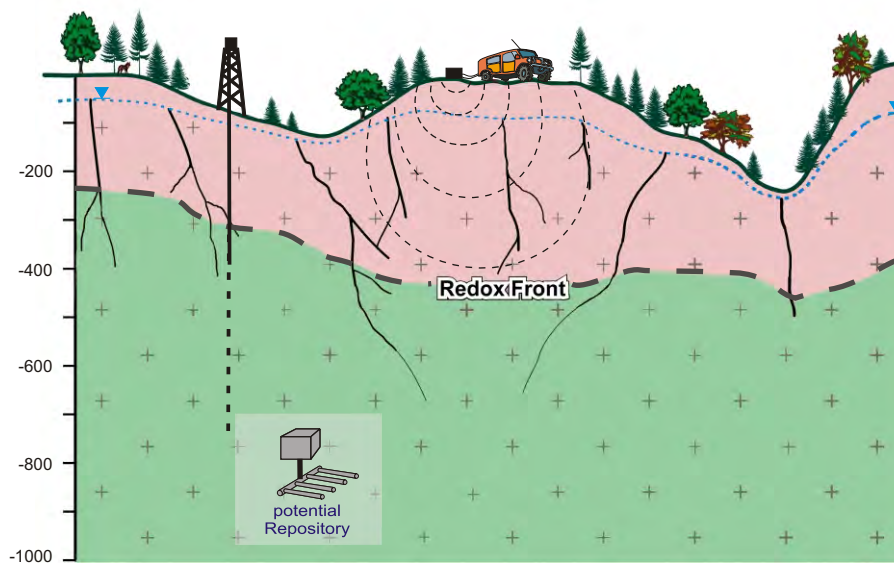


Anforderungen an die Standorterkundung für HAW-Endlager im Hartgestein (ASTER)



**Deutsch-russische
wissenschaftlich-technische Zusammenarbeit
zur
Endlagerung radioaktiver Abfälle**





**ANFORDERUNGEN
AN DIE STANDORTTERKUNDUNG FÜR HAW-ENDLAGER
IM HARTGESTEIN
(ASTER)**

ABSCHLUSSBERICHT

M. Wallner, BGR
S. Mrugalla, BGR
J. Hammer, BGR
W. Brewitz, GRS
Ch. Fahrenholz, GRS
E. Fein, GRS
W. Filbert, DBE TECHNOLOGY
B. Haverkamp, DBE TECHNOLOGY
M. Jobmann, DBE TECHNOLOGY
J. Krone, DBE TECHNOLOGY

Ch. Lerch, DBE TECHNOLOGY
P. Ward, DBE TECHNOLOGY
E. Weiß, DBE TECHNOLOGY
J. Ziegenhagen, DBE TECHNOLOGY
T. Gupalo, VNIPIPT
E. Kamnev, VNIPIPT
V. Konovalov, VNIPIPT
V. Lopatin, VNIPIPT
V. Milovidov, VNIPIPT
O. Prokopova, VNIPIPT

März 2005

Die diesem Bericht zu Grunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrage des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) durchgeführt (FKZ 02E9612 und FKZ 02E9622). Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

Dieser Bericht unterliegt samt Inhalt dem Schutz des Urheberrechtes und darf nur mit Zustimmung der DBE TECHNOLOGY GmbH und VNIPI PT sowie ihrer Auftraggeber ganz oder in Teilen vervielfältigt werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Juni 2001 wurde zwischen dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi, jetzt BMWA) der Bundesrepublik Deutschland und dem Ministerium für Atomenergie (MINATOM, jetzt ROSATOM) der Russischen Föderation die Neuaufnahme der wissenschaftlichen Kooperation auf dem Gebiet der Endlagerforschung im Rahmen des Abkommens beider Länder über die wissenschaftlich-technische Zusammenarbeit bei der friedlichen Nutzung der Kernenergie vom 22.04.1987 vereinbart und eine Reihe gemeinsamer Projekte zur Endlagerforschung abgestimmt.

In dem vorliegenden Abschlussbericht werden die im Zeitraum Januar 2002 – Dezember 2004 erzielten Ergebnisse zu zwei dieser Projekte

- B2 Untersuchungen zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen Granitformationen
- B3 Untersuchungen zur Endlagerung hochradioaktiver und wärmeentwickelnder verglaste Abfälle in tiefen Porphyrrformationen

zusammengefasst.

Beide Projekte wurden auf deutscher Seite im Rahmen des vom BMWA geförderten Forschungsvorhabens „Anforderungen an die Standorterkundung für HAW-Endlager im Hartgestein (ASTER)“ von der DBE TECHNOLOGY GmbH, der BGR und der GRS mbH bearbeitet. Das von ROSATOM dafür festgelegte Institut VNIPI Promtehnologii war an diesem Forschungsvorhaben auf vertraglicher Grundlage beteiligt und bezog weitere russische Forschungseinrichtungen ein.

Zielstellung des Forschungsvorhabens war es, einen methodischen Ansatz zu entwickeln, der zu einem fundierten Standorterkundungs- und -auswahlprogramm führt, das auf die für die Belange der Endlagersicherheit wesentlichen Aspekte ausgerichtet ist. Die Besonderheit dieser Aufgabenstellung besteht darin, dass bereits in einer frühen Phase der Standorterkundung und Endlagerplanung die Frage nach dem tatsächlichen geowissenschaftlichen Informationsbedarf für eine Sicherheitsbewertung gestellt wird, den die weitere Standorterkundung decken soll. So wird - abweichend von der gängigen Praxis einer möglichst umfassenden und damit aufwändigen Standortcharakterisierung - die Konzentration auf ein zielorientiertes Erkundungsprogramm ermöglicht.

Zwischen den deutschen und russischen Partnern wurde vereinbart, dass das Vorhaben am Beispiel der von russischer Seite seit längerer Zeit untersuchten potenziellen Endlagergebiete für radioaktive Abfälle im Raum Krasnojarsk (Granitoidformation) und in der Umgebung der im Südrural gelegenen Produktionsvereinigung Majak (Porphyritformation) bearbeitet wird, wobei der Standort Krasnojarsk aufgrund der Interessenslage der russischen Seite Vorrang hat.

Die im vorliegenden Bericht dargelegten Ergebnisse der Forschungsarbeiten zum Projekt B2 bezüglich eines Endlagers in einer Granitoidformation können wie folgt zusammengefasst werden:

In einem ersten Schritt wurden die zu derzeit betrachteten zwei potenziellen Standorten vorliegenden umfangreichen Informationen zur Standortcharakterisierung und zum vorgesehenen Endlagerinventar ausgewertet und entsprechend den inhaltlichen Aufgabenstellungen des Forschungsvorhabens systematisiert. In den Kapiteln 1 und 2 sind die Ergebnisse dieser Datenzusammenstellung und –aufbereitung dargestellt. Ungeachtet einer Reihe von Problemen bezüglich der Vollständigkeit der erforderlichen standortbezogenen Untersuchungsergebnisse und der Art der Datenbereitstellung bildeten diese eine hinreichende Grundlage für die weiteren

Arbeitsschritte. Ein besonderes Problem stellten die stark variierende Kartenmaßstäbe, Mängel in der Präzision bei der Erstellung der Karten sowie fehlende Ortskoordinaten in den auf deutscher Seite verfügbaren Unterlagen dar. Bisher wurde noch keine komplexe Interpretation der bisher gewonnenen geowissenschaftlichen Erkundungsdaten vorgenommen.

Als ein hilfreiches Instrument bei der Beherrschung des umfangreichen Datenpools hat sich die Überführung der Daten und Informationen in ein Geoinformationssystem erwiesen, das einen schnellen Zugriff auf die Daten und deren komplexe Bearbeitung ermöglicht.

Bei fehlenden oder unzureichenden Daten, die für die Entwicklung eines Endlagerkonzepts sowie für eine erste Sicherheitsanalyse des Endlagers erforderlich waren, wurden anhand der internationalen Literatur begründete Annahmen getroffen und zwischen den Projektpartnern abgestimmt.

Auf der Grundlage dieser Daten und Informationen wurde ein generisches Endlagerkonzept für die Nishnekansker Granitoidformation im Gebiet Krasnojarsk entwickelt (s. Kap. 3). Dabei wurde die Endlagerung von stark wärmeentwickelnden Abfällen in untertägig abgeteuften Bohrlöchern und von schwach wärmeentwickelnden in horizontalen Strecken vorgesehen. Die durchgeführten thermischen Berechnungen zum konzipierten Endlager zeigen, dass aufgrund der außerordentlich hohen Wärmeentwicklung von bestimmten Abfallgebinden, die in der Anfangszeit bei weitem die in Deutschland und anderen Ländern zugrundegelegte Wärmeabgabe von Endlagergebinden überschreitet, besondere technische Maßnahmen erforderlich sind, um die Integrität der technischen Barrieren zu gewährleisten und die thermische Beeinflussung des Wirtsgesteins auf ein zulässiges Maß zu begrenzen. Dazu wurde eine thermische Isolationsschicht zwischen den Abfallbehältern und der technischen Barriere Bentonitbuffer vorgeschlagen. Die dazu durchgeführten thermischen Parameter-Variationsrechnungen haben gezeigt, dass bei Auswahl von Materialien für den Bentonit und den thermischen Isolator mit bestimmten wärmephysikalischen Kennwerten, die Integrität der Bentonitbarriere gewährleistet werden kann und auch eine Überhitzung des Abfallbehälters und der Abfallmatrix vermieden wird. Diese neu entwickelte technische Lösung ermöglicht die Endlagerung von wärmeentwickelnden Abfallgebinden mit hoher Anfangswärmeleistung bei annehmbaren Zwischenlagerzeiten sowie eine relativ kompakte Anordnung der Abfallgebinde im Endlager. Sie kann auch für Endlagerkonzepte in anderen Wirtsgesteinen eingesetzt werden, wo zur Gewährleistung der Barrierenintegrität Temperaturbegrenzungen gesetzt werden müssen.

In Kapitel 4 ist die Bewertung der Endlagersicherheit mit Hilfe eines Systems von Modellen für das Nah- bzw. Fernfeld zur Analyse der Grundwasserströmung, der Radionuklidenausbreitung und der Beeinflussung der Biosphäre detailliert beschrieben und es werden die Ergebnisse der durchgeführten Modellrechnungen vorgestellt. Um insbesondere die Sensitivität von Veränderungen des Kluftsystems, des natürlichen Wärmefeldes sowie des Endlagerkonzeptes und der Behälterstandzeit auf den Radionuklidtransport zu bewerten, wurde eine Vielzahl von Variationsrechnungen durchgeführt. Die Modellierungen haben gezeigt, dass die Grundwasserströmung und der Schadstofftransport in geklüftetem Gestein im Wesentlichen von den hydraulischen Durchlässigkeiten der Gesteinsmatrix und ihrer Klüfte beeinflusst werden. Mit größer werdendem Unterschied zwischen Matrix- und Kluftdurchlässigkeit nimmt das Kluftnetzwerk an Bedeutung zu. Die Strömungs- bzw. Transportgeschwindigkeit innerhalb des Kluftsystems ist abhängig von der Kluftart, der Kluftöffnung und -orientierung. Einzelklüfte mit großen Öffnungsweiten können gegenüber Bereichen hoher Kluftdichte eine besonders große Strömungsgeschwindigkeit aufweisen. Das natürliche Wärmefeld führt zu einer Beschleunigung der Grundwasserströmung und kann den Transportpfad der Radionuklide stark verändern. Die bisherigen orientierenden Modellierungen der Biosphäre führten unter Verwendung der vorhandenen Daten und Modellannahmen zu einer Strahlenexposition, die in keinem Fall weder den deutschen noch den russischen Grenzwerte erreicht. Die Ergebnisse legen nahe, für eine Endlagerung radioaktiven Abfalls im Hartgestein eine möglichst große

Entfernung zur nächsten, hydraulisch aktiven Kluft einzuhalten. Dem anfänglichen diffusiven Transport durch eine wenig gestörte und daher gering durchlässige Gesteinsmatrix kommt im Hinblick auf das Isolationspotenzial der geologischen Barriere eine besonders große Bedeutung zu, da dieser Gesteinsbereich die Gesamttransportzeit ganz wesentlich bestimmt. Weiterhin sollten in Grundwasserströmungsrichtung verlaufende Lagerklüfte gemieden werden. Deshalb ist die Existenz und der Verlauf von Einzelklüften in Endlagernähe zu untersuchen. Aus den Untersuchungen wird ersichtlich, dass es im Hartgestein aufgrund der Wasserwegsamkeiten innerhalb des Kluftnetzwerks schnell zu einem Austrag der Radionuklide in die Biosphäre mit entsprechend hohen Expositionsraten kommen kann. Der technischen Endlagerbarriere kommt daher eine besondere Bedeutung zu.

Auf der Grundlage der verfügbaren Daten wurde mit der geologischen 3-D Modellierung zweier Standorte im Territorium Krasnojarsk begonnen (s. Kap. 5), um eine komplexe Interpretation der Erkundungsergebnisse an den vorausgewählten Standorten vorzunehmen. Auf der Grundlage der verfügbaren geowissenschaftlichen Daten und Informationen wurde begonnen, eine Einschätzung der langzeitlichen geologischen Entwicklung des Nishnekansker Granitoidmassivs zu erarbeiten (Kap. 6). Dies eine der Voraussetzungen für die Bewertung der Eignung dieses Territoriums für die Errichtung eines geologischen Endlagers. Obwohl diese Arbeit erst am Anfang steht, konnte ausgehend von den bisher vorliegenden geologisch-geophysikalischen Erkundungsergebnissen, vorbehaltlich einer gründlicheren Auseinandersetzung mit dieser Themenstellung, für das Gebiet des Nishnekansker Granitoidmassivs eine für die HAW-Endlagerung geeignete langzeitliche geologische Entwicklung prognostiziert werden.

In Kap. 7 wurden wesentliche Anforderungen an den Standort Nishnekansker Granitoidmassiv zusammengestellt. Die Grundlage hierfür waren:

- Gegenüberstellung der geowissenschaftlichen Anforderungen an einen Endlagerstandort in einer Granitformation mit einer Analyse der gegenwärtigen geowissenschaftlichen Daten und Informationen zum Nishnekansker Granitoidmassiv
- Thermische Berechnungen zum Endlagerkonzept, aus denen Anforderungen an den Standort hinsichtlich der erforderlichen Größe eines weitestgehend homogenen Gesteinsblockes sowie bezüglich der thermischen Kenndaten des Gebirges sowie der mineralogischen Zusammensetzung der Gesteine resultierten und
- Sicherheitsanalytische Modellrechnungen, aus denen sich insbesondere Anforderungen hinsichtlich des Kluftsystems der Wirtsgesteinsformation, d. h. zur Orientierung von Klüften und Störungszonen, Durchlässigkeiten der Gesteinsmatrix und von Klüften, bzw. Störungszonen sowie zur Anordnung des Endlagers bezüglich der Klüfte und Störungszonen ergeben.

Ausgehend von der Analyse der Standortanforderungen und des vorhandenen Datenbestandes zur sicherheitsanalytischen Bewertung des Nishnekansker Granitoidmassivs wurden zielgerichtete Empfehlungen für die weitere Standorterkundung erarbeitet (Kap. 8). Die Empfehlungen betreffen insbesondere folgende Komplexe:

- Erweiterung des Kenntnisstandes zum strukturgeologischen Bau des Gesteinsmassivs,
- Erweiterung des Standortuntersuchungsprogramms zur besseren Charakterisierung der hydrogeologischen Bedingungen im Endlagerumfeld,
- Erweiterung der Kenntnisse bezüglich der seismischen und neotektonischen Gefährdung sowie des Spannungszustandes und der uplift-Raten des Untersuchungsgebietes,
- Vervollständigung der Daten zu den Wirtsgesteinseigenschaften sowie

- Ergänzende Untersuchungen der Wirksamkeit der technischen und geotechnischen Barrieren.

Detaillierte Empfehlungen wurden für die weitere seismische Erkundung, für das Niederbringen einer Tiefbohrung sowie zur Anwendung bohrlochgeophysikalischer und hydrogeologischer Untersuchungen zwecks Erkundung der petrophysikalischen Eigenschaften und der Klüftigkeit der Endlager-Wirtsgesteine sowie zur Untersuchung der thermischen Kenndaten der Gesteinsformation und der thermophysikalischen Eigenschaften der Gesteine erarbeitet.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich der erarbeitete methodische Ansatz zur frühzeitigen Zusammenführung von Informationen aus den drei Hauptkomponenten

- geologische Modellbildung,
- technisches Endlagerkonzept und
- sicherheitsanalytisches Modell

bewährt hat und sich als zielführend für die fundierte Ableitung von Empfehlungen für die weiterführende Erkundung und spätere Standortauswahl erwies.

Dieses methodische Herangehen kann auf andere Gesteinsformationen, wie z. B. Ton und Salz, übertragen werden, um damit zu gewährleisten, dass bereits in einem sehr frühen Stadium die Standorterkundung auf die Belange der Endlagersicherheit und den Nachweis der Standorteignung ausgerichtet wird.

Da sich die gewählte Vorgehensweise als grundsätzlich zielführend erwies, besteht das beidseitige Interesse der deutschen und russischen Spezialisten die gegenseitig vorteilhafte Zusammenarbeit fortzusetzen und zu vertiefen, um noch bestehende offene Fragestellungen zu klären. Als zentrale Fragestellung der Fortführung der gemeinsamen Arbeiten gilt es zu klären, welche Rolle die einzelnen Barrieren des geologisch-geotechnischen Barrierensystems bei der Gewährleistung der Endlagersicherheit und somit bei der Bewertung der Standorteignung spielen. Es wurde daher empfohlen, zukünftige gemeinsame Untersuchungen auf die Wirksamkeit der einzelnen Barrieren und ihre Rolle in einem integrierten sicherheitsanalytischen Modell unter den Bedingungen eines Endlagers im magmatischen Wirtsgestein auszurichten. Zu einzelnen dieser Probleme wurden erste gemeinsame Vorstellungen für künftige Arbeitsprogramme entwickelt.

Die Untersuchungen zur Endlagerung in Porphyriten (s. Teil B des vorliegenden Berichtes) beschränkten sich auf eine erste grobe Zusammenstellung verfügbarer geowissenschaftlichen Informationen zum vorgesehenen Standort auf dem Territorium der Produktionsvereinigung Majak. Weiterhin wurde in Analogie zum Standort Nishnekansker Granitoidmassiv ein erstes generisches Endlagerkonzept entworfen und es wurden dazu erste thermische Berechnungen durchgeführt. Mit dem Programm FEFLOW wurden orientierende Rechnungen zur Grundwasserströmung und zum Schadstofftransport durchgeführt. Das erstellte zwei-dimensionale Grundwasserströmungsmodell wurde schrittweise um den Schadstofftransport ohne und später unter Berücksichtigung des natürlichen Wärmegradienten im Gestein erweitert.

Der vorliegende Bericht wurde von deutschen und russischen Spezialisten erarbeitet und in zwei Sprachen herausgegeben. Die Ursprungsversion des Berichtes wurde in deutsch verfasst. Die Redaktion des russischen Textes wurde vom VNIPIPT vorgenommen.

Die Autoren danken der Föderalen Agentur für Atomenergie der Russischen Föderation, dem Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit der Bundesrepublik Deutschland, dem Projektträger für Wassertechnologie und Entsorgung, Projektbereich Entsorgung (PTE-FZK) sowie Mitarbeitern der Institutionen

Bereich Hydrologie des Institutes für Geoökologie der TU Braunschweig
FGPU Bergbau-Chemisches Kombinat, Gebiet Krasnojarsk,
IGEM , Akademie der Wissenschaften der Russischen Föderation, Moskau,
KGPII VNIPIET, Krasnojarsk
KNIIGIMS, Krasnojarsk,
PO Majak, Ozersk, Gebiet Tscheljabinsk,
Radiuminstitut „V. G. Khlopin“, St. Petersburg,

für die ständige Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung des Forschungsvorhabens sowie für die Bereitstellung von Ausgangsdaten und Diskussion der Ergebnisse des Projektes.

Inhaltsverzeichnis

Seite

Zusammenfassung

Zusammenfassung	3
1 EINLEITUNG	13
1.1 Wissenschaftlich-Technische Zusammenarbeit Deutschland – Russland auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle	13
1.2 Ziele und Aufgabenstellung sowie Vorgehensweise	15
TEIL A: ENDLAGERUNG IN GRANIT	A-1
1 Abfalldaten	A-2
1.2 Abfallherkunft	A-2
1.3 Abfallmengengerüst	A-4
1.4 Abfallbehälter	A-4
1.5 Abfallmatrix	A-5
1.6 Aktivität und Radionuklidgehalt	A-6
1.7 Wärmeleistung	A-12
1.8 Inventarübersicht	A-12
2 STANDORTCHARAKTERISIERUNG	A-14
2.1 Geographische Lage, Topographie und Hydrologie des Untersuchungsgebietes	A-14
2.2 Klimatische Bedingungen	A-17
2.3 Regionalgeologische Position und geologische Entwicklung des Gebietes um Zheleznogorsk	A-19
2.4 Geologische Position und Genese der Nizhnekansker Granitoide	A-24
2.5 Einschätzung der seismischen Aktivität und der neotektonischen Entwicklung der Region	A-25
2.5.1 Seismologische Situation in der Region Shelesnogorsk	A-25
2.5.2 Neotektonische Entwicklung des Gebietes um Shelesnogorsk	A-31
2.6 Hydrogeologie des Untersuchungsgebietes	A-32
2.6.1 Kurzdarstellung des Kenntnisstandes zur Hydrogeologie des Gebietes	A-32
2.6.2 Hydrogeologische Zonierung - Verbreitung von Kluft- und Porengrundwasserleitern	A-34
2.6.3 Verteilung und räumliche Anordnung der Klüfte und Störungszonen im Untersuchungsgebiet	A-37
2.6.4 Hydraulische Eigenschaften der Endlager-Wirtsgesteine	A-42
2.6.5 Hydrochemie der Oberflächen- und Grundwässer	A-44

2.7	Mineralogisch-geochemische Zusammensetzung und petrophysikalische Eigenschaften der Granitoide	A-46
2.7.1	Petrographische und geochemische Zusammensetzung der Gesteine des Nizhnekansker Granitoidkomplexes	A-46
2.7.2	Geomechanische Eigenschaften der Gesteine.....	A-49
2.7.3	Wärmephysikalische Eigenschaften der Nizhnekansker Granitoide	A-50
2.7.4	Geothermische Verhältnisse im Untersuchungsgebiet.....	A-52
2.7.5	Sorptions- und Desorptionseigenschaften der Gesteine.....	A-53
2.7.6	Hydrothermal-metasomatische Alterationen der Gesteine und ihre Auswirkungen auf die Festigkeits- und Sorptionseigenschaften	A-56
2.8	Stand und Bewertung der bisher vorliegenden Daten zum geologischen Bau der potenziellen Endlagerregionen	A-57
2.8.1	Stand der bisherigen Erkundungsarbeiten.....	A-57
2.8.2	Bewertung der bisher durchgeführten Erkundungsarbeiten zur Standortauswahl eines HAW-Endlagers	A-67
3	ENDLAGERKONZEPT	A-73
3.1	Einleitung	A-73
3.2	Basiskonfiguration des Endlagers	A-73
3.2.1	Endlagerung der Fraktion Cs/Sr.....	A-73
3.2.2	Endlagerung der schwach wärmeentwickelnden Abfälle	A-77
3.3	Thermische Auslegungsberechnungen zur Endlagerung der Cs/Sr-Fraktionen	A-79
3.3.1	Konzeptuelles Modell	A-79
3.3.1.1	Umgebungsbedingungen.....	A-79
3.3.1.2	Behälter und dessen Wärmefreisetzung	A-80
3.3.1.3	Materialverhalten und Materialparameter	A-81
3.3.2	Berechnungsmodelle und deren Ergebnisse.....	A-85
3.3.2.1	Auslegung eines Einzelbohrlochs	A-85
3.3.2.2	Auslegung eines Einlagerungsfelds	A-89
3.3.2.3	Verbesserung der Auslegung eines Einlagerungsfelds	A-91
3.3.2.4	Variation der Modellparameter	A-94
3.3.2.4.1	Variation einzelner Parameter	A-94
3.3.2.4.2	Weitergehende Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Wirtsgesteine	A-100
3.3.3	Anforderungen an die technische Barriere aus thermischer Sicht	A-103
3.3.4	Zusammenfassung der thermischen Auslegung.....	A-104
3.4	Standzeit der Behälter für wärmeentwickelnde Abfälle	A-105

3.4.1	Grundlagen	A-105
3.4.2	Behälterkorrosion	A-106
3.4.3	Bewertung der mittleren Behälterstandzeit	A-108
3.5	Technisches Endlagerkonzept	A-109
3.5.1	Bohrlochlagerung der Fraktion Cs/Sr	A-109
3.5.2	Streckenlagerung der schwach wärmeentwickelnden Abfälle	A-111
3.6	Bewertung der für die Endlagerkonzeption vorhandenen Ausgangsdaten	A-112
4	SICHERHEITSANALYTISCHES ENDLAGER- UND STANDORTMODELL	A-114
4.1	Einleitung	A-114
4.2	Das sicherheitsanalytische Modell	A-117
4.3	Verwendete Modelle und ihre Vernetzung	A-117
4.4	Strömungs- und Transportmodellierungen im Nishnekansker Massiv	A-119
4.4.1	Modellaufbau FEFLOW	A-120
4.4.1.1	Datenakquisition und –aufbereitung	A-121
4.4.1.2	Schematisierte zweidimensionale Rechnungen mit FEFLOW	A-125
4.4.1.3	2d und 3d Modelle im Untersuchungsgebiet Itatskij	A-126
4.4.2	Modellaufbau EMOS	A-137
4.4.2.1	Die Nahfeldmodellierung GRAPOS	A-138
4.4.2.2	Die Fernfeldmodellierung CHETMAD	A-148
4.4.2.3	Das Biosphärenmodell EXMAS	A-152
4.4.3	Ergebnisse der Variationsrechnungen	A-153
4.4.3.1	Ergebnisse der schematischen zweidimensionalen Transportmodellierungen	A-153
4.4.3.2	Sicherheitsanalytische Modellrechnungen	A-161
4.4.3.2.1	Cäsium-Strontium-Fraktion	A-161
4.4.3.2.2	Schlämme, Fraktionen Seltene Erden und Spaltprodukte	A-171
4.4.3.3	Ergebnisse der 2d-Modellierung	A-179
4.4.3.4	Ergebnisse der 3d-Strömungsmodellierung	A-184
4.4.4	Diskussion und Ausblick	A-186
4.4.4.1	Diskussion der Modellierungsergebnisse	A-186
4.4.4.2	Mögliche Weiterentwicklung der Programme	A-191
4.5	Bewertung der vorliegenden Standortdaten im Hinblick auf das sicherheitsanalytische Modell sowie Empfehlung für zusätzliche Erkundungsmaßnahmen und Laborexperimente	A-192

5	ENTWURF DREIDIMENSIONALER GEOLOGISCHER STANDORTMODELLE FÜR DIE GEBIETE „VERCHNE-ITATSKIJ“ UND „JENNISSEJSKIJ“	A-213
5.1	Ziele und Aussagemöglichkeiten der 3D-Modellierung	A-213
5.5.1	Probleme bei der Durchführung der Modellierungsarbeiten und Bewertung der Ausgangsdaten	A-221
5.5.2	Erste Ergebnisse der durchgeführten Modellierungsarbeiten	A-223
6	GEOWISSENSCHAFTLICHE LANGZEITPROGNOSE	A-208
6.1	Grundlagen, Zielstellung und Ausgangsdaten	A-208
6.2	Langzeitliche geologische Entwicklung des Standortes „Nishnekansker Granitoidmassiv“	A-210
7	STANDORTANFORDERUNGEN	A-214
7.1	Geowissenschaftliche Anforderungen an Endlagerstandorte in magmatischen Gesteinen	A-214
7.1.1	Regionalgeologische und strukturgeologisch-tektonische Kriterien	A-215
7.1.2	Geomorphologisch-hydrographische Anforderungen an Endlagerstandorte	A-216
7.1.3	Hydrogeologische Standortfaktoren	A-216
7.1.4	Petrophysikalische Auswahlkriterien	A-217
7.1.5	Mineralogisch-geochemische Anforderungen	A-218
7.1.6	Besonderheiten von Granitoiden als Endlager-Wirtsgesteine	A-218
7.1.7	Vergleich der bisher vorliegenden Erkundungsdaten mit den geowissenschaftlichen Standortanforderungen	A-220
7.2.	Anforderungen an den Standort Nishnekansker Granitoidmassiv aus sicherheitsanalytischer Sicht	A-222
7.3	Anforderungen an den Standort Nishnekansker Granitmassiv aus Sicht des Endlagerkonzeptes	A-223
8	EMPFEHLUNGEN FÜR DIE WEITERE STANDORTUNTERSUCHUNG IM NISHNEKANSKER GRANITOIDMASSIV	A-225
8.1	Definition der detaillierter zu untersuchenden Parameter	A-225
8.2	Detaillierte Empfehlungen zu ausgewählten Problemen der weiteren Standortuntersuchung	A-231
8.2.1	Empfehlungen für die seismische Erkundung	A-231

8.2.2	Empfehlungen für das Niederbringen einer Tiefbohrung sowie zur Anwendung bohrlochgeophysikalischer Untersuchungen zwecks Erkundung der petrophysikalischen Eigenschaften und der Klüftigkeit der Endlager-Wirtsgesteine.....	A-233
8.2.2.1	Empfehlungen für das Niederbringen einer Tiefbohrung	A-233
8.2.2.2	Empfehlungen zur Durchführung bohrlochgeophysikalischer und hydraulischer Untersuchungen.....	A-234
8.2.3	Empfehlungen zur Untersuchung der thermophysikalischen Eigenschaften der Gesteine.....	A-238
8.2.3.1	Grundlagen	A-238
8.2.3.1	Empfehlungen für ein Messprogramm.....	A-239
9	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN.....	A-242
10	LITERATUR.....	A-247
11	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	A-259
12	TABELLENVERZEICHNIS	A-266

Anlage A1	Kurzbeschreibung des Programms „OpenGeo5“
Anlage A2	Programme für die Strömungs- und Transportmodellierung
Anlage A3	Empfehlungen für die Durchführung seismischer Messungen zur Erkundung eines Standortes für ein Endlager radioaktiver Abfälle in magmatischen Gesteinen mit besonderer Betonung auf die Oberflächenseismik
Anlage A4	Empfehlungen für das Abteufen einer Bohrung und die Durchführung bohrlochgeophysikalischer und hydraulischer Untersuchungen zur Erkundung eines Standortes für ein Endlager radioaktiver Abfälle in Magmatiten

TEIL B	ENDLAGERUNG IN PORPHYRIT

1 EINLEITUNG

Im vorliegenden Abschlussbericht werden die Ergebnisse des Forschungsprojektes „Anforderungen an die Standorterkundung für HAW-Endlager im Hartgestein (ASTER)“ im Rahmen der deutsch-russischen wissenschaftlich-technischen Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle dargestellt.

1.1 Wissenschaftlich-Technische Zusammenarbeit Deutschland – Russland auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle

Entsprechend den Empfehlungen der IAEA ist die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Wirtsgesteinsformationen und unter Nutzung eines Systems von natürlichen und ingenieurtechnischen Barrieren vorzusehen. International existieren Endlagerprojekte mit unterschiedlichem Entwicklungsstand in den Wirtsgesteinsformationen Salz (Deutschland, USA), Granit (Schweden, Finnland, Schweiz, Kanada), Ton (Frankreich, Schweiz, Belgien) und Tuff (USA). Des weiteren wird die Eignung der Wirtsgesteinsformationen Grünschiefer (Rumänien) sowie Porphyry und Permafrostboden (Russland) im Hinblick auf die Endlagerung von radioaktiven Abfällen diskutiert. Den höchsten Entwicklungsstand weisen die Endlagerprojekte in den Wirtsgesteinen Salz, Granit, Ton und Tuff auf.

Auf Grund der großen Komplexität der mit der Endlagerung verbundenen wissenschaftlich-technischen Fragestellungen und der Vielfalt betrachteter Wirtsgesteine ist die internationale Kooperation ein unverzichtbarer Bestandteil der Endlagerforschung. Sowohl in bilateralen Forschungsabkommen (z. B. mit SKB, NAGRA, ANDRA, US DOE) als auch vor allem in den von der Europäischen Kommission geförderten Forschungsarbeiten, in denen sowohl europäische als auch außereuropäische Forschungseinrichtungen zusammenwirken, zeigt sich der hohe Stellenwert internationaler Kooperation.

Vor diesem Hintergrund fand vom 27. bis 29. Juni 2001 eine gemeinsame Sitzung des Ministeriums für Atomenergie (MINATOM)¹ der Russischen Föderation und des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi)² der Bundesrepublik Deutschland zur Fortsetzung der wissenschaftlich-technischen Kooperation beider Länder auf den Gebieten der Reaktorsicherheits- und Endlagerforschung statt. Dabei wurde eine Neuaufnahme der wissenschaftlichen Kooperation beider Länder auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle vereinbart [BMWi - MINATOM, 2001].

Unter Berücksichtigung spezifischer deutscher Erfahrungen auf einigen Gebieten der Entsorgung radioaktiver Abfälle, aber auch unter Beachtung der vom MINATOM Russlands gesetzten Prioritäten auf diesem Gebiet, vereinbarten beide Seiten gemeinsame Arbeiten zu sieben ausgewählten Projekten:

- B1 Untersuchungen zur Endlagerung fester schwach- und mittelradioaktiver Abfälle in Permafrostformationen;
- B2 Untersuchungen zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen Granitformationen;
- B3 Untersuchungen zur Endlagerung hochradioaktiver und wärmeentwickelnder verglaste Abfälle in tiefen Porphyryformationen;
- B4 Erfahrungsaustausch zu standortunabhängigen Fragen der Endlagerung;

¹ Seit 2004 Föderale Agentur für Atomenergie (ROSATOM))

² Seit 2002 Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA)

- B5 Forschung und Entwicklung zur Immobilisierung und Konditionierung radioaktiver Abfälle, sowie zur Behälterentwicklung;
- B6 Zerstörungsfreie Messtechnik für die Bewertung von verglasten hochradioaktiven Abfällen;
- B7 Konservierung und Verschluss von Endlagerbohrlöchern für flüssige radioaktive Abfälle.

Auf der Besprechung der Sachverständigen des MINATOM und des BMWA zur WTZ auf dem Gebiet der friedlichen Nutzung der Kernenergie am 20.05.2003 wurden zwei weitere Themen der Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle vereinbart [BMWA-MINATOM, 2003]:

- B8 Auswahl und Erprobung von fortgeschrittenen Verfahren zur Wirtsgesteinscharakterisierung sowie
- B9 Erarbeitung eines Konzeptes, Realisierungs- und Finanzierungsplanes für die industrielle Versuchsanlage zur Endlagerung radioaktiver Abfälle im Nishnekansker Granitoidmassiv.

An den Projekten B1 bis B9 arbeiten von russischer Seite das für die geologische Endlagerung in Russland federführende Allrussische Forschungs- und Projektierungsinstitut für Industrietechnologien in Moskau (VNIPI Promtehnologii), das Chlopin-Institut in St. Petersburg, das Bergbau-Chemische Kombinat (frühere Bezeichnung: Krasnojarsk-26) in Shelesnogorsk und die Produktionsvereinigung Majak (frühere Bezeichnung: Cheljabinsk-56) mit.

Die deutschen Kooperationspartner sind die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), die DBE TECHNOLOGY GmbH sowie die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH.

Bei Bedarf werden von beiden Seiten weitere Forschungseinrichtungen einbezogen.

Für die drei Projekte

- B1. Untersuchungen zur Endlagerung fester schwach- und mittelradioaktiver Abfälle in Permafrostformationen
- B2. Untersuchungen zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen Granitformationen
- B3. Untersuchungen zur Endlagerung hochradioaktiver und wärmeentwickelnder verglaste Abfälle in tiefen Porphyrfformationen

wurde anlässlich der gemeinsamen Beratung des MINATOM¹ und des BMWi² am 19. und 20. November 2001 in Berlin auf drei Jahre angelegte Arbeitsprogramme abgestimmt. Ferner wurden in Beratungen der beteiligten deutschen und russischen Forschungseinrichtungen die konkreten Arbeitspläne für die einzelnen Jahre zu den Themenkomplexen B2 und B3 erarbeitet, die Gegenstand dieses Berichtes sind.

Die durch das BMWA finanzierte Endlagerforschung dient der kontinuierlichen Verbesserung der Sicherheit vor den potenziellen Gefahren radioaktiver Abfälle, der Vertiefung der Kenntnisse zu den sicherheitlich relevanten Fragestellungen sowie der Fortentwicklung der Sicherheitstechnik und der Methoden zur Sicherheitsbewertung. Die Bundesregierung hat in der 1999 erfolgten Neuausrichtung der Endlagerforschung festgelegt, neben Salz auch andere Wirtsgesteinsformationen im Hinblick auf ihre Eignung für ein Endlager für hochradioaktive

¹ Seit 2004 ROSATOM

²Seit 2002 BMWA

Abfälle zu untersuchen. Dabei erlangt die internationale Zusammenarbeit eine große Bedeutung. Ihre wesentlichsten Ziele sind [FZ Karlsruhe, 2002]:

- Erfahrungen und Informationen über Entsorgungsfragen sowie Forschungserkenntnisse auszutauschen und so die nationale Wissensbasis zu verbreitern,
- die Annäherung unterschiedlicher Entsorgungskonzepte und Sicherheitsanforderungen zu fördern,
- Voraussetzungen für die Harmonisierung von Gesetzen und Vorschriften zu schaffen sowie
- finanzielle Ressourcen durch gemeinsame Projekte wirtschaftlicher zu nutzen.

Die mit dem MINATOM vereinbarte wissenschaftlich-technische Zusammenarbeit zur Endlagerforschung dient der Erreichung dieser Ziele. Einerseits wird eine Erweiterung des Know-hows bezüglich der Endlagerung in alternativen Wirtsgesteinen erreicht und andererseits wird der russischen Seite eine wirksame wissenschaftlich-technische Unterstützung bei der Annäherung an den international fortgeschrittenen Stand auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle gewährt. Weiterhin wird damit die Einhaltung internationaler Sicherheitsstandards in russischen Endlagerprojekten gefördert.

Die in den Projekten B2 und B3 gemeinsam durchgeführten Arbeiten entsprechen den im BMBF-Förderkonzept „FuE zur Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen“ [FZ Karlsruhe, 2002] zum Arbeitsthema A „Weiterentwicklung von Endlagerkonzeptionen unter Sicherheitsgesichtspunkten“ und hierbei insbesondere A4 „Charakterisierung und Eigenschaften potentieller Wirtsgesteinsformationen“ zuzuordnenden Arbeiten. Gleichzeitig dienen sie der Erreichung der im Abschnitt 8. des BMBF-Förderkonzeptes „Internationale Zusammenarbeit“ formulierten Ziele.

1.2 Ziele und Aufgabenstellung sowie Vorgehensweise

Zielstellung des Forschungsvorhabens ist es, einen methodischen Ansatz zu entwickeln, der zu einem fundierten, auf die für die Belange der Endlagersicherheit wesentlichen Aspekte ausgerichteten Standorterkundungs- und -auswahlprogramm führt. Auf Grund der Komplexität der Problematik und der zu berücksichtigenden geowissenschaftlichen, ingenieurtechnischen und radiologischen Sachverhalte wurde der Versuch einer allgemeingültigen abstrakten Bearbeitung dieser Fragestellung als nicht zielführend bewertet. Deshalb wurden zwei fortgeschrittene Standortuntersuchungsprogramme im magmatischen Gestein als Referenzfälle ausgewählt, die in Russland vom MINATOM seit ca. 15 Jahren verfolgt werden und für die russische Seite von aktuellem Interesse sind. Diese Projekte können kurz wie folgt charakterisiert werden:

- Im Nishnekansker Granitoidmassiv, Gebiet Krasnojarsk, ist die Errichtung eines Endlagers für verfestigte hochradioaktive Schlämme aus der ehemaligen Waffenplutoniumproduktion und verfestigter hochradioaktiver Wiederaufarbeitungsabfälle aus der geplanten Wiederaufbereitungsanlage RT-2 des Bergbau-Chemischen Kombines Shelesnogorsk vorgesehen.
- Am Standort der Produktionsvereinigung Majak in Ozersk, Gebiet Tscheljabinsk, ist die Endlagerung verglaster hochradioaktiver Abfälle aus der Wiederaufbereitungsanlage RT-1 in einer Porphyrförderung geplant.

In beiden Gebieten werden seit mehreren Jahren Standortuntersuchungen durchgeführt, die bereits zu einer Vorauswahl von möglichen Endlagerstandorten in relativ begrenzten Territorien der umgebenden Gebirgsmassive geführt haben.

Da an beiden Standorten klüftige Magmatite bzw. Metamorphite als Endlagerwirtsgesteine vorliegen (Granite, Gneise und Porphyrite) bestehen hinsichtlich der Methodik der Standort-suche und -auswahl zahlreiche Synergien, die sich vor allem aus der Gleichartigkeit des Barrieren- und Einlagerungskonzeptes sowie der Modelle zur Untersuchung der Standorteignung ergeben. Andererseits bieten die Unterschiede an beiden Standorten insbesondere hinsichtlich des Oberflächenreliefs, der hydrogeologischen Situation, der metamorphen Überprägung der Gesteine und des Kluftsystems sowie der Wirtsgesteinseigenschaften die Möglichkeit, den Einfluss standortspezifischer Faktoren auf die Endlagersicherheit zu untersuchen.

Auf Grund einer Reihe von Problemen wurden die geologisch-geophysikalischen Erkundungsarbeiten im Umfeld der Produktionsvereinigung Majak unterbrochen. Ausgehend davon und unter Zugrundelegung von Informationen, die während eines Besuches einer deutschen Delegation Ende März 2003 bei der Produktionsvereinigung Majak gesammelt wurden, hat die deutsche Seite in Abstimmung mit den russischen Partnern beschlossen, die weiteren Untersuchungen im Rahmen der Zusammenarbeit vorerst auf das Nishnekansker Granitoidmassiv im Gebiet Krasnojarsk zu konzentrieren. Hinsichtlich der Endlagerung verglaster hochradioaktiver Abfälle im Porphyr wurden neben der Erfassung und Analyse der verfügbaren Daten lediglich erste Ansätze des Endlagerkonzeptes sowie des sicherheitsanalytischen Konzeptes entwickelt. Für den Standort Majak ergeben sich darüber hinaus umfangreiche Möglichkeiten der Zusammenarbeit auf den Gebieten der Bewertung, Prognose und Sanierung von mit radioaktiven Abfällen kontaminierter Oberflächen- und Grundwässer.

Die methodische Basis für das Gemeinschaftsprojekt ist die Erkenntnis, dass eine detaillierte Standortcharakterisierung alle notwendigen Informationen liefern muss, um eine standortbezogene Sicherheitsanalyse für das ausgewählte Endlagerkonzept durchführen zu können. Bezüglich der Standortauswahl soll unter mehreren Alternativen der Standort mit den besten Sicherheitsmerkmalen ausgewählt werden.

Die Abhängigkeit der Endlagersicherheit von bestimmten Standorteigenschaften wurde in der Vergangenheit intensiv untersucht. Aus diesen Studien wurden verschiedene Standortauswahlkriterien entwickelt, die ihren Niederschlag in zahlreichen internationalen und nationalen Empfehlungen bzw. Regelungen gefunden haben. Zu nennen sind z. B. Festlegungen bezüglich der geologischen, hydrogeologischen, seismischen und tektonischen Gegebenheiten eines Endlagerstandortes, wie z. B. geringe Gebirgsdurchlässigkeit, geringe Seismizität, große Entfernung von tektonisch aktiven Bruchstrukturen, und hinreichendes Grundwasseralter im geplanten Einlagerungsniveau. In Deutschland wurden von einer speziell dafür zusammengestellten Expertengruppe Kriterien für die Standortauswahl erarbeitet, die ein mehrstufiges System bilden [AkEnd, 2002].

Diese Empfehlungen tragen einen allgemeinen Charakter und haben insbesondere für die Untersuchungen in frühen Phasen der Standortauswahl und bei der Suche untersuchungswürdiger Gebiete eine große Bedeutung. Jedoch berücksichtigen diese Kriterien weder einen bereits vorhandenen Erkenntnisstand über einen Standort noch ein gewähltes Endlagerkonzept.

Mit dem Gemeinschaftsprojekt wird ein methodischer Ansatz entwickelt und realisiert, der zur Ableitung von konkreten Anforderungen an eine gezielte, effektive und kostengünstige Standorterkundung führt, um einen Sicherheitsnachweis bzw. einen Standorteignungsnachweis führen zu können. Die Besonderheit dieser Aufgabenstellung besteht darin, dass bereits in einer frühen Phase der Endlagerplanung und der Standortcharakterisierung auf der Grundlage vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen die Frage nach dem tatsächlichen geowissenschaftlichen Informationsbedarf gestellt wird, den die weitere Standorterkundung decken soll. So wird - abweichend von der gängigen Praxis einer möglichst umfassenden und damit aufwändigen Standortcharakterisierung - die Konzentration auf ein zielorientiertes Erkundungsprogramm ermöglicht.

