

Vorschlag für den Berichtsteil:

X.X Methodik für vorläufige Sicherheitsuntersuchungen

Verfasser: Prof. Dr.-Ing. Wolfram Kudla, Minister Stefan Wenzel
Entwurf 5 von 05.04.2016,

Vorbemerkung:

Der vorliegende Entwurf 5 wurde am 05.04.2016 zwischen Prof. Kudla und Minister Stefan Wenzel abgestimmt.

Vorbemerkung Bearbeitung NMU:

Basierend auf der Absprache zwischen Prof. Kudla und Minister Wenzel vom 05.03.2016 wird im Folgenden der Versuch unternommen die Textbausteine aus der K-Drs. AG3-106 in die K-Drs. AG3-96 a (Entwurf 4 vom 05.03.2016) zu integrieren. Die vorgeschlagenen Streichungen erfolgen im Wesentlichen mit dem Ziel einer Textstraffung und inhaltlichen Verdichtung im Sinne einer bestmöglichen Digestion.

Vorbemerkung zum Entwurf 4:

Dies ist eine Arbeitsfassung vom 05.03.2016 für einen Entwurf 4. Er basiert auf dem Entwurf 3 in der Fassung vom 29.02.2016. Es sind einige Kürzungen vorgenommen worden.

Vorbemerkung zum Entwurf 3:

In diesem Entwurf 3 wurden gegenüber dem Entwurf 2 ergänzt:

- a) Die Begrifflichkeiten wurden an das Standortauswahlgesetz gemäß dem Ergebnis der Kommissionssitzung am 15.02.2016 erneut angepasst, das heißt der ursprünglich in der Sitzung der AG3 am 17.12.2015 vereinbarte Begriff „*Sicherheitsbetrachtung*“ für die „*repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen*“ (§13(2) StandAG) in der Phase 1 wurde wieder zurückgenommen.
- b) Die Ergebnisse des Arbeitskreises 4 in der „Kriterien-Fachkonferenz“ am 29./30.02.2016 wurden aufgenommen.
- c) Die Ausarbeitung ist so formuliert, dass Sie in einen Endbericht übernommen werden könnte.
- d) Die Anmerkungen von Dr. Appel in K.-Drs. 3-95 wurden teilweise übernommen.

x.x.1 Inhalt und Kontext von Sicherheitsuntersuchungen

Die Endlagerkommission hat die Aufgabe, im Zusammenhang mit den Entscheidungsgrundlagen für die Standortauswahl für ein Endlager (für insbesondere wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente) Vorschläge für die "Methodik für die durchzuführenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen" zu erarbeiten (vgl. § 4 Abs. 2 Nr. 2 StandAG /1/).

Das Standortauswahlgesetz sieht in der Methodik für die durchzuführenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen eine wesentliche Entscheidungsgrundlage für die Einengung der Suchräume und die Standortauswahl (vgl. Begründung zum StandAG, Punkt B. zu § 4).

Nach dieser Begründung wird in einer Sicherheitsuntersuchung das Verhalten des Endlagersystems unter den verschiedensten Belastungssituationen und unter Berücksichtigung von Datenunsicherheiten, Fehlfunktionen sowie zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten im Hinblick auf die Erfüllung der Sicherheitsfunktionen analysiert. Sie umfasst zudem die Beurteilung der Zuverlässigkeit der Erfüllung der Sicherheitsfunktionen und damit auch der Robustheit dieses Systems.

Die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen müssen eine Bewertung enthalten, welche geologischen Eigenschaften der Standortregionen bzw. des Standorts besonders positive oder auch negative Auswirkungen auf das Lagersystem haben könnten.

Unterschiedliche geologische Gesamtsituationen können sehr unterschiedliche Vor- und Nachteile insbesondere für die Langzeitsicherheit haben. Insofern muss bei einem Vergleich von Standortregionen mit eventuell unterschiedlichen geologischen Situationen ermittelt werden, welche Eigenschaften für die Langzeitsicherheit eine besondere Bedeutung haben und mit welchen Instrumentarien die sicherheitstechnische Bedeutung im Vergleich bewertet wird. Dies kann für die jeweiligen Schritte des Standortauswahlverfahrens unterschiedlich sein (vgl. Begründung zum StandAG).

Für die Glaubwürdigkeit der Ergebnisse der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen und der Vergleiche unterschiedlicher Standorte und Wirtsgesteinsformationen ist es notwendig, dass die Methodik der durchzuführenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen sowie der dafür notwendigen Daten und Informationen vor Beginn der vergleichenden Untersuchung bestimmt werden (vgl. Begründung zum StandAG)..

Eine vorläufige Sicherheitsuntersuchung unterscheidet sich von einem Langzeitsicherheitsnachweis in einem Genehmigungsverfahren, weil für einen solchen Sicherheitsnachweis umfassende Daten und Kenntnisse über das Lagersystem, den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG), geologische Barrieren und die geologische Umgebung erforderlich sind, die aber naturgemäß zu Beginn des Auswahlprozesses bzw. in der jeweiligen Phase noch nicht vorliegen (können).

Die abschließende Sicherheitsnachweis / Sicherheitsbewertung (safety case) für den letztlich ausgewählten Standort baut auf einer umfassenden Sicherheitsanalyse auf, für die umfassende Daten/Kenntnisse über das Endlagersystem, den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) und die geologische Umgebung erforderlich sind.

Der Detaillierungsgrad der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen und die Aussagekraft ihrer Ergebnisse nehmen entsprechend dem zunehmenden Informationsgewinn durch die Erkundung der Standortregionen / Standorte von Phase zu Phase des Auswahlverfahrens zu. Entsprechend sind mit der Weiterentwicklung des Kenntnisstandes das Sicherheitskonzept und das Endlagerkonzept zu

überprüfen und weiter zu entwickeln. In der Schlussphase des Auswahlverfahrens hat der Vorhabenträger die verbliebenen Standorte auf Grundlage der Prüfkriterien zur Beurteilung von Ergebnissen der untertägigen Erkundung und umfassender vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen für die Betriebsphase und die Nachverschlussphase zu vergleichen und einen Standortvorschlag vorzulegen.

