

Gliederung

1.KURZFASSUNG DES GUTACHTENS	2
2.EINLEITUNG.....	3
3.MÖGLICHE AUSWIRKUNG VON ERDBEBEN AUF EIN ENDLAGER	5
4.WELCHES VERFAHREN WÄRE GEEIGNET, DAS GEFÄHRDUNGSBILD, SCHÄDIGUNG DES VERSCHLOSSENEN ENDLAGERS DURCH ERDBEBEN ÜBER DEN ZEITRAUM VON 1 MILLION JAHRE' ZU QUANTIFIZIEREN?	7
5.WELCHE ROLLE KÖNNEN DIE ZONIERUNGSKARTEN DER DIN EN 1998-1/NA 2011-0 UND DIN EN 1998-1/NA:2018-10 – ENTWURF IN DER ERSTEN ETAPPE DER STANDORTAUSWAHL SPIELEN?	9
6.SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	11
ANHANG 1	13
ANHANG 2	15
ANHANG 3	19
ANHANG 4	24
ZITIERTE LITERATUR.....	27

1. Kurzfassung des Gutachtens

Das Umweltbundesamt (UBA) hat ein Gutachten zur Prüfung des aktuellen Standes des Ausschlusskriteriums „seismische Aktivität“ laut § 22 Abs. 2 Nr. 4 Standortauswahlgesetz (StandAG) in Auftrag gegeben (Projektnummer 144496), welches die Beantwortung der folgenden Frage beinhaltet:

Wie ist die Anwendung einer DIN-Norm (sowohl DIN EN 1998-1/NA 2011-01 als auch DIN EN 1998-1/NA:2018-10 – Entwurf), die für Hochbauten erstellt wurde, auf ein Endlager im Untergrund überhaupt zu bewerten? Ist die DIN-Norm eine angemessene Orientierung zur Gefährdungsabschätzung von Erdbeben auf ein geplantes Endlager im Untergrund oder sind Wellenausbreitung und daher Auswirkungen eines Erdbebens im Untergrund entscheidend unterschiedlich zu denen in einem Hochbau, sodass eine andere Grundlage zur Gefährdungsabschätzung nötig wäre?

Die folgenden Ausführungen und hier gelisteten Schlussfolgerungen beziehen sich auf die seismische Langzeitsicherheit eines Endlagers, also die Phase nach dem Verschluss bis ca. 1 Million Jahre.

Das einzig erhebliche Schadensbild für die Langzeitsicherheit eines Endlagers entsteht, wenn die Bruchfläche eines Erdbebens das Lager durchschlägt. Die Erschütterungen, die von Beben stammen, deren Bruchfläche das Lager nicht ‚durchschlägt‘ sind unerheblich. Die so beschriebene Gefahr ist aber nicht rein hypothetisch, sondern zumindest in Teilen der BRD ernst zu nehmen.

Keine der genannten Normen DIN EN 1998-1/NA 2011-01 und DIN EN 1998-1/NA:2018-10 – Entwurf, aber auch keine zukünftigen, die für Zwecke der Bauwerkssicherheit entwickelt wurden und werden sind geeignet, die seismische Gefährdung eines Endlagers wissenschaftlich fundiert zu charakterisieren. Weder die Wiederkehrperiode von 475 Jahren, die in der DIN-Norm zugrunde gelegt wird noch der Gefährdungsparameter (Bodenbewegung) sind geeignet, die Gefährdung eines Endlagers zu beschreiben. Die genannten DIN-Normen sind auch nicht geeignet als Proxy für die seismische Gefährdung der Langzeitsicherheit eines Endlagers zu dienen.

Das Ausschlusskriterium des StandAG § 22 Abs. 2 Nr. 4 ist nicht geeignet, Gebiete mit sehr hoher seismischer Gefährdung für ein Endlager wissenschaftlich rational auszuschließen.

Es ist prinzipiell möglich, die seismische Gefährdung der Langzeitsicherheit eines Endlagers für beliebige Standorte zu bestimmen. Die Datengrundlage ist weitgehend die gleiche wie sie für die Gefährdungskarten der DIN-Norm benutzt wird. Die Methode muss allerdings erst entwickelt werden. Dies ist nicht kurzfristig zu realisieren aber über den Zeitraum von Jahren vermutlich möglich.

Die daraus folgenden Empfehlungen sind:

Zurückstellung der Einbeziehung des StandAG § 22 Abs. 2 Nr. 4.

Entwicklung einer adäquaten Methode zur Quantifizierung der seismischen Gefährdung der Langzeitsicherheit eines Endlagers an beliebigen Standorten inklusive der Spezifikation von Ausschlusskriterien auf der Basis dieser Methode.

Anwendung des ‚neuen‘ Ausschlusskriteriums in der nächsten Phase der Standortsuche (Oberflächenerkundung).

Dem Sinn der gesetzlichen Regelung ist damit Rechnung getragen; die Durchführung der gesetzlichen Regelung auf eine wissenschaftliche Grundlage gestellt, lediglich die Wirksamkeit der Regelung verschoben.

2. Einleitung

Fragestellung

Das Umweltbundesamt (UBA) hat ein Gutachten zur Prüfung des aktuellen Standes des Ausschlusskriteriums „seismische Aktivität“ laut § 22 Abs. 2 Nr. 4 Standortauswahlgesetz in Auftrag gegeben (Projektnummer 144496), welches die Beantwortung der folgenden Frage beinhaltet:

Wie ist die Anwendung einer DIN-Norm (sowohl DIN EN 1998-1/NA 2011-01 als auch DIN EN 1998-1/NA:2018-10 – Entwurf), die für Hochbauten erstellt wurde, auf ein Endlager im Untergrund überhaupt zu bewerten? Ist die DIN-Norm eine angemessene Orientierung zur Gefährdungsabschätzung von Erdbeben auf ein geplantes Endlager im Untergrund oder sind Wellenausbreitung und daher Auswirkungen eines Erdbebens im Untergrund entscheidend unterschiedlich zu denen in einem Hochbau, sodass eine andere Grundlage zur Gefährdungsabschätzung nötig wäre?

Zur Beantwortung der Frage werden die Fakten und Überlegungen zu folgenden Punkten erläutert:

Mögliche Auswirkung von Erdbeben auf ein Endlager.

Welches Verfahren wäre geeignet, das Gefährdungsbild ‚Schädigung des verschlossenen Endlagers durch Erdbeben über den Zeitraum von 1 Million Jahre‘ zu erzeugen?

Was sagt die DIN EN 1998-1/NA 2011-0 in Hinblick auf die Langzeitsicherheit eines Endlagers aus?

Welche Rolle können die Zonierungskarten der DIN EN 1998-1/NA 2011-0 und DIN EN 1998-1/NA:2018-10 – Entwurf in der ersten Etappe der Standortauswahl spielen?

In den Anhängen werden folgende Themen adressiert:

Grobe Abschätzung der Wahrscheinlichkeit, dass ein Tiefenlager im Zeitraum von 1 Million Jahren wenigstens einmal von einem Erdbeben durchschlagen wird:

Allgemeine Bemerkungen zu Erdbeben: Tektonik, Wirkung und Schäden, Häufigkeit.

Erdbebenzonierung für DIN 4149.

Vergleich mit Bewertungsverfahren in anderen Ländern.

Gesetzliche Regelung

Das StandAG legt in § 22 fest:

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

(2) Die Ausschlusskriterien sind (hier nur das vierte und zweite Kriterium):

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

Unabhängig davon dürfen – als Kriterium 2 – keine aktiven Störungszonen im Bereich des Endlagers vorhanden sein. Eine Region ist auszuschließen, wenn

2. 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 aus-gedehnte 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.

Es ist wichtig beide Ausschlusskriterien zu betrachten, weil durch die Vermeidung aktiver Störungen ein Teil, möglicherweise ein wesentlicher Teil, der Erdbebengefährdung der Langzeitsicherheit eines Endlagers bereits eliminiert ist. Die Gefährdung der ‚restlichen‘ Seismizität muss mit Modellen beschrieben werden, wie sie in der ‚Probabilistic Seismic Hazard Analysis – PSHA‘ entwickelt wurde. Der Begriff ‚restlich‘ ist in Anführungszeichen gesetzt, weil nicht gesichert ist, dass der Teil der Seismizität der nicht mit bekannten, heute identifizierbaren aktiven Störungen assoziiert ist kleiner ist, klein ist.

Erdbebenzonen nach DIN EN 1998-1/NA 2011-01 und Gefährdung eines Endlagers

Die Erdbebenzonen > 1 legen die Gebiete fest bei denen Intensitäten > 7, bzw. horizontale Spitzenbeschleunigungen über 0.6 m/s² als Folge von Erdbeben in 50 Jahren mit einer Wahrscheinlichkeit von weniger als 10% mindestens einmal auftreten. Hochbauten müssen so ausgelegt werden, dass sie diesen Beschleunigungen standhalten, d.h. nicht ganz oder teilweise kollabieren. 10% in 50 Jahren entspricht einer Häufigkeit von 1/475 Jahren. In der Praxis ändert sich der Bemessungswert von 0.6 m/s² noch durch die lokalen Bodenbedingungen.

Weder der Bemessungswert noch die Häufigkeit von 1/475 Jahre haben eine direkte sinnfällige Beziehung zum Endlager: Gebäude, die während der Betriebsphase des Lagers benötigt werden und radioaktive Stoffe zeitweise lagern, müssen wesentlich besser konzipiert werden. Kernkraftwerke müssen i.d.R. für die Bodenbewegung ausgelegt werden, die mit der Häufigkeit 1/100.000 Jahre assoziiert ist. Nach dem Verschluss will man sicherstellen, dass das Lager über 1 Million Jahre hinweg von Erdbeben höchstens soweit geschädigt wird, dass keine erheblichen Wegsamkeiten für Radionukleide entstehen. Kriterien für diesen Punkt existieren heute noch nicht.

