

## Ausschlusskriterium „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 Absatz 2 Nummer 2 StandAG

### Was ist eine Störung?

Als Störung im Sinne eines tektonischen Vorgangs werden Flächen oder schmale Bereiche in der Erdkruste bezeichnet, die durch bruchhafte Verformung des Gesteinsverbandes entstanden sind (Twiss & Moores, 2007; Fossen, 2011). Entlang dieser Störungsflächen bewegen sich die angrenzenden Gesteinsblöcke relativ zueinander. Störungen mit deutlichen Versatzbetrag sind in der Regel als Störungszonen ausgebildet und bestehen aus dem Störungskern sowie einer umgebenden Zerrüttungszone (Abb. 1). Die Zerrüttungszone setzt sich meist aus mehreren, oft subparallel angeordneten Bruchflächen bzw. Sekundärstörungen zusammen (Fossen, 2011; Choi et al., 2016).

Störungen entstehen durch tektonische Kräfte wie Extension (Zugkraft), Kompression (Druckkraft) und Scherung (Frisch et al., 2010). Störungen werden nach der Bewegungsrichtung der Gesteinsblöcke relativ zueinander in Abschiebungen, Aufschiebungen und Blattverschiebungen klassifiziert (Twiss & Moores, 2007; Fossen, 2011). Die räumliche Lage der oft gekrümmten Störungsfläche / -zone wird durch ihre Streich- und Einfallrichtung (Abb. 2) definiert (Fossen, 2011).

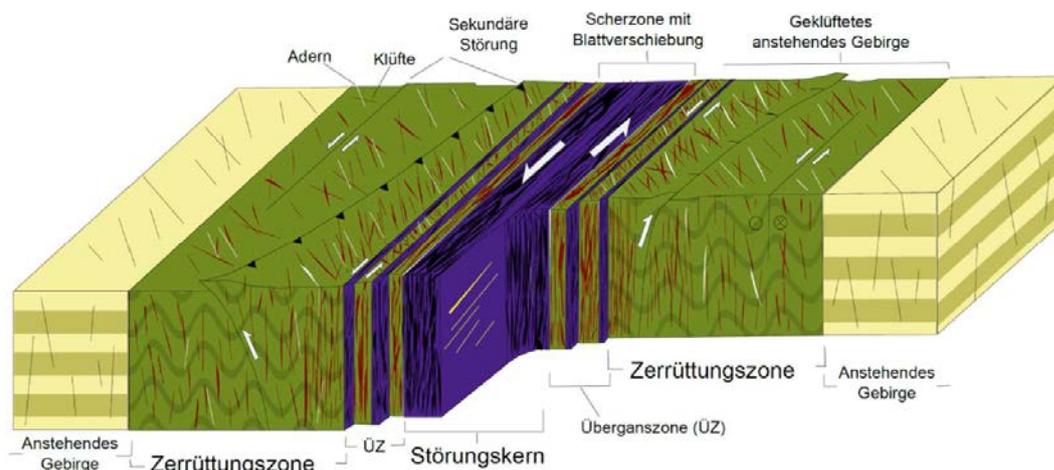


Abb. 1: Schematischer Aufbau einer Störungszone mit dem Störungskern und zwei Zerrüttungszonen (Agemar et al., 2017).

Trotz der intrakontinentalen Lage Deutschlands, sind einige Regionen seit dem Tertiär (vor 66 bis 2,6 Millionen Jahren) stärker von tektonischer Aktivität betroffen als andere. Besonders die jüngste Gebirgsbildungsphase der Alpen ist seit dem oberen Eozän (vor 38 bis 34 Millionen Jahren) maßgeblich für die rezente Aktivität von Störungen in Deutschland verantwortlich (Reicherter et al., 2008). Dabei stellen die in geologisch jüngerer Vergangenheit aktiven Störungszonen häufig reaktivierte Elemente dar, die schon bei älteren Gebirgsbildungsphasen angelegt wurden (Schumacher, 2002). Besonders hervorzuheben sind hier die seit dem Eozän entstandenen Grabensysteme als Teil des Europäischen Grabenbruchsystems (unter anderem der Oberrheingraben, das Mainzer Becken, die Niederrheinische Bucht und der Eger Graben im Deutsch-Tschechischen Grenzgebiet) (Ziegler, 1992; Zulauf, 1993; Dèzes et al., 2004). Im Zusammenhang mit der Alpen Gebirgsbildungsphase steht auch die Entstehung der Grabenstrukturen im westlichen Teil der Schwäbischen Alb entlang der Albstadt Scherzone sowie die Entwicklung des Molassebeckens als Vorlandbecken der Alpen (Reinecker & Schneider, 2002; Reicherter et al., 2012).

