

# Endlagerung radioaktiver Abfälle

## Objektive Beurteilung von Endlagerstandorten durch Ermittlung von Emissionsgrenzwerten über geologische Zeiträume

### 1. Vorbemerkung

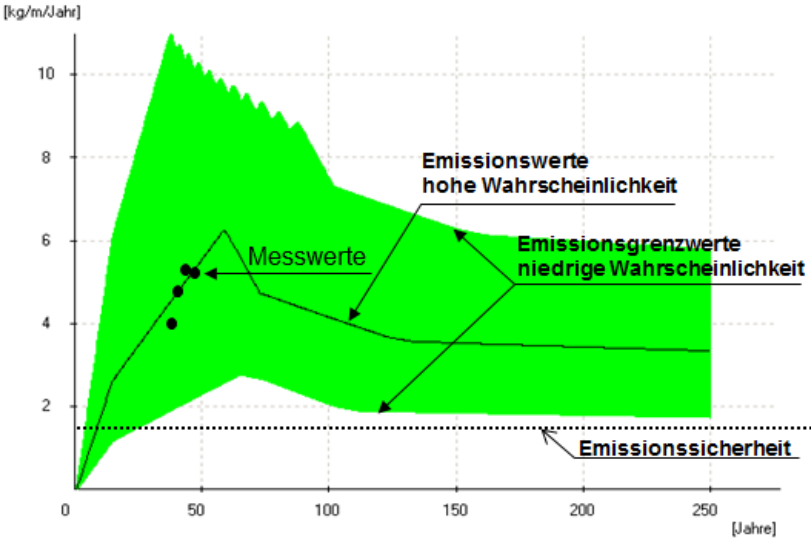
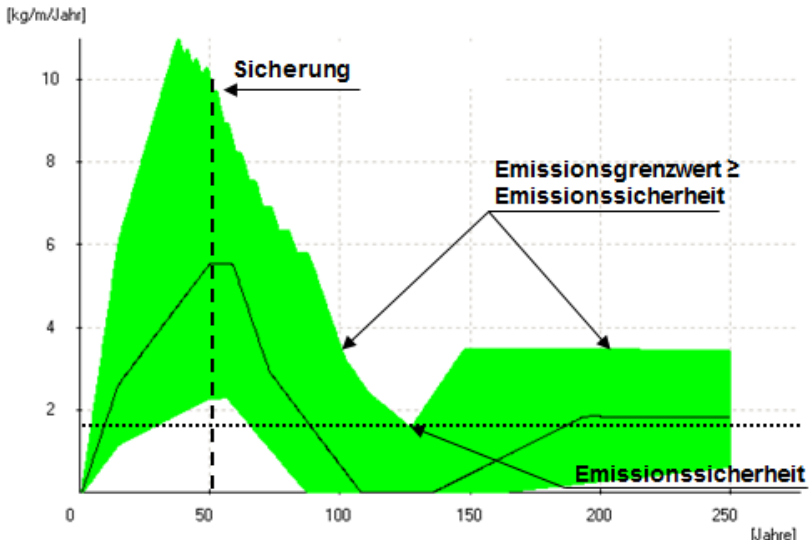
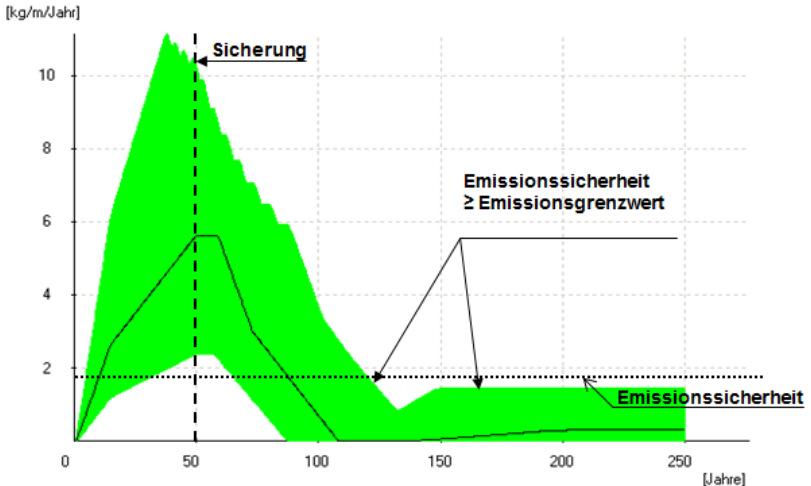
Die Grundlagen der Bemessung von Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen auf Grundlage von Emissionsgrenzwertanalysen wurden von Dr. Klemens Finsterwalder erarbeitet und bauen auf 26 Jahren Forschung und Entwicklung auf.