3.Mögliche Auswirkung von Erdbeben auf ein Endlager

Im Folgenden charakterisiere ich die Rolle von Erdbeben für ein Endlager (a) aus Sicht der verschiedenen Bauphasen des Endlagers (Oberflächenbauwerke, Zugangsbauwerke, operationelle Phase des Tunnelbaus, der Einlagerung, Verfüllung und Monitoring) bis zum endgültigen Verschluss und (b) aus der Perspektive der Langzeitsicherheit, also in der Nachverschlussphase. Daraus ergeben sich Konsequenzen für die Suche nach einem Endlager.

Vorverschlussphasen

Während der Bauphase des Lagers bis zum Verschluss, also über einen Zeitraum von ca. 100 Jahren können Erdbeben zu Schäden an den Oberflächenbauwerken, den Zugangsbauwerken (Schächte, Rampen) und den Lagertunneln oder -kavernen führen. Das kann durch die Bodenerschütterungen verursacht werden aber auch durch Setzungserscheinungen (Bodenverflüssigung), Versätzen längs Verwerfungen, an denen das Beben stattgefunden hat, indirekten Wirkungen wie Wassereinbruch und Feuer. Nachdem solche Phänomene nur durch sehr große Beben in der Nähe des Standortes erzeugt werden können ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich dergleichen in einem Zeitraum von 100 Jahren sehr klein. Unabhängig davon müssen aber Nuklearanlagen – in diesem Fall Zwischenlager, Konditionierungsanlagen etc. – so ausgelegt werden, dass kein radioaktives Material freigesetzt wird. Die einzelnen Komponenten des Lagers während der Bau- und Betriebsphase müssen – auf Grundlage einer seismischen Gefährdungsanalyse für die Komponenten – dann entsprechend sicher ausgelegt werden. Es wird sicherlich keine Rahmenbewilligung und/oder Baugenehmigung geben solange diese Aspekte

nicht gründlich untersucht wurden und in Sicherheitsmaßnahmen umgesetzt wurden. Gleichzeitig kann man – bevor solche quantitativen Untersuchungen getätigt wurden – davon ausgehen, dass in einer Region geringer Seismizität, wie sie in Deutschland vorherrscht und in gebührender Entfernung aktiver Verwerfungen (StandAG § 22 Abs. 2 Nr. 2) die denkbaren Gefährdungen und Risiken durch Erdbeben durch Ingenieur-Maßnahmen auf ein durch die Aufsichtsbehörden zu definierendes akzeptables Maß reduziert werden können. Aus den Gefährdungsanalysen können dann die Bemessungswerte für die Auslegung der Bauwerke und Einrichtungen vor Verschluss des Lagers abgeleitet werden.

Demzufolge spielen die Erdbeben und ihre Auswirkungen während der Bau- und Betriebsphase eines Tiefenlagers zwar eine Rolle: Die Bauwerke sind während dieser Phasen entsprechend auszulegen. Nachdem dies aber an jedem Standort möglich ist spielt das für die Standortauswahl keine Rolle.

Langzeitsicherheit

Nach der Verfüllung und dem Verschluss des Endlagers stellt die Bewegung im Erdinneren durch Erdbebenwellen keine Gefahr mehr dar. In Tiefen von mehreren hundert Metern können in solchen verfüllten Tunneln keine Schäden auftreten, die zum Bruch von Behältern führen und/oder Wegsamkeiten für radioaktives Material schaffen. Das einzige relevante Gefährdungsbild ist die Ausbildung eines Bruchs oder eines Bruchmusters, das durch das Erdbeben erzeugt wird. Wenn das Erdbeben und damit auch die Bruchausdehnungen groß genug ist können diese das Lager und den gesamten EG durchbrechen und damit eventuell radioaktives Material freisetzen (Bruch von Behältern) oder für wegen der Korrosion bereits freigesetztem Material Wegsamkeiten aus dem EG schaffen.

Aus Sicht der Langzeitsicherheit sind also ausschließlich Erdbeben von Bedeutung, deren Bruchsysteme das Lager selbst durchschlagen. Dabei ist der Zeitraum von 1 Million Jahre zu betrachten. Die Intensitäten oder Beschleunigungen sind unerheblich.

Zur Vervollständigung der Diskussion sei noch erwähnt, dass ein denkbares Schadensbild für ein Tiefenlager, das durch Erdbebenwellen erzeugt wird in der Verflüssigung des Füllmaterials der Lagerstollen bestehen könnte. Ich kenne keine diesbezüglichen Untersuchungen. Ein weiterer Aspekt ist, dass der Bau des Lagers (Tunnelvortrieb) zu induzierten Erdbeben führen kann. Auch dieser Aspekt ist standortspezifisch zu untersuchen. Beide Punkte spielen aber keine Rolle für die Standortauswahl.

Wieso kann ein Erdbeben das Lager nach Verschluss schädigen, wenn das Abstandsgebot von aktiven Störungen (§22) eingehalten wird?

Die BRD ist – tektonisch betrachtet – eine Region im Inneren der Eurasischen Platte, im Unterschied etwa zu mediterranen Regionen, die in der Kollisionszone der

Afrikanischen und Eurasischen Platte liegen. Die meisten und stärksten Beben finden an aktiven Plattenrändern statt, wo sich die Deformationen (z.B. durch Plattenkollision oder -subduktion) in Form der Erdbeben abspielen. Das Innere der Platten wird ebenfalls deformiert, aber erstens um eine Größenordnung oder mehr reduziert und zweitens zum großen Teil aseismisch. Die Folge davon ist eine viel kleiner Seismizität (=weniger Erdbeben pro Jahr über einer bestimmten Magnitude) und meist auch kleinere maximale Magnituden.

Während sich die Erdbeben an den Plattenrändern i.d.R. geologischen Verwerfungen zuordnen lassen, an denen die Deformationen lokalisiert sind gelingt das im Platteninneren nicht. Natürlich ereignen sich die wenigen Erdbeben dort auch an Verwerfungen, aber diese befinden sich oft innerhalb der Erdkruste, sind selten an der Oberfläche aufgeschlossen und damit geologisch unzugänglich. Erdbeben bis Magnitude 6 zeigen oft keinen Bruch an der Erdoberfläche. Zudem deformieren sich dokumentierte Störungen oft eher aseismisch. Man hat allerdings instrumentelle und historische Kataloge von Erdbebenaktivität, die zeigen, dass diese in abgrenzbaren Regionen verschiedene Eigenschaften (Häufigkeit, Verhältnis der Zahl großer zur Zahl kleiner Beben, maximale Magnitude) aufweisen. Daraus hat sich das Modell entwickelt, dass es identifizierbare Seismo-Tektonische Zonen (STZ) gibt, in denen die Seismizität unterscheidbare Eigenschaften zeigt, wo aber die Beben räumlich zufällig überall auftreten können, wengleich in einer festen Tiefe oder einem festen Tiefenintervall. Man nennt das flächenhaft Erdbebenquellen, siehe Beispiel in Abb. 1 wie sie für die probabilistische Gefährdungsrechnung in Deutschland benutzt werden (Grünthal et al., 2018)

Wenn die flächenhafte Abgrenzung einer STZ erfolgt ist, durch Abwägung ihrer geologischen Rolle und den Eigenschaften der beobachteten Erdbeben und anderer tektonischer Eigenschaften, kann man aus den beobachteten instrumentellen aber vorwiegend auch historischen Erdbeben die Seismizität durch eine Magnituden-Häufigkeits-Kurve charakterisieren, die auch Hypothesen zu den maximal möglichen Magnituden einschließt.

Der entscheidende Punkt hier ist, dass es zumindest in Inneren der Platten fragwürdig wäre, anzunehmen, dass nur an den bekannten geologischen Störungen größere (heißt hier Magnitude 6.0 und mehr) Erdbeben stattfinden können.

4. Welches Verfahren wäre geeignet, das Gefährdungsbild, Schädigung des verschlossenen Endlagers durch Erdbeben über den Zeitraum von 1 Million Jahre‘ zu quantifizieren?

Aus dem oben Gesagten ergibt sich, dass die Seismo-Tektonischen Zonen (STZ) und deren Seismizität eine Möglichkeit darstellen, die Gefährdung für die Langzeitsicherheit eines Endlagers zu analysieren. In schlichter Form, die nur Grundgedanken zeigt ist das im Anhang 1 beispielhaft erläutert. Befindet sich das Endlager in einer bestimmten STZ, kann man zumindest prinzipiell die

Wahrscheinlichkeit berechnen, dass das Lager von einem Beben im Nachweiszeitraum ‚tangiert‘ wird.

Abgesehen von den Parametern der Seismizität, die alle mit Unsicherheiten versehen sind, abgesehen davon, dass man ‚mehr‘ Geologie und Tektonik (z.B. das regionale Spannungsfeld) in den Modellen berücksichtigen kann ist die Festlegung der Seismo-Tektonischen Zonen selbst z.B. der Bundesrepublik und ihrer benachbarten Regionen keineswegs eindeutig, schon allein, weil der Begriff ‚Seismo-Tektonischen Zone‘ nicht scharf definiert ist. Es bestehen also meist mehrere Optionen der Festlegung der STZ.

Der entscheidende Punkt hier ist: Die STZ und ihre Seismizität bieten eine wissenschaftlich fundierte, klare Grundlage um die Gefährdung für die Langzeitsicherheit eines Endlagers zu quantifizieren. Entsprechende Gefährdungsanalysen und die Definition eines Wahrscheinlichkeitsniveaus, unter dem diese Gefährdung als unerheblich eingestuft wird, wären in der Lage bestimmte Regionen aus der Suche nach dem Endlager auszuschließen.

