-Europe convergence, not Alpine collision. *Geology*, Bd. 36, S. 839-842. ISSN 00917613. DOI: 10.1130/g24930a.1
- Knipping, B. J. (1989): Basalt intrusions in evaporites. Lecture notes in earth sciences, Berlin: Springer. ISBN 3540513086
- Knufinke, H. U. & Kothen, H. (1997): Die Tektonik der Niederrheinischen Bucht vor, während und nach der Hauptflözbildung. *Braunkohle, Surface Mining*, Bd. 49, S. 473-480. ISSN 09313990
- Kockel, F. (2003): Inversion structures in Central Europe - Expressions and reasons, an open discussion. *Netherlands Journal of Geosciences*, Bd. 82, S. 351-366. ISSN 00167746. DOI: 10.1017/S0016774600020187
- Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016): Verantwortung für die Zukunft. Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. Abschlussbericht K-Drs. 268. Geschäftsstelle, Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe gemäß § 3 Standortauswahlgesetz. Berlin
- Korn, M., Funke, S. & Wendt, S. (2008): Seismicity and seismotectonics of West Saxony, Germany - New insights from recent seismicity observed with the Saxonian seismic network. *Studia Geophysica et Geodaetica*, Bd. 52, S. 479-492. ISSN 15731626. DOI: 10.1007/s11200-008-0033-z
- Kozák, K., Obelić, B. & Horvatinčić, N. (1989): Tritium and ¹⁴C in Tree Rings of the Last Three Decades. *Radiocarbon*, Bd. 31, S. 766-770. ISSN 00338222. DOI: 10.1017/S0033822200012376
- Krawczyk, C. M., Maghsoudi, S. & Al-Halbouni, D. (2019): Wenn Gesteine sich auflösen: Erdfallstrukturen in Deutschlands Untergrund. *System Erde. GFZ-Journal*, Bd. 9, S. 32-37. ISSN 21918589. DOI: 10.2312/GFZ.syserde.09.01.5
- Kreemer, C., Blewitt, G. & Davis, P. M. (2020): Geodetic evidence for a buoyant mantle plume beneath the Eifel volcanic area, NW Europe. *Geophysical Journal International*, Bd. 222, S. 1316-1332. ISSN 0956-540X. DOI: 10.1093/gji/ggaa227
- Krentz, O. & Lapp, M. (2010): Bruchtektonische Hauptelemente. In: W. Bahrt, R. Bönisch, O. Krentz, R. Kühner, M. Lapp, H. Petzold, W. Schneider, H. Schulze, B. Seidel & G. Standke (Hrsg.): *Die geologische Entwicklung der Lausitz*. S. 139, Cottbus: Vattenfall Europe Mining AG. ISBN 9783000332746
- Kübler, S., Streich, R., Lück, E., Hoffmann, M., Friedrich, A. M. & Strecker, M. R. (2016): Active Faulting in a Populated Low-Strain Setting (Lower Rhine Graben, Central Europe) Identified by Geomorphic, Geophysical, and Geological Analysis. *Geological Society, London, Special Publications*, Bd. 432, S. 127-146. DOI: 10.1144/SP432.11
- Kühner, R. (2009): Neue Ergebnisse zum Nachweis neotektonischer Aktivitäten im Quartär des Tagebaus Welzow-Süd, Südbrandenburg. *Brandenburg. geowiss. Beiträge*, Bd. 16, S. 87-93
- Kupsch, W. O. (1962): Ice-Thrust Ridges in Western Canada. *The Journal of Geology*, Bd. 70, S. 582-594

- Lang, S. (2007): Die geologische Entwicklung der Hanau-Seligenstädter Senke (Hessen, Bayern). Dissertation, Technische Universität, Fachbereich Material- und Geowissenschaften, Darmstadt,
- Lange, J.-M., Tonk, C. & Wagner, G. A. (2008): Apatitspaltspurdaten zur postvariszischen thermotektonischen Entwicklung des sächsischen Grundgebirges – Erste Ergebnisse Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 159, S. 123-132. ISSN 18601804. DOI: 10.1127/1860-1804/2008/0159-0123
- Lange, T., Lorenz, V., Köppen, K.-H. & Büchel, G. (2019): Neue Aspekte zum Vulkanismus der Westeifel (Exkursion K am 26. April 2019). Jahresberichte und Mitteilungen des oberrheinischen geologischen Vereins, Bd. 101, S. 227-250. DOI: 10.1127/jmogv/101/0010
- LfU (2019): Hydrogeologische Karte 1:100.000. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU).