Der entwickelte methodische Ansatz umfasst folgende Schritte, die in Abbildung I-1 schematisch dargestellt sind:

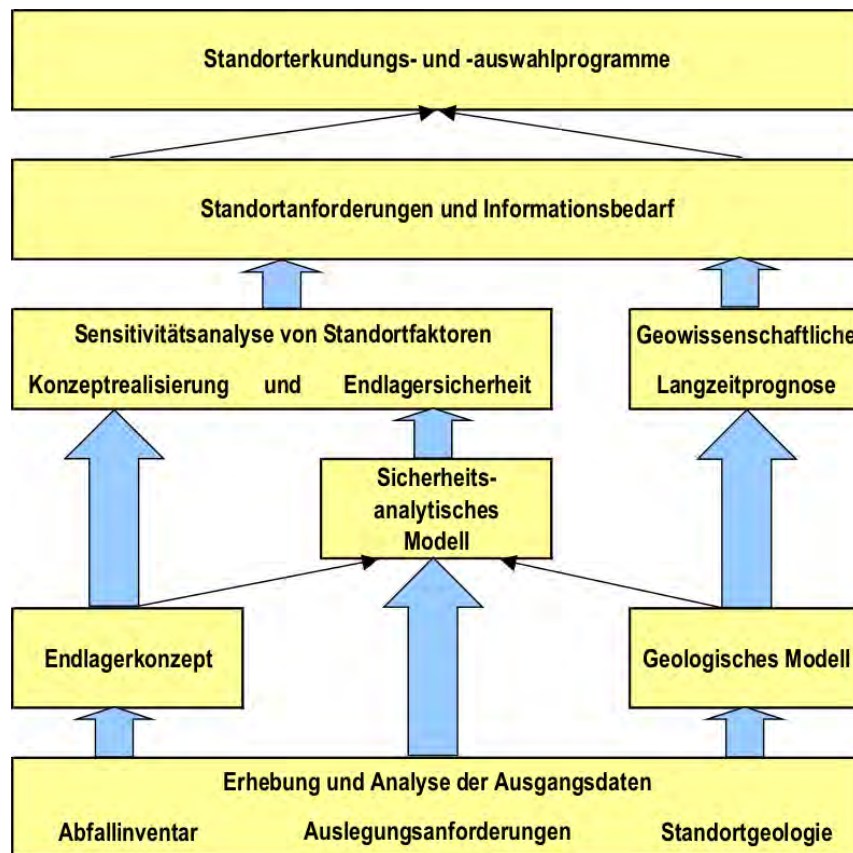


Abb. I-1: Methodischer Ansatz für das Standorterkundungs- und -auswahlprogramm

1. Erhebung und Analyse der verfügbaren geologischen, geophysikalischen und petrophysikalischen Datenbasis, des endzulagernden Abfallinventars und bestehender Anforderungen an die Endlagerkonzeption,
2. Entwicklung eines vorläufigen geologischen Modells der vorausgewählten Standorte und einer geologischen Langzeitprognose,
3. Entwicklung eines Endlagerkonzeptes unter Berücksichtigung des Abfallinventars, der bestehenden Auslegungsanforderungen und vorliegender geowissenschaftlicher Informationen zum Standort.
4. Entwicklung eines sicherheitsanalytischen Referenzmodells auf der Grundlage des Endlagerkonzeptes und des geologischen Modells,
5. Analyse des Einflusses geologischer Standorteigenschaften auf die Realisierbarkeit des Endlagers und auf die Endlagersicherheit (Sensitivitätsanalyse),
6. Ableitung der Standortanforderungen,
7. Bestimmung des noch offenen Informationsbedarfs und
8. Entwicklung des weiteren Erkundungsprogramms.

Für die Entwicklung des geologischen Modells, des sicherheitsanalytischen Modells und des Endlagerkonzeptes sowie bei der Analyse des Einflusses geologischer Standorteigenschaften auf die Realisierbarkeit des Endlagers und die Endlagersicherheit wird als Zwischenschritt der

jeweilige Datenbedarf bestimmt und mit dem in Schritt 1 erfassten Datenpool verglichen. Bei nicht verfügbaren Daten werden begründete Annahmen getroffen, die zwischen den Projektpartnern abgestimmt werden, um ein einheitliches Vorgehen bei nicht vorhandenen Daten zu gewährleisten und den weiteren Forschungsbedarf zu bestimmen.

TEIL A: ENDLAGERUNG IN GRANIT

1 ABFALLDATEN

1.2 Abfallherkunft

Als Referenzfall für die Erarbeitung eines detaillierten Programms der weiteren Standortuntersuchungen für ein geologisches Endlager in einer Granitformation wurde das Nishnekansker Granitmassiv ausgewählt (s. Kap. I.2). Für die Endlagerung in dieser Formation sind die hochradioaktiven Abfälle des Bergbau-Chemischen Kombines Shelesnogorsk vorgesehen.

Die radioaktiven Abfälle des Bergbau-Chemischen Kombines resultieren aus zwei Produktionsprozessen:

- Hochradioaktive Schlämme aus den früheren militärischen Programmen (Abb. 1-1)
- Flüssige Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von ausgedientem Kernbrennstoff in der geplanten Anlage RT-2 (Abb. 1-2, Abb. 1-3)

Das Bergbau-Chemische Kombinate Shelesnogorsk wurde ab 1950 als untertägige Produktionsanlage für die Waffenplutoniumproduktion errichtet. Zur Plutoniumgewinnung wurden zunächst zwei untertägige Brutreaktoren genutzt, die 1958 bzw. 1961 ihren Betrieb aufnahmen.



Abbildung 1-1: BChK - Radiochemische Produktionsanlagen für die Plutoniumgewinnung

Nach dem Zerfall der Sowjetunion und nach dem Ende des Kalten Krieges wurde ihr Betrieb 1992 endgültig eingestellt. Ein dritter Kernreaktor wurde 1964 in Betrieb gestellt und diente

vorrangig der Elektroenergie- und Wärmeversorgung der Stadt Shelesnogorsk. Sein Betrieb wird daher weitergeführt. Dieser Reaktor soll im kommenden Jahr durch ein konventionelles Wärmekraftwerk ersetzt werden.

Am Standort des Bergbau-Chemischen Kombines wurde mit der Errichtung der Wiederaufbereitungsanlage RT-2 für die Wiederaufbereitung von ausgedientem Kernbrennstoff aus den Kernkraftwerken mit Reaktoren vom Typ WWER-1000 begonnen, die auf Grund fehlender Finanzierung Anfang der 90iger Jahre eingestellt wurde.



Abbildung 1-2: BChK -Wiederaufbereitungsanlage RT-2

Gegenwärtig wird lediglich das fertiggestellte Zwischenlager für ausgedienten Kernbrennstoff genutzt. Die Fertigstellung der Anlage RT-2 ist vorgesehen.

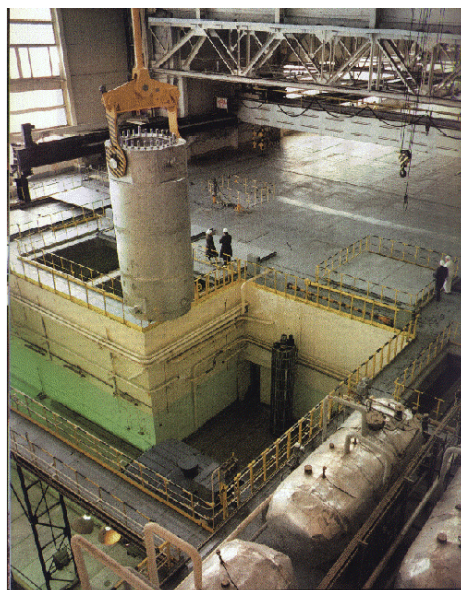


Abbildung 1-3: BChK – Wiederaufbereitungsanlage RT-2: Zwischenlager für ausgedienten Kernbrennstoff

1.3 Abfallmengengerüst

Nach den vorliegenden Angaben des BChK [VNIPI PT 2002] sind gegenwärtig ca. 7200 m³ hochradioaktiver Schlämme in Tanks gelagert. Es ist vorgesehen diese Abfälle mittels Borsilikat zu verfestigen und in Austenitstahlbehälter zu füllen. Eine Konditionierung der hochaktiven Schlämme in einer kristallinen Matrix auf Basis der Minerale Granat und Perowskit wird gleichfalls untersucht.

Das Gesamtvolumen der verglasten Schlämme wird nach den bisherigen technisch-ökonomischen Untersuchungen mit 600 m³ und das Gesamtgewicht mit ca. 1800 t angegeben. Die Gesamtmenge der Gebinde wird auf 3000 Stück geschätzt.

Die Aktivität der verfestigten Schlämme wird im wesentlichen vom Gehalt an ⁹⁰Sr und ¹³⁷Cs bestimmt. In den Schlämmen sind vor der Verarbeitung und Verglasung insgesamt ca. 600 kg Plutonium enthalten. Die Wärmeentwicklung der verfestigten Schlämme nach 30 Jahren Zwischenlagerung beträgt ca. 0,1 W/l.

Die technologische Planung zur Wiederaufarbeitung in der geplanten Anlage RT-2 sieht die Herauslösung von drei Fraktionen aus den flüssigen Abfällen der Wiederaufarbeitung vor, die sich in der Restwärmeentwicklung und der potenziellen radiologischen Gefahr unterscheiden. Es ist vorgesehen, die Fraktion Cs-Sr in einer Borsilikatmatrix und die Fraktionen Seltene Erden sowie Spaltprodukte in eine Keramikmatrix auf Basis von Zirkon oder Zirkoniumdioxid zu konditionieren. Die Hauptkennwerte und Konditionierungsverfahren für die drei Fraktionen sind in der Tabelle 1-1 angegeben [Kurnosow, 1999]:

Fraktion	Ausgangsdaten		Matrix	Endprodukt	
	m ³ /t	Ci/l		l/t	Ci/l
Cs-Sr	0,32	1500	Borsilikatglas	39	12400
Seltene Erden	0,4	800	Keramik	28	11600
Spaltprodukte	0,8	200	Keramik	32	5000

Tabelle 1-1: RT-2 - Kenndaten hochaktiver Abfälle

Die einzelnen Fraktionen sollen in Austenitstahlbehältern konditioniert werden.

Bei einer Wiederaufarbeitung von insgesamt 9000 t ausgedienten Kernbrennstoffes in der Anlage RT-2 werden folgende Mengen an verfestigten Abfällen erwartet:

Fraktion	Gesamtvolumen	Gesamtmasse	Gebinde gesamt	Gebinde pro Jahr
	m ³	t		
Cs-Sr	348	1148	4350	290
Seltene Erden	250	950	1250	85
Spaltprodukte	288	1095	1440	100

Tabelle 1-2: RT-2 – Anfall verfestigter Abfälle

1.4 Abfallbehälter

Die hochaktiven Schlämme sollen in einen Behälter aus Kohlenstoffstahl konditioniert werden, der in einen Austenitstahlbehälter verpackt wird. Der äußere Austenitstahlbehälter hat

einen Durchmesser von 600 mm und eine Höhe von 1000 mm. Die Wandstärke beider Behälter wird mit 7 mm angegeben.

Die verglaste Fraktion Cs-Sr soll in einem Austenitstahlbehälter mit einem Außendurchmesser von 450 mm, einer Höhe von 1000 mm und einer Wandstärke von 7 mm endgelagert werden.

Die Fraktionen Seltene Erden und Spaltprodukte sollen in Austenitstahlbehältern mit einem Außendurchmesser von 600 mm, einer Höhe von 1000 mm und einer Wandstärke von 7 mm endgelagert werden. Angaben oder Skizzen zur Konstruktion der jeweiligen Behälter lagen nicht vor.

Die Korrosionsrate der Austenitstahlbehälter wird wie folgt angegeben:

- Bei 150 °C und in Wasserdampfatosphäre – 2×10^{-3} mm/a
- Bei 75 °C im Kontakt mit Bentonit – 1×10^{-3} mm/a

1.5 Abfallmatrix

Für die Konditionierung der plutoniumhaltigen Schlämme werden mehrere Varianten untersucht [Kudinov et al. 2002]:

- Verarbeitung der Schlämme mit Rückgewinnung des Plutoniums als PuO und Zementierung der nichtlöslichen Rückstände. Diese Technologie ist im Bergbau-Chemischen Kombinat vorhanden.
- Einschmelzen der Schlämme in eine Borsilikatglasmatrix,
- Einschmelzen der Schlämme ohne Pu-Rückgewinnung in eine Phosphatglasmatrix.

Für die Untersuchungen im Rahmen das gemeinsame Forschungsvorhaben wurde die Verglasung in eine Borsilikatglasmatrix zugrunde gelegt.

Für die hochaktive Cs-Sr-Fraktion ist der Einschluss in eine Borsilikatglasmatrix vorgesehen.

Die Fraktionen Seltene Erden und Spaltprodukte mit einem hohen Anteil an langlebigen Radionukliden sollen in eine kristalline Keramikmatrix eingeschlossen werden. Es wird dabei davon ausgegangen, dass eine Keramik auf der Basis von s. g. Trägerphasen analog zu natürlichen akzessorischen Mineralen von Gesteinen das effektivste Material für den Langzeiteinschluss ($>10^5$ Jahre) der HLW ist. Als geeignete kristalline Trägerphasen für Aktinide werden natürliche Minerale der Gruppe der Seltenen Erden angesehen. Als geologisch mit den Granitoiden des Nishnekansker Massives vereinbar werden drei Mineralgruppen für die Verfestigung der aktinidenhaltigen HLW untersucht:

- Zirkoniumminerale
 - Zirkon – ZrSiO_4
 - Baddeleyit – ZrO_2 (monoklin)
 - Tasheranit – $\text{CaTiZr}_2\text{O}_8$
- Titanminerale
 - Titanit - CaTiSiO_5
 - Perowskit – CaTiO_3
 - Zirkonolith – $\text{CaZrTi}_2\text{O}_7$
 - Rutil – TiO_2
- Phosphorminerale
 - Monazit – CePO_4
 - Apatit – $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$

Als geeignetste Materialien für die Verfestigung der Fraktionen Seltene Erden und Spaltprodukte werden Matrizen auf der Basis von Zirkoniummineralen betrachtet. Die chemische Zusammensetzung dieser Keramiken bezogen auf die Masse ist

- SiO_2 – 10 – 20 %
- ZrO_2 – 60 – 70 %
- Transplutoniumelemente und Seltene Erden – bis 20%

In der Tabelle 1-3 sind wesentliche Kenndaten der Abfallmatrizen zusammengefasst.

Bezeichnung	Physikalisch-chemischer Kennwert	
	Borsilikatglas	Keramik
Anteil radioaktiver Abfälle, Gew. %	bis 20 - 25	Von 5 – 6 bis 10 - 20
Auslaugungsgeschwindigkeit der Radionuklide, $\text{g/cm}^2 \cdot \text{d}$		
• bei $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$	$10^{-6} - 10^{-8}$	$10^{-7} - 10^{-10}$
• bei $T = 75\text{--}100\text{ }^\circ\text{C}$	$10^{-4} - 10^{-6}$	$10^{-6} - 10^{-9}$
• hydrothermal	$10^{-3} - 10^{-5}$	$10^{-6} - 10^{-9}$
Wärmeleitfähigkeit, W/mK	0,8 – 1,4	2,0 – 3,0
Dichte, g/cm^3	2,5 – 4,0	3,0 – 4,5
Zulässige Lagerungstemperatur, $^\circ\text{C}$	550	550

Tabelle 1-3: Kennwerte der verfestigten HLW

Für einzelne Radionuklide werden folgende Auslaugungsgeschwindigkeiten angegeben:

Radionuklid	Auslaugung $\text{g/cm}^2 \cdot \text{d}$
Schlämme (Borsilikatglas)	
Pu	5×10^{-8}
U	5×10^{-7}
Faktion Cs-Sr	
Cs	1×10^{-6}
Sr	1×10^{-7}
Seltene Erden und Spaltprodukte	
Am-241, Zr-93, Se-79, Pd-107, Sn-126, Cm-245	$10^{-8} - 10^{-9}$

Tabelle 1-4: Auslaugungsgeschwindigkeit ausgewählter Radionuklide

1.6 Aktivität und Radionuklidgehalt

Die verfügbaren Daten zum Radionuklidgehalt der einzelnen Abfallströme und zur Aktivität sind in den Tabellen 1-5 bis 1-9 zusammengefasst.

In der Tabelle 1-5 „Radionuklidgehalt der Schlämme“ sind die Radionuklide ^{144}Ce , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{95}Zr und ^{95}Nb nicht aufgeführt, da deren Anteil an der Gesamtaktivität sehr gering ist und diese Nuklide auf grund der kurzen Halbwertszeiten praktisch nach 30 Jahren vollständig zerfallen sind.

Tabelle 1-9 zeigt, dass die Gesamtaktivität des Einlagerungsinventars nach 30 Jahren ca. 749 Mill. Ci, nach 70 Jahren ca. 363 Mill. Ci und nach 300 Jahren ca. 1,6 Mill. Ci beträgt.

Radionuklid	Halbwertszeit Jahre	Aktivität bei Verfestigung		Aktivität nach 10 Jahren		Aktivität nach 30 Jahren		Aktivität nach 70 Jahren		Aktivität nach 300 Jahren	
		Spezifische Aktivität Ci/l	Aktivität per Gebinde Ci	Spezifische Aktivität Ci/l	Aktivität per Gebinde Ci	Spezifische Aktivität Ci/l	Aktivität per Gebinde Ci	Spezifische Aktivität Ci/l	Aktivität per Gebinde Ci	Spezifische Aktivität Ci/l	Aktivität per Gebinde Ci
⁹⁰ Sr	29,1	36	7200	28	5600	1,7x10	3400	6,6	1320	2,6x10 ⁻²	5,2
¹³⁷ Cs	30	19	3800	15,1	3020	9,5	1900	3,8	760	1,8x10 ⁻²	3,6
²³⁹ Pu	2,41 · 10 ⁴	6x10 ⁻²	12	6x10 ⁻²	12	6x10 ⁻²	12	6x10 ⁻²	12	6x10 ⁻²	12
²³⁸ U	4,47 · 10 ⁹	3.2x10 ⁻⁴	0,064	3.2x10 ⁻⁴	0,064	3.2x10 ⁻⁴	0,064	3.2x10 ⁻⁴	0,064	3.2x10 ⁻⁴	0,064
Gesamt		54	11012,064	43,16	8632,064	26,5	5312,064	10,46	2092,064	0,104	20,864

 Langlebige Radionuklide

 Aktivitätsbestimmende Radionuklide

Tabelle 1-5: Radionuklidgehalt und -aktivität der Schlämme

Radionuklid	Halbwertszeit Jahre	Aktivität nach 10 Jahren		Aktivität nach 30 Jahren		Aktivität nach 70 Jahren		Aktivität nach 300 Jahren		Aktivität nach 500 Jahren	
		Spezifische Aktivität Ci/l	Aktivität per Gebinde Ci	Spezifische Aktivität Ci/l	Aktivität per Gebinde Ci	Spezifische Aktivität Ci/l	Aktivität per Gebinde Ci	Spezifische Aktivität Ci/l	Aktivität per Gebinde Ci	Spezifische Aktivität Ci/l	Aktivität per Gebinde Ci
⁹⁰ Sr	28,8	1,9x10 ⁻³	152000	9,2x10 ⁻²	73600	4x10 ⁻²	32000	1,24	99,2	9,86x10 ⁻³	0,79
¹³⁷ Cs	30,1	2,51x10 ⁻³	200800	1,16x10 ⁻³	92800	6,21x10 ⁻²	49680	2,57	205,6	2,52x10 ⁻²	2,01
¹³⁵ Cs	2300000	1,22x10 ⁻²	1	1,22x10 ⁻²	1	1,22x10 ⁻²	1	1,22x10 ⁻²	1	1,22x10 ⁻²	1
¹⁴⁷ Pr	2,6	1,05x10 ⁻¹	8,4	5,13x10 ⁻⁴		1,3x10 ⁻⁸					
¹⁵¹ Sm	90	2,97x10 ⁻³	0,2	2,51x10 ⁻³	0,2	1,76x10 ⁻³	0,1	2,97x10 ⁻⁴			
¹⁵² Eu	13,5	2,97x10 ⁻⁵									
¹⁵⁴ Eu	8,6	4,32x10 ⁻²	3,5	8,65x10 ⁻³	0,7	3,51x10 ⁻⁴		2,35x10 ⁻⁸			
¹⁵⁵ Eu	4,8	1,57 · 10 ⁻²	1,3	8,11x10 ⁻⁴	0	2,16x10 ⁻⁶					
²⁴¹ Am	432	2,97x10 ⁻²	2,4	2,7x10 ⁻²	2,2	2,51x10 ⁻²	2	1,76x10 ⁻²	1,4	1,28x10 ⁻²	1,02
²⁴⁴ Cm	18,1	2,7x10 ⁻²	2,1	1,22x10 ⁻²	1	2,7x10 ⁻³	0,2	4,1x10 ⁻⁷		0	
Gesamt		4410	352818,9	2080	166405,1	1021	81683,3	3,84	307,2	0,06	4,82

Langlebige Radionuklide

Aktivitätsbestimmende Radionuklide

Tabelle 1-6: Radionuklidgehalt und –aktivität der Fraktion Cs-Sr

Radionuklid	Halbwertszeit Jahre	Aktivität nach 10 Jahren		Aktivität nach 30 Jahren		Aktivität nach 70 Jahren		Aktivität nach 300 Jahre	
		Spezifische Aktivität Ci/l	Aktivität per Gebinde Ci	Spezifische Aktivität Ci/l	Aktivität per Gebinde Ci	Spezifische Aktivität Ci/l	Aktivität per Gebinde Ci	Spezifische Aktivität Ci/l	Aktivität per Gebinde Ci
¹⁴⁴ Ce	0,8	4,3	860	$8,1 \times 10^{-8}$					
¹⁴⁷ Pr	2,6	$3,2 \times 10^2$	64000	1,3	260	$4,1 \times 10^{-5}$	0		
¹⁵¹ Sm	90	8,4	1680	7,0	1400	5,1	1020	$7,6 \times 10^{-1}$	152
¹⁵² Eu	13,5	$8,4 \times 10^{-2}$	16,8	$2,7 \times 10^{-2}$	5,4	$3,0 \times 10^{-3}$	0,6	$4,6 \times 10^{-9}$	
¹⁵⁴ Eu	8,6	$1,3 \times 10^2$	26000	$2,6 \times 10$	5200	$9,8 \times 10^{-1}$	196	$3,0 \times 10^{-9}$	
¹⁵⁵ Eu	4,8	$4,6 \times 10$	9200	2,4	480	$6,5 \times 10^{-3}$	1,3		
¹⁵⁸ Tb	180	$5,4 \times 10^{-6}$		$5,1 \times 10^{-6}$	0	$4,1 \times 10^{-6}$	0	$1,4 \times 10^{-6}$	
^{166m} Ho	1200	$1,6 \times 10^{-6}$		$1,6 \times 10^{-6}$	0	$1,5 \times 10^{-6}$	0	$1,4 \times 10^{-6}$	
⁹³ Zr	1530000	$5,1 \times 10^{-2}$	10,2	$5,1 \times 10^{-2}$	10,2	$5,1 \times 10^{-2}$	10,2	$5,1 \times 10^{-2}$	10,2
²⁴¹ Am	432	$1,1 \times 10^{-4}$		1×10^{-4}	0	$9,5 \times 10^{-5}$	0	$6,5 \times 10^{-5}$	
²⁴³ Am	7370	1×10^{-6}		1×10^{-6}	0	1×10^{-6}	0	1×10^{-6}	
²⁴⁴ Cm	18,1	$1,2 \times 10^{-4}$		$5,7 \times 10^{-5}$	0	$1,2 \times 10^{-5}$	0	$1,9 \times 10^{-9}$	
²⁴⁵ Cm	8500	$1,5 \times 10^{-8}$		$1,5 \times 10^{-8}$	0	$1,5 \times 10^{-8}$	0	$1,4 \times 10^{-8}$	
²³⁷ Np	2144000	$6,9 \times 10^{-3}$	1,4	$6,9 \times 10^{-3}$	1,4	$6,9 \times 10^{-3}$	1,4	$6,9 \times 10^{-3}$	1,4
Gesamt		508,8	101768,4	36,78	7357	6,13	1229,5	0,82	163,6



Langlebige Radionuklide



Aktivitätsbestimmende Radionuklide

Tabelle 1-7:: Radionuklidgehalt und –aktivität der Fraktion Seltene Erden

Radionuklid	Halbwertszeit Jahre	Aktivität nach 10 Jahre		Aktivität nach 30 Jahren		Aktivität nach 70 Jahren		Aktivität nach 300 Jahren	
		Spezifische Aktivität Ci/l	Aktivität per Gebinde Ci	Spezifische Aktivität Ci/l	Aktivität per Gebinde Ci	Spezifische Aktivität Ci/l	Aktivität per Gebinde Ci	Spezifische Aktivität Ci/l	Aktivität per Gebinde Ci
⁷⁹ Se	650000	1,2 · 10 ⁻²	2,4	1,2 · 10 ⁻²	2,4	1,2 · 10 ⁻²	2,4	1,2 · 10 ⁻²	2,4
¹⁰⁶ Ru	~ 1	1,9x10	3800	2,1x10 ⁻⁵		-		-	0
¹⁰⁷ Pd	6500000	3,8x10 ⁻³	0,8	3,8x10 ⁻³	0,76	3,8x10 ⁻³	0,76	3,8x10 ⁻³	0,76
^{100m} Ag	0,7	5,9x10 ⁻³	1,2						
¹²⁵ Sb	2,8	1,8x10	3600	1,2x10 ⁻¹	24	5,4x10 ⁻⁶			
¹²⁶ Sn	~100000	1,8x10 ⁻²	3,6	1,8x10 ⁻²	3,6	1,8x10 ⁻²	3,6	1,8x10 ⁻²	3,6
¹⁵¹ Sm	90	1,2x10 ⁻²	2,4	1,1x10 ⁻²	2,2	7,8x10 ⁻³	1,56	1,2x10 ⁻³	0,24
¹⁴⁷ Pm	2,6	4,8x10 ⁻¹	96	1,9x10 ⁻³	0,38	6,5x10 ⁻⁸			
¹⁵² Eu	13,5	1,3x10 ⁻⁴		4,3x10 ⁻⁵		4,3x10 ⁻⁶			
¹⁵⁴ Eu	8,6	2x10 ⁻¹	40	4,1x10 ⁻²	8,2	1,5x10 ⁻³	0,3		
¹⁵⁵ Eu	4,8	7,3x10 ⁻²	14,6	3,8x10 ⁻³	0,76	1x10 ⁻⁵			
²⁴¹ Am	432	5,1x10 ⁻³	1	4,9x10 ⁻³	0,98	4,6x10 ⁻³	0,92	3,2x10 ⁻³	0,64
²⁴³ Am	7370	5,1x10 ⁻⁵		5,1x10 ⁻⁵		5,1x10 ⁻⁵		5,1x10 ⁻⁵	
²⁴⁴ Cm	18,1	1,2x10 ⁻³	0,2	5,7x10 ⁻⁴		1,2x10 ⁻⁴		1,9x10 ⁻⁸	
²⁴⁵ Cm	8500	1,1x10 ⁻⁷		1,1x10 ⁻⁷		1,1x10 ⁻⁷		1,1x10 ⁻⁷	
⁹⁹ Tc	211100	3,8x10 ⁻³	0,76	3,8x10 ⁻³	0,76	3,8x10 ⁻³	0,76	3,8x10 ⁻³	0,76
Gesamt		38,191	7562,96	0,22	44,04	0,052	10,3	0,042	8,4

Langlebige Radionuklide

Aktivitätsbestimmende Radionuklide

Tabelle 1-8: Radionuklidgehalt und –aktivität der Fraktion Spaltprodukte

Abfallart	Anzahl der Gebinde	Aktivität per Gebinde nach 30 Jahren Ci	Aktivität per Gebinde nach 70 Jahren Ci	Aktivität per Gebinde nach 300 Jahren Ci	Gesamtaktivität nach 30 Jahren Mill. Ci	Gesamtaktivität nach 70 Jahren Mill. Ci	Gesamtaktivität nach 300 Jahren Mill. Ci
Schlämme	3000	5312	2092	20,9	15,9	6,3	0,06
Fraktion Cs-Sr	4350	166405	81683	307,2	723,9	355,3	1,34
Fraktion Seltene Erden	1250	7357	1229	163,6	9,2	1,5	0,2
Fraktion Spaltprodukte	1440	44	10,3	0,06	0,015	0,015	0,0002
Gesamt	10040				749,1	363,1	1,6

Tabelle 1-9: Gesamtaktivität der endzulagernden radioaktiven Abfälle

1.7 Wärmeleistung

Die Wärmeleistung der Gebinde mit den verfestigten Schlämmen wird im wesentlichen durch den Gehalt an ^{137}Cs und ^{90}Sr bestimmt. Nach 30 Jahren Zwischenlagerung der Gebinde beträgt die spezifische Wärmeleistung nicht mehr als 0,08W/l.

Die berechnete Wärmeleistung der Fraktionen Cs-Sr, Seltene Erden und Spaltprodukte in Abhängigkeit von der Zeit nach Verfestigung ist in den Tabellen 1-10 bis 1-12 aufgeführt.

Nuklide	Wärmeleistung (W/l) nach				
	10 Jahren	30 Jahren	100 Jahren	300 Jahren	600 Jahren
Sr+Cs	25,6	16	3,1	0,021	$2,6 \cdot 10^{-5}$
^{135}Cs	$4,8 \cdot 10^{-6}$	$4,8 \cdot 10^{-6}$	$4,8 \cdot 10^{-6}$	$4,8 \cdot 10^{-6}$	$4,8 \cdot 10^{-6}$
Am + Cm	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$8,5 \cdot 10^{-4}$	$5,8 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$
Total	25,6	16	3,1	0,022	$4 \cdot 10^{-4}$

Tabelle 1-10: Wärmeleistung der Fraktion Cs-Sr

Nuklide	Wärmeleistung (W/l) nach			
	10 Jahren	30 Jahren	100 Jahren	300 Jahren
Seltene Erden	1,4	0,23	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$9,7 \cdot 10^{-5}$
Am + Cm	$8 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$
Total	1,4	0,23	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$

Tabelle 1-11: Wärmeleistung der Fraktion Seltene Erden

Nuklide	Wärmeleistung (W/l) nach			
	10 Jahren	30 Jahren	100 Jahren	300 Jahren
^{125}Sb	$5,7 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	-	-
^{126}Sn	$5,4 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-5}$	$5,4 \cdot 10^{-5}$	$5,4 \cdot 10^{-5}$
$^{106}\text{Ru}/^{106}\text{Rh}$	0,18	$1,8 \cdot 10^{-7}$	-	-
Seltene Erden	$4,7 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-5}$	$7,6 \cdot 10^{-6}$
Am + Cm	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$
Total	0,28	$8,8 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$

Tabelle 1-12: Wärmeleistung der Fraktion Spaltprodukte

1.8 Inventarübersicht

Eine zusammenfassende Übersicht über das für die Endlagerung vorgesehene Inventar ist in der Tabelle 1-13 gegeben.

Bezeichnung	Einheit	Verfestigte Schlämme	Fraktionen nach der Wiederaufarbeitung *)		
			Cs+Sr	Seltene Erden	Spalt- produkte
Berechnetes Volumen der verfestigten Abfälle	t m ³	1.800 600	1.148 348	950 250	1.095 288
Spezifische Wärmeleistung nach 30 a Lagerung der Schlämme 50 a Lagerung des Kernbrennstoffes	W/l W/l	0,1 -	- 9,3	- 0,1	- 7x10 ⁻⁴
Daten der Abfallbehälter - Durchmesser, Höhe, Wandstärke - Abfallvolumen je Behälter - Abfallmenge je Behälter	mm l kg	600/1000/7 200 600	450/1000/7 80 264	600/1000/7 200 760	600/1000/7 200 760
Behälter - Gesamtanzahl - Jährliche Anlieferung	Stck.	3.000 200	4.350 290	1.250 85	1.440 100
Wärmeleistung der Abfallgebinde	W/lfd. m	20	744	20	0,14
Spezifische Wärmeleistung der Gebinde - Nach 30 Jahren Zwischenlagerung - Nach 50 Jahren Zwischenlagerung	W/l	0,1 -	16 9,3	0,23 0,1	8,8x10 ⁻⁴ 7x10 ⁻⁴
Spezifische Aktivität nach 30 Jahren	Ci/l	ca. 30	ca. 2100	ca. 40	ca. 0,2

*) aus der Wiederaufarbeitung von 9.000 t ausgedienter Brennelemente der Reaktoren WWER-1000

Tabelle 1-13: BChK - Übersichtsdaten des Endlagerinventars

2 STANDORTCHARAKTERISIERUNG

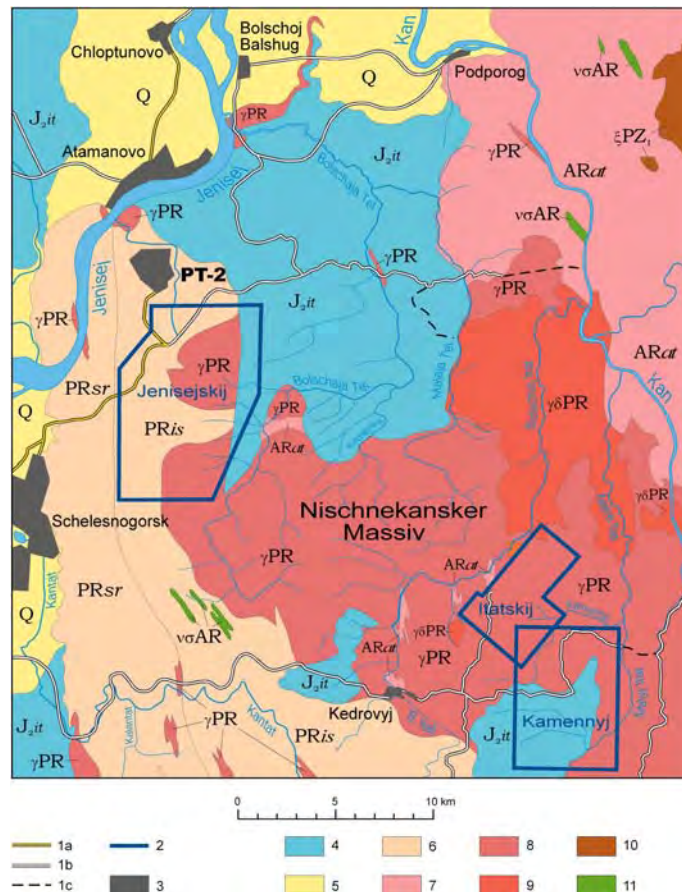
2.1 Geographische Lage, Topographie und Hydrologie des Untersuchungsgebietes

Das für die Untersuchungen zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen Granitformationen ausgewählte Nishnekansker Granitoidmassiv befindet sich im Süden Zentralsibiriens, im südlichen Bereich des Gebietes Krasnojarsk unweit der Stadt Shelesnogorsk im Umfeld des Bergbau-Chemischen Kombines (Abb. 2-1 und 2-2). Die Stadt Krasnojarsk liegt etwa 75 km südwestlich des Untersuchungsgebietes.



Abbildung 2-1: Geographische Lage des Untersuchungsgebietes (Krasnojarsk – rot umrandet)

In diesem Gebiet erfolgt seit 1993 die Suche nach einem Standort für die unterirdische Endlagerung radioaktiver Abfälle des BChK [Anderson et al. 1998]. Unter Zugrundelegung von photogeologischen, geomorphologischen und strukturell-tektonischen Bewertungskriterien sowie von Untersuchungsergebnissen aus analogen geologischen Bildungen und von internationalen Erfahrungen bei der Standortauswahl wurden ungeeignete geologische Einheiten ausgeschlossen und durch schrittweise Reduzierung der potenziell für diese Zwecke nutzbaren Flächen zwei Untersuchungsgebiete für die Detailerkundung ausgewählt. Das Gebiet „Verchne-Itatskij“, das die beiden Teilgebiete „Itatskij“ und „Kamennyj“ enthält, liegt zwischen dem Jennissej und dem Kan, genauer zwischen den Flüssen Bolshoj Itat und Malyj Itat, beides linksseitige Zuflüsse des Kan. Das Gebiet „Jennissejskij“ ist in einer Entfernung von ca. 5 km vom BChK östlich des Jennissej platziert (Abb. 2-2).



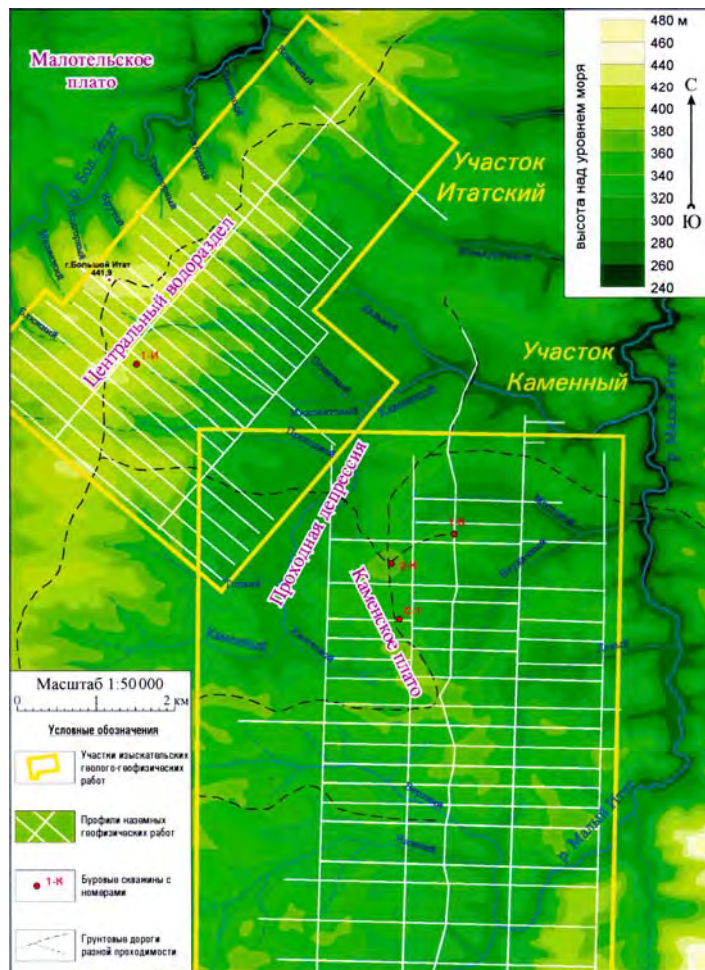
Symbole: 1 – Strassen (a – asphaltiert, b – befestigt, c – unbefestigt), 2 – Grenzen der Untersuchungsgebiete, 3 – Ortschaften, 4 – jurassische Sedimente, 5 – quartäre Ablagerungen, 6 – proterozoische Metamorphite, 7 – archaische Metamorphite, 8 – Nishnekansker Granitoidkomplex, 1. Intrusionsphase, 9 – Nishnekansker Granitoidkomplex, 2. Intrusionsphase, 10 – paläozoische alkalische Magmatite, 11 – archaische basische Gänge

Abbildung 2-2: Lage der detailliert bezüglich ihrer Eignung als Standorte für eine unterirdische Endlagerung radioaktiver Abfälle analysierten Gebiete „Verchne-Itatskij“ („Kamennyj“ und „Itatskij“, beide rechts unten) und „Jennissejskij“ (Mitte links) auf der schematisierten geologischen Karte des Umfeldes des Bergbau-Chemischen Kombines Shelesnogorsk (nach: Anderson et al. 2001)

Das bis Ende 2001 detailliert analysierte „Verchne-Itatskij“-Territorium („Itatsker Anhöhe“) ist durch ein hügelig-welliges, geglättetes Relief mit relativ geringen Höhendifferenzen (100 bis 250 m) charakterisiert (Abb. 2-3). Vom Jennissej wird das Gebiet durch den Atamanovsker Höhenzug abgetrennt, dessen höchstgelegener Punkt 573 m NN erreicht. Die relativ ebenen, intensiv mit Taiga bewaldeten Wasserscheiden zwischen den Flüssen Malyj Itat und Bolshoj Itat erreichen absolute Höhen von bis zu 480 m NN. Die Flusstäler sind bis zu 150 m tief in das Relief eingeschnitten.

Das Relief wurde durch Erosions- und Denudationsprozesse abgeflacht (siehe auch Kap. 2.3). Die mittlere Erosionsgeschwindigkeit der Flüsse liegt im Untersuchungsgebiet bei 0,0135 mm/a, die durchschnittliche Denudationsgeschwindigkeit bei 0,0171 mm/a [Zuev et al. 2000].

Bedingt durch das Auftreten von nur schwach neotektonisch aktiven Störungszonen ist das Gebiet zwischen Jennissej und Kan durch ein stufenartiges Oberflächenrelief mit relativ geringen vertikalen Verschiebungen der einzelnen Krustenblöcke gegeneinander charakterisiert.



gelb umrandet: Gebiet „Kamennyj“ – Mitte unten, Gebiet „Itatskij“ – links oben, Höhenangaben (rechts oben) in Meter NN, rote Punkte: Erkundungsbohrungen 1-I (Itatskij) und 1-K, 2-K, S-1 (alle Kamennyj), schwarz gestrichelt: Strassen befestigt und unbefestigt

Abbildung 2-3: Topographische Karte des „Verchne-Itatskij“- Gebietes mit Angaben zur Lage der geophysikalischen Messprofile und Erkundungsbohrungen

Der räumliche Verlauf des Flusssystems wird vor allem durch das Auftreten und die Vernetzung sowie die lithologische Ausbildung von Störungszonen und die neotektonische Entwicklung der Region bestimmt. Die stark mäandrierenden Flussläufe passen sich in ihrer Orientierung den sich kreuzenden Störungssystemen an („tektonische Mäandrierung“).

Bei durchschnittlichen jährlichen Niederschlägen von ca. 550 mm führen die jährlichen Evapotranspirationsverluste von 480 bis 500 mm sowie die hydraulischen Eigenschaften der oberflächennahen Bodenschichten (Kap. 2.5.3) zu einem relativ geringen Abfluss von Oberflächenwässern zwischen 2,5 bis 3,0 l/(s km²) bei den proterozoisch-archaischen Metamorphiten und 3,2 bis 4,0 l/(s km²) im Verbreitungsgebiet des Nizhnekansker Granitoidkomplexes [Anderson et al. 1993].

Der Grundwasserspiegel wiederholt in geglätteter Form das Relief. Im Gebiet der Wasserscheiden befindet er sich etwa 20 bis 30 m unter der Geländeoberkante, während er in den Flusstälern etwa in einer Tiefe von 2 bis 10 m beobachtet wird.

Aus hydrologisch-geomorphologisch-strukturgeologischen Gründen sind die im Untersuchungsgebiet existierenden Wasserscheiden geeignete Standorte für das Abteufen von Schächten zur Errichtung des unterirdischen Endlagers. Die Wasserscheiden weisen das am wenigsten gegliederte Relief auf und werden als stabile Blöcke nur wenig von den randlich verlaufenden Störungszonen beeinflusst. Die Flusstäler sind abgesehen von möglichen Gefährdungen durch Hochwasser auch durch die Bindung vieler Flussverläufe an Zerrüttungs- und Kataklysebereiche und durch den aufsteigenden Charakter der Grundwässer in diesen Bereichen nicht geeignet.

2.2 Klimatische Bedingungen

Das Untersuchungsgebiet ist durch ein stark kontinentales Klima und extreme Temperaturunterschiede zwischen den Winter- und Sommerperioden von bis zu 65 °C gekennzeichnet. Die langjährige durchschnittliche Juli-Lufttemperatur beträgt 18,4 °C, während die mittlere Lufttemperatur im Januar bei –15,8 °C liegt. Es gibt keinen ewigen Frostboden im Untersuchungsgebiet. Der auf das Meeresniveau bezogene Luftdruck schwankt im Jahresverlauf zwischen 992,1 hPa im Februar und 974,8 hPa im Juli (Tabelle 2-1).

Die Intensität der Niederschläge im Gebiet Krasnojarsk variiert jahreszeitlich, wobei Schwankungen zwischen 12,4 mm und 81,2 mm pro Monat gemessen wurden (Abb. 2-4). In den Monaten April bis Oktober gehen etwa $\frac{3}{4}$ der Jahresniederschlagsmenge von im Mittel 540 bis 560 mm nieder (langjähriger Mittelwerte der Wetterstation „Bogunaj“, die etwa 35 km östlich von Shelesnogorsk am rechten Ufer des Kan liegt). Die Niederschläge weisen eine geringe Mineralisation (im Mittel 11,9 mg/l) und einen $\text{Cl}^- - \text{HCO}_3^- - \text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$ -dominierten Chemismus sowie pH-Werte zwischen 5,4 und 7,5 auf. Einen Überblick zur chemischen Zusammensetzung der im Gebiet des Nizhnekansker Massivs auftretenden Niederschlagswässer, Flüsse und Quellen gibt Tabelle 2-2.

Temperatur													
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Temperatur (°C)	-15.8	-15.1	-7.2	1.1	9.3	15.9	18.4	15.2	8.8	1.2	-8.4	-14.2	0.8
Standardabw. (°C)	4.0	4.3	3.1	2.1	1.6	1.4	1.2	1.1	1.6	2.2	4.2	4.1	
#Mittelungsjahre	43	44	42	40	41	41	40	37	40	39	41	42	
Mittelungszeitraum: 1951-1994													
Niederschlag													
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Niederschlag (mm)	16.2	12.4	13.0	27.7	44.3	57.5	81.2	70.2	42.0	37.7	34.2	24.2	460.6
Standardabw. (mm)	8.8	8.6	7.4	14.7	21.0	27.2	37.8	31.3	18.5	18.7	18.5	11.3	
# Mittelungsjahre	43	43	43	40	41	42	40	37	41	39	42	42	
Mittelungszeitraum: 1951-1994													
Luftdruck													
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	
Stationsdruck (hPa)	991.7	992.1	985.6	984.4	980.4	977.1	974.8	977.9	982.0	986.9	989.1	991.5	
Standardabw. (hPa)	3.4	4.1	15.5	3.1	1.7	1.5	1.3	1.2	6.2	2.2	3.7	3.9	
# Mittelungsjahre	23	23	23	20	21	22	21	17	21	20	21	22	
Mittelungszeitraum: 1971-1994 Fehlwerte: 2000. bzw. 999.													