Alle (vorläufigen) Sicherheitsuntersuchungen erfolgen auf dem jeweiligen Stand von Wissenschaft und Technik. Dazu gehört auch jeweils das Endlagerkonzept (einschließlich Verschluss- und Versatzmaßnahmen), das die beste Schadensvorsorge nach dem jeweiligen Stand von Wissenschaft und Technik ermöglicht. Es ist selbstverständlich, dass eine Änderung des Standes von Wissenschaft und Technik bei nachfolgenden Sicherheitsuntersuchungen berücksichtigt werden muss. Dies kann dazu führen, dass (vorläufige) Sicherheitsuntersuchungen, die bereits Jahre vorher durchgeführt wurden, neu bewertet und revidiert werden müssen.

x.x.2 Methodischer Ansatz für vorläufige Sicherheitsuntersuchungen

x.x.2.1 Sicherheitsuntersuchungen als Instrument im Auswahlprozess

In dem Standortauswahlverfahren werden die Suchräume für den Lagerstandort ausgehend von dem gesamten bundesdeutschen Staatsgebiet in den Phasen des vergleichenden Verfahrens jeweils eingeschränkt. Dabei soll in jeder Phase vorrangiges Auswahlkriterium die Einhaltung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen (4.2.2 StandAG), die wirtsgesteinsspezifischen Ausschluss- und Auswahlkriterien (4.2.2 StandAG) und die wirtsgesteinsunabhängigen Abwägungskriterien (4.2.2 StandAG) sein. Die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen (4.2.2 StandAG) muss erwartet werden können. Die Kriterien für eine mögliche Fehlerkorrektur (4.2.3 StandAG) müssen erfüllt sein.

Der Vorschlag für in Betracht kommende Standortregionen wird somit im vergleichenden Ausschluss- und Abwägungsverfahren erarbeitet.

Für die übrig gebliebenen und damit in Betracht kommenden Standortregionen hat der Vorhabenträger jeweils vorläufige Sicherheitsuntersuchungen nach Maßgabe der zuvor durch Bundesgesetz (§ 4 Absatz 5) festgelegten Methodik und der Kriterien für die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen zu erstellen. Die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen müssen eine Bewertung enthalten, welche geologischen Eigenschaften der Standortregionen besonders positive oder auch negative Auswirkungen auf ein Endlager haben könnten (vgl. Begründung zum StandAG)..

Der Vorhabenträger hat einen Vorschlag für die in Betracht kommenden Standortregionen und auf der Grundlage der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen weitergehend einen Vorschlag für eine Auswahl von Standorten für die übertägige Erkundung zu erstellen und diese dem Bundesamt für kerntechnische Entsorgung zu übermitteln. Dabei wählt er Standorte aus, die insbesondere im Hinblick auf das Ziel der bestmöglichen Sicherheit einer übertägigen Erkundung unterzogen werden sollen (vgl. Begründung zum StandAG)..

Die eigentliche Entscheidung für die übertägige Erkundung beruht auf einer Abwägung beruhen muss. Angesichts der Zielsetzung des Standortauswahlgesetzes muss diese Abwägung auf die bestmögliche Sicherheit ausgerichtet sein. Qualitative und / oder quantitative Abwägungen mehrerer, ggf. auch widersprüchlich zu wertender Sachverhalte sind in vielen Lebensbereichen erforderlich, hierfür existiert eine Reihe mehr oder minder formalisierter Verfahren. Der Schlüssel für deren Erfolg liegt in der adäquaten, transparenten, wissenschaftsbasierten und glaubwürdigen Würdigung und Wichtung der einzelnen Sachverhalte.

x.x.2.2 Sicherheitsuntersuchungen in den verschiedenen Phasen der Standortauswahl

In den verschiedenen Phasen des Standortauswahlverfahrens sind (vorläufigen) Sicherheitsuntersuchungen im Zuge der Einengung auf potenziell geeignete Standorte vorgesehen, die bereits im StandAG sinnvoll festgelegt sind (siehe §13(2) und §16(2) und §18(3)).

Verantwortlich für die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen ist der Vorhabenträger (§6, 4). Der Vorhabenträger hat die in dem Standortauswahlverfahren festgelegten Standorte übertägig und untertägig zu erkunden. Dabei hat er regelmäßig an das Bundesamt für kerntechnische Entsorgung zu berichten und die Erkundungsergebnisse in vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen zusammenzufassen und sie zu bewerten (§12 (1)).

Der Detaillierungsgrad der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen und die Aussagekraft ihrer Ergebnisse nehmen entsprechend dem zunehmenden Informationsgewinn durch die Erkundung der Standortregionen bzw. der Standorte und dem sich weiterentwickelnden Sicherheits- und Lagerkonzept (bzw. der Konzepte, sofern mehrere gleichzeitig verfolgt werden) von Phase zu Phase des Auswahlverfahrens zu.

Im voranschreitenden Auswahlprozess entwickeln sich die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen iterativ, da mit dem Fortschreiten im Standortauswahlprozess die Kenntnisse über die geologischen Verhältnisse in den Standortregionen wachsen und dafür angepasste Konzepte immer konkreter und belastbarer entwickelt werden können.

Die gewählten Adjektive für die Sicherheitsuntersuchungen in den verschiedenen Phasen des Auswahlprozesses im StandAG antizipieren diesen Erkenntnisfortschritt bereits, z.B.:

1. §13(2): repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen,
2. §16(2): weiterentwickelte vorläufige Sicherheitsuntersuchungen,
3. §18(3): umfassende Sicherheitsuntersuchungen.

So hat der Vorhabenträger in Phase 1 des Standortauswahlverfahrens zur Ermittlung in Betracht kommender Standortregionen und zur Auswahl von Standorten für die übertägige Erkundung *repräsentative* vorläufige Sicherheitsuntersuchungen zu erstellen (§13(2)).