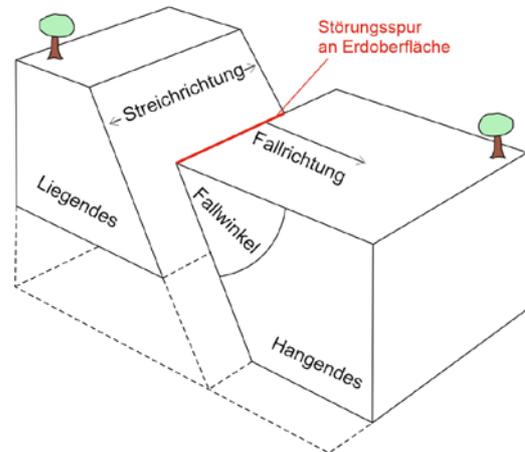


Abb. 2: Streichen und Fallen einer Störung.

## Spezialfall „Atektonische Vorgänge“

Atektonische bzw. aseismische Vorgänge, also Gesteinsdeformationen, die nicht aus tektonischen Prozessen abgeleitet werden können bzw. nicht auf seismische Aktivitäten zurückzuführen sind und die zu ähnlichen Konsequenzen für die Sicherheit eines Endlagers wie tektonische Störungszonen führen können, sind gemäß § 22 Absatz 2 Nummer 2 StandAG wie diese zu behandeln. Dazu gehören Gesteinsdeformationen wie z. B. Senkungen und Einstürze über Hohlräumen von relativ leicht löslichen Gesteinen (Kalk, Gips oder Steinsalz) sowie Deformationen durch Gletscherüberfahrung oder Impaktereignisse (z. B. Meteoritenkrater Nördlinger Ries) (Murawski & Meyer, 2004).

## Warum werden aktive Störungszonen von der Endlagersuche ausgeschlossen?

Je nach Deformationsart, Intensität der Gesteinsdeformation und Gesteinstyp können Störungszonen eine deutlich größere oder wesentlich kleinere Gebirgsdurchlässigkeit als das intakte Gestein aufweisen (Faulkner et al., 2010; Fossen, 2011; Agemar et al., 2017). Eine größere Gebirgsdurchlässigkeit könnte das Endlagersystem und seine Barrieren beeinträchtigen. Dabei wird die Gebirgsdurchlässigkeit im Nahbereich von Störungszonen wesentlich vom Aufbau der Zerrüttungszonen und der Mächtigkeit und Eigenschaften des Störungskerns (oder der Störungskerne bei mehreren Bruchflächen) beeinflusst und kontrolliert (Abb. 1) (Faulkner et al., 2010). Vor allem in grundwasserhemmenden Gesteinen ermöglichen Störungszonen häufig den Transport von Fluiden, da die äußeren Zerrüttungszonen aufgrund von Klüften eine erhöhte Durchlässigkeit aufweisen können (Fossen, 2011).

## So will die BGE das Ausschlusskriterium „Aktive Störungszonen“ anwenden

(Sollte sich auf Grundlage von Fachdiskussionen die Notwendigkeit einer methodischen Anpassung ergeben, kann der hier gezeigte Zwischenstand von dem Ergebnis im Zwischenbericht Teilgebiete abweichen.)

Nach § 22 Absatz 2 Nummer 2 Standortauswahlgesetz (StandAG) werden Gebirgsbereiche einschließlich eines abdeckenden Sicherheitsabstands zu einem Endlager ausgeschlossen, wenn geologisch aktive Störungszonen, die das Endlagersystem und seine Barrieren beeinträchtigen können, nachgewiesen sind. Als „aktive Störungszonen“ werden dabei Brüche in den Gesteinsschichten der oberen Erdkruste wie Verwerfungen mit deutlichem Gesteinsversatz definiert, an denen nachweislich oder mit großer Wahrscheinlichkeit im Zeitraum Rupel bis heute, also innerhalb der letzten 34 Millionen Jahre, Bewegungen stattgefunden haben.