- LGRB (2015): Geologische Karte von Baden-Württemberg. 1:50.000. Freiburg im Breisgau: Regierungspräsidium Freiburg.
- Martin, C. & Eiblmaier, M. (2000a): Lexikon der Geowissenschaften. 1. Band: A bis Edi. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. ISBN 3827402999
- Martin, C. & Eiblmaier, M. (2000b): Lexikon der Geowissenschaften. 2. Band: Edu bis Insti. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. ISBN 3827404215
- Martin, C. & Eiblmaier, M. (2001a): Lexikon der Geowissenschaften. 3. Band: Instr bis Nor. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. ISBN 3827404223
- Martin, C. & Eiblmaier, M. (2001b): Lexikon der Geowissenschaften. 4. Band: Nord bis Silb. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. ISBN 3827404231
- Martin, C. & Eiblmaier, M. (2002): Lexikon der Geowissenschaften. 5. Band: Silc bis Z. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. ISBN 382740424X
- Marx, C. (1999): Neue Entwicklungen zur Tiefbohrtechnik, Übertage - Untertage. Jahrbuch der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft, Bd. 1998, S. 87-98
- May, F. (2019): Möglichkeiten der Prognose zukünftiger vulkanischer Aktivität in Deutschland. Kurzbericht. Hannover Bundesanstalt für Geowissenschaften (BGR)
- Mertz, D., Löhnertz, W., Nomade, S., Pereira, A., Prelević, D. & Renne, P. (2015): Temporal-spatial evolution of low-SiO₂ volcanism in the Pleistocene West Eifel volcanic field (West Germany) and relationship to upwelling asthenosphere. Journal of Geodynamics, Bd. 88, S. 59-74. DOI: 10.1016/j.jog.2015.04.002
- Meschede, M. (2018): Geologie Deutschlands: Ein prozessorientierter Ansatz. 2. Aufl., Berlin: Springer Spektrum. ISBN 9783662564226
- Mey, J., Scherler, D., Wickert, A. D., Egholm, D. L., Tesauro, M., Schildgen, T. & Strecker, M. R. (2016): Glacial isostatic uplift of the European Alps. Nature Communications, Bd. 7, S. 1-9. DOI: 10.1038/ncomms13382
- Meyer, W. (2013): Geologie der Eifel : mit 12 Tabellen. 4. Aufl., Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652792
- Meyer, W. & Stets, J. (2002): Pleistocene to Recent tectonics in the Rhenish Massif (Germany). Netherlands Journal of Geosciences, Bd. 81, S. 217-221. ISSN 00167746. DOI: 10.1017/S0016774600022460

- Miller, H. (1992): Abriß der Plattentektonik. Stuttgart: Enke. ISBN 3432997310
- Mills, P. C. (1983): Genesis and diagnostic value of soft-sediment deformation structures - A review. *Sedimentary Geology*, Bd. 35, S. 83-104. ISSN 00370738. DOI: 10.1016/0037-0738(83)90046-5
- Mortimer, C. E. & Müller, U. (2010): Chemie: Das Basiswissen der Chemie. 10. Aufl., Stuttgart: Thieme. ISBN 9783134843101
- Mrlina, J., Kämpf, H., Kroner, C., Mingram, J., Stebich, M., Brauer, A., Geissler, W. H., Kallmeyer, J., Matthes, H. & Seidl, M. (2009): Discovery of the first Quaternary maar in the Bohemian Massif, Central Europe, based on combined geophysical and geological surveys. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Bd. 182, S. 97-112. ISSN 03770273. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2009.01.027
- Mrugalla, S. (2014): Geowissenschaftliche Langzeitprognose für Norddeutschland - ohne Endlagereinfluss (AnSicht). Ergebnisbericht. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
- Müller-Sohnius, D., Horn, P. & Huckenholz, H. G. (1989): Kalium-Argon-Datierungen an tertiären Vulkaniten der Hocheifel (BRD). *Chemie der Erde*, Bd. 49, S. 119-136. ISSN 00092819
- Müller, C., Jähne-Klingberg, F., von Goerne, G., Binot, F. & Röhling, H.-G. (2016): Vom Geotektonischen Atlas („Kockel-Atlas“) zu einem 3D-Gesamtmodell des Norddeutschen Beckens: Basisinformationen zum tieferen Untergrund von Norddeutschland. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, Bd. 126, S. 65-106. DOI: 10.1127/zdgg/2016/0072