### 2. Grundlagen aus der Deponietechnik

Im Rahmen der Entwicklungen zur Anwendung von Emissionsgrenzwertanalysen hat die Finsterwalder Umwelttechnik (Fitec) ein Berechnungsverfahren auf naturwissenschaftlicher Grundlage entwickelt, welches Analysen über beliebige Zeiträume ermöglicht (DESi Variation / Deponie Emission Sicherheit). Der wesentliche Unterschied zu anderen Verfahren liegt darin, dass die Streuung der verwendeten Daten und ihre zeitabhängige Veränderung berücksichtigt werden. Die Ergebnisse beschreiben die Emissionen bei mittleren Verhältnissen (Emissionswerte hohe Wahrscheinlichkeit) und bei Überlagerung aller günstigen und ungünstigen möglichen Bedingungen (Emissionsgrenzwerte niedrige Wahrscheinlichkeit). Für die Bemessung von Sicherheitsmaßnahmen sind die Überlagerungsergebnisse aus den ungünstigen möglichen Bedingungen relevant, denn diese müssen die gesetzlich vorgegebene standortspezifische Emissionssicherheit (u.a. Auslöseschwellenwerte, Maßnahmenwerte) unterschreiten. Die Emissionsgrenzwertanalyse basiert auf der Berechnung des beweglichen Molekülschwarms aus der Stoffquelle, unter Berücksichtigung von Molekulargewicht, Ladungsart, Wertigkeit und Halbwertszeit. Dies bedeutet, dass sowohl chemotoxische, als auch radiotoxische Stoffe in ihrem Wanderungsverhalten, ausgehend von der Quelle in die Umgebung, in Bezug auf Menge und Zeit, untersucht werden können.

Die Anwendungen bisher betrafen Deponien oberer der Klassen II und III nach der Deponieverordnung. Die Nachweiszeiträume betragen je nach Standort und Deponiesicherung einen Zeitraum von bis zu 5.000 Jahren, um die maximalen Emissionsgrenzwerte (= Grenzzustand) zu erfassen. Fitec wendet dieses praktische Verfahren zur Bemessung von Deponiesicherungen an mit dem Ziel, diese so zu gestalten, dass sie den gesetzlichen Anforderungen zur Beendigung der Nachsorge genügen.

Mit DESi Variation kann die Deponiesicherung nach den Erfordernissen des Standortes bemessen und nach ökologischen und ökonomischen Aspekten optimiert werden (vgl. Abbildung 1 bis 3). Der erneute Anstieg der Emission für einen chemotoxischen Stoff bei den Abbildungen 2 und 3 ist durch das Versagen der technischen Barriere (Kunststoffdichtungsbahn) bedingt.