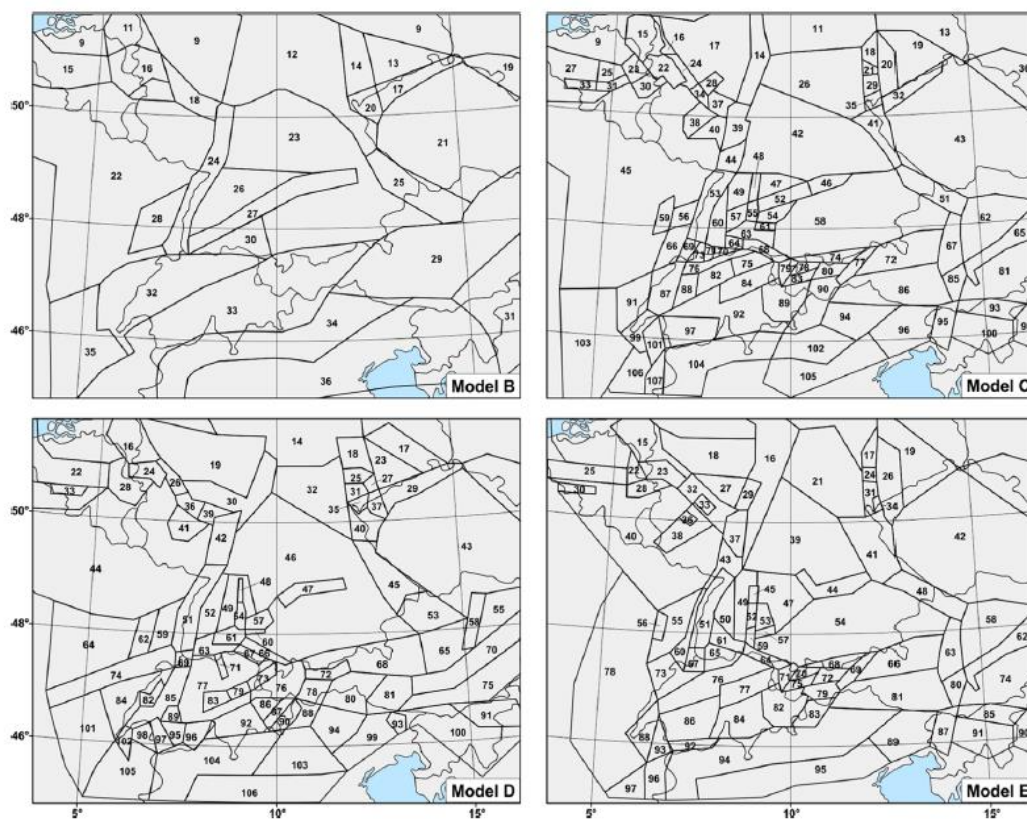


Abb. 1: Verschiedene Modelle der Seismo-Tektonischen Zonierung der BRD und deren Nachbarregionen wie sie von Grünthal et al. (2018) entwickelt wurden.

Allerdings kann man nicht sagen, dass diese Methodik wissenschaftlich durchdrungen ist. Probleme wie die Einbeziehung oder besser Nicht-Einbeziehung

der identifizierten Störungen nach StandAG §22 Abs.2 Nr.2, die Nicht-Eindeutigkeit der Festlegung der STZ, Behandlung benachbarter STZ, sowie die im Anhang 1 genannten Fragen können wohl nicht in sehr kurzer Zeit im Sinn einer wissenschaftlichen Belastbarkeit geklärt werden. Kurzfristig kann aus meiner Sicht die Gefährdung eines Endlagers in der ganzen BRD nicht etabliert werden, aber sicherlich im Zeitraum von wenigen Jahren.

5. Welche Rolle können die Zonierungskarten der DIN EN 1998-1/NA 2011-0 und DIN EN 1998-1/NA:2018-10 – Entwurf in der ersten Etappe der Standortauswahl spielen?

Der Sinn des Ausschluss-Kriteriums ‚Seismizität‘ in seiner jetzigen Formulierung im StandAG §22 Abs.2 Nr.4 kann nur darin bestehen, dass man die seismisch aktiveren Regionen ausschließen will und dafür ein Proxy benutzt, das (a) flächenhaft in Form der Karten der DIN4149 vorhanden ist und (b) zumindest indirekt ein Indikator der Seismizität ist.

Ich gehe im Folgenden davon aus, dass es – angesichts der geringen Seismizität der BRD - stets möglich ist Bauwerke, die vor dem Verschluss des Lagers benötigt werden so zu konzipieren, dass keine Radionuklid-Freisetzung zu befürchten ist, oder zumindest als extrem unwahrscheinlich ausgeschlossen werden kann. Solche Bauwerke sind: Oberflächenbauwerke, Zugangsbauwerke, Untergrundbauwerke, noch nicht verfüllte Tunnel und Kavernen. Die Erdbebensicherheit für diese Komponenten und damit für die Vorverschlussphase des Endlagers ist also de facto überall in der BRD sichergestellt, insbesondere auch dann, wenn man sich von aktiven Verwerfungen fernhalten muss.

Wenn Tunnel und Kavernen verfüllt sind bleibt als mögliches Schadensbild für die Nachverschlussphase in der die Radioaktivität noch nicht abgeklungen ist, ein (oder mehrere) Erdbeben das mit seiner Bruchfläche das Lager und den Einschlusswirksamen Gebirgsbereich ‚durchschlägt‘ und damit Wegsamkeiten für Radionuklide aus dem Einschlusswirksamen Gebirgsbereich schafft. Wenn sich das Erdbeben ereignet bevor die Behälter dysfunktional geworden sind (Korrosion) muss die Bruchfläche die Behälter schädigen, andernfalls ist bereits mit freigesetzten Radionukleiden im Nahfeld zu rechnen.

Die entscheidenden Fragen sind dann:

Besteht überhaupt die Chance, dass der eben geschilderte Schadensfall in einem Endlager der BRD auftritt?

Ist die Erdbebenzonierung für DIN4149 ein sinnvoller Proxy für diese Gefahr?

Kann man sagen, dass ein Nachweis der seismischen Langzeitsicherheit eines Endlagers in Erdbebenzonen > 1 aller Erwartung nach nicht geführt werden kann, während er in Zonen 0 und 1 geführt werden kann.

Man muss folgende Antworten geben:

Zu 1: In einem Zeitraum von 1 Million Jahre besteht in den seismisch aktiven Regionen der BRD eine Chance, dass es zu einem Beben kommt, dessen Bruchfläche ein Endlager ‚durchschlägt‘. Im Anhang 1 findet sich eine einfache Abschätzung für diese Gefährdung, die nur dazu dient, die Größenordnung anzudeuten mit welcher Rate ein Beben > Magnitude 6.5 auftritt, wobei unterstellt wird, dass ein solches Beben das Potenzial hat mit seiner Bruchfläche das Lager zu schädigen.

Zu 2: Die Gefährdung für ein Tiefenlager an einem Ort hängt ausschließlich von den lokalen Erdbeben ab; die Entfernungsskala für Nähe ist durch die Bruchlänge des Bebens gegeben, die bei Magnitude 6.5 ca. 18 km beträgt.

Die seismische Gefährdung an einem gegebenen Ort (= die Bodenbeschleunigung, die mit der Rate 1/475 Jahre dort auftritt) hängt nicht allein von der lokalen Seismizität ab. Zudem müsste zunächst die viel längere Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahre adressiert werden. Die Beschleunigungswerte, die mit 475 Jahren assoziiert sind können nicht herangezogen werden.

Die Bestimmung der Gefährdung an dem Ort erfordert die Einbeziehung aller Beben in einem recht weiten Bereich um den Ort herum, einem Radius von üblicherweise 200 bis 300 km. Die Gefährdung an diesem Ort ist also das agglomerierte Ergebnis der Einflüsse einer großen Region und nicht nur charakteristisch für die Erdbeben in unmittelbarer Umgebung des Ortes. Selbst wenn der tatsächliche Einflussbereich der nicht-lokalen Beben kleiner als 200 bis 300 km ist bleibt die Tatsache bestehen, dass für die seismischen Gefährdungskarten für die DIN-Norm viele Erdbeben eine Rolle spielen, die für die Gefährdung des Endlagers keine spielen.

Die Zonierung für DIN 4149 ist also kein wissenschaftlich begründbarer Proxy für die Gefährdung eines Endlagers. Das ist wohl auch der Grund weshalb Vorgaben wie sie der §22 Abs.2 Nr. 4 StandAG enthält, meiner Kenntnis nach international für die Standortauswahl keine Rolle spielen. Die einzige Ausnahme, wo die seismische Zonierung für die Bau-Normen in die Standortwahl für ein Endlager einzubeziehen ist findet sich in Kanada (siehe Anhang 4). Allerdings fungiert die Anforderung, dass der Standort in Zone 0 oder 1 liegen soll nicht als Ausschlusskriterium, sondern wird als ‚wünschenswert‘ bezeichnet.

Zu 3: Ich gehe aber davon aus, dass die Ausschlusskriterien mit der Absicht formuliert wurden, das in den Regionen, die mit Hilfe des Kriteriums auszuschließen sind ein Sicherheitsnachweis schwer oder gar nicht möglich wäre. Nachdem die seismische Zonierung für die DIN-Norm die Gefährdung für die Langzeitsicherheit eines Endlagers nicht darstellt und auch kein Proxy dafür ist besteht auch kein Grund zur Annahme, dass ein Nachweis der seismischen Langzeitsicherheit eines Endlagers in Erdbebenzonen > 1 aller Erwartung nach nicht geführt werden kann, während er in Zonen 0 und 1 geführt werden kann.