Tabelle 2-1: Klimatische Bedingungen im Gebiet Krasnojarsk

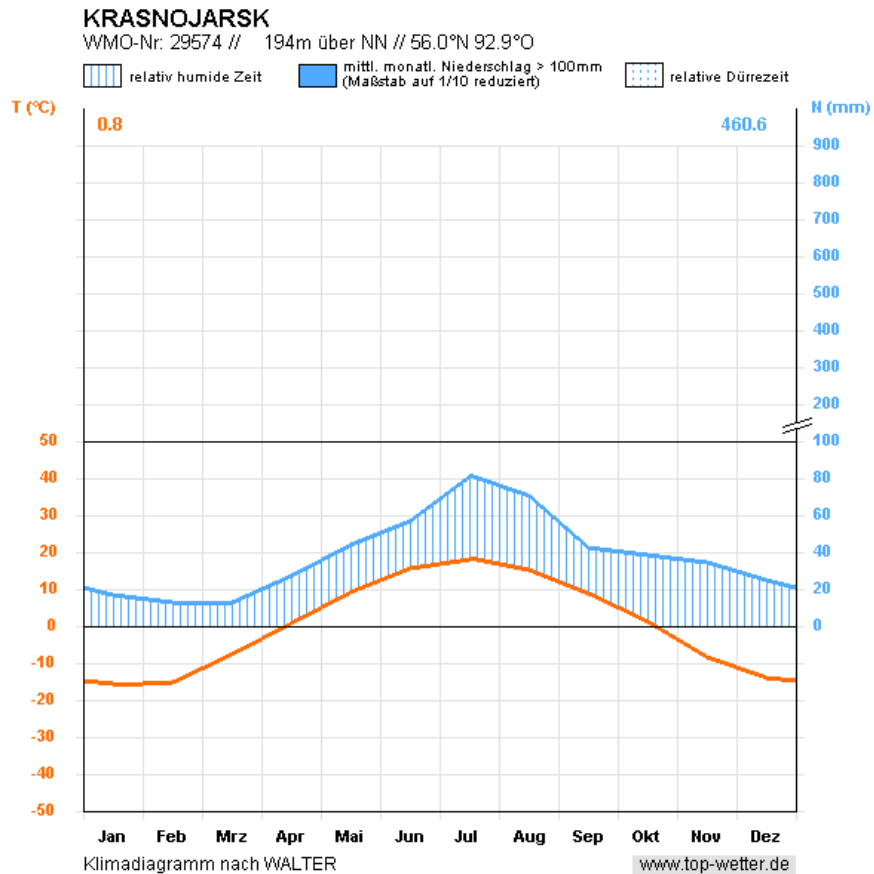


Abbildung 2-4: Langjährige Mittelwerte von Temperatur, Niederschlag und Luftdruck in der Region Krasnojarsk (Quelle: www.klima-info.de/klimadiagramme/asien)

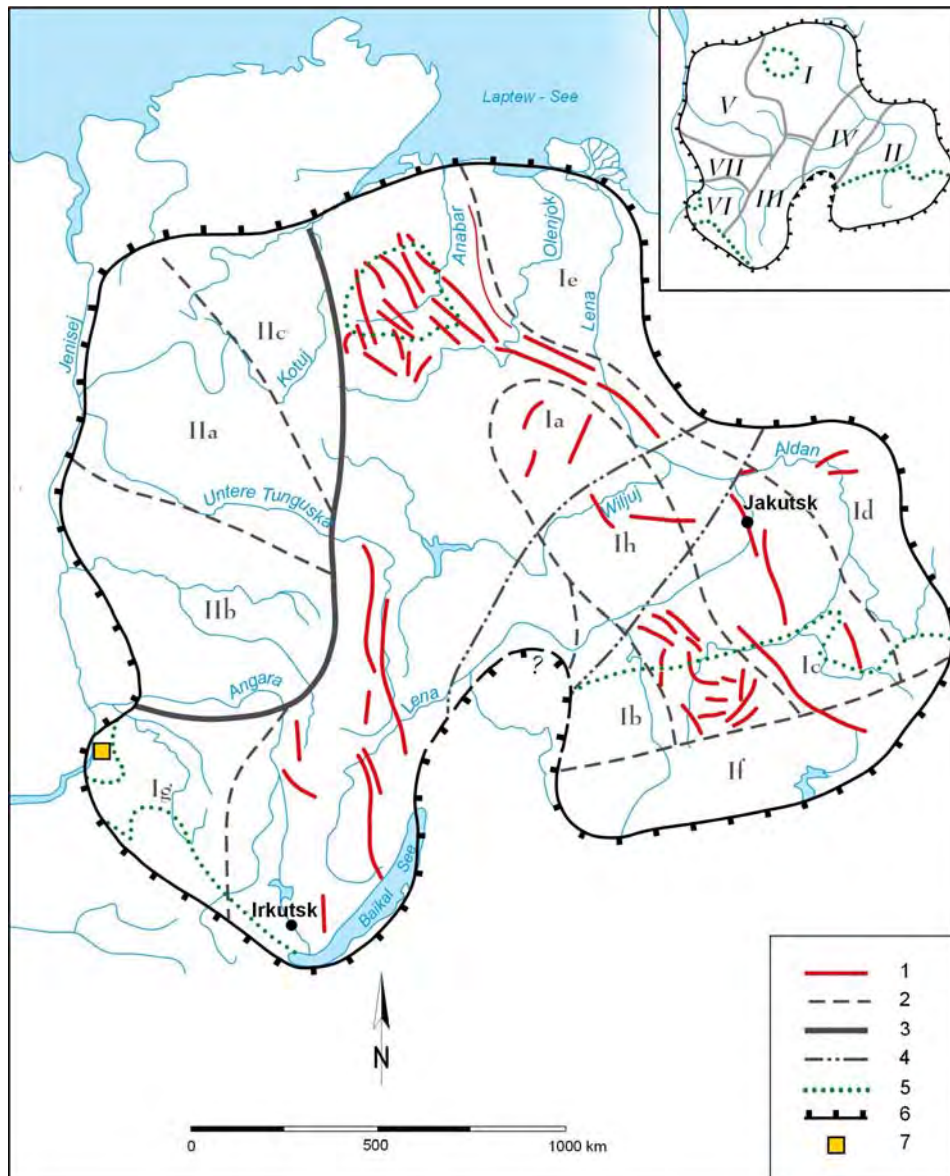
Die im Untersuchungsgebiet festgestellten signifikanten Unterschiede zwischen den Temperaturen der Luft und der Flüsse [Zuev et al. 2000] deuten auf einen beträchtlichen Anteil an Grundwasserzufluss in das Vorflutersystem. Der relativ hohe Anteil an Grundwasserspeisung der Zuflüsse des Malyj Itat und Bolshoj Itat ist auf ein funktionierendes System der Grundwasserzirkulation innerhalb der sedimentären Überdeckung und der Verwitterungskruste der Granitoide zurückzuführen (siehe Kap. 2.6).

Parameter	Atmosphärische Niederschläge	Flüsse	Quellen
T _{Wasser} , °C	9,4	9,3	8,2
Eh, mV	+ 208,7	+ 135,1	+ 80
pH	6,5	7,9	7,3
CO ₂ , mg/l	2,8	8,2	19,7
Fe gesamt, mg/l	0,00	0,03	0,9
Fe ³⁺ , mg/l	0,00	0,03	0,4
Fe ²⁺ , mg/l	0,00	0,00	0,5
NH ₄ ⁺ , mg/l	0,5	0,03	0,3
NO ₂ ⁻ , mg/l	0,00	0,00	0,00
HCO ₃ ⁻ , mg/l	5,7	174,9	141,2
SO ₄ ²⁻ , mg/l	0,3	0,7	3,1
Cl ⁻ , mg/l	2,0	3,0	2,7
Gesamthärte, mg-Äquiv/l	0,1	2,8	2,4
Ca ²⁺ , mg/l	1,3	45,1	39,6
Mg ²⁺ , mg/l	0,2	7,0	5,5
Na ⁺ + K ⁺ , mg/l	1,8	3,2	1,2
HCO ₃ ⁻ , mg-Äquiv%	60,6	96,3	92,3
SO ₄ ²⁻ , mg-Äquiv%	3,0	0,7	4,2
Cl ⁻ , mg-Äquiv%	36,4	3,0	3,5
Ca ²⁺ , mg-Äquiv%	42,9	75,2	77,5
Mg ²⁺ , mg-Äquiv%	9,3	20,2	20,6
Na ⁺ + K ⁺ , mg-Äquiv%	47,8	4,6	1,9
Gesamtmineralisation, mg/l	11,9	233,9	194,5
Leitfähigkeit, µSi	7,8	230,2	157,4
Abdampfdruckstand, mg/l	8,9	146,5	123,9
Oxydierbarkeit, mg/l	1,9	8,3	14,4

Tabelle 2-2: Chemische Zusammensetzung der Niederschläge, Flüsse und Quellen im Gebiet des Nizhnekansker Granitoidmassives (nach: [Zuev et al. 2000])

2.3 Regionalgeologische Position und geologische Entwicklung des Gebietes um Zheleznogorsk

Beide auf ihre Eignung zur HAW-Endlagerung detailliert analysierten Gebiete sind Bestandteile des Kansker-Prisajansker Blockes bzw. der Angara-Kansker Scholle im südwestlichen Abschnitt der vorwiegend aus präkambrischen Gesteinen zusammengesetzten Jennissejsker Gebirgskette [Dokembrijskaya geologija SSSR, 1988]. Unter regionalgeologischen Gesichtspunkten gehört dieses Territorium zum südwestlichen Randbereich der Sibirischen Plattform (Abb. 2-5 und 2-6). Die Jennissejsker Gebirgskette stellt eine schollenartige Heraushebung des sehr alten, baikalidischen, d. h. vor mehr als 1 Mrd. Jahre entstandenen Fundamentes der Sibirischen Plattform dar. Der bereits präkambrisch konsolidierte stabile Krustenblock wurde in der Folgezeit nur schwach tektonisch überprägt.

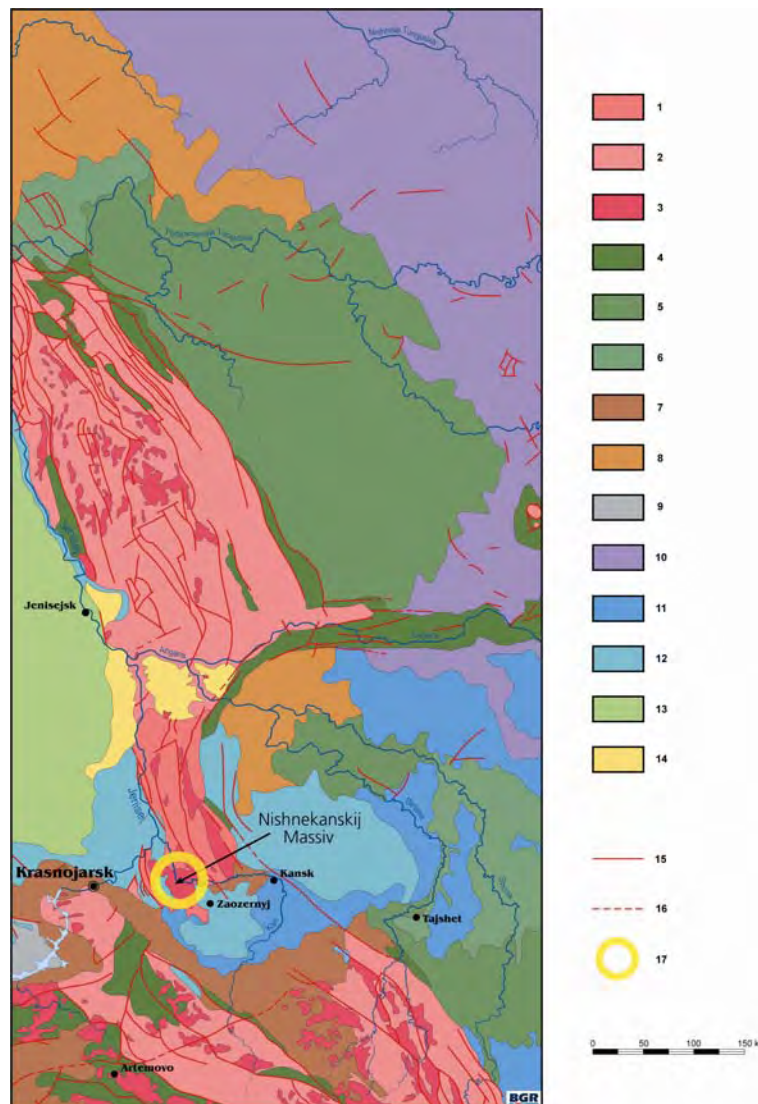


Großes Bild: I – II: große präkambrische Blöcke (I – Aldan-Anabar-Angara-Block: Ia – Olekminsker, Ib – West-Aldan, Ic – Timpiono-Dscheltulinsker (Ost-Aldan), Id – Batomgsker, Ie – Olenjoksker, If – Stanovojsker, Ig – Taseevsker; II – Tungussker Block: IIa – Nord-Tungussker, IIb – Süd-Tungussker, IIC – Kotyjsker); Ih – Viljujsker phanerozoischer Block;

Symbole: 1 – Achsen von Magnetanomalien großer Intensität, 2 – Grenzen zwischen kleineren präkambrischen Krustenblöcken, 3 – Grenzen zwischen den großen präkambrischen Krustenblöcken, 4 – Grenzen des phanerozoischen Blockes, 5 – Grenzen der Oberflächenausbisse von präkambrischen kristallinen Gesteinen, 6 – Grenzen der Sibirischen Plattform (nach L. E. Schustova und V. K. Pjatnizkij), 7 – Untersuchungsgebiet (Nischnekansker Granitoidkomplex)

Ausschnitt rechts oben: I – Anabarsker Antiklinale, II – Aldansker Antiklinale, III – Angara-Lena-Antiklinale, IV – Viljujsker Synklinale, V – Tungussker Synklinale, VI – Sajan-Jenisejsk-Synklinale, VII – Markinsker Gebirgssattel (nach V. K. Pjatnizkij)

Abbildung 2-5: Lage des Untersuchungsgebietes innerhalb der Blockstruktur des präkambrischen Fundamentes der Sibirischen Plattform (aus: [Dokembrijskaja geologija SSSR, 1988])



Symbol: 1 - archaische Gesteine („Dzheltulinsker Serie“ und Analoga), vereinzelt früh- bis spätproterozoische Gesteine und archaische basische/ultrabasische und saure Intrusiva, z. T. überdeckt von karbonischen und neogenen Sedimenten, 2 - früh- bis spätproterozoische (inklusive riphäische und vendische) Gesteine mit zahlreichen basisch-ultrabasischen bis sauren Intrusivgesteinen, 3 - granitoide Intrusionen überwiegend spätproterozoisch-frühkambrischen oder devonischen Alters, 4 - kambrische Gesteine, z. T. Gesteine ordovizischen Alters, 5 - überwiegend spätkambrisch-ordovizische Gesteine mit zahlreichen triassischen Gabbroid-Vorkommen, 6 - überwiegend silurische Gesteine, mit T₁-Gabbroiden und untergeordnet ordovizischen Sedimenten, 7 - meist devonische Sedimente und Vulkanite, untergeordnet karbonische Ablagerungen, 8 - devonisch-karbonische, untergeordnet permische Gesteine mit zahlreichen T₁-Gabbroiden, 9 - karbonische Sedimente, untergeordnet Devon, 10 - überwiegend triassische Vulkanite basischer Zusammensetzung, mit T₁-Gabbroid-Intrusionen und karbonisch-permischen Ablagerungen sowie vereinzelt Jura- und Neogen-Vorkommen, 11 - frühjurassische Sedimente, lokal in Kombination mit karbonisch-permischen Gesteinen, 12 - Sedimente des mittleren Jura (hJ₂), 13 - vorwiegend Sedimente der oberen Kreide, untergeordnet K₁- und N-Ablagerungen, 14 - Neogen- bzw. Paläogen-Neogen-Ablagerungen, 15 - oberflächlich nachgewiesene Störungszonen, 16 - vermutete Störungszonen, 17 - Untersuchungsobjekt (Nishnekansker Granitoidkomplex)

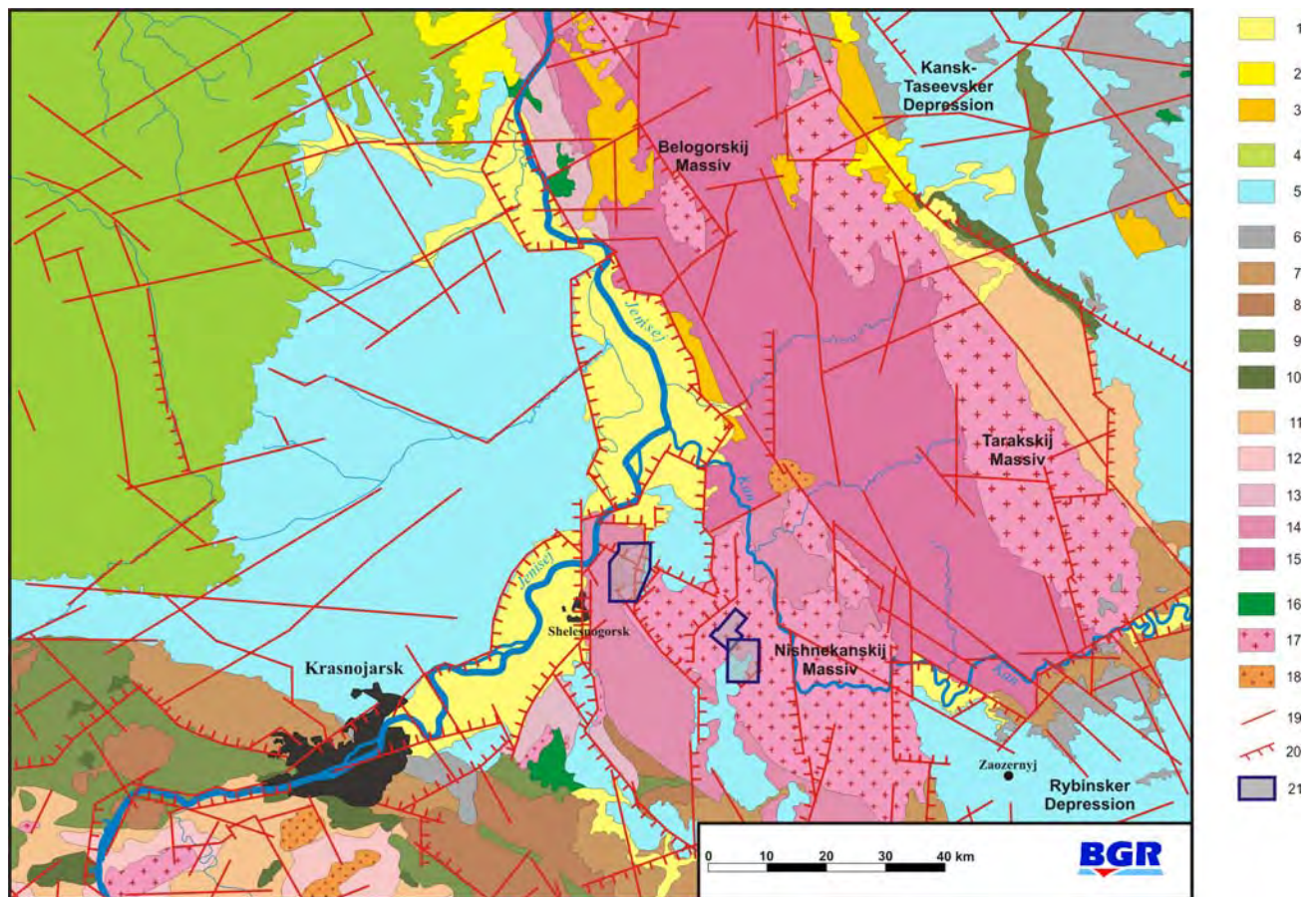
Abbildung 2-6: Regionalgeologische Position des Nishnekansker Granitoidkomplexes im Südwestteil der Sibirischen Plattform (gezeichnet auf der Grundlage der „Geologischen Karte der UdSSR und angrenzender Aquatorien“ im Maßstab 1 : 2 500 000)

Der aus hochmetamorphen und magmatischen archaisch-proterozoischen Gesteinen zusammengesetzte Ausbiss des kristallinen Grundgebirges wird im Gebiet Krasnojarsk nur lokal randlich von jüngeren Deckgebirgsablagerungen überdeckt. Nach Westen hin tauchen die metamorphen Gesteine unter den bis zu 2500 m mächtigen mesozoisch-känozoischen sedimentären Deckschichten der Westsibirischen Platte ab. Südlich und südöstlich des Untersuchungsgebietes befindet sich das epiplattforme, kompliziert geologisch aufgebaute Orogen des Ostsajans. Diese geologische Einheit setzt sich aus in Faltenzonen kaledonischen Alters positionierten präkambrischen Massiven, diskordant aufliegenden vulkanogenen und klastischen Gesteinen des Riphäikums, vendischen bis kambrischen Karbonaten sowie aus intramontanen Becken mittel- und jungpaläozoischen Alters zusammen [Khain 1994]. Der Jennissejsker Höhenrücken ist vom Ostsajan und von der Westsibirischen Platte durch ein System von mächtigen, $\pm$ parallelen, submeridionalen Tiefenbruchzonen abgetrennt (Abb. 2-6 und 2-7).

Die Gesteine des Südteils der Jennissejsker Gebirgskette wurden im Verlaufe der baikalidischen Orogenese, d. h. vor ca. 1 Mrd. Jahren, hochmetamorph überprägt und blockweise gemeinsam mit syn- und posttektonisch eingedrungenen spätproterozoischen Granitoiden in höhere Krustenniveaus angehoben. Abgesehen von wenigen kurzzeitigen Unterbrechungen war das für die Endlagerung vorausgewählte Territorium seit dem Beginn des Paläozoikums Abtragungsgebiet. Der Abtransport des erodierten Gesteinsmaterials erfolgte überwiegend in südlicher Richtung. Die dadurch im Ostsajan sedimentierten spätproterozoisch-paläozoischen Ablagerungen wurden im Verlaufe der kaledonischen und herzynischen Tektogenesen kompliziert verfaltet, deformiert und herausgehoben. Lediglich in jurassischer Zeit, also vor ca. 200 bis 135 Millionen Jahren, kam es im Umfeld des Untersuchungsgebietes zu deutlichen Absenkungen bzw. Blockverschiebungen entlang von Störungszonen. Dies führte zur Entstehung flachmariner Becken und zu einer relativ großflächigen, differenzierten Verteilung von Jura-Sedimenten. Dabei handelt es sich überwiegend um Argillite mit geringmächtigen Zwischenschichten von Sandsteinen, Aleurolithen und kohlehaltigen Sedimenten.

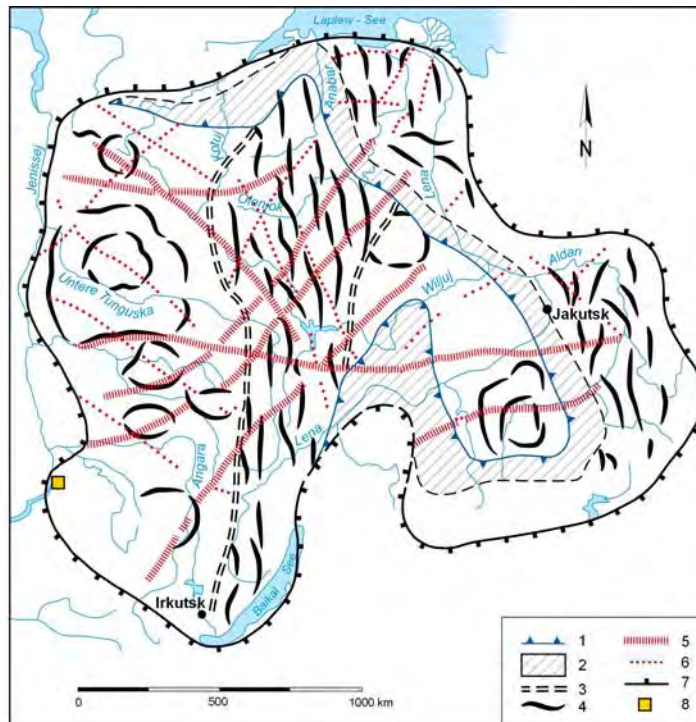
Beginnend mit der Kreidezeit kam es zur intensiven Denudation (flächenhaften Erosion) und Einebnung des Reliefs sowie zur Entwicklung einer bis 60 m mächtigen Verwitterungskruste. Im Ergebnis von seit dem Pliozän ablaufenden epiplattformen orogenen Bewegungen bildete sich die heute zu beobachtende Blockstruktur heraus. Durch die neotektonischen Bewegungen und die daran gebundenen Erosionsprozesse erfolgte die Bildung eines flachhügeligen Reliefs und der Flussterrassen. Der Jennissej ist seit dem späten Pliozän, d. h. in ca. 2 Millionen Jahren, etwa 160 bis 360 m in das Gestein erodiert und hat in etwa 700 000 Jahren sieben Terrassen ausgebildet [Anderson et al. 1996]. Es gibt im Untersuchungsgebiet keinerlei Anzeichen für quartäre Inlandsvereisungen.

Eine für die unterirdische HAW-Endlagerung positive Besonderheit des Untersuchungsgebietes ist das Fehlen von Anzeichen intensiver kaledonischer, herzynischer, kimmerischer und alpidischer Gebirgsbildungsprozesse. Während dieser Orogenesen hat sich die von mächtigen Störungszonen eingerahmte Angara-Kansker Scholle als starrer Krustenblock verhalten. Nur in den Randgebieten der Jennissejsker Gebirgskette lassen sich vereinzelt Beeinflussungen durch die Faltungs- und Metamorphoseprozesse in benachbarten geologischen Einheiten feststellen [Anderson et al. 1996]. Auch die ansonsten häufig auf der Sibirischen Plattform beobachteten Riftstrukturen und der daran gebundene Trappvulkanismus fehlen in der Region um Shelesnogorsk (Abb. 2-8) [Malitsch et al. 1989], [Dolginow & Kropatschjow 1994]).



Symbol: 1 – quartäre Sedimente, 2 – neogene Sedimente, 3 – paläogene Ablagerungen, 4 – kretazische Tone, Sande und Kiese, 5 – jurassische Sedimente, 6 - karbonische Sedimente, 7 – mittel- bis spätdevonische Ablagerungen, 8 – frühdevonische Konglomerate und Sandsteine, 9 – ordovizische Effusiva, 10 – frühkambrische Kalksteine, Dolomite und Mergel, 11 – Sedimente des Vendiums, 12 - spätproterozoische Phyllitoide und Diabasporyphrite, 13 – frühproterozoische Metamorphite, 14 – proterozoische Gesteine, amphibolitfaziell überprägt, 15 – archaische Gesteine, granulitfaziell überprägt, 16 – basische Intrusivkomplexe, 17 – archaische bis spätproterozoische Granitoidkomplexe, 18 – Alkaligranite bis Syenite, 19 - Aufschiebungen bzw. Abschiebungen, 20 – Überschiebungen und Störungszonen unklarer Kinematik, 21 – Untersuchungsgebiete „Verhne-Itatskij“ und „Jennissejskij“

Abbildung 2-7: Lage der Untersuchungsgebiete „Verhne-Itatskij“ und „Jennissejskij“ am Südwestrand der Sibirischen Plattform, gezeichnet auf der Grundlage der Geologischen Karte des Gebietes im Maßstab 1 : 750 000



Symbol: 1 – Grenze des unterarchaischen Grundgebirges, 2 – im Frühproterozoikum thermotektonisch überprägte Zone, 3 – Grenzen der wesentlichen tektonischen Provinzen, 4 – Trends archaischer Strukturen, 5 – Hauptstörungen, 6 – untergeordnete Störungen, 7 – Grenzen der Sibirischen Plattform (nach L. E. Schustova und V. K. Pjatnizkij), 8 – Untersuchungsgebiet (Nishnekansker Granitoidmassiv)

Abbildung 2-8: Position des Untersuchungsgebietes innerhalb der tektonischen Übersichtskarte des Grundgebirges der Sibirischen Plattform (nach Kogan 1979, aus: Dolginow & Kropatschjow 1994)

2.4 Geologische Position und Genese der Nizhnekansker Granitoide

Wie aus der geologischen Karte des Untersuchungsgebietes (Abb. 2-2) hervorgeht, befinden sich die beiden für die unterirdische Endlagerung radioaktiver Abfälle vorausgewählten Gebiete im NE-Teil des Nizhnekansker Granitoidkomplexes („Verchne-Itatskij“) bzw. im Kontaktbereich der Granitoide mit den hochmetamorphen Rahmengesteinen („Jennissejskij“). Das Nishnekansker Massiv erstreckt sich im mittleren Abschnitt des Flusses Kan in NW-SE-Richtung und hat eine Längsausdehnung von 55 km sowie eine Breite zwischen 15 und 25 km. Im SW, S und NW wird der Pluton transgressiv von jurassischen Sedimenten überlagert (Abb. 2-2), wobei die Mächtigkeit der Sedimente 250 m nicht übersteigt. Im heutigen Anschnittsniveau nimmt das Massiv eine Gesamtfläche von etwa 1 000 km² ein. Bei Einbeziehung der Teile, die mit Jura-Sedimenten überdeckt sind, weist der Granitoidkörper unterhalb der quartären Ablagerungen eine Anschnittsfläche von ca. 3 500 km² auf. Nach gravimetrischen Daten hat der Pluton im Zentralteil eine Mächtigkeit ≥ 5 bis 6 km [Valshak 1997], [Anderson et al. 1998]. Demgegenüber ergab die Auswertung der seismischen Messungen eine maximale Mächtigkeit von ca. 2 km.

Die Bildung des granitoiden Intrusivkörpers ist auf spätproterozoische Subduktionsprozesse am SW-Rand der Sibirischen Plattform zurückzuführen. Fluide, die durch die Absenkung ozeanischer Erdkruste unter den Plattenrand freigesetzt wurden, haben zu partiellen Schmelzprozessen in der Unterkruste und zum Aufstieg granitoider Teilschmelzen geführt. Das Nizhnekansker Granitoidmassiv entspricht einem mitteltief intrudierten Batholith, der zum Zeitpunkt des Eindringens vor etwa 920 ± 50 Millionen Jahren [Volobuev & Zukov 1961] durch ein etwa

5 km mächtiges Gesteinspaket (Metamorphite) überdeckt war. Das relativ tiefe Intrusionsniveau, der postorogene Charakter des Plutons und seine Zugehörigkeit zu einem seit etwa 900 Millionen Jahren starren, von mächtigen, plastisch reagierenden Deformationszonen umgebenen Erdkrustenblock (siehe Kap. 2.3 und 2.5) haben zu einer vergleichsweise geringen tektonischen Überprägung und Deformation der granitoiden Gesteine geführt.

Die hochmetamorphen Rahmengesteine des Nizhnekansker Granitoidkomplexes sind archaischen bis frühproterozoischen Alters und liegen in Granulitfazies, z. T. in Amphibolitfazies vor. Die in der „Kansker Serie“ zusammengefassten, bis zu 8 000 m mächtigen archaischen Gesteine werden in die „Atamanov-“ und in die „Kuzeev-Schichten“ unterteilt, die frühproterozoischen in die „Isaevsker“ und die „Serednjansker Folgen“. Unter den, mit den alten Gesteinen Ostsibiriens korrelierenden Metamorphiten überwiegen Biotit-Gneise, Biotit-Granat-Gneise, Quarzite, Amphibolite und kristalline Schiefer [Dokembrijskaja geologija SSSR, 1988].

2.5 Einschätzung der seismischen Aktivität und der neotektonischen Entwicklung der Region

2.5.1 Seismologische Situation in der Region Shelesnogorsk

Für die Auswahl von potenziellen Standorten für Nuklearanlagen ist in Russland der Nachweis fehlender intensiver seismischer Aktivitäten im Umkreis von 200 km um das Objekt herum gesetzlich vorgeschrieben. Der größte Teil der für eine solche Bewertung erforderlichen Ausgangsdaten liegt, nach Informationen von VNIPI Promtehnologii, in Form von Erdbebenkatalogen und aktuellen Messergebnissen der seismischen Erschütterungen in der Region vor, ist aber in den bisher erstellten Untersuchungsberichten nicht ausführlich und seiner Bedeutung entsprechend dargestellt worden (siehe Kap. 2.8). Zusätzlich zum Nachweis seismischer Inaktivität in der Region muss ausgehend von Langzeitsicherheitsüberlegungen im Ergebnis des Standortauswahlverfahrens für ein unterirdisches HAW-Endlager in Magmatiten bzw. Metamorphiten für den eigentlichen Einlagerungsbereich das Vorkommen seismisch aktiver Störungszonen mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden können.

Daten zur Seismizität Sibiriens werden erst seit etwa 250 Jahren erfasst. Die Sibirische Plattform gilt als eine seismisch inaktive Region mit Erdbeben-Magnituden von in der Regel weniger als 5. [Arzhannikov et al. 2004] publizierten unlängst eine Übersicht zu Erdbeben, die seit 1727 im SW-Teil der Sibirischen Plattform stattgefunden haben (Tabelle 2-3).

Erdbeben-Epizentrum	Zeitpunkt	Magnitude
Vercholensk	1910	5,0 ± 0,5
Kirensk	1727	6,25
Kirensk	1827	6,5
Kirensk	1856	5,0
140 km SE Bratsk	26.02.1996	4
	1786	5,4
Cheremchovo	1908	4,4 ± 0,6
Zima-Balagansk	1913	4,7 ± 0,6
Rybnaja Basin	29.08.1892	3,9 ± 0,7
Rybnaja Basin	25.04.1938	4,9 ± 0,5

Tabelle 2-3: Zusammenstellung von Erdbeben im SW-Teil der Sibirischen Plattform (nach: Arzhannikov et al. 2004)

Durch das Krasnojarsker Forschungsinstitut für Geologie und Mineralische Rohstoffe (KNII-GIMS) wurde im Rahmen seiner Umweltmonitoring-Aufgaben ein umfangreiches Programm zur Erfassung von seismischen Bewegungen im Berührungsgebiet der alten Sibirischen Plattform, der jungen Westsibirischen Platte und des mobilen Altaj-Sajan-Gebirges (siehe Abb. 2-6) realisiert. Die systematische Aufzeichnung der seismischen Aktivitäten ergab für die Region Krasnojarsk für den Zeitraum von 1963 bis heute ein vollständiges Fehlen von Erdbeben mit einer Magnitude größer 5 nach der Richter-Skala. Lediglich vereinzelt wurden im Krasnojarsker Gebiet schwache seismische Bewegungen registriert, die auf Erdbeben innerhalb des NW-Teils des Ostsajans (z. B. „Karagansker Erdbeben“ vom 27.10.2000) zurückzuführen waren [Anderson et al. 1998].

Der relativ kurze Beobachtungszeitraum bzw. die erst in jüngster Vergangenheit einsetzende systematische Registrierung von Erdbeben und die z. T. fehlende klare Abgrenzung natürlicher von künstlichen Beben (verursacht durch Abbau von Rohstoffen und Großbauprojekte) lassen nur eine grobe Abschätzung der seismischen Gefährdung des Gebietes um Shelesnogorsk auf der Grundlage statistischer Auswertungen zu. Die vorliegenden Daten sind bezüglich der Intensitäts-, Orts- und Zeitangaben z. T. widersprüchlich. So z. B. taucht das bei [Anderson et al. 1998] genannte Erdbeben vom 10.06.1958, für das im etwa 120 bis 130 km südlich von Krasnojarsk gelegenen Epizentrum eine Magnitude von 6 bis 7 angenommen wurde, nicht im Erdbebenkatalog von [Shebalin & Leydecker 1997] auf. Das Fehlen von Angaben zu den Herdorten und zu den Epizentralintensitäten über historisch lange Zeiträume (als Vergleich siehe z. B. Erdbebenkatalog für Deutschland ab dem Jahre 800 nach [Christi, Leydecker 1998] erschwert statistisch determinierte Aussagen zur Wahrscheinlichkeit des Eintretens von Erdbeben bestimmter Stärke.

Trotz Schwierigkeiten bei der Datenbeschaffung erarbeitete die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit dem „Labor für starke Erdbeben“ am Institut für Physik der Erde der Russischen Akademie der Wissenschaften einen historischen Erdbebenkatalog für das Territorium der ehemaligen Sowjetunion für den Zeitraum 500 Jahre vor Christi bis 1988 [Shebalin & Leydecker 1997]. Tabelle 2-4 enthält auf dieser Datengrundlage basierende Angaben zur Epizentrenlage, Herdtiefe, Stärke (Intensität) und Magnitude der in dieser Zeit im Umfeld der potenziellen Endlagerregion erfassten Erdbeben mit einer Intensität von mehr als 4. Eine ähnliche Datenzusammenstellung auf der Basis des Erdbebenkatalogs des Internationalen Seismischen Zentrums [ISC-Bulletin 2001] ist in Tabelle 2-5 enthalten.

Wie aus Tabelle 2-4 ersichtlich, sind aus historischer Zeit nur wenige Beben im Umkreis von 200 km um den potenziellen HAW-Endlagerstandort bekannt. Ein Beispiel für ein relativ starkes Erdbeben ist das am 25.04.1938 etwa 100 km südlich der Kan-Man-Wasserscheide stattgefundene Erdbeben der Magnitude 5. Eine Auswertung der Datensammlung von [Shebalin & Leydecker 1997] ergab die in Abb. 2-9 und 2-10 dargestellten Verteilungen der Erdbeben im weiteren Umfeld von Krasnojarsk in Abhängigkeit von der Magnitude und Epizentralintensität der Beben.

Die Ergebnisse des Langzeitmonitorings der seismischen Erschütterungen belegen ebenso wie geomorphologische Untersuchungen in der Region (siehe Kap. 2.5.2), dass der potenzielle Endlagerstandort einem stabilen Plattformgebiet mit niedriger seismo-tektonischer Aktivität und geringer Heraushebungstendenz zuzuordnen ist. Aufgrund der geometrisch bedingten schnellen Energieabnahme, d. h. einer drastischen Senkung der Energiedichte bei zunehmender Entfernung vom Epizentrum, schwächen sich die Auswirkungen seismischer Prozesse in benachbarten mobilen Zonen schnell ab. So waren das an den Hauptabbruch des Sajan-Gebirges gebundene „Karagansker Erdbeben“ mit einer Magnitude von 5,2 bis 5,8 im Epizentrum und die Erdbeben im Altaj-Sajan-Gebirge Ende September 2003 im Untersuchungsgebiet maximal mit einer Magnitude von 1,5 bis 4 nach Richter spürbar. Es wurden keinerlei negative Auswir-

kungen auf die zahlreichen ingenieurtechnischen Bauten der Region, wie z. B. auf die Wasserkraftwerke oder Untertageanlagen festgestellt.

Datum	Uhrzeit	Breitengrad	Längengrad	Tiefe (km)	Magnitude	Intensität
1806/08/08	11:00	55.90	92.60	5	3.6	6.0
1858/06/11	06:15	56.00	93.00	10	4.7	6.0
1879/03/27	12:00	52.10	92.50	18	5.6	7.0
1885/07/07		53.50	91.40	16	4.5	5.0
1892/08/29	13:30	55.60	95.50	10	3.9	5.0
1903/05/16	06:18	53.60	92.50	11	4.5	6.0
1905/03/15	17:55:00	52.70	92.60	30	6.1	5.0
1908/06/19		55.90	97.90	15	4.0	5.0
1914/03/13	20:00	57.60	93.20	5	2.6	4.0
1926/08/27		56.00	92.60	5	2.6	4.0
1927/05/10	19:59:27	52.00	88.50	22	5.3	7.0
1938/02/21	13:49:37	52.00	93.50	28	5.4	6.0
1938/04/25	10:13:39	56.90	97.00	22	4.9	5.0
1949/01/09	10:49:38	53.70	89.20	20	4.2	
1952/04/17	09:22:12	52.60	97.00	20	5.0	
1954/11/11	06:23:53	53.00	90.00	20	4.0	
1964/02/29	04:31:40	53.40	91.00	15	4.0	
1964/08/31	13:55:59	53.70	97.30	15	4.0	
1969/10/30	12:17:17	52.57	95.47	20	4.7	
1971/08/24	16:33:20	52.17	91.42	24	5.6	6.0
1971/08/24	16:38:14	52.02	91.32	30	4.0	
1971/10/21	23:07:50	54.19	91.00	12	4.4	5.0
1972/08/31	14:03:15	52.40	95.30	25	5.5	
1972/09/28	12:04:52	52.00	96.43	20	4.0	
1972/09/29	06:21:15	52.38	95.33	20	4.6	
1978/08/03	06:07:33	52.20	96.93	11	5.8	8.0
1982/06/09	13:10:02	54.25	90.46	6	4.1	6.0

Tabelle 2-4: Aus dem Erdbebenkatalog von Shebalin & Leydecker (1997) zusammengestellte Übersicht von Daten zu Erdbeben ab einer Intensität von 4 im Gebiet zwischen 52° bis 60° nördliche Breite und 88° bis 98° östliche Länge (bis zum Jahr 1988 erfaßte Erdbeben, Epizentralintensität nach der 12-stufigen MSK-Skala)

Datum	Uhrzeit	Breitengrad	Längengrad	Tiefe (km)	Magnitude	Intensität
1927/05/10	19:59:20	52.00	88.50	35	5.6	
1928/11/07	18:36:45	52.50	95.00			
1938/04/25	10:14:03	55.00	92.00			
1960/04/27	22:47:42	53.00	97.00			
1964/02/29	04:31:41	53.55	91.00	33	4.7	
1969/10/30	12:17:22	52.35	95.73	33	5.0	
1971/08/24	16:33:21	52.18	91.56	12	5.4	
1971/08/24	16:38:13	52.37	92.20	0		
1971/10/21	23:07:53	54.31	91.22	43	4.7	
1972/02/27	22:15:05	55.05	93.11	39		
1972/08/31	14:03:15	52.36	95.31	21	5.5	
1972/09/28	12:05:00	52.41	95.98	52		
1972/09/29	06:21:20	52.47	95.13	36	4.7	
1973/05/22	02:15:04	52.85	89.54	22		
1978/08/03	06:07:33	52.15	96.94	8	5.2	
1978/08/09	10:17:45	52.14	96.99	33	4.7	
1979/01/29	06:27:30	52.45	97.91	1	4.8	
1981/04/25	15:28:47	54.89	96.90	46	3.1	
1987/09/16	17:57:23	52.16	95.78	10	4.8	
1989/03/21	05:29:37	54.59	90.45	33	4.6	
1989/12/10	19:55:27	55.32	97.76	33	4.1	
1996/01/10	08:14:03	54.08	91.21		3.2	
1996/01/13	13:11:06	54.90	97.17	33	3.7	
1996/05/08	08:30:12	54.39	90.46		3.5	
1997/03/10	13:28:40	54.57	88.78	17	3.7	
1997/11/19	05:15:39	53.36	89.80	32	3.9	
1997/12/02	11:56:13	58.74	89.37		4.0	
1998/12/15	11:19:26	52.66	94.98	44	4.0	
1998/12/26	08:32:10	55.58	92.00	33	4.0	
1999/03/05	10:45:30	54.34	90.70	0	3.0	
1999/11/02	05:09:27	52.74	95.99	10	4.8	
1999/12/31	02:54:44	52.12	93.88	10	3.7	
2000/10/07	08:57:56	52.99	88.47	10	4.2	
2000/10/27	00:08:50	54.82	95.07	10	5.8	
2000/10/27	00:08:54	54.71	95.01	33	5.2	
2000/11/09	06:39:53	53.47	95.12	0	3.9	
2000/11/09	06:40:13	56.22	94.61	33	3.9	
2000/12/01	05:02:55	53.03	96.61	10	4.3	

Tabelle 2-5: Aus dem ISC-Katalog [ISC-Bulletin 2001] zusammengestellte Übersicht von Daten zu Erdbeben im Gebiet zwischen 52° bis 60° nördliche Breite und 88° bis 98° östliche Länge

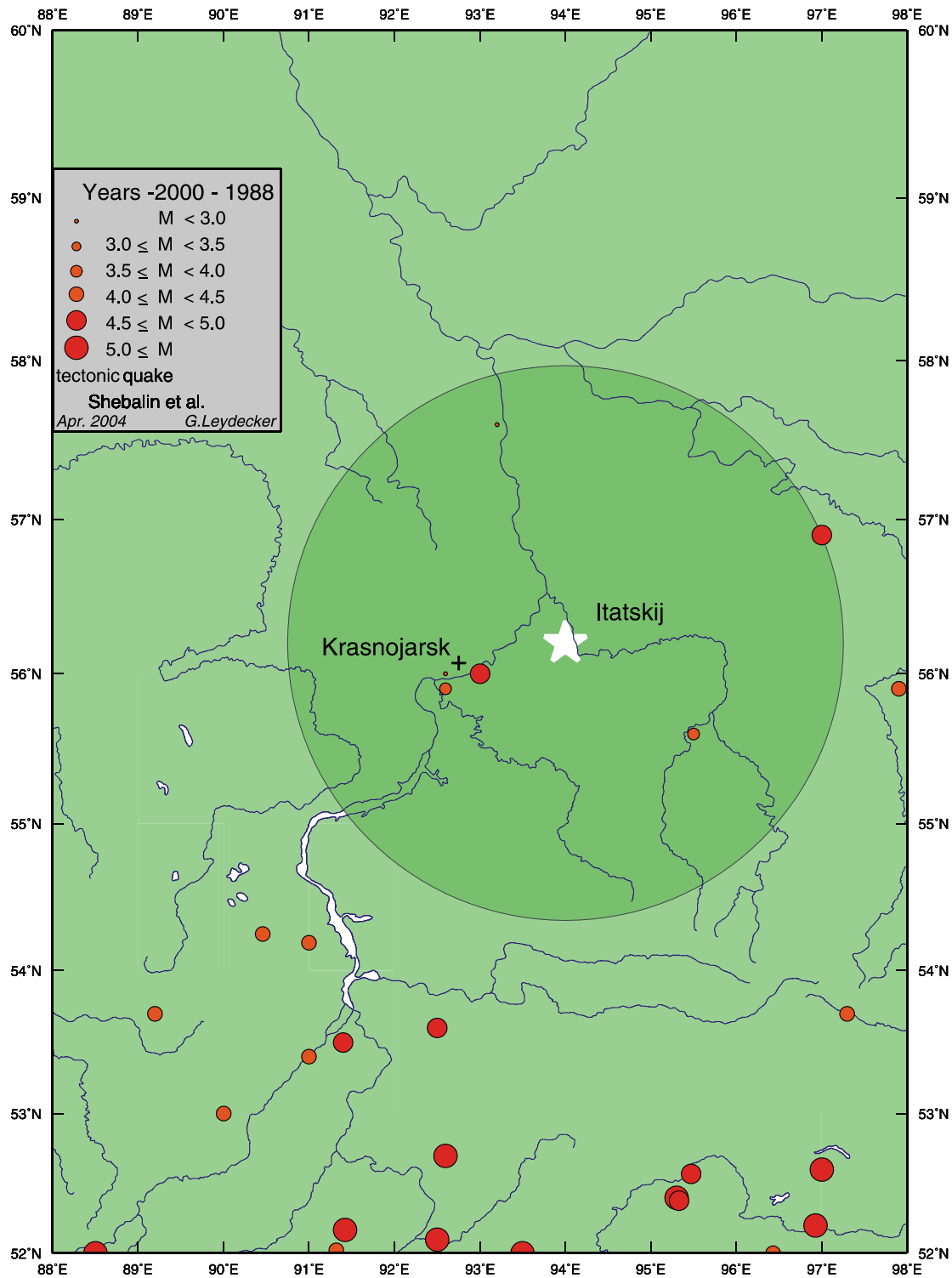


Abbildung 2-9: Verteilung von Erdbeben unterschiedlicher Magnitude im weiteren Umfeld von Krasnojarsk, gezeichnet auf der Grundlage der Datensammlung von [Shebalin & Leydecker 1997]. Der Kreis besitzt einen Durchmesser von 200 km.