<p>Abbildung 1.                  Emissionsverhalten „Istzustand“ einer Obertagedeponie für Siedlungsabfälle ohne Deponiesicherung, dauerhafte Überschreitung der gesetzlichen Emissionssicherheit für einen bestimmten chemotoxischen Stoff für diesen Standort.</p>	
<p>Abbildung 2.                  Emissionsverhalten bei Aufbringung einer Oberflächenabdichtung nach Regelaufbau DepV - DK II, Überschreitung der gesetzlichen Emissionssicherheit für einen bestimmten chemotoxischen Stoff für diesen Standort.</p>	
<p>Abbildung 3.                  Emissionsverhalten bei Berücksichtigung einer standort-spezifischen Lösung, Einhaltung der gesetzlichen Emissionssicherheit für einen bestimmten chemotoxischen Stoff.</p>	

Emissionsgrenzwertanalysen für verschiedene Konzepte zeigen, dass in diesem spezifischen Fall mit einer Standardlösung der Abdichtungs- und Abdecksysteme nach DepV eine Beendigung der Nachsorge nicht nachweisbar ist, da für den untersuchten Stoff die behördlich festgelegte Emissionssicherheit auf Dauer für das Schutzgut Grundwasser überschritten wird. Mit einer an den Standort und die vorherrschenden Rahmenbedingungen angepassten Lösung wird die Emissionssicherheit langfristig eingehalten.

Die Grundlagen für eine Emissionsgrenzwertanalyse von Endlagern für chemotoxische Stoffe unterscheiden sich nur wenig im Hinblick auf die Bemessung der Sicherheitsmaßnahmen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle, jedoch ist wegen des sehr viel größeren Gefährdungspotentials und der Komplexität der Aufgabenstellung besondere Sorgfalt bei der Standortwahl, der Datenerhebung und der Konzeptentwicklung erforderlich.

Die Anforderungen an den Nachweis der Emissionssicherheit eines Endlagers sind hoch, weil im Unterschied zum Bauwesen die Risiken nicht mit Sicherheitsbeiwerten zu einem Gebrauchszustand bewertet werden können. Diese Schwierigkeit wird mit der für Deponien eingeführten Berücksichtigung der Streuung aller Eingabedaten gelöst.

Im nachfolgenden Kapitel werden die Anforderungen an den Dateninput für eine objektive Beurteilung von Endlagerstandorten und ihrer Sicherheit, basierend auf den langjährigen Erfahrungen der Deponietechnik, nach ingenieurtechnischen Grundsätzen aufgelistet. Auf dieser Grundlage kann der Nachweis der Eignung von Standorten und langfristigen Wirksamkeit von Sicherungsmaßnahmen durch Bemessung, basierend auf den gesetzlichen Vorgaben erfolgen. Die Vorgaben, die vom jeweiligen Konzept abhängen, müssen im Rahmen der Planung erarbeitet und mit den Genehmigungsbehörden abgestimmt werden.

### **3. Anforderungen an die Durchführung einer Sicherheitsanalyse des Endlagers**

#### **3.1 Anforderungen an die Standsicherheit**

Standsicherheit als Anforderung für ein Atomares Endlager:

- Standsicherheit bezogen auf den Einsturz. Durch DIN Normen geregelt.
- Standsicherheit bezogen auf Störungen der internen Gebirgsspannungen durch die Hohlraumherstellung. Vorgaben müssen im Rahmen der Planung erarbeitet und mit den Genehmigungsbehörden abgestimmt werden.

#### **3.2 Anforderungen an die Emissionssicherheit auf Dauer**

Emissionssicherheit als Anforderung für ein Atomares Endlager:

- Beurteilungsgrößen: Müssen vom Gesetzgeber vorgegeben werden, z.B. Schadstoffe, zugehörige Grenzwerte, Dosisgrenzwerte usw.
- Einwirkungsgrößen: Zusammensetzung, Konzentration und Mobilität bei Zutritt von Wasser aller im Endlager enthaltenen Stoffe.
- Widerstandsgrößen: Randbedingungen Standort: Art, Festigkeit, Beständigkeit chemisch, thermisch, sowie Abmessungen, Mächtigkeit und Ausdehnung des Wirtsgesteins mit geologischen Profilen, usw.; Randbedingungen, die eintreten können: z.B. Korrosion der Behälter (Castoren) z.B. nach 10.000 bis 20.000 Jahren, Anwesenheit von Wasser.
- Isolation: Zum Nachweis der Isolation ist die Vorgabe der standortspezifischen Emissionssicherheit an der Nachweisfläche erforderlich, die unter Grenz-

bedingungen, d.h. der Kombination aller möglichen Einwirkungen und Widerstände, unter Berücksichtigung der Datenstreuungen, einzuhalten ist. Eine Nullemission ist auf der Grundlage der Stofftransportgesetze nicht möglich, man kann nur die Größe der Emission durch Maßnahmen beeinflussen.

