

Entwicklung des Standes von W&T bei der Führung eines Langzeitsicherheits- nachweises für Endlager an den Beispielen VSG und Konrad

Bericht zum Arbeitspaket 2

Untersuchung und Entwicklung
von sicherheitstechnischen
Bewertungen für Endlager für
Abfälle mit vernachlässigbarer
Wärmeentwicklung und
Bereitstellung des notwendigen
Instrumentariums am Beispiel
des Endlagers Konrad

Entwicklung des Standes von W&T bei der Führung eines Langzeitsicherheits- nachweises für Endlager an den Beispielen VSG und Konrad

Bericht zum Arbeitspaket 2

Untersuchung und Entwicklung
von sicherheitstechnischen
Bewertungen für Endlager für
Abfälle mit vernachlässigbarer
Wärmeentwicklung und
Bereitstellung des notwendigen
Instrumentariums am Beispiel
des Endlagers Konrad

Jürgen Larue
Klaus Fischer-Appelt
Eva Hartwig-Thurat

September 2015

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende FE-Vorhaben 3612R03410 wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

Deskriptoren

Endlager Konrad, Langzeitsicherheitsnachweis, Stand von Wissenschaft, Vorläufige Sicherheitsanalyse
Gorleben

Kurzfassung

Im Forschungsvorhaben 3612R03410 „Untersuchung und Entwicklung von sicherheitstechnischen Bewertungen für Endlager für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung; Entwicklung und Bereitstellung des notwendigen Instrumentariums am Beispiel des Endlagers Konrad“ wurde der Stand von Wissenschaft und Technik der sicherheitstechnischen Bewertungen und Instrumentarien zur Durchführung von Sicherheitsnachweisen untersucht. In den Berichten zu den beiden Arbeitspaketen wurden die Weiterentwicklungen der Methodik für Störfallanalysen (AP 1) und jene zur Führung von Langzeitsicherheitsnachweisen (AP 2) dargestellt und im internationalen wie nationalen Kontext mit den Methoden im Planfeststellungsverfahren des Endlagers Konrad verglichen.

Sicherheitsnachweise und die ihnen zugrunde liegenden Analysen und Methoden müssen an die Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik angepasst werden. In Deutschland wurden mit der Erstellung der Planfeststellungsunterlagen für das Endlager Konrad im Jahre 1990 und dem Forschungsvorhaben der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) im Jahre 2013 zwei Sicherheitsnachweise zur Langzeitsicherheit von Endlagern geführt, die den Entwicklungsstand der Nachweisführung zum jeweiligen Zeitpunkt widerspiegeln.

In diesem Bericht zum Arbeitspaket 2 wird anhand des Vergleichs der beiden oben genannten Beispiele für Langzeitsicherheitsnachweise unter Einbeziehung aktueller internationaler Empfehlungen und nationaler Regelwerke die Fortentwicklung des internationalen Standes von W&T aufgezeigt. Hierfür werden für jedes Element eines modernen Langzeitsicherheitsnachweises die wesentlichen Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen dem Langzeitsicherheitsnachweis zum Endlager Konrad einerseits und der VSG bzw. dem internationalen Stand andererseits zusammenfassend dargestellt.

Abstract

In the research project on the "Review and development of safety-related assessments of disposal facilities with negligible heat generation; development and provision of the necessary set of tools, using the example of the Konrad disposal facility" (3612R03410), the state of the art in science and technology of the safety-related assessments and sets of tools for building a safety case was examined. The reports pertaining to the two work packages described the further development of the

methodology for accident analyses (WP 1) and of building a safety case (WP 2); also, comparisons were drawn on a national and international scale with the methods applied in the licensing procedure of the Konrad disposal facility.

A safety case as well as its underlying analyses and methods always has to be brought up to date with the development of the state of the art in science and technology. In Germany, two safety cases regarding the long-term safety of disposal facilities have been prepared. These are the licensing documentation for the Konrad disposal facility in the year 1990 and the research project regarding the preliminary safety case for the Gorleben site (Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben - VSG) in the year 2013, both reflecting the state of development of building a safety case at the respective time.

Comparing the two above-mentioned examples of safety cases and taking recent international recommendations and national regulations into account, this report on Work Package 2 presents the development of the international state of the art in science and technology. This has been done by summarising the essential differences and similarities of each element of the safety case for the Konrad disposal facility on the one hand and the VSG and the international status on the other hand.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Bewertungsgrundlagen	5
2.1	Internationale und nationale Empfehlungen zum Strahlenschutz	5
2.2	Sicherheitsanforderungen des BMUB an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle	8
2.3	Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk /BMI 83/ und ihre Anwendung im Planfeststellungsverfahren Konrad.....	15
3	Struktur und Elemente eines Langzeitsicherheitsnachweises	19
3.1	International.....	19
3.2	Umfang und Struktur einer Langzeitsicherheitsanalyse nach aktuellem Stand von Wissenschaft und Technik am Beispiel der VSG	25
3.3	Konrad.....	28
4	Wissenschaftliche Grundlagen	31
4.1	Sicherheits- und Nachweiskonzept	31
4.1.1	International.....	31
4.1.2	VSG.....	32
4.1.3	Konrad.....	33
4.2	Standortcharakterisierung (Modelldaten)	36
4.2.1	International.....	36
4.2.2	VSG.....	37
4.2.3	Konrad.....	37
4.3	Abfälle, Behälter- und Endlagerkonzepte	40
4.3.1	International.....	40
4.3.2	NAPRO/VSG	44
4.3.3	Konrad.....	46

5	System- und Sicherheitsanalysen	51
5.1	Szenarienanalyse	51
5.1.1	Geowissenschaftliche Standortprognose	51
5.1.2	Szenarienentwicklung	53
5.1.3	Umgang mit Human Intrusion	57
5.2	Integritätsanalyse.....	62
5.2.1	International.....	62
5.2.2	VSG.....	62
5.2.3	Konrad.....	64
5.3	Radiologische Konsequenzenanalyse	65
5.3.1	International.....	65
5.3.2	VSG / VerSi / EMIL	65
5.3.3	Konrad	70
5.4	Umgang mit Ungewissheiten, Indikatoren, Rückholbarkeit.....	75
5.4.1	Umgang mit Ungewissheiten	75
5.4.2	Indikatoren.....	79
5.4.3	Rückholbarkeit.....	82
6	Zusammenfassung	87
	Literaturverzeichnis	95
	Abbildungsverzeichnis	105
	Glossar	107

1 Einleitung

Die GRS untersucht im Rahmen des BMUB Forschungsvorhabens 3612R03410 „Untersuchung und Entwicklung von sicherheitstechnischen Bewertungen für Endlager für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung; Entwicklung und Bereitstellung des notwendigen Instrumentariums am Beispiel des Endlagers Konrad“ die Methodik von Sicherheitsanalysen zur Beherrschung von Störfällen und zur Langzeitsicherheit sowie mögliche Weiterentwicklungen der sicherheitstechnischen Bewertungen. Ziel ist es die Voraussetzungen zur Schaffung eines modernen Instrumentariums für Sicherheitsanalysen bzw. die Weiterentwicklungsmöglichkeiten der Methodik zur Durchführung von Störfallanalysen (AP 1) /HAR 15/ und Langzeitsicherheitsnachweisen (AP 2) anhand des Stands von Wissenschaft und Technik zu identifizieren. Die Ergebnisse beider Arbeitspakete werden in eigenständigen Berichten dargestellt, der vorliegende Bericht betrifft die Fortentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik bei Langzeitsicherheitsnachweisen.

Die Antragstellung für die Errichtung, den Betrieb und die Stilllegung eines Endlagers für radioaktive Abfälle basiert auf Sicherheitsnachweisen, die die aktuellen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Endlagersicherheit berücksichtigen. Die Vorgehensweise und Methodik, die der Durchführung von Sicherheitsanalysen und damit der Führung von Sicherheitsnachweisen zugrunde liegt, basiert auf dem jeweils gültigen Stand von Wissenschaft und Technik. Der Stand von Wissenschaft und Technik entwickelt sich, z. B. aufgrund von neuen Erkenntnissen aus Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, über die Zeit weiter. Solche Entwicklungen können auch Einzelaspekte der Sicherheitsnachweise betreffen.

Sicherheitsnachweise und die ihnen zugrunde liegenden Methoden müssen daher an die Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik (W+T) angepasst werden. Zu nennen sind hierbei auch neue wissenschaftlich abgesicherte Erkenntnisse, die es erlauben, früher getroffene konservative Annahmen zu substituieren. Vor diesem Hintergrund ist es erforderlich, dass auf der Seite der Behörden und der von ihnen beteiligten Gutachter die bestehenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten aufgearbeitet und fortschrittliche Sicherheitsansätze, Konzepte und Methoden auf wissenschaftlicher Grundlage für die Durchführung von Sicherheitsanalysen weiterentwickelt werden.

International befassen sich das "Forum on Stakeholder Confidence" (FSC) sowie die Arbeitsgruppe "Integration Group for the Safety Case" (IGSC) der OECD/NEA mit den gesellschaftlichen Anforderungen an die Vorgehensweise zur Realisierung eines sicheren Endlagers bzw. mit den wissenschaftlich-technischen Anforderungen an den Nachweis der Sicherheit eines Endlagers. Nach dem heutigen internationalen Stand der Erkenntnisse zu einer sicheren Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen kann der Nachweis der Sicherheit eines Endlagers in der Nachverschlussphase nicht nur an Hand sicherheitsanalytischer Argumente (Langzeitsicherheitsanalyse) geführt werden. Der Nachweis der Sicherheit eines Endlagers muss nach den derzeitigen internationalen Empfehlungen in einem umfangreichen analytischen Prozess (engl. Safety Case) durch die Zusammenführung aller Argumente, Fakten und Analyseergebnisse zur Begründung der Sicherheit des Endlagersystems sowie zum Vertrauen in die Sicherheitsaussage in allen Entwicklungsstufen eines Endlagers (Planung, Errichtung, Betrieb und vor Verschluss) erbracht werden.

Basis für die Langzeitsicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle ist die Auswahl eines geeigneten Standortes innerhalb einer adäquaten geologischen Gesamtsituation. Als wesentliche Standorteigenschaften sind die Langzeitstabilität und die Einschlusswirksamkeit des Wirtsgesteins in der Umgebung des Endlagerbergwerks, die hydrogeologisch-hydrochemischen sowie die strukturgeologischen, seismischen und tektonischen Eigenschaften zu untersuchen. Die Bewertung der Langzeitsicherheit eines Endlagers erfolgt dabei auf der Basis einer geologischen und geotechnischen Langzeitprognose mit dem Ziel, die zeitliche Entwicklung der Standorteigenschaften im Hinblick auf ihre Bedeutung für die Wirksamkeit des Barrierensystems abzuschätzen. Zur Beurteilung der Langzeitsicherheit müssen die sich mit der Zeit ändernden Standorteigenschaften dahingehend bewertet werden, ob der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle über den geforderten Nachweiszeitraum erhalten bleibt. Die Bewertung erfolgt auf Basis der Ergebnisse einer eingehenden Standorterkundung und -charakterisierung. Das zu betrachtende Endlagersystem umfasst das Endlagerbergwerk mit seinen Komponenten (z. B. Abfall, Verpackung, Versatz, geotechnische Verschlüsse), die Geosphäre (Wirtsgestein, Deckgebirge, Nebengestein) und die Biosphäre. Wesentliche Einflussgrößen für das Verhalten des Endlagersystems sind neben den Eigenschaften der geologischen und technischen Barrieren die Randbedingungen des Systems, u. a. die klimatischen Bedingungen.

In Deutschland wurden mit der Erstellung der Planfeststellungsunterlagen für das Endlager Konrad im Jahre 1990 und dem Forschungsvorhaben der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) im Jahre 2013 zwei Langzeitsicherheitsnachweise geführt, die den Entwicklungsstand der Nachweisführung zum jeweiligen Zeitpunkt widerspiegeln. In diesem Bericht wird anhand des Vergleichs beider Sicherheitsnachweise die Fortentwicklung des internationalen Standes von W&T aufgezeigt. Weiterhin wurden im Forschungsvorhaben „Vergleichende Sicherheitsanalysen“ (VerSi) im Jahre 2010 Elemente des Sicherheitsnachweises auf einer generischen Basis verwendet, um einen Vergleich von Standorten in unterschiedlichen Wirtsgesteinen zu ermöglichen.

In diesem Bericht erfolgt eine Analyse der Entwicklung des internationalen und nationalen Standes entsprechender Regelwerke und der Sicherheits- und Nachweisphilosophien bzw. -strategien zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern: Auf der Grundlage internationaler Empfehlungen erfolgt eine Spiegelung auf die VSG als Beispiel eines Endlagerkonzepts für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und dem Endlager Konrad als Beispiel eines Endlagers für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, welches als erstes Endlager für radioaktive Abfälle in Deutschland entsprechend den sicherheitstechnischen Anforderungen des Atomgesetzes genehmigt wurde. Die Methodik der Nachweisführung der Langzeitsicherheit für das Endlager Konrad dient in diesem Forschungsvorhaben als Beispiel und der Fortschritt des Standes von W&T wird vor dem Hintergrund von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Endlagersicherheit unter Berücksichtigung der Entwicklung fortschrittlicher Sicherheitsansätze, Konzepte und Methoden auf wissenschaftlicher Grundlage analysiert. Zu jedem Nachweiselement werden Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen dem Planfeststellungsverfahren Konrad und der VSG bzw. dem internationalen Stand herausgearbeitet und bewertet.

2 **Bewertungsgrundlagen**

2.1 **Internationale und nationale Empfehlungen zum Strahlenschutz**

Die Internationale Strahlenschutzkommission (ICRP - International Commission on Radiological Protection) erstellt als unabhängige, gemeinnützige Gesellschaft Empfehlungen und Leitlinien für den Schutz vor ionisierenden Strahlen. Die ICRP hat in verschiedenen Regelentwürfen zum Strahlenschutz bei der Endlagerung in tiefen geologischen Schichten, z. B. die ICRP 81/ /ICRP 98/ bzw. die weiterhin gültigen älteren Empfehlungen ICRP 46 /ICRP 85/ und ICRP 60 /ICRP 90/, ergänzt und konkretisiert. In ICRP 81 /ICRP 98/ wird als Bewertungsmaßstab die Individualdosis von 0,3 mSv/a oder ein Risikoäquivalent empfohlen. Die neuesten Empfehlungen ICRP 103 /ICRP 07/ bzw. ICRP 122 /ICRP 13/ stellen eine Weiterentwicklung und Klarstellung der bisherigen Konzeption des Strahlenschutzes dar. Im Wesentlichen bestätigen sie sowohl qualitativ als auch quantitativ die bisherigen Schätzungen für strahleninduzierte Gesundheitseffekte und die grundsätzlichen Strahlenschutzstrategien der Rechtfertigung, der Optimierung und der Begrenzung, die sich bewährt haben und im deutschen Strahlenschutzrecht verankert sind.

Speziell im Hinblick auf den Bewertungsmaßstab der Individualdosis für lange Analysezeiträume, wie bei der Endlagerung üblich, ist die ICRP der Auffassung, dass Expositionen, die in weiter Zukunft erfolgen, mit beträchtlichen Unsicherheiten behaftet sind. Daher sollen Dosis-Abschätzungen, die über Zeiträume von einigen hundert Jahren in die Zukunft hinausgehen, nicht als Maß für den strahlenbedingten Gesundheitsschaden betrachtet werden. Stattdessen sind sie eher als Indikatoren für die Einschusswirkung des Endlagersystems zu betrachten /ICRP 103/.

“In the very long term, dose and risk criteria should be used for the comparison of options rather than a means of assessing health detriment.” (aus ICRP 122 /ICRP 13/)

International haben sich zwei verschiedene Formen der Optimierung durchgesetzt:

a) Radiologische Optimierung

Die radiologische Optimierung fußt auf dem ALARA-Prinzip. Hiernach ist der Betreiber einer kerntechnischen Anlage dazu verpflichtet, auch unterhalb der einzuhaltenden radiologischen Grenzwerte, die Strahlenbelastung so niedrig zu halten, wie dies mit

„vernünftigen Mitteln zu erreichen ist“ (ALARA-Prinzip „As Low As Reasonably Achievable“ = Strahlenschutzprinzip der internationalen Strahlenschutzkommission ICRP (ICRP 60 /ICRP 90/). ALARA erfordert somit eine maßvolle Abwägung zwischen Strahlenschutz und anderen Schutzziele bzw. zwischen Aufwand und Nutzen = Effektivitätsgebot. Die radiologische Optimierung betrifft frühe Zeiträume, d.h. die Betriebs- und Stilllegungsphase, sowie ggf. den anfänglichen Teil der Nachbetriebsphase.

b) Sicherheitstechnische Optimierung

Aufgrund der langen Zeitspanne von Standortauswahl bis zum Verschluss des Endlagers muss der Fortentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik Rechnung getragen werden. Daher soll in bestimmten Zeitabständen geprüft werden, ob die Sicherheit eines Endlagers durch technische (z. T. auch organisatorische) Maßnahmen verbessert werden kann bzw. ob alternative Konzepte zu wählen sind. Die sicherheitstechnische Optimierung zielt dabei weniger auf die Reduzierung radiologischer Expositionen als auf die Steigerung der Robustheit eines Endlagersystems ab. Dabei soll ebenso wie bei der radiologischen Optimierung eine angemessene Aufwand-Nutzen-Relation beachtet werden.

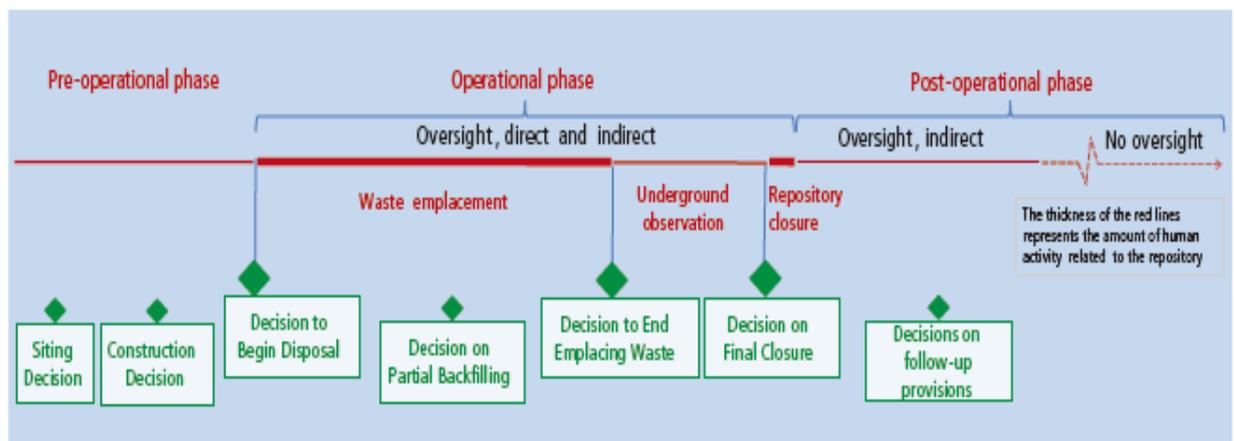


Abb. 2.1 Phasen eines Endlagerprogramms und der jeweiligen radiologischen Überwachung (aus /ICRP 13/)

Mit der ICRP 122 ‚Radiological Protection in Geological Disposal of Long-Lived Solid Radioactive Waste‘ /ICRP 13/ wurde das Ziel verfolgt, eine Grundlage für die Harmonisierung der internationalen Terminologie zu bieten, insbesondere hinsichtlich der bisher in internationalen Leitlinien der IAEO, ICRP und OECD/NEA im Zusammenhang

mit "Kontrolle (oversight)" (s. Abb. 2.1) Abb. 2.1 verwendeten unterschiedlichen Begriffe.

Die IAEA repräsentiert mit den im RADWASS-Programm erarbeiteten Empfehlungen und insbesondere mit den ‚Principles of Radioactive Waste Management‘ /IAEA 95/ die internationale Endlagerphilosophie und den Stand der Anforderungen an das Waste Management.

Die EU hat in ihren Regelwerken /EC 96, 99/ ebenfalls Schutzziele für die Langzeitsicherheit der Endlagerung festgelegt. Die neueste EU-Richtlinie 2013/59/Euratom des Rates von 2013 zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung hebt die Richtlinien 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom und 2003/122/Euratom auf. Es sind einheitliche Sicherheitsnormen für den Gesundheitsschutz der Bevölkerung und der Beschäftigten aufzustellen. Die Richtlinie gilt insbesondere für betriebliche Arbeiten im Umgang mit radioaktivem Material u. a. Herstellung, Erzeugung, Verarbeitung, Handhabung, Beseitigung, Verwendung, Lagerung, Besitz, Beförderung und Einfuhr in die Gemeinschaft bzw. Ausfuhr aus der Gemeinschaft. Neben allgemeinen Grundsätzen des Strahlenschutzes (u. a. Optimierungsinstrumente) enthält die Richtlinie u. a. Dosisrichtwerte für berufliche Expositionen, Expositionen der Bevölkerung und medizinische Expositionen. Sie legt Werte für eine Dosisbegrenzung fest und fordert sowohl eine Rechtfertigung als auch eine regulatorische Kontrolle der Tätigkeiten. Die grundlegenden Sicherheitsnormen folgen den neuen Empfehlungen der internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP), insbesondere der in der ICRP 103 eingeführten, auf Expositionssituationen beruhenden Konzepte.

Die EU-Richtlinie enthält folgende Mindestvorschriften zum Schutz der Umwelt (Artikel 65 Abs. 2):

„Darüber hinaus tragen diese Ableitungsgenehmigungen gegebenenfalls den Ergebnissen einer allgemeinen Untersuchung auf der Grundlage international anerkannter wissenschaftlicher Empfehlungen Rechnung, wenn eine solche Untersuchung von dem Mitgliedstaat vorgeschrieben wird, damit dargelegt wird, dass die Umweltkriterien für einen langfristigen Schutz der menschlichen Gesundheit eingehalten werden.“

Da diese Richtlinie Mindestanforderungen enthält, steht es den Mitgliedsstaaten frei, auch strengere Vorschriften zu erlassen.

Die Strahlenschutzverordnung – StrlSchV (Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen, /STV 01/) ist Bestandteil des deutschen Atomrechts (ATG) und stammt aus dem Jahr 1976. Sie wurde seitdem mehrfach dem aktuellen Stand der Wissenschaft angepasst. In der Strahlenschutzverordnung sind Dosisgrenzwerte für beruflich strahlenexponierte Personen und für die Bevölkerung festgelegt. Generell muss entsprechend der ICRP-Empfehlungen jede Anwendung ionisierender Strahlung in Deutschland gerechtfertigt sein und die Strahlenbelastung auch unterhalb der Grenzwerte so gering wie möglich gehalten werden, soweit dies mit angemessenen Maßnahmen erreichbar ist (ALARA-Prinzip). Nach § 46 der Strahlenschutzverordnung beträgt der Grenzwert für die effektive Dosis zum Schutz von Einzelpersonen der Bevölkerung 1 Millisievert im Kalenderjahr und bezieht alle Strahlenbelastungen durch kerntechnische und sonstige Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung sowie den Umgang mit radioaktiven Stoffen ein. Dieser Grenzwert gilt für die Summe der Strahlenexpositionen aus Direktstrahlung und der Strahlenexpositionen aus Ableitungen von kerntechnischen Anlagen, wobei die Strahlenbelastung aus einer einzelnen Anlage über die Belastungspfade Abwasser und Abluft jeweils den Wert von 0,3 Millisievert pro Jahr nach § 47 (früher § 45) der Strahlenschutzverordnung nicht überschreiten darf. Medizinische Strahlenanwendungen sind von diesen Begrenzungen ausgeschlossen. Dieser Grenzwert des § 45 (heute § 47) der Strahlenschutzverordnung wurde in den „Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk“ /BMI 83/ als radiologischer Bewertungsmaßstab für Langzeitsicherheitsanalysen (Individualdosis von 0,3 mSv/a) verwendet.

2.2 Sicherheitsanforderungen des BMUB an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle

Die Planung und Errichtung eines Endlagers für derartige Abfälle muss die nach dem Atomgesetz erforderliche Schadensvorsorge nach Stand von Wissenschaft und Technik treffen. Die 1983 im Bundesanzeiger veröffentlichten Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk /BMI 83/ entsprachen nach Ansicht der RSK nicht mehr dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik /RSK 02/ (s. Kap. 2.3). Insofern waren neue Anforderungen für die noch ausstehende Realisierung eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle zu erarbeiten. Die Sicherheitsanforderungen des BMUB /BMU 10/ an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle enthalten allgemeine, wirtsgesteinsübergreifende Vorgaben hinsichtlich des Sicherheitskonzeptes und Bewertungsmaßstäbe für die Prüfung der Genehmi-

gungsvoraussetzungen für ein neu zu errichtendes Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle. Sie berücksichtigen die Veröffentlichungen der internationalen Atomenergiebehörde (IAEA) und der internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP). Die Sicherheitsanforderungen beinhalten die Schutzziele, sowie Festlegungen zum schrittweisen Verfahren und zur Optimierung, zum Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen, Anforderungen an Sicherheitsanalysen und ihre Bewertung für den Betrieb und die Langzeitsicherheit, zur Endlagerauslegung und zum Sicherheitsmanagement und der Dokumentation.

An den Nachweis der Langzeitsicherheit werden u. a. folgende Anforderungen gestellt:

- Für die Nachverschlussphase wird der standortspezifische Nachweis der Sicherheit des Endlagersystems über einen Zeitraum von 1 Mio. Jahre gefordert.
- Der Nachweis muss alle Informationen, Analysen und Argumente, zur Langzeitsicherheit des Endlagers umfassen. Diese sind in der Bewertung zu belegen und das Vertrauen in diese Bewertung ist zu begründen.
- Es werden Einzelnachweise zur Langzeitsicherheitsaussage bzgl. der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, zur radiologischen Langzeitaussage, zur Robustheit technischer Komponenten des Endlagersystems und zum Ausschluss von Kritikalität gefordert.
- Im Einzelnen ist für die Nachverschlussphase nachzuweisen, dass durch die Freisetzung von Radionukliden, die aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen stammen
 - für wahrscheinliche Entwicklungen nur eine zusätzliche effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung im Bereich von 0,01 mSv im Jahr auftreten kann und
 - Für weniger wahrscheinliche Entwicklungen nur eine zusätzliche effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung im Bereich von 0,1 mSv im Jahr auftreten kann.

Weiterhin enthalten die Sicherheitsanforderungen Festlegungen zu folgenden Aspekten, die nachfolgend z. T. in verkürzter Form wiedergegeben sind.

Allgemeine Schutzziele und Sicherheitsprinzipien (Abschnitte 3 und 4):

Die allgemeinen **Schutzziele** betreffen

- a) den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen radioaktiver Abfälle sowie
- b) die Vermeidung unzumutbarer Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen.

Diese beiden Schutzziele sollen durch die Umsetzung folgender **Sicherheitsprinzipien** erreicht werden:

Zu a):

- Die radioaktiven und sonstigen Schadstoffe in den Abfällen müssen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich¹ konzentriert und eingeschlossen und damit möglichst lange von der Biosphäre ferngehalten werden.
- Das Endlagerkonzept muss sicherstellen, dass Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem Endlager langfristig die aus der natürlichen Strahlenexposition resultierenden Risiken nur sehr wenig erhöhen.
- Die Endlagerung darf die Artenvielfalt nicht gefährden. Dabei wird davon ausgegangen, dass auch terrestrische Ökosysteme sowie andere Spezies in ihrer Art geschützt werden, wenn der Mensch als Individuum vor ionisierender Strahlung geschützt ist.
- Die anderweitige Nutzung der natürlichen Ressourcen darf nicht unnötig eingeschränkt werden.
- Die Auswirkungen der Endlagerung auf Mensch und Umwelt dürfen außerhalb der Grenzen Deutschlands nicht größer sein als innerhalb Deutschlands zulässig.

Zu b):

- Das Endlager ist so zu errichten und so zu betreiben, dass für den zuverlässigen langfristigen Einschluss der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen

¹ Der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) ist der Teil des Endlagersystems, der im Zusammenwirken mit den technischen Verschlüssen (Schachtverschlüsse, Kammerabschlussbauwerke, Dammbauwerke, Versatz etc.) den Einschluss der Abfälle sicherstellt /BMU 10a/.

Gebirgsbereich in der Nachverschlussphase keine Eingriffe oder Wartungsarbeiten erforderlich werden.

- Es ist eine möglichst zügige Errichtung des Endlagers zu realisieren.
- Für Errichtung und Betrieb einschließlich Stilllegung des Endlagers müssen die finanziellen Mittel zeitgerecht zur Verfügung stehen.

Schrittweises Verfahren und Optimierung (Abschnitt 5):

Da zwischen der Festlegung des Standortes und der Stilllegung eines Endlagers mehrere Jahrzehnte vergehen, soll zu bestimmten Haltepunkten, insbesondere vor wesentlichen Entscheidungen zum weiteren Vorgehen, dem Erkenntniszuwachs zum Endlagersystem und dem fortgeschrittenen Stand von Wissenschaft und Technik Rechnung getragen werden. Dabei soll eine ausgewogene Optimierung der Konzeption und der Auslegung eines Endlagers erfolgen, bei der folgende Optimierungsziele zu berücksichtigen und gegeneinander abzuwägen sind:

- Strahlenschutz für die Betriebsphase
- Langzeitsicherheit
- Betriebssicherheit des Endlagers
- Zuverlässigkeit und Qualität des langfristigen Einschlusses der Abfälle
- Sicherheitsmanagement
- technische sowie finanzielle Realisierbarkeit

Ein weiteres Optimierungsziel, die zuverlässige Isolation der radioaktiven Stoffe im Endlager von zukünftigen menschlichen Aktivitäten, zum Beispiel bei einem unbeabsichtigten Eindringen in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich, ist ebenfalls, jedoch nachrangig zu den oben genannten Optimierungszielen zu berücksichtigen.

Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Abschnitt 6):

Die Gewährleistung des Strahlenschutzes in der Betriebsphase eines Endlagers (Einslagerungs- und Stilllegungsbetrieb) für Beschäftigte und Bevölkerung wird durch die entsprechenden Vorgaben des Atomgesetzes /ATG 10/ und die entsprechenden untergesetzlichen Verordnungen, insbesondere die Strahlenschutzverordnung /STV 01/

einschließlich der Vorgabe entsprechender radiologischer Bewertungskriterien, geregelt. Die Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ konzentrieren sich daher auf die Vorgabe von Bewertungskriterien für den Schutz zukünftiger Generationen vor ionisierender Strahlung in der Nachverschlussphase eines Endlagers, die die oben genannten Regelwerke nicht enthalten. Grundprinzip hierbei ist, dass die in den radioaktiven Abfällen enthaltenen Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich in der Nachverschlussphase so eingeschlossen sein müssen, dass sie dort verbleiben und allenfalls geringfügige Stoffmengen diesen Gebirgsbereich verlassen (Geringfügigkeitsprinzip).

Der Zahlenwert der radiologischen Bewertungskriterien richtet sich nach der Wahrscheinlichkeitsklasse der jeweils betrachteten Entwicklung des Endlagersystems. Im Einzelnen ist für die Nachverschlussphase nachzuweisen, dass durch die Freisetzung von Radionukliden, die aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen stammen

- für wahrscheinliche Entwicklungen nur eine zusätzliche effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung im Bereich von 10 Mikrosievert im Jahr auftreten kann,
- für weniger wahrscheinliche Entwicklungen nur eine zusätzliche effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung im Bereich von 0,1 Millisievert im Jahr auftreten kann.