In der Phase 2 werden für die übertägig erkundeten Standortregionen bzw. Standorte weiterentwickelte vorläufige Sicherheitsuntersuchungen durch den Vorhabenträger ausgeführt (§16(2)). Auf Grundlage der *weiterentwickelten* vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen und weiterer Daten erarbeitet der Vorhabenträger einen Vorschlag, welche Standortregionen bzw. Standorte untertägig erkundet werden sollen. Ergänzend schlägt er Prüfkriterien zur Beurteilung der Erkundungsergebnisse vor. Nach Prüfung durch das Bundesamt für kerntechnische Entsorgung werden die vorgeschlagenen Standorte untertägig erkundet.

In der Phase 3 werden für die untertägig erkundeten Standorte umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Betriebsphase und die Nachbetriebsphase durch den Vorhabenträger ausgeführt (siehe §18(3)). Auf Grundlage der umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen und weiterer Daten (siehe §19(1)) schlägt das Bundesamt für kerntechnische Entsorgung einen Standort für ein Endlager für insbesondere Wärme entwickelnde Abfälle vor.

In allen Phasen hat die Sicherheit des Endlagers oberste Priorität.

Sicherheitsuntersuchungen verlaufen im Zuge der Phasen des Standortauswahlprozesses iterativ, weil mit Fortschreiten im Standortauswahlprozess die Kenntnisse über die geologischen Verhältnisse in den Standortregionen wachsen und dafür angepasste Endlagerkonzepte immer konkreter und belastbarer entwickelt werden können.

Das bedeutet auch, dass mit fortschreitendem Auswahlprozess die Art der geforderten Sicherheitsuntersuchungen detaillierter werden muss. Damit wird auch deutlich, dass ein Standortauswahlverfahren nicht allein auf einen Vergleich der geologischen Merkmale verschiedener potenzieller Regionen und Standorte reduziert werden kann, sondern immer im Kontext mit dem entsprechenden Endlagersystem gesehen werden muss.

x.x.2.3 Grundlagen für Sicherheitsuntersuchungen im Rahmen des Standortauswahlverfahrens

Vor Beginn der Sicherheitsuntersuchungen sollten folgende Festlegungen getroffen werden:

- Übergeordnete sicherheitliche Ziele der (End-)Lagerung insbesondere hoch radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen in Abhängigkeit von den charakteristischen sicherheitsrelevanten Eigenschaften der nach StandAG in Frage kommenden Wirtsgesteinstypen Salz, Ton und Kristallin: Vollständiger bzw. sicherer Einschluss [PTD(1)] mit allenfalls geringfügiger Freisetzung innerhalb des Nachweiszeitraums von 1 Million Jahren nach.
- Generische Sicherheitskonzepte für EnLagersysteme bzw. Lagersystemtypen in charakteristischen Erscheinungsformen der Wirtsgesteinstypen (z.B. Salz in flacher Lagerung bzw. Salzstöcken, Tonstein) bzw. mit vom ursprünglichen ewG-Konzept abweichender Sicherheitskonfiguration (z.B. Kristallin, Kristallin unter Salz), deren Umsetzung zur Einhaltung der Schutzziele und sicherheitstechnischen Anforderungen führen soll.
- An die zu betrachtenden Endlagersystemtypen und die zugehörigen Sicherheitskonzepte angepasste technische Lagerkonzepte mit angepassten technischen und geotechnischen Barrieren, die im Laufe des Auswahlverfahrens auf Grundlage des zunehmenden Informations- und Erkenntnisgewinns standortspezifisch weiter zu entwickeln sind. [PTD(2)]

Folgende Grundlagen sind für die Sicherheitsuntersuchungen erforderlich:

- a) Genaue und frühzeitige Informationen zu Menge, Art und Eigenschaften der radioaktiven Abfälle,
- b) Kenntnisse der geologischen Gegebenheiten in den potenziellen Standortregionen bzw. an den Standorten,

-
Entsprechende Informationen müssen in den einzelnen Phasen (siehe Abschnitt 3.1) im jeweils erforderlichen Tiefgang vorliegen oder sind zu erarbeiten, bevor im Rahmen des Auswahlverfahrens Entscheidungen, z.B. bezüglich eines Ausschlusses oder einer Rückstellung von potenziellen Standortregionen oder Standorten getroffen werden können. Ausschlüsse aufgrund mangelnder Daten und Informationen sind nicht zulässig.

Zu a)

Informationen über Art und Menge der Wärme entwickelnden radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente in Deutschland liegen vor, z.B. im Nationalen Entsorgungsprogramm von Anfang 2015. Sofern der Vorhabenträger die Einlagerung weiterer, vernachlässigbar Wärme entwickelnder Abfälle am betrachteten Standort vorsieht, müssen diese Abfälle nach Art und Menge spezifiziert werden. Ihre Einlagerung ist im (Endo-)Lagerkonzept (s. u.) zu berücksichtigen.

Zu b)

Information und Kenntnisse über die geologischen Verhältnisse in einer Region oder an einem Standort können zunächst entweder aus vorhandenen Daten (Bohrprofilen, geophysikalischen Aufschlüssen usw.) und Kartenmaterial gewonnen werden, die den Geologischen Landesämtern und Bundesbehörden vorliegen. Dabei helfen insbesondere die in der Erdöl- und Erdgasindustrie gewonnenen Erkenntnisse aus seismischen Untersuchungen und aus Explorationsbohrungen, sofern diese öffentlich zugänglich sind oder gemacht werden können. Im weiteren Einengungsprozess sind gezielt die geologischen Verhältnisse zu erkunden.

x.x.2.3 Vorgehen bei Sicherheitsuntersuchungen – Vorschlag einer Methodik

Ziel der Endlagerung ist es, durch das geeignete Zusammenwirken geologischer, geotechnischer und technischer Barrieren den langfristig sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle zu gewährleisten, um Freisetzungen in die Biosphäre zu vermeiden bzw. auf ein möglichst niedriges geringfügiges Niveau unterhalb festgesetzter Grenzwerte zu begrenzen. Gegenstand der (vorläufigen, vorläufig weiterentwickelten und umfassenden) Sicherheitsuntersuchungen ist in diesem Zusammenhang grundsätzlich die Überprüfung, inwieweit dieses Ziel, d. h. der vollständige oder langfristig sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle unter Ausnutzung der geologischen Standortgegebenheiten gewährleistet werden kann.

