

Entsorgung radioaktiver Abfälle

Kompetenzen und Leistungen



Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH

Fachliche Leitung: Klaus Fischer-Appelt, Jörg Mönig

Redaktion: Sven Dokter

Layout und Satz: Dieter Komp

Druck: GRS

Stand: August 2015

1. Überblick
2. Charakterisierung radioaktiver Abfälle
3. Transportsicherheit
4. Zwischenlagerung und Kritikalitätssicherheit
5. Wirtsgesteine und Barrierematerialien
6. Modellierung des Schadstofftransportes im Untergrund
7. Bewertung von Endlagerkonzepten und Endlagerbetrieb
8. Methoden und Werkzeuge für Langzeitsicherheitsnachweise
9. Durchführung von Langzeitsicherheitsnachweisen
10. Bewertung von Langzeitsicherheitsnachweisen
11. Methoden für den Vergleich von Endlagersystemen
12. Weiterentwicklung von Sicherheitsanforderungen



1. Überblick

Im Bereich der Entsorgung radioaktiver Abfälle decken die Kompetenzen der GRS das gesamte Spektrum relevanter wissenschaftlicher Fragestellungen und Aufgaben ab. Der thematische Schwerpunkt der Arbeiten liegt dabei auf der Endlagerung. Hier ist die GRS auf zwei Ebenen aktiv: zum einen in der **Endlagersicherheitsforschung**, zum anderen in der **gutachterlichen Unterstützung von Behörden**.

In ihrem **Endlagerforschungszentrum** führt die GRS umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durch, die alle wesentlichen wissenschaftlichen Aspekte der Endlagerung radioaktiver Abfälle abdecken. Dies beginnt bei der Erforschung der für die Sicherheit der Endlagerung grundlegenden physikalischen- und chemischen Eigenschaften der potenziellen Wirtsgesteine und der im Endlagerbergwerk eingebrachten Baustoffe und Versatzmaterialien. Ein Teil dieser Forschungsarbeiten wird im **geowissenschaftlichen Labor** am Standort Braunschweig durchgeführt. Daneben wirken Wissenschaftler der GRS im Rahmen langjähriger Kooperationen an **In-situ-Experimenten** in Untertagelaboratorien in Frankreich, Schweden und der Schweiz mit. Die Erkenntnisse aus diesen Arbeiten bilden eine wesentliche Voraussetzung für das Verständnis und die Modellierung der komplexen Prozesse, die in einem Endlager ablaufen. Als führende deutsche Institution auf diesem Gebiet entwickelt die GRS Software und Datenbanken, mit denen solche Prozesse in Simulationen über lange Zeiträume berechnet werden können.

Einen weiteren Schwerpunkt bilden Arbeiten zum **Langzeitsicherheitsnachweis**. Bevor ein Endlager errichtet werden darf, ist im Genehmigungsverfahren nachzuweisen, dass insbesondere die in den Abfällen enthaltenen Radionuklide über einen Zeitraum von rund einer Million Jahren nicht oder nur in unerheblich geringen Mengen aus dem sogenannten »einschlusswirksamen Gebirgsbereich« im Inneren des Wirtsgesteins austreten. Die GRS entwickelt Methoden und Rechenprogramme zur Erstellung bzw. Bewertung solcher Nachweise. Ihre Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erstrecken sich dabei auch auf wissenschaftliche Fragestellungen im Zusammenhang mit der **Standortsuche** bzw. einen **Vergleich von Standorten** in unterschiedlichen Wirtsgesteinen.

Die langjährige Erfahrung und die Ergebnisse dieser Forschungs- und Entwicklungsarbeiten fließen in die Arbeiten als Sachverständige ein. Die GRS wird von Behörden des Bundes und der Länder beauftragt, wenn im Rahmen der Aufsicht oder der Genehmigung technisch-wissenschaftliche Fragestellungen gutachterlich zu bewerten sind. Darüber hinaus unterstützen die GRS das Bundesumweltministerium bei der **Erarbeitung regulatorischer Grundlagen** auf nationaler Ebene und in Fachgremien internationaler Organisationen wie der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO).

Die vorliegende Broschüre bietet einen Überblick über die wesentlichen Kompetenzfelder sowie Forschungs- und Entwicklungsarbeiten und Leistungen, die die GRS als Sachverständigenorganisation für ihre Auftraggeber im In- und Ausland erbringt.

2. Charakterisierung radioaktiver Abfälle

Eine grundlegende Voraussetzung für die Entsorgung radioaktiver Abfälle ist deren Quantifizierung und Charakterisierung. Verlässliche **Daten über Menge und Beschaffenheit der zu entsorgenden Abfälle** bilden die Grundlage für die Beantwortung sicherheitsrelevanter Fragestellungen im Hinblick auf die Zwischenlagerung ebenso wie für die Entwicklung und Bewertung von Behälter- und Endlagerkonzepten. Die GRS verfügt über die notwendigen Kompetenzen, um die relevanten radiologischen und chemotoxischen Eigenschaften der unterschiedlichen radioaktiven Abfälle für die nachfolgenden Entsorgungsschritte zu charakterisieren.

