



Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH

Szenarienanalysen im
Rahmen des
Nachweises der
Langzeitsicherheit von
Endlagern für
radioaktive Abfälle

Szenarienanalysen im
Rahmen des Nachweises der
Langzeitsicherheit von
Endlagern für radioaktive
Abfälle

November 1998

Auftrags-Nr.: 85483

Bundesamt für Strahlenschutz
Zentralbibliothek Salzgitter

10013435

Anmerkung:

Dieser Bericht ist von der GRS im Auftrag des BMU im Rahmen des Vorhabens SR 2220 erstellt worden. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt werden bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

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

Kurzfassung

Eine adäquate Szenarienanalyse ist wesentlich für die Durchführung einer belastbaren Langzeitsicherheitsanalyse für Endlager radioaktiver Abfälle. In den verschiedenen Endlagerprogrammen kommen methodisch sehr unterschiedliche Ansätze zur Szenarientwicklung zur Anwendung. Als Beitrag zur Entwicklung eines gemeinsamen Verständnisses zu diesem Thema in Deutschland führte die GRS eine Reihe von Workshops mit Vertretern von in der Endlagerung engagierten deutschen Institutionen durch. Gegenstand der Workshops waren Fragen der Terminologie, des Vergleichs von Methoden sowie der Betrachtung zukünftiger menschlicher Handlungen. Der vorliegende Bericht gibt die Ergebnisse der Workshops wieder.

Abstract

An adequate performance of scenario analysis is essential for the performance of a long-term safety analyses for radioactive waste repositories. Within the several programmes for final disposal of radioactive waste, different approaches to scenario development are being applied. As a contribution to the development of a common understanding concerning this subject, GRS organised a series of workshops with participants from German organisations which are involved in the final disposal of radioactive waste. Questions of terminology, the comparison of methodologies, and the consideration of future human actions have been subjects of the workshops. The report presented here presents the results obtained during the workshops.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Gegenwärtiger Entwicklungsstand.....	2
3	Fragestellungen der Szenarienanalyse	5
4	Terminologie	8
5	Methoden der Szenarienanalyse	12
6	Zukünftige menschliche Handlungen (<i>Future Human Actions - FHA</i>)	17
6.1	Definition und einleitende Bemerkungen	18
6.2	Berücksichtigung von FHA in Sicherheitsanalysen.....	19
6.3	Einordnung in Langzeitsicherheitsanalysen.....	19
7	Zusammenfassung	20
	Literaturverzeichnis	23
	Abkürzungsverzeichnis	26
Anlage 1:	Übersicht über die Workshops, ihre Themen und Teilnehmer	A1.1
Anlage 2.	██████████: Das GRS-Szenarien-Analyseverfahren TMM (<u>T</u> ransport- <u>M</u> echanismus- <u>M</u> ethode)	A2.1
Anlage 3.	██████████: Das französische Szenarien-Auswahlverfahren „ <i>Independent Initiating Event</i> “ (IIE)	A3.1
Anlage 4.	██████████: Die von der SKI im Projekt SITE-94 verwendete Methodik	A4.1

Anlage 5.	██████████	: Die ECN-Methode der Szenarientwicklung	A5.1
Anlage 6.	██████████	: <i>Total System Simulation</i>	A6.1
Anlage 7.	██████████	: Die Anwendung des Programms FANFARE (<u>F</u> <u>A</u> nalysis <u>f</u> or <u>A</u> pplication to <u>R</u> isk <u>E</u> valuation, AEA Technology, UK)	A7.1

1 Einleitung

Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit hat im Rahmen des Vertrages SR 2220 die GRS mit der Verfolgung und Bewertung der Vorgehensweise bei der Nachweisführung der Sicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle in der Langzeitphase (Nachbetriebsphase) beauftragt. Ein solche Nachweisführung (Langzeitsicherheitsanalyse) erfolgt in zwei Schritten:

- a) In einer **Szenarienanalyse** werden Zustände, Ereignisse und Prozesse („FEPs“ von engl. *Features, Events, and Processes*), die die zukünftige Entwicklung des Endlagersystems und seiner Umgebung beeinflussen können, identifiziert und zu Szenarien (d.h. Beschreibungen jeweils einer Entwicklungsmöglichkeit des Systems) verknüpft. Die Vielzahl der Szenarien wird zu Gruppen zusammengefaßt. Für die einzelnen Gruppen werden repräsentative Szenarien gebildet.
- b) In der **Konsequenzenanalyse** wird der Ablauf dieser Szenarien mit Hilfe von Rechenmodellen simuliert und die dabei berechnete Nuklidfreisetzung bzw. Dosis ("Konsequenz") mit Schutzziele verglichen. Abhängig vom zur Anwendung kommenden Regelwerk fließt in diesen Vergleich auch eine Bewertung der Aussagesicherheit ein.

Demzufolge bestimmen die Ergebnisse der Szenarienanalyse den Gegenstand der Konsequenzenanalyse und somit den Charakter und Umfang der gesamten Sicherheitsanalyse. Eine adäquate Durchführung der Szenarienanalyse ist eine wesentliche Voraussetzung für eine belastbare Langzeitsicherheitsanalyse.

International kommen methodisch sehr unterschiedliche Ansätze zur Szenarientwicklung zur Anwendung. Im Rahmen des deutschen Endlagerprogramms ist hierzu die Entwicklung eines gemeinsamen Verständnisses wünschenswert.

In der GRS wurde im Rahmen des EU-Projektes EVEREST die Methodik TMM (*Transport Mechanism Methodology*) zur Szenarienanalyse entwickelt (/EC 97a/, vgl. auch Anlage 2) und eingesetzt (/EC 97b/). Im Rahmen des Vertrages SR 2220 stellte

sich die Aufgabe, diese Methodik der nationalen Diskussion zu stellen und gegebenenfalls weiterzuentwickeln.

Zur Diskussion zur Szenarienanalyse im nationalen Rahmen wurde von der GRS eine Serie von Workshops zu diesem Thema mit Vertretern von in der Endlagerung engagierten Institutionen durchgeführt. Zielstellung der Workshops war zunächst eine Identifizierung wesentlicher Fragestellungen, eine Verständigung zur Terminologie, ein Vergleich von Methoden der Szenarienanalyse sowie die Bildung eines gemeinsamen Standpunktes hinsichtlich der Berücksichtigung künftiger menschlicher Handlungen als einer speziellen Gruppe von Szenarien. Der vorliegende Bericht gibt die Ergebnisse dieser Workshops wieder. In Anlage 1 sind die Themen und die Teilnehmer der einzelnen Workshops zusammengefaßt. Es ist vorgesehen, die Diskussion zur Szenarienanalyse im nationalen Rahmen weiterzuführen. Die Ergebnisse sollen auch in die Arbeit internationaler Gremien, insbesondere des Deutsch-französischen Direktorats (DFD) und der OECD/NEA, einfließen.

International existiert eine Vielzahl englischer Fachbegriffe zum Themenkomplex der Szenarienanalyse. Um durch Übersetzungen bedingte zusätzliche Unschärfen zu vermeiden, wurden ein Teil dieser Begriffe und einige Zitate im vorliegenden Bericht nicht ins Deutsche übersetzt. Die englischen Termini bzw. Zitate wurden in solchen Fällen *kursiv* gesetzt.

2 Gegenwärtiger Entwicklungsstand

Der internationale Stand der Entwicklungen und Diskussionen zur Szenarienanalyse in Zusammenhang mit Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager radioaktiver Abfälle zu Beginn der 90er Jahre wurde von einer Arbeitsgruppe der OECD/NEA (*NEA Working Group on the Identification and Selection of Scenarios for Performance Assessment of Radioactive Waste Disposal*) in dem Dokument /NEA 92/ zusammengefaßt.

Während der in Langzeitsicherheitsanalysen betrachteten langen Zeiträume besteht das Potential für eine Vielzahl von Änderungen im Endlagersystem und seiner Umgebung. Diese Änderungen können künstliche oder natürliche Ursachen haben.

„Since it is impossible to know the future, the related uncertainties must be handled in the safety assessment process; scenario development is the most commonly used technique to account for uncertainties about the future.“ (/NEA 92/)

Ihre zentrale Bedeutung für Langzeitsicherheitsanalysen wird nach /NEA 92/ durch drei Aspekte gekennzeichnet:

1. Szenarien liefern durch die Betrachtung potentieller zukünftiger Bedingungen den Kontext zur Durchführung der Sicherheitsanalysen.
2. Szenarien bestimmen die Vorgehensweise bei der Datenbeschaffung und Modellbildung.
3. Die Diskussion über Szenarien bildet eine wichtige Grundlage für die Kommunikation zwischen Antragstellern und Genehmigungsbehörde.

/NEA 92/ charakterisiert die Szenarienanalyse als rein qualitativen Prozeß, während quantitative Analysen, die dazugehörige Beschaffung numerischer Daten sowie die Nutzung mathematischer bzw. numerischer Modelle dem Bereich der Konsequenzenanalyse zugeordnet werden.

In /NEA 92/ wird ein Überblick über die zum Zeitpunkt des Erscheinens international gebräuchlichen Methoden der Szenarienanalyse gegeben. Sämtliche beschriebenen Methoden gehen von der Erstellung einer Sammlung von Daten über Zustände, Ereignisse und Prozesse („FEPs“ von engl. *Features, Events, and Processes*) aus, die die zukünftige Entwicklung des Endlagersystems und seiner Umgebung beeinflussen können. Im weiteren Vorgehen unterscheiden sich die Methoden laut /NEA 92/ nach

- *judgemental method,*
- *fault or event tree method,*
- *systematic approach*

Außerdem berücksichtigt der Bericht auch den

- *system simulation approach.*

(auch: *Environmental System Simulation, Total System Simulation* oder *Total-System Performance Assessment*, vgl. Kapitel 3 und Anlage 6) zur Modellierung des

Gesamtsystems (Endlager und Standort, meist einschließlich der Modelle zur Konsequenzenanalyse), die die Vielzahl möglicher zukünftiger Entwicklungen in einem Modell erfassen sollen und eine Szenarienanalyse explizit nicht vornehmen.

Auf diese Einteilung sowie auf einzelne Methoden, die diesen Sammelbegriffen zuzuordnen sind, soll im 3. Kapitel des vorliegenden Berichts näher eingegangen werden.

Seit der Erstellung des Berichts /NEA 92/ wurden die Methoden zur Szenarienanalyse im Rahmen einer Vielzahl nationaler Programme weiterentwickelt (vgl. Kapitel 3 und die Anlagen 2-7). Nachdem im Rahmen der NEA-Arbeitsgruppen IPAG (/NEA 97/) und IPAG-2 (Bericht in Vorbereitung) u. a. Fragen zur Einordnung von Szenarienanalysen in das Gesamtsystem von Langzeitsicherheitsanalysen betrachtet wurden, plant die OECD/NEA für 1999 im Rahmen eines Workshops eine Fortführung der internationalen Diskussion speziell zum Thema „Szenarienanalyse“.