- Müller, W. H., Naef, H. & Graf, H. R. (2002): Geologische Entwicklung der Nordschweiz, Neotektonik und Langzeitszenarien Zürcher Weinland. Technischer Bericht 99-08. Nagra. Wettingen
- Münnich, K. O. (1963): Atombomben-Tritium als Indikator in der Hydrologie. *Physikalische Blätter*, Bd. 19, S. 418-421. ISSN 00319279. DOI: 10.1002/phbl.19630190905
- Murawski, H. & Meyer, W. (2010): Geologisches Wörterbuch. 12. Aufl., Heidelberg: Springer Spektrum. ISBN 9783662540503
- Nagra (2002): Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse: Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Projekt Opalinuston. Technischer Bericht 02-03. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Wettingen, Schweiz
- Neukum, C., Seibert, S., Post, V. E. A., Königer, P., Bäumle, R., Desens, A. & Houben, G. (2020): Ausschlusskriterium Grundwasseralter. Zwischenbericht. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
- Niedersächsisches Umweltministerium (2002): Planfeststellungsbeschluss für die Errichtung und den Betrieb des Bergwerkes Konrad in Salzgitter. Planfeststellungsbeschluss. Niedersächsisches Umweltministerium. Hannover
- NordNordWest (2008): Positionskarte von Deutschland. [Karte]. o. O.: Wikimedia Commons. Letzte Aktualisierung am: 28.08.2019. Zugriff am: 22.07.2020. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Germany_location_map.svg
- Nydal, R. & Lövseth, K. (1970): Prospective decrease in atmospheric radiocarbon. *Journal of Geophysical Research*, Bd. 75, S. 2271-2278. ISSN 01480227. DOI: 10.1029/JC075i012p02271

- Ortner, H., Aichholzer, S., Zerlauth, M., Pilser, R. & Fügenschuh, B. (2015): Geometry, amount, and sequence of thrusting in the Subalpine Molasse of western Austria and southern Germany, European Alps. *Tectonics*, Bd. 34, S. 1-30. ISSN 02787407. DOI: 10.1002/2014tc003550
- Peters, G. & Van Balen, R. (2007): Tectonic geomorphology of the northern Upper Rhine Graben, Germany. *Global and Planetary Change*, Bd. 58, S. 310-334. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2006.11.041
- Pfeffer, K.-H. (2003): Karstlandschaften. *Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland - Relief, Boden und Wasser*, Bd. 2, S. 94-95
- Plenefisch, T. & Bonjer, K.-P. (1997): The stress field in the Rhine Graben area inferred from earthquake focal mechanisms and estimation of frictional parameters. *Tectonophysics*, Bd. 275, S. 71-97. ISSN 00401951. DOI: 10.1016/S0040-1951(97)00016-4
- Plummer, L. N. & Glynn, P. D. (2013): Radiocarbon Dating in groundwater systems. In: A. Suckow, P. K. Aggarwal & L. J. Araguas-Araguas (Hrsg.): *Isotope methods for dating old groundwater*. S. 33-89, Vienna: International Atomic Energy Agency. ISBN 9789201372109
- Press, F. & Siever, R. (2008): *Allgemeine Geologie*. 5. Aufl., Berlin, Heidelberg: Spektrum. ISBN 9783827418128
- Prinz, H. & Strauß, R. (2011): *Ingenieurgeologie*. 5. Aufl., Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. ISBN 9783827424723. DOI: 10.1007/978-3-8274-2473-0
- Ratschbacher, L., Frisch, W., Neubauer, F., Schmid, S. M. & Neugebauer, J. (1989): Extension in compressional orogenic belts: The eastern Alps. *Geology*, Bd. 17, S. 404-407. ISSN 00917613. DOI: 10.1130/0091-7613(1989)017<0404:Eicobt>2.3.Co;2
- Reich, M. (2015): *Auf Jagd im Untergrund*. 2. Aufl., Berlin: Springer Spektrum. ISBN 9783662462829. DOI: 10.1007/978-3-662-46282-9