Bei der Standortauswahl müssen die in Betracht kommenden Standortregionen / Standorte bzw. Endlagersysteme an Hand vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen vergleichend gegenübergestellt werden. Dabei wird die Gesamtheit des Endlagersystems mit allen seinen sicherheitsrelevanten Bestandteilen betrachtet und unmittelbar hinsichtlich seiner Sicherheit bewertet. Dabei werden sie mit ihren sicherheitsrelevanten Bestandteilen betrachtet und hinsichtlich der Wirksamkeit ihrer Sicherheitsfunktionen beurteilt. Soweit auf Grund der phasenabhängigen Informationslage überhaupt möglich / sinnvoll – werden außerdem die Aussichten auf die im weiteren Verfahrensverlauf schrittweise zu bestätigende und im Genehmigungsverfahren abschließend zu belegende Einhaltung der Schutzziele und der weiteren sicherheitlichen Anforderungen gemäß bewertet.

Für einen belastbaren Vergleich von Endlagersystemen mittels standortspezifischer Sicherheitsuntersuchungen sollen nach Stand von Wissenschaft und Technik vorrangig Kriterien herangezogen werden, die auf Sicherheitsindikatoren beruhen. Hierzu zählen in den Phasen 2 und 3 (nicht in Phase 1) auch solche zur Beurteilung möglicher Freisetzungen aus dem Endlager hinsichtlich Menge, Art sowie daraus resultierender radiologischer Konsequenzen. Ferner müssen zum Zeitpunkt des Vergleiches bestehende Ungewissheiten in die Abwägung ebenso miteinfließen wie die Robustheit der Sicherheitsaussage und der Sicherheit des Endlagersystems, d.h. bestehende konservative Annahmen und Sicherheitsreserven.

Während die Abfalldaten aufgrund der zeitlich begrenzten Kernenergienutzung in Deutschland weitgehend feststehen, unterscheiden sich Art und Umfang der zur Verfügung stehenden Informationen und Kenntnisse zu den jeweiligen geologischen Verhältnissen in den verschiedenen Phasen des Standortauswahlprozesses und für die entsprechenden Sicherheitsuntersuchungen erheblich.

Bei (vorläufigen) Sicherheitsuntersuchungen in den verschiedenen Phasen wird grundsätzlich vom gleichen, nachfolgend dargelegten Ablauf ausgegangen wie bei den späteren Sicherheitsanalysen. Daher sollte grundsätzlich auch von einer gleichen Vorgehensweise ausgegangen werden, die nachfolgend skizziert und erläutert wird. Auch wenn es zur Durchführung von Sicherheitsuntersuchungen bzw. Sicherheitsanalysen hinsichtlich der Langzeitsicherheit eines Endlagers radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen keinen einheitlichen Standard gibt, beinhalten sie im Wesentlichen folgende Schritte (aufbauend auf den in Abschnitt x.x.2.2 genannten Grundlagen). Insbesondere die Schritte 1 und 2 laufen dabei nicht zeitlich streng hintereinander ab:

1. Phasengerechte Erstellung eines Sicherheitskonzeptes und eines Nachweiskonzeptes für die jeweilige geologische Situation in Abhängigkeit des Wirtsgesteins.
2. Erarbeitung eines (vorläufigen) Lagerkonzeptes zur Umsetzung des Sicherheitskonzeptes.
3. Geowissenschaftliche und klimatische Langzeitprognose: Identifikation und Bewertung von Einwirkungen auf die Integrität der einschlusswirksamen geologischen, geotechnischen und technischen Barrieren sowie der Prozesse, die zu Freisetzungen bzw. zur Rückhaltung der Radionuklide führen können.
4. Bewertung möglicher Freisetzungen hinsichtlich ihres Auftretens und ihres Ausmaßes. Bewertung radiologischer Konsequenzen aus möglichen Freisetzungen (nur in Phase 2 und 3, nicht in Phase 1).
5. Bewertung von Ungewissheiten und Sicherheitsreserven sowie der Robustheit des Endlagersystems und seiner Sicherheit.
6. Ableitung des Erkundungs- und FuE-Bedarfs sowie von Optimierungsmöglichkeiten für das Endlagerkonzept.

Unter „Bewertung“ wird dabei eine verbal qualitative und teilweise auch quantitative Argumentation verstanden, bei der alle relevanten Gesichtspunkte (z.B. hinsichtlich möglicher Freisetzungspfade über technische oder geotechnische und geologische Barrieren) behandelt werden und die insbesondere Bezug auf die lange Zeitdauer des notwendigen sicheren Einschlusses nimmt. Werden verschiedene Standortregionen sowohl mit gleichem als auch mit verschiedenem Wirtsgestein miteinander verglichen, erfolgt die Bewertung im Rahmen der Sicherheitsuntersuchungen qualitativ.

Zu 1. Erstellung eines Sicherheitskonzeptes für die jeweilige geologische Situation

Nach den Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) lassen sich als übergeordnete Sicherheitsfunktionen „Einschluss“ sowie „Integrität“ (im Sinne des Erhalts der einschlussrelevanten Eigenschaften) ableiten. Diese wären dann entsprechend der geologischen Situation weiter zu spezifizieren: So ergäben sich z. B. für ein Wirtsgestein Tonstein auf einer nächsten Detaillierungsebenen die Funktionen „Strömungsbehinderung“ und „Verzögerung / Behinderung des diffusiven Schadstofftransports“ (modifiziert nach Andra 2005). Daraus wiederum könnten Anforderungen an die Gebirgsdurchlässigkeit, die Homogenität und die Mächtigkeit der Tonsteinschicht, die effektive und die scheinbare Diffusivität u.s.w. abgeleitet werden. Hinzu kommen auf die Integrität, also den Erhalt dieser einschlusswirksamen Eigenschaften, gerichtete Funktionen und Anforderungen.