6. Schlussfolgerungen

Die gestellte Frage:

Ist die DIN-Norm eine angemessene Orientierung zur Gefährdungsabschätzung von Erdbeben auf ein geplantes Endlager im Untergrund oder sind Wellenausbreitung und daher Auswirkungen eines Erdbebens im Untergrund entscheidend unterschiedlich zu denen in einem Hochbau, sodass eine andere Grundlage zur Gefährdungsabschätzung nötig wäre?

Die Auswirkungen eines Bebens auf Hochbauten und ein Endlager sind sehr unterschiedlich. Hochbauten sind in Deutschland in erster Linie durch Bodenbewegung, die durch die Wellenausbreitung von der seismischen Quelle erfolgt gefährdet, während die Langzeitsicherheit eines Endlagers ausschließlich durch die Bruchfläche eines lokalen Erdbebens gefährdet werden kann. Diese seismische Gefährdung eines Endlagers ist im Abschnitt 3 diskutiert und als einzig relevante Gefährdung für die Langzeitsicherheit identifiziert. Für die Gefährdung von Hochbauten werden Bodenbewegungen mit Wiederkehrperioden von 475 Jahren betrachtet. Die relevanten Wiederkehrperioden für das Gefährdungsbild für Endlager sind wegen des langen Nachweiszeitraumes (1 Million Jahre) und der Art der Gefährdung um Größenordnungen höher.

Eine naheliegende Möglichkeit diese Gefährdung eines Endlagers abzuschätzen wird im Gutachten skizziert und begründet (Abschnitt 4 und Anhang 1). Sie unterscheidet sich zwar signifikant von der Gefährdungsrechnung für die DIN-Norm, enthält aber ganz ähnliche Elemente und beruht auf den gleichen Daten wie die Gefährdungsrechnungen für die DIN-Norm.

Gleichzeitig ist aber festzustellen, dass es zurzeit kein allgemein wissenschaftlich akzeptiertes Verfahren gibt, die seismische Gefährdung für ein Endlager an beliebigen Standorten abzuschätzen. Nachdem ein solches Verfahren wesentlich auf die gleichen Daten zugreifen würde wie die Gefährdungsrechnungen für die DIN-Norm ist die Entwicklung einer solchen Methode in wenigen Jahren aber vermutlich möglich.

Die vereinfachten Betrachtungen des Anhangs 1 indizieren den Umstand, dass Endlager durchaus von Erdbeben gefährdet werden können, zumindest in den aktiveren Regionen der BRD.

Obgleich man die seismische Langzeitgefährdung eines Endlagers ganz unterschiedlich zu dem von Hochbauten berechnen muss kann man fragen, inwieweit die Zonierung der DIN-Norm als Proxy für die Gefährdung eines Endlagers dienen kann. Auch hier fällt die Antwort eher negativ aus, aus den Gründen, die im Abschnitt 5 diskutiert werden.

Der Umstand, dass in allen anderen Ländern – soweit mir bekannt - die Seismizität zwar typischerweise bei der Standortwahl betrachtet wird, aber nirgends als Ausschlusskriterium benutzt wird (Anhang 4) zeigt, dass das Verfahren des §22 Abs.

2 Nr.4 StandAG zumindest unüblich ist. In Kanada wird zwar die seismische Zonierung der Bau-Norm benutzt, aber nicht als Ausschlusskriterium.

Die Zonierungen für die Bau-Norm haben sich im Laufe der Zeit geändert, weil sich die Datenlage verändert hat (bessere Einschätzung historischer Beben, bessere Abschätzung der Wellenausbreitungseffekte, etc.) und damit die Gefährdungskarten. Die Karten zur DIN EN 1998-1/NA:2011-01 und die DIN EN 1998-1/NA:201811-0 unterscheiden sich in mehrfacher Hinsicht. Für die DIN EN 1998-1/NA:2018-10-Entwurf müsste man zunächst ein Ausschlusskriterium definieren, um sie überhaupt im Sinne des §22 Abs.2 Nr.4 StandAG anwenden zu können. Eine nähere Diskussion scheint aber müßig, weil beide Karten für die Anwendung auf die Langzeitsicherheit des Endlagers ungeeignet sind und auch zukünftige Karten, die die Bodenerschütterungen mit einer Wiederkehrperiode von 475 Jahre zum Inhalt haben ungeeignet bleiben.

Als Empfehlungen, die aber nicht detailliert diskutiert werden, weil sie kein Gegenstand der Frage sind, für die das Gutachten angefordert wurde scheinen nahezuliegen:

Zurückstellung der Einbeziehung des StandAG § 22 Abs. 2 Nr. 4.

Entwicklung einer adäquaten Methode zur Quantifizierung der seismischen Gefährdung der Langzeitsicherheit eines Endlagers an beliebigen Standorten inklusive der Spezifikation von Ausschlusskriterien auf der Basis dieser Methode.

Anwendung des ‚neuen‘ Ausschlusskriteriums in der nächsten Phase der Standortsuche (Oberflächenerkundung).

Dem Sinn der gesetzlichen Regelung ist damit Rechnung getragen; die Durchführung der gesetzlichen Regelung auf eine wissenschaftliche Grundlage gestellt, lediglich die Wirksamkeit der Regelung verschoben.

Anhang 1

Grobe Abschätzung der Wahrscheinlichkeit, dass ein Tiefenlager im Zeitraum von 1 Million Jahren wenigstens einmal von einem Erdbeben durchschlagen wird

Dazu mache ich eine Reihe von sehr vereinfachenden Annahmen:

Ab Magnitude 6.5 reichen die Bruchflächen der Erdbeben so nahe an die Erdoberfläche, dass sie ein Endlager von ca. 5 km² Fläche durchschlagen. Bei kreisförmiger Anordnung entspricht das einem Durchmesser von ca. 2.4 km.

In einer gegebenen Seismo-Tektonischen Zone (STZ) ereignen sich die Beben räumlich zufällig verteilt in der Region. Implizit nehme ich eine fixe Tiefenlage für die Hypozentren an. Als Beispiel nehme ich Daten aus Burkhard und Grünthal (2009) und betrachte die Seismo-Tektonischen Zone des Rheingrabens (RG).

Die Länge der Bruchfläche eines Bebens mit $m=6.5$ ist ca. 18 km. Die Beben erfolgen an vertikalen Bruchflächen, die wesentlich dem Streichen der Rheingrabens folgen.

Ereignen sich die Beben in einer Fläche von $(18 \text{ km} + 1.2 \text{ km}) \times 2.4 \text{ km} = 46 \text{ km}^2$ in und um das Lager so kann der Bruch durch das Lager gehen. Diese Fläche nenne ich Ereignisfläche.

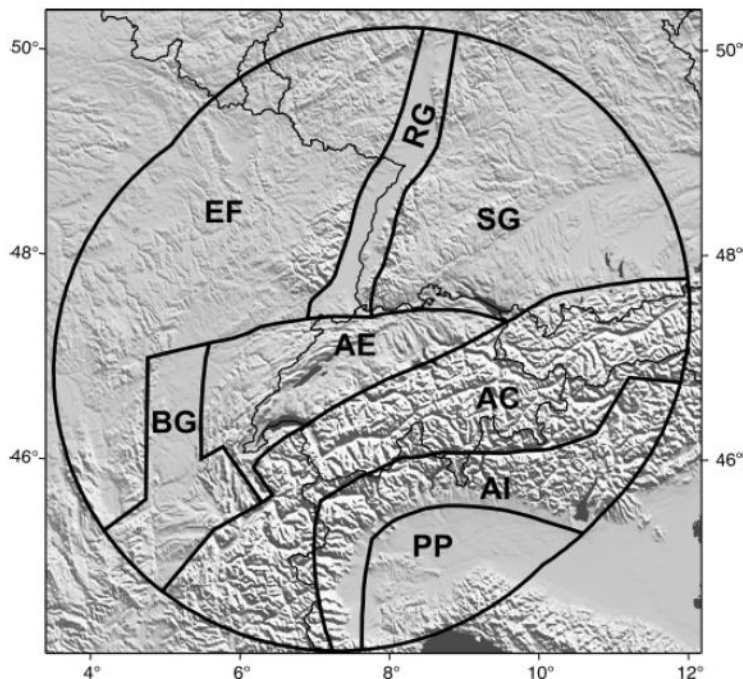


Abb. A1: Zonierung (grob) aus Burkhard und Grünthal (2009) für die Ermittlung der seismischen Gefährdung von KKW's in der Schweiz.

Mit der jährlichen Rate der Beben über 6.5, skaliert mit der Fläche der Seismo-Tektonischen Zone und multipliziert mit der Ereignisfläche ergibt sich die jährliche Rate, dass das Lager ‚tangiert‘ wird und damit ein Schadensfall eintreten kann.

Für die Region des Rheingrabens (RG) mit ca. 13,500 km² in der Abb. A1 werden die Rate und der b-Wert wie folgt gegeben

$$v(m \geq 2.3) = 2.9 \text{ yr}^{-1} \quad b = 0.86$$

In der gesamten STZ ereignen sich etwa 3 Beben mit Magnituden von 2.3 oder mehr pro Jahr. Mit Hilfe der üblichen Magnituden-Häufigkeits-Beziehung (Gutenberg/Richter) ergibt sich die Rate der Beben mit $m \geq 6.5$

$$v(m \geq 6.5) = v(m \geq 2.3) \cdot 10^{-0.86(6.5-2.3)} = 7 \cdot 10^{-4} \text{ yr}^{-1}$$

In der gesamten STZ ereignet sich im langjährigen Mittel ein Erdbeben $m \geq 6.5$ etwa alle 1,400 Jahre. Die Rate für $m \geq 6.5$ muss man noch mit dem Verhältnis der Ereignisfläche zur Fläche der STZ ($46/13,500=0.0034$) multiplizieren und erhält als Rate, dass

Damit erhält man die Flächenrate für Beben über $m = 6.5$ als Rate einer möglichen Schädigung des Lagers

$$\lambda = v(m \geq 6.5) \cdot 0.0034 = 2.4 \cdot 10^{-6} \text{ yr}^{-1}$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass das Lager während einer Million Jahre wenigstens einmal ‚tangiert‘ wird ist dann mit der Annahme einer Poisson-Verteilung der Erdbebenereignisse ca. 90%.