Gleichzeitig wird an der Weiterentwicklung einer FEP-Datenbank der NEA gearbeitet. Diese Datenbank soll aus einer durch die NEA erstellten generischen FEP-Sammlung basieren. Die dort gespeicherten FEPs sind entsprechend der Subsysteme, auf die sie sich beziehen, geordnet. In die Datenbank sollen außerdem von NEA-Mitgliedern erzeugte projektspezifische Datenbasen eingehen. Für die in diesen Datenbasen gespeicherten FEPs sollen Bezüge zur generischen NEA-Sammlung erstellt werden.

Eine Sonderrolle spielt die Betrachtung von Szenarien, die durch zukünftige menschlichen Handlungen (FHA von *Future Human Actions*, auch HI von *Human Intrusion*) bedingt sind (vgl. Kapitel 4). Hierzu wurden von der OECD/NEA zwei Serien von Workshops durchgeführt. Die Ergebnisse der ersten Serie zu Fragen im Zusammenhang mit Langzeitsicherheitsanalysen wurden veröffentlicht (/NEA 95/). Ein Bericht zur zweiten Serie wurde nicht erstellt, da keine über /NEA 95/ hinausgehenden Ergebnisse erzielt wurden.

Neben den Arbeiten der OECD/NEA sind Projekte der EU ein weiteres Forum zur internationalen Diskussion und zum Vergleich von Ansätzen zur Szenarienanalyse. In den EU-Projekten PAGIS (Zusammenfassung in /EC 88/) und PACOMA (u. a. /EC 90/) wurden bestimmte Szenarien als Basis für die Konsequenzenanalyse vorausgesetzt, ohne daß die Methodik der Szenarienanalyse selbst zum Gegenstand der Projekte

wurde. Parallel dazu erfolgte in einigen EU-Projekten eine ausführliche Betrachtung (geologischer und hydrogeologischer) Folgen klimatischer Veränderungen (vgl. z. B. /EC 97c/), ohne daß eine direkte Verbindung zu den erstgenannten Arbeiten hergestellt wurde.

Im Rahmen des EVEREST-Projekts wurden verschiedene Ansätze zur Szenarienanalyse angewendet und miteinander verglichen (/EC 97a/). Im einzelnen handelte es sich dabei um die französische IIE-Methode (Anlage 3), das niederländische Verfahren aus dem PROSA-Projekt (Anlage 5) sowie das deutsche TMM-Verfahren (Anlage 2). Folgt man der oben erwähnten Kategorisierung aus /NEA 92/, so sind alle drei Verfahren als *judgemental methods* einzuordnen (vgl. auch Kapitel 3). Es zeigte sich, daß die Verfahren für ähnliche Ausgangssituationen auch vergleichbare Ergebnisse lieferten. Auch im Rahmen des EVEREST-Projekts wurden langfristige klimatische Veränderungen separat betrachtet, ohne daß jedoch eine methodisch schlüssige Integration der diesbezüglichen Ergebnisse in das Gesamtsystem der Langzeitsicherheitsanalysen erfolgte.

In Deutschland erfolgte u. a. im Rahmen der o. g. EU-Projekte in verschiedenen Institutionen eine Entwicklung und Anwendung von Methoden zur Szenarienanalyse. Eine Vereinheitlichung der Methoden im nationalen Rahmen ist nicht vorgesehen. Vielmehr soll die Auswahl von Methoden den jeweiligen Antragstellern und Genehmigungsbehörden vorbehalten bleiben.

3 Fragestellungen der Szenarienanalyse

Ziel der Workshops, deren Ergebnisse in diesem Bericht beschrieben werden, war die Diskussion zur Szenarienanalyse im nationalen Rahmen. Es wurden folgende Themenkreise und Fragestellungen als wesentlich identifiziert:

Terminologie. Eine Diskussion über Methoden setzt eine einheitliche Terminologie und einheitliche Definitionen voraus. Das Angebot an Definitionen aus verschiedenen nationalen und internationalen Programmen ist nicht einheitlich und auch nicht in jedem Fall befriedigend. Folgende zentrale Fragen sind zu klären:

- Was ist ein Szenario?

- Wodurch ist ein Szenario eindeutig bestimmt, d.h. in welchen Fällen ist von zwei verschiedenen Szenarien, in welchen von Varianten innerhalb eines Szenarios zu sprechen?
- Wie ist die Szenarienanalyse innerhalb des Gesamtsystems einer Langzeitsicherheitsanalyse einzuordnen, welche Abgrenzungen gibt es?

Zu Fragen der Terminologie wird in Kapitel 4 des vorliegenden Berichts Stellung genommen.

Methodenvergleich.

- Wie sind verschiedene Methoden der Szenarienanalyse hinsichtlich
 - der Vollständigkeit,
 - des Ergebnisses der Szenarienauswahl,
 - der Einordnung in das System einer Langzeitsicherheitsanalyse,
 - des Aufwandes und der Effektivität sowohl in Bezug auf die Szenarienanalyse selbst als auch bezüglich der daraus resultierenden Arbeiten im Gesamtsystem von Langzeitsicherheitsanalysen,
 - der Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Vorgehensweise zu bewerten?

In Kapitel 5 des vorliegenden Berichts werden Methoden der Szenarienanalyse aus verschiedenen Ländern und Organisationen miteinander verglichen und bewertet. Einige dieser Methoden sind in den Anlagen 2 bis 7 beschrieben.

Vollständigkeit - Akzeptanz - Vertrauensbildung.

- Kann eine Vollständigkeit der identifizierten und betrachteten Szenarien erreicht und demonstriert werden?
- Welche Möglichkeiten gibt es, den Mechanismus der Szenarienanalyse und seine Ergebnisse auch für Institutionen und Außenstehende (Genehmigungsbehörde, Öffentlichkeit) nachvollziehbar zu dokumentieren?

Das Vollständigkeitsproblem ist nicht Gegenstand des vorliegenden Berichts. Fragen der Akzeptanz und Vertrauensbildung werden im Kontext des Methodenvergleichs (Kapitel 5) erörtert, jedoch nicht abschließend behandelt. Eine Weiterführung der Diskussion zu diesen Themen ist notwendig (vgl. Zusammenfassung in Kapitel 7).

Bezug zum Gesamtsystem der Langzeitsicherheitsanalyse.

- Welcher Übergang von der Szenarien- zur Konsequenzenanalyse ergibt sich aus der gewählten Terminologie?
- Inwieweit erfolgt eine Iteration?

Diese Fragen wurden im Zusammenhang mit der Problemstellung der Terminologie (Kapitel 4) und des Vergleichs von Methoden (Kapitel 5) erörtert.

Wahl von Ausschlußkriterien für Szenarien.

- Welche Kriterien zum Ausschluß bestimmter Szenarien aus der weiteren Betrachtung sind praktikabel und akzeptabel?
- Inwieweit erfordert die Anwendung bestimmter Ausschlußkriterien (z. B. niedrige Eintrittswahrscheinlichkeit, vernachlässigbare Konsequenz) Betrachtungen, die über die Durchführung einer Szenarienanalyse hinausgehen?

Die Wahl von Ausschlußkriterien ist nicht Gegenstand des vorliegenden Berichts. Eine Diskussion zu diesem Thema ist notwendig (vgl. Zusammenfassung in Kapitel 7).

Behandlung der Konsequenzen zukünftiger menschlicher Handlungen (FHA).

- Inwieweit erfordert die Betrachtung zukünftiger menschlicher Handlungen eine von der Behandlung natürlich induzierter Ereignisse abweichende Vorgehensweise?

Die Berücksichtigung von zukünftigen menschlichen Handlungen ist Gegenstand von Kapitel 6 des vorliegenden Berichts, wurde jedoch nicht abschließend behandelt. Die noch zu klärenden Fragen sind in Kapitel 6 sowie in der Zusammenfassung in Kapitel 7 aufgeführt.

4 Terminologie

Die Bedeutung des Begriffs „Szenario“ hängt stark vom Kontext ab, in dem der Begriff verwendet wird. Entscheidend für seine Bedeutung ist die Definition des betrachteten Systems.

Das *Radioactive Waste Management Glossary* der IAEA /IAEA 93/ kennzeichnet ein Szenario als

„An assumed set of conditions or events used in facility planning/design, assessment or regulatory activities.“

Ausgehend von der Definition des Begriffs *scenario* im *Oxford English Dictionary* als

„a sketch, outline, or description of an imagined situation or sequence of events“

wurde der Begriff *scenario development* von der Szenarien-Arbeitsgruppe der OECD/NEA in /NEA 92/ als

„the identification, broad description, and selection of alternative futures relevant to a reliable assessment of the radioactive waste repository safety“

definiert. Somit spezifiziere ein *scenario*

„one possible set of events and processes and provides a brush description of their characteristics and sequencing“.

In Anlehnung an die Formulierungen aus /NEA 92/ und im Hinblick auf eine größtmögliche Kompatibilität mit der Verwendung des Begriffs in anderen Wissensbereichen wurde unter den Teilnehmern des ersten Workshops (vgl. Anlage 1) folgender den gegenwärtigen Diskussionsstand widerspiegelnde Konsens zum Begriff „Szenario“ erreicht:

„Ein Szenario ist eine Entwicklungsmöglichkeit eines Systems. Es wird durch eine Kombination von FEPs spezifiziert.“

Dabei kann z. B. auf folgende Definitionen aus der WIPP-Sicherheitsanalyse für die Begriffe *features*, *events* und *processes* zurückgegriffen werden (/SNL 95/):

„A feature is an aspect or condition of the disposal system that influences the release and/or transport of contaminants.“

„An event is a natural or anthropogenic phenomenon that occurs over a small portion of the time frame of interest, in other words, a 'short-term' phenomenon.“

„A physical process is a natural or anthropogenic phenomenon that occurs over a significant portion of the time frame of interest, in other words, a 'long-term' phenomenon.“

Somit ist es abhängig von der Wahl des betrachteten Systems möglich, für jedes Subsystem eines Endlagersystems separat Szenarien zu definieren („geotechnisches Szenario“, „geochemisches Szenario“, ...). Gegenstand des vorliegenden Berichts ist jedoch die Entwicklung von Szenarien für das gesamte Endlagersystem. In diesem Kontext ist die Verwendung von Begriffen, die auf einzelne Subsysteme verweisen, nicht adäquat, da die Betrachtung des Gesamtsystems im allgemeinen eine andere Auflösung der FEPs nach sich zieht als die eines Subsystems.

Es ist zu beachten, daß Szenarienanalysen für ein Endlagersystem im Hinblick auf unterschiedliche Anwendungen erfolgen. Solche Anwendungen können

- die Stützung der Standortauswahl für ein Endlager,
- die Optimierung des Endlagerdesigns,
- das Aufzeigen der Robustheit des Endlagersystems,
- die Durchführung von Sicherheitsanalysen

und

- die Vertrauensbildung

sein.

Es wird zwischen

- durch natürliche Prozesse verursachten

und

- durch menschliche Handlungen bewirkten

Szenarien unterschieden.

Dabei sollen unter natürlichen Prozessen das Endlagersystem betreffende Entwicklungen, Bedingungen, Eigenschaften, Prozesse und Ereignisse nach dem Verschluß des Endlagersystems verstanden werden. Dies schließt die ungestörte Entwicklung, von ihr abweichende Entwicklungen sowie auslösende Ereignisse natürlichen Ursprungs ein. Dabei wird das Verhalten aller Komponenten des Endlagersystems, insbesondere der Barrieren berücksichtigt.