Die BGE hat im Nachgang mehrerer Datenabfragen Datensätze aus den verschiedensten Datenquellen von den Staatlichen Geologischen Diensten zu tektonischen Störungen erhalten. Der größte Teil dieser Daten basiert auf Informationen aus geologischen Karten und Übersichtskarten unterschiedlichen Maßstabs. Des Weiteren umfassen die Datenlieferungen Informationen aus Berichten, Forschungsprojekten und aus geologischen 3D-Modellen. In der Regel handelt es sich bei diesen Daten um sogenannte „Störungsspuren“ – Linien, die den Verlauf einer Störung an der Erdoberfläche zeigen. Die räumliche Erstreckung von Störungszonen im Untergrund, z. B. der Fallwinkel oder die maximale Tiefe, liegt der BGE für weniger als 1 % der Störungszonen vor. Angaben zu den Versatzbeträgen von Gesteinsschichten entlang einer Störungszone sind nur in einem Bruchteil der an die BGE übermittelten Datensätze enthalten. Da sowohl der Detaillierungsgrad der Informationen (z. B. verschiedene Kartenmaßstäbe als Grundlage), als auch die Qualität der Datensätze hinsichtlich ihres Informationsgehalts (Informationen zu Störungsorientierung und Aktivität) zwischen den Bundesländern stark schwankt, werden die Datensätze nicht deutschlandweit qualitativ angeglichen, sondern für jedes Bundesland wird der Datensatz mit der jeweils besten Qualität verwendet.

Im ersten Schritt zur Anwendung des Ausschlusskriteriums „aktive Störungszonen“ klassifiziert die BGE die ihr vorliegenden Störungszonen hinsichtlich ihrer Aktivität als aktiv, inaktiv oder unbekannt. Dabei werden die von den Geologischen Diensten als aktiv klassifizierten Störungen nach derzeitigem Arbeitsstand in der Regel als solche übernommen. Bei einem großen Teil der Datenlieferungen ist jedoch das Alter der Störungsaktivität unbekannt. Die BGE schlägt daher vor, weitere Störungen als aktiv zu klassifizieren, wenn diese in Gesteinseinheiten auftreten, die jünger als 34 Millionen Jahre sind. Dazu werden auf Grundlage der Geologischen Übersichtskarte Deutschlands (GÜK250) alle Störungen selektiert, die Gesteinseinheiten mit einem Maximalalter von 34 Millionen Jahren versetzen.

Nach der Auswahl aktiver Störungszonen muss die Breite des Ausschlussbereichs definiert werden, der sich beidseitig entlang der Störungszonen ergibt. Hinweise dazu sind in der Begründung zum StandAG zu finden (Bundestag-Drucksache 18/11398):

---

*Durch das Kriterium werden Gebiete ausgeschlossen, in denen geologisch aktive Störungszonen vorliegen, die die Sicherheit eines Endlagers beeinträchtigen können. Der erforderliche Sicherheitsabstand zu derartigen Störungszonen ist individuell abzuschätzen. Er beträgt in der Regel mindestens einen Kilometer.*

Quelle: Bundestag-Drucksache 18/11398, S. 68

---

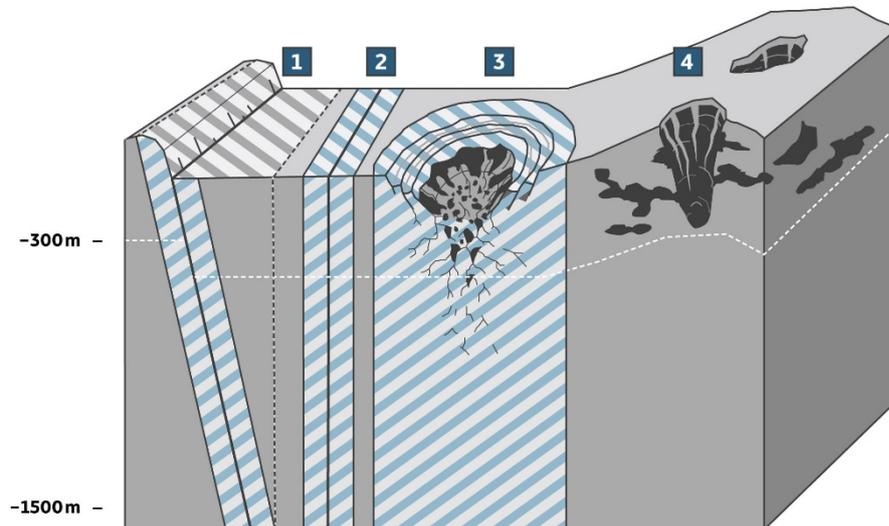
Ein solcher Sicherheitsabstand wird als Saum um eine Störungzone verstanden, die, bestehend aus einem Störungskern und einer Zerrüttungszone, selbst eine gewisse flächenhafte Ausdehnung hat. In der wissenschaftlichen Literatur wird die Breite von Zerrüttungszonen um einen Störungskern beschrieben. Diese 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 (Schritt 1, Phase 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 Störungzone zur Anwendung kommt. Die BGE schlägt vor, hierfür den in der Begründung des StandAG genannten Sicherheitsabstand von 1000 m als Saum um die Störungsspur zu verwenden. In den späteren Phasen des Standortauswahlverfahrens (Phasen 2 und 3) werden ggf. Ausdehnungen von Zerrüttungszonen einzelner Störungszonen individuell abgeschätzt. Dies kann zu einer Vergrößerung der Ausschlussbereiche im Laufe des weiteren Verfahrens führen.