Dabei sind jeweils Einzelpersonen mit einer heutigen Lebenserwartung, die während der gesamten Lebenszeit exponiert werden, zu betrachten.

Für unwahrscheinliche Entwicklungen oder solche aufgrund eines unbeabsichtigten Eindringens in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich werden in /BMU 10/ keine Werte für zumutbare Risiken oder zumutbare Strahlenexpositionen festgelegt. Allerdings ist für diese Entwicklungen im Rahmen der Optimierung zu prüfen, ob eine Reduzierung dieser Auswirkungen mit vertretbarem Aufwand möglich ist.

Anforderungen an Sicherheitsanalysen und ihre Bewertung für Betrieb und Langzeitsicherheit (Abschnitt 7):

Abschnitt 7 der Sicherheitsanforderungen des BMUB enthält inhaltliche Anforderungen an die Nachweise, die die Betriebs- und die Nachverschlussphase eines Endlagers betreffen:

a) Betriebliche Sicherheitsnachweise:

Für den unter radiologischen Gesichtspunkten sicheren Betrieb eines Endlagers während der Einlagerungs- und Stilllegungsphase wird ein umfassender Sicherheitsnachweis für alle Betriebszustände des Endlagers gefordert. Dabei sind anlagenspezifische Sicherheitsanalysen unter Berücksichtigung definierter Auslegungsstörfällen durchzuführen, die den gemäß Strahlenschutzverordnung notwendigen Schutz von Betriebspersonal, Bevölkerung und Umwelt belegen.

b) Langzeitsicherheitsnachweis:

Für die Nachverschlussphase wird der standortspezifische Nachweis der Sicherheit des Endlagersystems über einen Zeitraum von 1 Mio. Jahre gefordert. Dieser Nachweis muss alle Informationen, Analysen und Argumente, die die Langzeitsicherheit des Endlagers belegen, umfassen und hat das Vertrauen in diese Bewertung zu begründen. Diese Bewertung und deren Dokumentation müssen insbesondere folgende Aspekte umfassen

- Die qualitätsgesicherte Erhebung von Daten und Informationen aus Standorterkundung, Forschung und Entwicklung.
- Das zugrunde liegende Endlagerkonzept und die qualitätsgesicherte Umsetzbarkeit der Anforderungen an technische Barrieren.
- Die umfassende Identifizierung und Analyse sicherheitsrelevanter Szenarien und ihre Einordnung in Wahrscheinlichkeitsklassen.
- Die Identifizierung, Charakterisierung und Modellierung sicherheitsrelevanter Prozesse sowie die diesbezügliche Vertrauensbildung und Qualifizierung der Modelle.
- Die Darstellung und Umsetzung einer systematischen Strategie zur Identifizierung, Bewertung und Handhabung von Ungewissheiten.

Konkret werden in Bezug auf die Langzeitsicherheit in /BMU 10/ folgende Einzelnachweise gefordert:

- Langzeitaussage zur Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs,
- radiologische Langzeitaussage,
- Nachweis der Robustheit technischer Komponenten des Endlagersystems,
- Ausschluss von Kritikalität.

Endlagerauslegung (Abschnitt 8):

Abschnitt 8 enthält neben dezidierten Anforderungen an die Sicherheitsnachweise für die Betriebsphase eines Endlagers (Abschnitt 8.1) Anforderungen, die im Wesentlichen bei der Betriebsführung und bei der Endlagerauslegung zu berücksichtigen sind und die Langzeitsicherheit in der Nachverschlussphase betreffen:

- Die Festlegung der Grenzen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und die Forderung nach Minimierung der Durchörterung bei der Auffahrung von Einlagerungs- und Infrastrukturbereichen des Endlagerbergwerks (Abschnitte 8.2 und 8.3).
- Die Forderung nach räumlicher und zeitlicher Trennung von bergmännischen Arbeiten und radiologisch relevanten Tätigkeiten (Abschnitt 8.4).
- Die Forderung, die Anzahl gleichzeitig offener Einlagerungsbereiche möglichst gering zu halten (Abschnitt 8.5).
- Forderung der Rückholbarkeit der eingelagerten Abfallbehälter und ihrer Bergbarkeit über einen Zeitraum von 500 Jahren, wobei die hierzu erforderlichen Maßnahmen die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen dürfen (Abschnitt 8.6).
- Anforderungen an ein robustes, gestaffeltes Barrierensystem welches redundant und diversitär wirkt, seine Funktionen passiv und wartungsfrei erfüllt und seine Funktionstüchtigkeit selbst für den Fall in ausreichendem Maße beibehält, wenn einzelne Barrieren nicht ihre volle Wirkung entfalten (Abschnitt 8.7).
- Die Forderung nach einem umsetzbaren Stilllegungskonzept (Abschnitt 8.8).

Sicherheitsmanagement und Dokumentation (Abschnitte 9 und 10):

Die Festlegungen zum Sicherheitsmanagement betreffen Ziel, Art und Umfang des Sicherheitsmanagements während des Endlagerbetriebes. Abschnitt 9 stellt insbesondere Anforderungen an die Organisationsstruktur des Betreibers, die kontinuierliche Qualitätssicherung, den langfristigen Wissenstransfer sowie die Qualifikation des beschäftigten Personals.

Der letzte Abschnitt enthält Anforderungen an Art und Umfang, Pflege, Aufbewahrung und Zuständigkeiten bei der Dokumentation sicherheitserheblicher Informationen und Daten zum Endlagersystem, insbesondere im Hinblick auf den langfristigen Informationserhalt für zukünftige Generationen.

2.3 Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk /BMI 83/ und ihre Anwendung im Planfeststellungsverfahren Konrad

In den Langzeitsicherheitsanalysen zum Endlager Konrad wurde auf Basis der Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk /BMI 83/ und der Strahlenschutzverordnung /STV 01/ als radiologischer Bewertungsmaßstab die Individualdosis von 0,3 mSv/a über den gesamten betrachteten Zeitraum in der Nachbetriebsphase zugrunde gelegt. Die Sicherheitskriterien wurden für die Endlagerung allgemein, d.h. für alle Arten von radioaktiven Abfällen aufgestellt. Daher erstreckt sich ihr materieller Gültigkeitsbereich auch auf vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle.

Die Sicherheitskriterien des BMI betreffen nicht nur die Betriebssicherheit und die Langzeitsicherheit sondern enthalten auch geowissenschaftliche Anforderungen an den Standort sowie Anforderungen an die Standorterkundung. In diesem Aspekt gehen sie über den Inhalt der neuen Sicherheitsanforderungen des BMUB /BMU 10/ hinaus, deren zeitlicher Geltungsbereich sich auf das Genehmigungsverfahren eines bereits ausgewählten Endlagerstandortes beschränkt. Ein weiterer Unterschied ist, dass die Sicherheitskriterien des BMI keine Rückholbarkeit eingelagerter radioaktiver Abfälle vorsehen. Bezüglich des radiologischen Schutzziels für die Nachbetriebsphase werden die Grenzwerte des § 45 (heute § 47) der Strahlenschutzverordnung angesetzt. Hier wird für Ableitungen aus kerntechnischen Anlagen für Einzelpersonen der Bevölkerung eine maximale effektive Jahresdosis von 0,3 mSv festgesetzt.

Seit der Veröffentlichung der „Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk“ im Jahre 1983 wurden die internationalen Empfehlungen und Normen zum Strahlenschutz und zur Endlagerung wesentlich überarbeitet und fortgeschrieben. In einer gemeinsamen Stellungnahme von RSK und SSK im Jahr 2002 /RSK 02/ wurden die Sicherheitskriterien des BMI als nicht mehr dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechend bewertet und der Bedarf einer Überarbeitung und Anpassung an den Stand von Wissenschaft und Technik wie auch der Harmonisierung mit der internationalen Entwicklung gesehen. Die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 10/ (s. o) stellen aus Sicht der ESK dagegen Anforderungen nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik dar /ESK 13/. Im Gegensatz zu den Sicherheitskriterien des BMI ist der materielle Geltungsbereich allerdings – wie bereits erwähnt – auf ein neu zu errichtendes Endlagerbergwerk für wärmeentwickelnde Abfälle beschränkt.

Mit der Veröffentlichung der Sicherheitsanforderungen hat das BMUB dem Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) aktuelle Maßstäbe für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle vorgegeben und einen Diskussionsprozess abgeschlossen, der mit der Klärung der sicherheitstechnischen Fragestellung begonnen wurde. Sie dienen als Bewertungsmaßstab für die Genehmigung eines Endlagers. Die Sicherheitsanforderungen konkretisieren den Stand von Wissenschaft und Technik, der bei Errichtung, Betrieb und Verschluss eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle einzuhalten und von der jeweiligen Genehmigungsbehörde zu prüfen ist und sind damit der Maßstab für die Sicherheit eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle. Sie dienen dem BfS als Planungsgrundlage für die Eignungsprüfung eines noch zu suchenden Standortes und die Auslegung eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle.

Zentrale Unterschiede zu den Sicherheitskriterien aus dem Jahr 1983 /BMI 83/ sind:

- Für eine Million Jahre muss gezeigt werden, dass allenfalls sehr geringe Schadstoffmengen aus dem Endlager freigesetzt werden können. Hierzu muss die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nachgewiesen und das vom Endlager ausgehende Risiko bewertet und dargestellt werden.
- Die Sicherheit des Endlagers muss von der Planung bis zum Verschluss des Endlagers einem kontinuierlichen Optimierungsprozess mit periodischen Sicherheitsüberprüfungen unterworfen werden.

- Es muss ein Mehrbarrierensystem realisiert werden, das den im kerntechnischen Bereich üblichen Prinzipien der Redundanz (doppelte Sicherheitssysteme) und Diversität (unabhängige Wirkmechanismen) folgt.
- Es muss ein Kontroll- und Beweissicherungsprogramm auch nach Stilllegung des Endlagers durchgeführt werden.
- Während der Betriebszeit des Endlagers muss die Rückholbarkeit der radioaktiven Abfälle möglich sein. Im Notfall müssen die Behälter auch 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers geborgen werden können.
- Die Sicherheitsanforderungen gelten für die Genehmigung eines Endlagers, dessen Standort bereits ausgewählt ist. Insofern werden keine Standortauswahl- und Erkundungskriterien festgelegt.

Die Schachanlage Konrad ist als Endlager ausschließlich für vernachlässigbar wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle vorgesehen. Insofern ist sie vom materiellen Gültigkeitsbereich der Sicherheitsanforderungen des BMUB nicht betroffen. Andererseits kommt die ESK in einer Stellungnahme zum Stand von Wissenschaft und Technik des Langzeitsicherheitsnachweises zum Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) zum Ergebnis, dass sich aus den Sicherheitsanforderungen keine grundsätzlich anderen Anforderungen an das Sicherheitsniveau oder an den Umfang und die Qualität der Datenerhebung und der Nachweisführung als bei Endlagern für wärmeentwickelnde Abfälle ergeben /ESK 13/.

Selbst wenn man die Anwendbarkeit der „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver“ Abfälle des BMUB als aktueller regulatorischer Maßstab auf ein bestehendes Endlager mit radioaktiven Abfällen vernachlässigbarer Wärmeentwicklung erweitern, wären einige Anforderungen nicht oder nur eingeschränkt übertragbar, weil sie sich auf für Konrad nicht gegebene Sachverhalte beziehen. Dies betrifft u.a.

- Die Rückholbarkeit oder der Bergbarkeit von Abfällen, die in /BMU 10/ und auch im Vorhaben VSG nur auf die wärmeentwickelnden Abfälle bezogen wurden.
- Die Tatsache, dass es sich bei dem Endlager Konrad um eine bereits genehmigte Anlage handelt, wobei keine Freiheitsgrade für die Optimierung bei der Standortauswahl und der Endlagerauslegung bestehen. Dadurch finden die in /BMU 10/ genannten Dosisziele keine Anwendung, da diese nur für Neu-

lagen in einem neu aufzufahrenden Bergwerk unter Berücksichtigung der genannten Optimierungsziele gelten.

- Die für wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Entwicklungen festgelegten radiologischen Schutzkriterien, da diese dezidiert nur für Endlagersysteme an neu zu suchenden Standorten gelten.

Aus der Tatsache, dass auf der einen Seite die Dosischutzziele aus den Sicherheitsanforderungen des BMUB aus den oben genannten Gründen nicht für Endlager für vernachlässigbare wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle herangezogen werden können, auf der anderen Seite aber keine Aktualisierung der Sicherheitskriterien /BMI 83/ für Endlager für vernachlässigbare wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle bisher erfolgt ist, muss davon ausgegangen werden, dass der in § 47 (früher § 45) der Strahlenschutzverordnung /STV 01/ festgelegte Grenzwert einer effektiven Jahresdosis für Einzelpersonen von 0,3 mSv/a nach wie vor Bestand hat.

In Hinblick auf die in Konrad als radiologischer Bewertungsmaßstab angewendete Individualdosis können neben den Dosisgrenzwerten über die Belastungspfade Abwasser und Abluft aus einer kerntechnischen Anlage der gültigen Strahlenschutzverordnung auch die Berichte der ICRP herangezogen werden. In ICRP 103 /ICRP 07/ bzw. ICRP 122 /ICRP 13/ werden keine Veränderungen der Dosis-Grenzwerte empfohlen. Danach gelten weiterhin die den Langzeitsicherheitsanalysen zu Konrad zugrundeliegenden Bewertungsmaßstäbe:

“In application of the optimisation principle, the radiological criterion for the design of a waste disposal facility recommended by ICRP is an annual dose constraint for the population of 0.3 mSv per year.”

Dieser Bewertungsmaßstab wird von der ICRP somit nicht als Dosisgrenzwert (dose limit) sondern als Dosisbeschränkung (dose constraint) empfohlen, der schon eine ausreichende Optimierung des Strahlenschutzes einschließt.

3 Struktur und Elemente eines Langzeitsicherheitsnachweises

3.1 International

Empfehlungen der Internationalen Atomenergie-Behörde (IAEA) und Arbeiten der Nuklearenergie-Agentur (NEA) der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) bilden die Grundlage der Definition von internationalen Sicherheitsstandards für die Endlagerung radioaktiver Stoffe. Eine detaillierte Auswertung des internationalen Standes von W&T bei der Führung eines Langzeitsicherheitsnachweises wurde bereits im Rahmen des Vorhabens SR2548 von der GRS auf der Basis der Anforderungen an den Safety Case der beiden internationalen Organisationen OECD-NEA und IAEA vorgenommen /KIN 08/. In diesem Bericht wurden die in den jeweiligen nationalen Regelwerken formulierten Anforderungen an den Safety Case sowie die Umsetzung des Safety Case – Gedankens in den entsprechenden Sicherheitsanalysen ausgewertet. Die vorgenommene Auswertung zeigte, dass den internationalen Empfehlungen hinsichtlich der Anforderungen an die Umsetzung eines Safety Case auf nationaler Ebene weitestgehend gefolgt wird. Die Kernpunkte der internationalen Empfehlungen finden sich den jeweiligen nationalen gesetzlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen entsprechend in unterschiedlichem Detaillierungsgrad in den nationalen Regelwerken wieder.

Nachfolgend werden die neusten Entwicklungen in den Empfehlungen der internationalen Organisation OECD-NEA und IAEA beschrieben.

OECD-NEA

Unter Safety Case im Sinne der NEA wird die Synthese der Fakten, Analysen und Argumente verstanden, die zusammen den Nachweis der Sicherheit des Endlagers während des Betriebs, nach Verschluss, respektive nach der Beendigung der Überwachung erbringen.

In ihren Berichten „Nature and purpose of the safety case“ /NEA 04/ und „The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories“ /NEA 13/) gibt die NEA einen Überblick über die Beziehungen zwischen den unterschiedlichen Elementen eines Safety Case. Dabei werden bei allen Entwicklungsstufen eines Endlagers (Planung, Errichtung, Betrieb und vor Verschluss) Sicherheitsbewertungen vor-

genommen. Unter Safety Case im eigentlichen Sinne wird die Synthese der Fakten, Analysen und Argumente verstanden, die zusammen den Beweis der Sicherheit des Endlagers nach Verschluss respektive nach der Beendigung der Überwachung erbringen. Einen Überblick über die Beziehungen zwischen den unterschiedlichen Elementen eines Safety Case zeigt die Abb. 3.1 aus /NEA 04/. Die Sichtweise, den Zusammenhang von Sicherheitsfunktionen, Indikatoren und Geosynthesen im Safety Case gemeinsam im Sinne eines Bündels von Nachweissträngen (Multiple Lines of Evidence) zur Vertrauensbildung darzustellen, ist internationaler Stand von Wissenschaft und Technik. In der jüngsten Zeit wird diskutiert, ob mit dem Safety Case nicht eher die vollständige Analyse als der eigentliche Nachweis gemeint ist. Im europäischen Sprachgebrauch wird deshalb in neuester Zeit deshalb auch der Begriff „safety demonstration“, verwendet /EUR 15/.

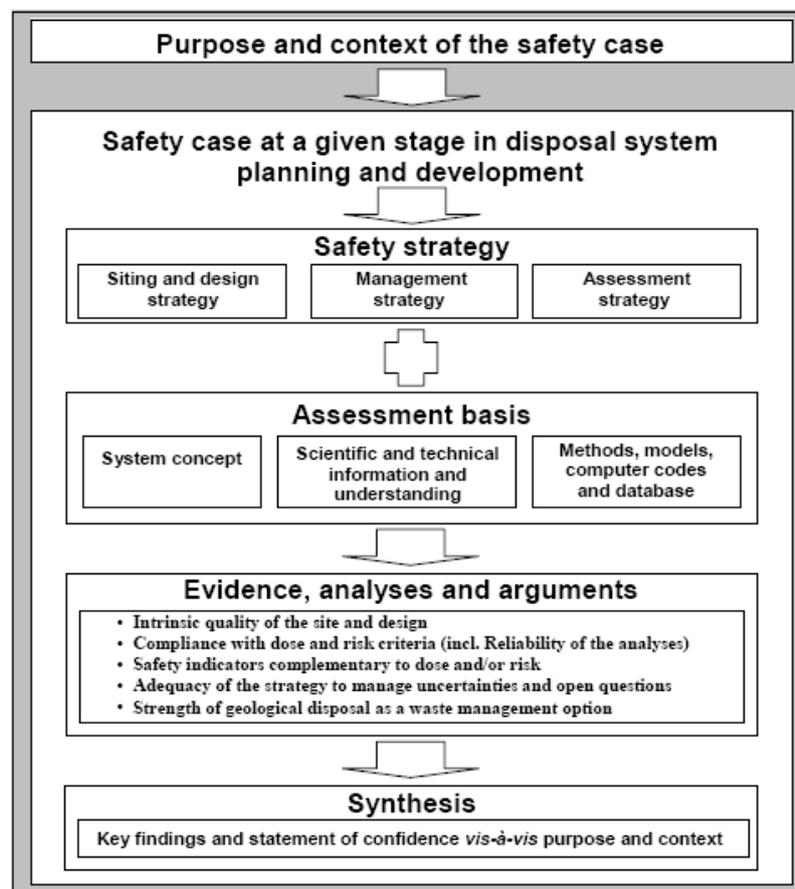


Abb. 3.1 Elemente und Ablauf eines Safety Case (Quelle /NEA 04/)

Ein Update des Berichtes /NEA 04/ wurde mit der Broschüre „The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories“ /NEA 13/ publiziert. Aufbauend auf den in den folgenden Jahren nach /NEA 04/ durchgeführten Arbeiten inte-

griert sie die Erfahrungen des OECD/NEA Radioactive Waste Management Committee (RWMC) und der Integration Group for the Safety (IGSC). Weiterhin stellt der Bericht den Stand W&T bezüglich der Erkenntnisse (s. Abb. 3.2) aus folgenden Initiativen und Tagungen zusammen:

- NEA Symposiums of Safety Case Preparation in den Mitgliedstaaten /NEA 08/,
- NEA Initiative "International Experience in Safety Case for Geological Repositories (INTESC)" /NEA 09/,
- NEA Initiative "Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste (MeSA)" /NEA 12/,
- EC- Projectes PAMINA "Performance Assessment Methodologies in Application to Guide the Development of the Safety Case" /EC 11/
- und einer Reihe von Sicherheitsberichten, die von nationalen Waste Management Organisationen vorgelegt wurden und nationalen bzw. internationalen Peerreviews unterzogen wurden.

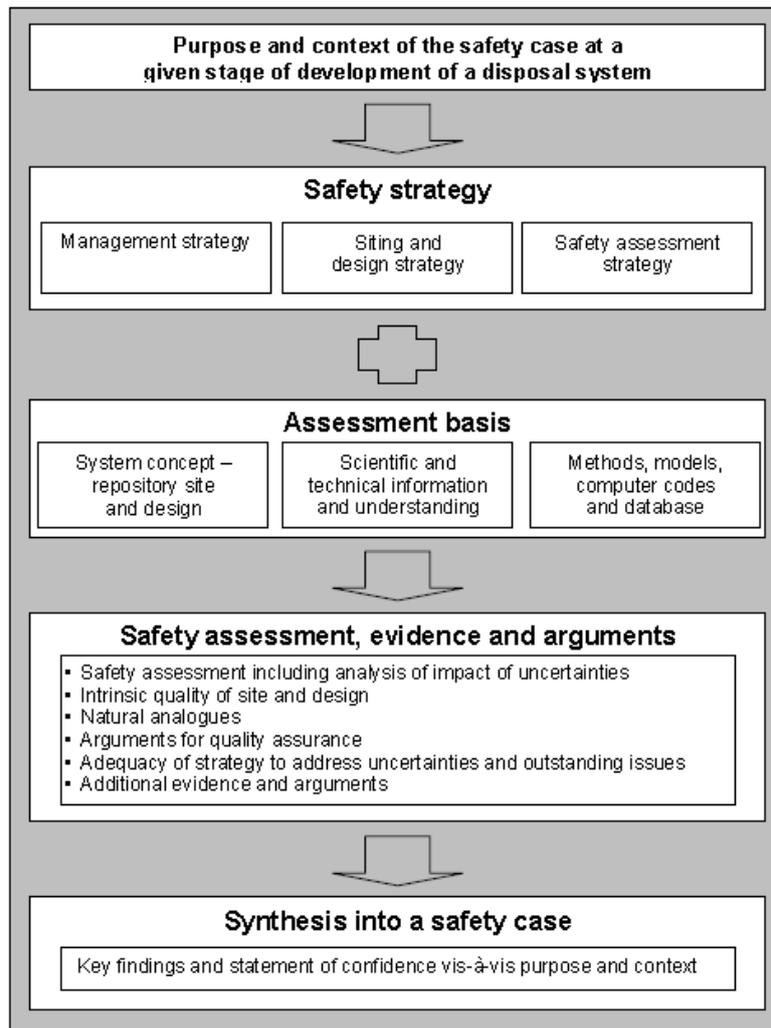


Abb. 3.2 Elemente eines Safety Case (Quelle /NEA 13/)

Ein Vergleich der Abb. 3.1 und Abb. 3.2 zeigt, dass der Entwicklungsstand der einzelnen Nachweiselemente des Safety Case für jede Entwicklungsstufe eines Endlagers im Zeitraum von 10 Jahren relativ unverändert geblieben ist.

IAEA

Den 'Safety Requirements' WS R-4 „Geological Disposal of Radioactive Wastes“ der IAEA /IAEA 06/ und den 'International Standard for Geological Repositories' /IAEA 11/ liegen die 'Safety Principles' der IAEA /IAE 95/² zugrunde. Diese Principles wurden in der Joint Convention /IAEA 97/ technisch umgesetzt. Im WS R-4 werden dem Stand

² Die der Endlagerung zugrunde liegenden Safety Principles der IAEA wurden weiter gefasst und in einen breiteren Anwendungsrahmen gestellt. 2006 wurden sie als Safety Fundamentals /IAEA 06a/ veröffentlicht.

von Wissenschaft und Technik entsprechende Anforderungen an die geologische Endlagerung formuliert, insbesondere betrifft dies den Schutz von Mensch und Umwelt und die Sicherheitsanforderungen:

Der Schutz von Mensch und Umwelt wird gewährleistet durch:

- Managementprinzipien
- Strahlenschutz während der Betriebsphase
- Strahlenschutz in der Phase nach Verschluss des Endlagers
- umweltbezogene und nicht-radiologische Aspekte

Die Sicherheitsanforderungen umfassen insbesondere:

- Sicherheitsvorgaben an die Planung
- Rechtliches und organisatorisches Rahmenwerk
- Sicherheitsverständnis
- Sicherheitsprinzipien
- Rahmenbedingungen für die geologische Endlagerung
- Sicherheitsnachweis und Sicherheitsbegründung
 - Anforderungen an: Endlagerentwicklung, Endlagerbetrieb, Verschluss des Endlagers, Vertrauen in die Sicherheit und Safeguards

Nach IAEA ist das Konzept des Safety Case, wie es z. B. in SSG-23 /IAEA 12/ beschrieben ist, für alle Arten von radioaktiven Abfällen und Typen von Entsorgungseinrichtungen anwendbar. Die Hauptkomponenten des Safety Case beschreibt die IAEA in der folgenden Abb. 3.3.

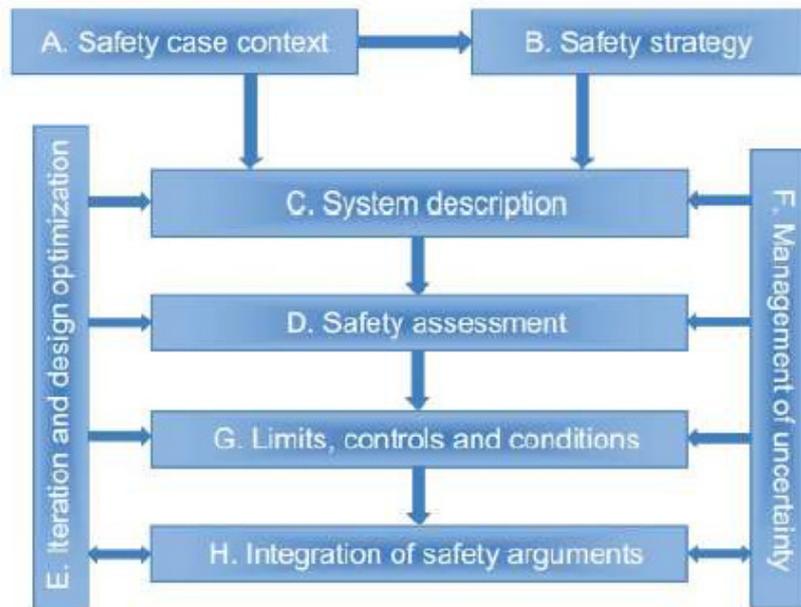


Abb. 3.3 Komponenten des Safety Case (Quelle SSG-23, /IAEA 12/)

Wie in SSG-23 beschrieben, enthält der Safety Case folgende Elemente (key elements):

- Radiological impact assessment for the period after closure,
- Site and engineering aspects,
- Passive safety,
- Multiple safety functions,
- Robustness,
- Scientific and engineering principles,
- Quality of the site characterization,
- Operational safety aspects,
- Non-radiological environmental impact,
- Management system.

Ein wesentliches Charakteristikum des Entwicklungsprozesses eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen ist die schrittweise Implementierung des Endlagers („step wise approach“). International besteht weitgehend Konsens darüber, dass die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ein schrittweise durchgeführter Pro-

zess ist, der nach jedem Schritt Haltepunkte zur Überprüfung des Konzeptes, vor allem vor dem Hintergrund des sich ständig weiterentwickelnden Standes von W+T vorgibt und damit die Entscheidung zur Durchführung des nächsten Schrittes explizit ermöglicht. In den meisten nationalen Entsorgungsprogrammen sind Haltepunkte nach der Standortauswahl, der Konzeptentwicklung, der Endlagererrichtung, einer Funktionsprüfung (Demonstrationsphase), der Einlagerung der Abfälle sowie bei Verfüllung und Verschluss des Endlagers vorgesehen. Damit kann ein Endlagerprogramm auf neue technische Entwicklungen im Sinne einer Optimierung angemessen reagieren und flexibel durchgeführt werden. Vor Einleitung eines jeden Schrittes kann grundsätzlich darüber entschieden werden, ob bereits getroffene Entscheidungen zurückgenommen werden und z. B. Maßnahmen wie etwa die Bergung eingelagerter Abfälle notwendig sind.

Es ist Aufgabe der Regierungen der einzelnen Länder auf der Basis dieser Empfehlungen der IAEA den gesetzlichen und regulatorischen Rahmen für die geologische Endlagerung vorzugeben. Der international in den nationalen Endlagerprogrammen etablierte schrittweise Entwicklungsprozess („step wise approach“) hat in den Sicherheitsanforderungen insoweit Eingang gefunden, dass die Konzeption bzw. Auslegung des Endlagers schrittweise unter Abwägung von Optimierungszielen zu entwickeln sind.

3.2 Umfang und Struktur einer Langzeitsicherheitsanalyse nach aktuellem Stand von Wissenschaft und Technik am Beispiel der VSG

Die Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) stellt ein Beispiel dar, welches den aktuellen Stand von W&T bzgl. Langzeitsicherheitsanalysen reflektiert. In der VSG wurden die Sicherheitsanforderungen des BMUB für wärmeentwickelnde Abfälle von 2010 /BMU 10/ erstmalig als regulatorischer Maßstab zugrunde gelegt. Auf Basis eines für die VSG entwickelten Sicherheitskonzeptes und der ersten Ergebnisse der Sicherheitsanalysen wurde die Konzeption bzw. Auslegung des Endlagers schrittweise unter Abwägung von Optimierungszielen fortentwickelt.

Aufbauend auf den Sicherheitsanforderungen des BMUB lagen ihm drei Leitgedanken für die Erreichung der sicheren und langfristigen Endlagerung zugrunde:

- Es soll ein möglichst weitgehender Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich um die Abfälle herum erreicht werden.

- Der Einschluss soll möglichst bald nach Verschluss des Endlagerbergwerks wirksam werden und durch das Endlagersystem dauerhaft und nachsorgefrei sichergestellt sein.
- Der dauerhafte Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich um die Abfälle soll vorrangig durch die Begrenzung des Zutritts von Lösungen zu den Abfällen erreicht werden.

Das Nachweiskonzept umfasst in Übereinstimmung mit den Sicherheitsanforderungen des BMUB das Vorgehen zur Ausweisung der Lage und Grenze eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG), den Erhalt des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Nachweiszeitraum, den Einschluss der Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich und die radiologischen Konsequenzen in der Biosphäre.

Im Sinne einer Langzeitsicherheitsanalyse als wesentlicher Bestandteil eines Langzeitsicherheitsnachweises geht die VSG in Teilbereichen über Inhalte einer reinen Sicherheitsanalyse hinaus. Dies betrifft z. B. die Beurteilung der Qualität geowissenschaftlicher Daten, die Bestandsaufnahme und Charakterisierung von Abfällen, die Entwicklung von Endlagerkonzepten oder Definition eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes.