Exemplarisch für die Erfahrungen der GRS auf diesem Gebiet sind ihre Arbeiten für das Bundesumweltministerium. Dazu gehört die Erfassung und Auswertung der abfallbezogenen Daten, die die Betreiber der deutschen Kernkraftwerke im Rahmen des sogenannten Entsorgungsvorsorgenachweises vorzulegen haben. Darüber hinaus unterstützt die GRS die Bundesregierung bei der Erfüllung der internationalen Verpflichtungen der Bundesrepublik Deutschland im Rahmen des »Gemeinsamen Übereinkommens über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle« sowie bei der Entwicklung des Nationalen Entsorgungsprogramms zur Umsetzung der Richtlinie 2011/70/EURATOM.



Quelle: Landessammelstelle Rheinland-Pfalz (LUWG)

3. Transportsicherheit

Der Transport radioaktiver Stoffe ist nur unter Beachtung spezieller Sicherheitsanforderungen zulässig, die weltweit auf den Transportvorschriften der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) beruhen. Nach diesen Vorschriften wird die Transportsicherheit überwiegend durch das Versandstück selbst gewährleistet. Die wesentlichen Aspekte sind dabei die sichere Umschließung der radioaktiven Stoffe, die adäquate Abschirmung der Strahlung, eine geregelte Abfuhr der Wärme und die Gewährleistung der Unterkritikalität. Die Einhaltung des erforderlichen Sicherheitsstandards ist nach den Transportvorschriften der IAEO regelmäßig zu überprüfen.

Die GRS erstellt hierzu sogenannte **Transportsicherheitsanalysen**. In diesen Analysen werden zum einen die Strahlenexpositionen von Personen, die sich im Nahbereich solcher Transporte aufhalten, für den **unfallfreien Transport** ermittelt und bewertet. Zum anderen werden auch mögliche Freisetzen von Radionukliden bei **Transport- oder Handhabungsunfällen** und die daraus folgende Strahlenexposition von Personen sowie die unfallbedingte Kontamination der Umgebung untersucht. Die Kompetenzen der GRS im Bereich der Transportsicherheit umfassen über diese gutachterlichen Analysen hinaus auch die Entwicklung der für solche Untersuchungen benötigten Analysemethoden.



Quelle: Gesellschaft für Nuklearservice (GNS)

4. Zwischenlagerung und Kritikalitätssicherheit

Vor der Einlagerung in einem Endlager müssen radioaktive Abfälle in Zwischenlagern sicher aufbewahrt werden. Die Dauer dieser Zwischenlagerung kann sich über viele Jahrzehnte erstrecken. Für Deutschland ist bereits heute absehbar, dass dieser Zeitraum für die Zwischenlagerung von wärmentwickelnden Abfälle in Transportbehältern (Typ CASTOR) deutlich über die 40 Jahre hinausgehen wird, für die die Aufbewahrung dieser Behälter gegenwärtig genehmigt ist.

Um eine sichere Zwischenlagerung gewährleisten zu können, ist die Einhaltung verschiedener Schutzziele nachzuweisen. Dazu gehören für abgebrannte Brennelemente neben der **Einhaltung der Unterkritikalität** und der Sicherstellung der **Nachzerfallswärmeabfuhr** auch die **Integrität der Brennelement-Hüllrohre** sowie die Aufrechterhaltung der **Abschirmfunktionen der Behälter**. Für die gutachterliche Tätigkeit im Auftrag von Behörden deckt die GRS alle wesentlichen Fragestellungen in diesem Zusammenhang ab. Daneben entwickelt und validiert die GRS außerdem Rechenprogramme für entsprechende Analysen, beispielsweise zur Kritikalität und zur Berechnung des Abbrands von Kernbrennstoff.

Im Hinblick auf die Zwischenlagerung verfügt die GRS darüber hinaus auch über ausgeprägte Kompetenzen im Hinblick auf die Sicherung entsprechender Anlagen. Hierzu ist sie seit vielen Jahren gutachterlich und beratend im Auftrag von Behörden im In- und Ausland mit allen relevanten Fragestellungen des **physischen Schutzes von Zwischenlagern** und anderen kerntechnischen Anlagen befasst.

Die Kritikalitätssicherheit spielt über die Zwischenlagerung hinaus auch bei der Endlagerung eine wichtige Rolle. Auch nach der Verbringung der Abfallbehälter in ein Endlager und dessen endgültigen Verschluss muss nach den gegenwärtigen Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle die Einhaltung der Unterkritikalität für einen Betrachtungszeitraum von 1.000.000 Jahren nachgewiesen werden.

Hierzu hat die GRS in mehreren Forschungsvorhaben für die Wirtsgesteine Salz, Ton und Kristallin entsprechende generische Untersuchungen durchgeführt. Dies beinhaltet neben den reinen Kritikalitätsanalysen auch Untersuchungen zur **Eintrittswahrscheinlichkeit einer Kritikalität** sowie den möglichen **Konsequenzen** einer hypothetischen, postulierten Kritikalität. Untersuchungen für ein realitätsnahes Endlagerungskonzept wurden außerdem im Rahmen des Forschungsprojekts »Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben« erstellt.