- Reicherter, K., Froitzheim, N., Jarosiński, M., Badura, J., Franzke, H.-J., Hansen, M., Hübscher, C., Müller, R., Poprawa, P., Reinecker, J., Stackebrandt, W., Voigt, T., Eynatten, H. V. & Zuchiewicz, W. (2008): Alpine tectonics north of the Alps. In: T. McCann (Hrsg.): *The Geology of Central Europe*. Bd. 2: Mesozoic and Cenozoic, S. 1232-1285, London: The Geological Society. ISBN 9781862392656. DOI: 10.1144/cev2p.7
- Reimold, W. U. & Jourdan, F. (2012): IMPACT! – Bolides, craters, and catastrophes. *Elements*, Bd. 8, S. 19-24. DOI: 10.2113/gselements.8.1.19
- Reinecker, J. & Schneider, G. (2002): Zur Neotektonik der Zollernalb: Der Hohenzollerngraben und die Albstadt-Erdbeben. *Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins*, Bd. 84, S. 391-417. ISSN 0078947. DOI: 10.1127/jmogv/84/2002/391
- Reinecker, J., Tingay, M., Müller, B. & Heidbach, O. (2010): Present-day stress orientation in the Molasse Basin. *Tectonophysics*, Bd. 482, S. 129-138. DOI: 10.1016/j.tecto.2009.07.021
- Reuter, F., Klengel, K. J. & Pašek, J. (1992): *Ingenieurgeologie*. 3. Aufl., Leipzig: Deutscher Verl. für Grundstoffindustrie. ISBN 3342003162
- Reuther, C.-D. (2012): *Grundlagen der Tektonik: Kräften und Spannungen der Erde auf der Spur*. Berlin: Springer Spektrum. ISBN 9783827420657

- Reuther, E.-U. (1989): Lehrbuch der Bergbaukunde. 11. Aufl., Essen: VGE. ISBN 3773904932
- Ring, U., Brandon, M. T., Willett, S. D. & Lister, G. S. (1999): Exhumation processes. In: U. Ring, M. T. Brandon, S. D. Willett & G. S. Lister (Hrsg.): Exhumation Processes: Normal Faulting, Ductile Flow and Erosion. Bd. 154, S. 1-27, London: The Geological Society ISBN 1862390320. DOI: 10.1144/GSL.SP.1999.154.01.01
- Ritter, J. R. R., Jordan, M., Christensen, U. R. & Achauer, U. (2001): A mantle plume below the Eifel volcanic fields, Germany. *Earth and Planetary Science Letters*, Bd. 186, S. 7-14. DOI: 10.1016/S0012-821X(01)00226-6
- Rohrmüller, J., Kämpf, H., Geiß, E., Großmann, J., Grun, I., Mingram, J., Mrlina, J., Plessen, B., Stebich, M., Veress, C., Wendt, A. & Nowaczyk, N. (2018): Reconnaissance study of an inferred Quaternary maar structure in the western part of the Bohemian Massif near Neualbenreuth, NE-Bavaria (Germany). *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)*, Bd. 107, S. 1381-1405. ISSN 14373262. DOI: 10.1007/s00531-017-1543-0
- Rosenbaum, G., Lister, G. & Duboz, C. (2002): Relative motions of Africa, Iberia and Europe during Alpine Orogeny. *Tectonophysics*, Bd. 359, S. 117-129. DOI: 10.1016/S0040-1951(02)00442-0
- Röthemeyer, H. & Viehl, E. (1989): Endlagerung radioaktiver Abfälle. *Physik in unserer Zeit*, Bd. 20, S. 116-124. ISSN 00319252. DOI: 10.1002/piuz.19890200404
- Rotstein, Y. & Schaming, M. (2011): The Upper Rhine Graben (URG) revisited: Miocene transtension and transpression account for the observed first-order structures. *Tectonics*, Bd. 30, S. 1-14. ISSN 0278-7407. DOI: 10.1029/2010tc002767
- SAAS (1986): Genehmigung zum Dauerbetrieb des Endlagers für radioaktive Abfälle. Planfeststellungsverfahren. Staatliches Amt für Atomsicherheit und Strahlenschutz
- Schäfer, A., Utescher, T., Klett, M. & Valdivia Manchego, M. (2005): The Cenozoic Lower Rhine Basin - Rifting, sedimentation, and cyclic stratigraphy. *International Journal of Earth Sciences*, Bd. 94, S. 621-639. DOI: 10.1007/s00531-005-0499-7
- Schlöder, Z., Urai, J., Nollet, S. & Hilgers, C. (2008): Solution-precipitation creep and fluid flow in halite: A case study of Zechstein (Z1) rocksalt from Neuhof salt mine (Germany). *International Journal of Earth Sciences*, Bd. 97, S. 1045-1056. DOI: 10.1007/s00531-007-0275-y