Die in der VSG entwickelte Vorgehensweise (Struktur s. Abb. 3.4) folgt in ihren Elementen der Nachweisführung weitgehend den Empfehlungen, der Nuclear Energy Agency (NEA) der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD), wie z. B. in /NEA 13/ formuliert worden sind. Die Elemente des Nachweises der Langzeitsicherheit wurden in der Vorhabensstruktur entsprechend der Elemente des Safety Case den vier Ebenen (Grundlagen, Endlagerplanung und -auslegung, Systemanalyse sowie Synthese und Empfehlungen) zugeordnet. Die Vorgehensweise reflektierte auch die Erkenntnis aus /BFS 05/, dass im Rahmen von Sicherheitsnachweisen die geologischen und technischen Barrieren eines Endlagers als integriertes System und die Wechselwirkungen zwischen Abfall und Wirtsgestein, u. a. auf Basis eines entsprechend auf die Standortverhältnisse zugeschnittenen Endlagerkonzeptes, zu berücksichtigen sind. Den gesamten Umfang aller Aspekte eines Safety Case bildet die VSG jedoch nicht ab. So erfolgte beispielsweise keine systematische Zusammenstellung von Begleitargumenten (Indikatoren), die die Ergebnisse der Langzeitsicherheitsanalyse stützen oder untermauern.

In der VSG wurden Elemente des Nachweises der Sicherheit (Safety Case) den folgenden vier Ebenen zugeordnet.

- Ebene 1: Grundlagen
 - Geowissenschaftliche Standortbeschreibung und Langzeitprognose
 - Abfallspezifikation und -mengengerüst
 - Sicherheits- und Nachweiskonzept
- Ebene 2: Endlagerplanung und -auslegung
 - Entwicklung initialer Endlagerkonzepte
 - Endlagerauslegung und -optimierung
 - Einschätzungen zur Betriebssicherheit
- Ebene 3: Systemanalyse
 - FEP-Katalog
 - Szenarientwicklung
 - Integritätsanalysen
 - Radiologische Konsequenzenanalyse
 - Bewertung Human Intrusion
- Ebene 4: Synthese und Empfehlungen
 - Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse (Synthese i.e.S.)
 - Empfehlungen

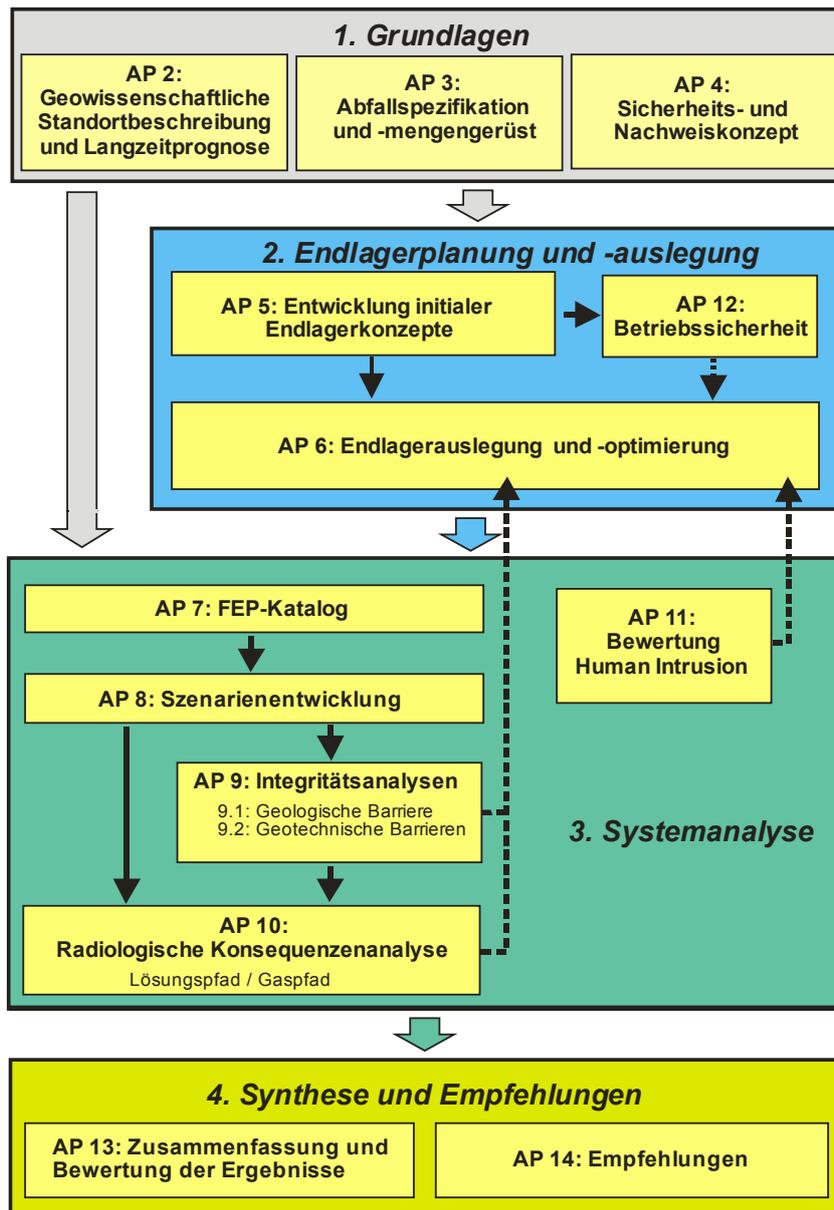


Abb. 3.4 Strukturplan des Vorhabens VSG aus /FIS 13/

3.3 Konrad

International setzt die Definition des Safety Case ein stufenweises Genehmigungsverfahren von der Endlagersuche bis zum Verschluss des Endlagers voraus. Im Planfeststellungsverfahren Konrad wurde im Gegensatz zu diesem international verfolgten „step wise approach“ prinzipiell die Implementierung des Endlagers in einem Schritt durchgeführt, wobei die Genehmigung einen konzentrierenden Effekt hinsichtlich verschiedener Gesetzesfelder beinhaltet. In § 9b Atomgesetz ist festgelegt, dass die Errichtung und der Betrieb von Endlagern für radioaktive Abfälle der Planfeststellung

bedürfen. Hierzu gehören eine Umweltverträglichkeitsprüfung und eine Öffentlichkeitsbeteiligung. Im Ergebnis wird im Planfeststellungsbeschluss festgestellt, ob die Zulässigkeit eines solchen Vorhabens unter Einschluss aller sonst erforderlichen Genehmigungen, Erlaubnisse usw. (Ausnahme: Bergrecht, Wasserrecht) gegeben ist. Die Genehmigung des Endlagers Konrad erfolgte somit in einem Planfeststellungsbeschluss /NMU 02/, ohne dass vorher Teilgenehmigungen erteilt wurden.

Der Nachweis der Langzeitsicherheit wurde im Planfeststellungsverfahren standortspezifisch auf der Basis der geologischen, hydrogeologischen, geochemischen und geotechnischen Situation des Endlagersystems sowie seiner Langzeitprognose geführt. Da in der Nachbetriebsphase das Endlager Konrad einer sicherheitstechnischen Beurteilung nicht unmittelbar zugänglich ist, wurden Langzeitsicherheitsanalysen durchgeführt, die das Endlagersystem und seine potentiellen Entwicklungen auf der Basis von Modellen und numerischen Methoden beschreiben.

Im Wesentlichen umfasste das dem Langzeitsicherheitsnachweis für den Standort Konrad zugrunde gelegte Bewertungskonzept im Planfeststellungsverfahren die Punkte :

- Darstellung und Nachweis des Isolationsvermögens auf der Grundlage der geologischen, hydrogeologischen und geochemischen Gegebenheiten
- Darlegung des langfristigen Erhalts des Isolationsvermögens an Hand einer geowissenschaftlichen Langzeitprognose
- Demonstration der Robustheit des Endlagersystems und der Nachweissführung (z. B. an Hand der geologischen und prognostischen Entwicklungsgeschichte sowie der Eigenschaften des Standortes und der Benennung von Indikatoren)
- Einhaltung der Schutzziele (z. B. Individualschutz, Grundwasserschutz) über einen langen Zeitraum.

Die Begründung der Langzeitsicherheit des Endlagers Konrad beruht in erster Linie auf den Aussagen der radiologischen Konsequenzenanalyse auf Basis von Modellrechnungen in eindimensionalen Stromröhren, welche je nach Szenario verschiedene Transportwege (z. B. kürzeste Laufzeit für Grundwasserpartikel durch die Geosphäre) repräsentieren, die Einhaltung der radiologischen Schutzziele aufzeigen.

Basis dieser Transportrechnungen waren Grundwassertransportrechnungen, die entsprechend den geologischen und hydrogeologischen Modellvorstellungen des Antragstellers und der Gutachter der Genehmigungsbehörde durchgeführt wurden.

Methodisch wurde ein deterministisches Vorgehen für den Langzeitsicherheitsnachweis gewählt, welches vom Gutachter der Planfeststellungsbehörde durch eine probabilistische Unsicherheitsanalyse untermauert wurde. Zur Bewertung der Langzeitsicherheitsanalysen des Endlagers Konrad wurde die effektive Dosis als Bewertungsgröße bzw. Sicherheitsindikator herangezogen. Dabei wurde als radiologischer Sicherheitsindikator das Dosismaxima jenseits des Nachweiszeitraumes dargestellt, welcher zur Bewertung des Rückhaltevermögens des Endlagersystems diente /NMU 02/. Ein Vergleich mit dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik (s. Kap. 3.1 und 3.2) zeigt, dass wesentliche Elemente des Safety Case in der Bewertung der Langzeitsicherheit für das Endlager Konrad bereits enthalten sind.

Im Nachfolgenden werden für jedes Element eines modernen Langzeitsicherheitsnachweises die wesentlichen Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen dem Langzeitsicherheitsnachweis zum Endlager Konrad einerseits und der VSG bzw. dem internationalen Stand andererseits zusammenfassend dargestellt.

4 Wissenschaftliche Grundlagen

4.1 Sicherheits- und Nachweiskonzept

Ziel des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes ist die Darstellung der Strategie, wie unter den konkreten Standortverhältnissen, dem gewählten Endlagerkonzept und einem gegebenen Abfallinventar ein dauerhaft sicherer Einschluss der in den radioaktiven Abfällen enthaltenen Radionuklide über den Nachweiszeitraum erreicht werden soll und nachgewiesen werden kann.

4.1.1 International

Für die Erhaltung der passiven Sicherheit eines Endlagers nach Verschluss wurde die Anwendung des Prinzips "defense in depth" entwickelt, welches mit dem Mehrbarrierenkonzept gleichgesetzt werden kann. Dabei erfolgt die Berücksichtigung des graduellen Charakters der Prozesse, des Zeitfaktors und des Ineinandergreifens von Komponenten in Form von "safety functions", als Beschreibung der Funktionalität der Barrieren. Zentrale Sicherheitsfunktion ist dabei der Einschluss der Radionuklide im geologischen Untergrund.

Verschiedene Barrieren und Endlagerkomponenten haben unterschiedliche Sicherheitsfunktionen zu erfüllen, welche aufgrund der Komplementarität zumindest zeitweise zu einem gewissen Maß an Redundanz führen. Angesichts der verschiedenen Schutzgüter und -ziele sowie der unterschiedlichen Aussagefähigkeit im Nachweiszeitraum werden Indikatoren als geeignet angesehen, die Isolation nachzuweisen, wobei die Sicherheitsindikatoren die Schutzgüter mit ihren jeweiligen Schutzzielen verbinden. Das Endlager ist so zu konzipieren, dass eine einfache (robuste) Nachweisführung möglich ist.

Ein Überblick über die allgemeinen Forderungen an den Safety Case gemäß NEA oder IAEA und den Zusammenhang von Sicherheitsfunktionen, Indikatoren und Geosynthesen im Safety Case gemeinsam im Sinne von „Multiple Lines of Evidence“ zur Vertrauensbildung erfolgte bereits im Kapitel 3.1.1. Die Sichtweise ist internationaler Stand von Wissenschaft und Technik.

4.1.2 VSG

Das **Sicherheitskonzept** der VSG wurde nach dem internationalen Stand von W&T entwickelt. Aufbauend auf den Sicherheitsanforderungen des BMUB lagen ihm die drei bereits im Abschnitt 3.2 beschriebenen Leitgedanken für die Erreichung der sicheren und langfristigen Endlagerung zugrunde. Das Sicherheitskonzept der VSG beruht auf einem gestaffelten System von verschiedenen Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen, wobei die jeweiligen Wirkzeiträume der Barrieren innerhalb des Nachweiszeitraums berücksichtigt werden. Die sicherheitsrelevanten Komponenten des Endlagersystems sind

- die radioaktiven Abfälle inklusive ihrer Behälter,
- das Endlagerbergwerk,
- der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) ,
- die Verschlusskomponenten Schachtverschlussbauwerke, Streckenverschlüsse und Versatz sowie
- das weitere Wirtsgestein außerhalb des ewG und das Deckgebirge.

Diese Komponenten tragen mit ihren unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen in ihrer Gesamtheit zum Einschlussvermögen bei.

Das darauf aufbauende **Nachweiskonzept** der VSG legt die Vorgehensweise fest, wie im Rahmen des Vorhabens die Sicherheit des Endlagersystems bewertet und die für eine Sicherheitsaussage erforderlichen Nachweise formuliert werden, so dass die Anforderungen gemäß /BMU 10/ erfüllt sind. Es umfasst folgende Aspekte

- Vorgehensweise zur Ausweisung der Lage und Grenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs
- Erhalt des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Nachweiszeitraum
- Mächtigkeit der geologischen Barriere im einschlusswirksamen Gebirgsbereich
- Integrität der geologischen Barriere
- Integrität der geotechnischen Barrieren
- Kritikalitätsausschluss

- Einschluss der Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich
- Radiologische Konsequenzen in der Biosphäre anhand der Kriterien der Sicherheitsanforderungen bei Freisetzung von Radionukliden aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich

Weiterhin wurde in der VSG gemäß /BMU 10/ eine geschlossene Darstellung des Management von Ungewissheiten und der Rückholbarkeit vorgelegt.

4.1.3 Konrad

Das **Sicherheitskonzept** für das Endlager Konrad basiert auf seiner günstigen geologischen Gesamtsituation wonach signifikant lange Transportzeiten eine möglichst langfristige Isolation gelöster Radionuklide aus den Abfällen vor Mensch und Umwelt sicherstellen. Das Endlager Konrad befindet sich in einem als Wirtsgestein genutzten Erzvorkommen in 800 bis 1.300 m Tiefe. Die günstige Gesamtsituation wird durch eine darüber liegende, bis zu 400 m dicke Deckschicht aus verschiedenen Tonsteinen des Jura und der Unterkreide gebildete, natürliche Barriere gewährleistet. Diese geologische Barriere soll im Zusammenwirken mit technischen und geotechnischen Barrieren (Versatz, Schachtverschlüsse) über den geforderten Isolationszeitraum sicherstellen, dass eine mögliche Beeinflussung des oberflächennahen Grundwassers durch die Freisetzung von Radionukliden aus dem Endlager so gering ist, dass keine nachteiligen Auswirkungen für Mensch und Umwelt zu befürchten sind. Die diesbezüglich wesentliche Sicherheitswirkung geht dabei weniger von der Einschlusswirkung des Wirtsgesteins in unmittelbarer Umgebung des Endlagers aus, sondern wird durch die geringe hydraulische Leitfähigkeit der Tonsteinserien des Jura und der Unterkreide gebildete, natürliche Barriere gewährleistet.

Das Sicherheitskonzept und die Darstellung seiner planerischen Umsetzung unter Beachtung der Planungsgrundsätze (z. B. Mehrbarrierenkonzept, technische Maßnahmen nach dem Stand der Technik) waren Grundlage des **Nachweiskonzepts**, in der zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit das Endlagersystem eine Reihe sicherheitsgerichteter Anforderungen erfüllen musste. Dies waren insbesondere Anforderungen an den Standort, das Endlagerkonzept sowie die Planung, Auslegung und Errichtung des Endlagers. Zur Nachweisführung wurde die Einschätzung der zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems und seiner Teilsysteme, die Langzeitsicherheitsanalyse und der Nachweis der Einhaltung der Schutzziele als wesentlich eingestuft. Der Langzeitsi-

cherheitsnachweis erforderte den plausiblen wissenschaftlich begründeten Nachweis der Erfüllung der Anforderungen an das Endlagersystem, das Zusammenführen von Argumenten zur Langzeitsicherheit, die Analysen potenzieller Konsequenzen in der Nachbetriebsphase des Endlagers sowie begründete Aussagen zum Vertrauen in den Nachweis.

Das Nachweiskonzept für das Endlager Konrad basiert auf der Erhaltung der passiven Sicherheit nach Verschluss und damit auf das Zusammenwirken der Teilsysteme eines Mehrbarrierensystems. Grundlage des Konzeptes der Sicherheitsbewertung für die Nachbetriebsphase bildet eine auf einer wissenschaftlich fundierten Prognose der zeitlichen Entwicklung des Endlagersystems in Bezug auf seine langzeitige Barrierenfunktion. Als Basis der Sicherheitsbewertung dienten die Erkenntnisse aus der Standortcharakterisierung, der geowissenschaftlichen Langzeitprognose sowie den Langzeitsicherheitsanalysen, deren Ergebnisse zum Nachweis der Einhaltung der Schutzziele herangezogen wurden.

Der Langzeitsicherheitsnachweis umfasste insbesondere:

- die Beschreibung des Endlagersystems mit
 - dem Abfallinventar
 - der Standortcharakterisierung und der geowissenschaftlichen Langzeitprognose des Standortes
 - der Charakterisierung der technischen Barriere Schachtverschlüsse und deren Langzeitprognose
- den Nachweis der Kritikalitätssicherheit (Ausschluss der Rekritikalität)
- den Erhalt des Gebirgsbereichs um das Endlager für den Nachweiszeitraum (Integrität)
- die Langzeitsicherheitsanalysen mit
 - der Darstellung und Analyse des langfristigen Verhaltens des Endlagersystems und seiner Teilsysteme zur Bestätigung des Sicherheitskonzeptes
 - der Ableitung der Szenarien
 - den Konsequenzenanalysen, die den bestehenden jeweiligen Unsicherheiten wie den Szenarien-, Daten- und Modellunsicherheiten im Langzeitsicherheitsnachweis Rechnung tragen

- den Nachweis der Einhaltung der Sicherheitsprinzipien für die Endlagerung und des Schutzzieles für die Nachbetriebsphase für den geforderten Nachweiszeitraum
- die Bewertung des Isolationsvermögens sowie weiterer Systemeigenschaften des Endlagersystems und seiner Teilsysteme anhand von Indikatoren
- die Begründung der Langzeitsicherheit des Endlagers.

Das Nachweiskonzept zum Endlager Konrad beruht in erster Linie auf den Aussagen der radiologischen Konsequenzenanalyse, die auf Basis von Modellrechnungen zur radiologischen Konsequenz aus dem Transport freigesetzter Radionuklide durch die Geosphäre in eindimensionalen Stromröhren in die Biosphäre, welche – je nach Szenario – verschiedene Transportwege, z. B. kürzester Laufzeit für Grundwasserpartikel durch die Geosphäre, repräsentieren.

Basis dieser Transportrechnungen waren die Grundwassertransportrechnungen die in der radiologischen Konsequenzenanalyse zum Endlager Konrad entsprechend den geologischen und hydrogeologischen Modellvorstellungen des Antragstellers und der Gutachter der Genehmigungsbehörde durchgeführt wurden.

Der Nachweis der Sicherheit in der Nachbetriebsphase wurde somit als umfassende Sicherheitsbewertung des Endlagersystems geführt und umfasste geologische, geotechnische, hydrogeologische, radiologische, chemotoxische und technische Aspekte sowie Einzelnachweise.

Der internationalen Sichtweise, geowissenschaftliche Daten nicht nur in der Sicherheitsanalyse sondern auch als geowissenschaftlicher Argumentationslinien im Sicherheitsnachweis zu verwenden, wurde bereits damals gefolgt. Die umfassende Nutzung aller für den Standort Konrad zur Verfügung stehenden geowissenschaftlichen Informationen wurde für Aspekte des Sicherheitsnachweises (u. a. geologische und geotechnische Langzeitprognose, Analyse und Prognose geomechanischer, hydrogeologischer und geochemischer Sachverhalte) genutzt. Insofern sind in der Bewertung der Langzeitsicherheit für das Endlager Konrad die wesentlichen Informationen, die ein Safety Case fordert, eingeflossen.

4.2 Standortcharakterisierung (Modelldaten)

Langzeitsicherheitsnachweise für Endlagerstandorte erfordern eine ausreichende und qualifizierte Datenbasis, welche eine realitätsnahe Modellierung der räumlichen und zeitlichen Entwicklung des Barrierensystems und seiner wesentlichen Einflussgrößen zulässt. Die Daten müssen für die zu behandelnde Problemstellung in ausreichender Anzahl und Dichte, d.h. repräsentativ, und in einer geeigneten Qualität zur Verfügung gestellt werden. Zur Qualifizierung der Daten müssen Qualitätssicherungsprogramme eingesetzt werden. Die Umsetzung dieser Anforderungen erhöht die Belastbarkeit der Analysen. Die Datengrundlage wird durch Laboruntersuchungen, durch in-situ Untersuchungen in Untertagelabors sowie durch die Standorterkundung geschaffen.

4.2.1 International

Nach internationalem Stand von Wissenschaft und Technik ist eine umfangreiche geowissenschaftliche Datenakquisition zur Führung des Sicherheitsnachweises (Safety Case) essentiell. Es wird daher als wichtig angesehen, dass der Antragsteller über einen ausreichend guten Kenntnisstand des Endlagersystems verfügt und diesen dokumentiert, so dass er den Sicherheitsnachweis führen kann. Eine erweiterte wissenschaftliche Datenakquisition erfolgt im Rahmen der geologischen und geotechnischen Langzeitprognose, in der Szenarientwicklung, in der Analyse und Prognose geomechanischer, hydrogeologischer und geochemischer Sachverhalte, in der Darstellung und Begründung des Sicherheitskonzepts und in der Demonstration von Barrierenfunktionen.

Die Geosynthese bildet als Dokumentation aller geowissenschaftlicher Informationen im Sicherheitsnachweis ein wichtiges Element worauf u. a. die Szenarien- und Sicherheitsanalysen aufbauen. Neben der Geosynthese als Dokumentation geowissenschaftlicher Informationen im Sicherheitsnachweis (Safety Case) werden darüber hinaus heute im Sinne der „Multiple Lines of Evidence“ zur Vertrauensbildung verstärkt geowissenschaftliche Argumente zur Unterstützung der Sicherheitsaussage herangezogen. Dabei wird u. a. diskutiert, wie aus Reviews und den Bewertungen von Sicherheitsnachweisen weitere Anforderungen an die geologischen Untersuchungsprogramme in den nationalen Endlagerprogrammen abzuleiten sind.

4.2.2 VSG

Die wesentlichen geowissenschaftlichen Erkenntnisse zu den Verhältnissen am Standort Gorleben, die den Kenntnisstand und die Datenlage widerspiegeln, wurden in einer Reihe von zusammenfassenden Fachberichten der BGR publiziert.

Während der übertägigen geologischen Erkundung des Standortes Gorleben wurde zunächst ein etwa 390 km² großes Gebiet südlich der Elbe untersucht und später die Arbeiten im Zeitraum nach Norden in die Elbe-Löcknitz Niederung ausgedehnt. Es wurden intensive seismische Untersuchungen durchgeführt, 44 Bohrungen bis einige Meter unterhalb des Salzspiegels, 4 Tiefbohrungen bis in rund 2000 m Tiefe, 2 Schachtvorbohrungen und 185 hydrogeologische Aufschlussbohrungen geteuft, sowie 398 Grundwassermessstellen eingerichtet und Hunderte weiterer Aufschlüsse angelegt. Auf der Grundlage der übertägigen Erkundungsergebnissen erfolgte die untertägige Erkundung des Salzstocks.

Diese geologische Erkundung des Salinars von unter Tage aus begann mit dem Abteufen der beiden Schächte und der Auffahrung des Infrastruktur- und des Erkundungsbereichs 1 (EB1) in einer Teufe von 840 m. Im Rahmen der untertägigen Erkundung wurden zahlreiche Bohrungen gestoßen, detaillierte untertägige Kartierungen erstellt sowie geophysikalische, hydraulische, mechanische, mineralogisch-geochemische und sonstige in-situ-Messungen und Laboruntersuchungen durchgeführt.

Da die Standortcharakterisierung bereits im Vorfeld der VSG erfolgte und seit der Erfassung der geowissenschaftlichen Daten und Informationen zu den Verhältnissen am Standort Gorleben ein Zeitraum von teilweise über 10 Jahren vergangen war, wurde im Rahmen der VSG eine Bewertung der Standortdaten im Hinblick auf deren Vollständigkeit, Aussagekraft und Ungewissheiten für eine vorläufige Sicherheitsanalyse sowie der Eignung der zugrunde liegenden Untersuchungsmethoden vorgenommen.

4.2.3 Konrad

Im Planfeststellungsverfahren Konrad beruhen die Kenntnisse über den geologischen Bau des Untergrundes im Untersuchungsgebiet des Endlagers Konrad auf der Auswertung von Ergebnissen aus Bohrungen, Bergwerken und einer seismischen Erkundung. Darüber hinaus wurden Untersuchungsergebnisse aus angrenzenden Gebieten be-

rücksichtigt, um die großräumige geologische Situation und paläogeographische Entwicklung einzubeziehen.

Innerhalb des Untersuchungsgebietes Konrad wurden neben den Schächten und 472 Tiefbohrungen aus Explorationstätigkeiten, die relativ gleichmäßig über das gesamte Untersuchungsgebiet verteilt sind, ausgewertet. Von einer großen Anzahl dieser Bohrungen lagen neben Schichtenverzeichnissen auch Bohrproben vor. Zur Petrographie, Mineralogie und Geochemie wurden neben ausführlichen Gesteinsbeschreibungen mineralogische und geochemische Analysenergebnisse von Gesteinsproben dargelegt. Informationen über die räumliche Lage und flächige Verbreitung der Gesteinsschichten und der Störungen lieferten die mit den Bohrergebnissen korrelierten seismischen Untersuchungen.

Zahlreiche ausführliche Fachberichte (ergänzende Unterlagen im Planfeststellungsverfahren) untermauern die Datenbasis zur Darstellung der geologischen und hydrogeologischen Erkenntnisse zum Untersuchungsgebiet Konrad.

Die in den Modellrechnungen für das Planfeststellungsverfahren Konrad verwendeten Durchlässigkeitswerte stützen sich im Wesentlichen auf in-situ-Verfahren, Laboruntersuchungen oder auf indirekte Verfahren:

- in situ Verfahren (hydraulische Tests, Pumpversuche) in
 - der Untersuchungsbohrung K101 (Die Untersuchungsbohrung K 101 wurde u. a. mit dem Ziel niedergebracht, ein möglichst vollständiges Profil der Gebirgsdurchlässigkeit für die gesamte Schichtenfolge bis zum Cornbrash zu bestimmen),
 - der Grube Konrad,
 - zwei Untersuchungsstrecken im Bereich Schacht Konrad,
 - Tiefbohrungen der Erdöl-/Erdgasexploration im Umfeld und
 - Brunnen und Grundwassermessstellen im Quartär.
- Laboruntersuchungen an
 - Probenmaterial aus Tiefbohrungen im Umfeld und
 - Probenmaterial aus der Untersuchungsbohrung K 101.
- auf indirekte Verfahren durch

- Auswertung geophysikalischer Messungen aus Tiefbohrungen (Bohrlochlogs),
- Auswertung der Messdaten aus Wasserzuflüssen in der Grube Konrad und
- geologisch-hydrogeologische Charakterisierung (Petrographie, Lithologie, Klüftigkeit, Wasserführung).

Vom Antragsteller wurden für das Untersuchungsgebiet Isotopenuntersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse sich für die einzelnen Isotope wie folgt darstellen:

- Tritium (^3H) konnte in den Tiefengrundwässern analytisch nicht nachgewiesen werden. Aufgrund der fehlenden Tritiumgehalte ist lediglich festzustellen, dass es sich um Wasser handelt, die vor 1952 gebildet wurden.
- Deuterium (^2H)- und Sauerstoff-18 (^{18}O)-Gehalte weisen auf eine meteorische Lösungskomponente hin.
- Schwefel-34 (^{34}S)-Gehalte und sehr geringe Kohlenstoff-14 (^{14}C)-Gehalte lassen keine eindeutige Aussage über Alter und Herkunft der Grundwässer zu, da sie durch bakterielle Einflüsse verändert worden sind.
- Die Ergebnisse der Helium-3/4-Edelgas-Isotopenmessungen deuten auf ein sehr hohes Alter der Tiefenwässer hin, das im Bereich von einigen Millionen Jahren liegt.

Die hydrochemischen Verhältnisse und die Ergebnisse der Isotopenverhältnisse der Tiefenwässer weisen auf sehr langsam ablaufende hydrochemische Prozesse in der Umgebung des geplanten Endlagers hin.

Zur Parametrierung der Modelle des Radionuklidtransportes wurden im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalysen standortspezifische Daten über das Radionuklid-Rückhaltevermögen der am Standort vorkommenden einschlusswirksamen Gesteine und relevante Stofftransportdaten (u. a. Sorptionsdaten, Dispersionslängen und Diffusionskoeffizienten) ermittelt.

Die Sorptionsdaten wurden nach dem damaligen Stand von Wissenschaft und Technik in Laborversuchen ermittelt. Dabei wurde berücksichtigt, dass das Sorptionsverhalten der Radionuklide von den physikalisch-chemischen Eigenschaften des jeweiligen Systems, vom spezifischen Gestein und seinen Mineralbestandteilen, der chemischen Zusammensetzung des Grundwassers (anaerobe Verhältnisse, pH-Wert usw.), von der

Nuklidart (chemische Verbindung, Oxidationsstufe u. a.), der Konzentration der Radionuklide, von künstlichen und natürlichen Komplexbildnern, der Kolloidbildung, der Experimentierzeit, dem Volumen/Masse-Verhältnis und von der Temperatur bestimmt wird.

Insgesamt ergab sich daraus eine breite geologische Datenbasis über das gesamte Untersuchungsgebiet Konrad, die alle erheblichen Daten für eine schlüssige Darstellung der geologischen Verhältnisse der Endlagerregion umfasst und die Ableitung eines belastbaren geologisch-hydrogeologischen Konzeptmodells als Grundlage von numerischen Modellen erlaubte.

4.3 Abfälle, Behälter- und Endlagerkonzepte

4.3.1 International

Abfälle

International werden verschiedene Klassifizierungen vorgenommen um radioaktive Abfälle, die beim Betrieb und Rückbau von Kernkraftwerken, Einrichtungen der Forschung, Industrie und Medizin entstehen, in unterschiedliche Kategorien einzuteilen. Häufig wird aufgrund ihrer Dosisleistung eine Unterscheidung zwischen hochradioaktiven Abfällen (HAW), mittelradioaktiven Abfällen (MAW) und schwachradioaktiven Abfällen (LAW) vorgenommen. Die Internationale Atomenergie Organisation (IAEA) unterteilt die Abfälle zusätzlich in kurz- und langlebige Abfälle, um damit die Zuordnung zu oberflächennahen und geologischen Endlagern zu ermöglichen.