Zwei Punkte gilt es hier zu beachten:

Erstens: Viele der hier benutzten einfachen Annahmen können verfeinert werden, z.B. die Annahme über die Bruchflächen.

Zweitens: Die Annahme der räumlichen Zufallsverteilung auch großer Erdbeben in einer Seismo-Tektonischen Zone könnte durch bessere geologische Kenntnisse verfeinert werden, was zu einem anderen Modell der Erdbebenherde führen würde. Das macht zurzeit etwa die Nagra in der Nordschweiz, indem sie annimmt, dass Beben sich nur an in der 3D-Seismik kartierten mesozoischen Störungen ereignen können.

Drittens: Auch wenn ein Bruch, als Folge eines Erdbebens durch das Lager geht ist das Austreten radioaktiven Materials aus dem Einschlusswirksamen Gebirgsbereich nicht zwangsläufig die Folge. Es kommt also darauf an, aus der Gefährdung das Risiko zu ermitteln, dass wesentliche Schutzziele – in diesem Fall eine Belastung der Umwelt durch zu hohe Dosen radioaktiver Strahlung – nicht eingehalten werden können.

Anhang 2

Allgemeine Bemerkungen zu Erdbeben: Tektonik, Wirkung und Schäden, Häufigkeit

(das Meiste des Folgenden ist entnommen aus www.dkkv.org/de/erdbeben)

Definition von tektonischen Erdbeben

Ein tektonisches Erdbeben ist ein schneller Bruchvorgang, meist in den oberen 30 km der Erde, bei dem sich durch tektonische Bewegungen akkumulierte Spannung löst, auf der Bruchfläche die Massen gegeneinander versetzt und elastische Wellen abgestrahlt werden. Während der Aufbau der Spannungen wegen der langsamen geologischen Bewegungen Jahrhunderte bis Jahrtausende dauern kann findet der Abbau (= das Erdbeben) in Sekunden bis Minuten statt. Mehr als 90 % der Erdbeben weltweit ereignen sich in Gebieten, in denen tektonische Platten aneinandergrenzen und sich gegeneinander bewegen. Zu diesen Regionen gehört Deutschland nicht. Es befindet sich im Inneren der Eurasischen Platte und ist demzufolge durch eine – etwa im Vergleich zu Plattenrandregionen von Italien und Griechenland - geringe bis mittlere Seismizität gekennzeichnet. Zudem bauen sich tektonische Spannungen weniger durch Erdbeben als durch langsames Kriechen ab.

Bei großen Beben wird längs des Bruchs die Erdoberfläche um Beträge im Meterbereich schlagartig versetzt. Erdbeben strahlen elastische Energie ab, die als Bodenerschütterungen wahrgenommen wird, die Sekunden (bei kleinen) bis Minuten (bei großen Beben) andauern. Die Wellenbewegungen können ‚Nebenwirkungen‘ haben: Sie können Hangrutschungen auslösen und in gesättigten Sandböden zur Verflüssigung des eigentlich festen Untergrundes führen. Größere Erdbeben werden immer von Nachbeben begleitet, die manchmal jahrelang anhalten können. Deren Magnituden sind zwar mindesten eine Größenordnung kleiner als die des Hauptbebens können aber dennoch zu weiteren Schäden und zur Verbreitung von Angst führen.

Nicht-tektonische Erdbeben sind Einsturzbeben wie sie in Karst- und Bergbaugebieten beobachtet werden. Alle menschlichen Aktivitäten, die die Spannungsverhältnisse im Untergrund ändern haben das Potenzial, Erdbeben zu induzieren: Dazu zählt der schon genannte Bergbau, das Aufstauen von Seen, das Verpressen von Flüssigkeiten im Untergrund mit hohen Drücken (petrothermale Geothermie, Fracking, Brauchwasserentsorgung), Flutung von alten Bergwerken, Gas- und Ölextraktion aus Reservoirs, etc.

Schäden durch Erdbeben

Die meisten Schäden entstehen durch die Wirkung der Bodenerschütterungen an Gebäuden, die dafür nicht ausgelegt sind. Sie können zu irreversiblen Deformationen von tragenden Teilen der Konstruktion führen und letztlich auch zum Einsturz eines Teils oder des ganzen Gebäudes führen. Die Wirkung der Erschütterungen ist für Bauwerke untertage im Vergleich zu Oberflächenbauwerken geringer.

Große Beben, die eine Bruchlinie an der Erdoberfläche erzeugen, an denen die Erde um mehrere Meter versetzt wird zeigen längs der Bruchs, starke Zerstörungen, weil

die meisten Bauwerke (Brücken, Dämme, Gebäude, Straßen, Schienen, etc.) dem nicht gewachsen sind. Solche Brüche können, wenn sie Tunnel oder andere untertägige Bauwerke oder Infrastruktureinrichtungen durchschlagen erhebliche Schäden nach sich ziehen, die sich meist aber auf ca. 200 m um die Bruchfläche herum beschränken.

Die Schwingungen, die sich vom Erdbebenherd ausbreiten können zu sogenannten sekundären Schäden führen. Gesättigte, meist sandige flache Schichten, typisch zu finden an Küsten oder Flussläufen verwandeln sich in Flüssigkeiten, verlieren jede Festigkeit, und Brückenpfeiler rutschen zur Seite und ganze Gebäude kippen auf dem instabilen gewordenen Untergrund.

Die Schwingungen können Hänge, die eigentlich stabil sind zum Gleiten bringen, sodass darauf stehende Bauten, wenn sie nicht sehr tief gegründet sind, wegrutschen und Bauten, auf die der Hangschutt rutscht zerstört werden.

Große Erdbeben können auch zu hydrologischen Veränderungen führen, wie Absenkung des Wasserspiegels.

Quantifizierung von Erdbeben und Wirkungen

Es werden zur Beschreibung der Stärke eines Erdbebens zwei Arten von Skalen in der Seismologie (Erdbebenforschung) unterschieden, die oft miteinander verwechselt werden:

Die Magnitude ist ein Maß für die von einem Erdbeben abgestrahlte Energie. Eine Magnitude 5 entspricht etwa der freigesetzten Energie der Hiroshima-Bombe (13 kt TNT). Ein Erdbeben mit Magnitude 6,5 setzt 6-mal mehr Energie frei als bei Magnitude 6; eines mit Magnitude 7 30-mal mehr. Die Bodenerschütterung (maximale horizontale Schwinggeschwindigkeit) an einem Ort hängt von der Entfernung zum Erdbebenherd ab, aber auch von den Ausbreitungsbedingungen der elastischen Wellen und den lokalen Untergrundbedingungen. Maximale Schwinggeschwindigkeiten verdoppeln sich in gegebener Entfernung, wenn die Magnitude um 0,5 steigt. Das stärkste gemessene Erdbeben seit 1900 hatte eine Magnitude von 9,5 (Chile, 1960).

In einer 12-stufigen Intensitätsskala werden die Auswirkungen der Erschütterungen an einem Ort beschrieben, die subjektiv von Menschen wahrgenommen und beobachtet werden. Angegeben wird die Intensität in römischen Zahlen und bezieht sich auf die lokalen Auswirkungen. In der Europäischen Union findet die Europäische Makroseismische Skala (EMS98) Verwendung. Vergleichbar ist diese Erdbebenintensitätsskala mit der Windstärkeskala nach Beaufort, die auch zwölf Stufen aufweist. Jedes Erdbeben hat somit eine Magnitude und eine maximale Intensität – meist im Epizentrum des Bebens. Mit wachsender Entfernung vom Epizentrum wird die Intensität – und damit die Schäden – geringer.

Die Intensität ist ein Schadensmaß, welches aber schwer in konstruktiven Berechnungen einbezogen werden kann. Erdbebeningenieure benötigen die horizontale maximale Bodenbeschleunigung an einem Standort, um Gebäude bemessen zu können. Mit der effektiven Masse des Gebäudes multipliziert erhält

man damit die maximale Kraft, die horizontal auf ein Gebäude während eines Erdbebens wirkt und es bei mangelnder Widerstandsfähigkeit schädigt und sogar zum Einsturz bringen kann.

Nun wäre es schön, wenn man für einen gegebenen Standort die dort maximal auftretende Beschleunigung prognostizieren könnte. Das ist aber nicht der Fall, weil Erdbeben sowohl räumlich wie auch zeitlich eher zufällig auftreten. In aktiven Plattenrandgebieten gelingt es häufig insbesondere große Erdbeben klar mit bekannten und kartierten geologischen Störungen zu korrelieren. Im Platteninneren gelingt das in der Regel nicht. Man geht immer noch davon aus, dass Erdbeben längs geologischer Störungen stattfinden, die aber an der Oberfläche oder in geophysikalischen Erkundungen nicht identifiziert werden können und darüber hinaus sich eher diffus in bestimmte Regionen anhäufen. Diese nennt man Seismo-Tektonische Zonen. In diesen Gebieten treten die Erdbeben dann räumlich zufällig verteilt auf. Diese Zonen können sich hinsichtlich der Zahl der Beben und der maximal zu vermutenden Magnituden markant unterscheiden.

Darüber hinaus kann die von einem bestimmten Beben in gegebener Entfernung erzeugte Beschleunigung auch nur mit erheblichen Fehlergrenzen prognostiziert werden, sodass auch die Entfernungsabhängigkeit in der Gefährdungsrechnung probabilistisch gehandhabt wird.