Nach Auswahl eines pauschalen Sicherheitsabstands um die als aktiv klassifizierte Störungsspur wird das sich ergebende Volumen von der Geländeoberkante vertikal bis in 1500 m ausgeschlossen (Abb. 3). Ist die Raumlage der Störungsfläche bekannt, wird der Sicherheitsabstand parallel zur Störungsfläche angelegt und der resultierende Volumenkörper ausgeschlossen. Um diese dreidimensionale Information auf einer Karte ausweisen zu können, wird der Ausschlussraum entlang der Störungsfläche vertikal an die Erdoberfläche projiziert (Abb. 3).

Besonderheiten ergeben sich im Umgang mit Sockelstörungen und Scheitelstörungen. Erstere sind Störungen im Grundgebirge unterhalb von Salinarhorizonten, wie sie zum Beispiel im Norddeutschen Becken auftreten. Aufgrund der mechanischen Entkopplung zwischen Grundgebirge unterhalb und den Gesteinsformationen oberhalb von Salinarhorizonten, ist eine direkte Korrelation zwischen Deckgebirgsstörung und Sockelstörung schwierig (Brückner-Röhling et al., 2002). Die BGE schlägt daher vor, dass Sockelstörungen im jetzigen Verfahrensschritt, in dem keine Einzelfallprüfungen stattfinden, nicht zu einem Ausschluss von überlagernden Gebirgsbereichen führen.

Scheitelstörungen hingegen treten oberhalb einiger Salzstrukturen auf und sind auf dessen Wachstumsdynamik zurückzuführen, was im unmittelbar überlagernden Gebirge unter anderem zu Extension und Dachbereichsaufwölbung führen kann (Davison et al., 2000). Für den betroffenen Bereich im Deckgebirge einer Salzstruktur gilt daher das Ausschlusskriterium als erfüllt. Da sich aber Scheitelstörungen in der Regel auf das Deckgebirge beschränken und nicht die Integrität einer Salzstruktur beeinflussen, betrifft der Ausschluss nicht die Salzstruktur im Liegenden (unterhalb) der Scheitelstörungen.

Störungen mit unbekannter Aktivität werden nicht vom Verfahren ausgeschlossen. Für diese Störungszonen erfolgt eine detaillierte Untersuchung im weiteren Verlauf des Verfahrens, wenn diese in einer Standortregion liegen.



- |  |  |
|--|--|
| <p><b>1</b> Aktive Störungszone mit Information zur Raumlage</p> <p><b>2</b> Aktive Störungszone ohne Information zur Raumlage</p> <p><b>3</b> Impakt ereignis</p> <p><b>4</b> Erdfall</p> | <p> Ausschlussbereich (ausgeschlossener Sicherheitsabstand um die Störungsfläche)</p> <p> Projizierte Störungsfläche inklusive Sicherheitsabstand an die Erdoberfläche</p> |
|--|--|

Abb. 3: Ausschlussmethodik und Visualisierung für tektonische Störungen (Ziffern 1 und 2) und atektonische Vorgänge (Ziffern 3 und 4). Für atektonische Vorgänge mit Entstehungstiefen bzw. Einwirkungstiefen (Impakt) größer als 300 m erfolgt der Ausschluss und die Visualisierung analog zu den tektonischen Störungen.