Die IAEA empfiehlt im Sicherheitsstandard „Classification of Radioactive Waste“ ein Klassifizierungsschema. Die Abfallarten werden in insgesamt sechs Kategorien unterteilt. Die Klasse der schwach- und mittelaktiven Abfälle ist auf Grund der Lebensdauer der Abfälle nach kurz- und langlebigen Radionukliden untergliedert. Die Untergliederung der mittel- und hochaktiven Abfälle erfolgt auf Grund der spezifischen Wärmeleistung /IAEA 09 IAEA 09a/ (s. Abb. 4.1) wie folgt:

- Exempt Waste (EW): Freigegebene Abfälle, die nicht mehr der atomrechtlichen Überwachung unterliegen,

- Very Low-Level Waste (VLLW): sehr schwachradioaktive Abfälle zur Beseitigung auf einer speziellen Deponie,
- Very Short-Lived Waste (VSLW): sehr kurzlebige Abfälle für die Abklinglagerung,
- Low-Level Waste (LLW): schwachradioaktive Abfälle für die oberflächennahe Endlagerung,
- Intermediate-Level Waste (ILW): mittelradioaktive Abfälle zur Endlagerung in mittleren Tiefen, und
- High-Level Waste (HLW): hochradioaktive Abfälle zur Endlagerung in tiefen geologischen Formationen.

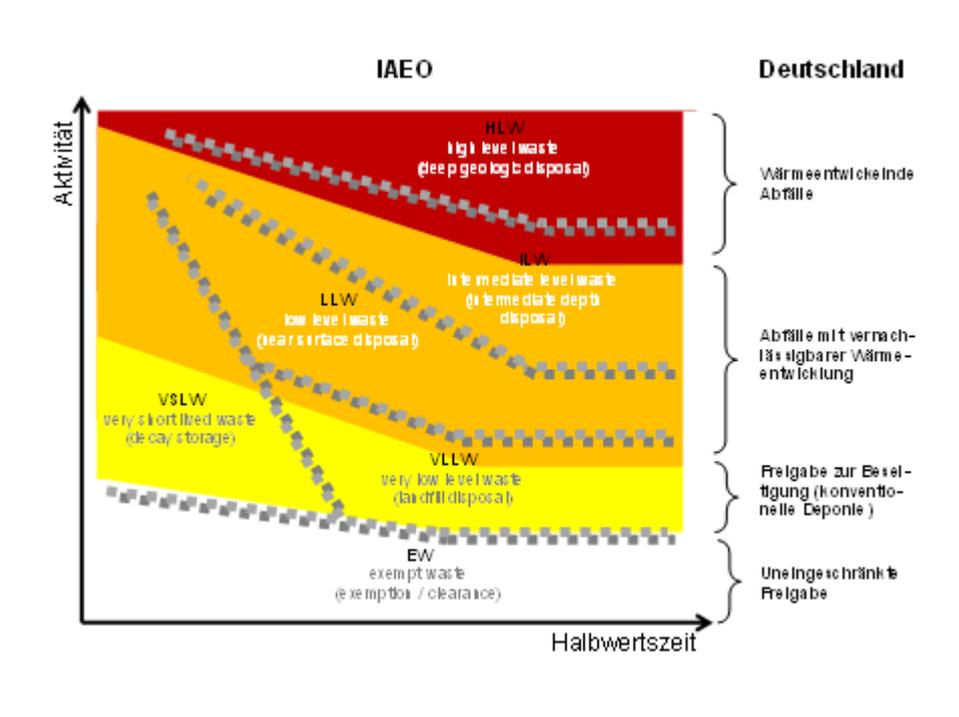


Abb. 4.1 Vergleich der Abfallklassifizierung in Deutschland und nach IAEA 09a/

In Deutschland werden zwei Kategorien radioaktiver Abfälle unterschieden. Zum einen die „vernachlässigbar wärmentwickelnden radioaktiven Abfälle“, mit dem Ziel der Endlagerung im Schacht Konrad. Zum anderen die „wärmentwickelnden radioaktiven Abfälle“ mit dem Ziel der Endlagerung im „Endlager für insbesondere wärmentwickelnde Abfälle“ welches nach dem Standortwahlgesetz noch zu suchen und auszuwählen ist /BMUB 15/. Im Gegensatz zu IAEA 09, IAEA 09a/, die eine zusätzliche Unterteilung in kurz- und langlebige Abfälle und damit die Zuordnung zu oberflächennahen und geologischen Endlagern zulässt (s. Abb. 4.2), in der deutschen Abfalleinteilung werden die

Halbwertszeiten der Radionuklide nicht berücksichtigt. Nach /BMUB 15/ beabsichtigt die Bundesregierung alle Arten radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen endzulagern. Stoffe, die nach § 29 StrlSchV freigegeben werden können, unterliegen nicht mehr der atomrechtlichen Aufsicht und müssen nicht in ein Endlager verbracht werden.

Die deutsche Abfalleinteilung ist weitgehend kompatibel zum Klassifizierungsvorschlag, d.h. sie fügt sich mit geringfügigen Abweichungen in die internationale Klassifizierung ein. Von der IAEA als VLLW bezeichnete Abfälle überschreiten die in Deutschland geltenden Freigabewerte für die Beseitigung als konventionelle Abfälle und sind im Endlager Konrad endzulagern.

Behälter

Bezüglich internationaler Anforderungen an Endlagerbehälter hat die IAEA eine Reihe von Publikationen, u. a. SSG-14 (z.B. in §6.36ff) /IAEA 11a/, SSR-5 (z. B. in Req. 20) /IAEA 11/, TECDOC 1515 /IAEA 06b/, GSG-3 /IAEA 13/ und GSR-5 /IAEA 09a/ herausgegeben. Darüber hinaus stellen die WENRA Safety Reference Levels (SRLs) von 2014 /WEN 14/ den neuesten Entwicklungsstand dar.

Bei der Konditionierung und Zwischenlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle gibt es keine großen Unterschiede in der internationalen Vorgehensweise. Gängige Konditionierungsverfahren sind die Trocknung, Kompaktierung, Verbrennung, Zementierung oder Bituminierung der Abfälle. Im Unterschied zu manchen anderen Ländern kommt die Bituminierung in Deutschland wegen des damit verbundenen Brandrisikos bereits seit längerem nicht mehr zum Einsatz. Auch die Zementierung hat wegen der mit diesem Verfahren einher gehenden Volumenvergrößerung stark an Bedeutung verloren.

Endlagerkonzept

Das Prinzip des "defense in depth" bzw. das Mehrbarrierenkonzept ist ein international für die Endlagerung anerkanntes Konzept. Es gewährleistet über Sicherheitsfunktionen eine methodische Verbindung von Sicherheitskonzept bzw. Endlagerkonzept und der Sicherheitsanalyse im Sicherheitsnachweis für Endlager die Einhaltung von Schutzziele. In der funktionalen Betrachtung hat die Endlagerkonzeption dem Mehrbarrierensystem zu folgen, welches aus einer Kombination verschiedener ineinander greifender

Barrierefunktionen besteht. Dabei spielen insbesondere die ingenieurtechnischen Barrieren (EBS, Engineered Barrier Systems) eine entscheidende Rolle im Sicherheitsnachweis. Durch die Einzelwirkung oder das Zusammenspiel dieser Barrieren, z. B. Abfallform, Abfallverpackung, Versatz, Verschlussbauwerke muss sichergestellt werden, dass die Langzeitsicherheit gewährleistet ist.

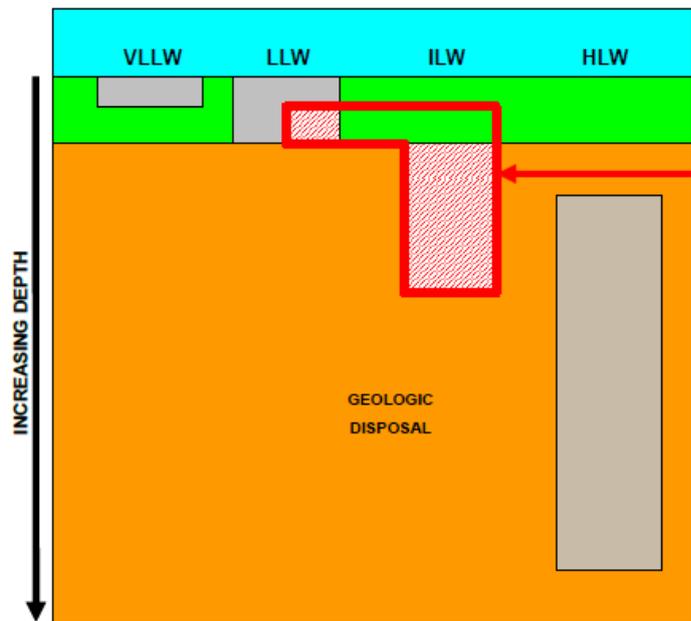


Abb. 4.2 International verfolgte Endlagerkonzepte (Quelle SSR-5 /IAEA 11/)

Während in Deutschland alle radioaktiven Abfälle in tiefe geologische Formationen verbracht werden sollen, werden in vielen anderen Ländern schwach- und mittelradioaktive Abfälle mit kurzen Halbwertszeiten (< 30 Jahre) entweder bereits heute oberflächennah endgelagert oder es ist eine solche Form der Endlagerung geplant. Zahlreiche derartige Einrichtungen wurden in den vergangenen 40 Jahren errichtet und betrieben (u. a. in USA, Frankreich, Großbritannien, Japan). Endlagerbergwerke für schwach- und mittelradioaktive Abfälle in relativ geringer Tiefe (bis 100 m) gibt es in Schweden (Forsmark), Finnland (Olkiluoto, Loviisa) und der Tschechischen Republik (Richard, Bratrstvi). Das schwedische Endlager SFR bei Forsmark wurde im Kristallin-gestein etwa 60 m unterhalb des Meeresbodens errichtet. Während die Abfälle früher häufig auf vergleichsweise einfache Art in Gräben gefüllt und mit Erdreich abgedeckt wurden, sind die neueren Anlagen als ingenieurmäßige Betonstrukturen ausgelegt, die nach Verfüllung feste Monolithe bilden.

4.3.2 NAPRO/VSG

Abfälle

Gemäß des Nationalen Entsorgungsprogramms (NAPRO) /BMUB 15/ sollen in Deutschland alle Arten radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen endgelagert werden. Sie werden nach dem Kriterium der Wärmentwicklung in radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmentwicklung mit dem Ziel Endlager Konrad und insbesondere wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle mit dem Ziel Endlager nach Standortauswahlgesetz unterteilt. Die Halbwertszeit der in den Abfällen enthaltenen Radionuklide spielt bei dieser Klassifizierung keine Rolle. Insofern sind keine Maßnahmen und Vorkehrungen erforderlich, die auf eine diesbezügliche Trennung der anfallenden radioaktiven Abfälle ausgerichtet sind.

Für die VSG wurde die Endlagerung von abgebrannten Brennelementen und von radioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung der abgebrannten Brennelemente (wärmeentwickelnde Abfälle) untersucht. Nach internationaler Klassifikation sind dies hoch- und mittelradioaktive Abfälle. Darüber hinaus wurde die Endlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle untersucht, die den planfestgestellten Endlagerbedingungen Konrad voraussichtlich nicht genügen (z. B. aufgrund ihres Aktivitätsinventars oder ihrer stofflichen Zusammensetzung) und die möglicherweise zu entsorgenden Produktionsrückstände aus der Urananreicherung. In der VSG erfolgte eine umfangreiche Recherche und Dokumentation von Art und Menge sowie die Charakterisierung der radiologischen und stofflichen Eigenschaften der in Deutschland anfallenden wärmeentwickelnden Abfälle. Hierzu gehören:

- bestrahlte Brennelemente aus Leistungsreaktoren, die für eine direkte Endlagerung vorgesehen sind,
- radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung im Ausland sowie aus der Wiederaufarbeitungsanlage in Karlsruhe,
- bestrahlte Brennelemente aus Prototyp- und Forschungsreaktoren.

Weiterhin wurden zwecks einer optionalen Betrachtung zusätzlich radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, bei denen aus heutiger Sicht nicht ausgeschlossen werden kann, dass diese gemeinsam mit wärmeentwickelnden Abfällen in einem Endlager eingelagert werden sollen, in die Untersuchungen einbezogen. Hierbei handelt es sich um

- graphithaltige Abfälle,
- Urantails aus der Urananreicherung sowie
- sonstige radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, die z. B. aufgrund ihrer radiologischen Eigenschaften nicht im Endlager Konrad endgelagert werden können.

Die Aufgabe im Vorhaben VSG bestand darin, zu analysieren, ob eine gemeinsame Endlagerung von wärmeentwickelnden und vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen möglich bzw. sinnvoll ist oder, ob hierdurch so große sicherheitstechnische Nachteile in Kauf genommen werden müssen, dass ein derartiges Konzept von vorne herein scheitern könnte.

Behälter

Über die Zusammenstellung der Mengengerüste und der Charakteristika hinaus wurden für die verschiedenen Abfalltypen geeignete Abfallbehältertypen vorgeschlagen und die technischen Charakteristika dieser Behälter beschrieben. Hierbei wurde zwischen Behältern für die Streckenlagerung, die Einlagerung in einigen 100 m tiefen Bohrlöchern sowie der Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern unterschieden. Die Angaben zu Art und Menge der für die Endlagerung der radioaktiven Abfälle erforderlichen Behälter bildeten eine wesentliche Grundlage für die Planung der Endlagerbergwerke und der Einlagerungskonzepte.

Endlagerkonzept

Im Sicherheits- und Nachweiskonzept des Vorhabens wurde in Übereinstimmung mit den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ festgelegt, dass bis zum Verschluss der Schächte eine Rückholung von Abfallbehältern mit wärmeentwickelnden Abfällen gewährleistet sein muss. Folglich beinhalteten die im Vorhaben VSG entwickelten Endla-

gerkonzepte auch Techniken und Strategien zur Rückholung wärmeentwickelnder Abfälle in Abhängigkeit von den jeweils konzipierten Einlagerungsvarianten.

Mehrere Layout-Varianten der untertägigen Anlagen (Grubengebäude) wurden betrachtet, die sich im Hinblick auf die Anordnung der verschiedenen Abfalltypen in Abhängigkeit der erwarteten Wärmeentwicklung im Gebirge, der eingesetzten Einlagerungstechnologie und der eingesetzten Behältertypen unterscheiden.

Für die Konkretisierung ausgehend von den Sicherheitsanforderungen und den genannten Leitgedanken, wurden drei Grundanforderungen definiert, aus denen sich folgende konkrete Zielsetzungen ableiten und strategische, planerische Maßnahmen festlegen lassen:

- Die eingelagerten Abfallgebände sollen schnell und möglichst dicht vom Salzgestein im Verbund mit den geotechnischen Barrieren eingeschlossen werden (Einschlussgedanke).
- Der ausgewiesene einschlusswirksame Gebirgsbereich bleibt im Nachweiszeitraum erhalten und seine Barrierenfunktion (geologische Barriere und geotechnische Barrieren) wird weder durch interne noch durch externe Vorgänge und Prozesse beeinträchtigt (Integritätsgedanke / Wartungsfreiheit).
- Eine Rekritikalität muss in jeder Phase der Endlagerentwicklung ausgeschlossen werden (Kritikalitätsausschluss).

Im Vorhaben VSG erfolgte darüber hinaus in einer Überprüfung der entwickelten Endlagerkonzepte, ob aus betrieblichen Aspekten Zweifel an der Realisierbarkeit der projektierten technischen Maßnahmen vorliegen, bzw. an der Gewährleistung der Betriebssicherheit hervorrufen. Soweit die Ergebnisse der betriebssicherheitlichen Prüfungen im Rahmen der Bearbeitung des Vorhabens VSG umsetzbar waren, flossen diese in die Optimierung der Endlagerkonzepte ein.

4.3.3 Konrad

Abfälle

Das Endlager Konrad ist für die Aufnahme von bis zu 303.000 m³ radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, d. h. von schwach- und mittelradioaktiven

Abfällen, genehmigt. Entsprechend der Genehmigung für das Endlager Konrad handelt es sich um radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung. Diese Abfallklasse umfasst z. B. Betriebs- und Stilllegungsabfälle aus kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen sowie Abfälle aus den Bereichen Forschung, Medizin und Industrie. International werden diese als schwach und mittel radioaktiv bezeichnet. Die angelieferten radioaktiven Abfälle müssen so konditioniert, d.h. verarbeitet und verpackt sein, dass sie sowohl die allgemeinen Anforderungen des betrieblichen Strahlenschutzes als auch die aus den standortspezifischen, sicherheitsanalytischen Untersuchungen abgeleiteten Anforderungen erfüllen.

Die Abfallgebinde für die Einlagerung sind entsprechend der Endlagerungsbedingungen /BFS 11/ zu konditionieren. Nach und teilweise während ihrer Konditionierung durchlaufen sie die Produktkontrolle des Bundesamts für Strahlenschutz (BfS) bevor die Abfallgebinde für die Endlagerung freigegeben werden. Hierzu wird eine Kombination aus Stichprobenprüfungen und Verfahrensqualifikation (Vorbehandlung und Konditionierung der radioaktiven Abfälle nach einem durch das BfS qualifizierten Verfahren zum Zweck der Endlagerung) durchgeführt.

Hinsichtlich einer möglichen Rekritikalität der eingelagerten Radionuklide wurde in einer Sicherheitsanalyse unterstellt, dass in begrenztem Umfang spaltbare Stoffe durch zutretende Tiefenwässer ausgelaugt werden. Die Analyse ergab, dass keine kritischen Anordnungen zu erwarten sind.

Die Endlagerungsbedingungen sind im Wesentlichen die Umsetzung der Ergebnisse aus den Sicherheitsanalysen zum bestimmungsgemäßen Betrieb, Störfällen, thermischer Beeinflussung des Wirtsgesteins, Kritikalitätssicherheit und der radiologischen Langzeitauswirkungen. Sie enthalten Bestimmungen für die Behältereigenschaften der Gebinde, die stoffliche Zusammensetzung der Abfälle und das radioaktive Inventar.

Behälter

Als Verpackung für die einzulagernden radioaktiven Abfälle sind für das Endlager Konrad zylindrische oder quaderförmige Behälter und Container vorgesehen, die z. B. aus Stahlblech, armiertem Beton oder Gusswerkstoff hergestellt werden. Nach /BFS 11/ können die Verursacher die Art der Verpackung wählen.

Alle zur Einlagerung vorgesehenen Behälter müssen nach den Endlagerungsbedingungen für die Schachanlage Konrad bestimmte Grundanforderungen an die Dichtigkeit, die Handhabbarkeit und die Integrität der Behälter im bestimmungsgemäßen Betrieb erfüllen. Diese legen weiterhin fest, dass radioaktive Abfälle nur in fester beziehungsweise verfestigter Form vorliegen, nicht faulen oder gären und keine selbstentzündlichen oder explosiven Bestandteile beinhalten dürfen. Diese Grundanforderungen beziehen sich im Wesentlichen auf die geometrischen Abmessungen und Bruttovolumina, die Stapelbarkeit ohne Beeinträchtigung der mechanischen Integrität und Dichtigkeit bei der Ablieferung und den Korrosionsschutz im Falle von Stahlblechcontainern. Die Endlagerungsbedingungen werden im Rahmen der Produktkontrolle durch das Bundesamt für Strahlenschutz in Zusammenarbeit mit von ihm beauftragten Gutachtern geprüft.

Im Langzeitsicherheitsnachweis wird unterstellt, dass die Behälter nach Verschluss des Endlagers keine Sicherheitsfunktion aufweisen. Sie werden mit Verschluss des Endlagers als defekt (undicht) angesehen. Es wird angenommen, dass unmittelbar nach Verschluss des Endlagers Konrad Formationswässer an die endgelagerten radioaktiven Abfälle gelangen und Radionuklide aus den konditionierten Abfällen in die Formationswässer übertreten. In Langzeitsicherheitsanalysen wird der Übertritt von Radionukliden aus den Abfällen in die Wässer, ihre Ausbreitung im Bereich des Grubengebäudes und mit Grundwässern aus dem Bereich des Endlagers durch die Geosphäre bis in oberflächennahe Grundwässer sowie die möglichen Auswirkungen in der Biosphäre betrachtet.

Endlagerkonzept

Das Endlagerkonzept für das Endlager Konrad sieht eine räumliche Trennung zwischen der Einlagerung von radioaktiven Abfallgebinden und dem Auffahrbetrieb vor. Die Einlagerung des radioaktiven Abfalls von der Anlieferung, der Eingangskontrolle und der Beförderung der Abfallbinde nach unter Tage bis hin zum Verschließen der befüllten Einlagerungskammern erfolgt nach einem festen Schema unter Einhaltung gesetzlicher Vorgaben bezüglich des Strahlenschutzes. Die Einlagerungskammern in den Einlagerungsfeldern werden sektionsweise aufgefahren. Direkt nach der Einlagerung der Abfallbinde werden die verbleibenden Hohlräume mit Erzbeton mittels Pump- und Schleuderversatz verfüllt und anschließend verschlossen. Für das Endlager Konrad sind zwei Einlagerungsfelder vorgesehen. Zu Beginn der Einlagerung wird zunächst nur ein Teilfeld komplett aufgefahren und mit Abfallgebinden gefüllt, verbleiben-

de Hohlräume werden mit einem speziellen Beton verfüllt und verschlossen. Die genaue Lage der radioaktiven Abfälle in den jeweiligen Einlagerungsfeldern wird dokumentiert. Das Endlagerkonzept sieht nach Beendigung des Endlagerbetriebs den Versatz von verbleibenden Hohlräumen und den Verschluss von Strecken und Schächten vor. Maßnahmen zur Rückholbarkeit nach dem Verschluss eines Endlagers sind nicht Bestandteil dieses Konzeptes. Das vorgelegte technische Konzept für die langzeitsichere Verfüllung der Schächte sieht bei den in Quartär und Oberkreide liegenden Schachtabschnitten eine hydrostatische Asphaltabdichtung, innerhalb der Unterkreide eine mineralische Abdichtung und in den Schichten des Malm und Dogger eine mineralische Stützsäule mit horizontalem Anschluss an das verfüllte Grubengebäude vor /NMU 02/.

Im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens wurden Konzeptplanungen zum Verschluss des Endlagers vorgelegt und genehmigt. Wie die nach Abschluss des Einlagerungsbetriebes zur Einhaltung der Schutzziele erforderlichen Maßnahmen konkret durchgeführt bzw. umgesetzt werden, ist noch nicht abschließend festgeschrieben. Diese Festlegung soll zu einem Zeitpunkt, an dem das Ende des Einlagerungsbetriebes absehbar ist, nach dem dann gültigen Stand von Wissenschaft und Technik im Rahmen eigener Verfahren erfolgen, die sowohl die atomrechtlichen als auch die berg- und wasserrechtlichen sowie die sonstigen rechtlichen Belange umfassen.

5 System- und Sicherheitsanalysen

5.1 Szenarienanalyse

5.1.1 Geowissenschaftliche Standortprognose

5.1.1.1 International

In der Regel werden die natürlichen Entwicklungen durch regionale geologische, hydrogeologische und klimatische Prozesse betrachtet, die der Standort auch ohne die Existenz eines Endlagers und die eingelagerten radioaktiven Abfälle nach heutigem Kenntnisstand erfahren würde. Dabei kommt das Aktualitätsprinzip zur Anwendung, wobei unterstellt wird, dass diejenigen Prozesse und Ereignisse, die in der Vergangenheit zur heutigen Situation geführt haben, auch in Zukunft in ähnlicher Art, Tendenz, Intensität und Periodizität ab- bzw. weiterlaufen werden.

5.1.1.2 VSG

Als Grundlage für die innerhalb der Szenarientwicklung zu berücksichtigenden natürlichen zukünftigen Entwicklungen am Standort Gorleben wurde eine geowissenschaftliche Langzeitprognose erstellt. Diese umfasst eine Prognose zukünftiger klimatischer, (salz-)tektonischer, geomorphologischer und hydrogeologischer Prozesse und Ergebnisse innerhalb des Nachweiszeitraums. Dabei werden in der Regel nur die natürlichen Entwicklungen durch regionale geologische, hydrogeologische und klimatische Prozesse betrachtet, die der Standort auch ohne die Existenz eines Endlagers nach heutigem Wissen erfahren würde:

- Überregionale Entwicklungen: Hebung/Senkung der Erdkruste, großräumige Krustendeformationen, Grabenbildung, neotektonische Vorgängen, Erdbeben
- Regionale Entwicklungen: Magmatismus, hydrothermale Aktivität, Gesteinsmetamorphose, Meteoriteneinschlag
- Kaltzeitliche Entwicklungen: Permafrost, kryogene Klüfte, Inlandvereisung, glazigene Rinnen, glazigene Deformationen im Deck- und Nebengebirge

- Entwicklungen der Geomorphologie sowie des Deck- und Nebengebirges: Transgression/Regression, Erosion, Sedimentation, Diagenese, Störungen im Neben- und Deckgebirge, mikrobielle Prozesse im Neben- und Deckgebirge
- Zukünftige Entwicklungen des hydrogeologischen Systems am Standort Gorleben: Einflüsse mikrobieller Prozesse auf die Hydrogeologie und
- Zukünftige salinarspezifische Entwicklungen: Diapirismus/Halokinese, Subrosion.

Zu jedem Aspekt wurde diskutiert, welche Unsicherheiten bei Charakterisierung und Prognose herrschen und abgeschätzt wie wahrscheinlich das Auftreten bzw. die Ausprägung des jeweiligen Ereignisses oder Prozesses ist.

5.1.1.3 Konrad

Im Planfeststellungsverfahren Konrad wurden in einer geologischen Langzeitprognose die geologischen Prozesse und Ereignisse zusammengestellt, die nach Einschätzung des Antragstellers die natürlichen Barrieren des Endlagers in einem Zeitrahmen von einigen 10^5 Jahren beeinträchtigen könnten. Dabei bildeten die gewonnenen Erkenntnisse zur erdgeschichtlichen Vergangenheit der Standortregion Konrad eine wesentliche Grundlage für die Langzeitprognose.

In der Langzeitprognose wurden mögliche Auswirkungen langsam ablaufender Prozesse der globalen Klimaveränderung bzw. einer von Abtragung begleiteten epirogenen Hebung der Endlagerregion sowie Aspekte der zukünftigen Entwicklung der dem Endlager benachbarten Salzstrukturen betrachtet und die Auftretenswahrscheinlichkeit intrusiv-magmatischer Prozesse und vulkanischer Ereignisse in der Endlagerregion diskutiert und die potentiellen Effekte auf die Endlagersicherheit dargelegt.

Weiterhin wurden die nach den Erkenntnissen aus der jüngeren geologischen Vergangenheit hergeleiteten exogenen Einwirkungen einer verändernden Eiszeit innerhalb der nächsten 10^5 Jahre betrachtet und die Auswirkungen der Prozesse und Ereignisse der exogenen Dynamik auf das geplante Endlager abgeschätzt, z. B. durch mehrfache Wechsel von Kalt- und Warmzeiten und epirogene Hebungen der Endlagerregion und eine hieraus resultierende verstärkte Erosion. Innerhalb des vorgegeben Zeitrahmens von 10^5 Jahren wurde sie vom Antragsteller nicht als Sicherheitsrisiko angesehen. Darüber hinaus wurde die Endlagerregion tektonisch weitestgehend stabil und erdbeben-

arm angesehen und die Wahrscheinlichkeit der Neubildung von bedeutenden Tiefenbrüchen und das Risiko des Vulkanismus als äußerst gering eingestuft.

Bei Berücksichtigung der bisherigen geologischen Entwicklung der Standortregion Konrad waren aus Sicht der Gutachter keine für das Endlager relevanten natürlichen geologischen Prozesse und Ereignisse erkennbar, die im betrachteten Zeitrahmen zu einer Gefährdung der Endlagersicherheit führen. In der Langzeitprognose wurden alle natürlichen geologischen Prozesse und Ereignisse von allgemeiner oder regionalspezifischer Bedeutung erfasst und diskutiert wurden.

Auch heutzutage werden international in Langzeitprognosen natürliche Entwicklungen durch Prozesse betrachtet, die der Standort auch ohne die Existenz eines Endlagers nach heutigem Wissen erfahren würde. Ein bedeutender F&E-Fortschritt ist somit nicht zu erkennen.

5.1.2 Szenarientwicklung

In einer Szenarientwicklung werden Ereignisabläufe und Prozesse, wie beispielsweise solche, die zu einer Freisetzung von eingelagerten Radionukliden in die Biosphäre führen können, identifiziert, zu Szenariengruppen zusammengestellt und repräsentative Szenarien für jede Gruppe ermittelt.

5.1.2.1 International

International ist eine Reihe von Szenarienanalysemethoden entwickelt worden und zum Einsatz gelangt. Mit Hilfe der relevanten Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse (features, events an processes, FEP), welche die Entwicklung des Endlagersystems und seiner Barriereigenschaften bestimmen, werden mehr oder weniger systematisch Szenarien abgeleitet. Die Summe der FEP bildet gleichsam eine umfassende Bestandsaufnahme dessen, welche sicherheitsrelevanten Merkmale das Endlagersystem charakterisieren, welche Ereignisse in der Zukunft eintreten können bzw. welche Prozesse derzeit ablaufen oder in der Zukunft ablaufen können.

FEP-Katalog

Für eine belastbare Szenarienanalyse ist das Vorliegen einer hinreichend umfassenden FEP-Liste eine wesentliche Voraussetzung. Eine Vollständigkeit dieser FEP-Liste kann es wegen der Vielzahl und Komplexität der zu betrachtenden Prozesse einerseits und der Grenzen des menschlichen Erkenntnisvermögens andererseits nicht geben. Die Gefahr, dass wesentliche FEP übersehen wurden, kann jedoch durch die systematische Verwendung möglichst umfassender Informationsquellen, z. B. die unter Koordination der OECD/NEA erstellte FEP-Datenbank sowie die Beteiligung von Wissenschaftlern aller in Frage kommenden Fachrichtungen bei der Katalogerstellung, minimiert werden.

Szenarientwicklung

Zur Erfassung der für die Langzeitsicherheitsanalyse wesentlichen Rechenfälle werden aus der Vielzahl der möglichen Entwicklungen adäquate Szenarien identifiziert, die jeweils ein Spektrum der potentiellen Entwicklungen repräsentieren. Bei ihrer Auswahl spielt die Wahrscheinlichkeit, mit der ihr Ablauf prognostiziert wird, eine wesentliche Rolle. Transparenz und Nachvollziehbarkeit insbesondere bei den Entscheidungsmechanismen haben einen hohen Stellenwert in der Szenarientwicklung. Die international zur Anwendung gebrachten Verfahren sind daher so aufgebaut, dass eine ausführliche Dokumentation aller Entscheidungen und Festlegungen zu den Szenarien erfolgt. In vielen Langzeitsicherheitsanalysen erfolgte die Szenarienermittlung auf Basis von FEP-Katalogen, die standortspezifisch als auch wirtsgesteinsspezifisch angelegt wurden.

5.1.2.2 VSG

Im Vorhaben VSG wurde für den Standort Gorleben eine systematische Szenarientwicklung auf Basis eines FEP-Katalogs für die zu betrachtenden Einlagerungsvarianten durchgeführt und ausführlich dokumentiert.