Das Sicherheitskonzept beschreibt verbalargumentativ, wie die natürlichen Gegebenheiten (das Wirtsgestein), die Prozesse (z.B. die Kompaktion des Salzversatzes unter einem aufkriechenden Salzgebirge) und die technischen Maßnahmen (z.B. die Behälter) in ihrer Gesamtheit dazu führen sollen, dass der langzeitsichere Einschluss der endgelagerten Abfälle am betrachteten Standort bzw. in der Standortregion gewährleistet werden soll.

Bei der Gestaltung des Sicherheitskonzeptes kann zunächst (insbesondere in der Phase 1) auf bereits vorliegende – teilweise im Ausland entwickelte - Konzepte für Endlager insbesondere Hoch radioaktiver Abfälle in verschiedenen Wirtsgesteinsformationen zurückgegriffen werden, die den in Deutschland verfolgten Wirtsgesteinstypen annähernd vergleichbar sind, soweit sie den internationalen Stand von Wissenschaft und Technik verkörpern.

[Hierzu zählen für Tonstein die Endlagerprojekte in der Schweiz und in Frankreich (z.B. Arbeiten der ANDRA (Dossier de Argile, 2005 und 2013)), im Kristallin die Genehmigungsanträge für Endlager für abgebrannte Brennelemente in Schweden (Arbeiten der SKB 2011 am Standort Forsmark) und in der Finn-land (Arbeiten von Posiva Oy 2012 am Standort Olkiluoto) sowie in Deutschland im Steinsalz die „Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben 2013“. Darüber hinaus sind im Hinblick auf die in Deutschland zu entsorgenden Wärme entwickelnden radioaktiven Abfälle und herrschenden geologischen Verhältnisse die Arbeiten im Auftrage des BMWi zu folgenden FuE-Vorhaben hervorzuheben[PTD(3)]

In nachfolgenden Phasen des Standortauswahlprozesses kann das Sicherheitskonzept auf der Grundlage der dann zur Verfügung stehenden geologischen Daten sowie unter Berücksichtigung der aus vorangegangenen (vorläufigen) Sicherheitsuntersuchungen gewonnenen Erkenntnisse weiterentwickelt werden. Kern des Sicherheitskonzeptes ist die Zuweisung von Sicherheitsfunktionen (vgl. die Sicherheitsanforderungen des BMU /2/) zu den Systemkomponenten.

Zu 2. Erarbeitung eines (vorläufigen) (End-)Lagerkonzeptes zur Umsetzung des Sicherheitskonzeptes

Neben den direkt auf die Sicherheit gerichteten Anforderungen müssen auch Anforderungen bzgl. der Umsetzbarkeit eines Lagers abgeleitet werden. Diese können sich z. B. auf die Ausdehnung und Teufenlage des Wirtsgesteins oder die geomechanischen Verhältnisse beziehen.

Als nächstes ist eine (Konzept-)Planung für das Bauwerk zu erstellen. Dies beinhaltet Konzepte für

- a) die Behälter (Art, Größe, technische Barrieren),
- b) die Art der Einlagerung,
- c) die Sicherheitsabstände zum Nebengestein,
- d) die Schachtverschlüsse und Streckenverschlüsse (geotechnischen Barrieren),
- e) das Versatzkonzept,
- f) den Umgriff für den später auszuweisenden einschlusswirksamen Gebirgsbereich,
- g) Überlegungen zum gebirgsschonenden Auffahren der Einlagerungsstrecken,
- h) Sofern auch LAW und MAW Abfälle eingelagert werden: Konzeptplanung für einen zweiten Einlagerungsbereich,
- i) den zeitlichen Ablauf der Einlagerung

Die o.g. Aufzählung a) bis f) ist beispielhaft und nicht vollständig. Sie enthält aber die wesentlichen Punkte.

In nachfolgenden Phasen des Standortauswahlprozesses ist das Endlagerkonzept auf der Grundlage der dann zur Verfügung stehenden geologischen Daten sowie unter Berücksichtigung der aus vorangegangenen Sicherheitsuntersuchungen gewonnenen Erkenntnisse weiterzuentwickeln.

Zu 3. Geowissenschaftliche und klimatische Langzeitprognose: Identifikation und Bewertung von Einwirkungen auf die Integrität der einschlusswirksamen geologischen, geotechnischen und technischen Barrieren sowie der Prozesse, die zu Freisetzungen bzw. zur Rückhaltung der Radionuklide führen können

Aufgrund der geowissenschaftlichen Langzeitprognose kann gefolgert werden, welche Prozesse (z. B. Erosion, Subrosion) die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereich gefährden könnten. Daraus müssen sich Anforderungen z. B. zu Sicherheitsabständen, Deckgebirge, Schutz- oder Opferschichten ergeben.

Dieser Teil von (vorläufigen) Sicherheitsuntersuchungen bzw. –analysen setzt sich unmittelbar damit auseinander, inwieweit das Ziel der Endlagerung, der langfristig sichere Einschluss der Abfälle, gewährleistet werden kann. Hierzu sind sowohl die Wirksamkeit der einschlusswirksamen geologischen, geotechnischen und technischen Barrieren, deren mögliche Beeinträchtigungen sowie Prozesse, die zur Mobilisierung als auch zur Rückhaltung der Radionuklide und anderer Schadstoffe führen können, zu analysieren.

Hierzu sind zunächst die Einwirkungen, die die Integrität der einschlusswirksamen geologischen, geotechnischen und technischen Barrieren und damit deren Wirksamkeit beeinträchtigen können sowie Prozesse, die zu Freisetzungen bzw. zur Rückhaltung der Radionuklide führen können zu identifizieren. Dazu ist eine Szenarienanalyse aufzustellen, die auf einer Vielzahl von angenommenen FEPs (features, events, processes) beruht. Entsprechende FEP-Zusammenstellungen sind aus den unter „zu 1.“ genannten, nationalen und internationalen Arbeiten für alle in Betracht kommenden Wirtsgesteine verfügbar. Ein übergreifender FEP-Katalog wird bei der OECD/NEA geführt und mit deutscher Beteiligung zu einer Datenbank weiterentwickelt.