Quelle: Energiewerke Nord (EWN)

5. Wirtsgesteine und Barrierematerialien

Der Langzeitsicherheitsnachweis eines Endlagers für radioaktive Abfälle erfordert eine Aussage zu den Eigenschaften und zum Verhalten der geologischen und geotechnischen Barrieren sowie zu den möglichen Transportprozessen von Radionukliden im Untergrund. Zu diesen Fragestellungen erarbeitet die GRS das Verständnis der bestimmenden, sich gegenseitig beeinflussenden physiko-chemischen Prozesse und entwickelt wirtsgesteinsspezifische Stoffmodelle sowie Werkzeuge für die Durchführung von Modellrechnungen. Die GRS verfügt über umfangreiche Erfahrungen in der **Charakterisierung der Wirtsgesteine**, der im tiefen Untergrund anzutreffenden Wässer und des **Löslichkeitsverhaltens von Schadstoffen** in diesen Wässern.

Die bisher in Deutschland als mögliche Wirtsgesteine für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle betrachteten Ton- und Salzgesteine zeichnen sich durch eine hohe Dichtigkeit aus, die eine Voraussetzung dafür ist, dass die radioaktiven Abfälle langfristig sicher eingeschlossen werden können. Beim Bau eines Endlagers entstehen in diesen plastisch verformbaren Wirtsgesteinen im Umfeld des Endlagerbergwerks Auflockerungszonen und Schädigungen des Wirtsgesteins. Diese können sich im Laufe der Zeit wieder zurückbilden und verheilen. Geschwindigkeit und Ausmaß werden durch Druck, Feuchtigkeit und Temperatur beeinflusst. Diese Prozesse und ihre Einflussfaktoren werden von der GRS erforscht.

Hierfür stehen der GRS das geowissenschaftliche Labor ihres Endlagerforschungszentrums sowie die Untertagelabore unter natürlichen und komplexen Randbedingungen wie z. B. im Felslabor Mont Terri zur Verfügung. So werden u. a. im Rahmen des EU-Projektes DOPAS die mechanisch-hydraulischen Eigenschaften der Baustoffe von **Verschlussbauwerken für Endlager im Salz- und Tongestein** untersucht. Zusätzlich wird die chemische Langzeitbeständigkeit der verwendeten Baustoffe geprüft. Ziel dieser Analysen ist zu klären, inwieweit mineralogische Änderungen durch chemische Korrosionsprozesse die mechanischen und hydraulischen Eigenschaften der Baustoffe verändern.

Die Qualifizierung der **Stoffmodelle und Simulationsprogramme** erfolgt durch den Vergleich der Rechenergebnisse mit Versuchsergebnissen aus gut dokumentierten Labor- und In-situ-Untersuchungen. Im Rahmen des EU-Projektes PEBS zeigte die GRS, dass sich die bei einem Streckenlagerungsversuch mit elektrisch beheizten Abfallbehältern im Felslabor Mont Terri zeitlich versetzt einstellenden Maximalwerte für die Gebirgstemperatur und den korrespondierenden Porenwasserdruck auch anhand von 3-dimensionalen Modellrechnungen gut nachvollziehen lassen



Der Transport der aus den Abfällen freigesetzten Schadstoffe erfolgt entweder durch Strömungsvorgänge von Fluiden (d.h. Wässern oder Gasen) im Untergrund oder bei stagnierenden Fluiden durch Diffusion. Durch Rückhalteprozesse (z. B. Sorption) kann der **Transport von gelösten radioaktiven Stoffen** verlangsamt und gleichzeitig deren Konzentration verringert werden. Diese Rückhaltungswirkung kann jedoch auch durch sogenannte Kolloide, denen Radionuklide anhaften, signifikant verschlechtert werden. Derartige Kolloide können in einem Endlager z. B. aus tonhaltigen Materialien gebildet werden.

Die Auswirkung dieser Effekte auf die Langzeitsicherheit hängt stark von den Transporteigenschaften der Kolloide und der Wechselwirkung der Radionuklide mit den Kolloiden ab. Die GRS untersucht solche Wechselwirkungen seit 2004 in dem internationalen Forschungsvorhaben »Colloid Filtration and Migration« (CFM) im Untertagelabor Grimsel (Schweiz) anhand von Feldexperimenten in einer Störungszone im Granit.



Quelle: swisstopo

6. Modellierung des Schadstofftransportes im Untergrund

In Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager für radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen wird für relevante Szenarien die Belastung der Umwelt infolge einer potenziellen Freisetzung von Schadstoffen ermittelt. Bei der Ausbreitung der Schadstoffe vom Endlager bis zum Menschen werden dazu drei Teilsysteme betrachtet: das Nahfeld, die Geosphäre und die Biosphäre.

Um den Transport von Schadstoffen durch die Geosphäre zu modellieren, ist die Kenntnis des Grundwasserströmungsverhaltens im Untergrund erforderlich. Für eine zwei- oder **dreidimensionale Simulation des Strömungsfeldes** hat die GRS in Zusammenarbeit mit verschiedenen Universitäten den Computercode d^3f (distributed density-driven flow) entwickelt. Mit d^3f können Grundwasserströmungen in Abhängigkeit von variablen Dichteverhältnissen in hydrogeologisch komplex aufgebauten Gebieten im großen Maßstab und für lange Zeiträume modelliert werden.