- Schmieder, M., Kennedy, T., Jourdan, F., Buchner, E. & Reimold, W. U. (2018): Response to Comment on "A high-precision $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age for the Nördlinger Ries impact crater, Germany, and implications for the accurate dating of terrestrial impact events". *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Bd. 220, S. 146-157. DOI: 10.1016/j.gca.2018.07.025
- Schmincke, H.-U. (2013): Vulkanismus. 4. Aufl., Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft (WBG). ISBN 9783534262458
- Schmincke, H.-U., Park, C. & Harms, E. (1999): Evolution and environmental impacts of the eruption of Laacher See Volcano (Germany) 12,900 a BP. *Quaternary International*, Bd. 61, S. 61-72. ISSN 10406182. DOI: 10.1016/S1040-6182(99)00017-8

- Schumacher, M. E. (2002): Upper Rhine Graben: Role of preexisting structures during rift evolution. *Tectonics*, Bd. 21, S. 6-1-6-17. ISSN 02787407. DOI: 10.1029/2001tc900022
- Schwarz, M. & Henk, A. (2005): Evolution and structure of the Upper Rhine Graben: Insights from three-dimensional thermomechanical modelling. *International Journal of Earth Sciences*, Bd. 94, S. 732-750. DOI: 10.1007/s00531-004-0451-2
- Siebert, L., Cottrell, E., Venzke, E. & Andrews, B. (2015): Earth's Volcanoes and Their Eruptions: An Overview. In: H. Sigurdsson (Hrsg.): *The Encyclopedia of Volcanoes*. 2. Aufl., S. 239-255, Amsterdam: Academic Press. ISBN 9780123859389. DOI: 10.1016/B978-0-12-385938-9.00012-2
- Sinclair, H. D. & Allen, P. A. (1992): Vertical versus horizontal motions in the Alpine orogenic wedge: stratigraphic response in the foreland basin. *Basin Research*, Bd. 4, S. 215-232. DOI: 10.1111/j.1365-2117.1992.tb00046.x
- Sleep, N. H. (1990): Hotspots and mantle plumes: Some phenomenology. *Journal of Geophysical Research*, Bd. 95, S. 6715-6736. ISSN 01480227. DOI: 10.1029/JB095iB05p06715
- Stackebrandt, W. (2005): Neotektonische Aktivitätsgebiete in Brandenburg (Norddeutschland). *Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge*, Bd. 12, S. 165-172
- Stackebrandt, W. & Beer, H. (2010): Strukturgeologische Übersicht. In: G. u. R. L. Landesamt für Bergbau (Hrsg.): *Atlas zur Geologie von Brandenburg*. 4. aktualisierte Auflage. Aufl., S. 80-81, Cottbus: Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe (LBGR). ISBN 978-3-9808157-4-1
- StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 247 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist
- Standortauswahlgesetz - StandAG (2017): Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 247 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist
- Stanek, K., Domínguez-González, L., Andreani, L. & Bräutigam, B. (2016): Tektonische und geomorphologische 3D-Modellierung der tertiären Einheiten der sächsischen Lausitz. 1. Aufl. 3D-Modellierung des Tertiärs in der Lausitz. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Dresden
- Stange, S. & Brüstle, W. (2005): The Albstadt/Swabian Jura seismic source zone reviewed through the study of the earthquake of March 22, 2003. *Jahresberichte und Mitteilungen des oberrheinischen geologischen Vereins*, Bd. 87, S. 391-414. DOI: 10.1127/jmogv/87/2005/391
- Stark, L. (2014): *Geowissenschaftliche Langzeitprognose für Süddeutschland - ohne Endlagereinfluss (AnSichT)*. Ergebnisbericht. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
- Štěpančíková, P., Fischer, T., Stemberk, J., Nováková, L., Hartvich, F. & Marques Figueiredo, P. (2019): Active tectonics in the Cheb basin: Youngest documented Holocene surface faulting in Central Europe? *Geomorphology*, Bd. 327, S. 472-488. DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.11.007
- Sternai, P., Sue, C., Husson, L., Serpelloni, E., Becker, T. W., Willett, S. D., Faccenna, C., Di Giulio, A., Spada, G., Jolivet, L., Valla, P., Petit, C., Nocquet, J.-M.,