Eine wesentliche Voraussetzung hierfür ist die standort- bzw. regionsspezifische geowissenschaftliche und klimatische Langzeitprognose. Sie beschreibt die wesentlichen zu berücksichtigenden geologischen und klimatischen Veränderungen im Nachweiszeitraum von wenigstens einer Million Jahren mit dem Schwerpunkt möglicher Beeinträchtigungen der einschlusswirksamen Barrieren. Die geowissenschaftliche Langzeitprognose baut vor Beginn der Standorterkundung zunächst im Wesentlichen auf der Kenntnis der regionalgeologischen Entwicklung und geeigneten Analogiebetrachtungen auf und ist in nachfolgenden Phasen des Auswahlverfahrens anhand gezielt erhobener Erkundungsdaten fortzuschreiben.

Die geowissenschaftliche Langzeitprognose fließt unmittelbar in die Szenarienanalyse ein, die mögliche Entwicklungen des Endlagersystems im Betrachtungszeitraum mit dem Schwerpunkt möglicher Einwirkungen auf die Integrität der einschlusswirksamen Barrieren sowie der Prozesse, die zu Freisetzungen bzw. zur Rückhaltung der Radionuklide führen können, beschreibt und analysiert. ß

In (vorläufigen) Sicherheitsuntersuchungen vor Beginn der Standorterkundung erscheint es jedoch nicht angemessen, eigenständige Szenarienanalysen durchzuführen, sondern auf bereits vorliegende Sicherheitsanalysen für Endlager in vergleichbaren Wirtsgesteinsformationen zurückzugreifen und zu überprüfen, inwieweit unter Berücksichtigung der jeweiligen Standortgegebenheiten und der vorläufigen geowissenschaftlichen Langzeitprognose die relevanten Einwirkungen und Prozesse übertragen werden können.

Für jeden Wirtsgesteinstyp soll dazu ein Set relevanter Einwirkungen und Prozesse abgeleitet werden und dafür die jeweiligen standortspezifischen Unterschiede ausgewiesen werden. Grundsätzlich ist es empfehlenswert, für jeden Wirtsgesteinstyp eine prototypische Sicherheitsuntersuchung zu erarbeiten, und auf dieser Grundlage für jeden betrachtenden Standort bzw. für jedes betrachtete Gebiet Differenzbetrachtungen durchzuführen. Anschließend sollen anhand der konkreten standort- bzw. gebietsspezifischen Merkmale die Unterschiede hinsichtlich der zu untersuchenden Sicherheitsaspekte herausgearbeitet werden.

Die identifizierten Einwirkungen auf die einschlusswirksamen Barrieren und freisetzungsrelevanten Prozesse sind dahingehend zu bewerten, inwieweit sie zu Freisetzungen in die Biosphäre führen können. Während hierzu in nachfolgenden Sicherheitsuntersuchungen numerische Integritätsanalysen (z. B. mit Überprüfung des Dilatanzkriteriums oder des Fluiddruckkriteriums) der einschlusswirksamen Barrieren sowie Mobilisierungs- und Transportrechnungen unverzichtbar sind, werden für Sicherheitsuntersuchungen in der ersten Phase des Standortauswahlverfahrens (vor Beginn von Standorterkundungen) die Nutzung von überschlägigen Abschätzungen und Analogiebetrachtungen anhand der „zu 1.“ genannten nationalen und internationalen Arbeiten bereits vorliegender Sicherheitsanalysen als angemessen angesehen.

In der Phase 1 gehören beispielhaft zu den vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen:

1. Abschätzung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches und damit der Bereiches, in dem das Fluiddruckkriterium und des Dilatanzkriterium eingehalten ist
2. Untersuchungen zum Wärmeeintrag im Wirtsgestein über die Zeit durch die eingelagerten Abfälle
3. Überlegungen und Untersuchungen zur Robustheit der eingesetzten Komponenten

Als Robustheit wird die Zuverlässigkeit und Qualität und somit die Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen sowie die Unempfindlichkeit der Ergebnisse der Sicherheitsanalysen gegenüber Abweichungen zur zugrunde gelegten Annahmen bezeichnet.

In der Phasen 2 und 3 gehören beispielhaft zusätzlich zu den für Phase 1 genannten Sicherheitsuntersuchungen, (wobei die nachfolgenden Untersuchungen auch je nach Kenntnisstand in der Phase 1 bereits teilweise sinnvoll sein können):

1. Nachweis der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches und ggfls. der Integrität des Deckgebirges; Überprüfung des Fluiddruckkriteriums und des Dilatanzkriteriums
2. Ausweis von Bereichen, in denen außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches das Fluiddruckkriterium verletzt ist und Ausweis aller Quellen für Porenwasser, Kristallwasser, Lösungseinschlüssen, Klüften und anderen möglichen Quellen für Zufuhr von Flüssigkeiten,
3. Untersuchungen zur Kompaktion des Versatzmaterials über die Zeit
4. Thermo-Mechanische Auslegungsberechnungen des Grubengebäudes (und damit auch zur Hebung des Geländeoberfläche)