Für die **Modellierung des Schadstofftransports** hat die GRS mit ihren Partnern das Rechenprogramm r^{3t} (radionuclides, reaction, retardation, and transport) entwickelt. Dieses Programm berücksichtigt den radioaktiven Zerfall (auch für Zerfallsreihen), lineare und nicht-lineare Adsorption und die Ausfällung gelöster Stoffe als Festkörper bei Erreichen von Löslichkeitsgrenzen. Außerdem ist es möglich, sowohl Adsorption als auch Ausfällung in Abhängigkeit von anderen mittransportierten Stoffen zu modellieren. Beide Programme können sowohl auf PCs als auch auf Parallelrechnern eingesetzt werden.

7. Bewertung von Endlagerkonzepten und Endlagerbetrieb

Die sicherheitstechnische Bewertung von Endlagerkonzepten und Endlagerbetrieb stellt eines der Hauptaufgabengebiete der GRS im Rahmen ihrer gutachterlichen Beratung von Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden dar. Entsprechende Fragestellungen im Zusammenhang mit der Errichtung, dem Betrieb und dem Verschluss von Endlagern für radioaktive Abfälle hat die GRS beispielsweise im Rahmen der Verfahren um die deutschen Endlager Konrad, ERAM und Asse untersucht.

Im Rahmen ihrer Forschungstätigkeit untersucht die GRS in dem Vorhaben »Analyse betrieblicher Erfahrungen und ihrer Bedeutung für das Anlagenkonzept und den Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle« wissenschaftliche Fragestellungen, die zur Bewertung von Endlagerkonzepten aus Sicht der Betriebsphase notwendig sind. Hauptthemen sind hier u. a. die »Robustheit« eines Endlager- und Behälterkonzeptes unter dem Aspekt der kerntechnischen und radiologischen Sicherheit. International ist die GRS hierbei unter anderem in Expertengruppen bei der IAEA und der OECD-NEA vertreten, in denen die Anforderungen an die **Betriebssicherheit bei Bau, Betrieb und Stilllegung** eines Endlagers sowie deren Einfluss auf die Langzeitsicherheit diskutiert und bewertet werden.

Auch im Hinblick auf die Durchführung und Bewertung von Sicherheitsanalysen für den bestimmungsgemäßen **Endlagerbetrieb und ein mögliches Störfallgeschehen** während des Betriebs sowie für die Stilllegung von Endlagern verfügt die GRS über ausgeprägte Kompetenzen. Diesbezügliche gutachterliche Untersuchungen wurden für Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinen sowohl in Deutschland als auch im Ausland durchgeführt. Im Rahmen ihrer Auswertung von Betriebserfahrungen analysierte und bewertete die GRS beispielsweise für die Entsorgungskommission des Bundesumweltministeriums die Ereignisse im US-amerikanischen Endlager WIPP aus dem Jahr 2014, bei denen es u. a. zu einer Freisetzung von Radionukliden gekommen war.

Eine wesentliche Grundlage für derartige Analysen bilden detaillierte Kenntnisse zur Systemtechnik für die Handhabung und den Transport der unterschiedlichen Endlagerbehälter in geologischen Endlagern. Die Verknüpfung dieser Kenntnisse mit den abfall-spezifischen Kompetenzen und den Erfahrungen aus der **Durchführung und Bewertung von Sicherheitsanalysen** erlaubt es der GRS, die für die Sicherheit relevanten Anforderungen an die Abfallgebinde und die technische Auslegung eines Endlagers zu bestimmen.



8. Methoden und Werkzeuge für Langzeitsicherheitsnachweise

Ein Langzeitsicherheitsnachweis (international als Safety Case bezeichnet) umfasst die Prüfung und Bewertung von Daten, Maßnahmen, Analysen und Argumenten, die die Erfüllung der gesetzlichen Vorgaben aufzeigen und damit die Sicherheit des Endlagers für radioaktive Abfälle aus Sicht des Antragstellers belegen. Die GRS hat in diversen FuE-Projekten gemeinsam mit weiteren Partnern die Sicherheitskonzepte für **Endlager im Salz- und Tongestein** sowie die grundlegenden Nachweisstrategien beim Sicherheitsnachweis für die Nachverschlussphase weiterentwickelt. In den Sicherheitskonzepten wird dargestellt, durch welche geologischen Gegebenheiten und technischen Maßnahmen der Einschluss der Radionuklide im Endlager gewährleistet werden soll.

Mit ihren Kompetenzen und ihrer langjährigen Erfahrung ist die GRS deshalb sowohl national als auch international in allen wichtigen Forschungsprojekten und Gremien vertreten, die sich mit dem Langzeitsicherheitsnachweis bzw. dem Safety Case beschäftigen – in Deutschland beispielsweise in der Deutschen Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung (DAEF), international vor allem in den Gremien der OECD (Radioactive Waste Management Committee – RWMC, Integration Group for the Safety Case – IGSC, Salt Club, Clay Club) und der EU (Implementing Geological Disposal Technology Platform – IGD-TP).

Darüber hinaus kooperiert die GRS mit vielen Ländern im Rahmen einer wissenschaftlich-technischen Zusammenarbeit. Die Arbeiten beziehen sich dabei u. a. auf Methoden zum Umgang mit Ungewiss-

heiten, mit den Auswirkungen eines menschlichen Eindringens in das verschlossene Endlager nach Verlust des Wissens über das Endlager (Human Intrusion) sowie auf den Vergleich von im Endlagersystem ablaufenden Prozessen mit solchen, die in natürlichen geologischen Systemen ablaufen (natürliche Analoga).