Im Hinblick auf die weitere Behandlung ist eine Klassifizierung von Szenarien erforderlich. Für durch natürliche Prozesse verursachte Szenarien ist im Rahmen von Langzeitsicherheitsanalysen eine Unterscheidung zwischen

- Referenzszenarien,
- hypothetischen Szenarien

und

- nicht zu betrachtenden Szenarien

Stand der Diskussion.

Referenzszenarien sind Szenarien, die sicher oder mit hoher Wahrscheinlichkeit eintreten werden.

Für **hypothetische Szenarien** bestehen niedrige Eintrittswahrscheinlichkeiten oder große Prognoseunsicherheiten.

Szenarien sollten bei sehr niedrigen Eintrittswahrscheinlichkeiten, sehr niedriger zu erwartender Konsequenz oder bei Irrelevanz für die konkrete Analyse **nicht weiter betrachtet** werden.

Die hier aufgeführte Kategorisierung von Szenarien natürlichen Ursprungs wird in naher Zukunft Gegenstand weiterführender Diskussionen im nationalen Rahmen sein.

Vielfach wird die Fragestellung der Abgrenzung zwischen Szenarien- und Konsequenzenanalyse diskutiert. Damit verbunden ist die Frage, wann von verschiedenen Szenarien zu sprechen ist und wann im Gegensatz dazu verschiedene Abläufe nur Varianten innerhalb eines Szenarios darstellen, die z. B. durch die Wahl unterschiedlicher Parametersätze repräsentiert werden. Dieses Problem der Abgrenzung hat insbesondere für die Methodik von Unsicherheitsanalysen Bedeutung, da Szenariensicherheiten i. d. R. anders als Parameterunsicherheiten behandelt werden.

In praktischen Anwendungen definiert die Antwort auf die Frage nach der Zugehörigkeit verschiedener Abläufe zum gleichen Szenario bzw. zu verschiedenen Szenarien auch die Abgrenzung zwischen Szenarien- und Konsequenzenanalyse: Parametervariationen erfolgen in der Konsequenzenanalyse, während die Unterscheidung zwischen verschiedenen Szenarien in der Szenarienanalyse getroffen wird.

Es ist jedoch zu beachten, daß das Wirken von FEPs und ihr Zusammenwirken in Szenarien auch durch numerische Parameter ausgedrückt werden kann. So besteht zum Beispiel im einfachsten Fall die Möglichkeit, das Eintreten oder Nicht-Eintreten eines Ereignisses durch eine Dualzahl 1 bzw. 0 darzustellen. Entscheidungen darüber, welche Phänomene in einer Langzeitsicherheitsanalyse in welchem Stadium numerisch, welche graphisch und welche verbal beschrieben werden, basieren i. d. R. auf pragmatischen Überlegungen im Zusammenhang mit der verwendeten Methodik und den in der Konsequenzenanalyse zum Einsatz kommenden Modellen. Insofern ist es nicht möglich, allein durch die Festlegung einer Terminologie eine Abgrenzung zwischen Szenarien- und Konsequenzenanalyse vorzunehmen oder zu unterscheiden, ob bei Varianten zukünftiger hypothetischer Abläufe von mehreren verschiedenen Szenarien oder aber von Varianten innerhalb des gleichen Szenarios zu sprechen ist. Vielmehr sind diese Abgrenzungen und Unterscheidungen stark von der verwendeten

Methode zur Szenarienanalyse wie auch von den in der Sicherheitsanalyse eingesetzten Modellen abhängig.

5 Methoden der Szenarienanalyse

International kommt eine Vielzahl von Methoden bei der Szenarienanalyse zum Einsatz. Diese unterscheiden sich zumindest in der äußeren Form z. T. deutlich voneinander. In /NEA 92/ wurde der Versuch einer Kategorisierung nach *judgemental method*, *fault or event tree method*, *systematic approach* und *system simulation approach* unternommen (vgl. Abschnitt 2.1). Es bleibt hier jedoch weitgehend offen, welcher Grad der Formalisierung eine Einordnung einer Methodik in die Kategorie *systematic approach* anstelle der Zuordnung zur Gruppe der *judgemental methods* berechtigt. Der *system simulation approach* ist keine Methode zur expliziten Erzeugung von Szenarien, sondern eine Vorgehensweise für die gesamte Sicherheitsanalyse. Da dies die Prognose über potentielle zukünftige Entwicklungen des Endlagersystems einschließt, ist ein Vergleich dieses Zugangs mit Methoden zur expliziten Generierung von Szenarien notwendig.

Seit der Veröffentlichung von /NEA 92/ ist eine Weiterentwicklung insbesondere im Bereich der Formalisierung der Entscheidungsprozesse bei der Szenarienanalyse zu verzeichnen (vgl. z. B. die Anlagen 4 und 7). Die Anlagen 2 bis 7 stellen beispielhaft die Vorgehensweise einiger Methoden dar:

- Anlage 2: Das GRS-Szenarien-Analyseverfahren TMM (Deutschland)
- Anlage 3: Das französische Szenarien-Auswahlverfahren „*Independent Initiating Event*“ (IIE)
- Anlage 4: Die von der SKI im Projekt SITE-94 verwendete Methodik (Schweden)
- Anlage 5: Die ECN-Methode der Szenarientwicklung (Niederlande, Anwendungen auch in Belgien)
- Anlage 6: *Total System Simulation* (verschiedene Methoden aus Großbritannien, Frankreich und den USA, auch: *Environmental System Simulation*, *System Simulation Approach* oder *Total-System Performance Assessment*)

- Anlage 7: Die Anwendung des Programms FANFARE (AEA Technology, Großbritannien)

Es ist festzustellen, daß sich die verschiedenen vorgestellten Verfahren im Ansatz (Definition des Systems, Identifizierung wirksamer FEPs und Beziehungen der Systemkomponenten untereinander) und auch in Bezug auf die subjektive Komponente dieses Ansatzes wenig unterscheiden. Zu beachten ist allerdings, daß es sich bei keinem der vorgestellten Verfahren um eine Fehler- oder Ereignisbaum-Methodik handelt. In /NEA 92/ wird eingeschätzt, daß solche Fehler- und Ereignisbaumtechniken zwar in der Vergangenheit in einigen Projekten (u.a. Yucca Mountain, Hanford) zum Einsatz kamen, Entwicklungen in diese Richtung aber aus folgenden Gründen inzwischen abgebrochen wurden:

„First, the phenomena of importance to waste disposal assessments are slow and continuous rather than abrupt events. Second, the event tree approach is not suitable for considering the interaction and feedback between different phenomena, although such interaction and feedback are of importance for determining repository safety. Third, event trees force artificial barriers between the representation of the processes. Whereas the important question is how the entire system behaves. Forth, in common with other bottom-up approaches, the number of combinations which needs to be examined becomes unmanageable unless rather drastic screening or grouping is undertaken.“

Alle im Anhang dargestellten Verfahren beinhalten folgende Komponenten:

1. Zunächst werden alle Phänomene, die für die Charakterisierung des Verhaltens des betrachteten Systems wesentlich sind (meist: „FEPs“), zusammengestellt. Dabei kann sowohl auf generische Datenbasen (etwa die NEA-Datenbank) als auch auf standortspezifische Informationen zurückgegriffen werden. Der Prozeß der Auswahl der Phänomene, die für die Fragestellung für relevant gehalten werden (*screening*), basiert auf z. T. subjektiven Entscheidungen. Dies gilt auch, wenn dieser Entscheidungsprozeß stark formalisiert oder gar automatisiert ist, da in solchen Fällen die (evtl. subjektive) Entscheidung mit der Festlegung des Auswahlkriteriums gefällt wird. Werden zur Auswahl z. B. die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Phänomene herangezogen, stellt sich die Frage, nach welchen Verfahren diese Eintrittswahrscheinlichkeiten ermittelt wurden.

2. Die Phänomene werden dann zu Szenarien kombiniert. Dies ist auch dann der Fall, wenn (wie etwa bei der *Total System Simulation*) vom Begriff des Szenarios explizit kein Gebrauch gemacht wird. Für die Methodik der Kombination der Phänomene (FEPs) gibt es verschiedene Möglichkeiten, unter denen sich keine gegenüber den übrigen durch besondere Vorteile auszeichnet. Die Ableitung der Szenarien hängt vom Zweck der durchzuführenden Analyse ab. So können z. B. Abläufe, die natürliche Standortentwicklungen beschreiben, von besonderem Interesse für die Standortauswahl sein, während das gesamte Endlagersystem betreffende Abläufe zur Sicherheitsanalyse für ein Endlager herangezogen werden können.
3. Abschließend werden die Szenarien zu Gruppen zusammengefaßt und über die weitere Vorgehensweise hinsichtlich ihrer Berücksichtigung in einer Analyse entschieden. Dabei wird wiederum der Zweck der durchzuführenden Analyse berücksichtigt. Die unter 1. getroffenen Feststellungen bezüglich der Subjektivität eines solchen Entscheidungsprozesses gelten auch hier.

Zu den einzelnen in den Anlagen vorgestellten Methoden wurde in den Workshops folgendes festgestellt:

- Die Unterscheidung zwischen Ereignissen natürlichen und menschlichen Ursprungs hat wegen des spekulativen Charakters aller Annahmen über künftige menschliche Verhaltensweisen eine besondere Bedeutung für den weiteren Umgang mit den entsprechenden Szenarien (vgl. Kapitel 4). Insofern erscheint die bei der IIE-Methodik (Anlage 3) vorgenommene Unterscheidung problematisch, da einleitende Ereignisse, die durch ungenügende Kenntnisse der Gegebenheiten am Standort verursacht sind („*Non detected faults*“, „*Non detected brine inclusions*“, „*Non detected heterogeneities*“) oder „*Sealing defects*“ ebenso wie Eindringen, Krieg und Klimaänderung durch menschliche Aktivitäten der Kategorie FHA zugerechnet werden.
- Die Diskussion zur SKI-Methode (Anlage 4) beschäftigte sich insbesondere mit den Vor- und Nachteilen der starken Formalisierung des Verfahrens. Diese kommt offenbar besonders der Qualitätssicherung zugute. Andererseits suggeriert das Verfahren dem Außenstehenden eine von subjektiven Faktoren unabhängige Vertrauenswürdigkeit, die so nicht gegeben ist. Die Vorgehensweise bei der Zusammenstellung der FEPs und Einflüsse ist der anderer (weniger formalisierter)

Verfahren vergleichbar. Die Vergabe der *Importance Levels* (ILs, vgl. Anlage 4), die für das Screening entscheidend ist, erfolgt nach subjektiven Maßstäben. Darüber hinaus besitzen insbesondere die „vollständigen“ *Process Influence Diagrams* (PIDs), die die Einflüsse aller ILs darstellen, eine geringe Anschaulichkeit.