5. Entwurf Schachtverschluss und Ermittlung von Grundwasserzutrittsraten über die Zeit in Abhängigkeit der Ausbildung des Verschlusses und der umgebenden Auflockerungszone
6. Nachweis der Tragfähigkeit und der Rissebeschränkung bei den Schachtverschlüssen
7. Untersuchungen zu Einwirkungen von Erdbeben auf das Grubengebäude, speziell die Schachtverschlüsse
8. Konzeptentwicklung zur Rückholung, Bergung oder Wiederauffindung von Behältern
9. Untersuchungen zur Gasentwicklung über die Zeit auf Grundlage der Restfeuchte in den Behältern, der Versatzfeuchte (im Tonstein und Kristallingestein zusätzlich: unter Berücksichtigung der Eigenfeuchte und zutretenden Wässern)
10. Untersuchungen zur Korrosion der Behälter
11. Radiologische Freisetzungsberechnungen (Ergebnisse sind nur Sicherheitsindikatoren!)
12. Untersuchungen zur Mobilisierung von natürlich im Endlagersystem vorkommenden radioaktiven oder sonstigen grundwasser- oder bodenrelevanten Stoffen
13. Untersuchung zu radiolytischen Prozessen
14. Untersuchungen zu dynamischen Prozessen und Selbstorganisation von Prozessen,
15. Untersuchungen zur Veränderung der geochemischen und katalytischen Bedingungen auf Grund der Temperaturerhöhung im Einlagerungsbereich
16. Untersuchungen zur Temperaturerhöhung und darauf aufbauend zur Änderung der geochemischen Verhältnisse im Grundwasserleiter des Deckgebirges
17. Untersuchungen zur Kritikalität und Nachweis des Kritikalitätsausschlusses
18. Überlegungen zur Verhinderung des menschlichen Eindringens nach dem Verschluss (human intrusion)
19. Untersuchungen zur technische Auslegung und Optimierung der Einlagerungsmaschinen
20. Untersuchungen zur betriebssicherheitlich und strahlenschutztechnisch günstigen Wetterführung
21. Überlegungen zu einem Monitoringkonzept
22. Überlegungen zur Optimierung aller Endlagerkomponenten

Die genannten Sicherheitsuntersuchungen Nr. 1 bis 22 sind nur beispielhaft aufgelistet und sind auf keinen Fall vollständig! Der Vorhabenträger hat selbst alle Sicherheitsuntersuchungen auszuführen, um sämtliche als relevant erkannten Auslegungsfälle zu berücksichtigen und sämtlich in den Sicherheitsanforderungen des BMU /2/ genannten Sicherheitsanforderungen zu erfüllen (jeweils angepasst an die Phase).

Im Rahmen der Sicherheitsuntersuchungen werden auch Untersuchungen hinsichtlich der Standort-eignung der oberirdischen Anlagen und hinsichtlich der Betriebssicherheit durchgeführt. Zur Überprüfung der Standorteignung der oberirdischen Anlagen zählen beispielsweise die Prüfung hinsichtlich des Hochwasserschutzes und des Meeresspiegelanstiegs, hinsichtlich Störfällen aus benachbarten Industrieanlagen, hinsichtlich Flugzeugabsturz usw. . Die Sicherheitsuntersuchungen zu den genannten Punkten haben damit auch Einfluss auf die Standortauswahl der oberirdischen Anlagen.

Zu 4. Bewertung möglicher Freisetzungen hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens und ihres Ausmaßes; Bewertung radiologischer Konsequenzen aus möglichen Freisetzungen

Es ist zu klären, welche Informationen in der jeweiligen Phase tatsächlich für den Vergleich zur Verfügung stehen. Nur diese sind heranzuziehen; es ist zu klären, welche Interpretationsspielräume sich aus den Informationen ergeben und welche Sensitivität diese hinsichtlich der Sicherheitsfunktionen aufweisen. Nach OECD/NEA 2015 müssen für den Vergleich Unsicherheiten (Ungewissheiten?) gewürdigt und angemessen berücksichtigt werden. Solange sich das Verfahren noch in einer generischen Phase befindet ist es jedoch wahrscheinlich, dass sicherheitsbezogene Bewertungen lediglich zur Unterscheidung der vorher getroffenen Annahmen führen. Zu beachten ist: („Uncertainties need to be acknowledged and appropriately accounted for when making comparisons. In a generic state, prior to site characterisation it is difficult to use safety assessment results for discrimination between sites, because it is likely to be just discrimination between assumptions.“ (OECD/NEA 2015).

Daraus ergibt sich, dass die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen je nach Phase der Standortauswahl noch nicht den Charakter vollwertiger Sicherheitsanalysen haben können. Modellrechnungen können durchaus eine Rolle spielen (z. B. Diffusionsrechnungen zur Abschätzung des Einschlusspotentials von Tonsteinformationen oder thermomechanische Modellrechnungen zur Abschätzung der Integrität einer Steinsalzformation). Solche Modellrechnungen liefern so genannte Indikatoren (z. B. „Status of barriers’ related indicators“ nach OECD/NEA 2012), die in der Kriterienbildung verwendet werden können.

[Die angenommene Gleichwertigkeit von Standortgebieten bzw. Standorten, die einen gewissen Dosisgrenzwert unterschreiten, ist nicht gegeben, daher sollten Unterschiede in den berechneten Dosiswerten unterhalb der Grenzwerte nicht zum Vergleich herangezogen werden. Gleichwertigkeit könnte nur bei Berücksichtigung aller sicherheitsrelevanten Eigenschaften der Standortgebiete bzw. Standorte, etwa auf Basis des jeweils abschließenden Langzeitsicherheitsnachweises im Genehmigungsverfahren gezeigt werden. Diese Aussage gilt auch für die Schweiz, wo jedoch 2015 in der Etappe 2 des dortigen Auswahlverfahrens auf Grundlage von vorläufigen Dosisberechnungen sowohl die Eignung als auch die Gleichwertigkeit der betrachteten Standortregionen postuliert worden ist.][PTD(4)]

Zu 5. Bewertung von Ungewissheiten und Sicherheitsreserven sowie der Robustheit des Endlagersystems und seiner Sicherheit

Wie bereits ausgeführt, können die Bewertung der Sicherheit eines Endlagersystems und insbesondere eine vergleichende Gegenüberstellung nicht ausschließlich anhand möglicher Freisetzungen in die Biosphäre und daraus resultierender radiologischer Konsequenzen erfolgen. Im Rahmen der (vorläufigen) Sicherheitsuntersuchungen müssen zwangsläufig Ungewissheiten in Kauf genommen werden, die mit zielgerichteten Erkundungsprogrammen abgebaut, aber nicht gänzlich beseitigt werden können. Diese Ungewissheiten sind daher explizit auszuweisen und in die Bewertung und vergleichende Gegenüberstellung mit einzubeziehen.