Ein zentraler Bestandteil des Langzeitsicherheitsnachweises ist die **Langzeitsicherheitsanalyse**. Sie ist eine standortspezifische Analyse der Funktion eines Endlagersystems im Hinblick auf die radiologischen Konsequenzen. Dabei geht es im Kern darum, ob und in welcher Menge radioaktive Stoffe in die Biosphäre gelangen können. Im Rahmen ihrer Endlagerforschung entwickelt die GRS Werkzeuge, die für Langzeitsicherheitsanalysen für alle Arten von Endlagern für radioaktive Abfälle und für alle Arten von Wirtsgesteinen benötigt werden. Dabei handelt es sich u. a. um die Entwicklung von Szenarien, Modelle zur Beschreibung von potenziellen Schadstoffausbreitungen sowie Computercodes für Modellrechnungen.

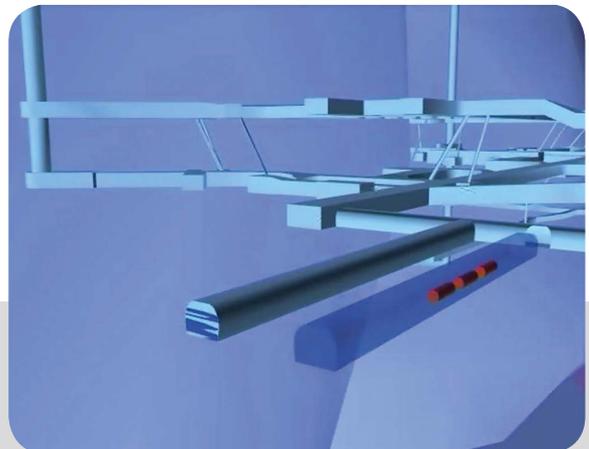
Grundlage für die Entwicklung von Szenarien, die in der Langzeitsicherheitsanalyse zu berücksichtigen sind, ist der sogenannte FEP-Katalog (FEP = Features, Events and Processes). Dieser beschreibt alle Komponenten des Endlagers mit den relevanten ablaufenden Prozessen und legt begründet dar, wie die Prozesse auf die Endlagerkomponenten einwirken. Aus den im FEP-Katalog definierten Wechselwirkungen können Szenarien für die zukünftigen Entwicklungen des Endlagersystems abgeleitet werden. In dem Forschungsprojekt »Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG)« hat die GRS mit anderen Institutionen erstmalig einen FEP-Katalog für einen realen Standort erstellt und auf dessen Basis die wahrscheinlichen

und weniger wahrscheinlichen Entwicklungen abgeleitet. In dem aktuellen Projekt AnSichT identifiziert die GRS zusammen mit weiteren Partnern unter anderem die Prozesse, die in einem FEP-Katalog für einen Standort im Tongestein zu berücksichtigen sind.

Bei der **Beschreibung potenzieller Schadstoffausbreitungen** im Rahmen einer Langzeitsicherheitsanalyse ist zu berücksichtigen, dass Stoffe in einem Endlager sowohl durch Flüssigkeiten als auch durch Gase transportiert werden können. Relevant ist hierfür auch der sogenannte Zweiphasenfluss, d.h. die gleichzeitige Bewegung zweier nicht mischbarer Fluide wie Wasser und Gas. In einem 2013 gestarteten Projekt entwickelt die GRS die dazu notwendigen Berechnungswerkzeuge und -methoden weiter und testet sie anhand realer Daten aus dem Endlager für radioaktive Abfälle in Morsleben (ERAM).

Ein aktuelles Beispiel für die Entwicklung von Computercodes stellt das von der GRS entwickelte **Programm RepoTREND** dar. RepoTREND ist ein neues, fortgeschrittenes Werkzeug zur Analyse der Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle. Mit dem Programm können komplexe Prozesse in einem Endlagersystem simuliert werden. Darauf basierend kann eine potentielle Strahlenbelastung für betroffene Menschen errechnet werden. RepoTREND besteht aus mehreren eigenständigen Rechenmodulen für verschiedene Teilbereiche von Endlagern in unterschiedlichen geologischen Formationen. Zur Analyse von Ungewissheiten und der Sensitivitäten der Modellparameter sind in RepoTREND eine Vielzahl von Methoden implementiert.

Ein weiteres Beispiel ist das weltweit erste **virtuelle Untertage-labor VIRTUS**, das die GRS mit weiteren Partnern entwickelt hat. Mit seiner dreidimensionalen Visualisierung erleichtert VIRTUS die Erforschung sicherheitsrelevanter Prozesse in einem Endlager und trägt zu einer transparenteren und verständlicheren Darstellung von Forschungsergebnissen bei.



9. Durchführung von Langzeitsicherheitsnachweisen

Die GRS wendet die von ihr entwickelten Methoden und Rechenprogramme auch zur Analyse der Langzeitsicherheit für konkrete Endlagerprojekte in tiefen geologischen Formationen an. Dabei werden sowohl generische Standorte betrachtet (z. B. Gorleben im Rahmen der VSG) als auch bereits in Stilllegung (Asse, Morsleben) und in Bau befindliche Endlager (Schacht Konrad).