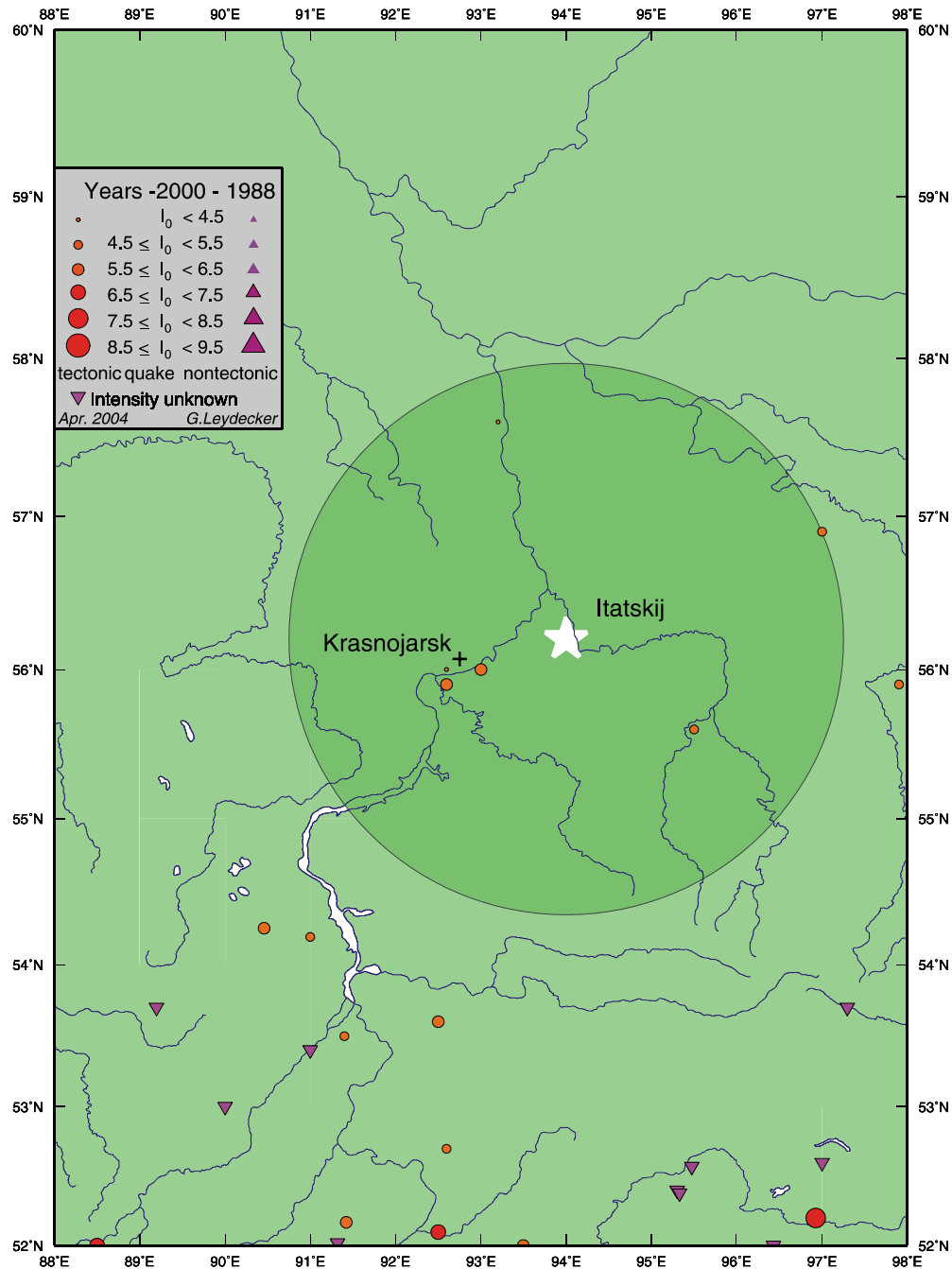
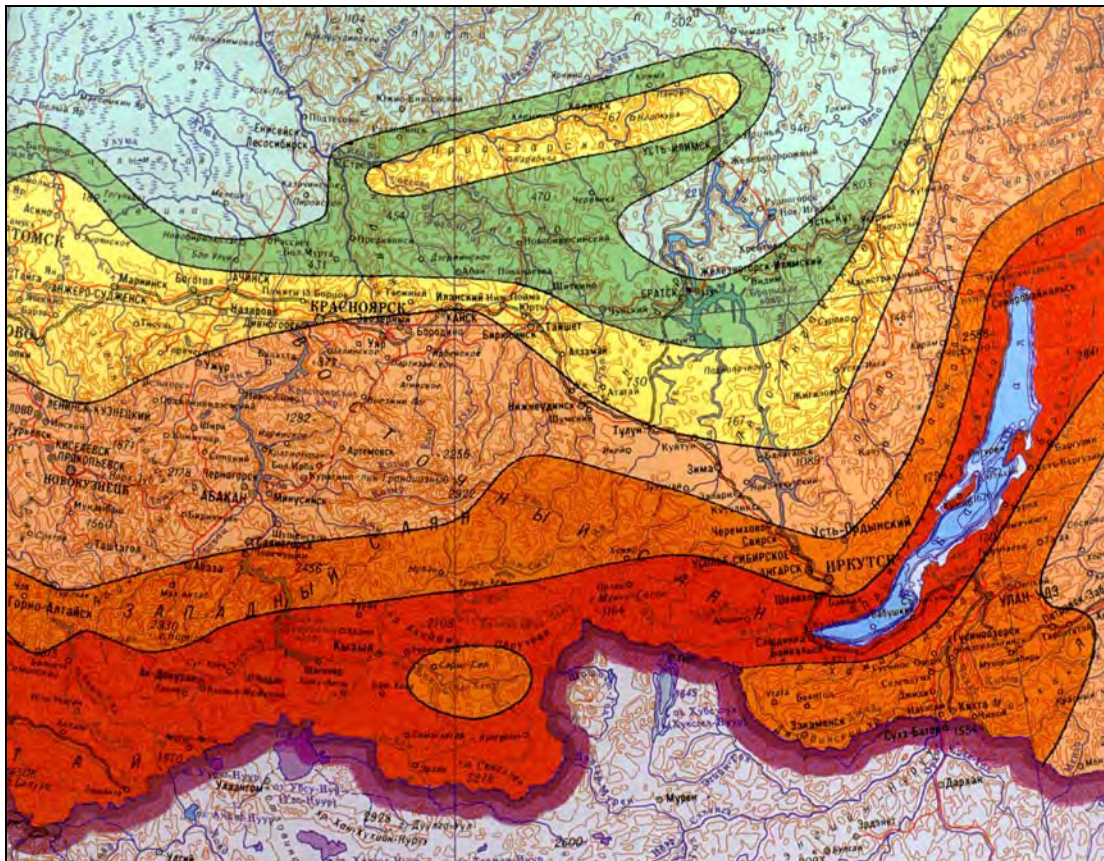


Abbildung 2-10: Räumliche Anordnung von Erdbeben unterschiedlicher Intensität in der Umgebung von Krasnojarsk (Erläuterungen siehe Abb. 2-8, I_0 -Epizentralintensität nach der 12-stufigen Medvedev-Sponheuer-Karnik-Skala, Kreisdurchmesser: 200 km)

Zusätzlich zur kontinuierlichen Messung der seismischen Erschütterungen dient die vom Institut für Physik der Erde der Russischen Akademie der Wissenschaften herausgegebene „Karte der allgemeinen seismischen Gliederung des Territoriums der russischen Föderation („OSR – 97 – S“)“ als unverzichtbare, normativ vorgeschriebene Entscheidungsgrundlage für die Ausweisung von geeigneten Standorten [Morozov et al. 2001]. Ausgehend von der auf dieser Karte vorgenommenen Einteilung des Territoriums der ehemaligen Sowjetunion in erdbebengeographische Einheiten ist das Untersuchungsgebiet durch eine geringe Tendenz zu seismischen Erschütterungen charakterisiert und liegt innerhalb der Kategorie 7 (Abb. 2-11). Dies bedeutet,

dass sich ein Erdbeben der Intensität 7, d. h. ein Erdbeben, das Risse im Verputz und Spalten in den Wänden und Schornsteinen hervorruft, in dieser Region einmal in 5 000 Jahren wiederholen kann.

Alle bekannten Epizentren Zentralsibiriens, wie z. B. die Baikal-Riftzone oder der Süd- und Südostteil des Altaj-Sajan-Gebietes (rot eingefärbte Bereiche in Abb. 2-11), liegen mehrere hundert bis tausend km entfernt (siehe auch Abb. 2-5 bis 2-8). Berechnungen der Auswirkungen von Erdbeben mit einer Magnitude von 8 in diesen Regionen ergaben für das Jennissejsker Gebiet Magnituden von maximal 5 (Morozov, pers. Mitteilung).



Farbgebung: violett – Staatsgrenze Russlands, dunkelrot – Intensität 10 und mehr, orange – Intensität 9, hellbraun - Intensität 8, gelb – Intensität 7, grün – Intensität 6. Die unterschiedlichen Intensitätsangaben bedeuten, dass ein Erdbeben der genannten Intensität in dieser Region eine Periode der Wiederholung von 5000 Jahren aufweist.

Abbildung 2-11: Einordnung des Gebietes um Shelesnogorsk in die „Karte der allgemeinen seismischen Gliederung des Territoriums der russischen Föderation („OSR – 97 – S“)“

2.5.2 Neotektonische Entwicklung des Gebietes um Shelesnogorsk

[Lukina 1996], [Lukina 2001] ermittelte auf der Grundlage einer Analyse der Vertikalverschiebungen der neogenen bis frühquartären Sedimente und Terrassenbildungen eine relativ geringe Hebungsrate des Untersuchungsgebietes. Die Heraushebung der Region im Ergebnis regionaler neotektonischer Prozesse schwankt für unterschiedliche Krustenblöcke im Mittel zwischen 0,051 mm/a im Westen des Untersuchungsgebietes und 0,093 mm/a im östlichen Teil des betrachteten Territoriums. Ausgehend davon prognostizierte [Lukina 2001] für die potenzielle Endlagerregion eine Heraushebung der Grundwasserscheiden von maximal 90 cm in 10 000 a

bzw. von maximal 10 m in 130 000 a sowie eine mittlere Erosionswirkung der Flüsse in 10 000 Jahren von 24 cm im Westteil der Region und 52 cm im Ostteil.

Die Heraushebungsprozesse laufen sehr langsam ab und haben nur minimale Auswirkungen auf die Festigkeits- und hydraulischen Eigenschaften des Gesteinsmassivs. Die vertikalen Verschiebungen erfolgen entlang von mächtigen Störungszonen, d. h. es werden großvolumige Gesteinsblöcke gegeneinander verschoben. Dabei wird das Innere dieser durch Störungszonen begrenzten Gesteinsblöcke, d. h. die potenziellen Einlagerungsbereiche eines unterirdischen Endlagers, nur sehr schwach oder gar nicht deformiert. Für die Einlagerungsbereiche muss das Vorkommen derartiger, neotektonisch aktiver Störungszonen im Ergebnis der Standorterkundung mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.

Die aufgrund geomorphologischer Befunde von [Lukina 2001] postulierten annähernd konstanten Heraushebungsbeträge von deutlich kleiner 1 mm/a seit dem Pliozän kennzeichnen das Gebiet um Shelesnogorsk als stabilen Plattformbereich. Präzise geodätische Messungen zur Bewertung der rezenten uplift-Raten im Bereich der Jennissejsker Gebirgskette [Kolmogorova & Kolmogorov 2004] ergaben im Untersuchungsgebiet, d. h. im äußersten Süden dieser geologischen Einheit, im Unterschied zum Zentralteil dieses Gebirgszuges (zwischen den Städten Jennissejsk, Novaja Jeruda und Jartsevo) mit uplift-Raten bis 10 mm/a, deutlich niedrigere Hebungsbeträge. Bestimmungen der vertikalen Verschiebungen von Messpunkten auf der etwa 450 km langen, E-W-orientierten Verbindungslinie zwischen Krasnojarsk, Kansk und Tajshet (siehe Abb. 2-6) lieferten für das Gebiet um Shelesnogorsk für den Zeitraum 1963 bis 1986 uplift-Raten zwischen 0 und 1,5 mm/a. Die gemessene Hebungstendenz liegt im Umfeld des BChK damit deutlich niedriger als im weiter südwestlich positionierten Altaj-Sajan-Gebiet [Kolmogorova & Kolmogorov 2002].

Gleichzeitig dienten dabei festgestellte uplift-Anomalien in der mit einem Messpunktnetz überdeckten Jennissejsker Gebirgskette zum Nachweis neotektonisch aktiver Störungszonen. Mit Ausnahme der Ishimba-Störungszonen erreichen die mächtigen, neotektonisch aktiven Störungszonen des SW-Teils der Sibirischen Plattform, wie z. B. die Kamenka-, Jennissej- und Angara-Störungen, das Umfeld des BChK nicht [Kolmogorova & Kolmogorov 2004].

Untersuchungen im Rahmen des Geomonitorings der Untertageanlagen des Bergbau-Chemischen Kombines Shelesnogorsk bestätigen die Zugehörigkeit des Untersuchungsgebietes zu einem stabilen, seismisch inaktiven Plattformbereich. [Gupalo 2003] berichtete über vertikale Verschiebungen im Niveau der Untertageanlagen des BChK im Zeitraum von 1976 bis 1998 von im Mittel + 0,09 mm/a. Diese Zahl belegt ein ruhiges neotektonisches Regime innerhalb der potenziellen Endlagerregion, mit weniger als 1 m Heraushebung der einzelnen, durch Störungszonen abgetrennten Gesteinsblöcke in 10 000 Jahren.

2.6 Hydrogeologie des Untersuchungsgebietes

2.6.1 Kurzdarstellung des Kenntnisstandes zur Hydrogeologie des Gebietes

Mit Ausnahme von wenigen hydrogeologischen und bohrlochgeophysikalischen Messungen in den bisher niedergebrachten Erkundungsbohrungen (z. B. Flowmetermessungen und geoelektrische Untersuchungen in den Bohrungen 1-I und 1-K; Pumpversuche für abgepackte, bis zu 50 m lange Intervalle in der Bohrung 2-K) fehlen für das Untersuchungsgebiet feldgeologische Befunde zur Grundwasserführung der Gesteine des Nishnekansker Granitoidkomplexes und zur Verteilung, räumlichen Anordnung sowie zu den hydraulischen Eigenschaften der potenziellen Migrationswege (Klüfte, Störungszonen, Kontakte unterschiedlicher Lithotypen). Dies ermöglicht z. Zt. nur sehr allgemeine Aussagen zum hydrogeologischen Aufbau des Untergrundes im Nordteil des Nishnekansker Granitoidkomplexes.

Angeichts der Datenlage wurde von russischer Seite auf der Basis von Analogiebetrachtungen zu geologisch ähnlich aufgebauten, besser untersuchten Grundgebirgseinheiten ein 5-Zonen-Modell des hydrogeologischen Baus des oberen Teils der Erdkruste im Gebiet des Nishnekansker Granitoidkomplexes generiert (Tabelle 2-6). Die Errichtung eines unterirdischen HAW-Endlagers ist aus bergbautechnischen und ökonomischen Gründen nur innerhalb der Zone II („Bereich der Spannungsentlastung“) und/oder der Zone III („Zone regional erhöhter Spannungen“) möglich. Parallel zu dieser Zonierung wurden von russischer Seite die im Untersuchungsgebiet auftretenden tektonischen Störungszonen in 5 Kategorien untergliedert (siehe Kap. 2.6.3).

Zone	Tiefe km	Durchlässigkeitswerte m/d			
		Für tektonische Blöcke III.-IV. Ordnung		Für tektonische Störungen III.-IV. Ordnung	
		min/max	Mittelwert	min/max	Mittelwert
Zone 1 Verwitterung und intensive Auflockerung der Gesteine	0 - 0,1	$5 \cdot 10^{-3} / 5 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2} / 1$	$5 \cdot 10^{-1}$
Zone 2 Spannungsentlastung	0,1 - 2,5	$1 \cdot 10^{-5} / 3 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4} / 1 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Zone 3 Erhöhte regionale Spannungen	1 - 5	$1 \cdot 10^{-9} / 3 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-7} / 1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$
Zone 4 Relativ erniedrigte Spannungen	5 - 7	$1 \cdot 10^{-8} / 1 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6} / 1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Zone 5 Hohe regionale Spannungen	>7	$1 \cdot 10^{-10} / 1 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8} / 1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$

Tabelle 2-6: Modellvorstellungen zur Tiefenzonierung des geologischen Untergrundes im Gebiet des Nishnekansker Granitoidkomplexes aus: [Milovidov et al. 1998]
(1 m/d entspricht etwa $1,2 \cdot 10^{-5}$ m/s)

Hinweise zum hydrogeologischen Aufbau und zu den hydraulischen Eigenschaften der metamorphen Rahmengesteine des Nishnekansker Massivs sind aus umfangreichen Untersuchungen in den Untertageanlagen des BChK Shelesnogorsk [Gupalo 2003] ableitbar. Diese Daten können allerdings auf Grund deutlicher lithologischer und strukturell-textureller Unterschiede zwischen den Metamorphiten und Magmatiten nicht direkt auf die Granitoide des Nishnekansker Granitoidkomplexes übertragen werden.

Die im Teufenniveau der Untertageanlagen gemessenen Filtrationsgeschwindigkeiten schwach geklüfteter Gneisblöcke erreichen maximal $4 \cdot 10^{-4}$ m/Tag. Höhere Durchlässigkeiten weisen Schieferungszonen (bis maximal $7 \cdot 10^{-3}$ m/Tag) und Kontaktbereiche zwischen mafischen Dykes und dem metamorphen Nebengestein (bis maximal $5 \cdot 10^{-3}$ m/Tag) auf. Leider liegen im Ergebnis der in den Untertageanlagen durchgeführten Pumpversuche infolge Nicht-Vorhandenseins entsprechender Packersysteme nur auf größere, zwischen 25 und 50 m lange Bohrungsintervalle gemittelte Durchlässigkeitswerte vor. So schwanken die Filtrationskoeffizienten für die Bohrungen 2 und 3 zwischen $1 \cdot 10^{-3}$ und $3 \cdot 10^{-4}$ m/Tag. Allerdings ist das Vorkommen einzelner Zonen mit deutlich höheren Durchlässigkeitswerten (bis $1 \cdot 10^{-1}$ m/Tag, [Gupalo 2003]) nicht auszuschließen.

Innerhalb der Zone sekundärer, d. h. technogener Klüftung im Nahfeld der Untertageauffahrungen wurden Filtrationsgeschwindigkeiten von maximal 6 m/Tag, im Mittel 0,3 m/Tag gemessen [Gupalo 2003]. Bemerkenswert ist die deutliche, 2- bis 13-fache Abnahme der Wasserzuflüsse in die Untertageanlagen seit ihrer Inbetriebnahme, was auf eine mechanische und chemische Kolmation eines Großteils der Klüfte zurückzuführen ist.

2.6.2 Hydrogeologische Zonierung - Verbreitung von Kluft- und Porengrundwasserleitern

Zur Einschätzung der potenziellen Möglichkeiten einer Grundwasserkontamination durch die eingelagerten Abfälle und zur Modellierung der Grundwasserströmung bzw. des Radionuklidtransportes sind umfangreiche Kenntnisse zum hydrogeologischen Aufbau des Gebietes sowie zu den möglichen Migrationswegen der Fluide und ihren hydraulischen Eigenschaften (wie z. B. Transmissivität, hydraulischer Gradient) erforderlich. Auch die Planung der bergbaulichen Arbeiten bei der Auffahrung und beim Ausbau des Endlagers hängt unter dem Aspekt der Absicherung der Langlebigkeit der Ingenieurbauten entscheidend von den hydrogeologischen Rahmenbedingungen ab.

Das Untersuchungsgebiet ist Bestandteil der Jennissejsker Gebirgskette (siehe Kap. 2.3) und zeichnet sich durch ein dominierendes Auftreten von Kluftgrundwasserleitern aus. Damit unterscheidet es sich in hydrogeologischer Hinsicht deutlich von der Westsibirischen Plattform oder vom nördlich gelegenen Tungusker Becken (Abb. 2-6 und 2-7), die durch die Dominanz von Porengrundwasserleitern und das Auftreten artesisch gespannter Grundwässer charakterisiert sind. Die hydrodynamische Barriere des dränierenden Tales des Flusses Man und die geomorphologische Begrenzung des Südtails des Untersuchungsgebietes durch die westlichen Ausläufer der Rybinsker Senke sorgen dafür, dass es im Untersuchungsgebiet zu keinen hydrostatisch bedingten, aufsteigenden Grundwasserzuflüssen von Seiten des Ostsajans kommt.

Die Grundwasserfließrichtungen werden in magmatischen Gesteinen entscheidend von der gegenseitigen Verschneidung der auftretenden Störungszonen bzw. Klüfte sowie von den wirkenden Spannungsfeldern bestimmt. Diese wiederum hängen vor allem vom Einfluß seismischer Prozesse ab. So kann es im Ergebnis neotektonischer Aktivitäten zu Veränderungen des Spannungsfeldes kommen, was große Auswirkungen auf den Kluftöffnungsgrad, die Morphologie von Störungszonen sowie die Grundwasserfließverhältnisse haben kann. Der Öffnungsgrad von Klüften, d. h. ihre hydraulischen Eigenschaften, werden entscheidend von ihrer Orientierung im Verhältnis zum Tensor des Spannungsfeldes bestimmt. So z. B. können submeridional orientierte Klüfte oder Störungszonen bei E-W-gerichteten Spannungstensoren aufreißen, was zu deutlichen Zunahmen ihrer hydraulischen Durchlässigkeiten führen würde.

Ausgehend von den bisher vorliegenden Daten und in Anlehnung an die hydrogeologische Zonierung des Carnmenellis-Granits in Cornwall [Watkins 2003] lassen sich für den Endlagerrelevanten Teufenbereich des geologischen Untergrundes im Untersuchungsgebiet vier hydrogeologische Zonen mit deutlichen Unterschieden in der Physikochemie der Grundwässer aushalten (Abb. 2-12).

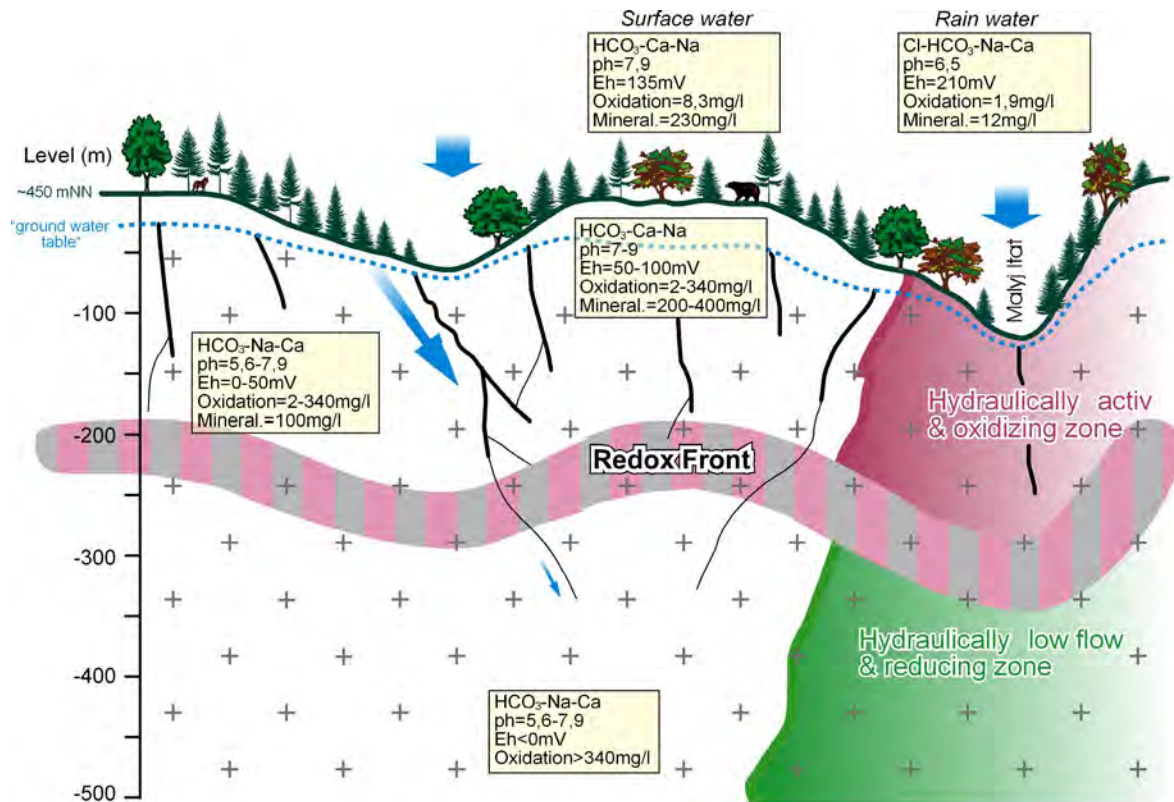


Abbildung 2-12: Schematischer hydrogeologischer Aufbau des geologischen Untergrundes im Bereich des Nishnekansker Granitoidmassivs und Angaben zur Geochemie der Oberflächen- und Grundwässer

Angaben zur lithologischen Zusammensetzung, zu den Mächtigkeiten und zu den auf Grund von Analogiebetrachtungen angenommenen wahrscheinlichen Durchlässigkeitsbeiwerten der Gesteine der einzelnen Zonen sind in Tabelle 2-7 zusammengestellt.

	Zone	Lithologie	Teufenbereich	k_f -Wert Matrix (m/s)	k_f -Wert Klüfte (m/s)
1	Porengrundwässer	Quartär- und Jura-Sedimente	bis 50 m	10^{-8} bis 10^{-6}	10^{-7} bis 10^{-5}
2	Poren- und Kluftgrundwässer	Verwitterungskruste und Bereich intensiver exogener Klüftung	bis 70 – 150 m	10^{-8} bis 10^{-6}	10^{-7} bis 10^{-5}
3	Kluft- und Spaltengrundwässer	Ruschel- und Schieferungszonen im unverwitterten Granitoid	bis 1 km	10^{-10} bis 10^{-7}	10^{-9} bis 10^{-6}
4	Zone eingeschränkter Wasseraustausches	Seltene Klüfte und Störungszonen im unverwitterten Granitoid	> 1 km	10^{-14} bis 10^{-11}	$< 10^{-10}$ (meist $< 10^{-12}$)

Tabelle 2-7: Lithologie, Mächtigkeiten und wahrscheinliche Wasserdurchlässigkeiten der hydrogeologischen Zonen im Bereich des Nishnekansker Granitoidkomplexes

Den obersten Teil des hydrogeologischen Profils bildet die sedimentäre, quartäre und z. T. jurassische Überdeckung der Magmatite/Metamorphite. Diese Zone ist durch das Auftreten von hydrokarbonatischen, Ca – Na – Porengrundwässern mit einer Gesamtmineralisation von 0,2 bis 0,4 g/l sowie durch stark schwankende Mächtigkeiten zwischen 5 und 50 m, lokal hohe Filtrationskoeffizienten bis 10 m/Tag (entspricht ca. 10^{-4} m/s) und z. T. hohe Quellenergiebigkeiten von bis zu 400 m³/Tag gekennzeichnet [Anderson et al. 1993]. Die Porengrundwässer

weisen keine durchgängige Verbreitung auf und sind durch ein instabiles Regime sowie vergleichsweise geringe Ressourcen gekennzeichnet.

Unterhalb dieses Bereiches intensiver Grundwasserzirkulation wird eine Zone von Poren- und Kluftgrundwässern ausgehalten, die die Verwitterungskruste der magmatischen/metamorphen Gesteine und ggf. den darunter liegenden Bereich intensiver exogener (hypergener) Klüftigkeit einschließt. Ausgehend von den bereits niedergebrachten Erkundungsbohrungen reicht diese Zone am untersuchten Standort bis in eine Tiefe von 70 bis 150 m unterhalb der Geländeoberkante. Die in diesem Teufenbereich auftretenden, meist hydrokarbonatischen Na–Ca-Grundwässer sind schwach mineralisiert (ca. 0,1 g/l) und weisen pH-Werte zwischen 5,6 und 7,9 auf [Anderson et al. 1993]. Die Quellenergiebigkeit erreicht selten Werte $> 1,2$ l/s (ca. 100 m³/Tag). Die Kluftgrundwässer sammeln örtlich den oberflächennahen Grundwasseranteil und senken ihn unterhalb der lokalen Erosionsbasis ab. Die Wässer sind in der Regel ungespannt und ihre Zirkulationstiefe erreicht selten mehr als 80 m.

Die den im Rahmen des ASTER-Projektes (siehe Kap. 4) durchzuführenden Modellbetrachtungen zum Radionuklidtransport zugrunde gelegten k_f -Werte der Gesteine schwanken innerhalb dieser Zone zwischen 10^{-8} und 10^{-6} m/s. [Watkins 2003] ordnete dieser Zone verwitterter Granitoide in Abhängigkeit vom Verwitterungsgrad der Gesteine k_f -Werte zwischen 10^{-9} und 10^{-5} m/s zu. Wie Untersuchungen von [Balla et al. 2000] an ungarischen Granitoiden zeigen, ist die hydraulische Durchlässigkeit der Verwitterungskruste (10^{-7} bis 10^{-5} m/s) oft höher als die der sedimentären, häufig tonreichen Überdeckung von Granitoiden (10^{-9} bis 10^{-7} m/s). Im Bereich der ersten beiden Zonen ist mit einem relativ schnellen Eintritt des Sickerwassers in die Kluftgrundwasserleiter des Untergrundes zu rechnen.

Grundwasservorkommen innerhalb der sich darunter anschließenden Zone von Kluft- und Spaltengrundwässern sind überwiegend an Zerrüttungs- und Schieferungszonen tektonischer Störungen sowie an die Kontakte von basischen Gängen gebunden. Beobachtungen in den Untertageanlagen des BChK [Gupalo 2003] belegen, dass entlang der Kontakte von basischen Dykes häufig Zonen mit erhöhter Wasserführung festgestellt werden. Dies zeigt die Notwendigkeit einer möglichst detaillierten Ausgliederung dieser Kontaktbereiche im Ergebnis der geologisch-geophysikalischen Standortuntersuchungen.

Der Bereich der Kluft- und Spaltengrundwässer verfügt über hydraulische Verbindungen mit der darüber liegenden zweiten Zone. Ausgehend von Analogiebetrachtungen zu geologisch ähnlich aufgebauten Gesteinskomplexen erstreckt er sich bis in Teufen von maximal 1 km und weist Wasserdurchlässigkeiten zwischen 10^{-10} und 10^{-6} m/s auf (Tabelle 2-6). Die Fließrichtungen und -geschwindigkeiten der infiltrativen Grundwässer des oberflächennahen Bereiches (sedimentäre Überdeckung, Verwitterungskruste und regionale hypergene Klüftigkeit) werden vollständig durch das Relief, das Vorflutersystem auf der Erdoberfläche, die Ausbildung der Klüfte (z. B. Kluftöffnungsweite) und den Druckgradienten bestimmt. Zur Einschätzung der Mächtigkeit und der hydrodynamischen Eigenschaften der Zone intensiven, infiltrativen Wasseraustausches am Standort Shelesnogorsk fehlen spezielle hydrogeologische Untersuchungen, wie z. B. Tracer- und Pumpversuche oder Altersbestimmungen von Grundwässern.

Darunter wird, ebenfalls in Analogie zu besser untersuchten geologischen Einheiten anderer alter Schilde, eine schwach geklüftete „Zone eingeschränkten Wasseraustausches“ ausgehalten, deren Grundwasserführung sich auf wenige Kluft- und Störungszonen beschränkt. Innerhalb dieser Zone liegen die k_f -Werte der Gesteinsblöcke in der Größenordnung von $< 10^{-11}$ m/s. Sehr häufig sind die Klüfte mit Sekundärmineralen verheilt. Watkins (2003) gibt für den unverwitterten Carnmenellis-Granit Durchlässigkeitsbeiwerte zwischen 10^{-9} und 10^{-10} m/s an, weist aber darauf hin, dass auch in der Zone unverwitterter Granite große Störungszonen mit k_f -Werten von $> 10^{-5}$ m/s auftreten können. Derartige Zonen gilt es, im Ergebnis der Standortuntersuchungen aus dem geplanten Einlagerungsbereich auszuschließen.

Die angenommene deutliche Abnahme der Durchlässigkeitsbeiwerte der Klüfte mit zunehmender Teufe (Tabelle 2-6) deckt sich mit Untersuchungsbefunden von [Tkashuk 1992], der eine signifikante Verringerung der Kluftöffnungsweiten und der Grundwasserfiltrationsgeschwindigkeiten in Klüften bei zunehmender Teufe feststellte.

Zur Zeit gibt es keine Hinweise auf Zuflüsse sehr tief zirkulierender Grundwässer in das Vorflutersystem [Anderson et al. 2001]. Allerdings sind die bisher vorhandenen Kenntnisse zu den Fließrichtungen und zur Verteilung gespannter Kluftwässer mit ausreichend hohem hydrostatischen Druck unzureichend. Im für die Endlagerung in Frage kommenden Teufenbereich fehlen größtenteils die geologischen Voraussetzungen für einen Druckaufbau im Grundwasser, der für aufsteigende Grundwasserzuflüsse aus großen Tiefen notwendig ist. Ausgehend von den bisherigen Beobachtungen überwiegen im für die Endlagerung relevanten Teufenabschnitt abwärts gerichtete Grundwasserfließrichtungen [Anderson et al. 2001]. Die Physikochemie der Grundwässer der „Zone eingeschränkten Wasseraustausches“ schränkt die Radionuklidmigration durch negative Redoxpotenziale und schwach alkalische pH-Werte deutlich ein (siehe Kap. 2.6.5).

2.6.3 Verteilung und räumliche Anordnung der Klüfte und Störungszonen im Untersuchungsgebiet

Entsprechend den Kriterien der IAEA [IAEA 1983] sollen die hydrogeologischen Eigenschaften von Gesteinsblöcken, in denen eine unterirdische Endlagerung radioaktiver Abfälle erfolgen soll, einen Grundwasserzufluss in den Einlagerungsbereich unterbinden bzw. begrenzen. Das bedeutet u. a. dass solche Regionen durch das weitgehende Fehlen struktureller Schwächezonen, wie z. B. offene Klüfte, Schieferungs- und Bruchzonen oder langaushaltende wasserdurchlässige Kontakte lithologischer Varietäten charakterisiert sein sollten. Notwendig sind außerdem weite Entfernungen zu mächtigen, hydraulisch aktiven Störungszonen, minimale Hebungs- bzw. Absenkungsgeschwindigkeiten und Versatzbeträge neotektonischer Bewegungen sowie eine möglichst geringe Vernetzung der Kluftsysteme und Störungszonen.

Die Ausbildung und die hydraulischen Eigenschaften von Bruchzonen hängen entscheidend von der Genese, von den wirkenden Kräften bzw. Spannungsverteilungen und vom Zeitpunkt ihrer Bildung ab. Häufig sind nur die auf die jüngsten Deformationsereignisse zurückzuführenden Störungszonen stark wasserdurchlässig. Durch Mylonitisierung und hydrothermal-metasomatische Überprägung verheilt ein großer Teil der früh gebildeten Störungszonen. Mineralum- und -neubildungen können die Schwächezonen weitgehend schließen bzw. ihre hydraulischen Leitfähigkeiten stark senken. Die Temperatur und die Physikochemie der hydrothermal-metasomatischen Überprägung bestimmt die in den Klüften ablaufenden Mineralbildungsprozesse und damit ihre hydraulischen sowie Sorptionseigenschaften [Laverov et al. 2002], [Petrov 2001]. Oft kommt es im Ergebnis der Alteration der Gesteine zur Bildung von Tonmineralen sowie zu intensiven Karbonatisierungs- und/oder Epidotisationsprozessen. Während Tonminerale über ein großes Sorptionsvermögen für Radionuklide und Cs verfügen, sind Karbonate und Epidote in der Lage, Sr zu fixieren.

Auf alten Schilden, wie z. B. der Sibirischen Plattform, ist davon auszugehen, dass mehrere, voneinander weitgehend unabhängige, mechanisch und geometrisch unterschiedlich wirkende Deformationsereignisse das Kluftbild erzeugt haben. Häufig veränderten sich die wirkenden Spannungsfelder im Verlaufe der erdgeschichtlichen Entwicklung, z. B. durch die Anhebung der präkambrischen Gesteine in höhere Krustenniveaus, durch das Eindringen von magmatischen Plutonen sowie durch Orogenesen und Riftbildungen in benachbarten Regionen. Das hat eine komplizierte, polystadial entstandene Klüftigkeit und eine polymetamorphe Überprägung der Gesteine zur Folge.

Ausgehend von der geologischen Entwicklung und vom $\pm$ starren Charakter des Südwestteils der Sibirischen Plattform seit dem späten Proterozoikum (siehe Kap. 2.3), ist die Region um Zheleznogorsk durch eine vergleichsweise geringe tektono-metamorphe Überprägung gekennzeichnet. Das am SW-Ende der Jennissejsker Gebirgskette gelegene Untersuchungsgebiet stellt eine schollenartige Heraushebung des baikalidischen Fundamentes der Sibirischen Plattform dar. Innerhalb des präkambrischen Fundamentes lassen sich zwei Gruppen von regionalen Störungszonen aushalten. Neben der „Jennissejsker Gruppe“ mit einem NW-SE-Streichen werden Bruchzonen der „Angara-Gruppe“ mit NE-SW-Streichrichtungen beobachtet (Abb. 2-5 und Abb. 2-6). Von der Westsibirischen Platte ist die Jennissejsker Gebirgskette durch ein System von parallelen, submeridionalen Störungszonen, z. B. durch die „Muratov-Störung“ abgetrennt. Der Großteil dieser Störungszonen sind Überschiebungen, mit einem Einfallen der Verschiebungsflächen von 50 bis 70 ° in Richtung der Sibirischen Plattform.

Das geometrische Muster der Bruchstrukturen der Region um Zheleznogorsk wurde bereits präpaläozoisch angelegt, aber im Verlaufe des Mesozoikums (Kreide bis Paläogen) und im Spättertiär/Quartär regeneriert und leicht modifiziert. Verwerfungsbeträge von bis zu 150 m haben zur Entstehung von Gräben und Horsten geführt, wie z. B. zur Bildung des mit Jura-Sedimenten ausgefüllten Grabens im Tal des Flusses Bolshoj Tel (Abb. 2-2 und 2-13). Die Rekonstruktion der rezenten Höhenlagen der spätpliozänischen Oberflächensedimente (Anderson et al. 1996, Lukina 2001) deutet im SW-Teil der Jennissejsker Gebirgskette auf das Vorhandensein zahlreicher, durch Störungszonen begrenzter und in jüngerer Vergangenheit schwach gegeneinander verschobener Krustenblöcke hin.

Rückschlüsse zum bruchtektonischen Muster der Granitoide und Metamorphite beruhen z. Zt. vor allem auf geomorphologischen und feldgeologischen Befunden, auf einer Auswertung der Flussverläufe und Photolineationen auf topographischen Karten und Luftbild- bzw. Satelliten-aufnahmen sowie auf einer Analyse der Lage bzw. Orientierung von in Störungszonen platzgenommenen magmatischen Gängen. Die aus geoelektrischen Messungen abgeleiteten Zonen stark erhöhter elektrischer Leitfähigkeiten, d. h. von Störungszonen mit erhöhten Tonmineral- bzw. Wassergehalten, wurden bisher nicht mit den aus anderen Verfahren abgeleiteten Störungsmustern verglichen. Gleiches trifft auf die Auswertung der geomagnetischen, gravimetrischen und vor allem der seismischen Untersuchungen zwecks Lokalisierung von Zonen erhöhter Klüftigkeit zu (dazu siehe Kap. 5).

Unter Zugrundelegung der genannten Daten wurden für das Umfeld des Bergbau-Chemischen Kombines Zheleznogorsk folgende Kartenwerke für die im wesentlichen auf strukturell-tektonischen Besonderheiten des geologischen Untergrundes basierende Endlager-Standortvorauswahl erstellt:

- „Karte der Störungszonen und Megaklüfte im SW-Teil der Jennissejsker Gebirgskette und in angrenzenden Gebieten“ (1 : 200 000, Lukina in: Anderson et al. 1993),
- „Karte des tektonischen Störungsgrades“ bzw. „Karte der Lineamentdichte in km/km²“ (1 : 100 000, Lopatin in: Anderson et al. 1993),
- „Schema zum Blockbau des Nishnekansker Massivs und seines westlichen Rahmens“ (1 : 100 000, [Milovidov & Muravev 1994] und
- „Karte des Bruchzonen-Block-Systems im Südteil der Jennissejsker Gebirgskette“ (1 : 200 000, Lopatin 1993), nachfolgend ergänzt durch eine entsprechende Karte für das Untersuchungsgebiet „Verchne-Itatskij“ (1 : 100 000, Lopatin / Dacenko in: [Anderson et al. 1996].

Auf der Grundlage dieser graphischen Zusammenstellungen erfolgte die Empfehlung, das Territorium zwischen den Flüssen Bolshoj Itat und Malyj Itat detaillierter auf seine Eignung als Endlagerstandort zu untersuchen.

Die per Luft- und Satellitenbilddauswertung ausgewiesenen Photolineationen lassen, ebenso wie die Analyse der Flussverläufe, für das weitere Umfeld des Bergbau-Chemischen Kombines mehrere Richtungen von Störungszonen erkennen. Neben submeridional streichenden und sub-E-W-streichenden Störungen werden zwei dazu diagonal orientierte Kluftsysteme mit NW- SE- bzw. NE-SW-Streichrichtungen ausgehalten [Anderson et al. 1996]. Diese Befunde wurden durch die Ergebnisse aeromagnetischer und gravimetrischer Untersuchungen [Ljubceva 2002] bestätigt. Anhand von Anomalien in den Schwere- und Magnetfeldern lassen sich insbesondere die Störungszonen mit NW-SE-Streichen (320 bis 330 °) und die submeridionalen Bruchzonen gut nachweisen.

Bei der Analyse der Klüftigkeit der Granitoide des Nizhnekansker Massivs muss zwischen primären und sekundären Klüften unterschieden werden. Die primären bzw. Absonderungsklüfte sind mit der Platznahme und Erstarrung des Magmas verbunden. Sie werden nach Cloos in Quer-, Längs- und Lagerklüfte unterteilt. Die im Gelände nur schwer erkennbaren Lagerklüfte fallen im Granitpluton mit einem Winkel von 5 bis 20 ° flach bevorzugt nach NW (ca. 320 °) ein [Anderson et al. 1998]. Die senkrecht auf den Lagerklüften stehenden Längs- und Querklüfte sind durch ein steiles Einfallen von 80 bis 90 ° in Richtung S bzw. N (Querklüfte) oder in Richtung W bzw. E (Längsklüfte) charakterisiert. Geologische Kartierungsarbeiten in den Gesteinsaufschlüssen der Flusstäler belegen ein überwiegend submeridionales Streichen der Längsklüfte und ein bevorzugtes E-W-Streichen der Querklüfte. Informationen zur Kluftdichte bzw. zum Kluftabstand sowie zur Kluftverschneidung liegen für den potenziellen Endlagerstandort ebenso wie statistische Auswertungen der Kluftorientierung und Kluftgeometrie z. Zt. noch nicht vor.

Der Hauptteil der Störungszonen innerhalb des Nizhnekansker Granitoidkomplexes weist ein submeridionales bis NW-SE (325 bis 345 °) gerichtetes Streichen auf. Diese Gruppe von Klüften ist ebenso wie die deutlich selteneren E-W-streichenden Störungszonen durch ein steiles Einfallen, mit Einfallswinkeln zwischen 80 und 90 ° gekennzeichnet. Beide Typen von Störungszonen sind Bereiche intensiver Mylonitisierung und Kataklyse. Die an derartige Tiefenbrüche gebundene „Zone der dynamischen Beeinflussung“ innerhalb der Nebengesteine erreicht für Störungszonen der ersten und zweiten Kategorie (Tabelle 2-8), die allerdings im Untersuchungsgebiet nicht zu beobachten sind, Mächtigkeiten von bis zu 1,3 km [Anderson et al. 2001].