FEP-Katalog

Entsprechend internationaler Praxis erfolgte im Vorhaben VSG die Auflistung und Beschreibung der Merkmale und Eigenschaften der einzelnen Komponenten des Endlagersystems und zukünftig möglicher Ereignisse bzw. Prozessabläufe einschließlich

ihrer gegenseitigen Beeinflussungen und Abhängigkeiten, ihrer Eintrittswahrscheinlichkeiten sowie ihrer Relevanz für Barrierenfunktionen in Form eines FEP-Katalogs. Abgeleitet wurden insgesamt 115 FEP unter Berücksichtigung

- der geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten des Standortes und der Ereignisse und Prozesse, denen dieser Standort im Nachweiszeitraum natürlicherweise unterworfen sein kann, unter besonderer Berücksichtigung ihres Einflusses auf die geologische Barriere (z. B. Einfluss mehrfacher Inlandvereisungen),
- der von den eingelagerten radioaktiven Abfällen ausgehenden Prozesse (z. B. thermischer Einfluss der Zerfallswärme auf die geologische Barriere) und
- des verschlossenen und verfüllten Endlagers, seiner geotechnischen Verschlussbauwerke und der prozessbedingten Veränderungen, die diese erfahren (z. B. fortschreitende Salzgruskompaktion).

Der FEP-Katalog basiert auf dem im Vorhaben ISIBEL erarbeiteten FEP-Katalog /ISI 10/ unter Einbeziehung des universellen FEP-Katalogs der OECD-NEA /NEA 00/. In der Projektstruktur des Vorhabens VSG bildete der FEP-Katalog das zentrale Verbindungselement zwischen den Grundlagen (Standortbeschreibung, geowissenschaftliche Langzeitprognose und Abfallspezifikation, den entwickelten Endlagerkonzepten und der Systemanalyse. Insbesondere bildet er die Vorstufe für die Szenarientwicklung, die wiederum die Basis für die Integritätsanalysen und die radiologische Konsequenzenanalyse ist. Die Ergebnisse wurden in /WOL 12a/ und /WOL 12b/ dokumentiert.

Szenarientwicklung

Im Vorhaben VSG wurden eine systematische Szenarientwicklung auf Basis des FEP-Katalogs und der zu betrachtenden Einlagerungsvarianten durchgeführt und denkbare Entwicklungsmöglichkeiten identifiziert. Die identifizierten Szenarien wurden entsprechend ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit in die Kategorien „wahrscheinlich“ oder „weniger wahrscheinlich“ eingeordnet. Die Notwendigkeit dazu ergibt sich aus den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/, wobei in Abschnitt 6 in Abhängigkeit von der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Szenariums unterschiedlich restriktive radiologische Schutzkriterien angesetzt werden. Entsprechend der Einordnung der Eintrittswahr-

scheinlichkeit erfolgte die Ableitung eines Referenzszenariums (je Einlagerungskonzept) und mehrerer weniger wahrscheinlicher Alternativszenarien (Abb. 5.1)

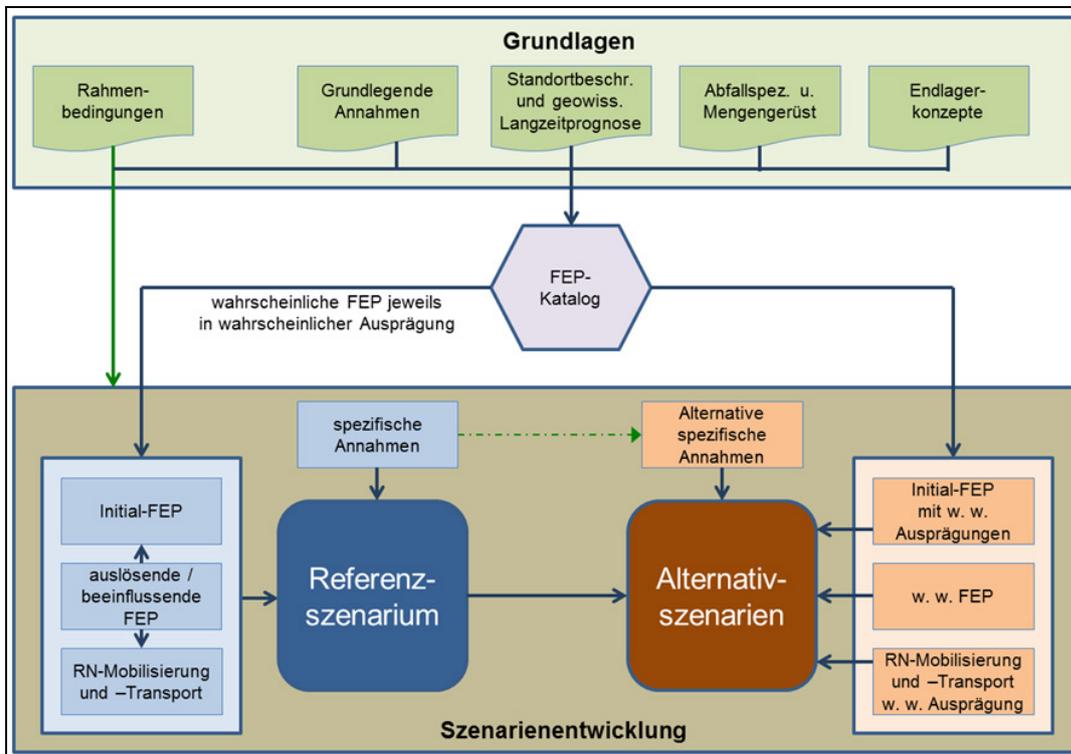


Abb. 5.1 Schematische Darstellung der methodischen Elemente für die Szenarientwicklung aus /BEU 12b/

Die abgeleiteten Szenarien bildeten die Grundlage für die Ableitung von Rechenfällen für die nachfolgenden rechenmodellgestützten Sicherheitsanalysen. Auf der Grundlage dieser Szenarien wurden für die nachfolgenden Sicherheitsanalysen Lastfälle (Ereignisse und Prozesse, die das Barrierensystem potentiell beeinträchtigen können) für die geologische Barriere und die geotechnischen Barrieren identifiziert, aus denen die entsprechenden Rechenfälle abgeleitet wurden. Methodik und Ergebnisse der im Vorhaben VSG durchgeführten Szenarientwicklung wurden ausführlich in einem Abschlussbericht /BEU 12b/ dokumentiert.

5.1.2.3 Konrad

Im Planfeststellungsverfahren wurden bestehende FEP-Listen zu internationalen Endlagerprojekten mit unterschiedlichen geologischen Umgebungen im Hinblick auf ihre Relevanz für das Untersuchungsgebiet Konrad ausgewertet. Die beschriebenen Ausbreitungsszenarien beruhen jedoch rein auf Modellparametervariationen (Durchlässig-

keitsbeiwerte eines ungestörten bzw. gestörten umgebenden Gebirges im Schichten- bzw. Störzonenmodell).

Die im Zusammenhang mit zukünftigen Klimaveränderungen für einige 10^5 Jahre betrachteten natürlichen Erscheinungen, Ereignisse und Prozesse stellen nach Sicht des Antragstellers eine standortspezifisch abdeckende Auswahl dar. Die Auseinandersetzung mit den möglichen klimatischen Verhältnissen und ihren Auswirkungen entsprechen für diese Aspekte einer standortbezogenen Szenarienentwicklung.

Die heutige international anerkannte Forderung nach einer nachvollziehbar dokumentierten Szenarienanalyse auf der Basis eines systematischen Analyseverfahrens stellt methodisch einen Fortschritt gegenüber der Vorgehensweise im Langzeitsicherheitsnachweis zum Endlager Konrad dar. Jedoch wurde auch damals den potentiellen Standortentwicklungen auch unter Berücksichtigung anthropogener Einflüsse (Schachtverschlüsse, alte Bohrungen) im Nachweis der Langzeitsicherheit umfassend Rechnung getragen. Wenn auch dem methodischen Vorgehen kein formalisiertes Szenarienanalyseverfahren zugrunde liegt, ist eine Herleitung von Szenarien erkennbar, wie sie auch als Ergebnis einer systematischen Entwicklung entsprechen könnte. Zur Untermauerung der Adäquatheit der im Verfahren angenommenen Prozesse und Transportpfade würde eine systematische Szenarienanalyse den heutigen Stand von W&T widerspiegeln.

5.1.3 Umgang mit Human Intrusion

Die Berücksichtigung der Szenariengruppe "Menschliche Einwirkungen" in Sicherheitsnachweisen nehmen eine Sonderstellung bezüglich der Szenarienentwicklung im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung eines Endlagersystems ein. Es werden in der Regel Szenarien unbeabsichtigten menschlichen Eindringens nach Verlust der Kenntnisse zur Existenz des Endlagers (Human Intrusion, kurz: „HI“) berücksichtigt, das Potenzial haben, das Barrierensystem eines Endlagers zu gefährden. Um Verwechslungen mit anderen Szenarien aus der Szenarienentwicklung zu vermeiden, werden diese stilisierten Szenarien als HI-Szenarien bezeichnet.

5.1.3.1 International

Die Berücksichtigung der Szenariengruppe "Menschliche Einwirkungen – Human Intrusion" in Sicherheitsanalysen entspricht der internationalen Praxis. Die Behandlung ausgewählter Szenarien in Genehmigungsverfahren für Endlagerstandorte wird international auf regulatorischer Basis (regulatorische Vorgaben) favorisiert.

International differenzieren die Länder zwischen absichtlichem und unbeabsichtigtem menschlichem Eindringen in das Endlager, wobei nur das unbeabsichtigte menschliche Eindringen im Langzeitsicherheitsnachweis berücksichtigt wird. Die Konsequenzen aus absichtlichem Eindringen werden dagegen in die Verantwortung der jeweils handelnden Gesellschaft gestellt und im Sicherheitsnachweis nicht weiter behandelt. Desweiteren wird z. T. gefordert, dass Szenarien des unbeabsichtigten menschlichen Eindringens, fallspezifisch zu erschließen sind und die Wahrscheinlichkeit eines Eindringens als auch die damit verbundenen Konsequenzen zu berücksichtigen sind.

Mit dem unbeabsichtigten Eindringen ist der Verlust über die Kenntnis des Endlagerstandortes und der davon ausgehenden radiologischen Gefahr verbunden. Unter diesem Aspekt wird insbesondere der Informationserhalt als eine mögliche Maßnahme zur Reduzierung der Wahrscheinlichkeit des menschlichen Eindringens diskutiert. In Frankreich wird in der Leitlinie ein Zeitrahmen von 500 Jahren für den Informationserhalt angegeben, der gleichzeitig den frühesten Zeitpunkt, der für ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen zu unterstellen ist, markiert. Zurzeit stellt sich international das NEA-Vorhaben „Record Keeping and Memory (RK&M)“ diesen Fragestellungen.

Bei der Ermittlung der Konsequenzen aus Szenarien menschlicher Eingriffe und ihrer sicherheitstechnischen Bewertung wird unterschieden zwischen relativ kurzzeitiger, ggf. hoher radiologischer Belastung kleiner Personengruppen bis hin zu langzeitigen dauerhaften Belastungen sogenannter kritischer Gruppen. Die Maßstäbe zur Bewertung der Konsequenzen aus diesen Szenarien sind international uneinheitlich; einige Länder verwenden die Individualdosis als Bewertungsmaßstab, andere halten eine Begrenzung der Auswirkungen unterhalb deterministischer Effekte für ausreichend. Die ICRP hat Empfehlungen, z. B. /ICRP 89/ zur Endlagerung in tiefen geologischen Formationen erarbeitet, die radiologische Richtwerte zu Individualdosen zur Bewertung der Konsequenzen aus menschlichen Eingriffen vorsieht, wobei Belastungen in der Größenordnung von 10 mSv/a Individualdosis für eine Person der kritischen Gruppe

nicht zwangsläufig eine Intervention erfordern. Aus Optimierungsgründen sollten jedoch Anstrengungen unternommen werden, die Eintrittswahrscheinlichkeit für diese Ereignisse zu reduzieren.

Weiterhin herrscht allgemeines Einvernehmen darüber, dass die Ermittlung der Szenarien für diese Szenariengruppe nicht in gleicher Weise erfolgen kann wie die Szenarioanalyse der natürlichen Standortentwicklung. Es ist allgemein anerkannt, dass vor dem Hintergrund der langen zu betrachtenden Zeiträume die Prognosefähigkeit der Entwicklung der menschlichen Gesellschaft, der Entwicklung des technischen Vermögens der dann tätigen Menschen sowie der Entwicklung des Rohstoffbedarfs beschränkt ist. Daher wird empfohlen, ausgewählte Szenarien menschlicher Einwirkungen zu analysieren, um an Beispielen das Isolationsvermögen des Gesamtsystems Endlager aufzuzeigen /NEA 95a/. Dabei werden heute übliche menschliche Aktivitäten und Praktiken nach Stand der Technik zugrunde gelegt.

5.1.3.2 Sicherheitsanforderungen/VSG

Die Sicherheitsanforderungen des BMUB sehen vor, dass eine Optimierung des Endlagers auch mit Blick auf eine zuverlässige Isolation der radioaktiven Stoffe im Endlager vor zukünftigen menschlichen Aktivitäten vorzunehmen ist. Allerdings sind derartige Optimierungsmaßnahmen nachrangig zu anderen Optimierungszielen durchzuführen, da zukünftige menschliche Aktivitäten nicht prognostiziert werden können. Nach /BMUB 10/ sind Referenzszenarien für ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in das Endlager, denen derzeit übliche menschliche Aktivitäten zugrunde liegen, zu analysieren. Im Sinne der Optimierung ist auf eine Reduzierung der Wahrscheinlichkeit des Eintretens unbeabsichtigten menschlichen Eindringens bzw. der resultierenden radiologischen Auswirkungen auf die allgemeine Bevölkerung hinzuwirken. Für Entwicklungen aufgrund eines unbeabsichtigten Eindringens in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich wird kein Wert für zumutbare Risiken oder zumutbare Strahlenexpositionen festgelegt.

In der VSG wurden die aus heutiger Sicht denkbaren zukünftigen menschlichen Aktivitäten identifiziert und beschrieben, die nach einem Verlust des Wissens um die Existenz eines Endlagers im Untergrund zu einem unbeabsichtigten Eindringen (unter Annahme heutiger Rohstoffbedürfnisse und Explorationstechnologien) in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich führen konnten. Dazu wurden drei Szenarien (Ab-

teufen einer Tiefbohrung, Solen einer Kaverne, Auffahrung eines Gewinnungsbergwerks in der Nachbarschaft des Endlagers) abgeleitet und mögliche technische Maßnahmen zur Reduzierung der Wahrscheinlichkeit oder Begrenzung der radiologischen Konsequenzen aus erfolgtem menschlichen Eindringen untersucht.

Für diese Szenarien wurden mögliche Optimierungsmaßnahmen identifiziert, die vornehmlich auf ein frühzeitiges Erkennen einer Anomalie bzw. Auffälligkeit durch hinweisgebende bzw. als Indikator wirkende Maßnahmen abzielen. Weiterhin wurden Optimierungsmaßnahmen zur möglichen Reduzierung der mit dem menschlichen Eindringen verbundenen Konsequenzen durch konzeptionelle Maßnahmen identifiziert. Diese Optimierungsmaßnahmen wurden abschließend hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit und möglicher Konflikte zu den primären Optimierungszielen Strahlenschutz und Sicherheit in der Betriebsphase, Langzeitsicherheit, Zuverlässigkeit und Qualität des langfristigen Einschlusses der Abfälle, Sicherheitsmanagement sowie technischer und finanzieller Realisierbarkeit abgewogen. Weiterhin wurde eine Einschätzung der Erfolgsaussichten bzw. des Nutzens der jeweiligen Optimierungsmaßnahme vorgenommen.

Insgesamt ist aus den Erfahrungen aus dem Vorhaben VSG festzustellen, dass die Möglichkeiten zur Optimierung eines Endlagersystems gegen menschliches Eindringen stark begrenzt sind. Im Ergebnis der Abwägung und Diskussion möglicher Optimierungsmaßnahmen verblieben nur zwei Maßnahmen, wobei in keinem Fall eine quantitative Beurteilung der Reduktion radiologischer Konsequenzen möglich war. Hintergrund ist, dass die Maßnahmen lediglich einen hinweisgebenden Charakter in Bezug auf menschliche Aktivitäten bzw. stattgefundenen Bergbau am Standort haben können. Ob und in welcher Weise zukünftige Generationen auf derartige Hinweise auf bergbauliche Anomalien reagieren werden, ist ungewiss. Zur quantitativen Beurteilung der Wirkung der Maßnahmen lassen sich somit keine klaren Randbedingungen aufstellen, da der Erfolg der Maßnahme maßgeblich von der Deutung der Auffälligkeit und den unbekanntem, daraus resultierenden Entscheidungen der in der Zukunft handelnden Personen abhängt. Methodik und Ergebnisse der HI-Analyse wurden in /BEU 12a/ dokumentiert.

5.1.3.3 Konrad

Die "Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk" /BMI 83/ enthalten keine Festlegungen zum Aspekt des unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in ein Endlager. Die Planfeststellungsbehörde hatte deshalb eine "Stellungnahme zu unbeabsichtigten menschlichen Einwirkungen auf das Endlager Konrad in der Nachbetriebsphase" erarbeiten lassen, in der ausgeführt wurde, dass für den Bereich des Endlagers Konrad nach damaliger Kenntnis grundsätzlich nur zukünftige bergbaulich-rohstoffwirtschaftlichen Tätigkeiten denkbar seien. Im Planfeststellungsverfahren wurden daher zur Bewertung der Szenariengruppe „unbewusste menschliche Einwirkungen zwei Szenarien untersucht:

- Prospektion und Gewinnung von Eisenerz, von Kohlenwasserstoffen (Erdöl, Erdgas, Kondensat), von Salzen (Steinsalz, Kalisalze), von Sole, von Steinen, Erden und Industriemineralien und von geothermischer Energie
- Bau von Kavernen oder Bergwerken für Speicher- und Deponiezwecke.

Vor dem Hintergrund, dass die o.g. Explorationstätigkeiten jeweils mit dem Niederbringen von Tiefbohrungen bzw. dem Abteufen von Schächten eingeleitet werden, wurde abgeleitet, dass als ungünstigster möglicher Fall das Anbohren des Endlagers beim Niederbringen einer Tiefbohrung, rd. 300 Jahre nach Verschluss des Endlagers, im Bereich einer Endlagerungskammer mit 6 m Stapelhöhe der Abfallgebände, zu betrachten waren. Die Ergebnisse dieser Rechnungen zeigten, dass auch bei den getroffenen sehr ungünstigen Annahmen durch ein unbeabsichtigtes Anbohren des Endlagers bei einem unterstellten Informationsverlust bereits nach 300 Jahren das damit verbundene Strahlenrisiko im Bereich dessen lag, wie es für Personen in der Kerntechnik (§ 55 StrlSchV /STV 01/) als zulässig gilt. Der bewusste Eingriff des Menschen in das Endlagersystem wurde entsprechend der internationalen Gepflogenheiten nicht unterstellt.

Die Analyse der menschlichen Einwirkungen sowohl hinsichtlich der Vorgehensweise bei der Szenarienauswahl als auch der Bewertung der ermittelten Konsequenzen entsprach bereits damals dem heutigen Verständnis und entspricht unter Berücksichtigung zwischenzeitlicher neuer internationaler Erkenntnisse dem Stand von Wissenschaft und Technik.

5.2 Integritätsanalyse

5.2.1 International

International sind die mit dem Nachweis der Integrität des Gebirges um ein Endlager (Wirtsgestein und/oder des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs) verbundenen Anforderungen in den letzten Jahren in Bezug auf Methodik (Integritätsanalysen) und Werkzeuge (Berechnungsprogramme) im konkreten Nachweisverfahren stark gewachsen. In internationalen wie nationalen Untersuchungen werden bereits seit Jahren Anstrengungen unternommen Nachweismethoden zur Integritätsanalyse zu entwickeln und umzusetzen.

5.2.2 VSG

Im Vorhaben wurden gemäß dem Sicherheits- und Nachweiskonzept der VSG die Integritätsuntersuchungen zunächst für die gesamte geologische Barriere, welche die Salzstruktur Gorleben umfasst, sowie für die geotechnischen Verschlussbauwerke durchgeführt. Die Erfordernis für die Durchführung von Integritätsanalysen der geologischen Barriere leitet sich direkt aus den Sicherheitsanforderungen des BMUB /BMU 10/, wonach für sämtliche wahrscheinliche Entwicklungen nachgewiesen werden muss, dass die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches über den Nachweiszeitraum von 1 Mio. Jahre sichergestellt ist.

Im Vorhaben wurden modellgestützte Integritätsanalysen zur geologischen Barriere der Salzstruktur Gorleben durchgeführt. Diese untersuchen die thermomechanischen Einwirkungen der Abfallwärme auf das umgebende Salzgestein sowie die Auswirkungen von klimatischen Veränderungen (z. B. Vereisung des Standortes).

Für die Nachweisführung der Integrität der geotechnischen Barrieren (s. Abb. 5.2) wurden die Abdichtbauwerke so geplant, dass diese eine dem Sicherheitskonzept genügende Abdichtwirkung entfalten, in dem sie den Zutritt von Deckgebirgs- und Formationswässern in die Einlagerungsbereiche möglichst vollständig unterbinden. Weiterhin wurde nachgewiesen, dass diese Abdichtwirkung über die geplante Funktionsdauer erhalten bleibt. Neben der Auslegung der Abdichtbauwerke, d. h. die Konzeptplanung der Abmessungen, der eingesetzten Materialien und der Herstellung von Schacht- und Streckenverschlüsse waren die entsprechenden Nachweisforderungen

des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes umzusetzen. Letztere bezogen sich auf den Nachweis eines ausreichend hohen hydraulischen Widerstandes und den Nachweis der Funktionstüchtigkeit der geotechnischen Abdichtbauwerke über die vorgesehene Funktionsdauer von ca. 50.000 Jahren. Hierbei waren alle thermischen, mechanischen, hydraulischen und geomechanischen Prozesse zu berücksichtigen, die die Funktionsfähigkeit der Abdichtbauwerke in Frage stellen.

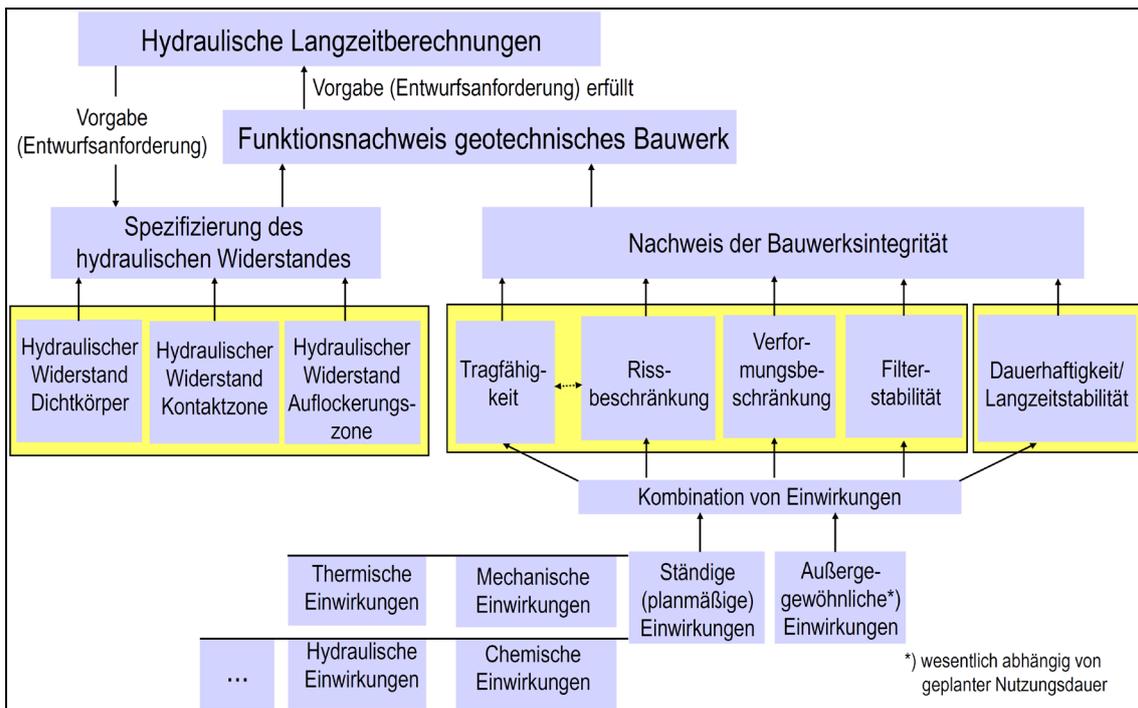


Abb. 5.2 Struktur des technischen Funktionsnachweises für das Verschlussystem des Endlagerkonzeptes der VSG, aus /MÜL 12/

Die Durchführung der Integritätsanalysen erfolgte im Vorhaben VSG u. a. über die Prüfaspekte:

- Modell- und prozessmäßige Umsetzung der Szenarien
- Modellbildung (Auflösung, Dimensionalität etc.)
- Eingesetztes Recheninstrumentarium
- Schlüssigkeit und Richtigkeit der Ergebnisaussagen zum
 - Erhalt der Mächtigkeit der geologischen Barriere im einschlusswirksamen Gebirgsbereich,
 - Erhalt der Integrität (Eigenschaften) der geologischen Barriere,

- Erhalt der Integrität der geotechnischen Verschlussbauwerke über den geforderten Wirkzeitraum.

Im Ergebnis der Integritätsanalyse konnte festgestellt werden, dass bei allen zukünftig zu erwartenden Lastfällen auch bei extrem pessimistischen Annahmen oberhalb der konzipierten Einlagerungsbereiche eine intakte geologische Barriere von mehreren 100 m Salzgestein verbleibt.

5.2.3 Konrad

Im Planfeststellungsverfahren Konrad wurden Integritätsanalysen unter den Gesichtspunkten Gebirgsmechanik und Seismologie durchgeführt. Die derzeitige Standfestigkeit des Grubengebäudes Konrad wurde durch zahlreiche übertägige und untertägige Messungen und Beobachtungen zur Gebirgsmechanik der Schachanlage (u. a. kein Auftreten von übertägigen Senkungsschäden) bestätigt. Gebirgsmechanische Modellrechnungen zeigten, dass die Standfestigkeit der untertägigen Anlagen sowie der Schächte auch in der Nachbetriebsphase des Endlagers Konrad nicht gefährdet ist /NMU 02/.

Zur Ermittlung der Erdbebengefährdung wurden alle seismischen Ereignisse mit Abständen bis zu 200 Kilometern um Konrad berücksichtigt und zur Bestimmung des Bemessungserdbebens die jüngeren tektonischen Störungen im Umkreis des Standortes als potentielle Erdbebenzonen in Betracht gezogen.

Die Auswirkungen von Klimaveränderungen und Abtragungen durch epirogene Bewegungen auf die Integrität des Endlagers und seines einschlusswirksamen Gebirges wurde im Rahmen der geowissenschaftlichen Langzeitprognose analysiert.

Da die Nachweisführung der Langzeitsicherheit für Konrad mit der Ausnahme der Schachtverschlüsse nicht auf Basis von geotechnischen Barrieren beruht, wurden die gebirgsmechanischen Analysen auf die Integrität des Grubengebäudes (Standfestigkeit) und dem Wirtsgesteins bzw. dem Deckgebirge nach Stand von Wissenschaft und Technik beschränkt. Angesichts des Sicherheitskonzeptes, welches hauptsächlich auf lange Transportzeiten gelöster Radionuklide im tiefen Untergrund, wäre diese Vorgehensweise prinzipiell auch heute üblich.

5.3 Radiologische Konsequenzenanalyse

5.3.1 International

Die radiologische Konsequenzenanalyse ist ein zentraler Bestandteil einer Langzeitsicherheitsanalyse. Durch die Simulation des Transports von freigesetzten Radionukliden wird das Einschuss- bzw. Rückhaltevermögen des Endlagersystems untersucht. Dies bildet auch die Grundlage für den Nachweis, dass regulatorisch festgelegte radiologische Schutzziele über den gesamten Nachweiszeitraum eingehalten werden.

In der radiologischen Konsequenzenanalyse werden konzeptionelle Modelle der Hydrogeologie des Standortes in mathematische Modelle überführt und eine Berechnung der räumlichen und zeitlichen Abhängigkeit der zu berechnenden Zielgrößen vorgenommen. Diese Rechnungen dienen der Beschreibung des Standortes und seiner potentiellen Entwicklung einerseits und die Beschreibung des potentiellen Radionuklidtransportes und seiner radiologischen Konsequenzen andererseits. Ergebnisse der Konsequenzenanalyse sind beispielsweise die Grundwassergeschwindigkeit im Modellgebiet, die Radionuklidkonzentration im Grundwasser und in der Biosphäre sowie die potentielle Dosisbelastung.

International wird in Langzeitsicherheitsanalysen das Gesamtsystem Endlager häufig in drei Teilsysteme gegliedert (Nahfeld, Geosphäre und Biosphäre), zu deren Analyse entsprechende Rechencodes entwickelt wurden. Die Grundanforderung an diese Rechencodes ist der Nachweis auf deren Einsatzfähigkeit, d.h. sie müssen das gestellte Problem erfassen und lösen können (Validierung, Qualifizierung). Daher dürfen in der Langzeitsicherheitsanalyse nur entsprechend qualifizierte Rechenprogramme zum Einsatz gelangen.

5.3.2 VSG / VerSi / EMIL

Zentraler Aspekt der radiologischen Konsequenzenanalyse der VSG war die Ermittlung möglicher radiologischer Konsequenzen der verschiedenen zu betrachtenden Szenarien gemäß der in den Sicherheitsanforderungen des BMUB geforderten radiologischen Langzeitaussage u. a. durch Überprüfung der Erfüllung der in /BMU 10/ dargestellten radiologischen Schutzkriterien. Die Bewertung der Qualität des einschusswirksamen Gebirgsbereichs im Hinblick auf den Einschuss der in den Abfällen enthaltenen Radio-

nuklide erfolgte in der VSG für die verschiedenen Szenarien anhand einer Betrachtung der potentiellen Freisetzungen von Radionukliden über den Lösungspfad und über den Gaspfad für alle wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Szenarien.

Im Detail wurden die Auswirkungen der verschiedenen Szenarien mittels geeigneter Rechenfälle ermittelt. Bei der Ableitung der Rechenfälle wurde unterschieden, ob die wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Szenarien (Referenz- und Alternativszenarien)

- direkt die Radionuklidmobilisierung bzw. ihren Transport im integren Zustand des Barrierensystems betrafen und somit direkt in Rechenfälle zu überführen waren oder
- erst in Integritätsanalysen zunächst dahingehend überprüft wurden, ob sich die Eigenschaften der geologischen bzw. geotechnischen Barrieren so ändern, dass im Rahmen der Konsequenzenanalyse hierzu zusätzliche Rechenfälle abgeleitet werden mussten.

Entsprechend des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes der VSG und der durchgeführten Nachweisführung des möglichst vollständigen Radionuklideinschlusses im ewG wurden in der Konsequenzenanalyse keine Deckgebirgsrechnungen durchgeführt.

Mit dem Ziel, eine Methode für einen Standortvergleich von Endlagern in verschiedenen Wirtsgesteinen zu erarbeiten, wurde das Verbundprojekt "Durchführung vergleichender Sicherheitsanalysen für Endlagersysteme zur Bewertung der Methoden und Instrumentarien" (**VerSi**) initiiert. Im Teilvorhaben „Entwicklung eines synthetischen Tonsteinstandortes“ führte die GRS zur Charakterisierung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches um ein Endlager in Tonstein (s. Abb. 5.3) und zur Definition der hydraulischen Randbedingungen an der Grenze des ewG zweidimensionale Modellrechnungen unter Berücksichtigung eines linearen Dichtegradienten (ein mit der Teufe zunehmender Salzgehalt) durch. In der Auswertung wurden die Ergebnisse mit Ergebnissen von Süßwasserrechnungen (s. Abb.5.4) verglichen.