Für Schacht Konrad hat das Endlagerforschungszentrum der GRS (damals noch als Teil des Instituts für Tief Lagerung der Gesellschaft für Strahlenforschung) im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens den Teil der Langzeitsicherheit bewertet, der sich mit der Mobilisierung und dem Transport der Radionuklide im Grubengebäude befasst. Gemeinsam mit externen Partnern wurden außerdem der Transport im Deckgebirge und die anschließende Strahlenexposition in der Biosphäre untersucht.

Für die Stilllegung der Schachtanlage Asse II und des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben hat die GRS über viele Jahre Langzeitsicherheitsanalysen erstellt, teilweise in Kooperation mit internationalen Partnern. Diese Arbeiten werden im Rahmen atomrechtlicher Verfahren für das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) als gesetzlich zuständigen Betreiber durchgeführt.



Quelle: [wikimedia commons/Johamar](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schacht_Konrad.jpg)

10. Bewertung von Langzeitsicherheitsnachweisen

Eine Kernaufgabe der GRS ist die **gutachterliche Bewertung** von Sicherheitsnachweisen (Safety Case) zur fachlichen Unterstützung von Behörden im In- und Ausland. Im Rahmen von Standortauswahlverfahren und Genehmigungsverfahren zur Errichtung oder Stilllegung von Endlagern müssen vor allem Sicherheitsanalysen des Antragstellers auf der Basis regulatorischer Vorschriften bewertet werden.

Hierfür verfügt die GRS sowohl über die notwendigen Fachkompetenzen und Simulationsprogramme als auch die erforderlichen Kenntnisse über die relevanten regulatorischen Anforderungen auf nationaler und internationaler Ebene. Um dieses Know-how ständig aktuell zu halten, werden Analysemethoden und die zugrunde liegenden mathematisch-physikalischen Modelle kontinuierlich dem Stand von Wissenschaft und Technik angepasst und die in der GRS vorhandenen Rechenprogramme zur gutachterlichen Bewertung von Sicherheitsnachweisen fortlaufend entsprechend weiterentwickelt.

Ein aktuelles Beispiel stellt ein Forschungsprojekt dar, das die Verbesserung und **Entwicklung von Methoden zu sicherheitstechnischen Bewertungen für Endlager** für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung zum Ziel hat. In diesem Vorhaben werden bis Ende 2015 am Beispiel des Endlagers Konrad die Methoden zur Durchführung von Sicherheitsnachweisen über die Beherrschung von Betriebsstörungen und Störfällen sowie der Langzeitsicherheit überprüft und weiterentwickelt.

11. Methoden für den Vergleich von Endlagersystemen

Weltweit werden geeignete Standorte für Endlager für radioaktive Abfälle gesucht. In Deutschland soll dazu ein Auswahlverfahren mit dem Ziel entwickelt und durchgeführt werden, durch einen Vergleich mehrerer möglicher Standorte den bestmöglichen zu finden.

Ein Vergleich von Standorten kann sich nach heutigem Stand von Wissenschaft und Technik nicht alleine auf die geologischen Verhältnisse beschränken, sondern muss auch das jeweilige Endlagerkonzept miteinbeziehen. Ein solcher **Vergleich von Endlagersystemen** birgt besondere methodische Herausforderungen, wenn Standorte mit unterschiedlichen Wirtsgesteinen betrachtet werden sollen.

Die GRS hat im Forschungsprojekt VerSi als weltweit erste Institution zwei sich ergänzende Methoden für den Vergleich von Langzeitsicherheitsanalysen verschiedener Endlagerstandorte in unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen entwickelt. Eine verbalargumentativen Vorgehensweise, mit der ein sicherheitsgerichteter Vergleich durch eine Gegenüberstellung der jeweiligen Sicherheitsfunktionen geführt werden kann und eine auf probabilistischen Langzeitsicherheitsanalysen basierende, quantitative Methode. Beide Methoden wurden am Beispiel der Standorte Gorleben und einem generischen Standort in einer Tonsteinformation getestet, um ihre Machbarkeit und die Grenzen ihrer Aussagekraft zu untersuchen.

12. Weiterentwicklung von Sicherheitsanforderungen

Nationale Regeln für die Endlagerung radioaktiver Abfälle müssen dem internationalen Stand von Wissenschaft und Technik sowie den Vorgaben entsprechen, sich aus internationalen Verpflichtungen ergeben. Die GRS ist in zahlreichen Arbeitsgruppen internationaler Institutionen wie der IAEA, der WENRA oder der OECD/NEA tätig, die sich mit regulatorischen Grundsatzfragen und der Harmonisierung der Sicherheitsphilosophien bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle befassen.

Diese Mitarbeit bildet eine wichtige Grundlage für die fachliche Unterstützung des Bundesumweltministeriums (BMUB) bei der **Erarbeitung von Sicherheitskriterien und Leitlinien** zur Endlagerung. Ein Beispiel für diese Aufgabe der GRS stellt die Mitwirkung an den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle dar, mit denen das BMUB im Jahr 2010 den sicherheitstechnischen Rahmen für Planung, Errichtung, Betrieb und Verschluss eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle vorgegeben hat.