- Emissionssicherheit: Die standortspezifische Emissionssicherheit muss sich an den gesetzlich vorgegebenen Schutzziele (Isolation) orientieren.

### 3.3 Anforderungen an die Emissionssicherheit für Betrieb und Schließung

Emissionssicherheit als Anforderung für den Betrieb und die Schließung eines Atomaren Endlagers:

- Betriebsphase: Befüllung zeitlich minimieren, um in diesem Zeitabschnitt die Einwirkungen von außen zu begrenzen. Dies bedeutet besondere Anforderungen an die Logistik des Transportes der Castoren bis zum Einbau, da dieser Zeitraum bis zur Beendigung der eigentlichen Verschlussmaßnahmen die Hauptrisiken der Endlagerung birgt.
- Verschluss: muss mindestens gleichwertig zum Gesamtkonzept in Bezug auf die Emissionssicherheit sein.

## 4. Anforderungen an die Nachweisführung der Emissionssicherheit

### 4.1 Zeitraum Nachweisführung

Der Nachweiszeitraum ergibt sich aus dem Standort und den dort herrschenden Randbedingungen, den Vorgaben der Genehmigungsbehörde und dem gewählten Endlagerkonzept, unter Berücksichtigung der in den Abschnitten 3.1 bis 3.3 zusammengestellten Vorgaben. Der Zeitraum muss mindestens so lange sein, dass die Emissionsmaxima erfasst werden (siehe Beispiel Kapitel 5).

### 4.2 Berücksichtigung der Streuung aller Daten

Alle Daten sind ihrer Natur nach probabilistisch. Daher müssen die Daten unter Berücksichtigung ihrer Streuung aus Einwirkungen und Widerständen in die Berechnung einfließen. Damit sind die für eine Bemessung der Sicherheitsmaßnahmen und die für die Nachweisführung vorgeschriebene Sicherheitsanalyse berücksichtigt. Die Emissionsgrenzwerte „niedrige Wahrscheinlichkeit“ (Isolation) können mit den gesetzlichen Grenzwerten direkt verglichen werden.

### 4.3 Planung und Bemessung

Die Planung, Bemessung und Optimierung des Atomaren Endlagers ist ein Prozess, in dem die vom Gesetzgeber definierte Sicherheit in jedem Fall erreicht werden muss. Mit dem von der Fitec entwickelten Berechnungsverfahren (Emissionsgrenzwertanalyse) können unterschiedliche Konzepte der Sicherheitsmaßnahmen an unterschiedlichen Standorten direkt objektiv vergleichbar gemacht werden. Der Prozess der Optimierung bezieht auf die Gestaltung des Konzepts, dessen Bemessung und auf die Kosten, unter Einhaltung der ökologischen Zielsetzung.

Um diese Zusammenhänge zu erläutern, werden nachfolgend Emissionsgrenzwertanalysen für einen radiotoxischen Stoff durchgeführt, an Hand der Ergebnisse werden einige der angeführten Aspekte behandelt.

## 5. Beispielrechnung

### 5.1 Rahmenbedingungen

Im Rahmen einer Beispielrechnung mit DESI (Deponie Emission Sicherheit) Variation wurden folgende Randbedingungen festgesetzt:

- **Lagerbehälter** der atomaren Reststoffe sind korrodiert;
- **Feuchtigkeit** ist vorhanden;
- Umgebung **Tongestein**;
- **Stofftyp**: Rechenbeispiel Cäsium 135, Halbwertszeit 2,3 Mio. Jahre.

Für das Rechenbeispiel wurden folgende mögliche Mächtigkeiten der Tonbarriere angenommen:

- Zustand 1: 5 m,
- Zustand 2: 25 m und
- Zustand 3: 45 m.