- Für das Verfahren der ECN (Anlage 5) wurde insbesondere die Möglichkeit, bei wenigen primären FEPs auf effektivem Weg zu abdeckenden Szenarien zu kommen, als Vorteil identifiziert. Das Verfahren ist nur bei mehreren nacheinander wirkenden Barrieren sinnvoll anwendbar. Die Zuordnung von „primären“ und „sekundären“ FEPs ist nicht immer eindeutig.
- Probleme der Verfahren der *Total System Simulation* (Anlage 6) wurden insbesondere in dem *peer review* durch die *Sandia National Laboratories* (SNL) (/ZIM 92/) für die Anwendung im Rahmen des Projekts *Dry Run 3* (/SUM 92/) dargelegt. Die dort getroffenen Einschätzungen (vgl. Anlage 6) treffen prinzipiell auch auf andere Verfahren dieser Gruppe zu (/NEA 92/). In noch stärkerem Maß als bei der Methodik aus SITE-94 ist eine Überdeckung der zugrundeliegenden kritischen subjektiven Entscheidungen (insbesondere beim *screening*) durch die Präsentation in einem Formalismus gegeben.
- Bei dem auf der Anwendung des Softwareprogramms FANFARE basierenden Verfahren (Anlage 7) ist das formalisierte Vorgehen eine gute Basis zur Qualitätssicherung. Anders als bei der PID-Methode (SITE-94) ist der Entscheidungsprozeß und insbesondere die Trennlinie zwischen subjektiven Komponenten und vom Code/Verfahren vorgegebenen Schema vom Außenstehenden deutlich zu erkennen.

Die verschiedenen vorgestellten Verfahren unterscheiden sich im Ansatz (Definition des Systems, Identifizierung wirksamer FEPs und Beziehungen der Systemkomponenten untereinander) und auch in Bezug auf die subjektive Komponente dieses Ansatzes wenig. Unterschiede gibt es bezüglich

- dem gedanklichen Ausgangspunkt der Zusammenstellung der FEPs (top-down, Transportmechanismen, Barrieren),
- dem Grad der Formalisierung des Konstruktions- und Entscheidungsprozesses und seiner Dokumentation,

- der Abgrenzung von der Modellierung/Konsequenzenanalyse,
- des Ziels des *Performance Assessments*, der verwendeten Indikatoren und der zugrundeliegenden Regelwerke.

Kriterien für die Beurteilung verschiedener Zugänge sind

- die „Vollständigkeit“ des Ergebnisses,
- Aspekte der Qualitätssicherung (Nachvollziehbarkeit, Reproduzierbarkeit, Dokumentation),
- die Transparenz des Entscheidungsprozesses,
- die Vermittelbarkeit des Vorgehens an verschiedene Zielgruppen.

Gegenwärtig sind Methoden der *Total System Simulation* nicht in der Lage, eine „klassische“ Szenarienanalyse zu ersetzen. Eine gegenseitige Ergänzung der Verfahrensgruppen ist jedoch denkbar. Diese könnte z. B. in der Verwendung vereinfachter Modelle als Entscheidungshilfe bei der Abschätzung des potentiellen Beitrags von FEPs zur Konsequenz (neben der Zuweisung von Eintrittswahrscheinlichkeiten dem Grundproblem aller Entscheidungsfindungen bei der Szenarienkonstruktion) bestehen.

Ja/Nein-Entscheidungen beim FEP-Screening sind wegen der Zeitabhängigkeit der betrachteten Probleme nicht in jedem Fall angemessen. Eine stochastische Form der Szenarienanalyse (vergleichbar mit probabilistischen Konsequenzenanalysen) ist denkbar. Jedoch ist dabei das Problem der Ableitung von Eintrittswahrscheinlichkeiten zu berücksichtigen. Die Frage der (im Wortsinn nicht zu erreichenden) Vollständigkeit der identifizierten Szenarien stellt sich unabhängig vom verwendeten Verfahren.

Allen betrachteten Ansätzen ist die subjektive Komponente im Entscheidungsmechanismus gemeinsam. Es handelt sich hierbei weder um eine Schwäche von Verfahren noch um ein Spezifikum der Endlagerproblematik, sondern um eine Eigenschaft, die in der Natur des menschlichen Erkenntnisprozesses begründet ist. Ansätze, die diesen Faktor durch einen Formalismus verschleiern, sind kritisch zu bewerten. Hilfreich und notwendig sind Formalismen dagegen bei der (objektiven) Dokumentation subjektiver Entscheidungen, wobei größtmögliche Transparenz und Nachvollziehbarkeit anzustreben ist. In dieser Hinsicht erscheint der

FANFARE-Formalismus vielversprechend. Er soll deshalb bei einer Fortsetzung der Arbeit einer eingehenderen Betrachtung unterzogen werden.

6 Zukünftige menschliche Handlungen (*Future Human Actions* - FHA)

Ebenso wie natürlich verursachte Phänomene können auch menschliche Handlungen (z. B. bergbauliche Tätigkeiten) in der Zukunft zu einer Beeinträchtigung der Wirksamkeit von Endlagerbarrieren führen. Deshalb sind in Langzeitsicherheitsanalysen die Möglichkeit solcher Handlungen und die daraus resultierenden Konsequenzen zu berücksichtigen. Im Rahmen der Szenarienanalyse ist zu entscheiden, welche dieser möglichen Handlungen in welcher Form zu betrachten ist.

Andererseits ist der spekulative Gehalt von Prognosen zur Entwicklung der menschlichen Gesellschaft, zum Fortschritt der Technologie und zu zukünftigen menschlichen Verhaltensnormen und -weisen wesentlich höher als der von Vorhersagen bezüglich natürlicher Entwicklungen. Es ist deshalb sinnvoll, Szenarien, die durch zukünftige menschliche Handlungen ausgelöst werden und die in ihrer Wirkung den Kurzschluß von Barrieren nach sich ziehen, in gesonderter, aber vergleichbarer Weise wie natürlich verursachte Szenarien einzuordnen. Für die Bewertung möglicher Konsequenzen solcher Szenarien besteht noch Diskussionsbedarf.

Die Betrachtung zukünftiger menschlicher Handlungen war Arbeitsgegenstand zweier Arbeitsgruppen der OECD/NEA. Die Ergebnisse der Arbeitsgruppe „*Future Human Actions*“ (FHA) wurden in /NEA 95/ dokumentiert. Ein Bericht zur zweiten Serie zu regulatorischen Fragestellungen wurde nicht erstellt, da keine über /NEA 95/ hinausgehende Ergebnisse erzielt wurden.

Im 3. der hier beschriebenen Workshops (vgl. Anlage 1) wurde ein auf den Ergebnissen der NEA-Arbeitsgruppen fußender Konsens erarbeitet, der mit diesen in den wesentlichen Aussagen übereinstimmt, aber der deutschen Situation stärker Rechnung trägt. Diskutiert und berücksichtigt wurden ferner die Ergebnisse der NEA-

Arbeitsgruppen IPAG (/NEA 97/) und IPAG-2 (Dokumentation in Vorbereitung).
Nachfolgend sind die Ergebnisse der Diskussion dargestellt:

6.1 Definition und einleitende Bemerkungen

Zukünftige menschliche Handlungen (*Future Human Actions*, FHA) sind nach Verschuß des Endlagers stattfindende menschliche Handlungen, die das Barrierenverhalten beeinflussen können.

Diese Definition betont den lokalen Charakter wie auch die zeitliche Einordnung von FHA. Handlungen und auslösende Ereignisse, die nicht der Definition entsprechen, werden im Rahmen der üblichen Szenarienanalyse behandelt.

Der in der Vergangenheit gebräuchliche Begriff des menschlichen Eindringens (*Human Intrusion*, HI) ist für die betrachtete Problematik nicht umfassend genug, da menschliche Handlungen auch ohne ein direktes Eindringen in das Endlager eine Beeinträchtigung der Barrierenwirksamkeit bewirken können.

FHA können nicht aus der Sicherheitsanalyse ausgeschlossen werden. Das Ziel dieser Analysen ist es, zur Einschätzung des Isolationspotentials eines Endlagers beizutragen. Die Ergebnisse der Behandlung von FHA finden bei der Eignungsaussage Berücksichtigung.

Es existiert keine wissenschaftliche Grundlage für die Voraussage der Entwicklung des menschlichen Verhaltens über den in Langzeitsicherheitsanalysen zu betrachtenden Zeitrahmen. Demzufolge ist auch eine Voraussage von FHA auf gesicherter wissenschaftlicher Grundlage nicht möglich. Dies bedingt eine gesonderte Vorgehensweise bei der Konstruktion von mit FHA zusammenhängenden Szenarien.

Es ist zwischen **beabsichtigten** und **nicht beabsichtigten** FHA zu unterscheiden.

Als **beabsichtigt** werden solche FHA bezeichnet, bei denen das Vorhandensein des Endlagers und sein Gefährdungspotential bekannt sind.

Wird das Endlagersystem dagegen versehentlich durch FHA beeinflusst, weil das Wissen über das Endlager, seinen genauen Standort oder die von dem

Endlager ausgehende Gefahr verlorengegangen ist oder falsch eingeschätzt wird, gilt die FHA als **nicht beabsichtigt**.

6.2 Berücksichtigung von FHA in Sicherheitsanalysen

Zur Berücksichtigung von FHA in Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager radioaktiver Abfälle wurde im 3. der hier beschriebenen Workshops (vgl. Anlage 1) folgender Standpunkt erarbeitet:

1. In Langzeitsicherheitsanalysen sollten lediglich nicht beabsichtigte FHA berücksichtigt werden. Für die Konsequenzen aus beabsichtigten FHA ist der sie auslösende Personenkreis verantwortlich.
2. Zur Berücksichtigung von FHA sollte eine begrenzte Auswahl **sinnvoller** Szenarien **postuliert** werden. Basis hierfür sind der heutige technische Entwicklungsstand und die heutigen Lebensgewohnheiten der Menschen. Die postulierten Szenarien werden i. d. R. standortspezifisch sein. Ihre Erstellung korrespondiert mit der in /NEA 97/ erwähnten Notwendigkeit der Erstellung von „*stylised presentations*“. Eine Zuordnung von Eintrittswahrscheinlichkeiten zu einzelnen FHA-Szenarien ist nicht möglich. Die Kriterien zur Auswahl der FHA-Szenarien sind unter Einbeziehung von Antragstellern, Gutachtern und Genehmigungsbehörden zu diskutieren.
3. Es kann vorausgesetzt werden, daß die Dokumentation über die Existenz des Endlagers in Zusammenhang mit den üblichen Genehmigungsverfahren für Bauten, Bohrungen etc. nicht beabsichtigte FHA für einige 100 Jahre ausschließt.

6.3 Einordnung in Langzeitsicherheitsanalysen

Wegen des stark spekulativen Charakters von zukünftige menschliche Verhaltensweisen betreffenden Voraussagen können die Ergebnisse der Betrachtung von FHA-Szenarien, die in ihrer Wirkung den Kurzschluß von Barrieren nach sich ziehen, nicht in der gleichen Weise wie die anderer Konsequenzenanalysen verwendet und an den üblichen Sicherheitsindikatoren gemessen werden. Vielmehr haben sie orientierenden Charakter bei der Demonstration des Isolationspotentials eines Endlagers.

Zur Verdeutlichung der mit zukünftigen menschlichen Handlungen verbundenen Möglichkeit der Beeinträchtigung von Barrierenfunktionen einerseits und zur Demonstration des Isolationspotentials eines Endlagers andererseits sind FHA-Szenarien zu **postulieren**, ohne diesen Szenarien Eintrittswahrscheinlichkeiten zuzuordnen. Diese Szenarien sind einer Konsequenzenanalyse zu unterziehen.