Auf internationaler Ebene unterstützt die GRS das BMUB unter anderem bei den Aktivitäten der WENRA zur Harmonisierung von Regularien. Aktuell werden die in der WENRA erarbeiteten »Safety Reference Level« zur Endlagerung an dem jeweiligen nationalen Regelwerk der Mitgliedsländer gespiegelt und entsprechende Übereinstimmungen und Lücken bzw. fehlende Anforderungen identifiziert. Etwaige Unterschiede sollen anschließend von den Mitgliedsländern im Rahmen nationaler Aktionspläne ausgeglichen werden.

Entsorgung radioaktiver Abfälle · Kompetenzen und Leistungen

Weiterführende Informationen

Weiterführende Informationen zu den in dieser Broschüre dargestellten Themen sind in den nachfolgend aufgeführten Quellen der GRS und anderer Institutionen zu finden. GRS-Berichte (gekennzeichnet mit »GRS-[Nr.]«) sind als Download auf der Webseite der GRS unter www.grs.de erhältlich.

Abfallcharakterisierung

Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J.: Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Laufzeitverlängerung der Kernkraftwerke (September 2010). Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-274, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2011.

Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J.: Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011). Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-278, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2011.

Transportsicherheit

Sentuc, F.-N., Brücher, W., Büttner, U. et al.: Transportstudie Konrad 2009, GRS-256, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2010.

Zwischenlagerung und Kritikalitätssicherheit

Kilger, R., Bock, M., Moser, E., Gmal, B.: Betrachtungen zum Kritikalitätsausschluss in der Nachverschlussphase, Technischer Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, München, 2012.

Gmal, B., Kilger, R., Krzykacz-Hausmann, B., Herbert, H.-J., Moser, F.-E., Peschke, J.: Weiterführende Bearbeitung spezieller Themen im Rahmen generischer Sicherheitsanalysen zur Kritikalität von Kernbrennstoffen in der Nachbetriebsphase eines geologischen Endlagers, GRS-A-3486, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Garching, 2009.

Analyse des Verhaltens verschiedener Wirtsgesteine und Barriermaterialien

Hagemann, S.; Bischofer, B.; Scharge, T.; Schönwiese, D.: Entwicklung von Methoden und Modellen zur Bestimmung des Redoxpotentials salinärer Lösungen, GRS-260, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, 2014.

Noseck, U.; Brendler, V.; Flügge, J.; Stockmann, M.; Britz, S.; Lampe, M.; Schikora, J.; Schneider, A.: Realistic Integration of Sorption Processes in Transport Codes for Long-Term Safety Assessments, GRS-297, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, 2012.

Wieczorek, K.; Komischke, M.; Mieke, R.; Moog, H.: Geoelectric Monitoring of Bentonite Barrier Resaturation in the Äspö Prototype Repository, GRS-352, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, 2014.

Wieczorek, K.; Czaikowski, O.; Mieke, R.: PEBS – Long-Term Performance of Engineered Barrier Systems, GRS-353, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, 2014.

Xie, M.; Mieke, R.; Kasbohm, J.; Herbert, H.-J.; Meyer, L.; Ziesche, U.: Bentonite Barriers – New Experiments and State of the Art, GRS-300, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, 2012.

Zhang, Ch.-L.; Czaikowski, O.; Rothfuchs, T.; Wieczorek, K.: Thermo-Hydro-Mechanical Processes in the Nearfield around a HLW Repository in Argillaceous Formations. Volume I: Laboratory Investigations, GRS-312, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, 2013.

Zhang, Ch.-L.; Czaikowski, O.; Komischke, M.; Wieczorek, K.: Thermo-Hydro-Mechanical Processes in the Nearfield around a HLW Repository in Argillaceous Formations. Volume II: In-situ- Investigations and Interpretative Modelling, GRS-313, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, 2014.

Zhang, Ch.-L.; Armand, G.; Conil, N.: Investigation on the Anisotropic Mechanical Behaviour of the Calovo-Oxfordian Clay Rock, GRS-360, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH within the framework of ANDRA/GRS cooperation programme, Braunschweig, 2015.

Webseite des Verbundprojekts THEREDA (Thermodynamische Referenzdatenbasis): www.thereda.de

Webseite des Projekts WEIMAR (Weiterentwicklung des Smart-Kd-Konzepts für Langzeitsicherheitsanalysen): www.smartkd-concept.de

Modellierung des Schadstofftransportes im Untergrund

Fein, E.; Schneider, A. (eds.): d^{2f} – Ein Programmpaket zur Modellierung von Dichteströmungen, GRS-139, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, 1999.

Fein, E. (ed.): Software Package r^{3t} . Model for Transport and Retention in Porous Media, GRS-192, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, 2004.

Fein, E.; Kröhn, K.-P.; Noseck, U.; Schneider, A.: Modelling of field-scale pollutant transport, GRS-231, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH Braunschweig, 2008.

Schneider, A.; BIRTHLER, H.: Modellrechnungen zur großräumigen dichteabhängigen Grundwasserbewegung, GRS-191 Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, 2004.

Schneider, A. (ed.): Enhancement of d^{2f} und r^{3t} (E-DuR), GRS-292, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, 2012.