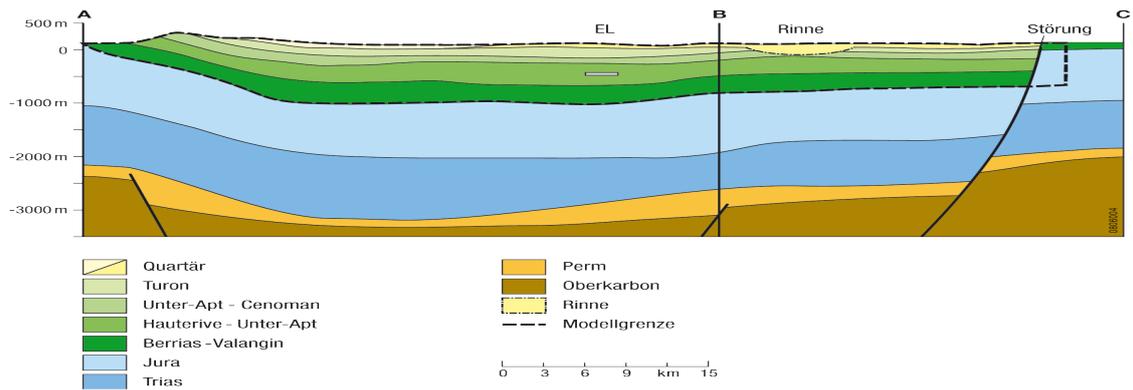


Abb. 5.3 Modell der Salz-/Süßwasserrechnungen an einem Tonsteinstandort

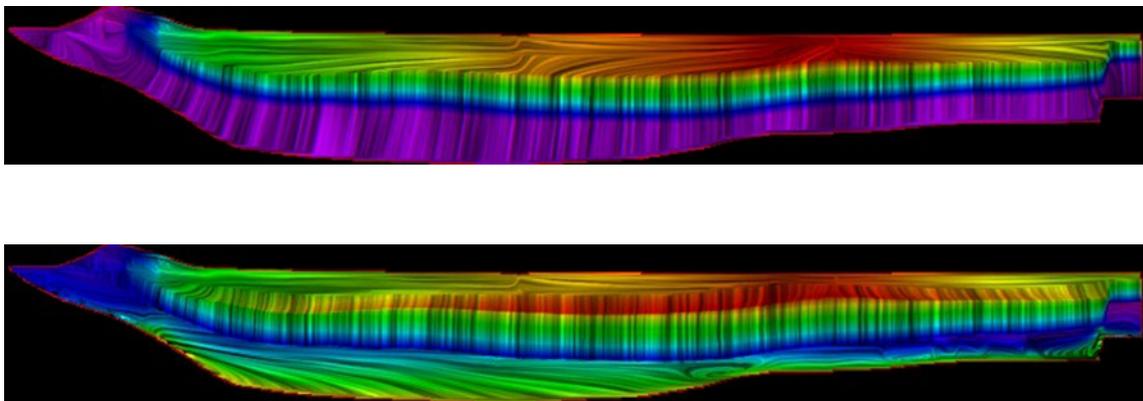


Abb. 5.4 Ergebnisse der 2D-Modellrechnungen, Rechenzeitraum 10.000 a, Stromliniendarstellung (oben Süßwasserrechnung, darunter Salinitätsrechnung)

In den Ergebnissen der Modellierung eines generischen Standortes zeigten sowohl die Süßwasser- also auch die Salinitätsrechnungen, dass sich über dem Endlager ein vertikaler hydraulischer Gradient zur Oberfläche ausbildet.

Eine Detailauswertung hinsichtlich Anforderungen für die Abmessung eines ewG um das Endlager (s. Abb. 5.5) ergab dass der advective Transport gegenüber dem diffusiven Transport von untergeordneter Bedeutung war.

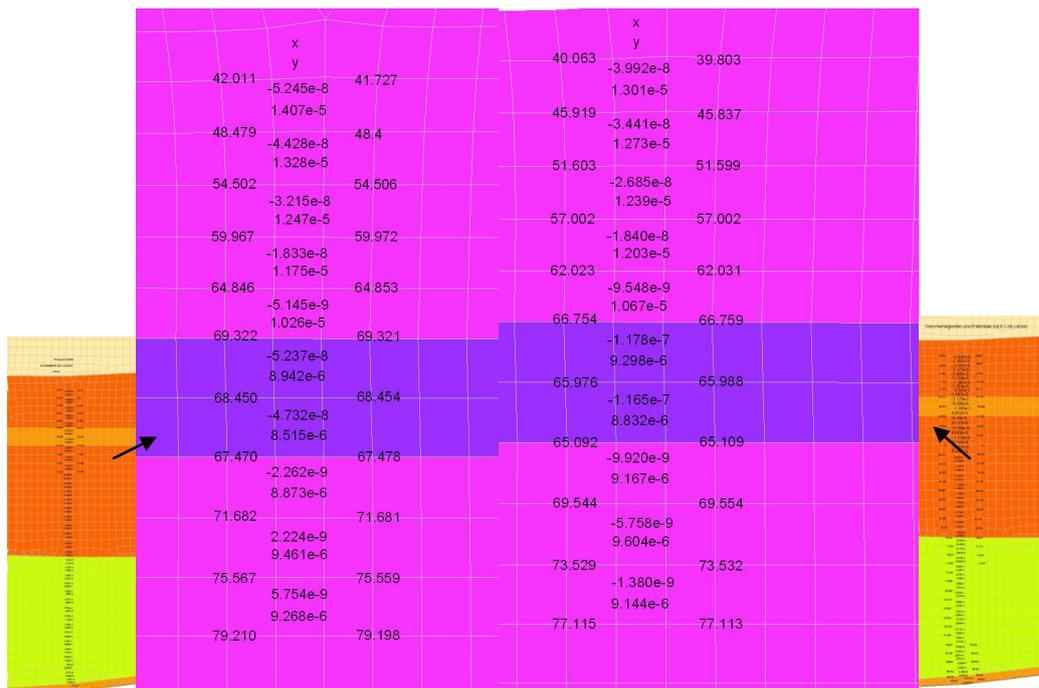


Abb. 5.5 Ergebnisse der 2D-Modellrechnungen, Abstandsgeschwindigkeiten und Druckhöhen (Süß-/Salzwasserrechnung) in einem Modellausschnitt des Wirtsgesteins im Bereich des Endlagers (blau)

Eine weitere Betrachtung der Abstandsgeschwindigkeiten ließ vermuten, dass hinsichtlich des dichtegetriebenen Salztransports in den Rechnungen noch kein quasi-stationärer Zustand erreicht wurde. Deshalb wurden die Rechnungen über längere Zeiträume weitergeführt. Die Ergebnisse in Abb. 5.6 zeigen den hydraulischen Zustand des Systems zu den Zeitpunkten von 1 Million bis 5 Millionen Jahren bei unveränderten Randbedingungen.

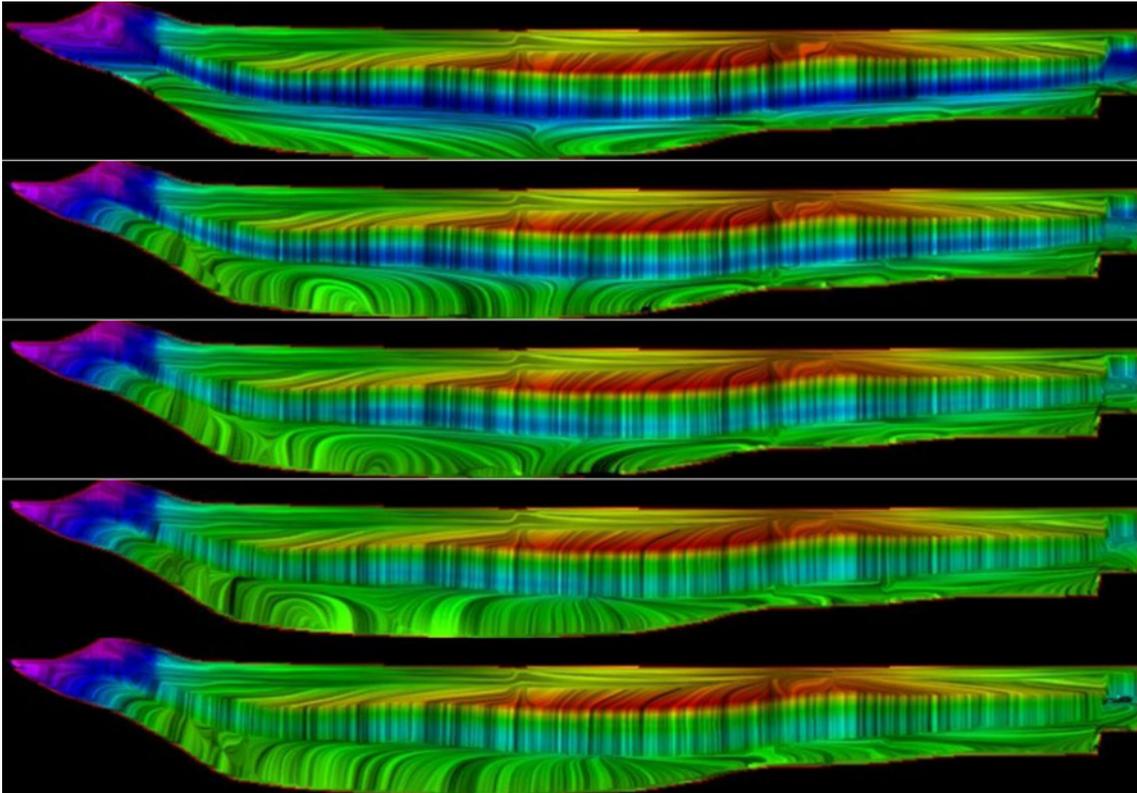


Abb. 5.6 Ergebnisse der 2D-Modellrechnungen, Stromliniendarstellung der Salinitätsrechnungen (Rechenzeitraum von 1.000.000 a, oben, bis 5.000.000 a unten)

Weitere Rechenergebnisse zeigten, dass auch nach fünf Millionen Jahren weiter vermehrt Süßwasser im Wiederergänzungsgebiet (links) in die Tiefe dringt und eine Versüßung der tiefen Schichten stattfindet. Gleichzeitig bauen sich die Druckpotentiale im Liegenden des Endlagers langsam ab und es entstehen Konvektionswalzen.

Im Ergebnis der zur Charakterisierung eines Standortes im Tonstein wurde durch die Grundwasserströmungsberechnungen in einem Salz-/Süßwassersystem mit linearen Dichtgradienten über lange Zeiträume gezeigt, dass ein vornehmlich diffusionsgetragener Stofftransport vorherrscht.

Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens 3614R03200 (EMIL) entwickelt die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH den Stand von Wissenschaft und Technik zur Führung und Bewertung von Langzeitsicherheits-

nachweisen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle mit folgenden Schwerpunktthemen weiter:

- Reaktive Transportprozesse und Kinetik geochemischer Reaktionen
- Radionuklidtransportverhalten in Süß-/Salzwassersystemen unter Berücksichtigung von Dichte- und Viskositätsunterschieden
- Szenarienentwicklung.

Unter dem Arbeitspunkt „Radionuklidtransportverhalten in Süß-/Salzwassersystemen unter Berücksichtigung von Dichte- und Viskositätsunterschieden“ wird der Stand von W&T bei der Modellierung von Strömungs- und Transportprozessen in Grundwassersystemen mit variabler Salinität eruiert. Weiterhin werden Modellansätze zur Modellierung dichteabhängiger Strömungsvorgänge bei Langzeitsicherheitsanalysen zusammengestellt.

Die GRS untersucht, inwieweit die in der GRS für Langzeitsicherheitsanalysen bei Endlagern für radioaktive Abfälle entwickelten Modelle und Rechencodes SPRING bzw. TOUGH2 zur gutachterlichen Bewertung von dichteabhängigen Strömungsvorgängen in Langzeitsicherheitsnachweisen auf dem neuesten Stand von W&T anzupassen bzw. weiterzuentwickeln sind. Neben der Erfassung der im Zusammenhang mit den Langzeitsicherheitsanalysen bei der Endlagerung radioaktiver Stoffe in geologischen Formationen entwickelten Modellansätzen hinsichtlich dichteabhängiger Strömungsvorgänge und der Ableitung eines Katalogs von Minimalanforderungen für die Modellierung von dichteabhängigen Strömungs- und Transportvorgängen in den zukünftigen Sicherheitsanalysen führt die GRS mit den weiterentwickelten Rechencodes Modellrechnungen in Süß-/Salzwassersystemen an Prinzipmodellen durch.

5.3.3 Konrad

Um die Langzeitsicherheit des Standortes auch unter Berücksichtigung ungünstiger Gegebenheiten und Prozesse in ihrer Konsequenz zu analysieren, wurden im Planfeststellungsverfahren Konrad Berechnungen für einen möglichen Transport von Radionukliden aus dem Endlagerbereich in die Biosphäre durchgeführt. Die im Verfahren durchgeführten radiologischen Konsequenzenanalysen beruhen auf Grundwassertransportrechnungen zum Endlager Konrad und bauen auf geologische und hydrogeologische Modellvorstellungen auf Basis der Standortcharakterisierung auf. Die 3D-

Modelle orientierten sich hinsichtlich der Modellgröße und dem Modellaufbau an den geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten entsprechend der Charakterisierung des Standortes. Die modellierten Ausbreitungspfade als Ergebnis der Konsequenzenanalyse des Plans zeigt Abb. 5.7 in einem Schnitt durch das 3D-Modellgebiet (Quelle: www.endlager-konrad.de).

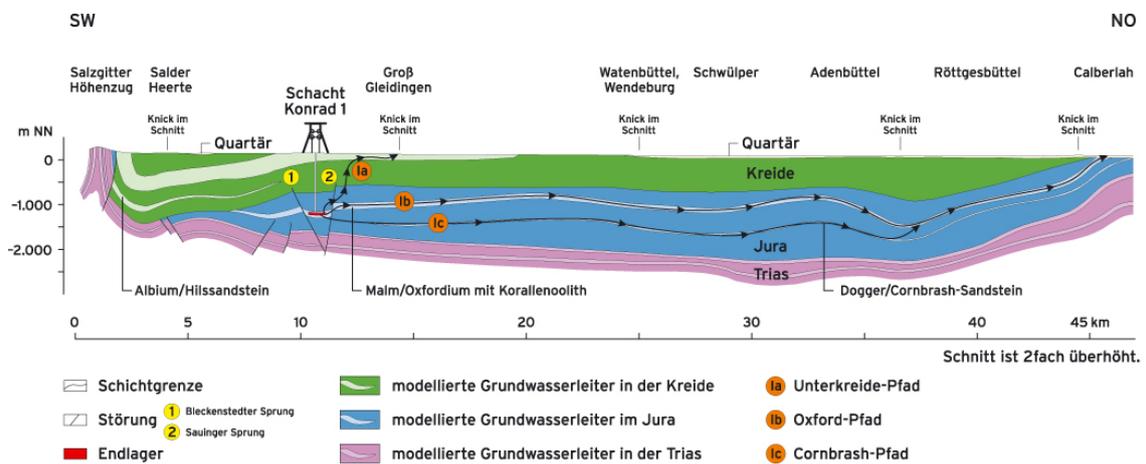


Abb. 5.7 Darstellung der modellierten Ausbreitungspfade im Plan (aus www.endlager-konrad.de)

Die Konsequenzenanalyse erfolgte mittels Süßwasserrechnungen und wurde im Ergebnis als konservativ im Hinblick auf den Grundwasser- und Radionuklidtransport eingestuft, da aufgrund der vorliegenden Dichteschichtung der Aufstieg von Tiefenwässern aus dem Endlagerbereich zur Biosphäre verhindert oder zumindest erschwert und diese begünstigende Eigenschaft jedoch in den Süßwassermodellen vernachlässigt wurde.

Die Grundwassersituation am Standort verzeichnet in Teufen größer 200 m eine zunehmende Dichte mit der Teufe. Damit verbunden ist eine Abnahme der advektiven Grundwasserbewegung mit der Teufe. Insbesondere in den Teufen des Endlagerbergwerks Konrad ist anzunehmen, dass der Transport von Inhaltsstoffen im Grundwasser vornehmlich diffusionsbestimmt ist. Die analytische Behandlung eines advektiven Grundwassertransports führte zu einem schnellen Radionuklidtransport, d. h. im Vergleich zur Diffusion wird eine deutlich kürzere Transportzeit der Radionuklide in die Biosphäre errechnet.

Bei Berücksichtigung der salinitätsabhängigen Flüssigkeitsdichte sind im Vergleich zu Grundwasserströmungen bei konstanter (Süßwasser-)Dichte eine überwiegend hori-

zontale Ausbreitung der Radionuklide und Zirkulationsströmungen zu erwarten, die den vertikalen Nuklidtransport nach oben erheblich erschweren bzw. verzögern können. Die nicht-lineare, salzanteilabhängige Adsorption kann die Nuklidverteilung stark beeinflussen und die Nuklidrückhaltung deutlich im Vergleich zum Fall ohne salzanteilabhängige Adsorption reduzieren.

Die Freisetzung der Radionuklide aus dem Endlager führt weiterhin aufgrund der Grundwasserströmungssituation zu einer räumlichen Verteilung der Radionuklide. Im Fall Konrad basiert der Nachweis der Langzeitsicherheit auf eindimensionalen Transportanalysen. Der Transport der Radionuklide wurde in einer eindimensionalen Stromröhre analysiert und unterstellt, dass der Radionuklidtransport nur entlang der Ausbreitungspfade mit kürzester Laufzeit erfolgt. Mit Hilfe der Durchströmungsrate durch das Endlager, den Standzeiten für Gebinde, den Löslichkeitsgrenzen und dem Retardationsvermögen der Gebinde wurden nuklidspezifische Freisetzungsraten bestimmt. Alle aus dem Endlager freigesetzten Radionuklide gelangten unter Berücksichtigung der Retardation und des radioaktiven Zerfalls durch diese Stromröhre in die Biosphäre, wobei diese Kanalisierung des Transports durch die Stromröhre zu einer Überschätzung der Konzentration der Radionuklide in der Biosphäre führte.

Im Ergebnis der Süßwasserrechnungen zeigte sich, dass die natürlichen Wegsamkeiten zu den grundwasserführenden Schichten in Oberflächennähe äußerst gering sind, da die Unterkreide als mächtige tonige Barriere den Einlagerungshorizont nach oben großflächig abdichtet.

Parameterunsicherheiten und ihren Konsequenzen wurde durch gezielte Parametervariationen nachgegangen, wobei auch deterministische Referenzdatensätze sowohl durch Expertenmeinung als auch durch probabilistische Unsicherheitsanalysen untermauert und sensitive Parameter identifiziert wurden:

Unterschiedliche Interpretationen der Wirkung einzelner geologischer Formationen führten auf der Seite der Gutachter zu einer im Detail veränderten Modellvorstellung, die von den Gutachtern als diversitäres Modell in die Sicherheitsbetrachtung der Langzeitsicherheit des Endlagers einbezogen wurden.

Die Rechnungen des Antragstellers (Stratigraphisches Modell (SWIFT), Störzonenmodell (FEM301), Modell "alte Bohrungen - Schachtverschluss" (FEM301) und Modell "Gasausbreitung im Endlager" (ECLIPSE100)) wurden durch die Gutachter der Ge-

nehmungsbefugnisbehörde über diversitäre Rechnungen (Stratigraphisches Modell des Antragstellers (SWIFT, NAMMU, CFEST), Störzonenmodell des Antragstellers (CFEST, NAMMU), Modell "Gasausbreitung im Endlager" (TOUGH2). Diese wurden mit Berechnungen zum Parametermodell (mit einer zum Antragsteller unterschiedlichen Interpretation der Modellränder), probabilistischen Rechnungen (zur Absicherung des Datensatzes für das Parametermodell) und zum Modell "alte Bohrungen - Schachtverschluss" der Gutachter der Planfeststellungsbehörde (NAMMU) ergänzt.

Durch die eingesetzten eindimensionalen Stromröhrenmodelle wurden szenarienabhängig verschiedene Transportwege, z. B. kürzester Laufzeit für Grundwasserpartikel durch die Geosphäre nachgebildet. Mit Hilfe der Durchströmungsrate durch das Endlager, den Standzeiten für Gebinde, den Löslichkeitsgrenzen und dem Retardationsvermögen der Gebinde wurden Quellterme bestimmt. Ein zusätzlicher Freisetzunganteil durch Kolloidbildung wurde nicht angenommen. Hintergrund war, dass Forschungsergebnisse gezeigt hatten, dass unter den vorliegenden hochsalinaren Grundwasserbedingungen nicht mit stabilen Kolloiden gerechnet werden muss. Die Folge der hohen Ionenkonzentration ist eine Ausflockung von Kolloidpartikeln unter Verlust ihrer Transportfähigkeit und führt bei den vorliegenden Salinitäten dazu, dass die Radionuklidmobilität nicht höher liegt, als nach der thermodynamischen Löslichkeit maximal möglich. Bei ihrem Durchgang durch die Stromröhre unterlagen die Radionuklide den gesteinsabhängigen Sorptionsmechanismen. Modelltechnisch wurde die Retardation mittels des Kd-Konzeptes behandelt.

Die Modellbetrachtungen in der radiologischen Konsequenzenanalyse zeigen, dass Einträge in das oberflächennahe Grundwasser frühestens nach circa 300.000 Jahren auftreten könnten, und zwar zunächst durch nicht retardierende Radionuklide wie Iod-129. Der Transport von langlebigen Radionukliden, die eine höhere Retardation in der Geosphäre erfahren, wie Radium-226 ergeben in den Modellrechnungen erst nach mehreren Millionen Jahren relevante Konzentrationen. Auf Basis dieser Modellrechnungen wurde in einem Zeitraum von 300.000 bis 360.000 Jahren nach dem Verschluss des Endlagers Konrad eine Strahlenexposition (effektive Dosis) für einen Säugling von maximal mit 0,26 Millisievert pro Jahr (Strahlenexposition in der Nachbetriebsphase des geplanten Endlagers Konrad bei Berechnung nach den Vorschriften der Neufassung der StrlSchV vom 20.07.2001 /NMU 02/) und für einen Erwachsenen mit höchstens 0,06 Millisievert jährlich berechnet.

Die Konsequenzenanalysen und die Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen der verwendeten Modellparameter zur Langzeitsicherheit des Endlagers Konrad wurden mit qualifizierten Rechencodes durchgeführt. Der Qualifizierungsstand dieser Rechencodes war hinsichtlich des dichteabhängigen Radionuklidtransportes in großräumigen Modellen jedoch zum damaligen Zeitpunkt noch nicht so weit fortgeschritten, dass er als qualifiziert – vergleichbar dem Qualifizierungsaufwand für Süßwassercodes – eingestuft werden konnte. Die Konsequenzenanalysen wurden deshalb im Verfahren in Ermangelung vorhandener Modelltechnik auf der Basis einer konservativen Vorgehensweise von Süßwassersystemen durchgeführt. Die am Standort Konrad gemessene Dichteschichtung in den Tiefenwässern aufgrund zunehmender Salinität mit der Tiefe wurde als ein qualitatives Argument für geringe Transportgeschwindigkeiten bzw. für diffusions-dominante Prozesse von aus dem Endlager in die Geosphäre freigesetzten Radionuklide im Sicherheitsnachweis verwendet und damit die Konservativität der Vorgehensweise im Sicherheitsnachweis u. a. begründet und die Robustheit der Nachweisführung herausgestellt.

Ein quantitativer Nachweis, der dieses Argument untermauert, wurde bisher nicht geführt, da die bisherigen Rechenprogramme diese Prozesse in komplexen Modellgeometrien nicht oder nur mit hohem rechentechnischen Aufwand bei gleichzeitig inakzeptabel hohen Rechenzeiten auflösen können. Die numerische Modellierung von dichtegetriebenen Strömungen in porösen Medien führt bei ihrer Anwendung auf realistische Probleme zu sehr großen Gleichungssystemen.

Aufgrund des Vorliegens hochmineralisierter Grundwässer ergibt sich dieses Problem bei praktisch allen Endlagersystemen in tiefen geologischen Formationen. In Salz-/Süßwassersystemen entstehen gänzlich andere Grundwasserströmungsmuster als in reinen Süßwassersystemen. Der Stofftransport in ungestörten Systemen mit variabler Dichte ist diffusionsdominiert und durch kleine Fließgeschwindigkeiten und die Möglichkeit von Konvektionszellen gekennzeichnet.

Wie bereits beschrieben werden national wie international diese Rechencodes weiterentwickelt mit dem Ziel, die Grundwassersituation unter Berücksichtigung der Dichteerückwirkung hochmineralisierter Wässer auf das Transportgeschehen zu analysieren. Sie wären somit in der Lage die konservative Vorgehensweise bei der Führung des Langzeitsicherheitsnachweises im Planfeststellungsverfahren auf der Basis neuer Analysen unter Berücksichtigung der zunehmenden Mineralisation der Tiefenwässer mit der Tiefe zu untermauern, eine zunehmende Realitätsnähe der Standortverhältnis-

se aufzeigen und evtl. vorliegende Überkonservativitäten im Sicherheitsnachweis abbauen.

5.4 Umgang mit Ungewissheiten, Indikatoren, Rückholbarkeit.

5.4.1 Umgang mit Ungewissheiten

5.4.1.1 International

Informationen über einen Standort und seine Entwicklung sowie über seine Daten und Parameter werden immer nur begrenzt vorliegen. Modelle, die der Beschreibung des Standortes und seiner Entwicklung dienen, sind ebenfalls nur ein Abbild der Erkenntnisse und des Verständnisses über den Standort. Daraus folgt, dass unvermeidliche Unsicherheiten die Standortcharakterisierung begleiten. Diese Unsicherheiten liegen, soweit sie bekannt und beschreibbar sind, sowohl räumlich als auch zeitlich vor. Zum Nachweis der Sicherheit müssen diese Unsicherheiten soweit als möglich abgebaut werden, z. B. durch eine möglichst vollständige Standortcharakterisierung und durch das Heranziehen von Erkenntnissen an natürlichen Analogsystemen. Nicht weiter reduzierbare Unsicherheiten müssen charakterisiert und ihr Einfluss auf die Sicherheitsaussage analysiert werden.

Die allgemeine, international anerkannte Strategie zum Umgang mit Ungewissheiten³ lässt sich in den folgenden Schritten zusammenfassen /VIG 07/:

1. Identifizieren
2. Beurteilen und Quantifizieren
3. Reduzieren und Vermeiden

Diese Vorgehensweise ist dabei als iterativer Prozess zu verstehen, der bei jeder neuen Fassung eines Sicherheitsnachweises (i. S. eines Safety Case, s. Abschnitt 3.2) wiederholt werden muss. In einem frühen Stadium wird vor allem das Ziel verfolgt, die

³ Auf den Begriff „Unsicherheit“, der teilweise synonym mit dem Begriff „Ungewissheit“ verwendet wird, wird hier verzichtet, da er mit der Unsicherheit im Sinne einer möglichen Gefährdung verwechselt werden kann.

Erkundung des Standortes sowie die Auslegung des Endlagers zu steuern. In dieser Phase bestehen vielfältige Möglichkeiten, erkannte Ungewissheiten zu reduzieren und zum Teil sogar zu eliminieren, wobei unter Umständen auch neue Ungewissheiten auftreten können. Letztlich werden aber niemals alle Ungewissheiten zu reduzieren oder gänzlich vermeidbar sein. Die nicht zu vermeidenden Ungewissheiten müssen benannt und ihre Auswirkungen auf die Sicherheitsaussage bewertet werden. Der Umgang mit Ungewissheiten erstreckt sich sowohl auf das Sicherheitskonzept als auch auf das Nachweiskonzept.

In einer Sicherheitsanalyse müssen die inhärenten Ungewissheiten im Hinblick auf die vorliegenden Standortdaten, die modellhafte Vorstellung des Endlagersystems, die zukünftige Entwicklung des Endlagersystems, aber auch bezüglich der Beschreibung einzelner Prozesse und des Zusammenwirkens von Prozessen identifiziert und ihre Auswirkungen auf die Aussagen zur Sicherheit des Endlagersystems über den Nachweiszeitraum bewertet werden.

Die Ungewissheiten werden in der Regel in Szenariungewissheiten (Ungewissheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems), Daten- und Parametrierungsgewissheiten und Modellungsgewissheiten eingeteilt. Die Auswertung internationaler Sicherheitsanalysen und vorliegender Sicherheitsnachweise lässt deutlich erkennen, dass eine Annäherung beider methodischen Vorgehen, der probabilistischen Analyse und der deterministischen Analyse in Verbindung mit Unsicherheitsanalysen, stattgefunden hat. Die Aussagen beider Methoden führen zu vergleichbaren Ergebnissen.

Für die Berücksichtigung von Unsicherheiten ist die Beantwortung zweier Fragen von Bedeutung:

- Welche Unsicherheit in der Konsequenz (Zielgröße) resultiert aus den Unsicherheiten in den Eingangsgrößen?
- Welche Unsicherheiten in den Eingangsgrößen haben besonders große Auswirkungen auf die Unsicherheit der Konsequenz?

Zur Beantwortung dieser Fragen werden probabilistische Unsicherheitsanalysen und Sensitivitätsanalysen herangezogen.

Die Verwendung deterministischer oder probabilistischer bzw. kombinierter Methoden beim Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern radioaktiver Abfälle wird durch

das in den einzelnen Ländern anzuwendende Regelwerk bestimmt. Dem Einfluss der zahlreichen Unsicherheiten über die abgebildeten Prozessabläufe (Szenarien) und Eingangsgrößen (Parameter) wird im Falle „deterministischer“ Regelwerke dadurch Rechnung getragen, dass man versucht konservative Szenarien zu definieren und Parametersätze zu wählen und somit abdeckende Ergebnisse zu erhalten. Doch ist bei dieser Vorgehensweise angesichts der komplexen Vorgänge der Nachweis der Konservativität von Szenarien und Parameterwertkonfigurationen kaum zu erbringen. In den insbesondere hinsichtlich einer sinnvollen Interpretation der Ergebnisse notwendigen Analysen von Szenarien und Unsicherheiten spielt die Anwendung probabilistischer Modelle zur Vertrauensbildung eine wichtige Rolle.

Die Vorgehensweisen deterministischer Analysen in Verbindung mit probabilistischen Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen durchzuführen, stellen den heutigen Stand von Wissenschaft und Technik dar.

5.4.1.2 VSG

Im Vorhaben VSG erfolgte eine umfassende Darstellung des Umgangs mit Daten, Modell Prozess- und Prognoseungewissheiten. Bestehende Ungewissheiten wurden während der Bearbeitung des Vorhabens identifiziert und im Hinblick auf die Sicherheitsanalyse eingeteilt in

- Ungewissheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems,
- Daten- und Parameterungewissheiten und
- Modellungsgewissheiten

Der Umgang mit diesen Ungewissheiten wurde thematisch beschrieben und bewertet unter den Aspekten:

- Ungewissheiten der Grundlagen der Sicherheitsanalyse (Standorterkundung, Abfallcharakterisierung, Einlagerungs- und Verschlusskonzept)
- Ungewissheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklungen (FEP-Katalog, Szenarientwicklung)

- Modellungewissheiten (Ungewissheiten bei der modellhaften Beschreibung der Standortgegebenheiten, Ungewissheiten zu den Endlagermodellen, Umgang mit Modellungewissheiten bei den Integritätsanalysen, Umgang mit Modellungewissheiten bei der Konsequenzenanalyse)
- Ungewissheiten bei der modellhaften Beschreibung von im Endlagersystem ablaufenden Prozessen
- Daten- und Parameterungewissheiten

Im Vorhaben VSG konnten eine Reihe von identifizierten Ungewissheiten insbesondere aus zeitlichen Gründen nicht durch ein begleitendes F&E-Programm weiter reduziert oder beseitigt werden. Daher erfolgte der Umgang mit ihnen in der Sicherheitsanalyse durch plausible, fachlich begründete Annahmen, die mittels Expertenurteil abgeleitet wurden und in einem späteren Standorterkundungsprogramm bzw. F&E-Programm so weit wie möglich Bestätigung finden oder weiter untermauert werden müssen. Der zukünftige F&E-Bedarf für Langzeitsicherheitsanalysen wurde systematisch und umfassend herausgestellt /FIS 13, THO 13/.