Besonders wichtig für die Bewertung der hydrogeologischen Eignung des Standortes ist die Erfassung der Verteilung, räumlichen Orientierung, Ausbildung und hydraulischen Eigenschaften der Quer- bzw. Dehnungsklüfte, die häufig durch Aplite, Pegmatite oder Quarzgänge markiert werden. Der Öffnungsgrad bzw. die Grundwasserführung der Querklüfte wird entscheidend durch die auf das Untersuchungsgebiet von Seiten der Westsibirischen Plattform und des Altaj-Sajan-Gebietes wirkenden Kräfte bestimmt. Im Unterschied zu den Querklüften weisen die Längs- und Lagerklüfte in der Regel sehr geringe und stark mit der Teufe abnehmende Öffnungsweiten auf.

Im Nishnekansker Granitoidkomplex entspricht die Ausbildung der Querklüfte dem von [Lukina 2001] ermittelten subzentren regionalen Beanspruchungs- bzw. Spannungsmuster. Danach erfolgt im Westteil des Plutons in NE-SW-Richtung eine starke Einengung des Krustenblockes und in NW-SE-Richtung eine starke Dehnung. Im Ostteil des Nizhnekansker Granitoidkomplexes werden eine fast meridionale Einengung sowie eine Dehnung in E-W-Richtung festgestellt.

Im Verlaufe der erdgeschichtlichen Entwicklung wechselnde Beanspruchungsmuster haben zur Überprägung der Frakturzonen und zu zahlreichen Verbiegungen sowie zu lokalen Auf- und/oder Verschiebungen innerhalb der Querklüfte geführt. Dies hat eine komplizierte Morphologie der Kluftflächen und große Variationsbreiten ihrer hydraulischen Durchlässigkeiten

zur Folge (siehe Kap. 5 und z. B. [Balla et al. 2000], [Enachescu et al. 2003]. Besonders ungünstig, weil in der Regel stark wasserführend, sind Verschneidungsbereiche von Dehnungsklüften mit Scherzonen [Böckh et al. 1987]. Außerdem kommt es infolge der wirkenden Kräfte oft zur Bildung von sekundären Klüften, wie z. B. zu Verwerfungen, Auf- und Abschiebungen und Zugklüften, die häufig subparallel zu großen regionalen Störungszonen orientiert sind.

Das Untersuchungsgebiet „Verchne-Itatskij“ liegt zwischen den Flüssen Malyj Itat und Bolshoj Itat, deren Flussläufe entlang von neotektonisch reaktivierten, bereits präkambrisch angelegten Aufschiebungen verlaufen. Die Streichrichtungen beider Störungen wechseln zwischen submeridional und NE-SW bzw. NW-SE. Beide Störungszonen fallen nach NW-W ein, wobei der Einfallwinkel der Bolshoj-Itat-Störung 75 bis 80 ° beträgt, während die Verschiebungsfläche der Malyj-Itat-Störung fast saiger steht. Bei beiden Störungszonen ist die östliche Scholle aufgeschoben, der Versatzbetrag liegt bei ca. 70 m (Bolshoj Itat) bzw. 50 bis 60 m (Malyj Itat). Beide auch aeromagnetisch [Ljubceva 2002] nachgewiesenen submeridionalen Tiefenbrüche werden durch zahlreiche kleinere, z. T. von den Hauptverwerfungen abzweigende Störungen mit überwiegend NW-SE-Streichrichtungen begleitet und durch mehrere E-W-streichende Störungszonen geschnitten (siehe auch Kap. 5).

Zwecks Absicherung der für eine Standortvorauswahl erforderlichen hydro- und ingenieurgeologischen Modellbetrachtungen wurde von russischer Seite, in Analogie zu besser untersuchten Grundgebirgsformationen, eine Einteilung der Störungszonen in verschiedene Kategorien vorgeschlagen (Tabelle 2-8) [Milovidov et al. 1998].

Kategorien der tektonischen Bruchstörungen	Horizontale Erstreckung [km]	Häufigkeit (durchschnittlicher Abstand zwischen den Störungen) [km]	Mächtigkeit der Einflusszone [m]	Mächtigkeit der Verwerfungszone [m]
I	> 30	> 10	> 300	> 30
II	10-30	3-10	100-300	10-30
III	3-10	1-3	10-100	1-10
IV	1-0,5	0,3-0,5	1-3	0,1-0,3
V	1-2	< 0,3	< 5	< 0,1

Tabelle 2-8: Einteilung der im Umfeld des potenziellen Endlagerstandortes „Verchne-Itatskij“ möglicherweise auftretenden Störungszonen (nach: [Milovidov et al. 1998], für Kategorien I und V: [Anderson et al. 1996], [Anderson et al. 1998])

Die fünf Gruppen von Störungen unterscheiden sich u. a. in ihrer Längserstreckung, in der Häufigkeit des Vorkommens (d. h. in der Schrittweite), in der Mächtigkeit der Einfluss- und Verwerfungszone sowie in ihren hydraulischen Eigenschaften (siehe Kap. 2.6.4).

Unter Zugrundelegung dieser Störungszonen-Gruppierung entsprechen die Aufschiebungen des Bolshoj Itat und des Malyj Itat Störungszonen der dritten Ordnung. Störungen der ersten und zweiten Kategorie treten lediglich außerhalb des Untersuchungsgebietes auf. Die Prijennisejsker Bruchzone erster Ordnung verläuft etwa 10 bis 30 km nördlich des Flusses Kan. Sie zeigt ebenso wenig Auswirkungen auf den tieferen Untergrund des Untersuchungsgebietes, wie die $\pm$ submeridional orientierten, mindestens 10 km vom potenziellen Endlagerstandort entfernten Störungszonen der zweiten Kategorie (z. B. Kansker-Jennissejsker Störungszone, Pravobereznij- und Malotelskij-Brüche).

In den Grenzen des Untersuchungsgebietes „Verchne-Itatskij“ werden lediglich Störungen der vierten und fünften Kategorie mit relativ geringen Versatzbeträgen (bis 30 m) und meist stei-

lem Einfallen beobachtet (Abb. 2-12, siehe auch Kap. 5). Zusätzlich ist von einem umfangreichen Inventar verschiedenster kleindimensionaler Klüfte auszugehen. Genauere Vorstellungen zur räumlichen Anordnung der Störungszonen und Klüfte, zu ihren hydraulischen Eigenschaften und zu ihrem Einfluss auf die Grundwasserfließverhältnisse existieren, abgesehen von den Geomonitoring-Befunden aus den Untertageanlagen des BChK [Gupalo 2003)], z. Zt. noch nicht.

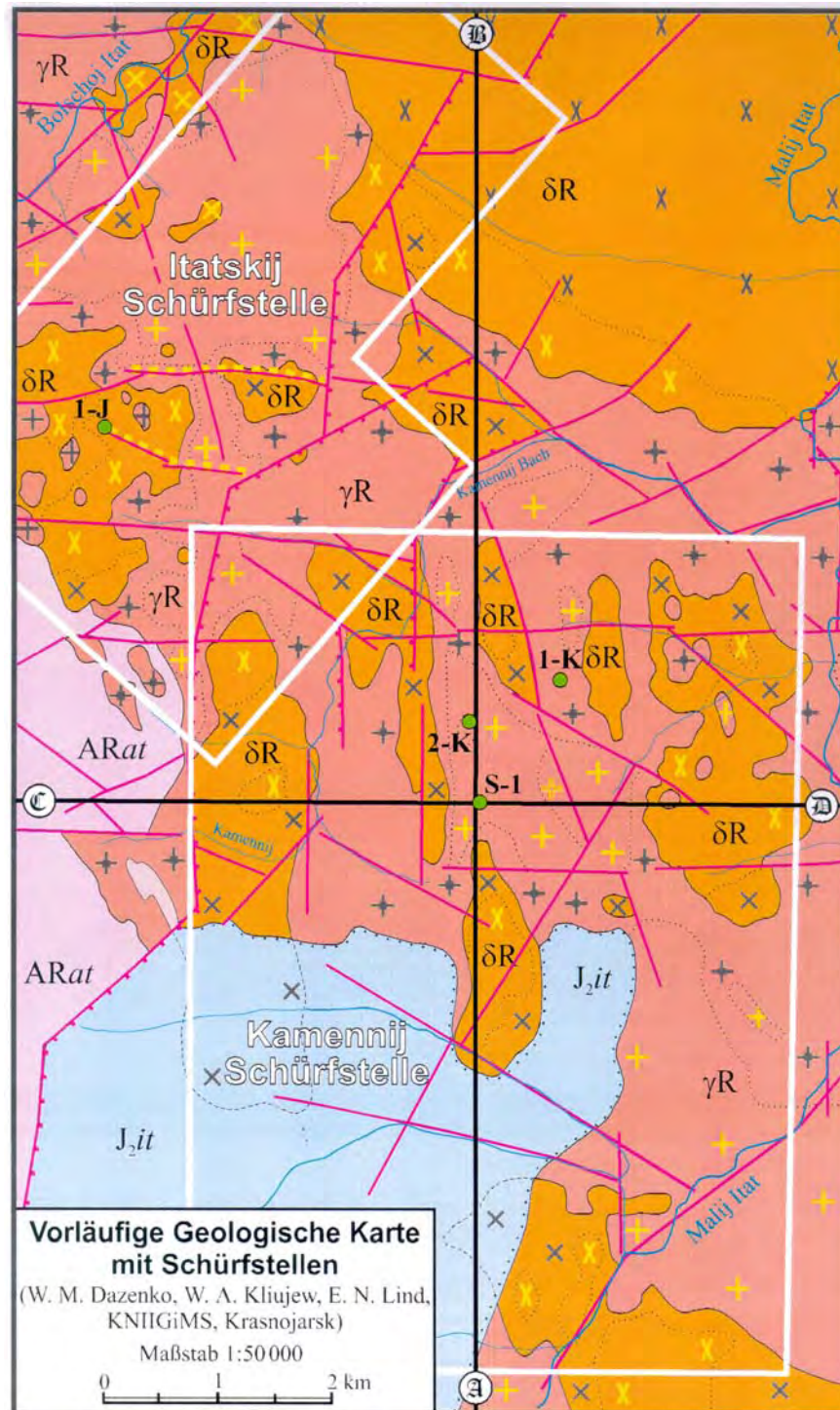


Abbildung 2-13: Verteilung der wichtigsten Störungszonen innerhalb der detailliert geologisch-geophysikalisch untersuchten Gebiete „Kamennij“ (Mitte unten) und „Itatskij“ (links oben) im Umfeld von Shelesnogorsk (aus: Anderson et al. 1998)

2.6.4 *Hydraulische Eigenschaften der Endlager-Wirtsgesteine*

In magmatischen/metamorphen Gesteinskomplexen wird die Radionuklidmigration im Unterschied zu porösen sedimentären Wirtsgesteinen weniger durch die effektive Porosität, die Struktur des Porenraumes oder die Matrixdurchlässigkeit der Gesteine bestimmt, als vielmehr durch die Klüftigkeit, die Kluft- bzw. Trennfugendurchlässigkeit und die Vernetzung der Klüfte untereinander. Die Grundwasserströmung beeinflussen vor allem die durch tektonische Prozesse verursachten Störungszonen unterschiedlicher Mächtigkeit und Tiefenreichweite sowie die im Prozess der Magmenerstarrung gebildeten Absonderungsklüfte. Weiterhin dienen die Kontakte zwischen einzelnen Intrusionsphasen oder zwischen den Magmatiten und den in ihnen vorkommenden magmatischen Gängen bzw. Einschlüssen sowie die in Metamorphiten auftretenden Schieferungsflächen als mögliche Migrationswege.

Das Vorkommen von Klüften ist nicht gleichbedeutend mit mangelnder hydrogeologischer Eignung des Standortes für eine HAW-Endlagerung (z. B. [Laverov et al. 2000]). Kluftsysteme können in Abhängigkeit von den im Verlaufe der erdgeschichtlichen Entwicklung sich möglicherweise verändernden Spannungsregimen sowie von der Physikochemie der Grundwässer unterschiedliche Öffnungsweiten und kluftgebundene Mineralisationen aufweisen. Die hydraulischen Durchlässigkeiten einzelner Klüfte können in Abhängigkeit von der Ausbildung der Kluftflächen (wie z. B. Verbiegungen, Unebenheiten, keine planparallelen Oberflächen) stark schwanken. [Balla et al. 2000] bestimmten für eine in variszischen Graniten Ungarns gelegene Kluft Durchlässigkeitsbeiwerte zwischen 10^{-6} und 10^{-10} m/s. Die Transmissivität des ungarischen Uveghuta-Granits, der als Wirtsgestein für ein Endlager für schwach und mittel radioaktive Abfälle vorgesehen ist, schwankt in Abhängigkeit von der Klüftigkeit der Gesteine und vom Kluftöffnungsgrad zwischen 10^{-12} und 10^{-3} m/s [Enachescu et al. 2003].

Die Möglichkeit des Vorkommens hydraulisch nicht aktiver, oft mit hochsorbptiven Tonmineralen ausgefüllter Kluftsysteme unterstreicht die Notwendigkeit der Kalibrierung und Überprüfung der Ergebnisse hydrogeologischer Modellrechnungen durch feldgeologische Messungen der hydraulischen Eigenschaften der Gesteine und Klüfte im Einlagerungsniveau, wie z. B. durch Packer- und Pumptestes. Ziel der parallel durchzuführenden Modellierungs- und Feldarbeiten muss es sein, die Existenz von Klüften mit sehr hohen Durchlässigkeitsbeiwerten („fast path ways“) im Umfeld des potenziellen Einlagerungsbereiches auszuschließen.

Die den bisher für das Gebiet Verchne-Itatskij durchgeführten hydro- und ingenieurgeologischen Modellierungen zugrunde gelegten hydraulischen Parameter der Gesteinsmatrix und der Störungszonen bzw. Klüfte beruhen weitgehend auf Analogiebetrachtungen zu geologisch ähnlich aufgebauten, besser untersuchten Grundgebirgsformationen [Milovidov et al. 1994, 1996, 1998; Anderson et al. 1998]. Die für die Berechnungen von der russischen Seite zur Verfügung gestellten Durchlässigkeitsbeiwerte bzw. Filtrationskoeffizienten schwanken in Abhängigkeit von der Teufenlage bzw. der Zugehörigkeit zu einer „Hydro-Geodeformationstiefenzone“ (nach Milovidov, siehe auch Kap. 2.6.1) und von den Parametern der Störungszonen bzw. Klüfte (Tabelle 2-6 bis 2-8).

Die Durchlässigkeitsbeiwerte der Gesteinsmatrix und der auftretenden Störungszonen bzw. Klüfte nehmen mit der Teufe deutlich ab (Tabelle 2-7). Der Bereich der sedimentären Überdeckung und der Verwitterungskruste (Zonen 1 und 2) ist durch Matrixdurchlässigkeiten zwischen 10^{-8} und 10^{-6} m/s sowie Kluftdurchlässigkeiten von 10^{-7} bis 10^{-5} m/s charakterisiert. Die darunter bis in eine Tiefe von etwa 1 km reichende Zone von Kluft- und Spaltengrundwässern weist innerhalb der tektonisch wenig gestörten Blöcke Durchlässigkeiten zwischen 10^{-10} und 10^{-7} m/s auf, während die Trennfugen-Durchlässigkeiten von 10^{-9} bis 10^{-6} m/s schwanken. Im Teufenbereich eingeschränkten Wasseraustausches und erhöhter Spannungen (Zone 4) variiert die hydraulische Durchlässigkeit $\pm$ monolithischer Gesteinsblöcke zwischen 10^{-14} und 10^{-11}

m/s. Die in dieser Zone auftretenden Klüfte haben Durchlässigkeitsbeiwerte $\leq 10^{-10}$ m/s, meist sogar $\leq 10^{-12}$ m/s (s. Tabelle 2-7) [Milovidov et al. 1996], [Shabalev et al. 2001]).

Die im Labor an Kernproben der Bohrungen 1-K und 1-I bestimmten Matrixpermeabilitäten der Nishnekansker Granitoide schwanken zwischen $3,7 \cdot 10^{-20}$ und $1,5 \cdot 10^{-18}$ m², bei einem Mittelwert von 10^{-19} m² [Velichkin et al. 2001]. Diese Zahlenangaben sind für die Bewertung der hydraulischen Eignung der granitoiden Wirtsgesteine für eine HAW-Endlagerung nur von geringem Interesse. Die Migration von Grundwässern erfolgt in Magmatiten/Metamorphiten vornehmlich auf Störungsflächen und Kluftzonen, die aufgrund ihrer im Vergleich zur Gesteinsmatrix in der Regel deutlich höheren hydraulischen Leitfähigkeiten bevorzugte Fließbahnen darstellen.

Die Abhängigkeit der hydraulischen Parameter der Wirtsgesteine von den realen Standortbedingungen unterstreicht die Notwendigkeit der Durchführung von feldgeologischen Messungen der hydraulischen Durchlässigkeiten von Gesteinsblöcken und Kluftzonen bzw. –systemen für Aussagen zur Langzeitsicherheit des geplanten Endlagers.

Unter Geländebedingungen mittels Pumpversuchen bestimmte Durchlässigkeitsbeiwerte einzelner Teufenbereiche liegen, ohne Angaben zur angewandten Methode und zur Belastbarkeit der Daten, lediglich für den Standort Kamennyj, genauer für die Bohrung K-2 vor. Aufgrund des Fehlens moderner Packersysteme zur gezielten Untersuchung der hydraulischen Eigenschaften einzelner Störungszonen, wurden lediglich größere, meist 25 bis 50 m lange Teufenintervalle bezüglich ihrer Durchlässigkeiten analysiert (Tabelle 2-9). Die dabei ermittelten k_f -Werte schwanken im Teufenbereich bis 150 m zwischen $3,07 \cdot 10^{-5}$ und $3,3 \cdot 10^{-4}$ m/d, was etwa $3,7 \cdot 10^{-10}$ bis $4 \cdot 10^{-9}$ m/s entspricht. Im Teufenbereich 150 bis 423 m variieren die Durchlässigkeitsbeiwerte zwischen $1,5 \cdot 10^{-5}$ und $7,3 \cdot 10^{-5}$ m/d (entspricht ca. $1,8 \cdot 10^{-10}$ und $8,8 \cdot 10^{-10}$ m/s, Tabelle 2-9).

Mittels geoelektrischer Bohrlochmessungen wurden die Filtrationsgeschwindigkeiten von drei im unteren Teil der Bohrung 1-K vorkommenden wasserführenden Zonen bestimmt [Anderson et al. 2001]. Die Messwerte schwankten zwischen 0,3 und 1,25 m/a, was Schwankungen der Filtrationsgeschwindigkeiten zwischen ca. $1 \cdot 10^{-8}$ und $3 \cdot 10^{-8}$ m/s entspricht. Flowmetermessungen ergaben entweder keine (Bohrung 1-I) oder nur sehr geringe (Bohrung 1-K) Grundwasserzuflüsse in die Tiefbohrungen.

Rückschlüsse auf die hydraulischen Eigenschaften der archaisch-proterozoischen Rahmengesteine des Nishnekansker Granitoidkomplexes ermöglichen die Ergebnisse von Einpressversuchen, die im Rahmen des Geomonitorings der Untertageanlagen am Standort Zheleznogorsk durchgeführt wurden [Gupalo 2001], [Gupalo 2003]. Die leider ebenfalls ohne entsprechende Packersysteme zur gezielten Abtrennung von einzelnen Störungszonen durchgeführten Untersuchungen ergaben Filtrationskoeffizienten $\pm$ monolithischer Gneispartien zwischen 0,03 und 0,4 mm/d (entspricht etwa $3 \cdot 10^{-10}$ bzw. $5 \cdot 10^{-9}$ m/s). Lediglich in Schieferungs- bzw. Zerrüttungszonen wurden im Teufenniveau der Untertageanlagen k_f -Werte bis 7 mm/d (ca. $8 \cdot 10^{-8}$ m/s) gemessen (siehe Kap. 2.6.1). Im Ergebnis dieser Arbeiten wurde eine Abhängigkeit des Filtrationskoeffizienten von der Kluftöffnungsweite festgestellt [Gupalo 2001]. Während bei einer Öffnungsweite von 1 mm ein k_f -Wert von ca. $2 \cdot 10^{-8}$ m/s bestimmt wurde, steigt er bei 2 mm Öffnungsweite auf $5 \cdot 10^{-8}$ m/s, bei 3 mm auf $9 \cdot 10^{-8}$ m/s und bei 4 mm Öffnungsweite auf $1,6 \cdot 10^{-6}$ m/s.

Die effektiven Porositäten der Granitoid-Proben variieren im Bereich von 0,26 bis 0,52 %, lediglich metasomatisch überprägte Ganggesteine weisen in einigen Fällen höhere effektive Porositäten bis 0,82 % auf [Velichkin et al. 2001].

Parameter	Einheit	Beprobungsintervall (m u.GOK)							
		37 - 65	65 - 100	101 - 150	150 - 200	200 - 252	250 - 300	300 - 350	350 - 423
Filtrationskoeffizient (k_f)	m/Tag	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$7,3 \cdot 10^{-5}$
Wasserleitfähigkeit (k_m)	m ² /Tag	n.b.	0,028	0,014	0,012	0,0086	0,013	0,015	0,044
pH		7,1	11,7	11,2	7	7,3	7,6	9,05	7,9
Kationen									
Ca	mg/l	9,8	77,8	48	2,8	8,7	12,4	1,7	2,71
Mg	mg/l	4,07	0,12	0,2	2,9	3,1	4,25	8,42	2,6
Na	mg/l	34,8	60,8	59,3	33,8	33,3	48,3	65,2	107
K	mg/l	3,3	32,7	24	15,6	26	17,8	102,1	18,1
Al	mg/l	< 0,2	< 0,2	0,86	1,24	3,4	1,16	28,9	8,5
Fe	mg/l	0,26	0,17	0,4	0,69	7,1	0,76	89,3	5,9
Mn	mg/l	0,007	0,005	0,0082	0,017	0,32	0,092	2,04	0,03
Sr	mg/l	0,25	2,1	1,21	0,36	0,32	0,55	0,19	0,35
Si	mg/l	5	7	19	14				32
SiO ₂	mg/l					11,3	11,3	85,9	
Anionen									
Cl ⁻	mg/l	n.b.	n.b.	8,5	9,1	14,7	21,3	7,8	8,5
SO ₄ ²⁻	mg/l	n.b.	n.b.	11,8	18,6	9,65	5,6	5,6	15
NO ₃ ⁻	mg/l	n.b.	n.b.	1,48	0,9	1,99	0,18	1,02	31
NO ₂ ⁻	mg/l	n.b.	n.b.	0,37	0,35	0,04	0,91	0,1	n.b.
HCO ₃ ⁻	mg-Äqui/l	n.b.	n.b.	0	2,05	3,2	3,2	3,3	8,5
CO ₃ ²⁻	mg-Äqui/l	n.b.	n.b.	0,8	0	0	0	0,3	0
OH ⁻	mg-Äqui/l	n.b.	n.b.	3	0	0	0	0	0
Abdampfdruckstand	mg/l	94	642	274	157	369	286	976	100
Glühverlust	mg/l	57	473	197	85	211	138	796	31
Oxydierbarkeit	mg/l	1,77	13,5	15,1	12,7	47,2	12,7	343	289
Mikroelemente									
Cu	mg/l	0,089	0,027	0,038	0,043	0,15	0,022	0,82	0,046
Pb	mg/l	0,007	0,017	0,004	0,003	0,017	0,009	0,013	0,01
Zn	mg/l	0,039	0,038	0,034	0,02	0,17	0,078	0,25	0,042
Cd	mg/l	0,001	0,0024	0,0013	0,001	0,0016	0,001	0,0013	0,0013
U	µg/l	3,09	3,3	0,87	2,03	1,9	0,9	4,1	2,6
Hg	mg/l	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Li	mg/l	0,0051	0,0053	0,0091	0,006	0,0016	0,001	0,0015	0,017

Tabelle 2-9: Angaben zu den hydraulischen Durchlässigkeiten der in der Bohrung K-2 erbohrten Gesteine und zum Chemismus der beprobten Grundwässer (Quelle: VNIPI Promtehnologii, Moskau)

2.6.5 Hydrochemie der Oberflächen- und Grundwässer

Zwecks Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle sind zur Prognose der Langzeitstabilität der Behälter und geotechnischen Barrieren sowie der Radionuklidenausbreitung bei nicht mehr intakten technischen und geotechnischen Barrieren Kenntnisse zur Physikochemie der am Standort auftretenden Grundwässer erforderlich. Die geringsten Radionuklidlöslichkeiten werden unter reduzierenden, neutralen bis schwach basischen Bedingungen gemessen [Brookins 1984], [Krauskopf 1986], [Krauskopf 1988], [Laverov et al. 2001].

Die von [Papp 1997] publizierten Angaben zu Referenzgrundwässern aus Kristallingebieten der Schweiz, Skandinaviens, des Kanadischen Schildes und Deutschlands (KTB-Bohrung) belegen den reduzierenden Charakter der meisten aus Teufen > 200 m entnommenen Grundwässer und ihren neutralen bis schwach alkalischen Chemismus, mit pH-Werten meist zwischen 6 und 8. Diese günstigen, die Radionuklidmigration behindernden Bedingungen in Tiefenwässern magmatischer/metamorpher Gesteinskomplexe werden durch die Ergebnisse der Modellierung der Gleichgewichtszusammensetzung von Grundwässern in kristallinen Gesteinen mit alumosilikatischen gesteinsbildenden Mineralen bestätigt [Ryzenko et al. 1996, 1997]; [Lisicin et al. 1997].

Zum heutigen Zeitpunkt existieren für das Untersuchungsgebiet lediglich die in Tabelle 2-9 zusammengestellten Angaben zum Chemismus von Grundwässern, die in der Bohrung K-2 beprobt wurden. Tabelle 2-1 fasst die bisher vorhandenen Angaben zur chemischen Zusammensetzung der Niederschlags-, Oberflächen- und Quellwässer im Untersuchungsgebiet zusammen. Obwohl die Quellwässer sofort bei ihrem Austritt aus dem Boden infolge der wechselnden Milieubedingungen charakteristische hydrochemische Veränderungen erfahren, wie z. B. zunehmende Temperaturen und Eh-Werte sowie sinkende CO_2 -, Fe-, NH_4^+ - und SO_4^{2-} -Gehalte, können Rückschlüsse auf die Hydrochemie der oberflächennahen Grundwässer gezogen werden. Sie sind gering mineralisiert (0,2 bis 0,4 g/l), haben eine hydrokarbonatische, Ca-Na-Zusammensetzung, weisen nur geringe Cl- und SO_4 -Gehalte auf und verfügen über pH-Werte zwischen 6,7 und 8,1 (Abb. 2-12, [Anderson et al. 2001]). Sie bieten damit schlechte Voraussetzungen für einen Radionuklidtransport.

Zwischen der Hydrochemie der an der Erdoberfläche austretenden infiltrativen Grundwässer (Quellwässer) und der hypsometrischen Lage der Quellorte bestehen deutliche Abhängigkeiten [Zuev et al. 2000]. Je tiefer der Austrittsort im Vergleich zur Wasserscheidenoberfläche liegt, d. h. je mächtiger die vom Grundwasser durchflossenen Gesteinsschichten sind, desto höhere Gesamtmineralisationen, elektrische Leitfähigkeiten und pH-Werte weisen die Wässer auf. Dies belegen auch Untersuchungen an den in den Untertageanlagen vorkommenden Kluft-Gangwässern, die etwa 15 bis 24 mal höher mineralisiert sind als die Tau- und Regenwässer [Gupalo 2003].

In Kristallingebieten häufig als Indikator für eine Tiefenherkunft von Grundwässern genutzte erhöhte Cl-Gehalte beschränken sich im Nordteil des Nizhnekansker Granitoidkomplexes auf Bereiche, in denen jurassische Sedimente die Granitoide überdecken. Die ansonsten geringen Cl-Gehalte der Grundwässer deuten ebenso auf das Fehlen von bedeutenden Zuflüssen von tief zirkulierenden Grundwässern in das Vorflutersystem hin, wie die nur lokal nachgewiesenen erhöhten He-Konzentrationen in Oberflächenwässern. Im Ergebnis umfangreicher hydrochemischer Untersuchungen der Oberflächenwässer [Zuev et al. 2000] wurden in den, im Gebiet „I-tatskij“ gelegenen Flüssen Milonitovoj und Prochodnoj leicht erhöhte He-Konzentrationen gemessen. Die He-Anomalien sind verbunden mit Zunahmen der elektrischen Leitfähigkeit und der Gesamtmineralisation sowie mit abnehmenden Eh- und Temperaturwerten. Diese signifikanten Änderungen der hydrochemischen Parameter sind darauf zurückzuführen, dass beide Flussläufe durch eine Reihe subparalleler tektonischer Störungen gekreuzt werden [Anderson et al. 2001].

Entscheidend für die Bewertung der Langzeitsicherheit eines Endlagerstandortes in magmatischen Gesteinen ist aus hydrogeologischer Sicht die mögliche Absenktiefe sauerstoffhaltiger, den Radionuklidtransport fördernder Grundwässer. Bei ungünstigen Bedingungen, wie geringen Gehalten reduzierender, sauerstoffverbrauchender Komponenten (organische Substanzen der Bodenschicht, Fe^{2+} -Gehalte im Gestein), hoher Klüftigkeit, intensiver Vernetzung der Klüfte, Vorkommen mächtiger Störungszonen, hohen hydraulischen Gradienten und Grundwasserfließgeschwindigkeiten, sind Absenkungen O_2 -reicher Grundwässer bis in 1000 m Teufe möglich. Für das Nishnekansker Granitoidmassiv liegen z. Zt. keine Untersuchungsbefunde vor, die eine Bestimmung des Alters und der Physikochemie von Tiefengrundwässern ermöglichen.

Analogiebetrachtungen zu anderen Regionen mit vorherrschender Verbreitung von magmatischen/metamorphen Gesteinen, wie z. B. dem Kanadischen Schild oder Schweden, belegen schon in > 100 m Tiefe die Dominanz von reduzierenden Grundwässern [Neretnieks 1986]. Durch Reaktion der Grundwässer mit den alumosilikatischen gesteinsbildenden Mineralen weisen die Gleichgewichtswässer einen schwach reduzierenden Charakter sowie pH-Werte im schwach basischen Bereich auf [Ryzenko et al. 1996, 1997]; [Lisicin et al. 1997].

2.7 Mineralogisch-geochemische Zusammensetzung und petrophysikalische Eigenschaften der Granitoide

Informationen zur mineralogisch-geochemischen Zusammensetzung der potenziellen Endlager-Wirtsgesteine und zur räumlichen Verteilung von Gesteinsvarietäten mit unterschiedlichen geomechanischen und wärmephysikalischen Eigenschaften stellen wichtige Ausgangsdaten für den zur Standortauswahl erforderlichen Langzeitsicherheitsnachweis und für die Planung der bergbaulichen Erschließungsarbeiten dar. Deshalb müssen bereits in einer frühen Phase der Standortsuche Angaben zum Verhalten der Gesteine bei Einwirkung von Stress, Wärme, radionuklidhaltigem Grundwasser und radioaktiver Strahlung sowie zu ihrem Schadstoffrückhaltevermögen vorliegen. Außerdem sind Kenntnisse zum In-situ-Zustand des Gebirgsmassivs bezüglich auftretender Spannungen und Deformationsraten notwendig. Sie sind z. B. erforderlich:

- zur Prognose des geomechanischen Verhaltens der Gesteine im Nahfeld des Endlagers,
- für Berechnungen der Stabilität von bergmännischen Auffahrungen und zur Planung von möglicherweise erforderlichen Sicherungsmaßnahmen,
- zur Ableitung der wahrscheinlichsten Szenarien von potenziell möglichen Deformationsprozessen,
- zur Berechnung der Auflockerung bzw. Permeabilitätszunahme im Umfeld der Abbaue, d. h. zum Nachweis der hydraulischen Integrität, sowie
- zur Modellierung der Radionuklidausbreitung im Umfeld des Endlagers.

2.7.1 *Petrographische und geochemische Zusammensetzung der Gesteine des Nizhnjekansker Granitoidkomplexes*

Nach [Dacenko 1995] weist das Nizhnjekansker Granitoidmassiv einen zweiphasigen Internbau auf. Nach einer ersten, dioritisch-quarzdioritisch-tonalitisch-granodioritischen Phase intrudierten Granite, Leukogranite und Alaskite, die im oberflächennahen Bereich mengenmäßig deutlich überwiegen. Angaben zur mineralogischen Zusammensetzung der häufigsten Gesteintypen sind in Tabelle 2-10 enthalten.

Die Granitoide haben eine massive, monolithische Textur mit sehr geringen effektiven Porositäten (deutlich $< 1\%$). Die Übergänge zwischen den einzelnen Gesteinsvarietäten sind makroskopisch kaum bemerkbar. An den Kontakten der Intrusionsphasen untereinander werden keine offenen Klüfte oder Spuren intensiver hydrothermal-metasomatischer Alterationsprozesse beobachtet. Anders als z. B. im Äspö-Granit [Maaranen et al. 2002] fehlen im Nizhnjekansker Granitoidkomplex Anzeichen für eine intensive regionalmetamorphe Überprägung (Schieferung) der Granitoide, die zur Ausbildung von Grundwasser-Migrationspfaden führen würde.

Gesteinstyp	Quarz	Kalifeldspat	Plagioklas	Biotit	Hornblende	Sekundärminerale	Akzessorien
Leukogranit	25-30	45-50	20-25	2-5	-	1-3	3-5
Granit	30	30-35	25-30	5	-	5-7	5-7
Adamellit	25-30	25-30	30-35	5-7	-	5-7	5-7
Granodiorit	25-30	10-15	45-50	7-10	-	1-3	3-5
Tonalit	15-20	5-10	55-60	10-15	5	1-3	2-3
Quarzdiorit	15-20	5	55-60	5-10	10-15	3-5	2-3
Quarzmonzodiorit	15	5	55-60	5-10	5-10	3-5	2-3
Diorit	5	5	50-55	5-10	20-25	1-3	2-3
Spessartit, alteriert	-	-	50-55	-	25-30	15-20	3-5
Granitgneis, alteriert	25-30	30-35	25-30	-	-	10-15	1

Tabelle 2-10: Mineralogische Zusammensetzung der wichtigsten Gesteinstypen des Nizhnekansker Granitoidkomplexes sowie der Spessartit-Gänge und der archaischen Rahmengesteine (Granitgneis), in Vol-%

In den Tabellen 2-11 und 2-12 sind Angaben zur chemischen Zusammensetzung der häufigsten Gesteinsvarietäten des Intrusivkomplexes sowie seiner Rahmen- und Ganggesteine zusammengestellt. Daraus sind signifikante Unterschiede im Chemismus der einzelnen Gesteinstypen ersichtlich. Beim Übergang von Diorit/Quarzdiorit über Granodiorit zum Leukogranit kommt es zu deutlichen Zunahmen der SiO_2 - und K_2O -Gehalte (55 bis 74 % bzw. 1,4 bis 5,1 %) sowie zu sinkenden Konzentrationen von MgO (4,0 bis 0,4 %), CaO (6,8 bis 0,7 %), $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ (11,4 bis 1,8 %) und TiO_2 (1,2 bis 0,1 %). Die Al_2O_3 -, MnO - und Na_2O -Gehalte sind für alle Granitoidtypen annähernd konstant.

	Diorite	Quarzdiorite	Granodiorite	Granite	Leukogranite	Granitgneise, alteriert	Spessartite, alteriert
SiO_2	54,83	62,00	66,52	72,05	76,26	71,00	51,22
TiO_2	1,05	0,66	0,57	0,24	0,11	0,36	0,95
Al_2O_3	15,5	18,24	14,46	14,09	13,12	13,94	16,19
$\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{gesamt})$	7,27	4,50	4,77	2,01	0,75	4,07	12,39
MnO	0,12	0,08	0,08	0,07	0,02	0,06	0,09
MgO	8,08	2,02	2,20	0,53	0,14	0,86	5,00
CaO	5,77	3,76	3,75	1,33	0,49	1,88	8,01
Na_2O	3,34	4,93	3,31	3,62	3,76	3,46	1,97
K_2O	1,68	2,80	3,44	5,11	4,93	4,64	0,80
P_2O_5	0,44	0,23	0,15	0,07	0,01	0,09	0,21
Glühverlust	1,81	0,58	0,51	0,84	0,36	1,36	7,15

Tabelle 2-11: Chemische Zusammensetzung der Hauptgesteinstypen des Nizhnekansker Granitoidkomplexes (Kernproben der Bohrungen 1-I und 1-K, aus: Laverov et al. 2002), in Gew.-%

	Diorite, biotisiert	Quarzdiorite	Tonalite	Granodiorite	Biotitgranite	Leukogranite	Pegmatit	Aplite	Greisen	Mylonite mit Feldspat- Kataklasten	Mylonite verquarzt
Proben- anzahl	(2)	(2)	(5)	(7)	(9)	(5)	(1)	(2)	(1)	(4)	(2)
Makroelemente, %											
SiO ₂	55,19	60,15	64,26	66,59	71,86	74,32	71,55	74,11	77,56	72,78	73,90
TiO ₂	1,21	0,79	0,47	0,41	0,21	0,07	0,05	0,06	0,10	0,08	0,11
Al ₂ O ₃	14,79	15,47	15,61	15,17	13,82	14,61	13,55	12,82	10,83	13,78	13,72
Fe ₂ O ₃	3,41	1,81	2,25	1,63	1,23	0,83	0,71	0,86	0,90	0,77	0,59
FeO	7,96	4,22	3,63	2,52	1,42	0,96	0,88	1,01	1,11	0,92	0,91
MnO	0,08	0,09	0,06	0,08	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,08
MgO	3,99	1,50	1,57	0,96	0,64	0,42	0,20	0,20	0,66	0,30	0,42
CaO	6,83	5,05	5,41	3,46	1,59	0,72	0,10	0,30	0,10	0,82	0,37
Na ₂ O	3,30	3,70	3,75	3,91	3,39	3,90	3,29	3,28	2,44	3,61	3,38
K ₂ O	2,76	6,53	1,36	3,87	4,60	3,78	10,10	7,77	6,87	5,70	5,81
P ₂ O ₅	0,33	0,19	0,13	0,09	0,06	0,07	0,07	0,08	0,07	0,07	0,07
Glühverl.	0,27	0,11	0,24	0,18	0,23	0,12	0,10	0,10	0,10	0,10	0,21
Summe	100,08	99,58	98,74	98,88	99,11	99,85	100,65	100,61	100,79	98,96	99,56
Mikroelemente, 10 ⁻⁴ %											
Li	30,6	3,0	41,2	21,7	19,3	9,3	29,4	2,8	5,8	9,3	22,6
Rb	168,3	101,3	116,6	119,8	134,6	86,1	40,5	160,9	304,0	156,9	117,2
Sr	340,0	860,0	1180,0	558,6	232,9	375,0	70,0	222,5	220,0	142,5	75,0
Ba	440,0	910,0	346,0	601,4	435,6	113,0	20,0	75,0	240,0	290,0	100,0
Nb	10,5	7,6	6,5	9,0	11,6	9,9	14,0	14,5	6,0	6,8	25,0
Zr	145,0	170,0	66,2	123,4	94,2	52,0	14,0	60,0	100,0	54,0	62,5
Y	21,0	17,0	10,3	13,8	14,3	15,1	4,0	12,0	11,0	13,8	31,0
Yb	2,7	2,4	1,5	1,8	1,9	1,4	0,8	1,8	1,4	1,8	3,5
Ga	15,0	13,5	13,2	13,2	14,6	12,8	15,0	17,5	12,0	14,8	16,2
V	205,0	76,0	97,0	43,1	21,3	9,7	2,5	3,6	33,0	4,5	3,2
Cr	72,5	41,0	59,8	51,2	52,3	45,8	50,0	33,5	75,0	46,8	23,5
Ni	42,5	18,5	47,0	57,7	40,1	36,4	65,0	27,2	60,0	19,8	24,5
Co	22,5	8,8	9,5	5,8	5,8	3,9	4,3	3,1	5,0	3,5	3,4
La	21,0	18,0	22,2	18,4	18,7	8,5	2,5	5,4	24,0	7,4	17,2
Ce	52,5	39,0	41,2	35,1	35,9	24,4	20,0	20,0	34,0	20,0	20,0

Tabelle 2-12: Mittlere chemische Zusammensetzung der häufigsten Gesteinstypen des Nizhnekansker Granitoidmassivs (Oberflächenproben aus dem Gebiet „Itatskij“, aus: [Anderson et al. 1998])

Die Gesteine der ersten Intrusionsphase sind in strukturell-textureller Hinsicht inhomogener als die Granite, Alaskite und Adamellite der zweiten Phase. Dies äußert sich in häufigen Fazieswechseln der Diorite, Quarzdiorite und Granodiorite sowie in einem verstärkten Auftreten von Xenolithen der archaischen Rahmengesteine. Die der vergleichenden Gegenüberstellung der Gebiete „Kamennyj“ und „Itatskij“ zugrunde liegenden Erkundungsbohrungen 1-I und 1-K ergaben deutliche Unterschiede zwischen beiden Bereichen im Vorkommen und in der Verteilung der Gesteinsvarietäten, im Grad ihrer hydrothermal-metasomatischen und deformativen Überprägung sowie in ihren petrophysikalischen Eigenschaften [Petrov 2001], [Laverov et al. 2002]. Im Bohrprofil der Itatskij-Bohrung überwiegen Quarzdiorite, Tonalite, Granodiorite und Diorite, gleichzeitig fehlen Leukogranite sowie Alaskite. Demgegenüber dominieren in der 1-K-Bohrung bis 500 m Tiefe Granite und Leukogranite, bei vollständigem Fehlen von Dioriten. Die vergleichsweise starke Deformation und intensive metamorphe Überprägung der Gesteine der Kamennyj-Bohrung sind auf ihre Lage innerhalb einer oberflächlich nicht festgestellten, N-S-

streichenden tektonischen Störungszone zurückzuführen, die im geologisch-geophysikalischen 3D-Modell identifiziert werden konnte (Kap. 5).

Innerhalb des Granitoidkomplexes werden mehrere Generationen von magmatischen Gängen (Aplite, Mikrosyenite, Diabasporphyrite und Lamprophyre) sowie zahlreiche Nebengesteinseinschlüsse bzw. Xenolithe beobachtet. Sie treten, mit Ausnahme der Aplite, gehäuft in den Gesteinen der ersten Intrusionsphase auf. Die systematische räumliche Erfassung der Gänge bzw. Einschlüsse sowie ihre detaillierte mineralogische Untersuchung, inklusive der Kontaktbereiche, sind wichtig für die Bewertung des hydraulischen und geomechanischen Eignungsgrades des Granitoidkomplexes als Endlager-Wirtsgestein.

2.7.2 Geomechanische Eigenschaften der Gesteine

Die strukturell-petrophysikalischen Eigenschaften der potenziellen Wirtsgesteine sind von entscheidender Bedeutung für die Auswahl von Endlagerstandorten. Unter Zugrundelegung der Arbeit von [Starostin et al. 1995] sind:

- eine tektonisch wenig beeinflusste regionalgeologische Position,
- ein elastisch-stabiles Verhalten der Gesteine,
- ihre möglichst nur einphasige deformative Überprägung,
- eine geringe Anisotropie ihrer physikomechanischen Eigenschaften und
- eine plastisch-elastisch reagierende Umgebung des in Frage kommenden Wirtsgesteinsblocks

besonders günstige Standortfaktoren. Aus petrophysikalischer Sicht sind basische Magmatitkomplexe, die sich durch eine vergleichsweise hohe Elastizität und eine geringe Sprödigkeit auszeichnen, insbesondere dann am besten als Endlager-Wirtsgesteine geeignet, wenn sie durch eine Hülle plastisch reagierender Schiefer oder Phyllite mit geringen Festigkeiten, d. h. hoher Tendenz zu duktiler Verformung (Fließen), vor regionalen Deformationen geschützt werden.

Die in Tabelle 2-13 für die wichtigsten Gesteinstypen des Nizhnekansker Granitoidkomplexes zusammengestellten petrophysikalischen Parameter spiegeln die Abhängigkeit des Deformationsverhaltens der Gesteine vom Mineralbestand wider. Quarzdiorite/Diorite und vor allem die metasomatisch überprägten Gang-Spessartite weisen infolge der erhöhten Biotit- und Hornblendegehalte sowie aufgrund geringerer Quarzanteile deutlich niedrigere Festigkeits- und Fließfähigkeits-Grenzwerte auf als die Granite bzw. Leukogranite. Quarzdiorite/Diorite tendieren deshalb stärker zu plastischen Deformationen. Quarzreichere Gesteine, wie Granite oder Leukogranite neigen, bedingt durch die hohe Sprödigkeit des Quarzes, bei mechanischer Beanspruchung stärker zur Bruchdeformation, d. h. Kataklyse und Kluftbildung.

Die physikomechanischen Eigenschaften der Gesteine hängen von ihrer strukturell-texturellen Ausbildung, vom Mineralbestand sowie von ihrem Alterations- und Verwitterungsgrad ab. Intensiv verwitterte Gesteine weisen meist höhere Porositäten bzw. Wasseraufnahmekapazitäten auf und reagieren aufgrund der Neubildung von Tonmineralen und Chloriten plastischer. Für diese Gesteine stellten [Lind et al. 2001] eine deutliche Abnahme der Widerstandswerte gegenüber Kompression fest. Während verwitterte Granitoidproben Werte zwischen 213 und 599 kg/cm² (n = 427) aufwiesen, erreichten unverwitterte, frische Granitoide bis zu 1500 kg/cm².