Beim folgenden Beispiel soll gezeigt werden, wie sich die Emissionsgrenzwerte (niedrige Wahrscheinlichkeit) bei Veränderung der Barrierenmächtigkeit verändern und in welchen Zeiträumen die Maximalwerte auftreten. Die Berechnungsgrundlagen wurden frei gewählt und sind keinem Standort zugeordnet.

In den nachfolgenden Tabellen 1 und 2 sind als Ergebnis der Analysen die maximalen Emissionswerte angeführt, der Zeitpunkt des Eintritts hängt mit der Mächtigkeit der gewählten Tonschicht zusammen. Die Maximalwerte des strahlenden Materials hoher Wahrscheinlichkeit (Emissionswerte), berechnet auf der Grundlage der Mittelwerte, sind in Tabelle 1 dargestellt (bzw. schwarze Linie der Abbildung 4):

	Abstand Quelle	Strahlendes Material - Emissionsmaximum	Zeitpunkt - Emissionsmaximum
Nr.	Mächtigkeit [m] Ton	$\text{g/m}^2\cdot\text{a}$	Jahre [a]
1	5	0,2115	75.923
2	25	0,0102	1.471.077
3	45	0,00191	3.124.154

Tabelle 1: Emissionswerte hohe Wahrscheinlichkeit.

Die maximalen Emissionsgrenzwerte des strahlenden Materials (Emissionsgrenzwerte niedrige Wahrscheinlichkeit) sind in Tabelle 2 dargestellt (bzw. Hüllkurve der Abbildung 4). Die Hüllkurve ergibt sich aus den streuenden Ausgangswerten, die sich in günstigster oder ungünstigster Art überlagern.

	Abstand Quelle	Strahlendes Material – Max. Emissionsgrenzwert	Zeitpunkt - Max. Emissionsgrenzwert
Nr.	Mächtigkeit [m] Ton	g/m <sup>2</sup> ·a	Jahre [a]
1	5	1,0005	13.462
2	25	0,1418	297.230
3	45	0,0298	1.103.846

Tabelle 2: Emissionsgrenzwerte niedrige Wahrscheinlichkeit.

In der nachfolgenden Tabelle 3 ist zahlenmäßig die zeitliche Veränderung in Prozent zwischen Maxima Isolation und Emission aus den Mittelwerten der Daten dargestellt, um deutlich zu machen, dass keine feste Korrelation zwischen diesen Ergebnissen besteht. Zum weiteren kann man aus den Einzeldarstellungen der Abbildung 4 erkennen, dass die jeweiligen Maxima zu ganz unterschiedlichen Zeitpunkten auftreten.

	Abstand Quelle	Fehleinschätzung
Nr.	Mächtigkeit [m] Ton	Veränderung in %
1	5	473
2	25	1.390
3	45	1.560

Tabelle 3: Veränderung in Prozent zwischen Maxima Emissionsgrenzwert (Isolation) und Emissionswert (Emission aus den Mittelwerten).

In den nachfolgenden Graphen sind die entsprechenden Entwicklungen der Emissionen für das strahlende Material dargestellt. Die Darstellung ist möglich für beliebig lange Zeiträume, sie muss jedenfalls den maximalen Emissionsgrenzwert erfassen können. Für das gewählte Rechenbeispiel wurde ein Zeitraum von 3,5 Mio. Jahre gewählt, um bei allen drei Beispielen die maximalen Emissionsgrenzwert zu erfassen. Der Maßstab der Zeitachsen ist bei allen Graphen gleich, der Maßstab der Emissionsachse unterschiedlich.