- Walpersdorf, A. & Castelltort, S. (2019): Present-day uplift of the European Alps: Evaluating mechanisms and models of their relative contributions. *Earth-Science Reviews*, Bd. 190, S. 589-604. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.01.005
- Stewart, S. A., Harvey, M. J., Otto, S. C. & Weston, P. J. (1996): Influence of salt on fault geometry: examples from the UK salt basins. Geological Society, London, Special Publications, Bd. 100, S. 175-202. DOI: 10.1144/gsl.Sp.1996.100.01.12
- Stöffler, D., Artemieva, N. A., Wünnemann, K., Reimold, W. U., Jacob, J., Hansen, B. K. & Summerson, I. A. T. (2013): Ries crater and suevite revisited - Observations and modeling Part I: Observations. *Meteoritics & Planetary Science*, Bd. 48, S. 515-589. ISSN 10869379. DOI: 10.1111/maps.12086
- Storck, R., Bütow, E., Heredia, L., Hossain, S., Kühle, T., Lütke-meier-Hosseini-pour, S., Nies, A., Prähl, G. & Struck, S. (1986): Langzeitsicherheitsanalyse des Endlagers Konrad: Radionuklid-ausbreitung in der Nachbetriebsphase. TA-Nr. 2242.03. Strahlen- und Umweltforschung mbH München, Institut für Tief-lagerung. München
- Stück, H., Bense, F., Frenzel, B., Henneberg, M., Kneuker, T., Lang, J., Mertineit, M., Noack, V. & Pollok, L. (2020): Ausschlusskriterium "Aktive Störungszonen". Abschlussbericht. Hannover/Berlin: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
- Sültenfuß, J. & Massmann, G. (2004): Datierung mit der ³He-Tritium-Methode am Beispiel der Uferfiltration im Oderbruch. *Grundwasser*, Bd. 9, S. 221-234. ISSN 14321165. DOI: 10.1007/s00767-004-0055-6
- Teixell, A., Bertotti, G., Frizon de Lamotte, D. & Charroud, M. (2009): The geology of vertical movements of the lithosphere: An overview. *Tectonophysics*, Bd. 475, S. 1-8. DOI: 10.1016/j.tecto.2009.08.018
- Ten Veen, J. H., Van Gessel, S. F. & Den Dulk, M. (2012): Thin- and thick-skinned salt tectonics in the Netherlands; a quantitative approach. *Netherlands Journal of Geosciences*, Bd. 91, S. 447-464. ISSN 00167746. DOI: 10.1017/S0016774600000330
- Teodoriu, C. & Falcone, G. (2014): Bohrtechnik für Tiefbohrung. In: M. Bauer, W. Freeden, H. Jacobi & T. Neu (Hrsg.): *Handbuch Tiefe Geothermie*. S. 303-336, Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum. ISBN 9783642545108. DOI: 10.1007/978-3-642-54511-5_8
- Thomson, S. N. & Zeh, A. (2000): Fission-track thermochronology of the Ruhla Crystalline Complex: new constraints on the post-Variscan thermal evolution of the NW Saxo-Bohemian Massif. *Tectonophysics*, Bd. 324, S. 17-35. ISSN 00401951. DOI: 10.1016/S0040-1951(00)00113-X
- Torabi, A. & Berg, S. S. (2011): Scaling of fault attributes: A review. *Marine and Petroleum Geology*, Bd. 28, S. 1444-1460. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2011.04.003
- Torabi, A., Ellingsen, T. S. S., Johannessen, M. U., Alaei, B., Rotevatn, A. & Chiarella, D. (2020): Fault zone architecture and its scaling laws: where does the damage zone start and stop? In: S. R. Ogilvie, S. J. De, R. W. Wilson & W. R. Bailey (Hrsg.): *Integrated Fault Seal Analysis*. Bd. 496, S. 99-124, 1, London: Geological Society, London, Special Publications. DOI: 10.1144/sp496-2018-151
- Ulrych, J., Ackerman, L., Balogh, K., Hegner, E., Jelínek, E., Pécskay, Z., Přichystal, A., Upton, B. G. J., Zimák, J. & Foltýnová, R. (2013): Plio-Pleistocene basanitic and melilititic series of the Bohemian Massif: K-Ar ages, major/trace element and Sr-

- Nd isotopic data. *Geochemistry*, Bd. 73, S. 429-450. ISSN 00092819 DOI: 10.1016/j.chemer.2013.02.001