Es ist anzustreben, diese Vorgehensweise ebenso wie die Bewertung der aus FHA-Szenarien resultierenden Konsequenzen zum Gegenstand entsprechender Regeln und Richtlinien zu machen.

7 Zusammenfassung

Die Durchführung von Szenarienanalysen ist ein entscheidender Bestandteil des Nachweises der Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle. Zur Diskussion zu diesem Thema im nationalen Rahmen auf der Basis bisheriger Arbeiten einzelner Institutionen und unter Berücksichtigung der internationalen Entwicklung wurde eine Reihe von Workshops mit Vertretern von in der Endlagerung engagierten Institutionen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Workshops werden im vorliegenden Bericht dargestellt.

Es wurden die Problemkreise der **Terminologie**, des **Vergleichs von Methoden** der Szenarienanalyse, der **Vollständigkeit** der identifizierten Szenarien, Fragestellungen der **Vertrauensbildung und Akzeptanz**, der **Einordnung und Abgrenzung** von Szenarienanalysen im Gesamtsystem von Langzeitsicherheitsanalysen sowie der **Wahl von Ausschlußkriterien** für Szenarien oder einzelne FEPs als wesentlich zur Bildung eines gemeinsamen Standpunktes identifiziert.

Von den genannten Themen sind Probleme der Terminologie, der Einordnung und Abgrenzung von Szenarienanalysen und des Vergleichs von Methoden sowie die Vorgehensweise bei der Betrachtung von Konsequenzen aus zukünftigen menschlichen Handlungen Gegenstände des vorliegenden Berichts. Die Frage nach der Vollständigkeit der identifizierten Szenarien, Fragestellungen der Vertrauensbildung und Akzeptanz sowie der Wahl von Ausschlußkriterien für Szenarien oder einzelne FEPs sollten in weiteren Veranstaltungen diskutiert werden.

Ausgehend von einer Verständigung zur Terminologie (Abschnitt 2.3) wurde festgestellt, daß die Einordnung der Szenarienanalyse wie auch die Abgrenzung einzelner Szenarien voneinander nicht a priori postuliert werden können, sondern stark von den verwendeten Methoden und Modellen in der Szenarien- wie auch in der Konsequenzenanalyse abhängen.

Ein Vergleich von Methoden zur Szenarienanalyse, die in verschiedenen nationalen Programmen zum Einsatz kamen oder kommen, ergibt grundlegende Gemeinsamkeiten hinsichtlich der Zusammenstellung und Auswahl einleitender bzw. auslösender Phänomene (meist: „FEPs“), ihrer Kombination zu Szenarien und deren Gruppierung und Einordnung. Hierbei ist in jedem Fall eine Anzahl subjektiver Entscheidungen zu treffen. Dieser Umstand ist kein Spezifikum der Langzeitsicherheitsanalyse oder der Endlagerproblematik. Vielmehr basiert jeder menschliche Erkenntnis- und Entscheidungsprozeß auf solchen subjektiven Faktoren.

Unterschiede gibt es insbesondere im gedanklichen Ausgangspunkt für die Zusammenstellung der betrachteten Phänomene sowie bezüglich des Ausmaßes der Formalisierung des Prozesses der Analyse. Letzteres führt wiederum zu Unterschieden bei der Dokumentation, Verständlichkeit und Nachvollziehbarkeit der Analyse und kann somit auch Auswirkungen auf die Akzeptanz haben.

Generell sind stärker formalisierte Analysen besser dokumentierbar und somit im Sinne der Qualitätssicherung auch besser nachvollziehbar. Andererseits besteht jedoch die Gefahr eines Akzeptanzverlustes, da die entstehenden, häufig sehr komplizierten Dokumente für Außenstehende u.U. kaum noch verständlich sind. Außerdem besteht die Gefahr, daß der zugrundeliegende subjektive Entscheidungsmechanismus durch Formalismen verschleiert wird.

Zukünftige menschliche Handlungen (FHA) können Szenarien auslösen, die die Barrierenwirksamkeit eines Endlagers beeinträchtigen. Sie sind deshalb im Rahmen einer Langzeitsicherheitsanalyse zu berücksichtigen. Wegen des spekulativen Charakters diesbezüglicher Prognosen sollten lediglich sinnvolle postulierte FHA-Szenarien in die Betrachtung einbezogen werden. Es sollten nur nicht beabsichtigte FHA berücksichtigt werden, wobei der heutige technologische Entwicklungsstand zugrundezulegen ist. Es kann vorausgesetzt werden, daß die übliche Dokumentation

über die Existenz eines Endlagers nicht beabsichtigte FHA für einige 100 Jahre ausschließt.

Zur Weiterentwicklung der Methodik der Szenarienanalyse in Deutschland und eines gemeinsamen Verständnisses hierzu ist eine Fortsetzung der hier dargestellten Arbeiten anzustreben. Die Themen hierfür ergeben sich entweder unmittelbar aus in Abschnitt 2.2 definierten Fragestellungen oder aber als Konsequenz der im vorliegenden Bericht beschriebenen Ergebnisse:

1. Es sind Möglichkeiten für eine nachvollziehbare Dokumentation des Mechanismus der Szenarienanalyse und seiner Ergebnisse auch für Fachinstitutionen und Außenstehende (Genehmigungsbehörde, Öffentlichkeit) zu untersuchen. Zur Verbesserung der Akzeptanz für die Vorgehensweise bei der Szenarienanalyse ist die Präsentation ihrer Ergebnisse weiterzuentwickeln. Die von deutschen Organisationen bisher verwendeten Methoden sind weniger stark formalisiert und weniger an einer nachvollziehbaren Dokumentation des Entscheidungsprozesses orientiert als die einiger ausländischer (z. B. schwedischer, britischer) Firmen und Behörden. Eine intensivere Auseinandersetzung mit einem dieser Verfahren (z. B. dem auf dem britischen FANFARE-Programm basierenden Verfahren), eventuell anhand eines konkreten Beispiels, würde das Verständnis für die Unterschiede in den Verfahren und deren Auswirkungen verbessern und sich vorteilhaft auf die Weiterentwicklung der eigenen Methoden auswirken.
2. Das Vertrauen in Szenarienanalysen hängt eng mit der Vorstellung zusammen, daß die erzeugten Szenarien „vollständig“ zu sein haben. Es stellt sich die Frage, inwieweit eine solche „Vollständigkeit“ anzustreben und erreichbar ist und wie sie ggf. demonstriert werden kann. Es besteht ein enger Zusammenhang zu der Gestaltung der gesetzlichen Vorgaben für Genehmigungsverfahren.
3. Ein weiterer Arbeitsgegenstand soll die Fragestellung der Ausschlußkriterien für FEPs und für Szenarien sein. Auch hier besteht ein enger Zusammenhang zu Fragen der Regeln und Richtlinien in Genehmigungsverfahren.
4. Im Zusammenhang mit FHA-Szenarien ist zu klären, wie und durch wen die Auswahl der zu betrachtenden Szenarien zu erfolgen hat und wie eine Akzeptanz der gewählten Vorgehensweise erreicht werden kann.

Literaturverzeichnis

- /BAR 91/ Barnard, R. W. et al.: TSPA 1991: An Initial Total-System Performance Assessment for Yucca Mountain. SAN91-2795, SANDIA, Albuquerque, Livermore 1991
- /BIL 98/ Billington, D.; Kelly, M.: The Directed Diagram Approach to FEP Analysis, Scenario Analysis and Conceptual Model Development. Draft, AEA Technology, 1998
- /BON 90/ Bonano, E. J.; Apostolakis, G. E.: Theoretical foundations and practical issues in uncertainty analysis for performance assessment in radioactive waste disposal facilities. OECD NEA PSAG User Group, Methods for the treatment of different types of uncertainty. PSAC/DOC (90)11, Madrid, 1990 pp. 105-160
- /BON 94/ Bonano, E. J.; Baca, R. G.: REVIEW OF SCENARIO SELECTION APPROACHES FOR PERFORMANCE ASSESSMENT OF HIGH-LEVEL WASTE REPOSITORIES AND RELATED ISSUES. CNW 94-02. Center for Nuclear Waste Regulatory Analyses, San Antonio, Texas, 1994
- /CHA 95/ Chapman, N. A. et al.: Systems Analysis, Scenario Construction and Consequence Analysis Definition for SITE-94. SKI Report 95:26. Stockholm 1995.
- /EC 88/ Cadelli, N.; Cottone, G.; Orliwski, S.; Bertozzi, G.; Girardi, F.; Saltelli, A. (ed.): PAGIS. Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste. Summary. EC, EUR 11775 EN, Luxembourg, 1988.
- /EC 91/ Hirsekorn, R.-P.; Nies, A.; Rausch, H.; Storck, R.: Performance Assessment of Confinements for medium-level and α -contaminated Waste (PACOMA Project). Rock Salt Option. Final Report. EC, EUR 16634 EN, Luxembourg, 1991.

- /EC 97a/ Gomit, J. M.; Marivoet, J.; Raimbault, P.; Recreo, F.: **E**valuation of **E**lements **R**esponsible for the effective **E**ngaged dose rates associated with the final **S**Torage of radioactive waste: EVEREST project. Volume 1: Common aspects of the study. Final report. EC, EUR 17449/1 EN, Luxembourg, 1997.
- /EC 97b/ Becker, A.; H. Fischer; E. Hofer; M. Kloos; B. Krzykacz; K.-H. Martens; K.-J. Röhlig: **E**valuation of **E**lements **R**esponsible for the effective **E**ngaged dose rates associated with the final **S**Torage of radioactive waste: EVEREST project, Volume 3a: Salt Formation, site in Germany. EC, EUR 17449/3a EN, Luxembourg, 1997.
- /EC 97c/ Boulton, G.; Curle, F. (ed.): Simulation of the effects of long-term climatic change on groundwater flow and the safety on geological disposal sites. Final report. EUR 17793 EN, EC, Luxembourg, 1997.
- /IAEA 93/ IAEA, Radioactive Waste Management Glossary. ISBN 92-0-103493-8, Wien 1993
- /NEA 92/ Systematic Approaches to Scenario Development. A report of the NEA Working Group on the Identification and Selection of Scenarios for Performance Assessment of Radioactive Waste Disposal. NEA, OECD, Paris 1992
- /NEA 95/ Future Human Actions at Disposal Sites. A report of the NEA Working Group on Assessment of Future Human Actions at Radioactive Waste Disposal Sites. NEA, OECD, Paris 1995
- /NEA 97/ Working Group on Integrated performance Assessments of Deep Repositories (IPAG): Lessons learnt from ten Performance Assessment Studies. NEA, OECD, Paris, 1997