5.4.1.3 Konrad

Die Konsequenzenanalysen und die Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen zur Langzeitsicherheit des Endlagers Konrad wurden mit qualifizierten Rechencodes durchgeführt, die auch heute noch was Süßwasseranalysen betrifft dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. Die Konsequenzenanalysen wurden, wie bereits erwähnt, in Ermangelung vorhandener Modelltechnik konservativ auf der Basis von Süßwassermodellen durchgeführt.

Im Auftrag des BMBF wurde zu einem späteren Zeitpunkt ein Rechencode „d3f“ entwickelt mit dem Ziel, die Grundwassersituation unter Berücksichtigung der Dichterückwirkung hochmineralisierter Wässer auf das Transportgeschehen zu analysieren. Der Qualifizierungsstand dieses Rechencodes war jedoch zu dem Zeitpunkt noch nicht so weit fortgeschritten, dass er als qualifiziert – vergleichbar dem Qualifizierungsaufwand für Süßwassercodes – eingestuft werden konnte.

Die im Verfahren durchgeführten Konsequenzenanalysen mittels Süßwasserrechnungen liefern konservative Ergebnisse im Hinblick auf den Grundwasser- und Radionuklidtransport, da aufgrund der vorliegenden Dichteschichtung der Aufstieg von Tiefen-

wässern aus dem Endlagerbereich zur Biosphäre verhindert oder zumindest erschwert wird. Diese im Sinne der Radionuklidrückhaltung günstige Eigenschaft wird jedoch bei Süßwassermodellen vernachlässigt.

Den Unsicherheiten der Parameter in den Süßwassermodellrechnungen und ihre Konsequenzen ist der Antragsteller durch gezielte Parametervariationen nachgegangen. Der Gutachter der Planfeststellungsbehörde hat seinen deterministischen Referenzdatensatz zu den Süßwasserrechnungen sowohl durch Expertenmeinung als auch durch probabilistische Unsicherheitsanalysen untermauert. Sensitive Parameter wurden identifiziert.

Da die deterministischen Analysen in Verbindung mit einer probabilistischen Unsicherheitsanalyse der hydraulischen Parameter untermauert wurden, enthält der Langzeitsicherheitsnachweis Teile einer probabilistischen Langzeitsicherheitsanalyse. Diese beziehen sich auf die durchgeführten Süßwasserrechnungen und entsprechen somit nicht dem Umfang eines heutigen Managements von Ungewissheiten. Hinsichtlich der gewählten konservativen Ansätze und die Naturbefunde am Standort, als ein qualitatives Argument für geringe Transportgeschwindigkeiten bzw. für diffusionsdominante Prozesse von aus dem Endlager in die Geosphäre freigesetzten Radionuklide, haben die Aussagen zur Langzeitsicherheit weiterhin Bestand. Eine quantitative Analyse, der dieses Argument und damit die Konservativität der Analysen untermauert, wurde jedoch bisher nicht geführt.

5.4.2 Indikatoren

Unter Indikatoren sind Mess- oder Bewertungsgrößen zur Beurteilung einer geforderten sicherheitsgerichteten Eigenschaft zu verstehen. Beim Nachweis der Langzeitsicherheit unterscheidet man nach Sicherheitsindikatoren und Funktionsindikatoren. Sicherheitsindikatoren (z. B. Dosis und Risiko) dienen dem Nachweis der Langzeitsicherheit, da sie die integrale Bewertung der Sicherheit des Endlagersystems ermöglichen. Funktionsindikatoren dienen der Bewertung der Robustheit von Teilsystemen und Komponenten des Endlagersystems. Indikatoren werden im Safety Case im Sinne von „Multiple Lines of Evidence“, parallel zur Langzeitsicherheitsanalyse angesetzte Nachweisstränge zur Vertrauensbildung der Sicherheitsaussagen genutzt. Indikatoren werden weiterhin als Begleitargumente zur Untermauerung der Systemrobustheit verwendet.

5.4.2.1 International

International werden verstärkt geowissenschaftliche Argumente zur Unterstützung der Sicherheitsaussage herangezogen. Die NEA hat Definitionen und Klassen von Indikatoren erarbeitet. Sie unterscheidet nach Sicherheitsindikatoren, komplementären Sicherheitsindikatoren und Funktionsindikatoren (performance indicators). Sicherheitsindikatoren können über den Betrachtungszeitraum sowohl konstant als auch zeitabhängig sein. Beim Vergleich eines zeitabhängigen Sicherheitsindikators mit einem Referenzwert werden oft die Maximalwerte des Sicherheitsindikators herangezogen. Teilsysteme, deren Bewertungen mittels Funktionsindikatoren erfolgen, können eine Barriere, mehrere Barrieren oder auch nur Teilbereiche einer Barriere des Barriersystems des Endlagers umfassen /NEA 12b/.

5.4.2.2 VSG

Die VSG kann im Rahmen der Diskussion von Indikatoren nicht zu Vergleichszwecken herangezogen werden, da dieser Aspekt nicht systematisch bearbeitet wurde. Auch wenn bei der VSG eine Reihe von Elementen aufgegriffen wurden, die über den Umfang einer Sicherheitsanalyse hinausgehen, handelt es sich nicht um einen vollständigen Sicherheitsnachweis.

5.4.2.3 Konrad

Zur Bewertung der Langzeitsicherheitsanalysen des Endlagers Konrad wurde die effektive Dosis als Bewertungsgröße bzw. für lange Betrachtungszeiträume als Sicherheitsindikator herangezogen. Die berechneten jährlichen Strahlenexpositionen (Oxford-Szenario) durch das Endlager Konrad für den Zeitraum nach 300.000 Jahre ab Einlagerung werden fast ausschließlich durch das Nuklid J-129 bestimmt. Die errechneten Dosismaxima, welche jenseits von 300.000 Jahren auftreten, stellen ein Rechenergebnis zur Bewertung des Rückhaltevermögens des Endlagersystems und keine Prognose erwarteter Belastungen dar und sind als Indikator für das Isolationsvermögen des Endlagersystems zu werten.

Die Langzeitsicherheitsaussage beruht im Planfeststellungsverfahren Konrad u. a. auf eine konservative Vorgehensweise bei den durchgeführten Konsequenzenanalysen, da im Hinblick auf den Grundwasser- und Radionuklidtransport, die am Standort vorlie-

gende Dichteschichtung nicht berücksichtigt wurde; dies aber den Aufstieg von Tiefenwässern aus dem Endlagerbereich zur Biosphäre verhindert oder zumindest erschwert. Zur Absicherung dieser Aussage aus den numerischen Analysen (Grundwasser- und Radionuklidtransport) wurde auf Sicherheitsindikatoren wie die Altersbestimmung und Herkunftsanalyse der Tiefenwässer, die Grundwasserbewegung und die lineare Salinitätsverteilung eingegangen. Die Messungen wurden zum damaligen Zeitpunkt auf hohem analytischen Standard von verschiedenen Institutionen an Proben durchgeführt und führten zu folgenden Ergebnissen:

- Untersuchungen belegen, dass in der Grube Konrad die Gesamtkonzentration der Inhaltsstoffe der analysierten Tiefengrundwässer zwischen 450 m und 1300 m unter Gelände zunehmen. Neben Natrium und Chlorid zeigt Bromid eine weitere deutliche Tiefenabhängigkeit.
- Aus den Bromid-Chlorid-Verhältnissen wurde in Übereinstimmung mit anderen chemischen Parametern abgeleitet, dass die Tiefenwässer aus der Grube Konrad mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit Mischungen von gesättigten evaporitischen Restlösungen und halbgesättigten Lösungen mariner und meteorischer Herkunft sind.
- Durchgeführte Isotopenuntersuchungen von Kohlenstoff-14 (^{14}C), Kohlenstoff-13 (^{13}C), Tritium (^3H), Deuterium (^2H), Helium (^4He), Schwefel-34 (^{34}S) und Sauerstoff-18 (^{18}O) zeigen,
 - dass keine geogenen Konzentrationen der Isotope des Kohlenstoffs und des Wasserstoffs in den Tiefenwässern vorhanden sind,
 - dass die Deuterium (^2H)- und Sauerstoff-18 (^{18}O)-Gehalte auf meteorische Lösungskomponenten hinweisen,
 - dass die Gehalte an radiogenem Helium auf ein hohes Entstehungsalter der Wässer in der Größenordnung von 10^7 bis 10^8 Jahren hinweisen.

Nachdem unterschiedliche Theorien und Einflussfaktoren diskutiert worden waren, wurden vom Antragsteller die Analysenergebnisse der tiefen Grundwässer durch einen linearen Gradienten, der eine tiefenabhängige Zunahme der Mineralisierung der Wasserproben zeigt, und durch Diffusionsvorgänge erklärt. Zur Stützung dieser These fehlen jedoch Belegdaten aus dem Bereich zwischen der tiefsten Stelle der Grube in ca. 1300 m Tiefe und dem nächst tieferen Salinar (Muschelkalk-Salinar) in ca. 2300 m Tiefe.

Weitere zur Bewertung der Rechenergebnisse herangezogene Indikatoren sind die folgenden Funktionsindikatoren:

- das gemessene Grundwasseralter im Vergleich zur berechneten Grundwasserfließzeit vom Gebiet der Grundwasserneubildung zum Endlagerbereich,
- die Abnahme des advektiven Transports von Grundwasser und dessen Inhaltsstoffen auf Grund zunehmender Dichte des Grundwassers (zunehmende Versalzung) mit der Teufe,
- die geringen Zustromraten von Grundwasser in die Grube.

Im Ergebnis der Bewertung der Untersuchungen zu den Sicherheitsindikatoren im Rahmen des Genehmigungsverfahrens /NMU 02/ wurde festgestellt, dass die geowissenschaftlichen Untersuchungen zur Erfassung der Indikatoren, abgesehen von einigen Ausnahmen, vollständig sind.

5.4.3 Rückholbarkeit

5.4.3.1 International

Seit den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts haben viele Organisationen und Institutionen, die sich mit der Entsorgung radioaktiver Abfälle befassen, intensiv die Fragen der Reversibilität (reversibility) und der Rückholbarkeit (retrievability) diskutiert und auf nationaler Ebene Eingang in die länderspezifischen Entsorgungsprogramme gefunden.

Die Europäische Kommission (EC) hat im Jahr 2000 in einer konzertierten Aktion den Stand der Rückholbarkeit in nationalen Entsorgungsprogrammen erfragt und dargestellt /EC 00/. Um zur Harmonisierung nationaler Endlagerprogramme beizutragen, stellte die NEA die relevanten Fragen zum Stellenwert von Reversibilität und Rückholbarkeit in verschiedenen Entsorgungsprogrammen in dem Bericht „Reversibility and Retrievability in Geologic Disposal of Radioactive Waste - Reflections at the International Level“ /NEA 01/ zusammen. Dabei wurden neben ethisch/gesellschaftlichen Fragen die praktisch/technischen Anforderungen für Rückholoptionen sowie die politischen und regeltechnischen Auswirkungen erörtert.

Im Bericht „Technological implications of retrievability on geological disposal of radioactive waste“ /IAEA 09/ wurde ein internationaler Überblick über den Stand der Rückhol-

barkeit zur Rückholbarkeit von hochradioaktiven Abfällen und Brennelementen festgehalten. Die Schwerpunkte der langjährigen nationalen Endlagerprogramme lagen zu diesem Zeitpunkt ausschließlich bei der technischen Realisierbarkeit und dem Nachweis der Langzeitsicherheit. In den darauf folgenden Jahren wurde immer deutlicher, dass technische Sachkenntnis und technische Zuverlässigkeit allein nicht ausreichen, um die geologische Endlagerung gegenüber einer breiteren Öffentlichkeit als einzig gangbaren Weg für die Beseitigung von radioaktivem Abfall zu rechtfertigen. Zusätzlich muss auch das Vertrauen der technischen Fachwelt und der Öffentlichkeit in die ethischen, ökonomischen und sozialen Aspekte der Eignung eines geologischen Endlagers vorhanden sein. Aufgrund dieser nationalen Entwicklungen in den letzten Jahren wurde auf Basis einer Entscheidung des OECD/NEA Radiactive Waste Management Committee (RWMC) die Initiative „Retrievability & Reversibility“ (R&R) ins Leben gerufen.

In der R&R-Initiative /NEA 11a, 11b/ bestand Konsens, dass es hierzu verschiedene Wege und Methoden gibt das Vertrauen der Öffentlichkeit zu gewinnen. Zu diesen gehören u. a. die Transparenz, die Progressivität und die Reversibilität des Endlagerentwicklungsprozesses, ein schrittweises und flexibles Vorgehen in einzelnen getrennten Schritten und die Berücksichtigung einer Rückholbarkeit der Abfälle.

Im internationalen Raum zeichnet sich ab, dass eine „umkehrbare“ Endlagerung mit Rückholoptionen zu einer Erhöhung der Akzeptanz der Endlagerung bei vielen Stakeholdern und in der Öffentlichkeit führt.

In einigen Ländern gibt es bereits gesetzliche Regelungen zur Rückholbarkeit, z. B. in Frankreich und den USA. Während in den USA die Rückholbarkeit während der Betriebsphase explizit gefordert wird, ist in Frankreich nach dem Gesetz die Rückholbarkeit in den Untersuchungen für ein geologisches Endlager zu berücksichtigen. In anderen Ländern es gibt keine gesetzlichen Regelungen zur Rückholbarkeit, z. B. in Belgien, Japan und Schweden /NEA 11a/.

Das geologische Tiefenlager Cigéo ist für eine mindestens 100jährige Rückholbarkeit konzipiert. Um dieser Anforderung des Parlaments zu entsprechen, hat die ANDRA technisch realisierbare Maßnahmen getroffen, die, ohne die Sicherheit des Endlagers in Frage zu stellen, nicht nur die Rückholung eingelagerter Behälter (auch die Rückholung von Lagerbehältern langlebiger mittelaktiver Abfälle) ermöglichen, sondern das Endlager auch für die Anpassung an Weiterentwicklungen flexibel gestalten.

Insgesamt ist festzustellen, dass international in keinem technischen Rückholbarkeitskonzept Zeiträume größer als 100 Jahre betrachtet werden. In den meisten Planungen gehen die Überlegungen einige Jahrzehnte über den Zeitraum des geplanten Endlagerbetriebs hinaus bis zum Verschluss des Endlagers.

Die IAEA stellt in /IAEA 15/ fest:

“Requirements for reversibility and retrievability are influenced by national legislation and stakeholder expectations and need to be considered during the design stage. It may be required to contribute to confidence building and to decision-making during stepwise development of a facility. Unlike spent fuel, the wastes discussed in this report are expected to have limited or no future resource value, thus there is no anticipated economic driver to recover them.”

5.4.3.2 BMU-Sicherheitsanforderungen und VSG

Aufgrund der internationalen Entwicklungen und nicht zuletzt den Ereignissen im Zusammenhang mit der Schließung des Endlagers ASSE II wurde auch in Deutschland die Frage der Rückholbarkeit auf politischer Ebene intensiv in die Diskussion um die Endlagerung radioaktiver Abfälle einbezogen. Die Ergebnisse der Diskussion spiegeln sich in den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 10/ wieder.

In der Endfassung der Sicherheitsanforderungen an ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle /BMU 10/ müssen Endlagerbergwerk und Abfälle so ausgelegt werden, dass folgende Funktionen erfüllt werden:

- In der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen muss eine Bergung der Abfälle unter Berücksichtigung unterstellter Lösungszutritte in die Einlagerungsbereiche möglich sein.
- Für die wahrscheinlichen Entwicklungen muss eine Handhabbarkeit der Abfallgebinde bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager noch nach 500 Jahren gegeben sein. Dabei ist die Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole zu beachten.

Die Bergung der Abfälle in der Nachbetriebsphase (Punkt 2) steht dabei in erster Linie nicht im Zusammenhang mit sicherheitstechnischen Belangen, sondern soll es künfti-

gen Generationen nicht unnötig erschweren, die Abfälle zu bergen. Die Sicherheitsanforderungen entsprechen damit dem Stand der internationalen Entwicklungen, wie sie im NEA-R&R-Projekt diskutiert wurden.

Technische Ansätze zur Forschungs- und Entwicklung der Integration der Rückholbarkeit wurden im Rahmen des Vorhabens VSG durchgeführt.

Auf Basis und als Ergebnis der BMUB-Sicherheitsanforderungen wurden im Forschungsvorhaben VSG die Möglichkeit der Rückholung von Behältern mit bestrahlten Brennelementen untersucht. Dazu wurde auf Basis eines initialen Einlagerungskonzepts und unter Berücksichtigung der Einlagerungstechnik, des Verfüll- und Verschlusskonzeptes sowie der zeitlichen Veränderungen der Komponenten ein Konzept für die Rückholung der Abfallgebinde während der Betriebsphase des Endlagers entwickelt. Es wurden die Betriebszustände sowie der in dieser Phase erwartete Zustand der Behälter berücksichtigt und eine technische Planung der Streckenaufwältigung und der geotechnischen Barrieren (Kammer-/Bohrlochabschluss) unter Berücksichtigung der Einflüsse der Temperatur und des Strahlungsfeldes in diesen Bereichen durchgeführt.

Die Untersuchungen zur Rückholbarkeit wurden somit in dieser erstmaligen Anwendung der Sicherheitsanforderungen mit konkretem Standort- und Endlagerkonzeptbezug in Deutschland nur auf wärmeentwickelnde Abfallgebinde durchgeführt und stellen damit den derzeitigen Stand von W+T, inkl. einer Ausweisung des entsprechenden F&E-Bedarfs dar.

Im Jahre 2011 hat die Entsorgungskommission (ESK) ein Diskussionspapier „Rückholung / Rückholbarkeit hochradioaktiver Abfälle aus einem Endlager“ veröffentlicht, in dem u. a. die Grundlagen und Ziele einer nachhaltig sicheren Endlagerung bzw. die sicherheitsorientierten und ethischen Argumente und die Rückholbarkeit in den Sicherheitsanforderungen des BMU diskutiert wurden. Die ESK kommt zum Schluss, dass die Berücksichtigung einer Option der Rückholbarkeit nur in einem Rahmen sinnvoll ist, in dem sie keine signifikante Beeinflussung der Langzeitsicherheit verursacht. Ein solcher Rahmen kann eine zeitlich begrenzte Beobachtungsphase umfassen. Die ESK bewertet die Sicherheit in der Nachbetriebsphase als prioritär gegenüber der Gewährleistung der Flexibilität für zukünftige Generationen und erachtet einen Sicherheitsgewinn für ein Endlager mit Option Rückholbarkeit als fraglich. Aus Sicht des ESK-EL können technische Maßnahmen zur Verbesserung der Rückholbarkeit sowie längere Zeiträume der Offenhaltung des Endlagers die natürlichen und technischen Barrieren

beeinträchtigen und sich damit insgesamt negativ auf die Langzeitsicherheit auswirken. Aus Sicht der ESK sind die heutigen deutschen Endlagerkonzepte, die auf den Einschluss der radioaktiven Abfälle, deren Konzentration im geologischen Untergrund und Isolation vom menschlichen Lebensraum ausgerichtet sind, richtig und stehen im Widerspruch zu Konzepten der Rückholbarkeit mit Offenhaltungen über längere Zeiträume.

5.4.3.3 Konrad

In verschiedenen Einwendungen zum Planfeststellungsverfahren Konrad wurde eine Endlagerung radioaktiver Abfälle mit zeitlich befristeter Rückholbarkeit vorgeschlagen. Das Argument lautete, dass hierdurch für einen längeren Zeitraum die nach der Einlagerung anfallenden Erfahrungen berücksichtigt werden können, einschließlich solcher, die während der Dauer der Rückholbarkeit im Endlager selber anfallen. Bei der Planfeststellung stand einer Rückholbarkeit der Abfallgebinde die Anforderung der Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk /BMI 83/ entgegen, wonach die Einlagerungsräume so kurzzeitig wie möglich offen zu halten und nach beendeter Nutzung zu verschließen sind /BFS 11/.

Nach Aussage des BfS /BFS 11/ wird nach dem Verfüllen und Verschließen des Endlagers Konrad kein unmittelbarer Zugang mehr zu den radioaktiven Abfällen möglich sein. Damit sollen zukünftige Generationen von Handlungsnotwendigkeiten entlastet werden. Grundsätzlich ist es jedoch auch bei der nicht rückholbaren Endlagerung technisch möglich, radioaktive Abfälle nach Endlagerverschluss wieder zu bergen, allerdings nur mit erheblichem Aufwand. Je nach Zeitpunkt der Bergung ist es fraglich, ob aus dem Versatzmaterial noch intakte, handhabbare Abfallgebinde geborgen werden könnten.

Zum derzeitigen Zeitpunkt ist die Strategie der Rückholbarkeit bzw. Bergbarkeit von radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung auch international nicht üblich und auch nicht Stand der Technik. Das planfestgestellte Konzept einer wartungsfreien, sicheren und zeitlich unbefristeten Endlagerung vernachlässigbar wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Konrad ohne Vorkehrungen zur Rückholung entspricht der in Deutschland gültigen Gesetzeslage. Ein verändertes Konzept mit Rückholbarkeitsoption würde darüber hinaus nachteilige Auswirkungen wie z. B. zusätzliche Kontrollmaßnahmen und hierdurch bedingte Strahlenexpositionen für das Personal beinhalten.

6 Zusammenfassung

In diesem Bericht erfolgt eine Analyse der Fortentwicklung des internationalen und nationalen Standes entsprechend einschlägiger Regelwerke und aktueller Sicherheits- und Nachweisstrategien im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises für Endlager für radioaktive Abfälle innerhalb der letzten beiden Jahrzehnte. In Deutschland wurden mit der Erstellung der Planfeststellungsunterlagen für das Endlager Konrad im Jahre 1990 und dem Forschungsvorhaben der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) im Jahre 2013 zwei Sicherheitsnachweise zur Langzeitsicherheit von Endlagern geführt, die den Entwicklungsstand der Nachweisführung zum jeweiligen Zeitpunkt widerspiegeln. Anhand des beispielhaften Vergleichs beider Sicherheitsnachweise wird unter Einbeziehung aktueller internationaler Empfehlungen und nationaler Regelwerke die Fortentwicklung des internationalen Standes von W&T aufgezeigt. Im Nachfolgenden für jedes Element eines modernen Langzeitsicherheitsnachweises die wesentlichen Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen dem Langzeitsicherheitsnachweis zum Endlager Konrad einerseits und der VSG bzw. dem internationalen Stand andererseits zusammenfassend dargestellt.

Sicherheits- und Nachweiskonzept

Ziel des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes ist die Darstellung der Strategie, wie unter den konkreten Standortverhältnissen, dem gewählten Endlagerkonzept und einem gegebenen Abfallinventar ein dauerhaft sicherer Einschluss der in den radioaktiven Abfällen enthaltenen Radionuklide über den Nachweiszeitraum erreicht werden soll und nachgewiesen werden kann.

Für die Erhaltung der passiven Sicherheit eines Endlagers nach Verschluss wurde international die Anwendung des Prinzips "defense in depth" entwickelt, welches mit dem Mehrbarrierenkonzept gleichgesetzt werden kann. Dabei erfolgt die Berücksichtigung des graduellen Charakters der Prozesse, des Zeitfaktors und des Ineinandergreifens von Komponenten in Form von "safety functions", als Beschreibung der Funktionalität der Barrieren. Zentrale Sicherheitsfunktion ist dabei die Isolation der Radionuklide im geologischen Untergrund. Im Rahmen der allgemeinen Forderungen an den Safety Case und den Zusammenhang von Sicherheitsfunktion ist das Endlager so zu konzipieren, dass eine einfache (robuste) Nachweisführung möglich ist.

Das Sicherheitskonzept im Vorhaben VSG wurde nach diesem internationalen Stand von W&T entwickelt. In Übereinstimmung mit den entsprechenden Festlegungen in den Sicherheitsanforderungen des BMUB /BMU 10/ beruht das Sicherheitskonzept der VSG auf einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) mit einem gestaffelten System von verschiedenen Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen, wobei die jeweiligen Wirkzeiträume der Barrieren innerhalb des Nachweiszeitraums berücksichtigt werden müssen. Das Nachweiskonzept umfasst gemäß /BMU 10/ das Vorgehen zur Ausweisung der Lage und Grenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG), den Erhalt des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Nachweiszeitraum, den Einschluss der Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich, die radiologischen Konsequenzen in der Biosphäre und den Nachweis der Unterkritikalität.

Das Sicherheitskonzept für das Endlager Konrad basiert auf seiner günstigen geologischen Gesamtsituation, wonach signifikant lange Transportzeiten eine möglichst langfristige Isolation gelöster Radionuklide aus den Abfällen vor Mensch und Umwelt sicherstellt. Die diesbezüglich wesentliche Sicherheitswirkung geht dabei weniger von der Einschlusswirkung des Wirtsgesteins in unmittelbarer Umgebung des Endlagers aus, sondern wird von den signifikant langen Transportzeiten entlang von Ausbreitungspfaden im Wirtsgestein oder durch eine darüber liegende, bis zu 400 m dicke Deckschicht aus verschiedenen Tonsteinen des Jura und der Unterkreide gebildete, natürliche Barriere gewährleistet.

Das Nachweiskonzept umfasst mit Ausnahme einer systematischen Szenarienentwicklung alle wesentlichen Teilnachweise und Nachweiselemente, die auch bei heutigen Langzeitsicherheitsanalysen im Sinne eines Safety Case relevant sind. Hierzu gehören Integritätsnachweis und radiologische Konsequenzenanalyse, der Nachweis der Unterkritikalität sowie die Zusammenführung aller Begleitargumente und Sicherheitsindikatoren zur Untermauerung der Ergebnisse der Langzeitsicherheitsanalyse. Dies bedeutet, dass bereits in den 1990er Jahren nahezu alle wesentlichen Elemente eines modernen Langzeitsicherheitsnachweises (Safety Case) berücksichtigt wurden. Allerdings bestehen Unterschiede im Hinblick auf Art und Tiefgang der Einzelnachweise, auf die im Folgenden eingegangen wird.

Standortcharakterisierung

Nach internationalem Stand von Wissenschaft und Technik ist eine umfangreiche geowissenschaftliche Datenakquisition zur Führung des Langzeitsicherheitsnachweises

essentiell. Es wird daher als wichtig angesehen, dass der Antragsteller über einen ausreichend guten Kenntnisstand des Endlagersystems verfügt und diesen dokumentiert. Dies bildet die Grundlage eines ausreichenden Systemverständnisses und der Ableitung von Modelldaten für die numerischen Analysen zur Langzeitsicherheit. Zusammen mit den Ergebnissen der geologischen Langzeitprognose bildet eine umfangreiche Datenakquisition die Voraussetzung für die nachfolgenden Analysen (Szenarienentwicklung, Integritätsanalyse und radiologische Konsequenzenanalyse). Eine umfassende Standortcharakterisierung bildet darüber hinaus auch die Basis für die Ableitung und Begründung des Sicherheitskonzepts sowie die Demonstration von Barrierenfunktionen.

Im Fall des Vorhabens VSG wurden umfangreiche geowissenschaftliche Daten bereits vor Projektbeginn im Zuge der ober- und untertägigen Untersuchungen zum Standort Gorleben durch die BGR erhoben und dokumentiert. Die Standortcharakterisierung beruht auf den Untersuchungsergebnissen aus zahlreichen Bohrungen, hydrogeologischen Messstellen, geophysikalischen Messungen sowie den beiden Schachtvorbohrungen. Dazu kamen die Ergebnisse der untertägigen Erkundung aus Erkundungsbohrungen, untertägige Kartierungen sowie geophysikalischen, hydraulischen, mechanischen und mineralogisch-geochemischen in-situ-Messungen und Laboruntersuchungen. Da die Standortcharakterisierung bereits im Vorfeld der VSG erfolgte und seit der Erhebung der geowissenschaftlichen Daten am Standort Gorleben eine gewisse Zeit vergangen war, wurde im Rahmen der VSG eine Bewertung der Standortdaten im Hinblick auf deren Vollständigkeit, Aussagekraft und Ungewissheiten für eine vorläufige Sicherheitsanalyse sowie der Eignung der zugrunde liegenden Untersuchungsmethoden vorgenommen.

Im Fall des Endlagers Konrad beruhen die Kenntnisse über den geologischen Bau des Untergrundes im Untersuchungsgebiet des Endlagers Konrad auf der Auswertung von Ergebnissen aus Bohrungen, untertägigen Untersuchungen und seismischen Erkundungen. Darüber hinaus wurden Untersuchungsergebnisse aus angrenzenden Gebieten berücksichtigt, um die großräumige geologische Situation und paläogeographische Entwicklung einzubeziehen. Unabhängig von der in diesem Bericht nicht untersuchten Frage der räumlichen Repräsentativität der Erkundungsmaßnahmen ergibt sich im Hinblick auf die Vollständigkeit eine geologische Datenbasis zum Untersuchungsgebiet Konrad, die alle erheblichen Daten für eine schlüssige Darstellung der geologischen Verhältnisse zur Ableitung von geologisch-hydrogeologischen Konzeptmodellen als Grundlage für die numerischen Modelle erlaubt.

Szenarientwicklung

International wird eine Reihe von Methoden der Szenarientwicklung angewendet. Ihnen gemein ist, dass sie auf der Grundlage eines umfangreichen und systematisch ermittelten Katalogs von relevanten Eigenschaften, Ereignissen und Prozessen (features, events and processes, FEP) basieren. Die Summe der FEP bildet gleichsam eine umfassende Bestandsaufnahme dessen, welche sicherheitsrelevanten Merkmale das Endlagersystem (Standort und Endlagerbergwerk) charakterisieren, welche Ereignisse in der Zukunft eintreten können bzw. welche Prozesse derzeit ablaufen oder in der Zukunft ablaufen können.

Die im Vorhaben VSG durchgeführte Szenarientwicklung gründet auf einer systematischen Auflistung aller sicherheitsrelevanter Eigenschaften der einzelnen Komponenten des Endlagersystems und zukünftig möglicher Ereignisse bzw. Prozessabläufe einschließlich ihrer gegenseitigen Beeinflussungen und Abhängigkeiten, ihrer Eintrittswahrscheinlichkeiten sowie ihrer Relevanz für Barrierefunktionen. Der FEP-Katalog umfasste insgesamt 115 FEP. Hieraus wurden für jedes untersuchte Einlagerungskonzept ein wahrscheinliches Referenzszenario und mehrere weniger wahrscheinliche Alternativszenarien abgeleitet.