Die (vorläufigen) Sicherheitsuntersuchungen bieten ein Gesamtverständnis für das sicherheitsgerichtete Zusammenwirken der verschiedenen Komponenten des Endlagersystems und dabei auch der Auswirkungen dieser oder jener geologischen Merkmale eines Standortes bzw. einer Region und ihrer Ausprägungen auf seine Sicherheit. Ohne sie ist eine belastbare Gewichtung von auf geologische Merkmale bezogenen Abwägungskriterien, eine geeignete quantitative Klassifizierung und insbesondere eine begründete Abwägung untereinander als nicht zielführend.

Zu 6. Ableitung des Erkundungs- und FuE-Bedarfs sowie von Optimierungsmöglichkeiten für das Endlagerkonzept

Bei der Implementierung von Endlagerprogrammen haben sich international in Übereinstimmung mit entsprechenden Empfehlungen (siehe u. a. The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories, NEA/RWM/R(2013)¹, Seite 15; IAEA Safety Standards, The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste for protecting people and the environment, No. SSG-23 Specific Safety Guide, Seite 19) vorläufige Sicherheitsuntersuchungen bzw. –analysen, die mit Fortschreiten des Standortauswahlverfahrens bzw. der Endlagerimplementierung sukzessive weiterentwickelt werden als geeignetes Werkzeug bewährt für die

- ☐ zielgerichtete Standorterkundung,
- ☐ Steuerung von FuE-Programmen und
- ☐ Optimierung von Endlagerkonzepten.

Die Gründe dafür sind naheliegend. Bei der Durchführung vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen werden mehr oder weniger zwangsläufig die maßgeblichen Kenntnisdefizite zur Geologie der betrachtenden Standorte, offene Fragestellungen, die in weiterführenden FuE-Arbeiten zu untersuchen sind, und die Optimierungsmöglichkeiten der angesetzten Endlagerkonzepte offenkundig. Die daraus resultierende Steuerungsfunktion der (vorläufigen) Sicherheitsuntersuchungen müssen daher in allen Phasen der Standortauswahl zielgerichtet genutzt werden.

xxx.2.4 Bewertung der Sicherheitsuntersuchungen

Als Bewertungsmaßstab für die Sicherheit werden die Sicherheitsanforderungen des BMU folgt zu Grunde gelegt (siehe BMU /2/).

In der Phase 1 sind die Ergebnisse der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen nur als orientierende Größen zu verstehen, die wegen geringer Kenntnisse zu den standortspezifischen geologischen Verhältnissen noch mit Unsicherheiten behaftet sind und damit keine hinreichend robuste Sicherheitsaussage zulassen (weitgehend nur generische Untersuchung).

Die Ergebnisse der (vorläufig weiterentwickelten oder umfassenden) Sicherheitsuntersuchungen in der Phase 2 und 3 (einschließlich Dosisberechnungen) werden zusammen mit der Bewertung der Abwägungskriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit dargelegt. Auf diese Weise erfolgt eine sicherheitstechnische Gesamtbewertung der Standortregionen bzw. Standorte unter Berücksichtigung der jeweiligen Vor- und Nachteile. Dadurch kann ein Vergleich von Standortregionen bzw. Standorten erfolgen. Dabei werden die erwartete Entwicklung des Gesamtsystems (Nahfeld und

Fernfeld, Geosphäre) sowie seine Robustheit berücksichtigt. Die Variabilität und die Unsicherheit in den Eingangsdaten sind dabei ebenfalls zu berücksichtigen. Des Weiteren sind Modellunsicherheiten darzulegen und aufzuzeigen, wie diesen Rechnung getragen wird.

[Beim Vergleich von Standorten dürfen Standorte nicht aufgrund von Dosisdifferenzen ausgeschlossen werden, die nur durch Ungewissheiten der zugrunde gelegten Daten verursacht werden.

Für die Gesamtbeurteilung von Standortregionen bzw. Standorten im Rahmen des Vergleichs solle eine vierstufige qualitative Bewertungsskala („sehr geeignet“, „geeignet“, „bedingt geeignet“, „weniger geeignet“) zu verwenden.[PTD(5)]

[Freisetzungs- und Dosisrechnungen, wie sie im Rahmen von vorläufigen Sicherheitsanalysen vorgenommen werden, sind jedoch insbesondere in frühen Phasen des Auswahlverfahrens kaum hilfreich beim Standortvergleich. Auch im Schweizer Auswahlverfahren wurden sie nicht für einen Vergleich, sondern lediglich zur Abschätzung genutzt, ob an einem Standort prinzipiell das Potential zur Erfüllung von Sicherheitsanforderungen besteht[PTD(6).]

3. Literatur

- /1/ Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und zur Änderung anderer Gesetze – (Standortauswahlgesetz – StandAG) vom 23. Juli 2013
- /2/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Stand 30. September 2010
- /3/ Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung (DAEF): Aspekte eines Standortauswahlverfahrens für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle, Köln, Oktober 2014,
- /4/ Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte, Empfehlungen des AkEnd , Abschlussbericht, Köln, 2002,
- /5/ Bundesamt für Strahlenschutz: Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle. Wirtsgesteine im Vergleich, Salzgitter 2005
- /6/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit und Bau (BMUB): Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm), ENTWURF vom 06. Januar 2015
- /7/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI (Bericht ENSI 33/075): Anforderungen an provisorische Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich; Sachplan Geologische Tiefenlager, Etappe 2, Brugg, April 2010

- /8/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI (Bericht ENSI 33/154): Präzisierung zur sicherheitstechnischen Methodik für die Auswahl von mindestens zwei Standortgebieten je für HAA und SMA in Etappe s SGT, Sachplan Geologische Tiefenlager, Etappe 2, Brugg, Januar 2013

und weitere im Text genannte Literatur.