- Van Balen, R. T., Bakker, M. A. J., Kasse, C., Wallinga, J. & Woolderink, H. A. G. (2019): A Late Glacial surface rupturing earthquake at the Peel Boundary fault zone, Roer Valley Rift System, the Netherlands. *Quaternary Science Reviews*, Bd. 218, S. 254-266. ISSN 02773791. DOI: 10.1016/j.quascirev.2019.06.033
- Van Balen, R. T., Houtgast, R. F., Van der Wateren, F. M. & Vandenberghe, J. (2002): Neotectonic evolution and sediment budget of the Meuse catchment in the Ardennes and the Roer Valley Rift System. *Netherlands Journal of Geosciences*, Bd. 81, S. 211-215. ISSN 00167746. DOI: 10.1017/S0016774600022459
- van den Berg, M. W. (1995): Neotectonics of the Roer Valley rift system; style and rate of crustal deformation inferred from syn-tectonic sedimentation. *Netherlands Journal of Geosciences*, Bd. 73, S. 143-156. ISSN 00167746
- van den Bogaard, P. (1995): ⁴⁰Ar/³⁹Ar ages of sanidine phenocrysts from Laacher See Tephra (12,900 yr BP): Chronostratigraphic and petrological significance. *Earth and Planetary Science Letters*, Bd. 133, S. 163-174. ISSN 0012821X. DOI: 10.1016/0012-821X(95)00066-L
- van den Bogaard, P. & Schmincke, H.-U. (1985): Laacher See Tephra: A widespread isochronous late Quaternary tephra layer in central and northern Europe. *GSA Bulletin*, Bd. 96, S. 1554-1571. ISSN 00167606. DOI: 10.1130/0016-7606(1985)96<1554:Lstawi>2.0.Co;2
- Vanneste, K., Camelbeeck, T. & Verbeeck, K. (2013): A Model of Composite Seismic Sources for the Lower Rhine Graben, Northwest Europe. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Bd. 103, S. 984-1007. DOI: 10.1785/0120120037
- Vanneste, K., Verbeeck, K., Camelbeeck, T., Paulissen, E., Meghraoui, M., Renardy, F., Jongmans, D. & Frechen, M. (2001): Surface-rupturing history of the Bree fault scarp, Roer Valley graben: Evidence for six events since the late Pleistocene. *Journal of Seismology*, Bd. 5, S. 329-359. ISSN 1573157X. DOI: 10.1023/A:1011419408419
- Verschuren, M. (1992): An integrated 3D approach to clay tectonic deformation and the development of a new 3D surface modelling method. Dissertation, Universiteit Gent, Faculty of Science, Gent, Belgien,
- Vidal, H. (1974): Die Forschungsbohrung Nördlingen 1973. Vorgeschichte, Verwirklichung und Organisation der wissenschaftlichen Bearbeitung. *Geologica Bavaria*, Bd. 72, S. 5-10
- von Blanckenburg, F. (2005): The control mechanisms of erosion and weathering at basin scale from cosmogenic nuclides in river sediment. *Earth and Planetary Science Letters*, Bd. 237, S. 462-479. ISSN 0012821X. DOI: 10.1016/j.epsl.2005.06.030
- von Eynatten, H., Voigt, T., Meier, A., Franzke, H.-J. & Gaupp, R. (2008): Provenance of Cretaceous clastics in the Subhercynian Basin: constraints to exhumation of the Harz Mountains and timing of inversion tectonics in Central Europe. *International Journal of Earth Sciences*, Bd. 97, S. 1315-1330. ISSN 14373262. DOI: 10.1007/s00531-007-0212-0
- von Goerne, G., Fleig, S., Rokahr, R. & Donadei, S. (2016): Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von

- Erneuerbaren Energien (InSpEE) (Wasserstoff und Druckluft). Archivstück Sachbericht 03ESP323B. BGR - Institut für Geotechnik (LUH) - KBB Underground Technologies. Hannover / Jülich
- von Hartmann, H., Tanner, D. C. & Schumacher, S. (2016): Initiation and development of normal faults within the German alpine foreland basin: The inconspicuous role of basement structures. *Tectonics*, Bd. 35, S. 1560-1574. ISSN 02787407. DOI: 10.1002/2016tc004176
- Vrolijk, P. & van der Pluijm, B. A. (1999): Clay gouge. *Journal of Structural Geology*, Bd. 21, S. 1039-1048. ISSN 01918141 DOI: 10.1016/s0191-8141(99)00103-0
- Wagner, H. (2017): Gebirgsmechanische Herausforderungen des tiefen Bergbaus. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, Bd. 162, S. 475-479. ISSN 16137531. DOI: 10.1007/s00501-017-0637-0