- /SAG 93/ Sagar, B.; Janetzke, R. W.: TOTAL-SYSTEM PERFORMANCE ASSESSMENT (TPA). COMPUTER CODE: DESCRIPTION OF EXECUTIVE MODULE, VERSION 2.0. Iterative Performance Assessment, Phase 2. CNW 93-17. Center for Nuclear Waste Regulatory Analyses, San Antonio, Texas, 1993
- /SKI 97/ SKI SITE-94. Deep Repository Performance Assessment Project. Summary. SKI Report 97:5. Stockholm 1997
- /SNL 95/ Rechard, R. P.: An Introduction to the mechanics of Performance Assessment Using Examples of Calculations Done for the Waste Isolation pilot Plant Between 1990 and 1992. SAND93-1378. October 1995
- /SUM 92/ Sumerling, T. J. (ed.): Dry Run 3. A Trial Assessment of Underground Disposal of Radioactive Wastes Based on Probabilistic Risk Analysis. Overview. DoE/HMIP/RR/92.039, Henley-on-Thames, 1992
- /ZIM 92/ Zimmerman, D. A.; Bonano, E. J.; Davies, P. A.; Harlen, C. P.; Chu My, P.: Peer Review of the UK DoE Dry Run 3 Exercise: A Trial Assessment of Repositories for Nuclear Waste at Harwell. SNL, Albuquerque, N. M., 1992

Abkürzungsverzeichnis

AMF	Assessment Model Flowchart (vgl. Anlage 4)
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BGMR	Bureau de Recherches Géologiques Minières (Frankreich)
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMU	Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
CNWRA	Center for Nuclear Waste Regulatory Analysis (USA)
DBE	Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern
DFD	Deutsch-Französisches Direktorat
DOE/HMIP	U.K. Department of the Environment, Her Majesty's Inspectorate of Pollution
EC	European Commission
ECN	Energieonderzoek Centrum Nederland
EFEP	external FEP (s.d.)
EU	Europäische Union
EVEREST	EValuation of Elements Responsible for the effective Engaged dose rates associated with the final STorage of radioactive waste (vgl. /CEC 97a, b/)
FANFARE	FEP Analysis for Application to Risk Evaluation

FEP	Features, Events, and Processes
FFSM	Far Field State Model (vgl. Anlage 6)
FHA	Future Human Action(s)
FZK	Forschungszentrum Karlsruhe
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH
GSM	Geological Simulation Model (vgl. Anlage 6)
HI	Human Intrusion
IAEA	International Atomic Energy Agency
IIE	Independent Initiating Event (vgl. Anlage 3)
IL	Importance Level (vgl. Anlage 4)
INE	Institut für Nukleare Entsorgung des FZK (s.d.)
IPAG	Integrated performance Assessments of Deep Repositories (vgl. /NEA 97/)
NEA	Nuclear Energy Agency der OECD (s.d.)
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PA	Performance Assessment
PACOMA	Performance Assessment of Confinements for medium-level and α -contaminated Waste (vgl. /CEC 91/)
PAGIS	Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste (vgl. /CEC 87/)

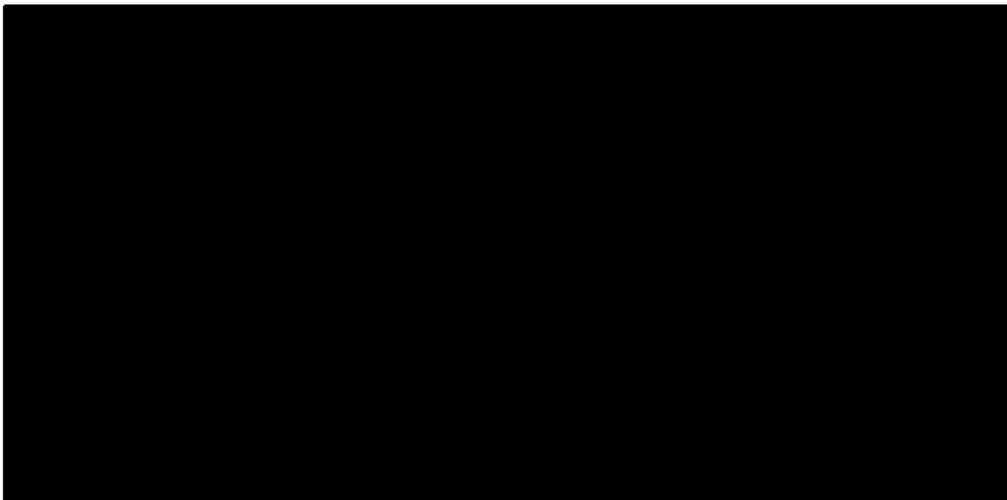
PID	Process Influence Diagram (vgl. Anlage 4)
PNL	Pacific Northwest Laboratories (USA)
PROSA	Probabilistic Safety Assessment
SKI	Statens Kärnkraftinspektion (Schweden)
SNL	Sandia National Laboratories (USA)
TMM	Transport Mechanism Methodology (vgl. Anlage 2)
TPA	Total Performance Assessment (vgl. Anlage 6)
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant (USA)

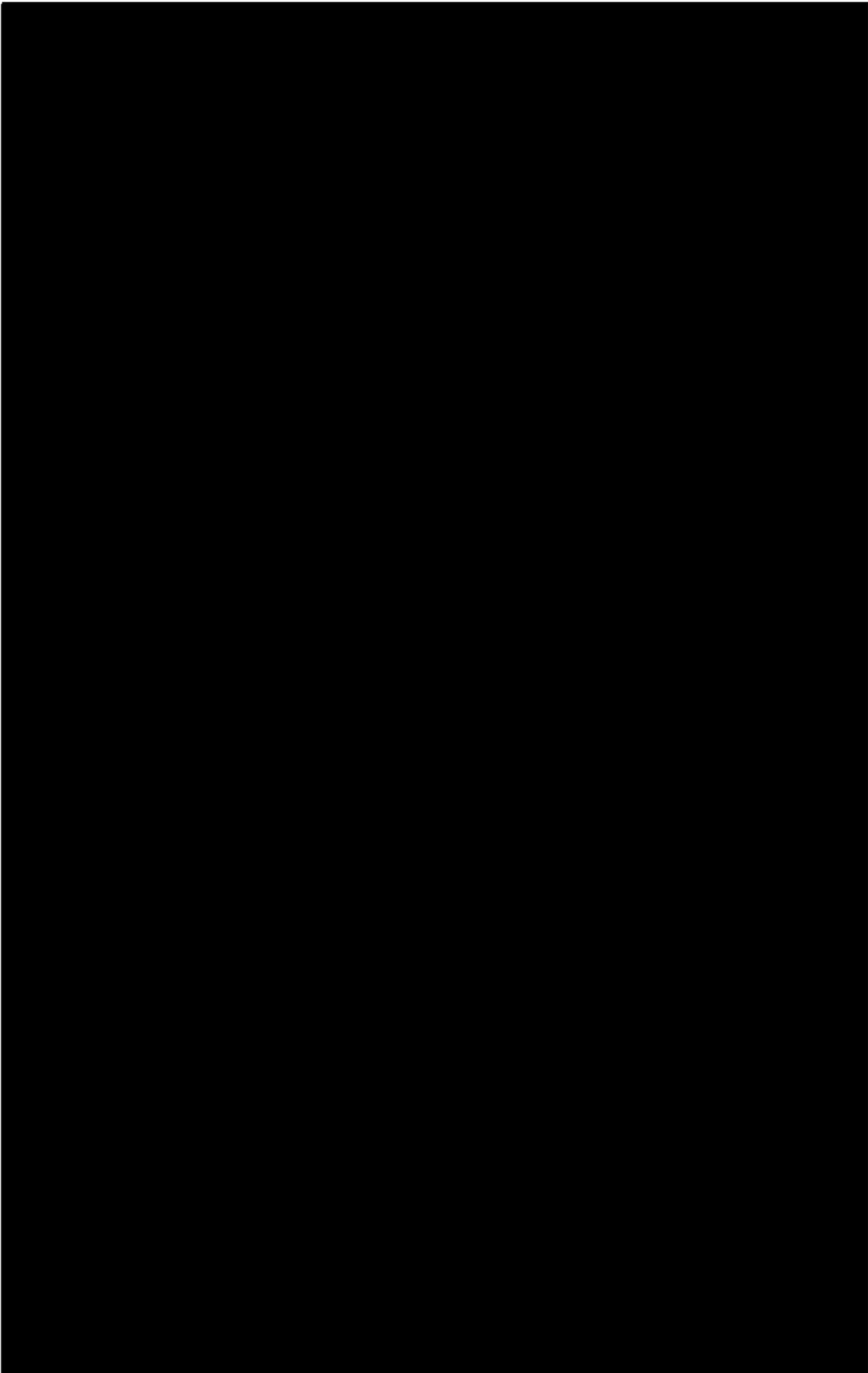
Anlage 1: Übersicht über die Workshops, ihre Themen und Teilnehmer

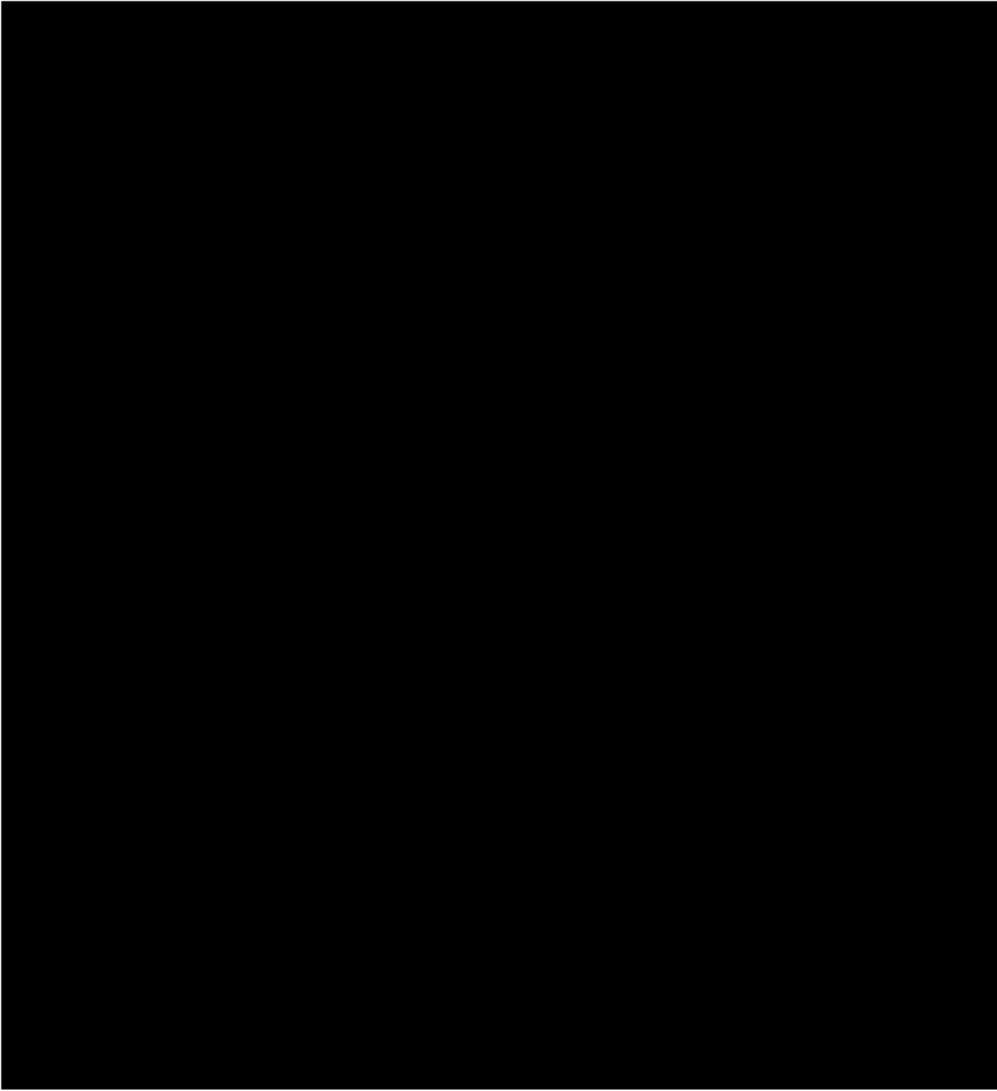
Workshops:

1. Zur Terminologie und zur Identifizierung von Fragestellungen
GRS Köln
6. November 1997
2. Vergleich von Methoden
GRS Köln
12. März 1998
3. Zukünftige menschliche Handlungen
GRS Köln
18./19. Mai 1998
4. Schlußfolgerungen und Abschlußbericht
GRS Köln
Oktober 1998

Teilnehmer:







Anlage 2. [REDACTED]: Das GRS-Szenarien-Analyseverfahren TMM (Transport-Mechanismus-Methode)

Der Ausgangspunkt der **T.M.M.**-Methode ist:

Die Biosphäre wird nur dann von einem Endlager beeinflusst, wenn sich der Abstand der Nuklide zur Biosphäre verringert.