Es gelingt nun aber mit Methoden und Modellen, die nicht weiter beschrieben werden, für einen gegebenen Ort, erstens die Häufigkeit zu berechnen mit der ein bestimmter Wert der Beschleunigung (z.B. 0.6 m/s²) im langjährigen Mittel (z.B. 100.000 Jahre) erreicht oder überschritten wird: Z.B. 1/475 Jahre. Den Kehrwert der Häufigkeit nennt man Wiederkehrperiode; im Beispiel also 475 Jahre. Der zeitliche Abstand zwischen den Ereignissen (Beschleunigung an diesem Ort ≥ 0.6 m/s²) ist selbst zufallsverteilt mit möglichen Zeitabständen unter 475 Jahren und möglichen Zeitabständen über 475 Jahren. Keinesfalls würde man die Ereignisse (Beschleunigung an diesem Ort ≥ 0.6 m/s²) regelmäßig alle 475 Jahre beobachten. Nur im Mittel ergeben sich 475 Jahre. Das übliche und wohlbegründete Modell für die Häufigkeit einer bestimmten Zahl von Ereignissen in einem vorgegebenen Zeitraum (z.B. 50 Jahre als typische Nutzungsdauer eines Bauwerkes) ist die Poisson-Verteilung. Wenn die Häufigkeit $H(a)$ oder Wiederkehrperiode $T(a) = 1/H(a)$ für das Erreichen oder Überschreiten einer bestimmten Beschleunigung a an einem Ort bekannt ist, dann ist die Wahrscheinlichkeit in einem Bemessungszeitraum T_B n solche Ereignisse zu beobachten

$$P(a, n, T_B) = \frac{(T_B/T(a))^n}{n!} \exp\left(-\frac{T_B}{T(a)}\right)$$

Die Wahrscheinlichkeit kein solches Ereignis in T_B zu erleben ist dann ($n=0$)

$$P(a, n = 0, T_B) = \exp\left(-\frac{T_B}{T(a)}\right)$$

und das Komplement dazu, die Wahrscheinlichkeit wenigstens 1 Ereignis in T_B zu erleben ist

$$P(a, n \geq 1, T_B) = 1 - \exp\left(-\frac{T_B}{T(a)}\right)$$

Anhang 3

Erdbebenzonierung für DIN 4149

Die ersten seismischen Zonierungskarten für Zwecke einer Bau-Norm für Erdbeben der BRD wurden auf der Basis beobachteter Intensitäten erstellt (DIN 4149 1955; DIN 4149 1957; DIN 4149 1981). Nach der Wiedervereinigung wurden die Karten auf ganz Deutschland erweitert (DIN 4149, 1992). Die erste probabilistische Gefährdungskarte – basierend auf seismischen Intensitäten - wurde von Grünthal und Bosse (1996) (Abb. A2) erarbeitet. Sie stellte die seismische Intensität dar, die mit 10% in 50 Jahren auftritt oder überschritten wird (entspricht einer Wiederkehrperiode von 475 Jahren). Die Karte wurde im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) erstellt. Sie ist die Grundlage der DIN EN 1998-1/NA:2011-01, deren Vorläuferversion die DIN 4149:2005-04 ist.

Wesentliche Schritte bei der Nutzung der Gefährdungskarte für die Norm war (1) eine Zonierung in 4 Zonen der Intensitäten (I) und (2) eine Zuordnung von horizontalen Spitzenbeschleunigungswerten (=Bemessungswert a_g) zu den Intensitäten bzw. Zonen (Abb. A3). Die Zonen wurden wie folgt definiert:

Zone 0: Intensität $I < 6.5$	keine Norm für Bauten
Zone 1: Intensität $6.5 < I < 7.0$	$a_g = 0.4 \text{ m/s}^2$
Zone 2: Intensität $7.0 < I < 7.5$	$a_g = 0.6 \text{ m/s}^2$
Zone 3: Intensität $I > 7.5$	$a_g = 0.8 \text{ m/s}^2$

Die Beschleunigungswerte, die für die tatsächliche Bemessung eines Gebäudes an einem gegebenen Standort benutzt werden erfordern weitere Daten, wie die Eigenschaften des tieferen und flacheren Untergrundes unter dem Bauwerk.

Die Zuordnung von Beschleunigungen zu Intensitäten ist sehr problematisch und wird in der neuen Norm (DIN EN 1998-1/NA:2018-10-Entwurf) vermieden, indem die Gefährdung direkt in Beschleunigungen berechnet wird. Die Gefährdungskarte der neuen Norm benutzt als Parameter auch keine horizontalen Spitzenbeschleunigungen mehr, sondern sogenannte Spektralwerte der Bodenbeschleunigung, genauer das Mittel aus den Perioden 0.1, 0.15 und 0.2 Sekunden (SRA) (Abb. A4)

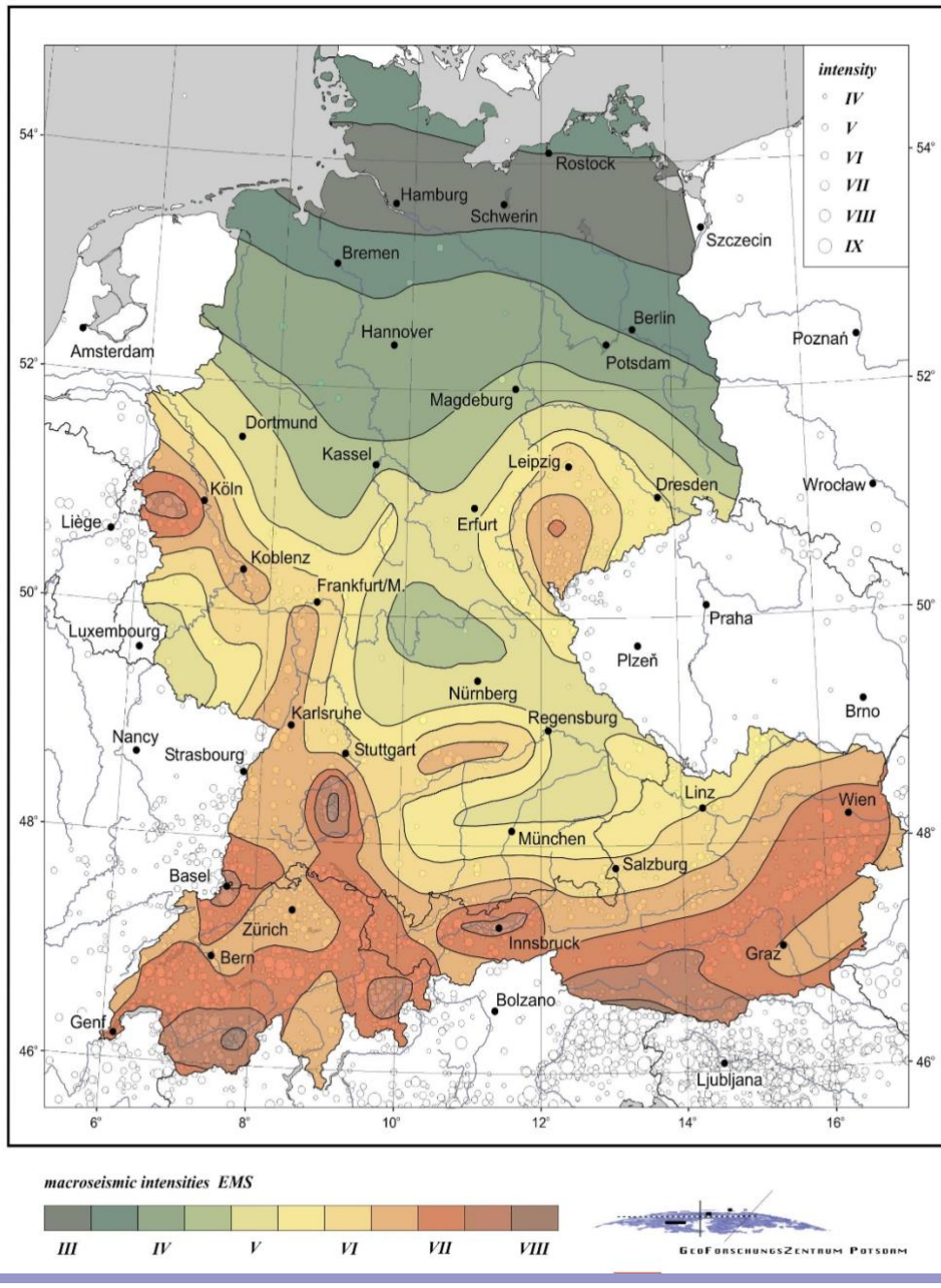
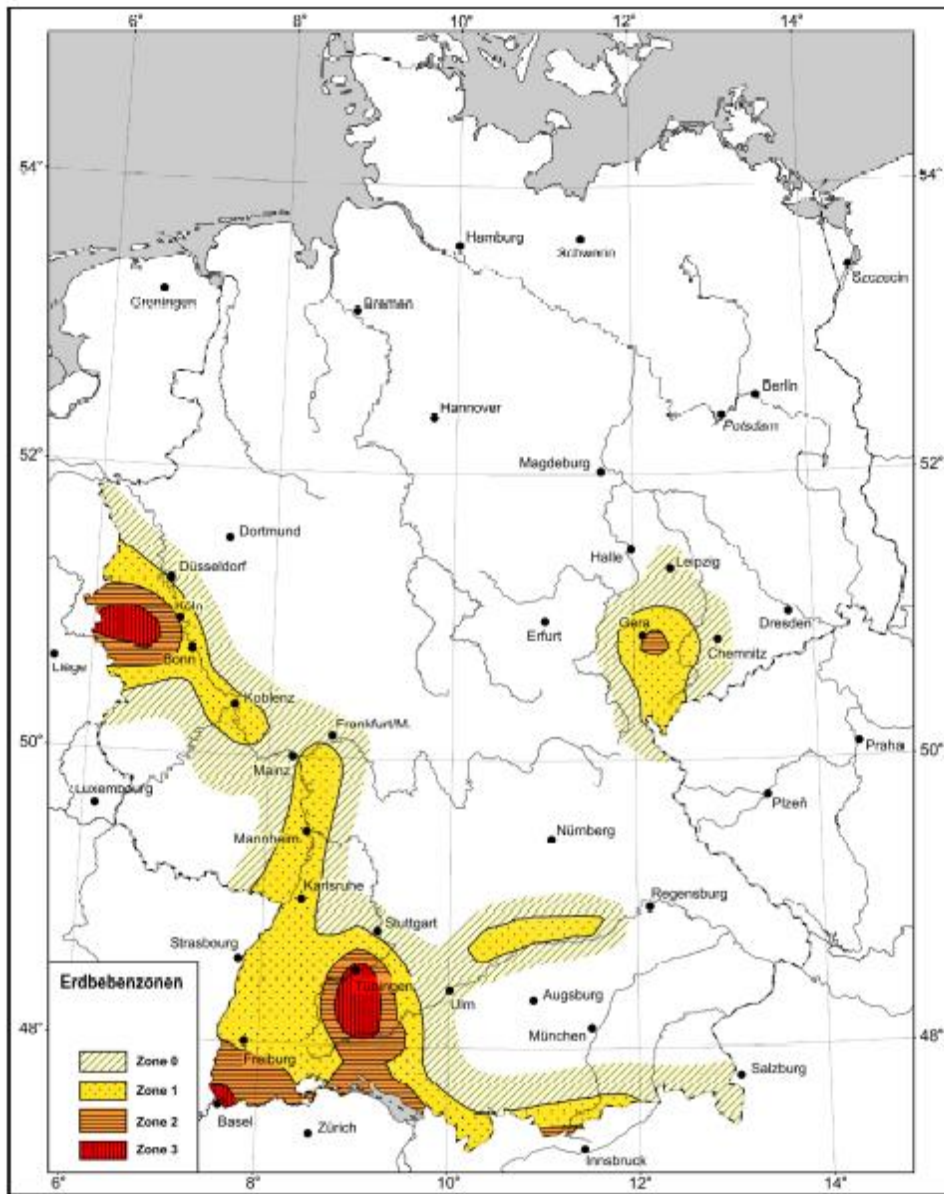