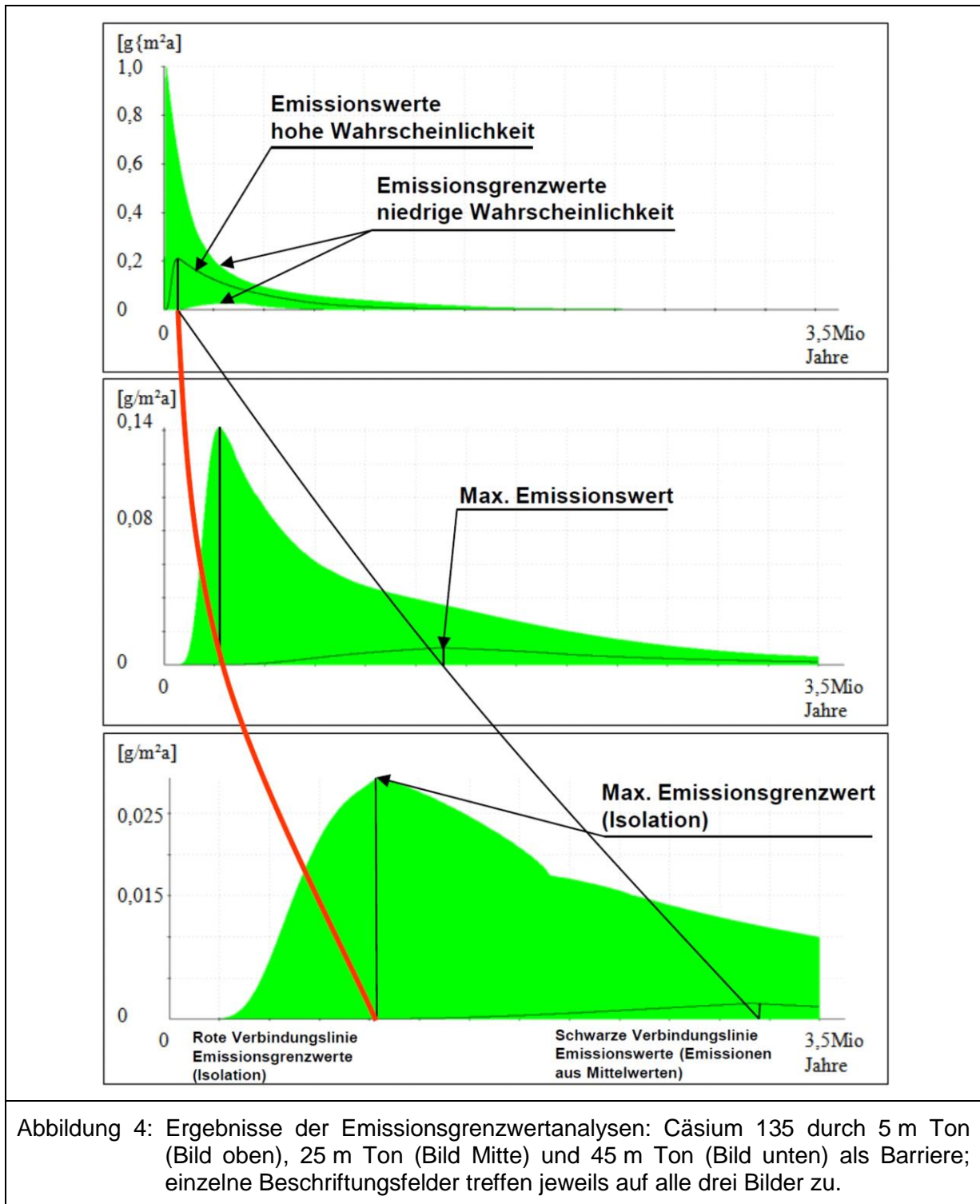


Abbildung 4: Ergebnisse der Emissionsgrenzwertanalysen: Cäsium 135 durch 5 m Ton (Bild oben), 25 m Ton (Bild Mitte) und 45 m Ton (Bild unten) als Barriere; einzelne Beschriftungsfelder treffen jeweils auf alle drei Bilder zu.

## 5.2 Interpretation

Die Berechnung der zur Isolation zugehörigen Emissionsgrenzwerte muss unter Berücksichtigung der Datenstreuungen erfolgen. Bei festen Datensätzen als Grundlage der Berechnung (Mittelwerte) erhält man keine aussagefähigen Ergebnisse im Sinne des Isolationsgedankens.