Die Vorgehensweise im Plan Konrad sowohl bei der Standortinterpretation als auch bei der Prognose der Standortentwicklung wurde ohne eine systematische FEP-gestützte Szenarientwicklung durchgeführt. Potentielle Standortentwicklungen wurden auch unter Berücksichtigung anthropogener Einflüsse (Schachtverschlüsse, alte Bohrungen) im Nachweis der Langzeitsicherheit umfassend Rechnung getragen. Diese Standortentwicklungen gründen sich jedoch nicht auf eine systematische Szenarientwicklung auf der Basis eines umfassenden und nachvollziehbaren FEP-Kataloges, der alle sicherheitsrelevanten Eigenschaften, Prozesse und Ereignisse beinhaltet und transparent dokumentiert. Es ist daher festzustellen, dass den letzten 20 Jahren im Bereich der Szenarienermittlung signifikante Fortschritte erzielt wurden.

Behandlung von Szenarien menschlichen Eindringens

Die Berücksichtigung der Szenariengruppe "Menschliches Eindringen – Human Intrusion" in Sicherheitsanalysen entspricht der internationalen Praxis. Sie nehmen eine Sonderstellung bezüglich der Szenarientwicklung im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung eines Endlagersystems ein. Es werden in der Regel Szenarien unbeabsichtig-

ten menschlichen Eindringens in das Endlagersystem nach Verlust der Kenntnisse zur Existenz des Endlagers (Human Intrusion, kurz: „HI“) berücksichtigt, die aufgrund der Beeinträchtigungen des Barrierensystems das Potenzial haben, den Einschluss der radioaktiven Abfälle zu gefährden. Dabei werden heute übliche menschliche Aktivitäten und Praktiken nach Stand der Technik zugrunde gelegt. Ziel ist es durch angemessenen Aufwand entweder die Wahrscheinlichkeit menschlichen Eindringens oder die resultierenden radiologischen Konsequenzen zu reduzieren. Da jedoch aufgrund der langen zu betrachtenden Zeiträume die Prognosefähigkeit der Entwicklung der menschlichen Gesellschaft, insbesondere ihrer technischen Fähigkeiten stark begrenzt ist, empfiehlt die NEA anhand der Analyse der HI-Szenarien beispielhaft das Isolationsvermögen des Endlagersystems aufzuzeigen.

In der VSG wurden die aus heutiger Sicht denkbaren Szenarien des unbeabsichtigten Eindringens in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (Abteufen einer Tiefbohrung, Solen einer Kaverne, Auffahrung eines Gewinnungsbergwerks in der Nachbarschaft des Endlagers) abgeleitet und mögliche technische Maßnahmen zur Reduzierung der Wahrscheinlichkeit oder Begrenzung der radiologischen Konsequenzen aus erfolgtem menschlichen Eindringen untersucht. Insgesamt ist aus den Erfahrungen aus dem Vorhaben VSG festzustellen, dass die Möglichkeiten zur Optimierung eines Endlagersystems gegen menschliches Eindringen stark begrenzt sind. Im Ergebnis der Abwägung möglicher Optimierungsmaßnahmen verblieben nur zwei Maßnahmen, die darauf abzielten, die Wahrscheinlichkeit des Eindringens dadurch zu verringern, indem Hinweise auf das Vorliegen von Anomalien gegeben werden.

Im Fall des Langzeitsicherheitsnachweises zum Endlager Konrad wurden zwei standort- und wirtsgesteinsspezifische HI-Szenarien auf Basis einer Rohstoffgewinnung und eines Speicherkavernenbaus analysiert. Die Analyse der menschlichen Einwirkungen sowohl hinsichtlich der Vorgehensweise bei der Szenarienauswahl als auch hinsichtlich der Bewertung der ermittelten Konsequenzen entsprach bereits damals dem heutigen Verständnis und entspricht unter Berücksichtigung zwischenzeitlicher neuer internationaler Erkenntnisse dem Stand von Wissenschaft und Technik.

Integritätsanalysen

International sind die mit dem Nachweis der Integrität des Gebirges in der Umgebung und der geotechnischen Barrieren eines Endlagers verbundenen Anforderungen in den letzten Jahren in Bezug auf Methodik (Integritätsanalysen) und Werkzeuge (Berech-

nungsprogramme) in Sicherheitsanalysen stark gewachsen. In internationalen wie nationalen Untersuchungen werden bereits seit Jahren Anstrengungen unternommen, Nachweismethoden zur Integritätsanalyse zu entwickeln und umzusetzen. Ziel ist der Nachweis, dass trotz natürlichen Prozessen und Ereignissen (z.B. Inlandvereisung) oder solchen, die im Zusammenhang mit den eingelagerten Abfällen stehen, (z.B. Gasbildung) nicht dazu führen, dass es aufgrund der Schädigung des Barrierensystems zu inakzeptabel hohen Freisetzungen kommt.

Im Vorhaben VSG wurden Integritätsuntersuchungen für die gesamte geologische Barriere, welche die Salzstruktur Gorleben umfasst, sowie für die geotechnischen Verschlussbauwerke durchgeführt. Insbesondere wurden die thermomechanischen Einwirkungen der Abfallwärme auf das umgebende Salzgestein sowie die Auswirkungen von klimatischen Veränderungen (z. B. Eisüberfahung des Standortes) untersucht. Hinsichtlich der Integrität der geotechnischen Barrieren wurde durch eine Vielzahl ingenieurtechnischer Nachweise demonstriert, dass die Abdichtwirkung der geotechnischen Barrieren über die im Sicherheitskonzept festgelegte Funktionsdauer erhalten bleibt und sie den Zutritt von Deckgebirgs- und Formationswässern in die Einlagerungsbereiche zuverlässig unterbinden.

Im Planfeststellungsverfahren Konrad wurden gebirgsmechanische und seismologische Integritätsanalysen durchgeführt. Da aufgrund der besonderen Standortverhältnisse die Nachweisführung der Langzeitsicherheit für Konrad mit der Ausnahme der Schachtverschlüsse nicht auf der Einschlusswirkung geotechnischer Barrieren fußt, wurden die Analysen auf die Integrität des Grubengebäudes (Standfestigkeit) und dem Wirtsgestein bzw. dem Deckgebirge beschränkt. Angesichts des Sicherheitskonzeptes, welches hauptsächlich auf lange Transportzeiten gelöster Radionuklide im tiefen Untergrund und weniger auf eine möglichst vollständige Einschlusswirkung des Wirtsgesteins in unmittelbarer Umgebung des Endlagers abzielt, wäre diese Vorgehensweise prinzipiell auch heute üblich. Allerdings wurden seitdem signifikante Fortschritte insbesondere auf dem Gebiet des Integritätsnachweises für geotechnische Barrieren (Schacht- und Streckenverschlüsse) erzielt.

Radiologische Konsequenzenanalyse

Die radiologische Konsequenzenanalyse ist ein zentraler Bestandteil einer Langzeitsicherheitsanalyse. Durch die Simulation des Transports von freigesetzten Radionukliden wird das Einschluss- bzw. Rückhaltevermögen des Endlagersystems untersucht.

Dies bildet auch die Grundlage für den Nachweis, dass regulatorisch festgelegte radiologische Schutzziele über den gesamten Nachweiszeitraum eingehalten werden. Die zum Einsatz gelangenden Rechencodes müssen qualifiziert sein, d. h. es muss nachgewiesen werden, dass sie das gestellte Problem erfassen und physikalisch korrekt lösen können.

Zentraler Aspekt der radiologischen Konsequenzenanalyse der VSG war die Ermittlung möglicher radiologischer Konsequenzen der verschiedenen zu betrachtenden Szenarien gemäß der in den Sicherheitsanforderungen des BMUB geforderten radiologischen Langzeitaussage. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Bewertung der Qualität und Robustheit des einschusswirksamen Gebirgsbereichs im Hinblick auf den Einschluss der in den Abfällen enthaltenen Radionuklide. Die radiologische Konsequenzenanalyse erfolgte in der VSG anhand einer Betrachtung der potenziellen Freisetzungen von Radionukliden über den Lösungspfad und über den Gaspfad für alle wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Szenarien. Da sich die Transportrechnungen auf die unmittelbare Umgebung des Endlagerbergwerks konzentrierten, konnte von gesättigter Salzlösung ausgegangen werden. Eine Berücksichtigung von Lösungen verschiedener Dichten im Deckgebirge über den Standort war daher nicht erforderlich.

Die Konsequenzenanalyse zum Endlager Konrad erfolgte auf Basis von Süßwasserrechnungen und wurde im Ergebnis als konservativ im Hinblick auf den Grundwasser- und Radionuklidtransport eingestuft. Hintergrund ist, dass aufgrund der tatsächlich vorliegenden Dichteschichtung der Aufstieg von Tiefenwässern aus dem Endlagerbereich zur Biosphäre verhindert oder zumindest erschwert, diese den Radionuklidtransport verzögernde Eigenschaft jedoch in den Süßwassermodellen vernachlässigt wurde. Die am Standort Konrad gemessene Dichteschichtung in den Tiefenwässern aufgrund zunehmender Salinität mit der Teufe wurde als qualitatives Argument für geringe Transportgeschwindigkeiten bzw. für diffusionsdominierten Transport freigesetzter Radionuklide herangezogen und damit die Konservativität der Vorgehensweise im Sicherheitsnachweis und die Robustheit der Nachweisführung herausgestellt. Ein quantitativer Nachweis, der dieses Argument untermauert wurde bisher nicht geführt, da in der Vergangenheit Rechenprogramme diese Prozesse in geometrisch komplexen Modellen nicht oder nur mit hohem rechentechnischen Aufwand bei gleichzeitig inakzeptabel hohen Rechenzeiten nachbilden konnten.

In der Folgezeit wurden Rechencodes und Rechnerressourcen entwickelt, die heute in der Lage sind, zumindest für Modellgebiete mittlerer geometrischer Komplexität das

Grundwasserfließgeschehen unter Berücksichtigung der Dichterückwirkung hochmineralisierter Wässer und den entsprechenden Transport gelöster Radionuklide bei gleichzeitig akzeptablen Rechenzeiten zu simulieren. Somit wäre man heutzutage in der Lage, die hydraulischen Standortverhältnisse realitätsnäher nachzubilden und somit das Maß der Konservativität im Langzeitsicherheitsnachweis zum Endlager Konrad auf der Basis neuer Analysen zu quantifizieren und eventuelle Überkonservativitäten im Sicherheitsnachweis abzubauen.

Indikatoren / Sicherheitstechnische Begleitargumente

International werden verstärkt geowissenschaftliche Begleitargumente zur Untermauerung der Rechenergebnisse der Langzeitsicherheitsanalyse und zur Unterstützung der hieraus abgeleiteten Sicherheitsaussage herangezogen. Sie dienen somit zur Demonstration der Robustheit eines Endlagersystems und zur Vertrauensbildung in die Sicherheitsaussagen. Konsequenterweise fordern auch die Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ dass der Nachweis alle Informationen, Analysen und Argumente, zur Langzeitsicherheit des Endlagers umfassen muss. Diese sind in der Bewertung zu belegen und das Vertrauen in diese Bewertung ist zu begründen.

Im Rahmen des Vorhabens VSG wurde dieser Aspekt nicht systematisch bearbeitet. Hintergrund ist, dass es sich bei der VSG streng genommen um eine Sicherheitsanalyse und nicht um einen vollumfänglichen Langzeitsicherheitsnachweis handelt, auch wenn eine Reihe von Elementen aufgegriffen wurden, die über den Umfang einer Sicherheitsanalyse hinausgehen.

Im Fall des Langzeitsicherheitsnachweises zum Endlager Konrad wurden zur Absicherung und Bewertung numerischer Analyseergebnisse (Grundwasser- und Radionuklidtransport) verschiedene Sicherheitsindikatoren, wie die Altersbestimmung und Herkunftsanalyse der Tiefenwässer, die Grundwasserbewegung und die lineare Salinitätsverteilung herangezogen. Die Isotopenmessungen wurden zum damaligen Zeitpunkt auf hohem analytischen Standard von verschiedenen Institutionen an Proben durchgeführt. Sie führten zu der Erkenntnis, dass im Bereich des Grubengebäudes hohe Grundwasseralter von mehreren 10 Millionen Jahren vorliegen. Das Beispiel des Langzeitsicherheitsnachweises zum Endlager Konrad zeigt, dass bereits vor 20 Jahren der Zusammenführung der Ergebnisse der Langzeitsicherheitsanalysen und geowissenschaftlicher Begleitargumente zu einer finalen Sicherheitsaussage ein hoher Stellenwert zugesprochen wurde.

Literaturverzeichnis

- /ABV 09/ Allgemeine Bundesbergverordnung vom 23. Oktober 1995 (BGBl. I S. 1466), zuletzt geändert durch Artikel 22 des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585).
- /ATG 10/ Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz) vom 23. Dezember 1959 (BGBl. I S. 814) in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565) (BGBl. III S. 751-1), zuletzt geändert durch Art. 1 des Gesetzes vom 8. Dezember 2010 (BGBl. I S. 1817).
- /BBG 09/ Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), zuletzt geändert durch Artikel 15a des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585).
- /BEU 12a/ Beuth, T., Baltés, B., Bollingerfehr, W., Buhmann, D., Charlier, F., Filbert, W., Fischer-Appelt, K., Mönig, J., Rübél, A., Wolf, J.:
Untersuchungen zum menschlichen Eindringen in ein Endlager. Bericht zum Arbeitspaket 11, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-280, ISBN: 978-3-939355-56-4, GRS mbH: Köln, 2012.
- /BEU 12b/ Beuth, T.; Bracke, G.; Buhmann, D.; Dresbach, C.; Keller, S.; Krone, J.; Lommerzheim, A.; Mönig, J.; Mrugalla, S.; Rübél, A.; Wolf, J.: Szenarientwicklung: Methodik und Anwendung. Bericht zum Arbeitspaket 8. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben – GRS-284, 2012.
- /BGR 03/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR):
Standortbeschreibung Gorleben, Teil III. Ergebnisse der Erkundung des Salinars. BGR, Hannover, 2003.
- /BFS 05/ Bundesamt für Strahlenschutz: Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle – Wirtsgesteine im Vergleich. Synthesebericht des Bundesamtes für Strahlenschutz, Salzgitter 04.11.2005

- /BFS 11/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS):
Endlager Konrad. Antworten auf die meistgestellten Fragen. Broschüre,
Herausgeber: Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, Stand März 2011.
- /BMI 83/ Fachausschuß Brennstoffkreislauf des Länderausschusses für Atomkern-
energie Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in ei-
nem Bergwerk. Rdschr. des BMI vom 20. April 1983, RS AGK 3 – 515
790/2.
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU):
Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radio-
aktiver Abfälle. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktor-
sicherheit. Stand: 30. September 2010.
- /BMU 12/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU):
Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 47 der Strahlenschutzverordnung
(Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe
aus Anlagen oder Einrichtungen). Vom 28. August 2012, veröffentlicht am
5. September 2012, Bundesanzeiger AT 05.09.2012 B1.
- /BMUB 15/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
(BMUB):
Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahl-
ter Brennelemente und radioaktiver Abfälle, (Nationales Entsorgungspro-
gramm, NAPRO), August 2015, Bonn, www.bmub.bund.de
- /EC 96/ Kommission der Europäischen Gemeinschaften:
Richtlinie 96/29/EURATOM des Rates vom 13. Mai 1996 zur Festlegung
der grundlegenden Sicherheitsnormen für den Schutz der Gesundheit der
Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende
Strahlen, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 159
- /EC 99/ Kommission der Europäischen Gemeinschaften:
Gemeinsames Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abge-
brannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioakti-
ver Abfälle, BGB 2 849/1999

- /EC 00/ European Commission (EC):
Concerted action on the retrievability of long-lived radioactive waste in deep underground repositories, EUR 19145, Final report, Brüssel, 2000
- /EC 11/ European Commission:
PAMINA: Performance Assessment Methodologies in Application to Guide the Development of the Safety Case, European Handbook of the State of the Art of Safety Assessments of Geological Repositories – Part 1, Brussels, Belgium, 2011.
- /EUR 15/ Rat der Europäische Union:
Access to European Union Law, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN-DE/TXT/?qid=1434119536917&uri=CELEX:32011L0070&from=DE>
- /ESK 13/ Entsorgungskommission: STELLUNGNAHME der Entsorgungskommission zum Langzeitsicherheitsnachweis für das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM), Bonn, 31. Januar 2013.
- /FIS 13/ Fischer-Appelt, K.; Baltés, B.; Buhmann, D; Larue, J.; Mönig, J.:
Synthesebericht für die VSG, Bericht zum Arbeitspaket 13, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS 290, IBSN 978-3-939355-66-3, Köln, März 2013
- /HAR 15/ Hartwig-Thurat, E; Uhlmann, S.:
Weiterentwicklung der Methodik für die Durchführung von Sicherheitsanalysen zur Beherrschung von Betriebsstörungen und Störfällen, Abschlussbericht zum AP 1 des FuE-Vorhabens 36R03410, GRS – 383, IBSN 978-3-944161-65-5, Köln, September 2015
- /IAEA 95/ International Atomic Energy Agency (IAEA):
Principles of Radioactive Waste Management
Safety Series No. 111-F, Vienna, 1995
- /IAEA 97/ International Atomic Energy Agency (IAEA):
The Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, Vienna, 1997

- /IAEA 06/ International Atomic Energy Agency (IAEA):
Geological Disposal of radioactive Waste
Safety Requirements, IAEA SAFETY STANDARDS SERIES No. WS-R-4
Vienna, 2006
- /IAEA 06a/ International Atomic Energy Agency (IAEA):
Fundamental Safety Principles
Safety Fundamentals, IAEA SAFETY STANDARDS SERIES No. SF-1
Vienna, 2006
- /IAEA 06b/ International Atomic Energy Agency (IAEA):
Development of Specifications for Radioactive Waste Packages,
IAEA-TECDOC-1515 (ISBN:92-0-109206-7), 2006
- /IAEA 09/ International Atomic Energy Agency (IAEA):
Geological Disposal of Radioactive Waste: Technological Implications for
Retrievability, IAEA NW-T-1.19, ISBN 978-92-0-100109-2, ISSN 1995-
780776 Vienna, January 2009
- /IAEA 09a/ International Atomic Energy Agency (IAEA):
Predisposal Management of Radioactive Waste,
General Safety Requirements Part 5,
STI/PUB/1368 (ISBN:978-92-0-111508-9) 38 pp.; 0 figures, 2009
- /IAEA 11/ International Atomic Energy Agency (IAEA):
Disposal of Radioactive Waste: Specific Safety Requirements”,
IAEA Safety Standards Series ISSN 1020-525X; no. SSR-5,
STI/PUB/1449, Wien, 2011
- /IAEA 11a/ International Atomic Energy Agency (IAEA):
Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste,
Specific Safety Guide, IAEA Safety Standards Series SSG-14,
STI/PUB/1483 (ISBN:978-92-0-111510-2) 104 pp.; 2 figures, 2011
- /IAEA 12/ International Atomic Energy Agency (IAEA):
The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive
Waste, Specific Safety Guide No. SSG-23, IAEA, Wien, 2012

- /IAEA 13/ International Atomic Energy Agency (IAEA):
The Safety Case and Safety Assessment for the Predisposal Management of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series GSG-3, STI/PUB/1576 (ISBN:978-92-0-134810-4) 151 pp.; 11 figures, 2013
- /IAEA 15/ International Atomic Energy Agency (IAEA):
Disposal Facilities for Intermediate Level Radioactive,
Draft safety report, IAEA, drafted at CM in Vienna, 18-22 May
- /ICRP 85/ International Commission on Radiological Protection :
Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste. ICRP Publication 46. Ann. ICRP 15 (4). Elsevier, Amsterdam, 1985.
- /ICRP 90/ International Commission on Radiological Protection :
1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3). Elsevier, Amsterdam, 1985.
- /ICRP 98/ International Commission on Radiological Protection :
Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste”, ICRP Publication 81, Ann. ICRP 28 (4), Elsevier, Amsterdam, 1998.
- /ICRP 07/ International Commission on Radiological Protection:
The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection”, ICRP Publication 103, Ann. ICRP 37 (2-4), Elsevier, Amsterdam, 2007.
- /ICRP 08/ International Commission on Radiological Protection:
Environmental Protection - the Concept and Use of Reference Animals and Plants. ICRP Publication 108. Ann. ICRP 38 (4-6).Elsevier, Amsterdam, 2008.
- /ICRP 09/ International Commission on Radiological Protection:
Application of the Commission’s Recommendations for the Protection of People in Emergency Exposure Situations”, ICRP Publication 109, Ann. ICRP 39 (1), Elsevier, Amsterdam, 2009.

- /ICRP 13/ International Commission on Radiological Protection:
Radiological Protection in Geological Disposal of Long-Lived Solid Radioactive Waste, ICRP Publication 122, Ann. ICRP 42 (3), Elsevier, Amsterdam, 2013.
- /ISI 08/ Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW; ISIBEL: Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008.
- /ISI 10/ Buhmann, D., Mönig, J., Wolf, J., Keller, S., Mrugalla, S., J.R., W., Krone, J., Lommerzheim, A.:
FEP-Katalog für einen HAW-Standort im Wirtsgestein Salz. Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW (Projekt ISIBEL), Gemeinsamer Bericht von DBE TECHNOLOGY GmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, April 2010.
- /KIN 08/ Kindt, A.; B. Baltes:
Der Safety Case Gedanke in nationalen Regulatorien und Sicherheitsberichten, GRS – A – 3430, Köln, 2008
- /LAR 13/ Larue, J., Baltes, B., Fischer, H., Frieling, G., Kock, I., Navarro, M., Seher, H.: Radiologische Konsequenzenanalyse. Bericht zum Arbeitspaket 10, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-289, ISBN 978-3-939355-65-6, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, Februar 2013.
- /MOE 11/ Mönig, J.; Buhmann, D.; Rübel, A.; Wolf, J.; Baltes, B.; Peiffer, F.; Fischer-Appelt, K.: Grundzüge des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes. Bericht zum Arbeitspaket 4. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. – GRS-271, Köln; 2011.

- /MÜL 12/ Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.J., Herbert, H.-J., Lerch, C., Linkamp, M., Wieczorek, K., Xie, M.: Integrität geotechnischer Barrieren – Teil 1: Vorbemessung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-287, ISBN: 978-3-939355-63-2, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /NEA 00/ Nuclear Energy Agency (NEA):
: Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste. An International Database. Radioactive Waste Management, 92 Seiten, ISBN 92-64-18514-3: Paris, 24.
- /NEA 01/ Nuclear Energy Agency (NEA):
Reversibility and Retrievability in Geologic Disposal of Radioactive Waste - Reflections at the International Level, NEA-3140, Paris, November 2001
- /NEA 04/ Nuclear Energy Agency (NEA):
Post-closure Safety Case for Geological Repositories
Nature and purpose, NEA No. 3679, ISBN 92-64-02075-6
OECD 2004
- /NEA 08/ Nuclear Energy Agency (NEA):
The Evolving Roles of Geoscience in the Safety Case – Responses to the AMIGO Questionnaire: A Report of the NEA Working Group on Approaches and Methods for Integrating Geological Information in the Safety Case (AMIGO), Integration Group for the Safety Case (IGSC), NEA/RWM/IGSC(2008)2, OECD/NEA, Paris.
- /NEA 08a/ Nuclear Energy Agency (NEA):
Moving Forward with Geological Disposal of Radioactive Waste: A Collective Statement by the NEA Radioactive Waste Management Committee, NEA No. 6433, OECD/NEA, Paris, 2008.
- /NEA 07/ Nuclear Energy Agency (NEA):
Safety Cases for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: Where Do We Stand?, Symposium Proceedings, Paris, France, 23-25 January 2007, NEA No. 6319, OECD/NEA, Paris, 2007.

- /NEA 09/ Nuclear Energy Agency (NEA):
International Experiences in Safety Cases for Geological Repositories (IN-
TESC), NEA No. 6251, OECD/NEA, Paris, 2009.
- /NEA 10/ Nuclear Energy Agency (NEA):
NEA (2010), Geoscientific Information in the Radioactive Waste Manage-
ment Safety Case. Main Messages from the AMIGO Project, NEA No.
6395, OECD/NEA, Paris, 2010.
- /NEA 11a/ Nuclear Energy Agency (NEA):
Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-level
radioactive Waste and Spent Fuel, Draft Findings of the NEA R&R Project,
Paris, June 2011
- /NEA 11b/ Nuclear Energy Agency (NEA):
International Understanding of Reversibility of Decisions and Retrievability
of Waste in Geological Disposal, NEA-leaflet, Draft Version, Paris, June
2011
- /NEA 12a/ Nuclear Energy Agency (NEA):
Indicators in the Safety Case: A Report of the Integrated Group on the
Safety Case (IGSC), NEA/RWM/R(2012)7, OECD/NEA, Paris, 2012.
- /NEA 12b/ Nuclear Energy Agency (NEA):
Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radio-
active Waste: Outcomes of the NEA MeSA Initiative, NEA No. 6923,
OECD/NEA, Paris, 2012
- /NEA 13/ Nuclear Energy Agency (NEA):
The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological
Repositories , NEA No. 78121, ISBN 92-64-02075-6
OECD 2013

- /NMU 02/ Niedersächsisches Umweltministerium
Planfeststellungsbeschluss für die Errichtung und den Betrieb des Bergwerkes Konrad in Salzgitter als Anlage zur Endlagerung fester oder verfestigter radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung,
22. Mai 2002
- /POP 93/ Popp, T.; Kern, H.: Thermal dehydration reactions characterized by combined measurements of electrical conductivity and elastic wave velocities. Earth Planet. Sci. Lett., 120: 43-57, 1993.
- /PRO 02/ Pröhl, G. und F. Gering: Dosiskonversionsfaktoren zur Berechnung der Strahlenexposition in der Nachbetriebsphase von Endlagern nach dem Entwurf der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 Strahlenschutzverordnung in Anlehnung an die Vorgehensweise im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens des geplanten Endlagers Konrad. GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit. Institut für Strahlenschutz, 85764 Neuherberg, 15. Dezember 2002
- /RSK 02/ Reaktor-Sicherheitskommission/Strahlenschutzkommission (RSK/SSK): Gemeinsame Stellungnahme der RSK und der SSK betreffend BMU-Fragen zur Fortschreibung der Endlager-Sicherheitskriterien.
05/06.12.2002.
- /STV 01/ Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), zuletzt geändert durch Artikel 5 der Verordnung vom 11. Dezember 2014 (BGBl. I S. 2010) .
- /THO 13/ Thomauske, B., Charlier, F.: Forschungs- und Entwicklungsbedarf auf Basis der Erkenntnisse aus der VSG sowie Empfehlungen. Bericht zum Arbeitspaket 14, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-304, ISBN 978-3-939355-83-0, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2013.
- /VIG 07/ Vigfusson, J., Madoux, J., Raimbault, Ph., Röhlig, K.-J. & Smith, R.: European Study on the regulatory review of the safety case for geological disposal of radioactive waste. Case study: Uncertainties and their management, 2007.

- /WEN 14/ Western European Nuclear Regulators Association (WENRA)
Radioactive Waste Disposal Facilities Safety Reference Levels, WENRA,
22 December 2014
- /WIE 04/ Wieczorek, K.; Schwarzianeck, P.: Untersuchung zur Auflockerungszone
im Salinar (ALOHA2), Abschlussbericht, GRS-198, Gesellschaft für Anla-
gen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, 2004.
- /WOL 12a/ Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dres-
bach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lom-
merzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mrugalla, S., Popp, T., Rübel, A.,
Weber, J.R.: FEP-Katalog für die VSG. Konzept und Aufbau. Bericht zum
Arbeitspaket 7, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben,
GRS-282, ISBN: 978-3-939355-58-8, Gesellschaft für Anlagen- und Reak-
torsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /WOL 12b/ Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dres-
bach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lom-
merzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mrugalla, S., Popp, T., Rübel, A.,
Weber, J.R.: FEP-Katalog für die VSG. Dokumentation. Bericht zum Ar-
beitspaket 7, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben,
GRS-283, ISBN: 978-3-939355-58-8, Gesellschaft für Anlagen- und Reak-
torsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Phasen eines Endlagerprogramms und der jeweiligen radiologischen Überwachung (aus /ICRP 13/)	6
Abb. 3.1	Elemente und Ablauf eines Safety Case (Quelle /NEA 04/)	20
Abb. 3.2	Elemente eines Safety Case (Quelle /NEA 13/)	22
Abb. 3.3	Komponenten des Safety Case (Quelle SSG-23, /IAEA 12/)	24
Abb. 3.4	Strukturplan des Vorhabens VSG aus /FIS 13/	28
Abb. 4.1	Vergleich der Abfallklassifizierung in Deutschland und nach /IAEA 09a/	41
Abb. 4.2	International verfolgte Endlagerkonzepte (Quelle SSR-5 /IAEA 11/)	43
Abb. 5.1	Schematische Darstellung der methodischen Elemente für die Szenarienentwicklung aus /BEU 12b/	56
Abb. 5.2	Struktur des technischen Funktionsnachweises für das Verschlussystem des Endlagerkonzepts der VSG, aus /MÜL 12/	63
Abb. 5.3	Modell der Salz-/Süßwasserrechnungen an einem Tonsteinstandort	67
Abb. 5.4	Ergebnisse der 2D-Modellrechnungen, Rechenzeitraum 10.000 a, Stromliniendarstellung (oben Süßwasserrechnung, darunter Salinitätsrechnung)	67
Abb. 5.5	Ergebnisse der 2D-Modellrechnungen, Abstandsgeschwindigkeiten und Druckhöhen (Süß-/Salzwasserrechnung) in einem Modellausschnitt des Wirtsgesteins im Bereich des Endlagers (blau)	68

Abb. 5.6	Ergebnisse der 2D-Modellrechnungen, Stromliniendarstellung der Salinitätsrechnungen (Rechenzeitraum von 1.000.000 a, oben, bis 5.000.000 a unten).....	69
Abb. 5.7	Darstellung der modellierten Ausbreitungspfade im Plan (aus www.endlager-konrad.de).....	71

Glossar

AtG	Atomgesetz
AtVfV	Atomrechtliche Verfahrensverordnung
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BSK-R	Brennstabkokillen
CASTOR	Behälter
CSD-B	Kokille mit verglasten Dekontaminations- und Spülwässern
CSD-C	Kokille mit hochdruckkompaktierten radioaktiven Abfällen (CSD-C, Colis Standard de Déchets Compactés)
CSD-V	Kokille mit verglasten Abfällen (CSD-V, Conteneur Standard de Déchets Vitriifiés)
DBE	Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe
ESK	Entsorgungskommission
EU	Europäische Union
FuE	Forschung und Entwicklung
HAW	Hoch radioaktiver Abfall
IFG	Informationsfreiheitsgesetz
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
ILLW	Intermediate Level Waste
LLW	Schwach radioaktiver Abfall
MAW	Mittel radioaktiver Abfall
PFB	Planfeststellungsbeschluss
PG-K	Projektgruppe „Errichtung des Endlagers Konrad“

PSÜ	Periodische Sicherheitsüberprüfung
PTB	Physikalisch Technische Bundesanstalt
PTKA	Projektträger Karlsruhe
StandAG	Standortauswahlgesetz
R&R	Rücknahme von Entscheidungen und Rückholbarkeit, Reversibility and Retrievability
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
TBL	Transportbehälterlager
TLB	Transport- und Lagerbehälter
tSM	Tonnen Schwermetall
VerSi	Vergleichende Sicherheitsanalysen für Endlagersysteme
VSG	Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de

ISBN 978-3-944161-65-5