Sicherheitstechnische Bewertung von Endlagerkonzepten und Endlagerbetrieb

Peiffer, F., Fass, T., Weber, S.: Analyse betrieblicher Erfahrungen und ihrer Bedeutung für das Anlagenkonzept und den Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle, GRS-A-3613, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2010.

Beise, E., Biesold, H., Gründler, D. et al.: Sicherheitsanalyse des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM), GRS-79, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 1991.

Peiffer, F.: Endlagerkonzept im Tonstein. Untersuchung aktueller planerischer Grundsatzfragen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen, Entwicklung eines synthetischen Tonsteinstandortes (Projekt VerSi), Teil 3, GRS-A-3535/3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2010.

Peiffer, F., McStocker, B.: Einschätzung betrieblicher Machbarkeit von Endlagerkonzepten. Bericht zum Arbeitspaket 12, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-279, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2012.

Entwicklung von Methoden und Werkzeugen für den Langzeitsicherheitsnachweis

Kock, I.: Berechnung des Zweiphasenflusses von Gasen und Flüssigkeiten im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben, Präsentation zum Projekt ZIESEL auf dem GRS Fachgespräch 2015, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2015 – Download unter: http://www.grs.de/sites/default/files/pdf/10_grs_fachgesprach_2015_kock.pdf

Kock, I., Larue, J., Fischer, H., Frieling, G., Navarro, M., Seher, H.: Results from One- and Two- Phase Fluid Flow Calculations within the Preliminary Safety Analysis of the Gorleben Site - 13310. S. 15, WM Symposia, Waste Management 2013, Phoenix, AZ, USA, 2013.

Rübel, A., Becker, D., Fein, E.: Radionuclide transport modelling – Performance assessment of repositories in clays, GRS-228, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig 2007.

Rübel, A., Meleshyn, A.: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, GRS-338, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, 2014.

Mönig, J., Buhmann, D., Rübel, A., Wolf, J., Baltés, B., Fischer-Appelt, K.: Sicherheits- und Nachweiskonzept. Bericht zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-277, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2012.

Reiche, T., Becker, D., Buhmann, D., Lauke, T.: Anpassung des Programmpakets EMOS an moderne Softwareanforderungen, ADEMOS – Phase 1, GRS-A-3623, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, 2011.

Reiche, T., Noseck, U., Wolf, J. W.: Modellierung des Schadstofftransports in geklüfteten porösen Medien unter der Berücksichtigung von Kolloiden mit den Transportprogrammen FRAME und COFRAME, GRS-333, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Braunschweig, 2014.

Reiche, T., Becker, D.-A.: Berechnung radiologischer Konsequenzen der Freisetzung radioaktiver Stoffe aus einem Endlager in die Biosphäre mit dem Programm BioTREND, GRS-345, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Braunschweig, 2014.

Spiessl, S., Becker, D.-A.: Sensitivity Analysis of a Final Repository Model with Quasi-Discrete Behavior Using Quasi-Random Sampling and a Metamodel Approach in Comparison to Other Variance-Based Techniques, Reliability Engineering & System Safety (RESS), vol. 134, 287–296, 2015.

Wolf, J., Rübel, A., Noseck, U., Becker, D.-A.: Safety and Performance Indicators for Repositories in Salt and Clay Formations, GRS-240, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, 2008.

Durchführung von Langzeitsicherheitsnachweisen

Storck, R. et al.: Langzeitsicherheitsanalyse des Endlagers Konrad: Radionuklidausbreitung in der Nachbetriebsphase. TA-Nummer 2242.03. Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung (GSF) München. Bericht im Auftrag der PTB. November 1986.

Buhmann, D. et al.: Projekt Langzeitsicherheit Asse. Transportmodellierung, Fluid- und Radionuklidtransport am Standort Asse. ALSA-C-1.5B-NR145. Konsortium NRG, AFC und GRS; Petten, Juli 2005.

Becker, D.-A. et al.: Endlager Morsleben. Sicherheitsanalyse für das verfüllte und verschlossene Endlager mit dem Programmpaket EMOS, GRS-A-3454, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2009.

Alle Berichte und Zwischenberichte zum Forschungsprojekt »Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben« zum Download unter: <http://www.grs.de/endlagersicherheit/gorleben/ergebnisse>

Gutachterliche Bewertung von Langzeitsicherheitsnachweisen

Larue, J.: Auswertung der finnischen Sicherheitsstudie TILA zur Endlagerung abgebrannter Kernbrennstoffe, BMU-2001-581, Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz Berichte aus Forschungsvorhaben, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.

Entwicklung von Methoden für den Vergleich von Endlagersystemen

Überblick über das Verbundprojekt VerSi (Vergleichende Sicherheitsanalysen) und Download der Projektberichte auf der Webseite des Bundesamts für Strahlenschutz unter: <http://www.bfs.de/DE/themen/ne/endlager/standortauswahl/mehr-infos/versi.html>

Weiterentwicklung von Sicherheitsanforderungen auf nationaler und internationaler Ebene

Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle (Stand: 30. September 2010), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Radioactive Waste Disposal Facilities – Safety Reference Levels, Western European Nuclear Regulators Association (WENRA), 2014

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

Schwertnergasse 1
50667 Köln
Telefon +49 221 2068-0
Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum
Boltzmannstraße 14
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

Folgen Sie uns!



www.riskaudit-int.org
www.eurosafe-forum.org