Zu den atektonischen Vorgängen hat die BGE Angaben zu Erdfällen, Subrosionsgebieten, Karstgefährdungsgebieten, Massenbewegungen, Glazitektonik und Impakt ereignissen (Meteoritenkrater, z. B. Nördlinger Ries) erhalten. Diese werden entsprechend der Entstehungstiefe bzw. der Einwirkungstiefe (Impakt) mit „> 300 m“ bzw. „< 300 m“ oder als „unbekannt“ ausgewiesen. Für atektonische Vorgänge mit Entstehungs- bzw. Einwirkungstiefen (Impakt) größer als 300 m, erfolgt die Anwendung eines pauschalen Sicherheitsabstandes von 1000 m um das Ereignis und das anschließende Ausschlussverfahren analog zu den tektonischen Störungen (Abb. 3). Für atektonische Vorgänge mit Entstehungstiefen kleiner 300 m oder unbekannter Entstehungstiefe erfolgt kein Ausschluss. Die Relevanz der Entstehungstiefe bzw. Einwirkungstiefe (Impakt) ergibt sich aus der Minimalteufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches gemäß StandAG.

## Konsultation zur Anwendung des Ausschlusskriteriums

Gerne möchten wir die Anwendung des Ausschlusskriteriums „Aktive Störungszonen“ mit Ihnen diskutieren. Haben Sie Fragen oder Anregungen zum Verfahren oder Erkenntnisse, die uns bei der Anwendung helfen können? Teilen Sie uns diese mit.

Hier geht's zur Online-Konsultation: [www.forum-bge.de](http://www.forum-bge.de)

## Literaturverzeichnis

- Agemar, T., Hese, F., Moeck, I., Stober, I. 2017: Kriterienkatalog für die Erfassung tieferreichender Störungen und ihrer geothermischen Nutzbarkeit in Deutschland. Zeitschrift der deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 168, 285-300.
- 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. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hannover).
- Childs, C., Manzocchi, T., Walsh, J. J., Bonson, C. G., Nicol, A., Schöpfer, M. P. 2009: A geometric model of fault zone and fault rock thickness variations. Journal of Structural Geology, 31, 117-127.
- 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 152, 70-87.
- Davison, I., Alsop, I., Birch, P., Elders, C., Evans, N., Nicholson, H., Rorison, P., Wade, D., Woodward, J., Young, M. 2000: Geometry and late-stage structural evolution of Central Graben salt diapirs, North Sea. Marine and Petroleum Geology, 17, 499-522.
- 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, 389, 1-33.
- Drucksache des Deutschen Bundestages 18/11398 vom 07.03.2017: Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze.
- 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, 32, 1557-1575.
- Fossen, H. 2011: Structural Geology. Cambridge University Press, Cambridge.
- Frisch, W., Meschede, M. Blakey, R.C. 2010: Plate Tectonics: Continental Drift and Mountain Building. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG) vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2510) geändert worden ist.
- Murawski, H. & Meyer, W. 2004: Geologisches Wörterbuch. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Reinecker, J. & Schneider, G. 2002: Zur Neotektonik der Zollernalb: Der Hohenzollerngraben und die Albstadt-Erdbeben. Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins, N.F., 84, 391-417.

- Reicherter, K., Froitzheim, N., Jarosiriski, M., et al. 2008: Alpine tectonics north of the Alps. In: McCann, T. (ed.). *The Geology of Central Europe, Volume 2: Mesozoic and Cenozoic*. Geological Society, London. 1232-1285.
- Schumacher, M. E. 2002: Upper Rhine Graben: role of preexisting structures during rift evolution. *Tectonics*, 21, 6-17.
- Twiss, R. J. & Moores, E. M., 2007: *Structural Geology*. 2nd Edition, W.H. Freeman, New York.
- Ziegler, P. A. 1992: European Cenozoic rift system. *Geodynamics of rifting*, 1, 91-111.
- Ziegler, P. A., Schumacher, M. E., Dèzes, P., Van Wees, J. D., Cloetingh, S.A.P.L. 2004: Post-Variscan evolution of the lithosphere in the Rhine Graben area: constraints from subsidence modelling. *Geological Society, London, Special Publications*, 223, 289-317.
- Zulauf, G. 1993: Brittle deformation events at the western border of the Bohemian Massif (Germany). *Geologische Rundschau* 82, 489-504.