Jede Ursache, die zur Reduzierung dieses Abstandes führt, wird Transport-Mechanismus genannt.

Die Definition eines Szenarios im Rahmen von **T.M.M.** ist wie folgt:

Ein Szenario, verursacht durch ein Ereignis oder Kette von Ereignissen, repräsentiert eine Kombination eines Transport-Mechanismus, induziert durch das Ereignis bzw. durch die Ereigniskette mit den Einflußgrößen (FEP's), die das Potential einer radiologischen Freisetzung in die Biosphäre hat.

Auswahl der Szenarien

Die Auswahl der Szenarien für die Konsequenzen-Analyse erfolgt in einem Mehrschrittverfahren:

Im ersten Schritt erfolgt die Erstellung einer vollständigen Liste aller relevanten Merkmale, Ereignisse und Prozesse (FEPs), die die sichere Einlagerung des radioaktiven Abfalles im Endlager beeinflussen können.

Im zweiten Schritt werden aus dieser Liste der FEPs die Ereignisse und die zugehörigen Transportmechanismen ausgewählt, die in dem zu untersuchendem Endlagersystem einen Nuklidtransport verursachen können.

Im dritten Schritt werden die Ereignisse und die zugehörigen Transportmechanismen, die einen vernachlässigbaren Einfluß auf die Nuklidfreisetzung oder eine sehr kleine Eintrittswahrscheinlichkeit haben, aus der Liste der Einleitungsereignisse gestrichen.

Im vierten Schritt werden die zu jedem Einleitungsereignis und den zugehörigen Transportmechanismen gehörenden FEPs, die den Nuklidtransport von den Behältern in die Biosphäre beeinflussen können, ausgewählt.

Im fünften Schritt werden die repräsentativen Szenarien gebildet. Jene Szenarien, die gleichzeitig wirksam sind und einen signifikanten Beitrag zur Freisetzung der Nuklide in die Biosphäre liefern, werden kombiniert zu einem repräsentativen Szenario.

Entsprechend der Eintrittswahrscheinlichkeit des einleitenden Ereignisses werden die zugehörigen Szenarien unterteilt in „Normal evolution“ und „altered evolution“ Szenarios.

Anlage 3. [REDACTED]: Das französische Szenarien-Auswahlverfahren „Independent Initiating Event“ (IIE)

Das Auswahlverfahren IIE „*Independent Initiating Event*“, angewendet von der ANDRA und IPSN, ist ein deterministisches Verfahren, das auf der Identifizierung von einleitenden Ereignissen, die das Endlagersystem beeinflussen können, beruht.

Die Szenarienauswahl erfolgt in vier Schritten:

1. Im ersten Schritt wird eine vollständige Liste von einleitenden und unabhängigen Ereignissen, die das Endlager beeinflussen können, erstellt.
Diese Ereignisse können vom Endlager selbst, von Naturphänomenen außerhalb des Endlagers oder infolge von menschlichen Aktivitäten herrühren.
2. Im zweiten Schritt werden die von den Einleitungsereignissen induzierten Ereignisse ausgewählt und nach ihren Eintrittswahrscheinlichkeiten geordnet.
Ereignisse mit zu kleinen Eintrittswahrscheinlichkeiten oder Konsequenzen werden aus der Liste eliminiert.
3. Im dritten Schritt werden Szenarien gebildet, beginnend mit einem Einleitungsereignis oder eine Kombination von verschiedenen Einleitungsereignissen, wenn die resultierende Wahrscheinlichkeit hinreichend groß ist.
4. Im vierten Schritt werden die Szenarien ausgewählt und Familien von Szenarien definiert.

Nachfolgend werden einhüllende Szenarien für die jeweilige Familie von Szenarien identifiziert. Das einhüllende Szenario entspricht dem Szenario der Familie mit den größten Konsequenzen.

Im Folgenden wird eine Erläuterung zu den einzelnen Schritten gegeben.

Die im ersten Schritt durchzuführende Erstellung einer Liste von unabhängigen einleitenden Ereignissen basiert auf „*Basic Safety rule for the Deep Geological*

Disposal of Long-Life Nuclear Waste (BSR n° III-2-f, *Ministry of Industry and Foreign Trade of France*, 1991)" und enthält alle identifizierten relevanten Einleitungsereignisse.

Diese Einleitungsereignisse können in zwei Klassen eingeteilt werden:

- Unabhängige Einleitungsereignisse natürlichen Ursprungs
- Unabhängige Einleitungsereignisse von Menschen verursacht

Als unabhängige Einleitungsereignisse natürlichen Ursprungs werden folgende Phänomene identifiziert:

1. Variation der Erdbahnparameter

- a) Induzierte Ereignisse im globalen Maßstab:
 - Variation der Ausdehnung der Eisbedeckung
 - Variation des Meeresspiegels
 - Temperatur und Niederschlagsänderung
 - Vegetationsänderung
- b) Induzierte Ereignisse im lokalen Maßstab
 - Vereisung am Standort
 - Permatrost
 - Änderung der Erosionsrate
 - hydraulische Änderungen
 - Änderung der Biosphäre

2. Tektonik

Induced events:

- Senkungen, Aufstieg
- Erdbeben
- Vulkanaktivität

3. Diapirismus

4. Meteoriteneinschlag

Als von Menschen verursachte unabhängige Einleitungsereignisse wurden die folgenden Ereignisse ausgewählt:

- 1 Nicht detektierte Merkmale
 - 1.1 Nicht detektierte Verwerfungen
 - 1.2 Nicht detektierte Laugeneinschlüsse
 - 1.3 Nicht detektierte Heterogenitäten (Sandlinsen, Anhydritadern)
- 2 Abschlußdefekte
 - 2.1 Aufgabe eines unverschlossenen Endlagers
 - 2.2 Versagen der Verschlüsse von Strecken und Schächten
 - 2.3 Behälterversagen
- 3 Vom Menschen verursachte Klimaänderung (Treibhaus-Effekt)
- 4 Krieg
- 5 Unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in ein Endlager
 - 5.1 Erkundungsbohrungen
 - 5.2 Förderbohrungen
 - 5.3 Bergbau
 - 5.4 Bau einer Kaverne zur Salzgewinnung
 - 5.5 Aufgabe einer Kaverne in Salz
 - 5.6 Geothermische Energieerzeugung

6 Absichtliches menschliches Eindringen in ein Endlager

6.1 Archäologische Erkundung

6.2 Sabotage

Im 2. Schritt erfolgt die Auswahl der induzierten Ereignisse.

Es werden die Ereignisse aus der Liste gestrichen, die eine zu kleine Eintrittswahrscheinlichkeit besitzen oder für das Wirtsgestein irrelevant bzw. die Konsequenzen aus diesen Ereignissen zu gering sind.

Zu diesen Ereignissen zählen:

- Meteoriteneinschlag
- Diapirismus
- Vulkanaktivität
- Sabotage
- Krieg
- Geothermische Energieproduktion
- von Menschen induzierte Klimaänderung
- Archäologische Erkundung
- Bergbau

Mit den in der Liste verbleibenden einleitenden und unabhängigen Ereignissen werden im dritten Schritt Szenarien gebildet.

Die Einleitungsereignisse natürlichen Ursprungs werden zu einem generischen **Evolutions-Szenario** zusammengefaßt.

Im vierten Schritt werden die **Szenarien-Familien** gebildet, indem die Szenarien in zwei Familien

- **Normal Evolution-Szenario** mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit nahe bei Eins und
- **Altered Evolution-Szenarien** mit einer sehr kleinen Eintrittswahrscheinlichkeit eingeteilt werden.

Die „**Altered-Evolution-Szenarien**“ werden weiter unterteilt in Szenarien natürlichen Ursprungs und menschlichen Ursprungs.

Das **einhüllende Szenario** einer jeden **Familie** ist das Szenario, das die größte Konsequenz aller Szenarien dieser Familie verursacht.

Anlage 4. [REDACTED]: Die von der SKI im Projekt SITE-94 verwendete Methodik

Von der schwedischen Kernkraftbehörde SKI wurde im Rahmen des Projekts SITE-94 eine geschlossene, wenn auch nicht vollständige Langzeitsicherheitsanalyse für ein hypothetisches Endlager auf der Basis von Daten vom Standort Äspö durchgeführt. In der hierzu durchgeführten Szenarienanalyse (/CHA 95/) wird zunächst zwischen internen und externen FEPs bezüglich des betrachteten Systems unterschieden, wobei letztere auf die Randbedingungen der Modelle einwirken. Da die Systemgrenzen im vorliegenden Fall sehr weit gewählt wurden, handelt es sich bei den externen FEPs („EFEPs“) i. allg. um das Klima betreffende Veränderungen.

Das Zusammenwirken der FEPs wird in sogenannten „*Process Influence Diagrams*“ (PIDs) dargestellt. PIDs sind Datenbasen zur Erfassung der Interaktion von FEPs und ihre Auswirkung auf die Zustandsgrößen des Systems. Es erfolgt eine Visualisierung mit die einzelnen FEPs repräsentierenden Boxen und verbindenden Linien zur Darstellung von Einflüssen (vgl. Abb. A4.1). Den einzelnen Einflüssen (Linien) wurden unterschiedliche „*Importance levels*“ (IL) zugeordnet. Die Zuordnung richtete sich nach dem Verlust an Vertrauen in die Analyse, wenn der jeweilige Einfluß nicht betrachtet würde. Die PIDs bilden die Basis für die Konstruktion von *Assessment Model Flowcharts* (AMF) als methodische Grundlage für die Konsequenzenanalyse.

Zunächst wurde ein Referenzfall definiert, für den keinerlei EFEPs angenommen wurden (d.h. stationäre Randbedingungen). Dieser bildete die Basis für ein zentrales Szenario, dem die prognostizierte Klimaentwicklung (Eiszeiten) zugrundegelegt wurde. Nach SKI-Angaben wurde darüber hinaus eine abdeckende Szenarienanalyse durchgeführt, in der Konsequenzenanalyse jedoch nur Referenzfall und zentrales Szenario betrachtet.