Abb. A2: Gefährdungskarte für Deutschland, Österreich, Schweiz in Intensitäten die mit 10% Wahrscheinlichkeit in 50 Jahren erreicht oder überschritten werden (Grünthal et al., 1998).



Erdbebenzonen in Deutschland

Abb. A3: Erdbeben-Zonierung für DIN EN 1998-1/NA:2011-01. Die Zone 0 erstreckt sich auch in das weiße Gebiet der BRD, ist aber hier nur für den Intensitätsbereich $6.0 < I < 6.5$ schraffiert markiert.

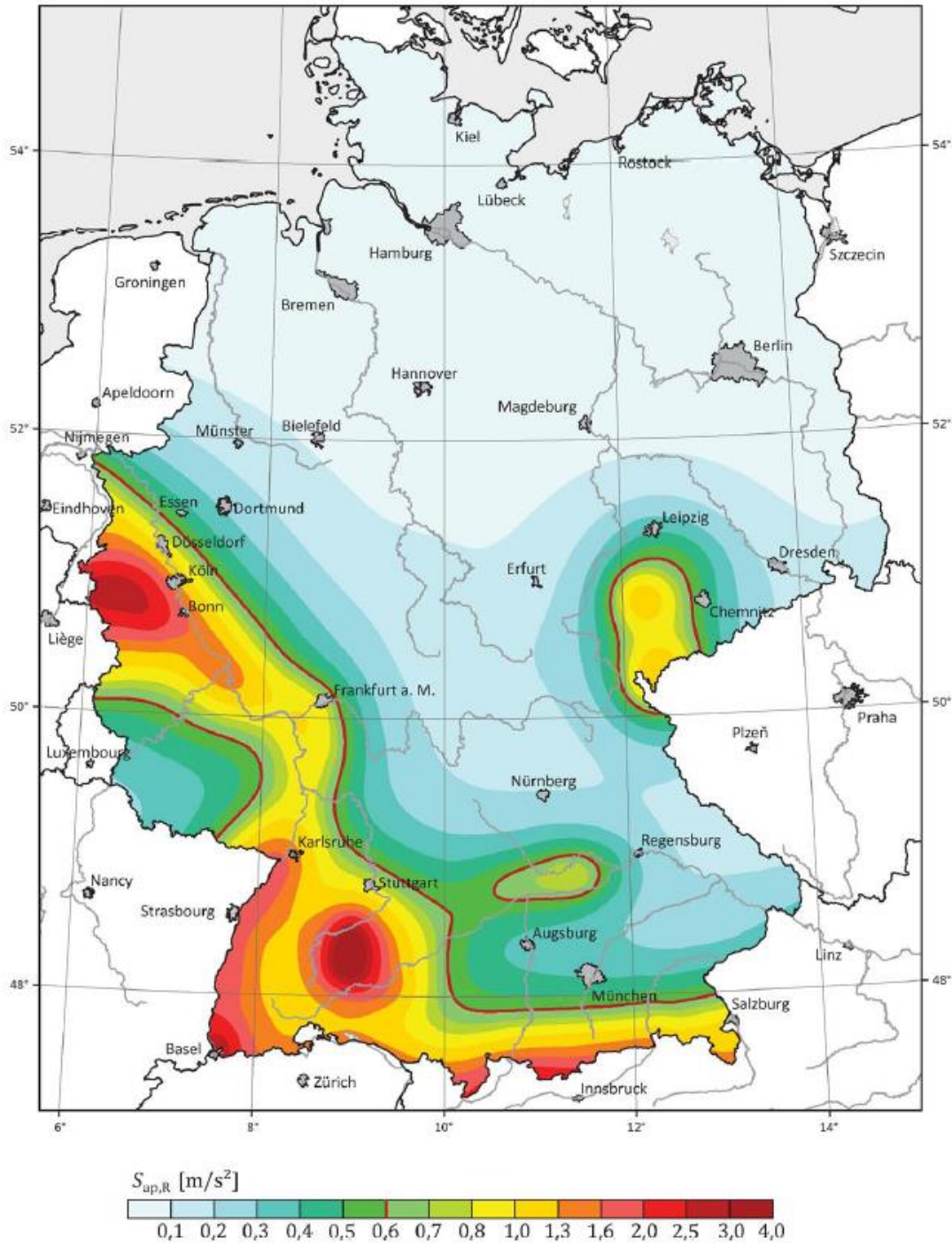


Abb. A4: Gefährdungskarte für DIN EN 1998-1/NA:2018-10-Entwurf, 475 Jahre Wiederkehrperiode, Mittel der Spektralwerte bei 0.1, 0.15, 0.2 Sekunden (SRA); die schwarze Linie stellt die Isolinie für 0.6 m/s^2 dar; aus Kaiser und Spiess (2020).

In der neuen Norm ist damit zu rechnen, dass es keine Zonierung mehr gibt, was auch eher dem internationalen Standard entspricht. Damit scheint die ganze Zonierungsidee des §22 Abs.2 Nr. 4 StandAG zu entfallen. Man könnte allerdings einen Beschleunigungswert definieren, z.B. 0.8 m/s^2 oder 1.0 m/s^2 sodass Regionen

in denen der Wert in der Gefährdungskarte darüber liegt dem Ausschlusskriterium unterliegen.

Das Hauptproblem beim Heranziehen der Gefährdungskarte aus der DIN 4149, egal in welcher Version, ist aber – wie an anderer Stelle des Gutachtens ausgeführt wird – der Umstand, dass diese Karten ungeeignet sind, die Langzeitgefährdung eines Endlagers zu beschreiben.

Weitere Informationen zum Vergleich der DIN EN 1998-1/NA:2011-01 und der DIN EN 1998-1/NA:2018-10-Entwurf finden sich in Kaiser und Spiess (2020)

Anhang 4

Vergleich mit Auswahlverfahren in anderen Ländern

Die folgenden Informationen basieren zum einen auf der Studie der Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS), Bork et al. (2001), die im Auftrag der Bundesanstalt für Strahlenschutz erstellt wurde. Die GRS-Studie betrachtet die Regelungen in den folgenden Ländern: Deutschland, Finnland, Frankreich, Kanada, Schweden, Schweiz, USA, sowie China, Großbritannien, Slowakei und Spanien.

Eine vergleichsweise neue Studie wurde von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) 2015 im Auftrag des BMWi erstellt: Abriss der Standortauswahl und Darstellung der angewandten geowissenschaftlichen Kriterien bei den Endlagerprojekten in den Ländern Schweiz, Frankreich, Schweden, Belgien und USA - Kurzstudie der BGR 2015.

Für die Bestimmungen in Schweden und der Schweiz habe ich auch neuere Informationen aus den laufenden Verfahren ergänzt.

Die Frage nach der tektonischen Stabilität ist in allen Standortregelungen enthalten. Das Vermeiden aktiver Verwerfungen wird überall verlangt. Allerdings wird ausschließlich in der BRD ein explizites Ausschlusskriterium, so wie heute im StandAG §22 fixiert ist erwogen. Das um ‚taucht‘ wohl erstmals in einer Studie der BGR (Bräuer et al., 1994) auf, genau in der Form (Ausschluss im Fall der Lage des Standorts in einer Erdbebenzone > 1) in der es der Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd, 2002), die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016) und letztlich der Gesetzgeber übernommen hat.