Gesteinstyp	Uniaxiale Festigkeit, σ_{ic} , MPa	Fließgrenze, σ_{is} , MPa	Poisson-Koeffizient, μ	Bruchdeformation, ε_{ic} , %	plastische Deformation ε_{pl} , %	dynamischer Elastizitätsmodul, $E \cdot 10^4$, MPa	statischer Elastizitätsmodul, $E_{st} \cdot 10^4$, MPa
Granite	252±8	232±8	0,21±0,01	0,58	0,10	6,59±0,13	6,08±0,8
Kataklas. Granit	273	248	0,24	0,47	0,11	7,57	6,65
Granit-Gneise	298±21	248±21	0,21±0,004	0,50	0,06	7,87±0,19	6,69±0,2
Gneis	264	253	0,21	0,65	0,18	5,98	6,48
Granodiorit	175	139	0,21	0,59	0,30	7,64	5,63
Quarzdiorite	193±7	158±7	0,27±0,01	0,38	0,13	7,10±0,31	6,27±0,2
Spessartit	125	99	—	1,25	0,63	—	1,66 (?)

Tabelle 2-13: Zusammenstellung der wichtigsten physikomechanischen Parameter für die Hauptgesteinstypen des Nizhnekansker Granitoidmassivs (aus: [Anderson et al. 1998])

Für die Gesteine des Kamennyj-Gebietes stellten [Laverov et al. 2002] eine größere Heterogenität der physikomechanischen Parameter fest, was sich mit der Lage der Bohrung 1-K in einer regionalen Störungszone erklären lässt (siehe Kap. 5). Als Indikatoren für den Deformationsgrad der Granitoide dienten die mittleren Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Longitudinalwellen und die Anisotropie der Wellenausbreitung in den Gesteinen. Je intensiver die Granitoide deformiert wurden, desto geringere Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Wellen und desto höhere Anisotropiekoeffizienten wurden gemessen. Während die Geschwindigkeitswerte in den Kamennyj-Proben zwischen 2,5 und 5,7 km/s (Mittelwert = 4,8 km/s) schwankten und der Anisotropiekoeffizient 35 % betrug, wurden für die nur sehr schwach deformierten Itatskij-Granitoide Variationen im Bereich 5,0 bis 5,9 km/s (Mittelwert = 5,6 km/s) und ein Koeffizient der Anisotropie von 8 % bestimmt. Diese, auf abgeschwächte Zwischenkornverbindungen und eine intensivere Mikrokluftung in den Kamennyj-Proben zurückzuführenden Unterschiede können erhöhte Wasserdurchlässigkeiten zur Folge haben.

2.7.3 Wärmephysikalische Eigenschaften der Nizhnekansker Granitoide

Zur Bewertung der Langzeitsicherheit der Endlagerung wärmeproduzierender hoch radioaktiver Abfälle müssen die Folgen der Wärmeeinwirkung auf die geomechanischen und hydraulischen Eigenschaften der Wirtsgesteine berechnet (z. B. [Aksjuk & Zarajskij 1994]), experimentell untersucht (z. B. [Balashov & Zarajskij 1982], [Zarajskij 1994]) und in Untertagelaboren gemessen werden (z. B. [Gupalo et al. 1998], [Gupalo 2003]). Die Erwärmung der Gesteine bzw. Grundwässer und die daran gebundenen Veränderungen der physiko-chemischen Milieuparameter sowie der petrophysikalischen Eigenschaften haben negative Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit der technischen, geotechnischen und geologischen Barrieren im Umfeld von HAW-Endlagern, wie z. B. intensivere Korrosion der Behälter, Alteration des Buffermaterials und Verschlechterung seiner Wärmedämm- und Sorptionseigenschaften sowie Zunahme der Wasserdurchlässigkeiten der Gesteine.

Unter dem Einfluss erhöhter Temperaturen und der daran gebundenen Dehydratation von OH-haltigen Mineralen kommt es in Magmatiten/Metamorphiten zu einer Auflockerung der Gesteine. Die von Shabalev et al. (2001) durchgeführten differentialthermoanalytischen Untersuchungen der Nizhnekansker Granitoide ergaben einen Temperaturbereich der Glimmer-Dehydratation zwischen 110 und 570 °C. Für Proben, die mit 10^7 Gy (entspricht 10^9 rad) bestrahlt wurden, steigt die maximale Temperatur der Dehydratation der Glimmer bis auf 650 °C an. Mit dem bei 573 °C zu verzeichnenden Übergang von α - in β -Quarz ist eine Kristallgitteraufweitung bzw. Volumenzunahme verbunden, was deutliche Transformationen der Gesteinsstrukturen zur Folge hat. Die bei einer Erwärmung entstehenden thermoelastischen Spannungen führen zu einer erhöhten Klüftigkeit. Sowohl an die Auflockerung als auch an die ther-

misch induzierte Kluftbildung sind ansteigende Wasserdurchlässigkeiten und abnehmende Festigkeitseigenschaften der Wirtsgesteine gebunden.

Die im Umfeld von Endlagern erwärmten Grundwässer führen zu einer Intensivierung der Wechselwirkungen Grundwasser – Wirtsgesteine. Es kommt zu Stoffumverteilungen und zu Mineralum- bzw. -neubildungen, wie z. B. Entstehung von Montmorillonit, Vermikulit, Chlorit und Zeolithen, die sich größtenteils positiv auf die Isolationseigenschaften der Gesteine auswirken (Verschliessen von Klüften, Verbesserung der Sorptionseigenschaften). Die Mineralumbildungen sind häufig mit einer Volumenzunahme verbunden, was abnehmende Porositäten und Wasserdurchlässigkeiten zur Folge hat. Am intensivsten laufen derartige Verheilungsprozesse von Klüften in basischen Gesteinen ab. Die Umwandlung von Olivin in Serpentin hat z. B. eine 1,5-fache Vergrößerung des Volumens zur Folge, die Alteration von Ca-reichem Plagioklas zu Calcit und Kaolinit ist mit einer Volumenzunahme um 37 % verbunden [Omeljanenko et al. 1994], [Laverov et al. 2001]. [Laverov et al. 1994] bestimmten für Diorite eine durch Hydratisierung hervorgerufene Volumenzunahme von 8 %, für Granodiorite und Granite lagen die Werte unter 1 %.

Außerdem kommt es im Umfeld eines Endlagers in Abhängigkeit vom Temperaturgradienten zu einer Intensivierung der Grundwasserbewegungen durch Wärmekonvektion. Bei sehr hohen Temperaturen entstehen durch Radiolyse Grundwässer mit hohem Oxydationsvermögen, die bei Wechselwirkung mit N_2 oder Sulfiden Salpeter- und/oder Schwefelsäure bilden können. Aufgrund der laut Endlagerkonzept (Kap. 3) erforderlichen Verwendung einer Bentonithaltigen geotechnischen Barriere und der daran gebundenen maximal zulässigen Temperatur von 100 °C im Umfeld der einzulagernden Abfallgebinde, sind die genannten Prozesse für die HAW-Endlagerung im Nishnekansker Granitoidkomplex nicht relevant.

Die thermischen Auswirkungen der HAW-Endlagerung auf die Wirtsgesteine werden durch die Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit der Gesteine geregelt, die wiederum abhängig sind von der mineralogischen Zusammensetzung, vom Störungsgrad und von der Struktur/Textur der Magmatite. [Laverov et al. 2002] bestimmten für 27 Granitoidproben des Nizhnekansker Massivs die in Tabelle 2-13 zusammengestellten wärmephysikalischen Eigenschaften. Ausgehend von diesen Daten weisen Gesteine mit erhöhten Konzentrationen OH-haltiger Minerale (Hornblende, Biotit, Muskovit, Chlorit, Tonminerale), wie Quarzdiorite, Tonalite und metasomatisch überprägte Spessartite, die geringsten Temperatur- bzw. Wärmeleitfähigkeiten sowie die höchsten Wärmekapazitäten auf. Unter den Gesteinen des Nizhnekansker Granitoidkomplexes verfügen die Granite und Leukogranite über die höchsten Temperatur- und Wärmeleitfähigkeiten, sind also aus wärmephysikalischen Gesichtspunkten am besten als Endlager-Wirtsgesteine geeignet. [Laverov et al. 2002] stellten außerdem abnehmende Wärme- und Temperaturleitfähigkeiten und zunehmende Wärmekapazitäten der Nizhnekansker Granitoide bei ansteigenden Temperaturen fest (Tabelle 2-14).

[Omeljanenko et al. 1993] analysierten die Temperaturabhängigkeit der Permeabilität von Granit, Gabbro, Dolerit, Diorit, Diabas, Basalt und Mergel im Bereich von 20 bis 700 °C, bei atmosphärischem Druck und bei bis zu 1 kbar. Dabei stellten sie fest, dass erst ab etwa 250 °C die Permeabilität der untersuchten Gesteinsproben signifikant zunahm. Sowohl in den Granitoiden als auch in den basischen Vulkaniten wurden bei etwa 200 °C die geringsten Permeabilitäten gemessen. Die Untersuchungen zum Einfluss des lithostatischen Druckes auf die Temperaturabhängigkeit der Permeabilität ergab eine Verzögerung des wärmeinduzierten Anstiegs der Wasserdurchlässigkeit der Magmatite bei zunehmenden Drücken. Während bei 50 bis 200 bar die kritische Permeabilität von 10^{-3} mD (entspricht einem k_f -Wert von etwa 10^{-11} m/s) bei 250 bis 300 °C erreicht wird, müssen bei 500 bis 800 bar Temperaturen von > 500 °C herrschen, um Permeabilitäten von 10^{-3} mD zu übertreffen. Derartige Einflüsse auf die Permeabilitäten der Granitoide sind im für die Endlagerung relevanten Temperatur- und Teufenbereich sehr niedrig und können deshalb vernachlässigt werden.

Gesteinstypen	Wärmeparameter	T=18 °C	T=100 °C	T=200 °C
Granite	a , 10^7 m ² /s	15,2±0,4	10,35±0,9	8,9±0,5
	C_p , J/(kg·K)	820±40	920±50	1000±50
	λ , W/(m·K)	3,3±0,15	2,5±0,1	2,2±0,1
Kataklasierte Granite	a	14,83±0,7	9,5±0,5	8,9±0,5
	C_p	840±40	970±50	1040±50
	λ	3,30±0,33	2,44±0,25	2,20±0,22
Granitgneise	a	14,1±2,0	9,8±1,8	8,1±1,2
	C_p	810±40	910±60	990±50
	λ	3,1±0,1	2,3±0,4	2,1±0,2
Gneise	a	14,1±0,7	10,0±0,5	8,3±0,4
	C_p	790±40	850±40	940±50
	λ	2,95±0,3	2,25±0,2	2,07±0,2
Granodiorite	a	9,98±0,5	7,0±0,35	6,0±0,3
	C_p	920±50	1040±50	1100±50
	λ	2,44±0,25	1,93±0,2	1,75±0,2
Quarzmonzodiorite/Tonalite	a	11,1±1,4	9,6±1,0	8,5±0,7
	C_p	890±70	940±40	1020±30
	λ	2,60±0,3	2,4±0,3	2,3±0,3
Quarzdiorite	a	11,1±2,2	8,27±1,6	7,1±1,1
	C_p	860±50	970±70	1040±50
	λ	2,54±0,4	2,1±0,2	1,99±0,25
Spessartite	a	5,5±0,25	4,5±0,25	4,2±0,25
	C_p	1020±50	1120±50	1150±50
	λ	1,52±0,15	1,46±0,15	1,31±0,15
Adamellite	a	11,6±0,6	8,1±0,2	6,8±0,2
	C_p	900±50	1030±50	1090±50
	λ	2,76±0,3	2,20±0,25	1,96±0,2

Erklärungen: a – Temperaturleitfähigkeit, 10^7 m²/s; C_p – Wärmekapazität, J/(kg·K);
 λ – Wärmeleitfähigkeit, W/(m·K)

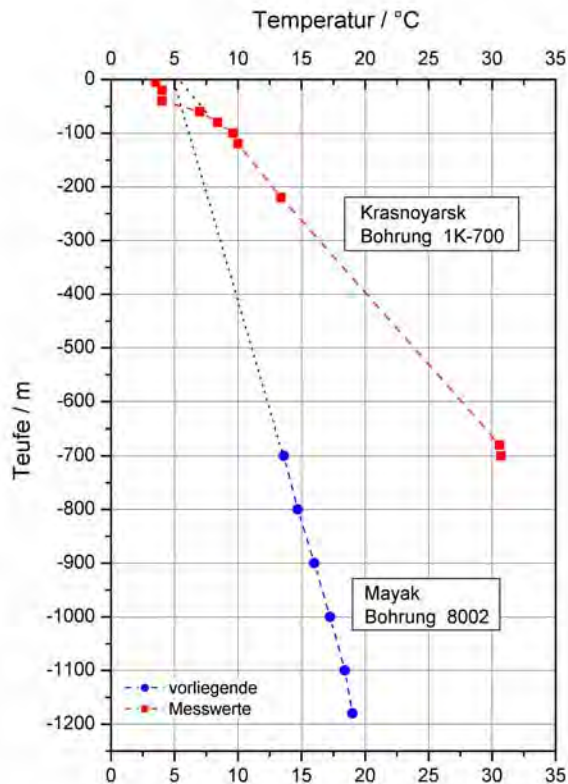
Tabelle 2-14: Mittlere wärmephysikalische Parameter für die wichtigsten Gesteinsvarietäten des Nizhnekansker Intrusivkomplexes (aus: [Laverov et al. 2002])

2.7.4 Geothermische Verhältnisse im Untersuchungsgebiet

Für das Nizhnekansker Granitoidmassiv und seinen metamorphen Rahmen existieren z. Zt. noch keine detaillierten Untersuchungsergebnisse zum natürlichen Wärmefeld. Derartige Angaben sind für Berechnungen der thermischen Auswirkungen des HAW-Endlagers auf die Bentonitbarriere und auf das umgebende Gesteinsmassiv erforderlich. Informationen zur in-situ-Gesteinstemperatur und zu den wärmephysikalischen Eigenschaften der Wirtsgesteine (siehe Kap. 2.7.3) bilden eine wesentliche Grundlage für die Erarbeitung des Endlagerkonzeptes (Kap. 3), d. h. für die Festlegung der Endlagerauslegung bzw. -geometrie und der Anforderungen an die geotechnische Barriere. Morsin (in: Anderson et al. 1996) charakterisierte die Dichte des regionalen Wärmeflusses im Gebiet Krasnojarsk mit 50 mW/m².

Hinweise zur Änderung der Gesteinstemperatur mit zunehmender Teufe sind für die Region Shelesnogorsk aus den bohrlochgeophysikalischen Messungen in den 500 m bzw. 700 m tiefen Erkundungsbohrungen im Gebiet „Verchne-Itatskij“ ableitbar (siehe Kap. 2.8.1). Beispielhaft für die im Gebiet „Kamennyj“ niedergebrachte Bohrung 1-K ist in Abb. 2-14 die Bohrloch-

Temperaturmesskurve wiedergegeben. Daraus lässt sich ein im Vergleich zum Südrural (Produktionsvereinigung Majak, in der Nähe von Jekaterinburg, siehe Teil B des vorliegenden Abschlußberichtes) deutlich höherer geothermischer Gradient für das Untersuchungsgebiet am Südrand der Sibirischen Platte berechnen. Der sich aus den Temperaturmessungen ergebende geothermische Gradient von etwa 37 °/km stimmt gut mit den von Lind (persönl. Mitteilung, 2003) gemachten Angaben (33,8 bis 38 °/km) überein. Im Zuge der weiteren Standorterkundung ist eine Ergänzung bzw. Präzisierung dieser Angaben erforderlich, z. B. durch exakte Temperaturmessungen in der Tiefbohrung 1-E im Gebiet „Jennisejskij“.



Gegenübergestellt sind die Ergebnisse von Bohrlochmessungen im Gebiet „Kamennyj“ (Nähe Shelesnogorsk) und im Gebiet „Mars-2“ (Südrural). Deutlich sichtbar ist der höhere geothermische Gradient für den Südrand der Sibirischen Platte.

Abbildung 2-14: Veränderung der Gebirgstemperatur mit zunehmender Tiefe

2.7.5 Sorptions- und Desorptionseigenschaften der Gesteine

Die Möglichkeit einer Radionuklidmigration im Umfeld eines HAW-Endlagers wird entscheidend von der Grundwasserchemie und von den Sorptions- bzw. Desorptionseigenschaften der Wirtsgesteine bestimmt. Eine maximale Radionuklidrückhaltung liegt unter reduzierenden, schwach basischen Bedingungen, bei hohen Tonmineralkonzentrationen in den alterierten Magmatiten/Metamorphiten und bei geringen Gehalten von Komplexbildnern sowie Kolloiden in den Grundwässern vor.

Die Sorptionseigenschaften von Magmatiten/Metamorphiten werden vor allem durch das Auftreten sekundärer Mineralphasen in metamorph überprägten oder verwitterten Gesteinsbereichen geregelt. Die Ergebnisse autoradiographischer Analysen der Nizhnekansker Granitoide ergaben eine Zunahme der Pu-Sorption in geklüfteten, alterierten Proben [Anderson et al. 2003]. [Omeljanenko et al. 1995], [Lisicin et al. 1997] und [Laverov et al. 2001] wiesen anstei-

gende Radionuklid-Verteilungskoeffizienten Gestein – Lösung bei zunehmendem Verwitterungsgrad von andesitisch-basaltischen Vulkaniten experimentell nach. Dabei sind Montmorillonite, Vermikulite und Chlorite effektive Sorbenten von Sr und Cs, während U besonders intensiv durch Fe- und Ti-Hydroxide fixiert wird.

In unverwitterten Granitoidproben ist ausgehend von autoradiographischen Studien und experimentellen Sorptionsuntersuchungen Biotit der Hauptsorbent für Radionuklide (Tabelle 2-15). Insbesondere für Pu weisen Granodiorite und Tonalite aufgrund ihrer höheren Biotitgehalte deutlich höhere Verteilungskoeffizienten auf als Leukogranite.

Mineral	Masseanteil Mineral im Granodiorit (Masse%)	Spezifische Aktivität von Am in Monomineral-Fractionen (Bq/g)	Relativer Anteil sorbiertes Am (%)
Biotit	19,2	$(1,32 \pm 0,15) \cdot 10^5$	66,6
Feldspäte	64,2	$(1,73 \pm 0,17) \cdot 10^4$	28,6
Quarz	16,6	$(1,11 \pm 0,17) \cdot 10^4$	4,8

Tabelle 2-15: Vergleich des Am-Sorptionsvermögens der gesteinsbildenden Minerale von Nizhnekansker Granodioriten (aus: [Anderson et al. 2003])

Sorptionsversuche mit Probenpulvern beschreiben die natürlichen Verhältnisse in klüftigen Gesteinen, d. h. die Wechselwirkung radionuklidhaltiger Grundwässer mit sekundären Mineralen an den Kluftwänden und im Umfeld der Klüfte, nur unzureichend. Dank der experimentellen Untersuchungen des Radium-Institutes St. Petersburg [Anderson et al. 2001, 2003]) existieren sowohl für Probenpulver als auch für nicht aufgemahlene Gesteinsproben der Nizhnekansker Granitoide umfangreiche Angaben zu den Sorptionseigenschaften für langlebige Nuklide mit dem größten radioaktiven Gefährdungspotenzial. In Tabelle 2-16 sind die Verteilungskoeffizienten für Am, Pu und Np zusammengestellt, die im Ergebnis von Sorptionsversuchen mit Probenpulvern und bikarbonatischen Lösungen bestimmt wurden. Die Intensität der Sorptionsprozesse nimmt bei sinkender Korngröße der Probenpulver stark zu.

Gesteinstyp	Verteilungskoeffizient, K_d , cm^3/g		
	Americium	Plutonium	Neptunium
Leukokrate Granite	930-1300	430-560	0,9-1,3
Tonalite	1300-1800	380-790	0,7-1,3
Granodiorite	940-1800	430-1500	<0,2
Biotitgranit	1200	900	1,8
Verquarzter Granit	800		1,4

Tabelle 2-16: Verteilungskoeffizienten für Am, Pu und Np in den Granitoiden des Nizhnekansker Granitoidkomplexes (bestimmt an Probenpulvern, aus: [Anderson et al. 2003])

Aus Tabelle 2-16 sind höhere Verteilungskoeffizienten für die vierwertigen Am (800 bis 1800 cm^3/g) und Pu (380 bis 1500 cm^3/g) im Vergleich zum fünfwertigen Np (< 0,2 bis 1,8 cm^3/g) ersichtlich. Diese experimentellen Daten sind geringer als die von der NAGRA (1994) publizierten Verteilungskoeffizienten (Am: 5000 l/kg, Pu: 5000 l/kg, Np: 1000 l/kg).

[Anderson et al. 2003] wiesen für die Nizhnekansker Granitoide nach, dass die Intensität der Pu-Sorption durch Zugabe von Kationen in die Modellösungen, wie z. B. K^+ oder Cs^+ , nur unwesentlich verändert wird. Demgegenüber führten ansteigende CO_3^{2-} -Konzentrationen im Modellgrundwasser durch zunehmende Sättigung der zur Verfügung stehenden Bindungskapazitäten zu einer deutlichen Abnahme der Pu-Sorption.

Zusätzlich wurden über 60 Tage andauernde, statische Sorptionsversuche mit 1 cm^3 -Probenwürfeln aus der Kernbohrung 1-K und einem Modellgrundwasser (pH: 8,2) durchge-

führt. Die dabei bestimmten oberflächigen Verteilungskoeffizienten sind in Tabelle 2-17 zusammengestellt. Parallel dazu realisierte Sorptionsversuche mit Am in aufgebohrten Probenkörpern („Brunnen im Würfel“, [Anderson et al. 2001]) ergaben etwas geringere Koeffizienten und Sorptionsgrade zwischen 92,3 und 97,6 %. Außerdem wurde im Ergebnis dieser Laborexperimente festgestellt, dass bei zunehmendem Alterationsgrad der Gesteine ihr Radionuklid-Sorptionsvermögen deutlich zunimmt. Diese Befunde unterstreichen die sehr guten Sorptionseigenschaften der alterierten Granitoide des Nizhnekansker Massivs.

Gesteinstyp	Americium K_a , cm	Plutonium K_a , cm	Neptunium K_a , cm
Leukokrater Granit	6,5 - 9,7	2,1-5,4	0,04
Tonalit	8,1-12,2	4,2-6,2	
Granodiorit	13,3-18,5	52-140	

Tabelle 2-17: Sorption von Am, Pu und Np an nicht aufgemahlene Gesteinsproben der Erkundungsbohrung 1-K (K_a – oberflächiger Verteilungskoeffizient, als Verhältnis zwischen dem Radionuklidgehalt pro Flächeneinheit der Gesteinsprobe und der Radionuklidkonzentration der Lösung; in cm; aus: [Anderson et al. 2001])

Die für nicht aufgemahlene Granit- und Quarzdioritproben des Nishnekansker Intrusivkomplexes bestimmten Cs-, Pu-, Am- und Np-Verteilungskoeffizienten für Sorptions- und Desorptionsprozesse sind in Tabelle 2-18 gegenübergestellt. Die darin zusammengefassten Ergebnisse bestätigen die Daten von Tabelle 2-16. Aus der Datenzusammenstellung ist ersichtlich, dass Np deutlich schlechter sorbiert wird als die anderen Radionuklide. Die Desorptionsverteilungskoeffizienten von Np sind ebenfalls deutlich niedriger als die Werte der übrigen Elemente, wobei die K_d -Werte in der Reihenfolge Cs – Pu – Am zunehmen.

Radionuklide	Verteilungskoeffizient Sorption	Verteilungskoeffizient Desorption
Cäsium	$n \cdot 10^2 - n \cdot 10^3$	$n \cdot 10^3$
Plutonium (IV)	$n \cdot 10^2 - n \cdot 10^3$	$n \cdot 10^4$
Americium (III)	$n \cdot 10^2 - n \cdot 10^3$	$n \cdot 10^4 - n \cdot 10^5$
Neptunium (V)	0, n – 2	1 – 2

Tabelle 2-18: Verteilungskoeffizienten K_d für langlebige Radionuklide, bestimmt an nicht aufgemahlene Granit- und Quarzdioritproben des Nishnekansker Massivs (nach: [Anderson et al. 2003])

Auf der Grundlage der von ihnen durchgeführten Sorptionsexperimente berechneten [Anderson et al. 2000] die summarischen Sorptionsverteilungskoeffizienten sowie die Migrationsraten der Radionuklide Cs, Pu, Am und Np in den Granitoiden des Nishnekansker Massivs. Die in Tabelle 2-19 zusammengestellten Kalkulationsergebnisse der Migrationsraten basieren auf folgenden Modellannahmen:

- für monolithische Gesteine: Porosität – $5 \cdot 10^{-3}$, hydraulische Leitfähigkeit – $3 \cdot 10^{-7}$ m/d, hydraulischer Gradient – $1 \cdot 10^{-2}$, aktuelle lineare Rate der Wassermigration – $2 \cdot 10^{-4}$ m/a;
- für geklüftete Gesteine: Porosität – $5 \cdot 10^{-2}$, hydraulische Leitfähigkeit – $3 \cdot 10^{-5}$ m/d, hydraulischer Gradient – $1 \cdot 10^{-2}$, aktuelle lineare Rate der Wassermigration – $2 \cdot 10^{-2}$ m/a.

Die maximale, im Rahmen dieser Kalkulationen für Np bestimmte Migrationsrate von $2 \cdot 10^{-5}$ m/a bedeutet eine per Migration zurückgelegte Entfernung von 1 m in 50 000 Jahren. Die Zahlenwerte für die anderen Radionuklide liegen deutlich unterhalb dieser Distanzangabe.

Radio-nuklid	$K_d \text{ summ (cm}^3/\text{g)}$	Migrationsrate (m/a) Monolithische Gesteine	Migrationsrate (m/a) Geklüftete Gesteine
Cs	$(5-9) \cdot 10^2$	$(4-8) \cdot 10^{-10}$	$(0,8-1,3) \cdot 10^{-7}$
Pu	$(7-9) \cdot 10^2$	$(6-8) \cdot 10^{-10}$	$(0,8-1) \cdot 10^{-7}$
Am	$(1,3-3,4) \cdot 10^3$	$(1-3) \cdot 10^{-10}$	$(2-5) \cdot 10^{-8}$
Np	4-28	$(0,1-1) \cdot 10^{-8}$	$(0,2-2) \cdot 10^{-5}$

Tabelle 2-19: Vergleich der Radionuklid-Rückhalteeigenschaften monolithischer und geklüfteter Granitoide des Nishnekansker Massivs (Modellannahmen siehe Text, nach: [Anderson et al. 2000])

Ergänzend publizierten [Anderson et al. 1998] und [Shabalev et al. 2001] die Ergebnisse von Untersuchungen bezüglich des Am-, Pu-, Np- und Cs-Sorptionsvermögens der gesteinsbildenden (Biotit, Muskovit, Mikroklin und Andesin) und akzessorischen Minerale (Zirkon, Magnetit, Apatit und Monazit) der Nizhnekansker Granitoide. Die Untersuchungen ergaben aufgrund des irreversiblen Einbaus der Radionuklide in die Kristallgitter nur geringe Desorptionsraten von $\leq 6\%$. In den Versuchen wurde ein hohes Sorptionsvermögen der z. T. in den Gesteinen vorkommenden Sulfide und Hämatite/Goethite bestimmt. Die ebenfalls mitgeteilten Diffusionskoeffizienten schwanken in Abhängigkeit vom Lithotyp zwischen 10^{-13} und $10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$ (für Am) bzw. zwischen 10^{-12} und $10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$ (für Pu).

2.7.6 *Hydrothermal-metasomatische Alterationen der Gesteine und ihre Auswirkungen auf die Festigkeits- und Sorptionseigenschaften*

Die Gesteine des Nizhnekansker Granitoidkomplexes wurden im Verlaufe ihrer Entwicklung polymetamorph überprägt. Poluektov (in: Laverov et al. 2002) unterscheidet postmagmatische Alterationsprozesse, lokale dynamometamorphe Hochtemperatur-Überprägungen, die zur Bildung von Mylonit-I und Kataklasit-I führten, sowie niedrigtemperierte hydrothermal-metasomatische Umwandlungsprozesse in der Nähe von Klüften, in deren Ergebnis Mylonit-2 und Kataklasit-2 gebildet wurden. Mit diesen Mineralum- und -neubildungen sind z. T. Veränderungen der chemischen Zusammensetzung der Gesteine verbunden. Bei den hochtemperierten Metamorphose- und Deformationsprozessen bleiben die SiO_2 , Al_2O_3 - und TiO_2 -Gehalte annähernd gleich, während die MgO -, CaO -, K_2O - und teilweise die Na_2O -Konzentrationen leicht zunehmen (Tabelle 2-11 und 2-12). Für die niedrigtemperierten Umwandlungsprozesse hängen die An- bzw. Abreicherungstendenzen der Elemente stark vom Ausgangsgestein und von der Physikochemie der Grundwässer ab.

Die im Ergebnis spät- bzw. postmagmatischer Prozesse gebildeten Mylonitisierungs-, Kataklaste- und Blastesezonen sind durch schiefrig-bändrige, gneisähnliche, blastokataklastische Texturen gekennzeichnet und erreichen Mächtigkeiten von bis zu 50 m. Sie führten lokal zur Entstehung von Hochtemperatur-Quarz-Feldspat-Metasomatiten, z. T. in gängchenförmiger Ausbildung. Unter dem Mikroskop sind in den Mineralen dieser Gesteine Protoklaste-Spuren feststellbar, d. h. Anzeichen typischer Veränderungen der Minerale, die sich im Ergebnis der Platznahme und Erstarrung der Schmelzen ergeben, wie z. B. streifenförmige, undulöse Auslöschung der Quarze oder Zwillingsverbiegungen der Feldspäte. Diese wirken sich nicht negativ auf die physikomechanischen Eigenschaften der Gesteine aus [Anderson et al. 2001]. Die in den Granitoiden vorkommenden Spuren früher Deformationen sind häufig verheilt.

Die dynamometamorphe Überprägung der Gesteine hatte lokal eng begrenzt die zonenhafte Ausbildung von Granitgneisen, Plagiogneisen und kristallinen Schiefern mit Mächtigkeiten bis 10 m zur Folge. Einige dieser Zonen wurden grünschieferfaziell überprägt, was zur Bildung von bis zu 2 m mächtigen Chlorit-Epidot-Aktinolith-Schiefern führte. Die Feldspäte dieser Gesteine sind, ausgehend von den Spaltbarkeitsflächen und Zonalitätskonturen, größtenteils stark

pelitisiert. Dies senkt zwar die Festigkeitseigenschaften der Gesteine leicht, hat aber durch die Tonmineralbildung im Verlaufe der Pelitisierung eine Verbesserung der Sorptionseigenschaften der alterierten Gesteine zur Folge.

Im Umfeld von Klüften und im Kontaktbereich von Dykes bzw. Gängen werden tieftemperierte hydrothermal-metasomatische Umwandlungen der Granitoide beobachtet. Im Ergebnis dieser Prozesse bildeten sich Zonen chloritisierter, sericitisierter und argillitisierter Gesteine, die häufig durch Bereiche intensiver Kataklyse und Gängchen- bzw. Breccienbildung sowie durch nichtmineralisierte Klüfte und kleinvolumige Auslaugungshohlräume begleitet werden. Diese Mylonit-II- bzw. Kataklysit-II-Bildungen überlagern häufig höhertemperierte Deformationszonen und setzen sich aus Quarz, Karbonaten, Sericit, Tonmineralen (Kaolinit, Smectit, Hydroglimmer), Chlorit, Leukoxen und Hämatit/Goethit zusammen. Typisch ist das netzartige Auftreten feiner Gängchen von Quarz, Karbonaten, Chlorit, Sulfiden und Tonmineralen. Die bei der Alteration gebildeten Hämatite und Goethite verfügen ebenso wie die Tonminerale über ein hohes Sorptionsvermögen für Radionuklide (siehe Kap. 2.7.5).

Durch die sekundäre Bildung von Tonmineralen sind intensiv mikrogeklüftete Gesteinsbereiche und tektonische Störungszonen häufig durch sehr geringe Wasserdurchlässigkeiten charakterisiert und können effektiv wirkende hydraulische, lithologische, geochemische und Sorptionsbarrieren darstellen.

2.8 Stand und Bewertung der bisher vorliegenden Daten zum geologischen Bau der potenziellen Endlagerregionen

Zwecks Erarbeitung von Vorschlägen für weitere, sich auf der Basis von Langzeitsicherheitsüberlegungen als notwendig zur detaillierteren Standortcharakterisierung erweisende Untersuchungen (siehe Kap. 8) sind die bisher durchgeführten Erkundungsarbeiten zuerst zusammenfassend darzustellen und zu bewerten. Diese Bewertung erfolgt auf der Grundlage von umfangreichen Erfahrungen, die bei der Auswahl und Erkundung potenzieller deutscher Endlagerstandorte sowie durch die jahrzehntelange Mitarbeit in internationalen Endlagerprojekten und Untertagelabors gesammelt wurden.

2.8.1 Stand der bisherigen Erkundungsarbeiten

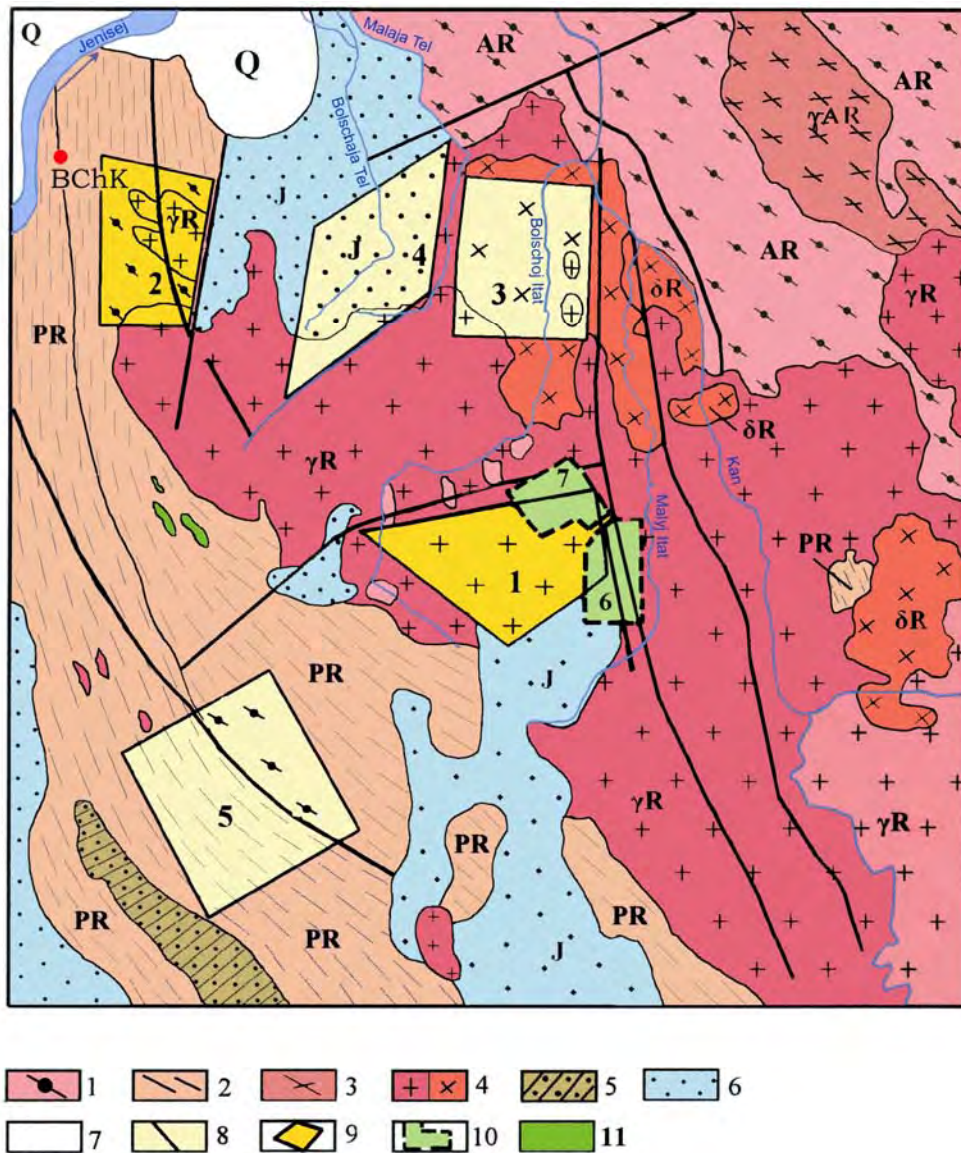
Angeichts der im BChK Shelesnogorsk bereits angehäuften großen Menge hoch radioaktiver Abfälle und der an diesem Standort geplanten Errichtung einer Wiederaufbereitungsanlage wurde Anfang der 90-iger Jahre der Beschluß zur Prüfung der Möglichkeiten zur Errichtung eines unterirdischen HAW-Endlagers im Umfeld des BChK gefasst. Seit 1993 werden deshalb bei Beteiligung zahlreicher wissenschaftlicher Einrichtungen bzw. Firmen und unter Aufsicht von MINATOM (jetzt: ROSATOM) komplexe geologisch-geophysikalische Untersuchungen zur möglichst umfassenden Charakterisierung des geologischen Baus und der geologischen Entwicklung dieser Region durchgeführt. Auf der Grundlage der in dieser Phase überwiegend geomorphologischen und geophysikalischen Erkundungsergebnisse sowie auf der Basis von Fernerkundungsdaten erfolgte seit 1996 die Auswahl und vergleichende Bewertung potenziell geeigneter Endlagerstandorte. Im weiteren Verlauf der Arbeiten wurden die Standorte „Verchne-Itatskij“ und „Jennissejskij“ (siehe Abb. 2-2) detaillierter untersucht. Nach Abschluss der Erkundungsarbeiten werden die beiden Standorte bezüglich ihrer Eignung als langzeitsichere HAW-Endlagerstandorte alternativ bewertet.

Zur Vorauswahl möglicher Standortregionen für ein HAW-Endlager im Umfeld des BChK wurden vor allem photogeologische, geologisch-geomorphologische und kleinmaßstäbliche geophysikalische Untersuchungsverfahren eingesetzt, wie z. B.:

- die Interpretation von Fernerkundungsdaten (Lineationen auf Luftbild- und Satellitenaufnahmen),
- strukturelle Interpretationen von geologischen und topographischen Karten (Störungen, magmatische Gänge, Flusssystem),
- regionale gravimetrische, seismische und geomagnetische Messungen, z. T. unter Einsatz von aerogeophysikalischen Verfahren,
- geologisch-tektonische Geländeaufnahmen, bei denen trotz schlechter Aufschlußverhältnisse versucht wurde, die Streich- und Einfallrichtungen von Störungszonen bzw. Klüften zu erfassen, sowie
- geomorphologische Analysen von Reliefformen, Terrassenbildungen und Einebnungsflächen.

Diese unter Leitung des Radium-Institutes St. Petersburg durchgeführten Arbeiten wurden Mitte der 90er Jahre mit der Ausweisung von 5 potenziell geeigneten Gebieten zur weiterführenden Untersuchung abgeschlossen. Dabei handelt es sich um (siehe Abb. 2-15):

- das zwischen den Unterläufen der Flüsse Bolshoj Itat und Malyj Itat befindliche „Verchne-Itatskij“- Gebiet, das sich aus Nishnekansker Granitoiden zusammensetzt, die zu einem geringen Teil durch jurassische Sedimente überdeckt sind. Innerhalb dieser Region und der unmittelbar angrenzenden Territorien wurden die Bereiche „Itatskij“ und „Kamennyj“ für detaillierte Standortuntersuchungen ausgegliedert (Anderson et al. 1996).
- das Gebiet „Jennissejskij“, das eine Entfernung von ca. 5 km zum BChK aufweist und im nordwestlichen Kontaktbereich des Nishnekansker Granitoidmassivs mit den proterozoischen metamorphen Rahmengesteinen liegt.
- das im Oberlauf des Flusses Bolschoj Itat innerhalb des Nishnekansker Granitoidmassivs positionierte Gebiet „Nishne-Itatskij“,
- das Gebiet „Telskij“, das im Unterlauf des Flusses Bolschoj Tel liegt und an dessen Oberfläche überwiegend jurassische Sedimente anstehen, die das Nishnekansker Granitoidmassiv überdecken und
- das im Kontaktbereich unterschiedlicher proterozoischer Metamorphite gelegene Gebiet „Juschnyj“.



Symbole: 1 – archaische Gneise, 2 – proterozoische Gneise, 3 – archaische Orthoklas-Granite, 4 – Nischnekansker Granitoide, 5 – devonische Sedimente, 6 – jurassische Sedimente, 7 – Quartärablagerungen, 8 – tektonische Störungszonen, 9 – perspektivische Gebiete, 10 – detailliert geologisch-geophysikalisch untersuchte Gebiete

Perspektivische Gebiete: 1 – Verchne-Itatskij, 2 – Jennissejskij, 3 – Nischne-Itatskij, 4 – Telskij, 5 – Juschnyj, 6 – Kamennyj, 7 – Itatskij

Abbildung 2-15: Lage der im Ergebnis umfangreicher Voruntersuchungen ausgegliederten, potenziell geeigneten Endlager-Standorte im Umfeld des Bergbau-Chemischen Kombines Shelesnogorsk (Maßstab: 1 cm entspricht ca. 10 km)

Da das Grundwasser in unverwitterten Magmatiten/Metamorphiten überwiegend an Klüfte, Störungszonen und lithologische Kontakte gebunden ist, erfordern die exakte hydrogeologische Charakterisierung derartiger Standorte und die Bewertung ihres Eignungsgrades für die Errichtung eines unterirdischen HAW-Endlagers eine möglichst detaillierte Analyse des strukturellen Baus des geologischen Untergrundes. Für die räumliche Erfassung des Kluft- und Störungszonen-Inventars bietet sich der Einsatz zerstörungsfreier geophysikalischer Methoden an.

Im Umfeld des BChK wurden seit Mitte der 50er Jahre umfangreiche geophysikalische Messungen durchgeführt, deren Resultate in das Endlagerstandort-Auswahlverfahren einbezogen

wurden. Dabei gestattet die Kombination unterschiedlicher geophysikalischer Messverfahren neben der strukturellen auch eine lithologische Differenzierung der für die Endlagerung in Frage kommenden Teufenbereiche sowie eine Abschätzung einzelner physikalischer Gesteinsparameter und eine Bestimmung der Mächtigkeiten sedimentärer Überdeckungen der Endlager-Wirtsgesteine. Die Sichtbarmachung des geologisch-tektonischen Baus der potenziellen Einlagerungsbereiche mittels Oberflächen- und/oder Aerogeophysik ist im Vergleich mit Bohrarbeiten deutlich zeit- und kostengünstiger [Knödel et al. 1997], [Lange & Knödel 2003]. Der Einsatz der Geophysik entbindet allerdings nicht von der Notwendigkeit des Abteufens von Erkundungsbohrungen, sondern kann lediglich zu einer deutlichen Reduzierung der Zahl der erforderlichen Bohrungen führen.

Neben aeromagnetischen und aerospektrometrischen Untersuchungen kamen in der frühen Phase der geologischen Charakterisierung der Region geoelektrische, gravimetrische sowie oberflächige geomagnetische und Emanationsmessungen zur Anwendung (Tabelle 2-20, Abb. 2-16, weitergehender Überblick in [Anderson et al. 1998], [Anderson 2001]).

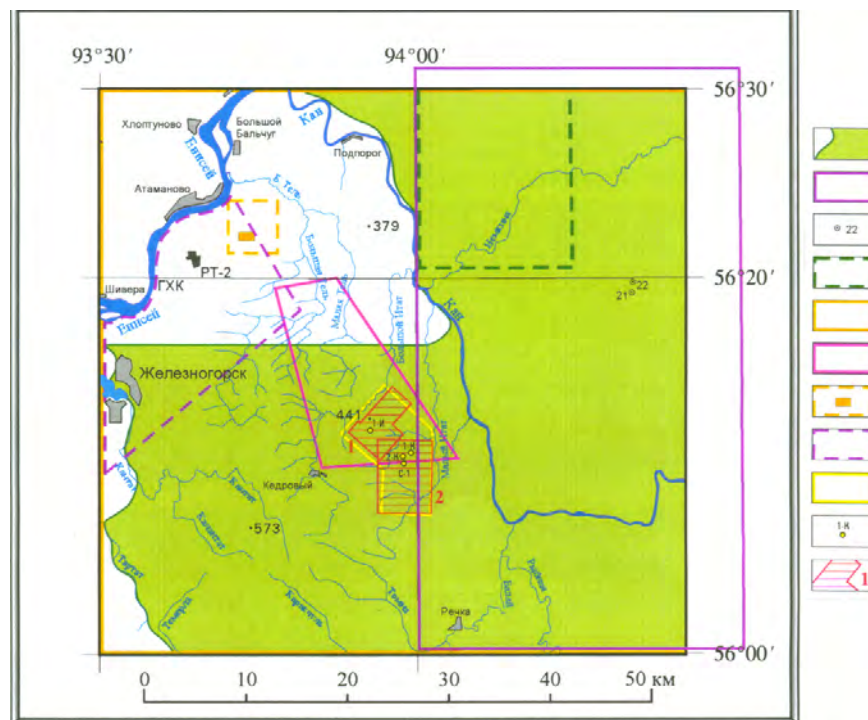
„Verchne-Itatskij“-Gebiet	„Jennissejskij“-Gebiet
Aeromagnetik 1 : 200 000 (1956, 1974)	Gravimetrie 1 : 200 000 (1974)
Geoelektrik (VES, Dipolsondierung) (1958 bis 1959)	Gravimetrie 1 : 200 000 (1995 bis 1996)
Geomagnetik (1961 bis 1963)	Geomagnetik 1 : 50 000 bis 1 : 25 000 (seit 2001)
Aerogeophysik (Radiometrie, Aeromagnetik) 1 : 50 000 (1961, 2001)	Geoelektrik (AMTS, REMP, VES) 1 : 25 000 (seit 2001)
Gravimetrie 1 : 200 000 (1974, 1995 bis 1996)	Gravimetrie 1 : 50 000 (seit 2001)
Geoelektrik (AMTS, REMP) 1 : 25 000 (1961 bis 1963; 1993 bis 2001)	Seismik auf Profilen (seit 2001)
Gravimetrie 1 : 50 000 (1996 bis 1999)	He-Messungen auf Flächen (seit 2001)
Geomagnetik 1 : 25 000 (1996 bis 1999)	Emanationsmessungen auf Profilen (Ra-Messungen) (seit 2001)
2D- und 3D-Seismik (1996 bis 1997, 2000 bis 2001)	
Geoelektrik (VES) (1998 bis 1999)	
He-Messungen (1996 bis 2000)	
Emanationsmessungen (Ra-Messungen) (1961 bis 1963; 1996 bis 1998)	

Tabelle 2-20: Zusammenstellung der auf den möglichen Endlager-Standorten „Verchne-Itatskij“ und „Jennissejskij“ durchgeführten geophysikalischen Untersuchungen

Bereits 1956 wurden durch „Vostsibneftegeofizika“ regionale aeromagnetische Aufnahmen im Maßstab 1 : 200 000 realisiert. Die Aerogeophysik bietet sich für die geophysikalische Untersuchung großflächiger Areale in abgelegenen, weitgehend unzugänglichen Regionen an. Die aeromagnetischen Untersuchungen dienten vorrangig zur Feststellung der Grenzen der Sibirischen Plattform.