Anlage 5. [REDACTED]: Die ECN-Methode der Szenarientwicklung

Die Methode der Szenarientwicklung des Niederländischen Energieforschungszentrums ECN wurde für das niederländische Projekt PROSA (*Probabilistic Safety Assessment*) entwickelt und dort sowie in dem EU-Projekt EVEREST angewendet.

Die Methode basiert darauf, daß ein Endlager ein Multibarrierensystem darstellt, dessen Entwicklung durch den jeweiligen Zustand der einzelnen Barrieren, z. B. Abfallkontainer, Salzstock, Deckgebirge und Biosphäre, charakterisiert ist. Für jede der Barrieren werden Eigenschaften, Ereignissen und Prozesse (*Features, Events, Processes*) ermittelt, welche die Integrität einer Barriere beeinflussen können. Diese sogenannten primären FEPs oder Kombinationen mehrerer primärer FEPs definieren ein Szenario.

Für jede Barriere lassen sich eine weitere Gruppe von FEPs ermitteln, die sogenannten sekundären FEPs, welche den Transport von Schadstoffen beeinflussen oder Randbedingungen für den Schadstofftransports verändern.

Die ECN-Methode stellt eine Vorgehensweise dar, zugleich FEPs zu identifizieren, welche die Szenarien definieren, und Prozessen zu finden, die in einer Konsequenzanalyse betrachtet werden müssen. Jeder FEP wird folglich dahingehend bewertet, ob er für die Szenarientwicklung oder eine Konsequenzanalyse im konkreten Fall relevant ist oder nicht. Für alle relevanten FEPs wird festgestellt, für welche Teile des Multibarrierensystem sie von Bedeutung sind. Eine nachvollziehbare Szenarientwicklung erfordert eine umfassende und ausführliche Dokumentation der Vorgehensweise und eine Rechtfertigung aller Annahmen, die in die Bewertung einfließen.

Die vollständige Szenarianalyse wird in folgenden Schritten durchgeführt:

- Aufstellen einer Liste der FEPs, welche den Zustand einer Barriere, die Freisetzung von Schadstoffen und deren Transport beeinflussen könnten. Diese

FEPs sind nicht beschränkt auf natürliche Vorgänge, sondern beinhalten auch solche menschlicher Aktivitäten.

- Sichten der FEPs in Hinblick auf ihre Eintrittswahrscheinlichkeit und Relevanz unter Berücksichtigung standortspezifischer Gegebenheiten.
- Klassifizierung in primäre und sekundäre FEPs. Ein primärer FEP verletzt die Integrität einer oder mehrerer Barrieren des Multibarrierensystems. Ein sekundärer FEP beeinflusst den Transport der Schadstoffe. Alle relevanten sekundären FEPs werden daher in der Modellierung des Schadstofftransports berücksichtigt.
- Definition möglicher Zustände der Barrieren. Für diese Definition reicht eine einfache Aufteilung in: Barriere intakt oder nicht intakt. Hierbei wird empfohlen, eine möglichst geringe Zahl von Barrieren zu definieren, um die Anzahl der möglichen Barrierenzustände zu begrenzen.
- Bestimmung der primären FEPs für jede der Barrieren. Hierbei muß berücksichtigt werden, daß ein FEP gegebenenfalls auch mehrere Barrieren beeinflussen kann.
- Bestimmung der sekundären FEPs für jede Barriere.
- Sichtung und Bewertung der primären und der sekundären FEPs für jede Barriere. Hierbei ist es nützlich, eine Klassifizierung bezüglich der Zeitspannen vorzunehmen, in denen ein FEP wirksam sein kann.
- Ermittlung der Szenarien, die in einer weiteren Analyse betrachtet werden sollen. Dies schließt die Auswahl der Prozesse ein, die in einer Konsequenzanalyse berücksichtigt werden müssen.

Startpunkt der FEP-Analyse sind bestehende internationale FEP-Listen, z. B. aus den Datenbanken der IAEA oder der NEA. Die Sichtung und Bewertung der FEPs erfolgt in Arbeitsgruppen mit Wissenschaftlern aus unterschiedlichen Disziplinen. Nach der Bewertung der primären FEPs und der Elimination nicht relevanter FEPs können anhand der übrig gebliebenen primären FEPs Szenarien definiert werden. Für die so ermittelten Szenarien kann unter Berücksichtigung aller relevanten sekundären FEPs jeweils eine Konsequenzanalyse durchgeführt werden.

Anlage 6. XXXXXXXXXX: *Total System Simulation*

Ziel der *Total system simulation* (auch: „*Environmental system simulation*“, „*System Simulation Approach*“, „*Total-system PA*“ - zu beachten ist jedoch, daß der in /BAR 91/ verwendete Begriff „*Total-system PA*“ **kein** Verfahren der hier betrachteten Art beschreibt) ist die Modellierung des Gesamtsystems (Endlager und Umgebung, meist einschließlich der Modelle zur Konsequenzenanalyse), um die Vielzahl möglicher zukünftiger Entwicklungen in **einem** Modell zu erfassen. Sie kommt insbesondere in Ländern zum Einsatz, deren Regelwerk von einem Risikokriterium ausgeht, was eine geschlossene Bewertung „aller“ Szenarien unter Berücksichtigung ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit wünschenswert macht. Es wird argumentiert,

- daß die Entwicklung von Wissenschaft und Technik die Chance zur Prognose und quantitativen Beschreibung geologischer und klimatischer Veränderungen bietet,
- daß TSS-Verfahren Formalismen mit guten Möglichkeiten der Dokumentation bieten

und

- daß bei konventionellen (Szenarien-) Zugängen häufig eine Unterschätzung des Risikos wegen der entkoppelten Betrachtung in Wahrheit (stochastisch) abhängiger Phänomene erfolgt.

In Tabelle A6.1 sind einige Verfahren bzw. Gruppen von Verfahren zusammengestellt.

Tab. A6.1 Verfahren und Verfahrensgruppen der *Total System Simulation*

Organisation	Name	Effekte	Literatur	Anwendungen
INTERA, PNL (USA)	GSM, FFSM	Klima, Geologie, FHA (stochastisch)	/NEA 92/, /BON 94/	Hanford
BGMR (F), EC	CASTOR	Klima, Tektonik → GWTT (deterministisch)	/NEA 92/, /BON 94/	Pariser Becken
UK DOE, INTERA	TIME2, TIME4 → VANDAL	Klima, Geologie (Markov) → PA (stochastisch)	/BON 90/, /NEA 92/, /SUM 92/, /BON 94/	u. a. <i>Dry Run 3</i> (Harwell)
CNWRA (USA)	TPA	Klima, Geologie, FHA → PA (stochastisch)	/NEA 92/, /SAG 93/	

Die Anwendungen von TIME4 und VANDAL im Rahmen des Projekt *Dry Run 3* (DoE/HMIP, vgl. /SUM 92/) wurde einem *peer review* durch SNL (USA) unterzogen (/ZIM 92/). Als problematisch wurden dabei

- die Ableitung von Verteilungsfunktionen für Eingangsparameter (also für Szenarien),
- die entscheidende Bedeutung der anfänglich getroffenen Auswahl der einzubeziehenden Phänomene (FEPs?), die eine ebenso starke Abhängigkeit von subjektiven Expertenurteilen wie bei klassischen Szenarienanalyse bewirkt,
- die Inkonsistenzen insbesondere bei Behandlung von Interaktionen zwischen Teilsystemen

und

- die Verwendung stark vereinfachter Einzellmodelle für die Konsequenzenanalyse (die z. B. bei *Dry Run 3* zu Artefakten führte)

identifiziert.

Anlage 7. [REDACTED]: Die Anwendung des Programms FANFARE (FEP Analysis for Application to Risk Evaluation, AEA Technology, UK)

FANFARE (FEP ANalysis For Application to Risk Evaluation) /BIL 98/ ist ein Werkzeug zur Analyse und Dokumentation einer Szenarienauswahl. Es wurde von AEA Technology entwickelt. FANFARE ist ein Datenbank-Programm, welches der Vereinfachung der Szenarientwicklung dient und die Entscheidungsprozesse, welche im Rahmen eines Brainstorming von Experten zur Identifikation von Szenarien führen, aufzeichnet.

Ausgangspunkt ist eine Liste von FEPs (features, events and processes), wie sie z.B. von der Nuclear Energy Agency zusammengestellt worden ist. Die einzelnen FEPs werden, ausgehend von dem unerwünschten Ereignis einer radiologischen Belastung des Menschen, in einer logischen Baumstruktur in Gruppen dargestellt. Es werden die Kombinationen und gegenseitige Beeinflussung der einzelnen FEPs behandelt, die als bedeutsam für den Langzeitsicherheitsnachweis eines Endlagers für radioaktive Abfälle angesehen werden müssen. Zu jedem FEP muß eine Entscheidung hinsichtlich der Relevanz für den jeweiligen Standort bzw. für den Kontext der Untersuchung gefällt werden, die in der Datenbank registriert wird. Werden übergeordnete FEPs als nicht relevant erkannt, so entfällt automatisch der gesamte untergeordnete Zweig. Am Rechner werden während des Brainstorming die Gesamtstruktur oder Unterstrukturen dargestellt, so daß in den Diskussionen der Überblick gewahrt bleibt. Das Ergebnis kann in Form einer Textdatei zur weiteren Verwendung z.B. in Berichten dargestellt werden. Zur Einarbeitung neuerer Erkenntnisse und zur Weiterführung der Diskussion kann die Datei nachbearbeitet werden.

FANFARE wurde von AEA Technology im Rahmen ihrer Arbeiten für den britischen Endlagerentwickler Nirex angewendet. AEA Technology und GRS haben es auch in einer gemeinsamen Studie für die Europäische Kommission zu einer Machbarkeitsstudie für ein Endlager in der Ukraine eingesetzt. FANFARE stellt eine gute Basis zur Qualitätssicherung der Szenarientwicklung dar. Der

Entscheidungsprozeß wird transparent gemacht. Die Trennlinie zwischen subjektiven Komponenten und der von Verfahren vorgegebenen Struktur ist auch für Außenstehende erkennbar.

Verteiler

Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Referat RS III 6 (B) 5 x

Bundesamt für Strahlenschutz

KT 1.1 2 x

ET-S 1 7 x

davon 2x 

ET-E 2 x

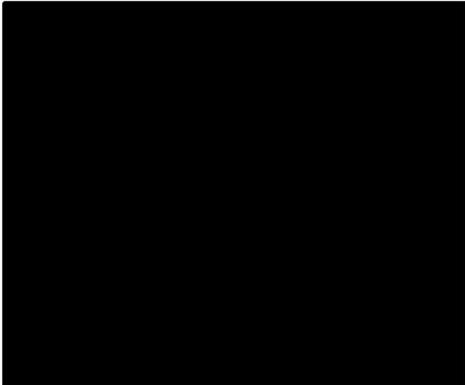
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) 1 x

Forschungszentrum Karlsruhe

 1 x

Institut für nukleare Entsorgung INE 1 x

GRS

Geschäftsführer  je 1 x

Bereichsleiter je 1 x

Projektbetreuung je 1 x

Abt. 703 1 x

Autoren je 3 x

Abt. 401 1 x

Abt. 602 1 x

Gesamtauflage: 39 x