Der Zeitrahmen für die Nachweisführung ist vom Standort, vom jeweiligen Konzept und den gesetzlich vorgegebenen Kriterien (Schutzziele) abhängig (siehe Abbildungen Kapitel 5.1).

## 6. Objektive Beurteilung von Endlagerstandorten durch Ermittlung von Emissionsgrenzwerten über geologische Zeiträume

Der vorgestellte Vorschlag zur Beurteilung von Endlagern an unterschiedlichen Standorten auf einer einheitlichen Grundlage ermöglicht einen objektiven Vergleich untereinander. Damit ist eine Entscheidung auf einer wissenschaftlichen, technischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Basis möglich. Das Vorgehen kann auf dieser Grundlage wie folgt strukturiert werden:

- Vorarbeiten zu Standort und Konzeptwahl (technisch): Die Vorarbeiten können als Basis von Planungskonzepten, die standortbezogen erstellt werden, geleistet werden. Die Daten hierfür werden aus vorhandenen Unterlagen, die von Experten und Kommissionen zu Schutzziele, Standorten und Konzepten erarbeitet wurden, entnommen. Umfangreiche Untersuchungen und Versuche sind nicht erforderlich. Damit kann eine grundsätzliche Auswahl geeigneter Standorte und standortspezifischer Konzepte erfolgen.
- Standort und Konzeptwahl (technisch, logistisch): Die Standorte und Konzepte, die aus (1) als technisch geeignet erkannt wurden, werden in einem nächsten Bearbeitungsschritt eingehender untersucht, wobei nicht nur technische Aspekte bewertet werden. Die dann verbleibenden Standort(e) der engen Wahl werden detailliert, sowohl emissionstechnisch, bautechnisch und kalkulatorisch untersucht; Aspekte in Bezug auf die Konzeption, als auch den Zeitrahmen der Errichtung und der Befüllung, die Logistik während der Einlagerung, die Sicherheit im Befüllbetrieb und die Komplexität der betrieblichen Rahmenbedingungen werden dabei berücksichtigt. Umfangreiche Untersuchungen und Versuche sind am Wirtsgestein und den Baustoffen zu emissionspezifischen Parametern erforderlich.
- Auswahl der Standorte für die Endlagerung (logistisch, gesellschaftlich): Die Auswahl eines oder mehrerer Standorte werden dann auf der Basis der Ergebnisse von (2) vorgenommen. Die Kriterien für die Auswahl sind keine technischen Kriterien, diese sind bei allen Konzepten erfüllt, sondern Kriterien, die die Logistik und die Akzeptanz der zur Auswahl stehenden Standorte betreffen.
- Detailplanung, Errichtung, Betrieb und Schließung: Die Endlager an den gewählten Standorten werden unter Verwendung der vor Ort erhobenen Daten einer umfangreichen Detailplanung unterworfen. Die Ausführung wird unter einer strikten Qualitätsüberwachung der verwendeten Baustoffe und Bauverfahren durchgeführt. Dazu zählt auch die Überwachung von Veränderungen der internen Gebirgsspannung innerhalb der geologischen Formation des Wirtsgesteins durch den Bau des Atomaren Endlagers.

Der Beitrag der Fitec in der vorgestellten Projektentwicklung bezieht sich im Schwerpunkt auf die Nachweise zur Einhaltung der Isolation. Dazu wird eine Konzeptbeurteilung, im Rahmen der Tätigkeiten zu (1) durchgeführt. Dies ist notwendig, da die Ergebnisse aus den Emissionsnachweisen unmittelbar Rückwirkungen auf das jeweilige Konzept haben können.

Bei den Punkten (2) bis (4) beschränkt sich die Leistung der Fitec auf die, in diesen Planungsphasen erforderlichen Emissionsgrenzwertanalysen auf einer einheitlichen Grundlage für einen objektiven Vergleich.