- Weinlich, F. H. (2014): Carbon dioxide controlled earthquake distribution pattern in the NW Bohemian swarm earthquake region, western Eger Rift, Czech Republic—gas migration in the crystalline basement. *Geofluids*, Bd. 14, S. 143-159. ISSN 14688115. DOI: 10.1111/gfl.12058
- Wetzel, H.-U. & Franzke, H. J. (2003): Lassen sich über Fernerkundung erweiterte Kenntnisse zur seismogenen Zone Bodensee-Stuttgart (9°-Ost) gewinnen? . In: E. Seyfert (Hrsg.): 23. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Bochum, 09.-11.09.2003. Potsdam: Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. ISBN 09422870
- WHG: Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1408) geändert worden ist
- White, R. S. & McKenzie, D. (1995): Mantle plumes and flood basalts. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Bd. 100, S. 17543-17585. ISSN 01480227. DOI: 10.1029/95jb01585
- Wilson, J. T. (1963): A possible origin of the Hawaiian Islands. *Canadian Journal of Physics*, Bd. 41, S. 863-870. DOI: doi.org/10.1139/p63-094
- Winsemann, J., Koopmann, H., Tanner, D. C., Lutz, R., Lang, J., Brandes, C. & Gaedicke, C. (2020): Seismic interpretation and structural restoration of the Heligoland glaciotectionic thrust-fault complex: Implications for multiple deformation during (pre-)Elsterian to Warthian ice advances into the southern North Sea Basin. *Quaternary Science Reviews*, Bd. 227, S. 1-15. ISSN 02773791. DOI: 10.1016/j.quascirev.2019.106068
- Winter, J. D. (2001): *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Lebanon, Indiana, U.S.A: Pearson/Prentice Hall. ISBN 9780132403429
- Wirtschaftsvereinigung Bergbau (1994): *Das Bergbau-Handbuch*. Essen: Glückauf Verlag. ISBN 377390567X
- Worden, R. H. & Burley, S. D. (2003): Sandstone Diagenesis: The Evolution of Sand to Stone. In: R. H. Worden & S. D. Burley (Hrsg.): *Sandstone Diagenesis: Recent and Ancient*. S. 1-44, 4, Malden, USA: Blackwell Publishing Ltd. ISBN 9781444304459. DOI: 10.1002/9781444304459.ch
- Wörner, G., Mamani, M. & Blum-Oeste, M. (2018): Magmatism in the Central Andes. *Elements*, Bd. 14, S. 237-244. ISSN 18115209. DOI: 10.2138/gselements.14.4.237

- Wüllner, U., Christensen, U. R. & Jordan, M. (2006): Joint geodynamical and seismic modelling of the Eifel plume. *Geophysical Journal International*, Bd. 165, S. 357-372. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2006.02906.x
- Ziegler, P. A., Schumacher, M. E., Dèzes, P. & Van Wees, J. D. (2004): Post-Variscan evolution of the lithosphere in the Rhine Graben area: Constraints from subsidence modelling. *Geological Society London Special Publications*, Bd. 223, S. 289-317. DOI: 10.1144/GSL.SP.2004.223.01.13
- Zijerveld, L., Stephenson, R. A., Cloetingh, S. A. P. L., Duin, E. & van den Berg, M. (1992): Subsidence analysis and modelling of the Roer Valley Graben (SE Netherlands). *Tectonophysics*, Bd. 208, S. 159-171. ISSN 00401951 DOI: 10.1016/0040-1951(92)90342-4
- Zoback, M. D. (2009): *Reservoir geomechanics*. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 9780511586477. DOI: 10.1017/CBO9780511586477
- Zolitschka, B., Negendank, J. F. W. & Lottermoser, B. G. (1995): Sedimentological proof and dating of the Early Holocene volcanic eruption of Ulmener Maar (Vulkaneifel, Germany). *Geologische Rundschau*, Bd. 84, S. 213-219. DOI: 10.1007/BF00192252
- Zötl, J. (1974): *Karsthydrogeologie*. Wien: Springer. ISBN 3211812504. DOI: 10.1007/978-3-7091-8370-0

Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
Eschenstraße 55
31224 Peine
T +49 05171 43-0
poststelle@bge.de
www.bge.de