1958/59 erfolgten im Gebiet von Shelesnogorsk auf einer Fläche von 1 400 km² geoelektrische Messungen mittels Vertikaler Elektrosondierung (VES) und Dipolsondierung zur Analyse der Grundwasserführung der meso- und känozoischen Ablagerungen. Bei umfangreichen Sucharbeiten nach Eisen- und Uranlagerstätten kamen anschließend bis 1961 aeromagnetische und aerogammaspektrometrische Untersuchungen (1 : 50 000, in Bereichen festgestellter Anomalien 1 : 10 000) zur Anwendung. Sie dienten gleichzeitig zur Rekonstruktion des oberflächennahen geologischen Aufbaus der Region.

Von 1961 bis 1963 wurden zur Unterstützung der geologischen Kartierungsarbeiten oberflächlich geomagnetische und geoelektrische („Elektroprofilierung“) sowie Emanationsmessungen durchgeführt, deren Ergebnisse, abgesehen von den geomagnetischen Befunden, allerdings nur schwer interpretierbar waren. Anfang der 70er Jahre erfolgten kleinmaßstäbliche gravimetrische und aeromagnetische Untersuchungen zur Rekonstruktion des Tiefenbaus der Region (siehe Anderson et al. 1994). In deren Ergebnis wurde z. B. eine Karte des anomalen magnetischen Feldes im Maßstab 1 : 100 000 erstellt. Unter Berücksichtigung aller bis dahin verfügbaren geologisch-geophysikalischen Daten konnten erste strukturell-tektonische Karten der Region im Maßstab 1 : 200 000 vorgelegt werden. Eine Besonderheit dieser frühen Erkundungsphase der Region um Schelesnogorsk besteht in dem Fehlen von Tiefbohrungen.



Symbole (von oben nach unten): 1 – aeromagnetische Messungen 1 : 200 000, 2 – aerogeophysikalische Messungen 1 : 50 000, 3 – Gebiete der oberflächigen Kontrolle der aerogeophysikalischen Anomalien, 4 – oberflächengeophysikalische Messungen zur Unterstützung der geologischen Kartierung, 5 – gravimetrische Messungen 1 : 200 000, 1974, 6 – geoelektrische Arbeiten mittels AMTS und REMP, 1997, 7 – spezielle Geoelektrik, 1994 – 2000, 8 – gravimetrische Messungen im Maßstab 1 : 200 000, 1995 – 1996, 9 – gravimetrische Messungen 1 : 50 000, 10 – Tiefbohrungen, 11 – Gebiete „Itatskij“ (1) und „Kamennyj“ (2)

Abbildung 2-16: Überblick zur räumlichen Verteilung der im Umfeld des BChK Schelesnogorsk bis 1999 durchgeführten geophysikalischen Erkundungsarbeiten

Auf der Grundlage der Interpretationsergebnisse der gemessenen geophysikalischen Felder erfolgte Mitte der 90er Jahre unter Einbeziehung von geomorphologisch-geologischen Geländebeobachtungen und Kartierungsbefunden sowie von Resultaten der Dechiffrierung von kosmischen und Luftbilddaufnahmen die Auswahl potenziell geeigneter Gebiete für die HAW-Endlagerung (Abb. 2-15). Eine Gegenüberstellung der vorausgewählten Regionen von jeweils etwa 30 bis 40 km² ergab ein Ranking der nachfolgend detaillierter zu untersuchenden Regionen, wobei ausgehend von den bis dahin vorliegenden Daten das Gebiet „Verchne-Itatskij“ die beste Bewertung erhielt [Anderson et al. 1996].

Ab 1995/96 wurden im Rahmen der Detailerkundung des Gebietes „Verchne-Itatskij“ und ab 2001 zusätzlich innerhalb des Gebietes „Jennissejskij“ großmaßstäbliche geophysikalische Untersuchungen auf Messprofilen (siehe Abb. 2-3) realisiert, z. T. gepaart mit Erkundungsbohrungen. Die überwiegend innerhalb des Gebietes „Verchne-Itatskij“ gelegenen Bereiche „Kamennyj“ und „Itatskij“ (Abb. 2-2) wurden oberflächlich mittels Kombination aus geomagnetischen (1 : 25 000), gravimetrischen (1 : 50 000), seismischen und geoelektrischen Messverfahren untersucht (Tabelle 2-20, [Anderson et al. 1999], [Lind et al. 2001]).

Insbesondere die mit sehr großem Aufwand durch das „Wissenschaftliche Forschungsinstitut für die Erdkruste“ der Staatlichen Universität St. Petersburg (Arbeitsgruppe Ljubceva) durchgeführten geoelektrischen Messungen gestatteten die Ausgrenzung von Bereichen mit erhöhter Klüftigkeit bzw. von Störungszonen bis in eine Tiefe von ca. 3 km. Dabei kamen die Verfahren audiomagnetotellurische Sondierung (AMTS), vertikale elektrische Sondierung (VES) und radioelektromagnetische Profilierung (REMP) zum Einsatz. Stark geklüftete Gebirgsbereiche wurden aufgrund ihrer erhöhten Wasserführung und/oder der mineralogisch bedingten zunehmenden elektrischen Leitfähigkeiten (Tonmineralanreicherungen durch Alteration der Gesteine) erfasst. Gleichzeitig ermöglichten die geoelektrischen Untersuchungen die Abtrennung der Lockersedimente (quartäre Ablagerungen, Verwitterungskruste, jurassische Sedimente) von den Granitoiden, die deutlich höhere spezifische elektrische Widerstände aufweisen.

Auf der Grundlage der geoelektrischen Befunde wurden für beide Bereiche Isolinienkarten der Teufe des Tops schwach durchlässiger Granitoide (der spezifische elektrische Widerstand ρ ist in diesen Gesteinen $\geq 5\,000\,\Omega\text{m}$) konstruiert und Gebiete für die Detailerkundung bzw. Bohransatzpunkte für das Abteufen von Erkundungsbohrungen vorgeschlagen. Ein möglicher Bereich dafür ist der Nordteil des Gebietes „Kamennyj“, wo sich der Top $\pm$ monolithischer Granitoide in 100 bis 250 m Tiefe befinden soll [Anderson et al. 1999].

Im Ergebnis von parallel zu den Geoelektrik-Arbeiten im Maßstab 1 : 50 000 durch die „Gravimetrische Expedition N°3“ durchgeführten gravimetrischen Messungen (dabei wurden die Gebiete mit einem Messprofil-Netz von 500*250 m bis 250*100 m überzogen) konnten, bei Berücksichtigung der magnetischen, elektrischen und seismischen Untersuchungsbefunde, in beiden Gebieten weitgehend unzerstörte Gebirgsbereiche ausgegliedert werden. Auf der Grundlage der gravimetrischen Daten wurden Bouguer-Schwerekarten berechnet, deren Interpretation unter Berücksichtigung der bereits vorliegenden Resultate aus den 1 : 200 000-Messungen erfolgte. Die in den Schwerekarten sichtbaren Minima können mit zunehmenden Mächtigkeiten der Lockergesteinsbedeckung in Depressionen oder mit dem gehäuften Auftreten von Leukograniten der zweiten Intrusionsphase des Granitoidmassivs bzw. mit Störungszonen erklärt werden. Maxima wurden auf erhöhte Anteile von dioritisch-granodioritischen Gesteinen der ersten Intrusionsphase zurückgeführt. Aus den gravimetrischen Daten ergeben sich unter Berücksichtigung der magnetischen, elektrischen und seismischen Untersuchungsbefunde Hinweise zur Lage $\pm$ monolithischer, weitgehend unzerstörter Gesteinsbereiche, z. B. im Gebiet „Kamennyj“ zwischen den Magistralen 3 und 4 sowie im Bereich der Magistrale 2.

Die auf beiden Erkundungsgebieten durchgeführten geomagnetischen Messungen hatten die geologisch-geophysikalische Kartierung der Kontakte der Granitoide mit den Rahmengesteinen und der verschiedenen Intrusionsphasen untereinander sowie von Inhomogenitäten im Granitoidpluton (Gänge, Xenolithe bzw. Einschlüsse) zum Ziel. Gleichzeitig sollten die mittels Protonengenerator gemessenen Anomalien des magnetischen Totalfeldes bzw. der daraus abgeleitete Vertikalgradient der magnetischen Totalintensität Aufschluss über das Vorkommen von Störungszonen und über die Mächtigkeit der sedimentären Überdeckung sowie der Verwitterungskruste der Granitoide liefern. Die Gesteine des Nishnekansker Massives enthalten bis zu 1,3 % Magnetit [Shabalev et al. 2001], dessen Oxydation in Störungszonen geomagnetisch nachweisbar sein müsste. Genauere Angaben zu den Ergebnissen der geomagnetischen Untersuchungen liegen der deutschen Seite nicht vor.

Die in den Jahren 1996/1997 und ab 2000 entlang von Profilen durch Mitarbeiter der Krasnojarsker Staatlichen Universität realisierten seismischen Untersuchungen dienten zur Konturierung des Hangenden des Granitoidmassivs und von $\pm$ monolithischen Gesteinsblöcken sowie zur Abgrenzung von Störungszonen. Detaillierte Ergebnisberichte konnten bisher nicht eingesehen werden.

Ab dem Jahre 2001 wurden in Auswertung der bisherigen Befunde auf bis zu 20 km langen Profilen vor allem nördlich und westlich der Gebiete „Kamennyj“ und Itatskij“ zusätzliche Messungen mittels audiomagnetotellurischer Sondierung durchgeführt [Ljubceva 2002]. Abb. 2-17 zeigt die Lage der ergänzenden Geoelektrik (AMTS)-Profile im Vergleich zu den Gebieten „Kamennyj“ und „Itatskij“. Gleichzeitig erfolgten innerhalb des Gebietes „Itatskij“ sowie im West- und Zentralteil des Gebietes „Kamennyj“ aeromagnetische und aerogammaspektrometrische Untersuchungen im Maßstab 1 : 50 000. Sie waren vor allem auf das Studium des SW-Kontaktes der Granitoide mit den metamorphen Rahmengesteinen der Atamanov-Serie sowie auf den Nachweis von Störungszonen ausgerichtet (siehe [Anderson et al. 2001], [Ljubceva 2002]). Dabei zeichneten sich Bereiche stark kataklasierter und mylonitisierter Granitoide im Magnetfeld im Vergleich mit nicht alterierten Gesteinen, bedingt durch die Oxydation von Magnetit, durch geringere magnetische Suszeptibilitäten aus.

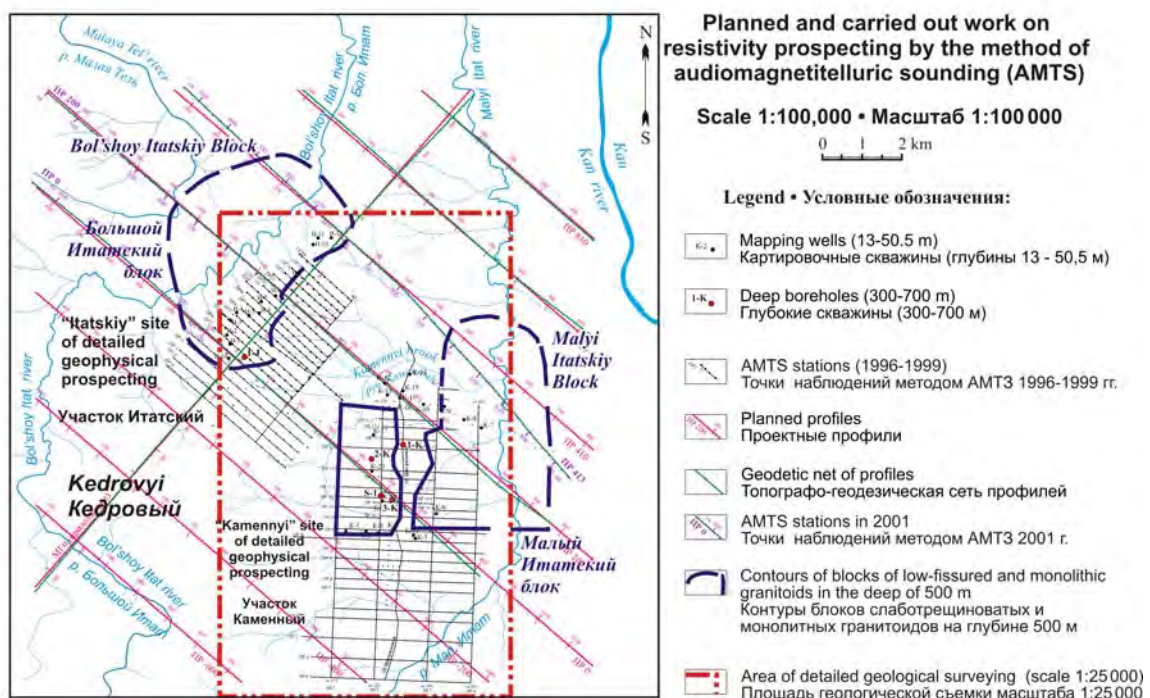


Abbildung 2-17: Lage der im Jahr 2001 realisierten zusätzlichen Geoelektrik-Profile, die zur räumlichen Abgrenzung der $\pm$ monolithischen Gesteinsblöcke „Bolshoj Itatskij Block“ (Westteil des „Itatsker“ Gebietes und dessen nordwestliche Fortsetzung) und „Malyj Itatskij Block“ (Nordteil des Gebietes „Kamennyj“ und dessen nordöstliche Fortsetzung) dienen

Diese aerogeophysikalischen Detailmessungen ergänzen die bereits Mitte der 50er und Anfang der 70er Jahre durchgeführten aeromagnetischen und aerogammaspektrometrischen, regional-geologischen Untersuchungen. Die mit einer „AN-2“ realisierten Messungen erfolgten bei einer Überflughöhe von 20 bis 100 m auf im Mittel 60 km langen Profilen, die untereinander einen Abstand von 500 m aufwiesen. Die Auswertung der aeromagnetischen Aufnahmen in

Form von Isolinkarten des anomalen Magnetfeldes ergab eine deutliche Trennung zwischen metamorphen und granitoiden Gesteinen sowie zahlreiche Hinweise auf das Auftreten von Störungszonen, die relativ gut mit den Befunden geomorphologischer Untersuchungen (Lukina 2000) übereinstimmen.

Zur Verbesserung der Interpretationsmöglichkeiten der Resultate der Oberflächen- und Aero-geophysik sowie zur direkten Untersuchung des struktur- und hydrogeologischen Baus des oberflächennahen Teufenabschnitts und des geplanten Einlagerungsniveaus wurden in den Untersuchungsgebieten „Verchne-Itatskij“ und „Jennissejskij“ 36, bis zu 50 m tiefe Kartierungsbohrungen und mehrere, bis zu 700 m tiefe Erkundungsbohrungen niedergebracht. Tabelle 2-21 gibt einen Überblick zu den bisher in den beiden Gebieten realisierten Erkundungsbohrungen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass nicht alle genannten Bohrungen im Rahmen der Standorterkundungen niedergebracht wurden und deshalb z. T. auch nicht für spezielle hydrogeologische Untersuchungen zur Verfügung standen. So z. B. wurden die Bohrungen S-1 und S-2 im Rahmen der „Geologischen Kartierung 1 : 200 000“ des Blattes 0-46-XXXIV durch „Krasnojarskgeolsjomka“ gebohrt. Die Lage der Bohrungen ist z. T. aus Abb. 2-3 ersichtlich.

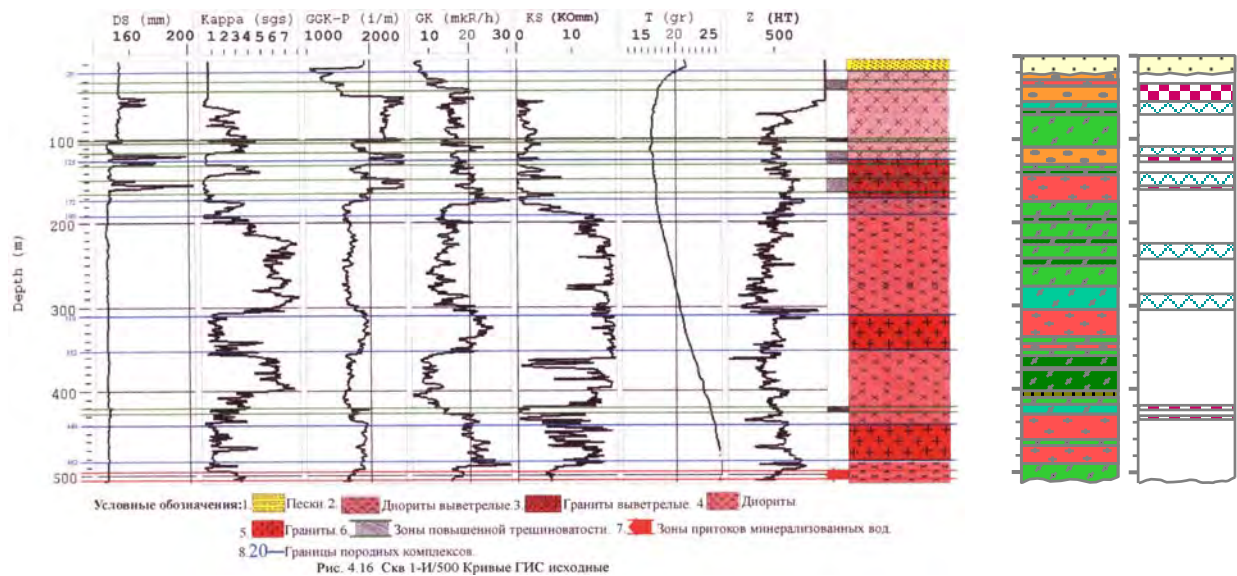
Bohrung	Endtiefe (m uGOK)	Durchmesser (Ausbau bzw. Bohrung, mm)
Gebiet „Kamennyj“		
1-K	703	0 bis 19 m: 146
		19 bis 82,6 m: 127
		82,6 bis 529,3 m: 76 (kein Ausbau)
		529,3 bis 703 m: 59 (kein Ausbau)
2-K	481,9	0-18,5 m: 273
		18,5 bis 64,9 m: 219
		64,9 bis 101 m: 146
		101 bis 425 m: 112 (kein Ausbau)
		425 bis 481,9 m: 93 (kein Ausbau)
S-1	308	Keine Angaben
Gebiet „Itatskij“		
1-I	505	0 bis 21 m: 127
		21 bis 50 m: 89
		50 bis 93,2 m: 76 (kein Ausbau)
		93,2 bis 505 m: 59 (kein Ausbau)
S-2 (südlich des Gebietes)	178	Keine Angaben
Gebiet „Jennissejskij“		
E-1	100	0 bis 15 m: 168
		15 bis 100 m: 76 (kein Ausbau)
E-2	100	0 bis 62 m: 108
		62 bis 100 m: 76 (kein Ausbau)
E-3	100	0 bis 50 m: 108
		50 bis 100 m: 76 (kein Ausbau)
1-E	1500 (geplant)	Keine Angaben

Tabelle 2-21: Zusammenfassung der Bohr- und Ausbauparameter der in den Gebieten „Verchne-Itatskij“ und „Jennissejskij“ niedergebrachten Erkundungsbohrungen

In den Bohrungen 1-I und 1-K sowie in den nur 100 m tiefen Bohrungen E-1 bis E-3 erfolgten umfangreiche geophysikalische Untersuchungen, wobei im Gebiet „Verchne-Itatskij“ die in Tabelle 2-22 aufgeführten Verfahren zum Einsatz kamen. Die Abb. 2-17 und 2-18 zeigen Gegenüberstellungen der bohrlochgeophysikalischen Messkurven mit den von [Velitschkin et al. 2001] auf der Grundlage detaillierter Bohrkernbeschreibungen festgestellten alterierten Kernabschnitten bzw. Störungszonen. Bei der Identifizierung der Störungszonen mittels Bohrlochgeophysik hat sich eine komplexe Auswertung der Gamma-, Gamma-Gamma-, Geoelektrik- und Kalibermesskurven bewährt.

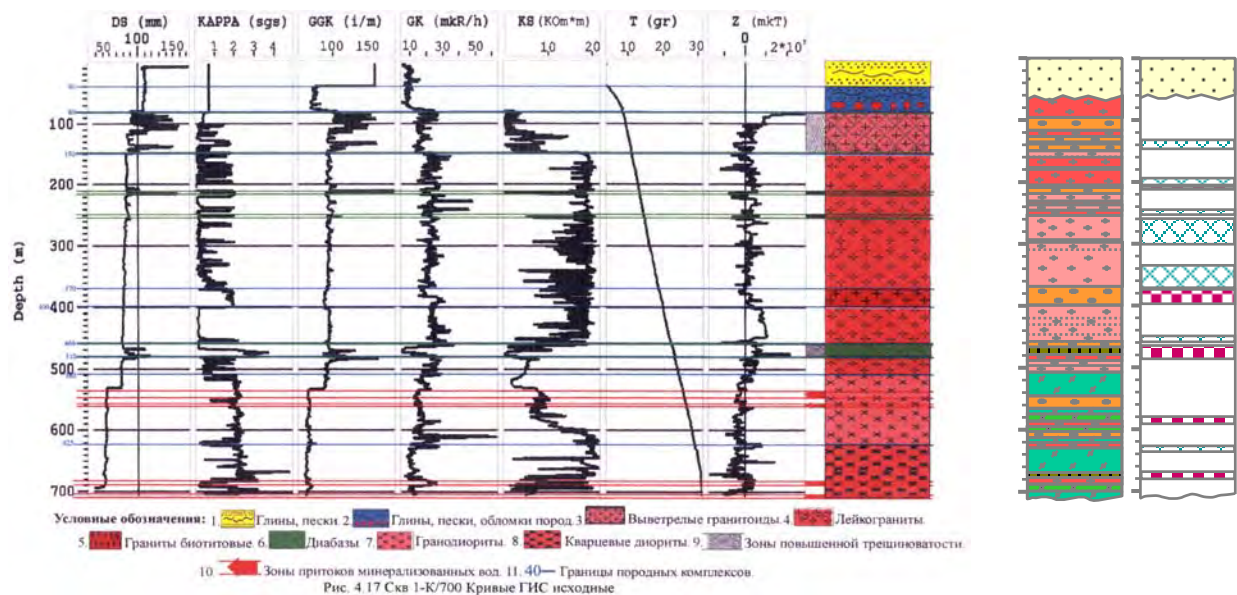
Verfahren	Russische Bezeichnung	Einheit	Erfasste Parameter bzw. Ziel des Einsatzes
Kalibermessung	Кавернометрия (DS)	mm	Bohrlochdurchmesser
Magnetische Suszeptibilität	Каппаметрия (Кappa)	(cgs)	Zunahme bei +/- monolithischen Bereichen und bei Basit-Einschaltungen
Gamma-Gamma-Dichtemessungen	Гамма-Гамма-Каротаж (GGK-P)	Imp/min	Gute Abtrennung stark verwitterter bzw. alterierter Bereiche sowie basischer Gänge
Gamma-Messungen	Гамма-Каротаж (GK)	$\mu\text{R/h}$	Nachweis von Störungszonen, Abtrennung basischer von sauren Gesteinen
Messung des scheinbaren Widerstandes	Кажущееся сопротивление (KS)	$\text{k}\Omega\text{m}$	Deutlich Abnahme in Störungs- und Alterationszonen
Magnetometrie	Магнетометрия (Z)	nTs	Nachweis basischer Gänge oder Einschlüsse
Temperaturmessung	Термометрия (T)	$^{\circ}\text{C}$	Nachweis von Zufluss- bzw. Abflusszonen
Messung des spezif. elektrischen Widerstandes der Bohrlochflüssigkeit	Резистивиметрия (Rez)	Ωm	Zur Eichung von Geoelektrik und zum Nachweis von Zu- und Abflüssen
Messung der Wasserer giebigkeit (Zuflussmenge)	Расходомертия	l/min	Flowmeter zum Nachweis von Zu- und Abflüssen
Akustik-Messung	Акустический каротаж (AK)		Keine Angaben und keine Messergebnisse

Tabelle 2-22: In den Bohrungen 1-I und 1-K eingesetzte geophysikalische Untersuchungsverfahren (Messungen durch „Südliche Geophysikalische Expedition“, Abakan)



(Abkürzungen der angewandten Verfahren siehe Tabelle 2-21; in der rechts außen angeordneten Bohrsäule sind grün straffierte Bereiche stark alterierte Proben, Bereiche mit roten Kästchen entsprechen Kataklyse- und Mylonitisierungszonen bzw. Störungszonen)

Abbildung 2-18: Bohrlochgeophysik-Messkurven für die Bohrung 1-I in der Gegenüberstellung mit der von [Velitschkin et al. 2001] vorgenommenen Bohrkernbeschreibung



(Abkürzungen der angewandten Verfahren siehe Tabelle 2-21; in der rechts außen angeordneten Bohrsäule sind grün straffierte Bereiche stark alterierte Proben, Bereiche mit roten Kästchen entsprechen Kataklyse- und Mylonitisierungszonen bzw. Störungszonen)

Abbildung 2-19: Gegenüberstellung der von Velitschkin et al. (2001) vorgenommenen Bohrkernbeschreibung mit den Geophysik-Messkurven für die Bohrung 1-K

Zwecks Identifizierung von Zuflusszonen und Bestimmung ihrer hydraulischen Eigenschaften erfolgten in den Bohrungen der Einsatz von Flowmetern und Messungen der elektrischen Leitfähigkeiten der Bohrspülungsflüssigkeiten. Im Ergebnis dieser Untersuchungen konnten ledig-

lich in der Bohrung 1-K geringe Zuflüsse nachgewiesen werden. Für die im unteren Teil dieser Bohrung festgestellten wasserführenden Bereiche wurden Filtrationsgeschwindigkeiten zwischen 0,3 und 1,25 m/a gemessen, was etwa $1 \cdot 10^{-8}$ bis $3 \cdot 10^{-8}$ m/s entspricht.

Die im Jahr 2003 in den „Jennissejskij“-Bohrungen E-1 bis E-3 durchgeführten hydrogeologischen Untersuchungen ergaben für sechs, jeweils gegen die Bohrlochsohle abgepackerte, ca. 50 m mächtige, maximal 100 m tiefe Bohrungsintervalle Filtrationskoeffizienten zwischen 0,004 und 0,019 m/d (entspricht ca. 1 bis 7 m/a bzw. $2,2 \cdot 10^{-7}$ bis $4,6 \cdot 10^{-8}$ m/s) und hydraulische Leitfähigkeiten im Bereich von 0,07 bis 0,66 m²/d.

Parallel zu den im Feld durchgeführten geophysikalischen Untersuchungen erfolgten seit Mitte der 90er Jahre an Bohrkernproben von Kartierungs- und Erkundungsbohrungen umfangreiche Labormessungen petrophysikalischer Parameter (siehe Kap. 2.7, z. B. [Velitschkin et al. 2001], [Petrov 2001]). Diese Arbeiten wurden größtenteils in Laboren von Instituten der Russischen Akademie der Wissenschaften (IGEM, OIFZ, IEM), im Chlopin-Institut St. Petersburg und in der Moskauer Staatlichen Universität durchgeführt. Diese Forschungsarbeiten dienten vor allem:

- zur Eichung und Interpretation der Resultate der geophysikalischen Feldmessungen,
- zur Ermittlung der für den Langzeitsicherheitsnachweis erforderlichen geomechanisch-petrophysikalischen Kenndaten,
- zum modell-gestützten Nachweis der Wärmeauswirkungen der HAW auf die geotechnische Barriere und das Endlagernahfeld,
- zur Quantifizierung der Radionuklid-Rückhalteeigenschaften der Endlager-Wirtsgesteine, wie z. B. zur Bestimmung des Sorptionsvermögens und der Diffusionskoeffizienten, sowie
- zur Erarbeitung neuer innovativer Verfahren zur Bewertung der Standorteignung, wie z. B. Ultraschalluntersuchungen zur Erfassung der Gesteinsklüftigkeit und -porosität (z. B. [Petrov 2003]).

Parallel zu den Standortuntersuchungen und Laborstudien wurden zur Vorbereitung der Investitionsentscheidungen und als Planungsgrundlagen für den Bau eines HAW-Endlagers dem zuständigen Ministerium (MINATOM, jetzt: ROSATOM) im Jahr 2001 eine „Deklaration über die Absichten zum Bau eines unterirdischen Forschungslabors im Nishnekansker Granitoidkomplex“ sowie im März 2004 eine „Konzeption zur Errichtung und Finanzierung einer großtechnischen Versuchsanlage für die Endlagerung radioaktiver Abfälle im Nishnekansker Granitoidmassiv“ vorgelegt.

2.8.2 Bewertung der bisher durchgeführten Erkundungsarbeiten zur Standortauswahl eines HAW-Endlagers

Verglichen mit den an anderen Endlager- bzw. Untertagelabor-Standorten durchgeführten Erkundungsarbeiten sind die im Umfeld des BChK Shelesnogorsk bis zum heutigen Tag realisierten geologisch-geophysikalischen Untersuchungen zur Standortauswahl bzw. -eignung sehr umfangreich (siehe Kap. 2.8.1). So z. B. konnten sich die Erkundungsarbeiten zur Auswahl des Standortes für ein Untertagelabor im Opalinuston im nördlichen Zürcher Weinland aufgrund sehr einfacher geologischer Rahmenbedingungen auf Untersuchungen mittels 3D-Seismik, eine Tiefbohrung sowie auf Untertageexperimente im Felslabor Mont Terri im Kanton Jura beschränken [Nagra 2002].

Die Entscheidung zur Auswahl der Salzkuppelstruktur Gorleben zwecks Errichtung eines unterirdischen HAW-Endlagers für deutschen Atommüll basierte vorwiegend auf flach- und tiefeismischen Erkundungsbefunden, auf jahrzehntelangen Erfahrungen im deutschen Salzbergbau und auf vier zielgerichtet zur Aufklärung des inneren Aufbaus und der äußeren Be-

grenzung der Salzkuppelstruktur niedergebrachten Erkundungsbohrungen [Bornemann et al. 2004]. Die Arbeiten zur Standortauswahl für ein Endlager für schwach und mittel radioaktive Abfälle im Uveghuta-Granit (SW-Ungarn) umfassten gravimetrische, seismische und geoelektrische Untersuchungen sowie das Niederbringen von einigen Erkundungsbohrungen, inklusive Bohrlochgeophysik und hydrogeologische Pumpversuche [Balla 2004].

Der erhöhte Erkundungsaufwand für ein HAW-Endlager im BChK-Umfeld ergibt sich aus den zu Beginn der Arbeiten unzureichenden Kenntnissen zum geologischen Tiefenbau der Region sowie zum struktur- und hydrogeologischen Aufbau der auftretenden Gesteinskomplexe, aus der geologischen Position dieser Region an der SW-Grenze des Sibirischen Schildes (siehe Kap. 2.3) und aus der Entscheidung für ein magmatisches Endlager-Wirtsgestein. Insbesondere für diesen Wirtsgesteinstyp sind umfangreiche Untersuchungen zur Verbreitung von Inhomogenitäten und potenziellen Grundwasserwegsamkeiten erforderlich.

Die Eignung von Standorten in magmatischen bzw. metamorphen Gesteinen für die HAW-Endlagerung wird vor allem durch das möglichst weitgehende Fehlen von hydraulisch aktiven Grundwasser-Migrationspfaden in Form von Störungszonen, intensiv geklüfteten Gesteinspartien, lithologischen Kontakten und Inhomogenitäten sowie von seismisch bzw. neotektonisch aktiven Störungszonen bestimmt. Die Erfassung und hydrogeologische Charakterisierung derartiger Strukturelemente in überdeckten Magmatiten/Metamorphiten ist durch indirekte geophysikalische (seismische, gravimetrische, magnetische, elektrische und elektromagnetische) Verfahren, detaillierte geodätische Messungen sowie durch Tiefbohrungen und bohrlochgeophysikalische bzw. hydrogeologische Untersuchungen in den Bohrungen möglich.

Dem aufgrund von Langzeitsicherheitsüberlegungen erforderlichen Nachweis des Fehlens offener Klüfte bzw. Störungszonen im Einlagerungsbereich sind allerdings technische und finanzielle Grenzen gesetzt. So ist es auch unter Einsatz aller modernen Erkundungsmethoden nicht möglich, mit vernünftigem Aufwand das Kluft- und Störungsnetzwerk von Magmatiten vollständig zu erfassen bzw. völlig störungsfreie Gebiete auszugliedern. Die Ergebnisse der Modellierung der Strömungs- und Transportprozesse (Kap. 4) und die mineralogisch-petrographischen Beobachtungen zum Alterationsgrad der Gesteine (Kap. 2.7.6) zeigen außerdem, dass es aus Gründen der Sicherheit des Endlagers auch nicht notwendig ist, im Prozeß des Standortauswahlverfahrens und auch im Stadium der unterirdischen Detailerkundung jede Kluft bzw. Störungzone zu bestimmen. Da viele Störungszonen infolge der Bildung von tonmineralhaltigen Alterationsprodukten wirkungsvolle hydraulische und Sorptionsbarrieren darstellen und zahlreiche Klüfte aufgrund der vorherrschenden Spannungsverteilungen geschlossen sind, ist es im Prozess der Detailcharakterisierung der potenziellen Endlagerstandorte vor allem wichtig, hydraulisch aktive Bereiche auszugliedern.

Das von den russischen Kollegen für die standortbezogenen Detailstudien gewählte Oberflächengeophysik-Methodenpaket (siehe Kap. 2.8.1) entspricht weitgehend den Erfahrungen der BGR bei der Untersuchung ähnlicher Problemstellungen. So z. B. kam bei der Auswahl von geeigneten Gebieten für die oberflächige Müllablagerung in der Nähe von Lüderitz, Namibia, eine Kombination aus magnetischen, elektromagnetischen, elektrischen („vertical electrical sounding – VES“) und refraktionsseismischen Messungen zum Einsatz [Lange & Eberle 1999]. Vor allem die elektromagnetischen Untersuchungen ermöglichten den Nachweis von stark geklüfteten Gesteinsbereichen bzw. tektonischen Verwerfungszonen.

Ein weiteres Beispiel für eine ähnliche Herangehensweise ist die Bewertung des Eignungsgrades des Standortes Rabenstein (nahe Chemnitz, äußerer Schiefermantel des Sächsischen Granulitgebirges) für die Anlage einer oberflächigen Mülldeponie. Die Auswahl des Standortes erfolgte auf der Grundlage geoelektrischer, elektromagnetischer und magnetischer Daten [Lange & Knödel 2003]. Die Kombination dieser oberflächengeophysikalischen Untersuchungsverfahren gestattete neben Aussagen zum tektonischen Baustil auch Schlussfolgerungen zur Mächtigkeit

keit der Lockergesteinsbedeckung und zur lithologischen Zusammensetzung des geologischen Untergrundes.

Elektromagnetische Methoden sind ausgehend von den in der BGR vorliegenden umfangreichen Erfahrungen bei der Suche nach grundwasserhöffigen Kluftsysteimen, z. B. im kristallinen Zentralplateau Westafrikas, sehr gut für die Kartierung steil einfallender Frakturen in granitoiden und metamorphen Gesteinen geeignet [Böckh et al. 1987]. Sie reagieren empfindlicher als galvanische Gleichstromverfahren und sind einfacher sowie schneller durchführbar. Probleme treten lediglich bei mächtigen Deckschichten auf, die eventuell in den Festgesteinen existierende Bruchzonen maskieren. Insbesondere durch die Kombination der elektromagnetischen Tiefensondierung (bei bis zu 5 unterschiedlichen Frequenzen) und magnetischer Messungen war es bei hydrogeologisch orientierten Arbeiten in Namibia möglich, unterschiedliche geologische Einheiten zu kartieren und vertikale Leitfähigkeitsverteilungen bis ca. 150 m Tiefe sichtbar zu machen (z. B. [Lange & Knödel 2003]). Durch die Verwendung unterschiedlicher Messfrequenzen gelang es, die Widerstandsverteilung in verschiedenen Teufenbereichen zu ermitteln. Sehr hohe Frequenzen steigern die Empfindlichkeit beim Nachweis von Störungszonen, haben aber auch eine geringere Eindringtiefe zur Folge.

Die von den russischen Kollegen eingesetzte Methode der audiomagnetotellurischen Sondierung (AMTS) eignet sich als passives Messverfahren, bei dem kein eigener, in der Regel schwer im unzugänglichen Gelände transportabler Sender verwendet werden muss, besonders gut für den Einsatz in der sibirischen Taiga. Die audiomagnetotellurische Sondierung hat eine relativ große Tiefenreichweite, aber ein vergleichsweise geringes Auflösungsvermögen und erfasst die oberen Profilmeter nur unzureichend. Deshalb wurde dieses Messverfahren durch die Vertikale Elektrosondierung (VES), die wiederum eine große Unschärfe in großer Tiefe aufweist, und die radioelektromagnetische Profilierung (REMP) ergänzt. Dies erhöht die Genauigkeit und Eindeutigkeit der Interpretation (Senkung der Freiheitsgrade) der AMTS-Kurven insbesondere für die obersten 100 bis 200 Profilmeter.

Eine komplexe Bewertung der bisher vorliegenden Erkundungsergebnisse erfordert die Berücksichtigung von Problemen, die aus wechselnden Verantwortlichkeiten für die Durchführung der Arbeiten zur Standortauswahl (1994 bis 2001: Radium-Institut St. Petersburg; ab 2001: VNIPI Promtehnologii, Moskau) sowie aus einer zumindest teilweisen Unterfinanzierung der Arbeiten resultieren. So konnten einige, vor allem geophysikalische Untersuchungen aufgrund einer fehlenden Anschlussfinanzierung nicht abgeschlossen werden, was häufig auf Kosten einer eingehenden Auswertung und Interpretation der Messergebnisse ging.

Eine kritische Durchsicht der vorliegenden Erkundungsergebnisse offenbart aus heutiger Sicht einige Unzulänglichkeiten bei der Durchführung der Arbeiten, insbesondere im Gebiet „Verchne-Itatskij“. Die flächenmäßige Abgrenzung der Gebiete „Kamennyj“ und „Itatskij“ basierte vorwiegend auf kleinmaßstäblichen geophysikalischen Befunden sowie auf geomorphologisch-neotektonischen Überlegungen und Dechiffrierungsergebnissen von Luftbild- und Satellitenaufnahmen. Die auf der Grundlage dieser Daten vorgenommene Eingrenzung der beiden detaillierter zu untersuchenden Gebiete erwies sich als z. T. nicht zutreffend. Gestützt durch zusätzliche Untersuchungen mittels AMTS auf Profilen, die beide Gebiete und ihre Umgebung überdecken, wurden $\pm$ monolithische Gesteinsblöcke im Randbereich und außerhalb der detailliert analysierten Gebiete festgestellt (Abb. 2-16). Die in 2001 auf bis zu 20 km langen Profilen durchgeführten geoelektrischen Untersuchungen hätten der Festlegung der Grenzen für die Detailstudien vorangestellt werden müssen.

Offensichtlich sind auch Schwierigkeiten bei der Überwachung der vor-Ort-Arbeiten durch den Auftraggeber. Eigene Erfahrungen bei der Standorterkundung und im Prozeß der Errichtung des Endlager-Erkundungsbergwerkes Gorleben belegen die Notwendigkeit einer permanenten Kontrolle der Subauftragnehmer durch den Auftraggeber. Gegebenenfalls muss im Falle von

offensichtlichen Mängeln bei der Durchführung der Arbeiten der Subauftragnehmer zur für den Auftraggeber kostenneutralen Nachbesserung bzw. Wiederholung bestimmter Arbeiten bzw. Messungen aufgefordert werden. Nur so kann eine hohe Qualität der Erkundungsdaten gewährleistet und Fehlern bei der Durchführung der Arbeiten vorgebeugt werden. Dies betrifft z. B. das Niederbringen der Erkundungsbohrungen 1-I und 1-K sowie die Durchführung der bohrlochgeophysikalischen und hydrogeologischen Untersuchungen in den Bohrungen zur Gewinnung dringend benötigter strukturgeologischer und hydraulischer Daten. Außerdem hat eine ungenügende Finanzierung der Erkundungsarbeiten dazu geführt, dass obwohl entsprechende gerätetechnische und organisatorische Voraussetzungen vorlagen, wichtige Untersuchungen nicht oder nur mit geringer Aussagekraft realisiert wurden, wie z. B. geophysikalische, insbesondere akustische Messungen in den Bohrungen; Pumpversuche für mit Packersystemen abgegrenzte Teufenintervalle.

Die mit viel Aufwand niedergebrachten Bohrungen wurden nach Beendigung der Bohrarbeiten nicht wie erforderlich sofort klargepumpt. Informationen zum Einsatz von Spülflüssigkeitszusätzen liegen beim Auftraggeber nicht vor, d. h. übliche Qualitätsstandards, wie z. B. die Führung und Übergabe eines Bohrjournals an den Auftraggeber, wurden nicht eingehalten. Es erfolgten keine gezielten hydrogeologischen Untersuchungen einzelner Störungszonen und, bis auf wenige Ausnahmen, auch keine Beprobungen der Tiefengrundwässer. Bisher gibt es für das Gebiet „Verchne-Itatskij“ keine Angaben zum Alter der Tiefengrundwässer und, abgesehen von Tabelle 2-8, auch nicht zu ihrer Physikochemie.

Mit Ausnahme von wenigen hydrogeologischen und bohrlochgeophysikalischen Messungen in den bisher niedergebrachten Erkundungsbohrungen (z. B. Flowmetermessungen und geoelektrische Untersuchungen in den Bohrungen 1-I und 1-K; Pumpversuche in gegen die Bohrlochsohle abgepackerten, bis zu 50 m langen Intervallen in der Bohrung 2-K) fehlen für das Gebiet „Verchne-Itatskij“ feldgeologische Befunde zur Grundwasserführung der Gesteine des Nishnekansker Granitoidkomplexes. Ähnlich unbefriedigend ist der Kenntnisstand zur Verteilung, räumlichen Anordnung sowie zu den hydraulischen Eigenschaften der potenziellen Migrationswege (Klüfte, Störungszonen, Kontakte unterschiedlicher Lithotypen). Dies ermöglicht z. Zt. nur sehr allgemeine Aussagen zum hydrogeologischen Aufbau des Untergrundes im Nordteil des Nishnekansker Granitoidkomplexes.

In den 2003 im Gebiet „Jennissejskij“ niedergebrachten Erkundungsbohrungen wurden umfangreiche hydrogeologische und bohrlochgeophysikalische Untersuchungen durchgeführt. Die nur jeweils 100 m tiefen Bohrungen sind allerdings durch z. T. sehr große Kernverluste (abschnittsweise bis 70 % Kernverlust) gekennzeichnet. In den Bohrungen wurden bohrlochgeophysikalische Untersuchungen unter Einsatz der Geoelektrik (Messungen des elektrischen Widerstandes und der spontanen Polarisation) und von Gamma-, Kaliber-, Temperatur- und Flowmeter-Messungen durchgeführt. Mittels Bestimmung der Zuflussmengen von Grundwasser in die Bohrungen und durch Pumpversuche in gegen die Bohrlochsohle abgepackerten, ca. 50 m langen Bohrungsintervallen wurden k_f -Werte zwischen 0,0047 und 0,0332 m/d (Analyse der Zuflussmengen) bzw. zwischen 0,004 und 0,019 m/d (Pumpversuche) bestimmt.

Die in den Bohrungen realisierten geophysikalischen Untersuchungen wurden nicht durch den Auftraggeber vor-Ort betreut und kontrolliert. Dies erschwert die Interpretation der Messkurven und lässt bei offensichtlichen Unstimmigkeiten (siehe Gegenüberstellung der Messkurven und Bohrkernbeschreibungen, Abb. 2-18 und 2-19) zumindest partiell Zweifel an der Korrektheit der Durchführung der Messungen entstehen. Dies trifft z. B. auf die Ergebnisse der Temperatur-, Gamma- und Kalibermessungen zu, die entgegen langjährigen Erfahrungen nur in seltenen Fällen zur Identifizierung von Zuflußhorizonten oder Störungszonen genutzt werden konnten. Gerade bei den z. T. hohen Kernverlusten haben bohrlochgeophysikalische Untersuchungen für die Ausgliederung von Störungszonen eine besonders große Bedeutung.

Bei der Auswahl der anzuwendenden bohrlochgeophysikalischen Methoden wurden einige, bei vergleichbaren Aufgabenstellungen häufig genutzte Verfahren, wie z. B. akustisches Bohrlochfernsehen oder fokussierte geoelektrische Verfahren, nicht eingesetzt. Gerade diese Verfahren ermöglichen einen besseren Nachweis von Störungszonen und liefern zusätzliche Informationen zur räumlichen Orientierung dieser potenziellen Grundwassermigrationswege. Ergebnisse der laut [Lind et al. 2001] durchgeführten akustischen Messungen konnten nicht eingesehen werden, d. h. standen für Auswertungen nicht zur Verfügung.