In allen anderen Ländern wird das Vorkommen von Erdbeben zum Teil explizit als ungünstige Bedingung genannt (z.B. USA) allerdings ohne Quantifizierung und insbesondere ohne Bezug zu Gefährdungskarten, die im Zug der Entwicklung von Bau-Normen entwickelt wurden. Die Regelung in Kanada (Environmental Protection Series, 1987) bezeichnet eine Lokation in einer Erdbebenzone 0 oder 1 als ‚wünschenswert‘. Hier findet sich also als einziges Beispiel – abgesehen von der BRD – ein Bezug zur seismischen Zonierung für Bau-Normen. Es ist allerdings kein Ausschlusskriterium.

Schweden

Die Aktiengesellschaft der vier KKW-Betreiber in Schweden, die SKB (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company) erstellte nach anfänglichen Untersuchungen seit 1977 im Zeitraum 1993 bis 2000 8 Machbarkeitsstudien in verschiedenen Regionen Schwedens. Eine Bedingung für weitere Studien, insbesondere Erkundungsbohrungen, war die Zustimmung der lokalen Bevölkerung zum Bau eines Endlagers. Kriterien an ein Lager wurden im SKB-Bericht TR-00-12 (2000) formuliert. Er enthält eine Reihe qualitativer als auch quantitativer Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen, allerdings keine bezüglich der Seismizität.

Das schwedische Tiefenlager für langlebigen Abfall soll in kristallinem Gestein in der Nähe des jetzigen Standortes des KKW Forsmark durch die SKB gebaut werden. Vorher war noch ein zweiter Standort (Laxemar) in der Diskussion, der aber wegen der deutlich höheren Dichte an Störungen im Kristallin und wegen geringer Wärmeleitfähigkeit als nachteilig gegenüber Forsmark eingestuft wurde. Das entsprechende Gesuch für Forsmark (License Application) wurde 2011 eingereicht. Die Prüfung führte 2016 zu weiteren Anforderungen, insbesondere sollte die Behälterintegrität hinsichtlich Korrosion und Scherbruchverhalten bei möglichen zukünftigen Erdbeben überzeugend nachgewiesen werden. Dieser Nachweis sollte 100.000 Jahre quantitativ erfassen, darüber hinaus reichende Zeiträume mehr qualitativ.

2019 reichte die SKB ein überarbeitetes Gesuch ein, zu dem seitens Regierung und Parlament eine baldige Entscheidung erwartet wird. Der Nachweis der Behälterintegrität von ca. 6.000 Kanistern erfolgte probabilistisch und lieferte für die Erdbeben eine 90%ige Wahrscheinlichkeit, dass in 1.000.000 Jahre kein einziger Behälter so geschert würde, dass Radioaktivität austreten kann.

Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass die geologisch dokumentierten Verwerfungen (insbesondere deren Dichte) und die Möglichkeit der Freisetzung radioaktiven Materials durch Schädigung der Barrieren durch Erdbeben eine erhebliche Rolle bei der Genehmigung eines schwedischen Tiefenlagers spielt. Allerdings spielte die Seismizität keine wesentliche Rolle bei der Suche nach einem Standort.

Schweiz

Der Sachplan geologische Tiefenlager (SGT) legt fest, wie in der Schweiz Standorte für geologische Tiefenlager radioaktiver Abfälle ausgewählt werden. Sachpläne sind ein Mittel der Raumplanung und organisieren die Zusammenarbeit zwischen Bund und Kantonen. Das Konzept zum Sachplan geologische Tiefenlager wurde vom Bundesamt für Energie mit weiteren Behörden und Organisationen entwickelt und 2008 vom Bundesrat genehmigt.

Die Herleitung, Beschreibung und Anwendung der Sicherheitstechnischen Kriterien für die Standortevaluation (ENSI, HSK 33/001, 2007) enthält als quantitatives Kriterium nur die maximale Dosis, die freigesetzt werden kann: 0,1 mSv/Jahr. Es werden allgemeine Grundsätze für die Lager (für schwach- und mittelaktive Stoffe, die keine Wärme produzieren – SMA und für langlebige wärmeproduzierende Stoff – HAA) formuliert und 13 Kriterien definiert, deren Erfüllung für ein sicheres Lager nachzuweisen sind, die aber alle nicht quantitativer Art sind. Weiterhin ist es eine regulatorische Anforderung, dass die Behälter mindestens 1.000 Jahre nicht soweit korrodieren, dass radioaktives Material freigesetzt werden kann. Die notwendigen Mindestanforderungen an geologische und bautechnische Parameter bleiben der Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) überlassen, werden allerdings von der Aufsichtsbehörde geprüft. Z.B. hat die Nagra in Etappe 1 Mindesttiefen für die Lager definiert um der negativen Wirkung der Erosion zu

entgehen und Maximaltiefen um die bautechnische Machbarkeit zu garantieren, d.h. ohne das Wirtsgestein in seiner Barriere-Eigenschaft zu sehr zu schädigen.

Es werden 3 Etappen definiert, die zunächst eine Auswahl von 6 möglichen Standorten (Etappe 1) ergab. In Etappe 2 folgten (a) eine Festlegung, dass sowohl SMA als auch HAA im Opalinuston positioniert werden müssen und (b) ein Ausschluss von 3 Standorten, die eindeutige Nachteile zeitigten. Etappe 3 soll schließlich zur Auswahl jeweils eines Standortes für das HAA und das SMA Lager führen. Mit der Einreichung des Rahmenbewilligungsgesuchs durch die Nagra wird 2024 gerechnet.

Im Rahmenbewilligungsgesuch der Nagra muss diese im Sicherheitsnachweis zeigen, dass die Erdbeben, die in den kommenden 100.000 Jahre für SMA und 1.000.000 Jahre für HAA zu keinen Konsequenzen führen, die das Dosiskriterium verletzt und/oder die Langzeitsicherheit wesentlich einschränkt. Für die Bauphase wird dabei auf gängige Vorschriften und Verfahren für Nukleareinrichtungen (KKWs, Zwischenlager, etc.) und den sicheren Bau von Tunneln und Schächten verwiesen. Für die Nachverschlussphase sind die Konzepte nicht völlig klar und nicht unumstritten.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass in der Schweiz, abgesehen vom Dosiskriterium und der Dauer der Behälterintegrität keine quantitativen Mindestanforderungen an geologische Parameter formuliert werden. Das bleibt der Nagra überlassen, obgleich in den Aufsichtsdokumenten durchaus gesagt wird, was bei der Auswahl verschiedener Standorte als vorteilhaft gilt (z.B: eine größere Mächtigkeit des Wirtsgesteins). Hinsichtlich der Erdbebensicherheit gibt es keine Vorgaben für die Suche der Lager. Letztlich muss die Nagra erst im Rahmenbewilligungsgesuch am Ende der Etappe 3 nachweisen, dass an den von ihr vorgeschlagenen Standorten die Seismizität keine sicherheitsrelevanten Probleme für die Lager darstellt.

<https://www.ensi.ch/de/aufsicht/entsorgung/geologische-tiefenlager/das-sachplanverfahren/>

https://www.ensi.ch/fr/wp-content/uploads/sites/4/2012/05/ensi_33-001_sachplangeologischetiefenlager_herleitungbeschreibungundanwendungdersicherheitskriterienfuerdiestandortevaluation.pdf

Zitierte Literatur

AKend, Auswahlverfahren für Endlagerstandorte Empfehlungen des AkEnd, https://www.bundestag.de/endlager-archiv/blob/281906/c1fb3860506631de51b9f1f689b7664c/kmat_01_akend-data.pdf, 2002.

Bork M., Kindt A., Nierste G., Walterscheidt K.-H., Zusammenstellung internationaler Kriterien zur Bewertung und Auswahl von Standorten für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen, GRS - A – 2834, 2001.

Bräuer V. et al., Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Regionen in nichtsalinaren Formationen, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) Hannover, 1994.

Burkhard M. & Grünthal G., Seismic source zone characterization for the seismic hazard assessment project PEGASOS by the Expert Group 2 (EG1b), Swiss J. Geosci. 102, 149–188, 2009.

DIN EN 1998-1/NA:2011-01 (2011) National Annex—Nationally determined parameters—Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance—part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, 2011.

ENSI, HSK 33/001, Herleitung, Beschreibung und Anwendung der sicherheitstechnischen Kriterien für die Standortevaluation, 2007.

Environmental Protection Series (EPS), Environmental codes of practice for steam electric power generation, Siting phase, Report EPS 1/PG/2, Environment Canada, March 1987.

Grünthal, G., Bosse, C., Probabilistische Karte der Erdbebengefährdung der Bundesrepublik Deutschland – Erdbebenzonierungskarte für das Nationale Anwendungsdokument zum Eurocode 8: Forschungsbericht, (Scientific Technical Report ; 96/10), Potsdam : Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 1996.

Grünthal G, Mayer-Rosa D, Lenhardt W, Abschätzung der Erdbebengefährdung für die D-A-CH Staaten - Deutschland, Österreich, Schweiz. Bautechnik 75(10):753–767, 1998.

Grünthal, G., Stromeyer, D., Bosse, C., Cotton, F., Bindi, D., The probabilistic seismic hazard assessment of Germany—version 2016, considering the range of epistemic uncertainties and aleatory variability, Bulletin of Earthquake Engineering, 16, 10, pp. 4339—4395, 2018.

Kaiser D. & Spiess T., Anwendung des Ausschlusskriteriums Seismische Aktivität, Zwischenbericht, 2020.

Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, Abschlussbericht: Verantwortung für die Zukunft - ein faires und transparentes Verfahren für die

Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes,
https://www.bundestag.de/resource/blob/434430/bb37b21b8e1e7e049ace5db6b2f949b2/drs_268-data.pdf, 2016.