Im Verlaufe der Bohrarbeiten wurden keine orientierten Bohrkerne entnommen, so dass in den Kernen feststellbare Klüfte bzw. Störungszonen nicht räumlich orientiert werden können. Dies schränkt die Möglichkeiten einer räumlichen Analyse der Störungszonen-Verbreitung und der Verschneidung potenzieller Grundwassermigrationsbahnen deutlich ein.

Einige der aufgeführten Unzulänglichkeiten sind auf das Nicht-Vorhandensein entsprechender Geräte und Erfahrungen bei der Durchführung derartiger Messungen zurückzuführen. Gerade dieser Umstand wäre durch eine internationale Kooperation auf dem Gebiet der Standorterkundung, d. h. eine schöpferische Übernahme von gerätetechnischen Entwicklungen und umfangreichen Erfahrungen bei der Durchführung derartiger Messungen lösbar.

Zwecks Analyse der Langzeitsicherheit des geplanten Endlagers sind aus unserer Sicht die bisherigen Darstellungen des Kenntnisstandes zur seismischen Gefährdung des Untersuchungsgebietes unzureichend. Auch beruhen die Abschätzungen der zukünftig zu erwartenden tektonischen Bewegungen bisher lediglich auf geomorphologischen Untersuchungsergebnissen (z. B. [Lukina 2001]), konkrete Resultate hochpräziser geodätischer Messungen wurden bisher nicht mitgeteilt. In den bisher eingesehenen Unterlagen fehlen systematische, für den Leser nachvollziehbare Darstellungen der Untersuchungsergebnisse zum seit 1963 durch KNIIGMS durchgeführten Langzeitmonitoring der seismischen Aktivitäten in der Region Schelesnogorsk bzw. Krasnojarsk. Entsprechende Bewertungen beschränken sich auf verbale Einschätzungen, konkrete Messergebnisse wurden nicht mitgeteilt. Ähnlich verhält es sich mit der Auswertung der Ra- und He-Messungen zum Nachweis aktiver Störungszonen.

Obwohl die einzelnen, bisher durchgeführten Standortuntersuchungen schon zahlreiche Hinweise zum geologischen Bau des analysierten Territoriums gaben, ist für eine sichere geologische Interpretation der Daten und für Schlussfolgerungen zur zukünftigen geologischen Entwicklung der Region eine komplexe Interpretation aller geologisch-geophysikalischen Daten erforderlich. Erst ein, auf alle Befunde zum geologischen Bau der analysierten Territorien gestütztes komplexes geologisches 3D-Modell und eine Überprüfung der Modellierungsergebnisse durch Tiefbohrungen erlauben einen Vergleich der Effektivität und Notwendigkeit des Einsatzes einzelner Erkundungsmethoden sowie Aussagen zur Eignung der verschiedenen Verfahren zur Strukturaufklärung des tieferen Untergrundes. Derartige Schlussfolgerungen bilden die Grundlage für eine gezielte Ergänzung des Standort-Untersuchungsprogramms und für eine komplexe Standortbewertung bzw. -auswahl.

Die komplexe Auswertung aller Erkundungsergebnisse wird durch eine teilweise geringe Qualität der von Subauftragnehmern erstellten Ergebnisberichte, insbesondere der Graphiken erschwert bzw. unmöglich gemacht. Oft enthalten die Berichte lediglich Interpretationen der Messergebnisse, die eigentlichen Messdaten und ausführliche Angaben zu den Messbedingungen bzw. eingesetzten Methoden liegen den Berichten häufig nicht bei, so dass eine Kontrolle der Auswertungen und Interpretationen oft unmöglich ist. Dies betrifft z. B. die Darstellung der Ergebnisse der Bohrlochgeophysik (insbesondere fehlen die Daten der Akustikmessungen), der seismischen Untersuchungen an der Erdoberfläche oder der hydrogeologischen Studien in den Bohrungen (mit Ausnahme der Untersuchungen in den Bohrungen E-1 bis E-3). Es existiert offensichtlich kein System der Archivierung der Originaldaten beim Auftraggeber, so dass vie-

le der Schlussfolgerungen nicht nachvollzogen bzw. bei fortschreitender Technik neu ausgewertet bzw. kontrolliert werden können.

Ein Großteil der zur Verfügung gestellten Karten, Schnitte und Schemata weist eine schlechte Qualität auf und ist, was z. B. die Wiedergabe des Flusssystems, die Positionen der geophysikalischen Messprofile und die maßstabsgetreue Abbildung der geologischen Sachverhalte angeht, ungenau (siehe auch Kap. 5.5.1). Dies erschwert die komplexe Interpretation der Untersuchungsbefunde.

3 ENDLAGERKONZEPT

3.1 Einleitung

Um das Projektziel zu erreichen, ist es erforderlich, zunächst für ein generisches Endlagermodell ein aus Einlagerungskonzept und Barrierenkonzept bestehendes technisches Endlagerkonzept für die Endlagerung im Wirtsgestein Granit zu erstellen. Ausgehend davon, dass die Anordnung des Einlagerungsbereiches in möglichst großer Entfernung von den Hauptstörungszonen erfolgen soll und flach einfallende Hauptstörungen für die Standortregion eher untypisch sind, wird im Rahmen dieses Vorhabens für die stark wärmeerzeugenden Cs/Sr-Abfälle nur die Bohrlochlagerung vorgesehen. Für die schwach wärmeentwickelnden Abfälle ist eine Einlagerung in Strecken vorgesehen.

Auf der Basis des Mengengerüsts und der Wärmeleistung der stark wärmeentwickelnden Abfälle (Kap. 1) werden erforderliche Mindestabmessungen der Endlagerbereiche für stark wärmeentwickelnde und schwach wärmeentwickelnde Abfälle ermittelt. Diese Abmessungen und das Barrierenkonzept gehen als Ausgangsdaten in die sicherheitsanalytischen Untersuchungen ein.

Detailliertere Untersuchungen werden zu den stark wärmeentwickelnden Abfällen durchgeführt, da die thermische Beeinflussung der technischen und geologischen Barrieren durch diese Abfallgebinde von entscheidender Bedeutung für die Planung des Endlagers ist.

Die Entwicklung des Endlagerkonzepts erfolgt deshalb in folgenden Untersuchungsschritten:

- Erarbeitung einer Startkonfiguration des Endlagers, insbesondere für die Bohrlochlagerung der stark wärmentwickelnden Abfälle, basierend auf dem vom VNIPI PT vorgeschlagenen Endlagerkonzept [VNIPI PT 2002]
- Thermische Berechnungen zur Bohrlochlagerung, einschließlich der Variation der thermischen Wirtsgesteinsparameter
- Erarbeitung des Endlagerkonzeptes

3.2 Basiskonfiguration des Endlagers

Die Basiskonfiguration für das Endlager sieht vor, die wärmeentwickelnden Abfälle in Bohrlöchern einzulagern und die schwach wärmeentwickelnden Abfälle in Strecken zu verbringen. Die Einlagerung der Cs/Sr-Fraktionen ist durch eine Bohrung mit Überfahrungsstrecke und Unterfahrungsstrecke parallel zum Bohrlochtiefsten gekennzeichnet. Die Endlagersäule umfasst 20 Endlagerbehälter. Die Sohlen sind mit einem Niveauunterschied von 30 m angelegt. Die Unterfahrungsstrecke dient der Entwässerung, der Bohrkleinabführung und der Bewetterungszufuhr. Aus der Überfahrungsstrecke erfolgt die Bohrung der Einlagerungsbohrlöcher sowie die Einlagerung der Endlagergebinde.

Für die schwachwärmeentwickelnden Abfälle ist eine Stapelung der Abfallgebinde in Strecken vorgesehen.

3.2.1 Endlagerung der Fraktion Cs/Sr

Wie schon im Kapitel 1.2 ausgeführt, bestehen die stark wärmeentwickelnden Abfälle aus der Fraktion Cs/Sr der flüssigen Wiederaufarbeitungsabfälle, die in einer Borosilikatmatrix verfestigt werden.

Der zur Einlagerung vorgesehene Abfallbehälter entspricht in seinen Abmessungen in etwa der Cogema-Kokille für verglaste Abfälle. Abb. 3.1 zeigt den Cs/Sr-Behälter [VNIPI PT 2002] im Vergleich zur Cogema-Kokille [Filbert et al. 1998]. Demnach wird eine Abfallmenge von 264 kg der Cs/Sr-Fraktionen in einem Behältervolumen von 80 l verpackt.

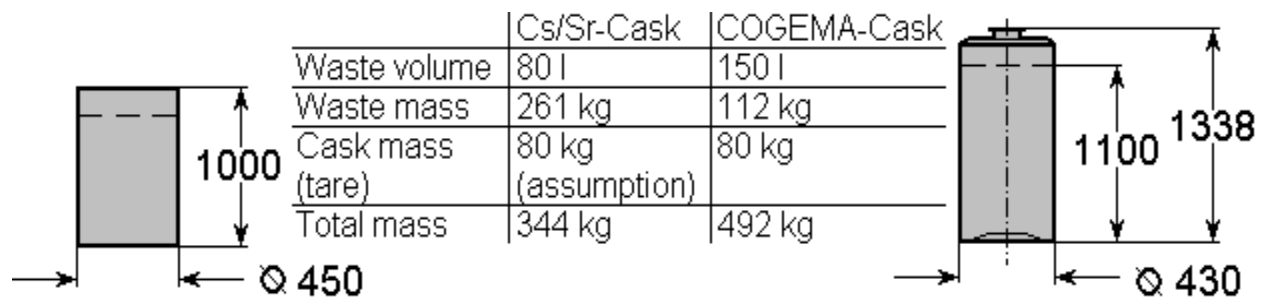


Abbildung 3-1: Technische Daten des Cs/Sr-Endlagerbehälters im Vergleich zur COGEMA-HAW-Kokille.

Entsprechend Tabelle 1-13 und den Daten aus [VNIPI PT 2002] sind für die Endlagerung insgesamt 4.350 Cs/Sr-Behälter zu berücksichtigen.

In einer ersten Vorauslegung wird gegenüber der Basiskonfiguration von VNIPI PT für die Ermittlung der benötigten Endlagerfläche unter Tage von einer Belegung von 15 Gebinden pro Bohrloch ausgegangen. Mit diese Anzahl wird sichergestellt, dass die im Bohrloch die Basis bildende Bentonitschicht aufgrund der Flächenpressung nicht ausweicht.

Als Startkonfiguration für die anschließenden Betrachtungen wird die folgende Konfiguration bezeichnet:

Aus der Stapelhöhe von 15 Behältern mit insgesamt 15 m sowie der Bodenplatte mit 0,5 m und einer Überdeckung mit einem 2,5 m langen Bohrlochstopfen ergibt sich ein Sohlenabstand zwischen Einlagerungsstrecke und Überfahrungsstrecke von 18 m. Der erforderliche Bohrlochdurchmesser ergibt sich aus dem Durchmesser des Behälters mit 45 cm, einem 1 cm breiten Ringspalt zum Bentonit, einer Stärke der Bentonitschicht von 29 cm und einem 5 cm breiten Ringspalt zur Bohrlochwand. Die Ringspalten sind beim Einsatz von Bentonitfertigteilen aus Handhabungsgründen erforderlich. Somit ergibt sich ein erforderlicher Bohrlochdurchmesser von 1,15 m.

Auf der Grundlage von Erfahrungen westeuropäischer Länder mit der Konzeption von Einlagerungsvorrichtungen für die Bohrlochlagerung wird der erforderliche Querschnitt der Überfahrungsstrecke mit 5,5 m x 6 m (Abb.3-2) abgeschätzt. Die Unterfahrungsstrecke (Abb. 3-3) kann nach jetzigem Kenntnisstand von ihrer Dimensionierung her beibehalten werden. Der Abstand zwischen der Unterfahrungsstrecke und dem Bohrloch hängt von dem zu realisierenden Abschluss im Fußbereich der Bohrung ab. Grundsätzlich sollte überdacht werden, ob eine Unterfahrungsstrecke notwendig ist oder ob für die Bohrkleinabfuhr und Entwässerung der Bohrung andere Lösungen möglich sind. Durch den Verzicht auf Unterfahrungsstrecken wird eine Verringerung der notwendigen Abdicht- und Versatzmaßnahmen zur Vermeidung möglicher Wegsamkeiten unter Tage erreicht.

In Abbildung 3-4 ist eine Gesamtübersicht im Entwurf der Bohrlochlagerungssituation im Vertikalschnitt gegeben.

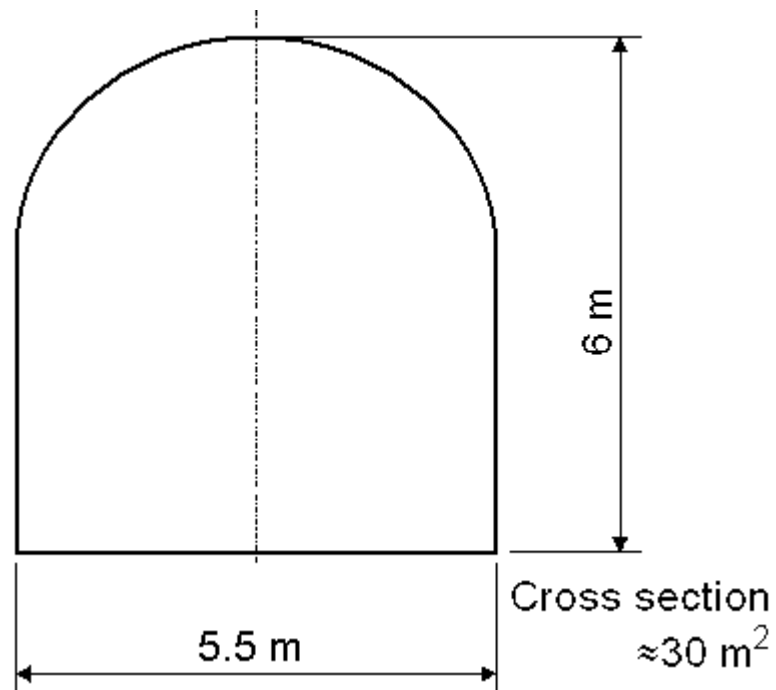


Abbildung 3-2: Querschnitt der Überfahrungs- bzw. Einlagerungsstrecke

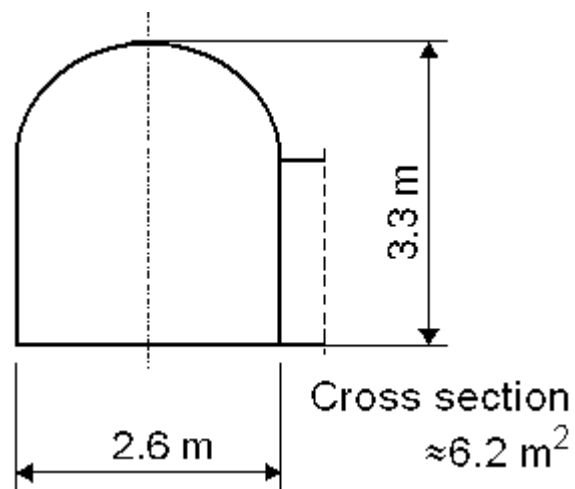


Abbildung 3-3: Querschnitt der Unterfahrungsstrecke

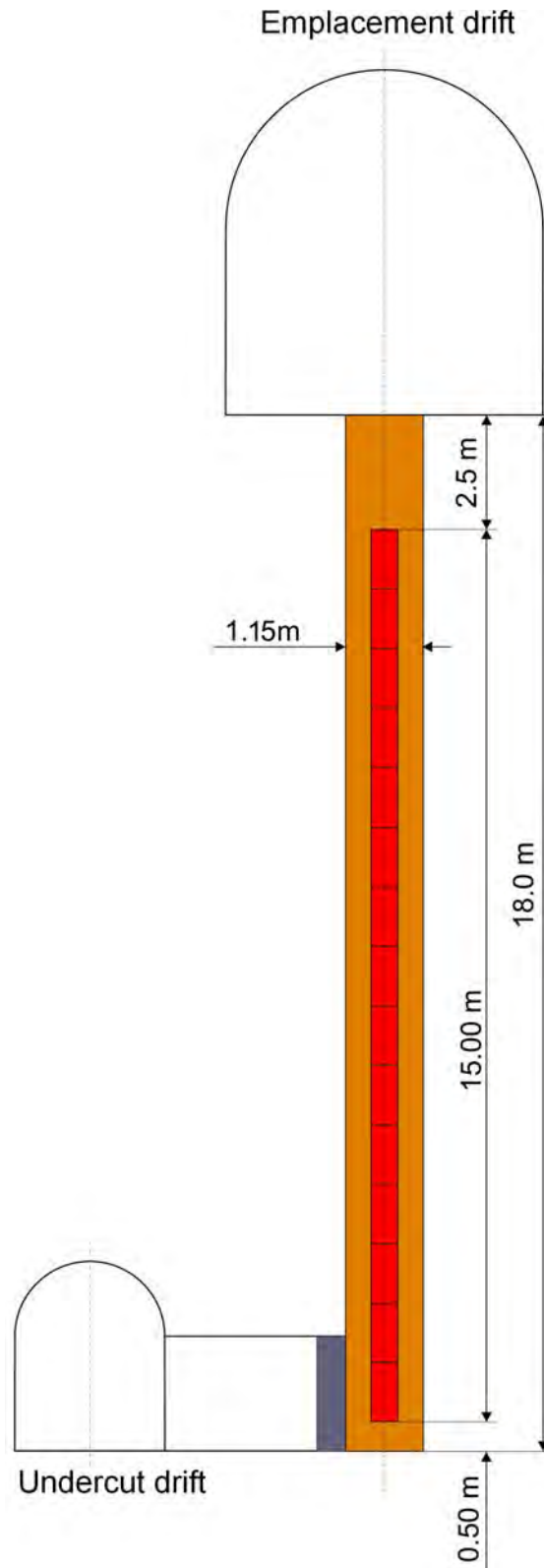


Abbildung 3-4: Startkonfiguration der Bohrlochlagerung

Auf Grund bergtechnischer Gegebenheiten (Auffahrung im Sprengverfahren) wird ein Mindestabstand zwischen 2 Einlagerungsstrecken mit 25 m vorgegeben. Hieraus ergibt sich bei äquidistanter hexagonaler Anordnung der Bohrlöcher ein Bohrlochabstand von 29 m. Daraus lässt sich für 4.350 Cs/Sr-Behälter wiederum eine erforderliche minimale Feldgröße von ca. 730 x 306 m ermitteln (Abb. 3-5).

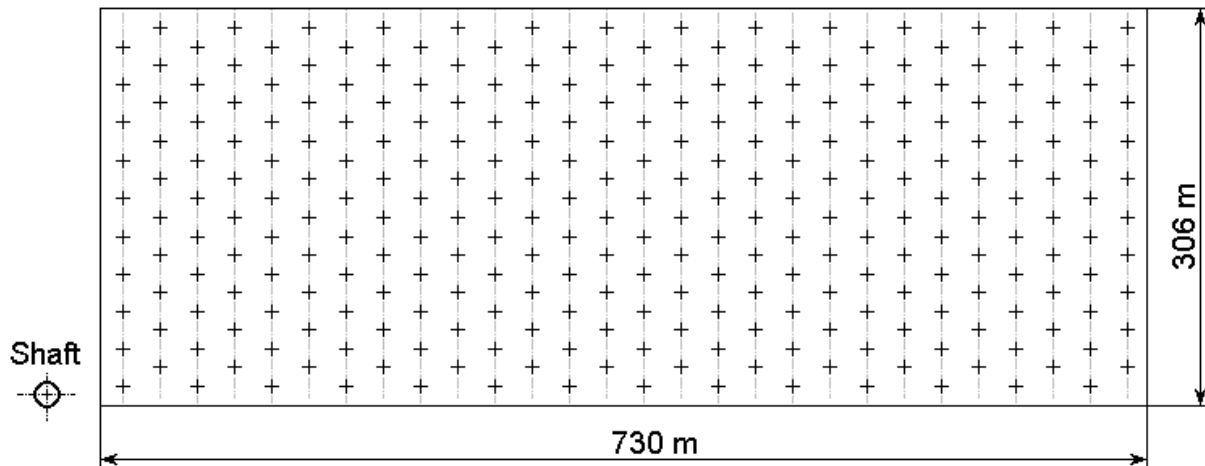


Abbildung 3-5: Startkonfiguration – Bohrlochlagerungsfeld Cs/Sr-Fraktion

Im Nahbereich des Bohrloches wird im ersten Ansatz von folgenden technischen Barrieren ausgegangen:

- für die komplette Behältersäule eine Umhüllung mit mindestens 29 cm Bentonitschichtdicke
- im Bereich des Behältersäulenfußes eine qualifizierte Abtrennung zur Unterfahrungsstrecke
- im Bereich des Bohrlochkopfes ein Bohrlochstopfen
- für die offenen Querschnitte der Unterfahrungs- bzw. Überfahrungs-/Einlagerungsstrecken ein Versatz mit Wirtsgesteinmaterial, falls erforderlich versetzt mit Sand/Bentonitzuschlägen

3.2.2 Endlagerung der schwach wärmeentwickelnden Abfälle

Wie schon in Kapitel 1.2 ausgeführt, bestehen die schwach wärmeentwickelnden Abfälle aus verfestigten Schlämmen aus der Waffenplutoniumproduktion und aus den Fraktionen Seltene Erden und aus Spaltprodukten der Wiederaufarbeitung. Die Behälter für alle schwach wärmeentwickelnden Abfallarten haben mit einer Höhe von 1.000 mm und einem Durchmesser von 600 mm identische Abmessungen. Die endzulagernde Anzahl beträgt 5.690 Behälter.

In dem Endlagerkonzept wird auf der Basis eines konzeptionellen Ansatzes des Bergbau-Chemischen Kombinars eine Einlagerung in Strecken für vorteilhaft erachtet. In der Strecke werden die Behälter liegend aufeinander gestapelt, beginnend mit 5 Behältern nebeneinander. Bei einer Stapelhöhe von 4 Schichten enthält ein Behälterstapel insgesamt 14 Behälter (Abbildung 3-6). Der zur Handhabung der Behälter erforderliche Mindestabstand zwischen zwei Behälterstapeln beträgt 0,2 m. Der Mindestabstand wird auf Grund von Handhabungserfahrungen mit Rundgebinden für das genehmigte LAW/MAW Endlager Konrad festgelegt. Mit diesen geometrischen Grundlagen ergibt sich für die Einlagerung von 5.690 Behältern eine Mindestfeldgröße von ca. 100 x 100 m (Abbildung 3-7).

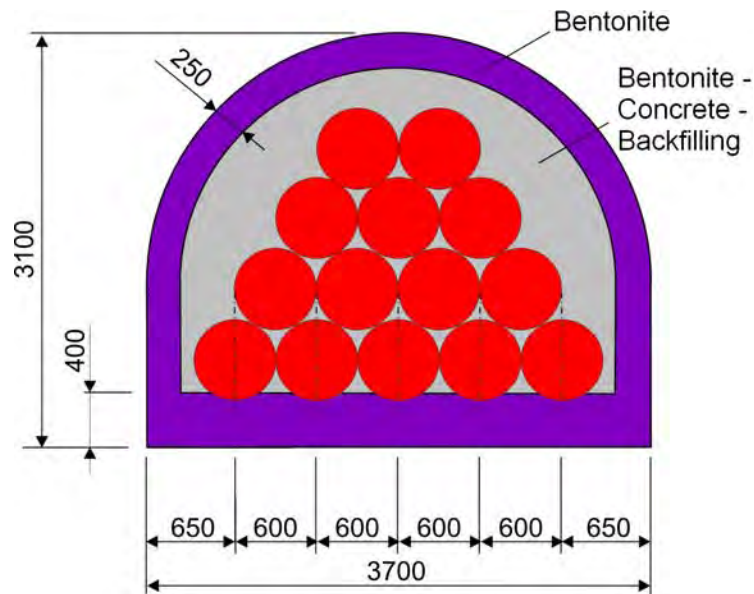


Abbildung 3-6: Streckenquerschnitt vernachlässigbar wärmeentwickelnder Abfälle (VWA)

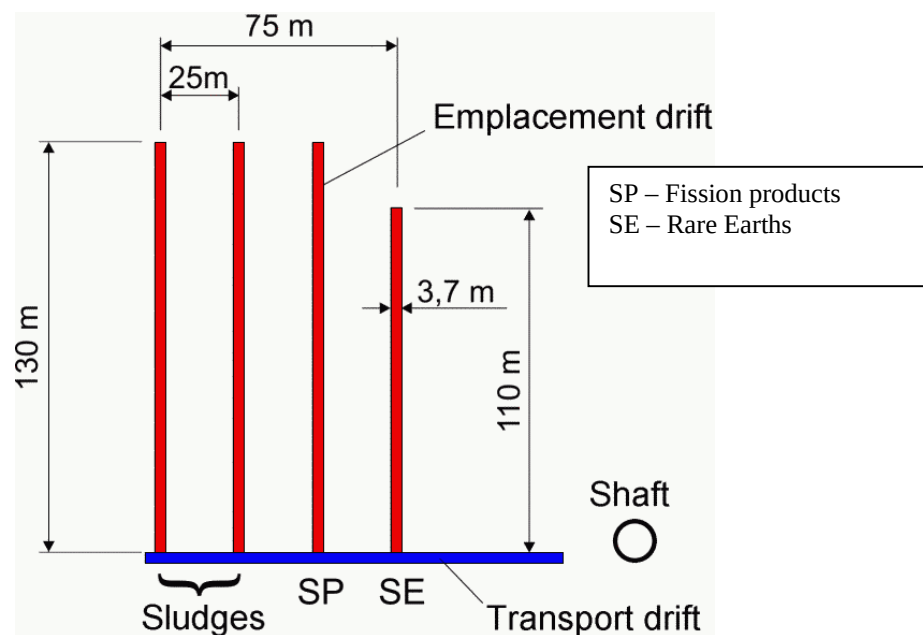


Abbildung 3-7: Startkonfiguration – Streckenlagerungsfeld schwach wärmeentwickelnder Abfälle

Das Barrierenkonzept für diese Abfälle sieht konzeptionell eine 0,25 m Bentonitschale für die Einlagerungsstrecke vor. Die Kenndaten dieser langzeitsicherheitsrelevanten Barriere sind im Ergebnis sicherheitsanalytischer Untersuchungen zu präzisieren. Im Sohlenbereich beträgt die Stärke der Bentonitschicht 0,4 m, um Mulden für die Ablage der ersten Behälterschicht realisieren zu können. Die Behälter der ersten Lage sind in diese vorbereiteten Mulden zu legen, um ein unkontrolliertes Rollen der Behälter gegen den Stoß zu vermeiden und eine mögliche Zerstörung der Bentonitschicht am Stoß zu verhindern. Die nach der Stapelung der Behälter verbleibenden Hohlräume werden mit einem Bentonit-Zementgemisch verfüllt.

3.3 Thermische Auslegungsberechnungen zur Endlagerung der Cs/Sr-Fraktionen

Eine maßgebliche Einwirkung auf das Barrierensystem, insbesondere auf den Bentonit, ist die Temperaturerhöhung, die durch die wärmeerzeugenden Abfälle induziert wird. Um schädigende Wirkungen auf die Bentonitabdichtung zu vermeiden, wird für die Auslegung der Bentonitabdichtung eine Grenztemperatur von 100 °C festgelegt. Dadurch wird Schrumpfung bzw. Rissbildung vermieden. Ein weiteres Temperaturskriterium für die Auslegung des Einlagerungsfeldes ist eine Grenztemperatur von 500 °C, die innerhalb des verglasten Abfalls nicht überschritten werden soll, um die Stabilität der Glasmatrix nicht nachteilig zu beeinträchtigen. Zusätzlich wird für die Auslegung des Behälters die Temperaturentwicklung am Behältermantel ausgewiesen.

Die Auslegungsberechnungen werden für potentielle Standorte im Gebiet Krasnojarsk und Majak (Teil B) unter den jeweils standortspezifischen Bedingungen durchgeführt. Das Ziel der im folgenden beschriebenen Ergebnisse ist es, die in Kapitel 3.1.2 vorgestellte Startkonfiguration aus thermischer Sicht zu bewerten und so zu verbessern, dass sie einerseits den thermischen Anforderungen genügt, andererseits einen geringen Raumbedarf für die erforderliche Größe des Einlagerungsfeldes aufweist. Darüber hinaus wird der Einfluss einzelner Parameter auf die Temperaturentwicklung im Bentonit und im verglasten Abfall bestimmt.

Dazu werden im folgenden zunächst die Umgebungsbedingungen beschrieben, die für die thermische Auslegung von Bedeutung sind. Im Anschluss wird das thermische Verhalten beschrieben, was einerseits den wärmefreisetzenden Teil der Cs/Sr-Fraktionen enthält, andererseits die Materialparameter der einzelnen Materialbereiche. Das Kapitel wird mit den Berechnungsmodellen für die jeweilige Zielstellung und deren Ergebnissen abgeschlossen.

3.3.1 Konzeptuelles Modell

Die nachfolgenden Auslegungsberechnungen beziehen sich auf die Endlagerung der wärmeerzeugenden Cs/Sr-Abfallfraktion des Bergbau-Chemischen Kombines und beinhalten Simulationen der Temperaturentwicklung innerhalb der Abfallmatrix, der Barriere (Bentonit) und des Wirtsgesteins. Das konzeptuelle Modell setzt sich zusammen aus:

- Informationen über die Umgebungsbedingungen am Untersuchungsort,
- den Daten über die Wärmeleistung der einzulagernden Abfallbehälter,
- den thermophysikalischen Stoffgesetzen und Parametern des Wirtsgesteins sowie der technischen Barriere und
- den Annahmen zur Modellgeometrie.

3.3.1.1 Umgebungsbedingungen

Hinsichtlich der standortspezifischen Umgebungsparameter wird für die Einlagerungsteufe im Nishnekansker Granitmassiv ein Bereich zwischen 600 bis 668 m angenommen, da eine Erkundungsbohrung gezeigt hat, dass dieser Bereich in der Mitte von zwei Grundwasserzuflüssen liegt. Informationen über das Temperaturfeld in dieser Teufe werden einem Temperatur-Log der Bohrung 1K-700 entnommen, [VNIPI PT 2002]. Abbildung 3-8 zeigt die angenommene Tiefenlage und Temperaturmessungen in der genannten Bohrung im Nishnekansker Granitmassiv. Demnach ist in der Region im Einlagerungsbereich von einem Temperaturgradienten von 37,4 mK/m und von einer Temperatur von etwa 29 °C in der angenommenen Einlagerungsteufe auszugehen. Im Hinblick auf den Bentonit beträgt die an diesem Standort maximal zugelassene Temperaturerhöhung 71 °C. An Hand dieser für die Erwärmung des Bentonits zur Verfügung stehenden Temperaturspanne wird die Bedeutung der Ausgangstemperatur im Einlagerungsbereich für die Standortauswahl deutlich. So weist z. B. der Standort Majak auf der Höhe des Einlagerungsbereichs eine um etwa 15 K geringere Ausgangstemperatur

auf. Diese geringere Ausgangstemperatur kann für eine größere thermische Last im Bohrloch in Form von kürzeren Zwischenlagerzeiten oder einer größeren Behälteranzahl in einem Bohrloch, durch geringere Bohrlochabstände oder durch einen größeren Sicherheitsabstand gegenüber den thermischen Auslegungskriterien genutzt werden. Bei sonst gleichen Bedingungen wäre daher der Standort mit einer geringeren Ausgangstemperatur im Einlagerungsbereich günstiger.

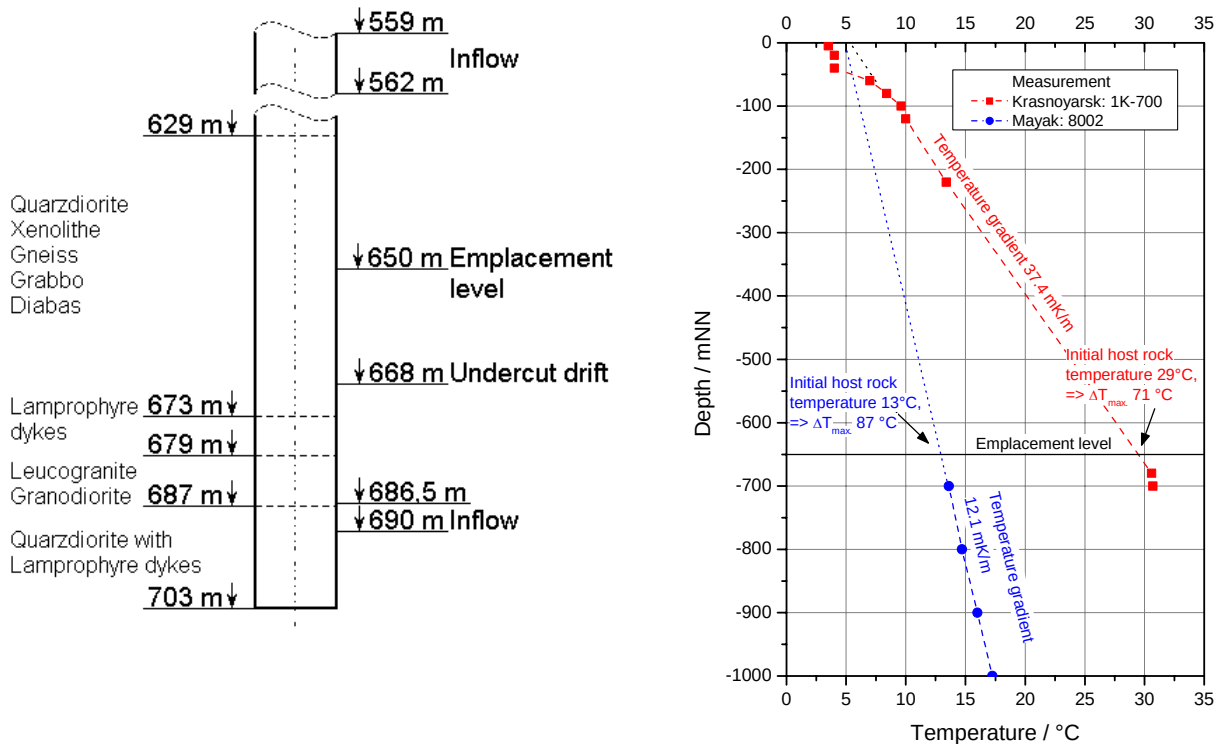


Abbildung 3-8: Angenommene Einlagerungsteufe und lokale Temperaturverhältnisse entsprechend den Untersuchungen in Bohrung 1K-700 [VNIPI PT 2002].

3.3.1.2 Behälter und dessen Wärmefreisetzung

Das wesentliche Element und die Grundlage für die thermischen Auslegungsberechnungen ist die Wärmeleistung eines Endlagerbehälters der Cs/Sr-Abfallfraktionen. Diese Wärmeleistung ist bezogen auf das Behältervolumen als Funktion der Zeit in Abbildung 3-9 dargestellt. Zum Vergleich sind neben den Wärmeleistungen der Cs/Sr-Abfallfraktionen auch die volumenspezifischen Wärmeleistungen anderer, zur Endlagerung vorgesehener Behälter mit dargestellt. Dabei handelt es sich um den Endlagerbehälter mit 3 Brennelementen (BSK-3) und den Polux-Behälter mit 8 bzw. 10 Brennelementen, wobei es sich um Uran-Brennelemente aus Druckwasserreaktoren mit einer Anreicherung von 4 % und einem durchschnittlichen Abbrand von 50 GWd/tSM handelt, sowie die HAW-Kokille und den Candu-Behälter.

Die für eine Einlagerung im Nishnekansker Granitmassiv vorgesehenen Cs/Sr-Abfallfraktionen haben insbesondere in der Anfangszeit eine sehr hohe Wärmeleistung, zeigen aber im Vergleich zu den anderen Behältern einen erheblich steileren Wärmeleistungsabfall. Dies wird besonders in der doppelt-logarithmische Darstellung deutlich, in dem die Cs/Sr-Fraktionen bereits nach ca. 200 Jahren eine geringere Wärmeleistung aufweisen, als die anderen Gebinde. Nach etwa 300 Jahren ist die Wärmeleistung auf unter 10 W/m³ abgesunken und damit für die Auslegung thermisch nicht mehr relevant. Dieses Wärmeleistungsniveau von 10 W/m³ wird dagegen beispielsweise von dem Candu-Behälter erst nach etwa 15.000

Jahren erreicht, so dass dieser Behälter erheblich länger thermisch bedeutsam bleibt. Zusammenfassend handelt es sich bei den zur Einlagerung vorgesehenen Cs/Sr-Fractionen zwar um eine starke Wärmequelle mit einem vergleichsweise kurzen thermisch wirksamen Zeitbereich.

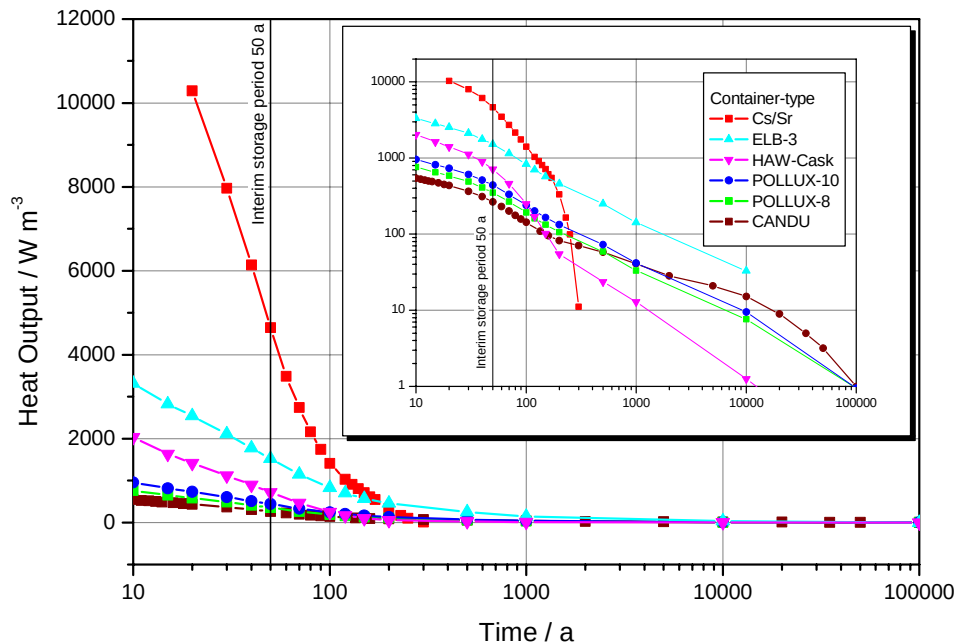


Abbildung 3-9: Volumenspezifische Wärmeleistung der Cs/Sr-Abfallfraktionen als Funktion der Zeit im Vergleich mit anderen vorgesehenen Endlagerbehältern

3.3.1.3 Materialverhalten und Materialparameter

Im folgenden Kapitel wird das thermische Materialverhalten der in den Berechnungen verwendeten Materialien beschrieben. Die in einzelnen Berechnungsschritten verwendeten Materialkenngrößen können gegenüber dem hier beschriebenen Materialverhalten einerseits durch den Schwerpunkt in den einzelnen Untersuchungen und andererseits durch unterschiedliche Annahmen der nur sehr wage bekannten Materialparameter abweichen. Auf ggf. bestehende Abweichungen wird bei den einzelnen Berechnungsschritten hingewiesen.

Die Abfuhr der von dem Endlagerbehälter produzierten Wärme wird allein auf der Basis der Wärmeleitung bestimmt. Die dazu erforderlichen Materialparameter sind die Wärmeleitfähigkeit sowie die massespezifische Wärmekapazität und die Materialdichte. Diese Parameter sind für die folgenden Materialien erforderlich: Wirtsgestein, Bentonit, Zwischenschicht, Behältermaterial sowie verglaster Abfall. Anzumerken ist, dass in den Berechnungen ein isotropes Materialverhalten zu Grunde gelegt wird. Für die genannten Materialien ist die in den Berechnungen verwendete Dichte in Tabelle 3-1 angegeben.

Material	Wirtsgestein	Bentonit	Zwischen- schicht	Behälter- material	Verglaster Abfall
Dichte [kg/m³]	2.180	2.180	2.000	8.000	2.750

Tabelle 3-1: Dichte der in den Berechnungen verwendeten Materialien

Im folgenden werden die beiden rein thermischen Parameter für die o. g. Materialien behandelt. Für das Wirtsgestein liegen standortspezifisch Messdaten vor [Laverov & Petrov 2002]. Abbildung 3-10 zeigt die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität der am

Standort angetroffenen Gesteinsarten in Abhängigkeit von der Temperatur. Das durch die Messdaten für das Nishnekansker Granitmassiv ermittelte Verhalten wird mit den folgenden Funktionen angenähert:

$$\lambda_{HR} = (b_{\lambda} + c_{\lambda} \cdot T) / (1 + a_{\lambda} \cdot T) \quad \text{für die Wärmeleitfähigkeit und} \quad (3.1)$$

$$c_{p,HR} = a_{cp} + b_{cp} \cdot T \quad \text{für die spezifische Wärmekapazität} \quad (3.2)$$

mit

T : Temperatur, °C
 a_{λ} , b_{λ} , c_{λ} : Empirische Konstanten
 a_{cp} , b_{cp} : Empirische Konstanten

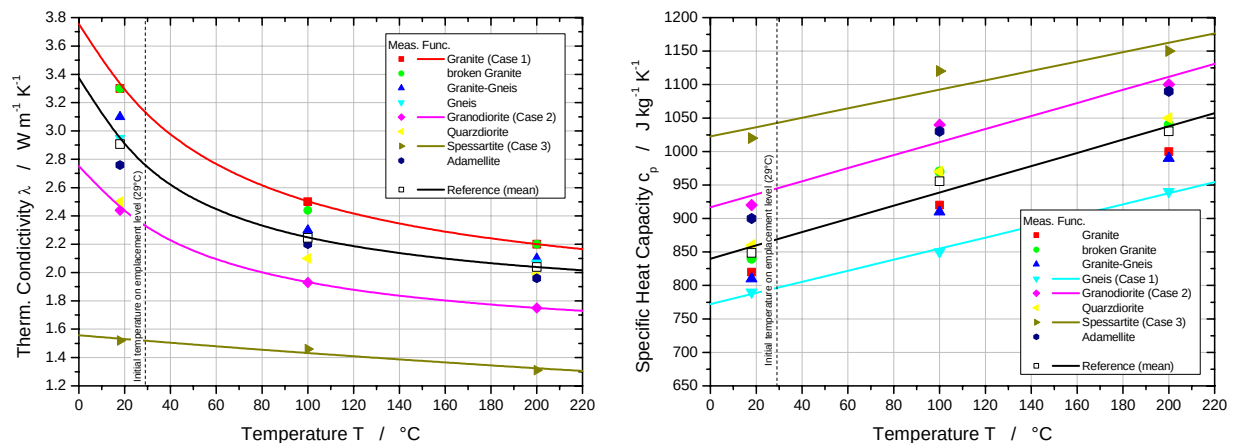


Abbildung 3-10: Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität der im Nishnekansker Granitmassiv angetroffenen Gesteinsarten als Funktion der Temperatur [Laverov & Petrov 2002]

Im Hinblick auf die Spannweite, die das thermische Verhalten des Wirtsgesteins bei unterschiedlichen Standorten aufweisen kann, werden vier Fälle unterschieden. Bleibt Spessartit zunächst unberücksichtigt, ergibt sich der Referenzfall aus dem arithmetischen Mittel aller übrigen Gesteinsarten. Variante 1 ergibt sich aus der maximalen Leitfähigkeit und der minimalen spezifischen Wärmekapazität, Variante 2 aus der minimalen Leitfähigkeit und der maximalen spezifischen Wärmekapazität. Variante 3 wird durch die Materialparameter des Spessartits selbst gebildet. Spessartit steht dabei nicht nur für sich selbst, sondern auch für weitere Gesteine mit vergleichbaren thermischen Eigenschaften. In Tabelle 3-2 sind die Parameter für die einzelnen Funktionen der vier Fälle angegeben.

		Referenz	Variante 1	Variante 2	Spessartit
Wärmeleitfähigkeit					
a_{λ}	1/K	$2,162 \cdot 10^{-2}$	$1,588 \cdot 10^{-2}$	$1,780 \cdot 10^{-2}$	$8,790 \cdot 10^{-4}$
b_{λ}	W/(m·K)	3,368	3,754	2,751	1,558
c_{λ}	W/(m·K ²)	$3,747 \cdot 10^{-2}$	$2,716 \cdot 10^{-2}$	$2,614 \cdot 10^{-2}$	0,0
Spezifische Wärmekapazität					
a_{cp}	J/(kg·K)	$8,401 \cdot 10^{+2}$	$7,723 \cdot 10^{+2}$	$9,167 \cdot 10^{+2}$	$1,023 \cdot 10^{+3}$
b_{cp}	J/(kg·K ²)	$9,877 \cdot 10^{-1}$	$8,269 \cdot 10^{-1}$	$9,750 \cdot 10^{-1}$	$6,993 \cdot 10^{-1}$

Tabelle 3-2: Parameter der Modellfunktionen des thermischen Verhaltens des Wirtsgesteins

Auf die Bedeutung des ungewichteten Mittels im Vergleich mit der Verteilung der Gesteinsarten im Untersuchungsgebiet bei der Bestimmung der Funktionen des Referenzfalls sei hin-

gewiesen. Weiterhin ist anzumerken, dass der Referenzfall durch die Mittelung der Parameterbestimmung und die Variante 1 durch den unterschiedlichen Materialbezug bei Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität jeweils ein fiktives Material repräsentieren. Gleichwohl entspricht das Verhalten des Wirtsgesteins im Referenzfall nahezu dem von Gneis, bzw. im Temperaturbereich von ca. 100 °C auch näherungsweise dem von Granit-Gneis und Adamelite. Variante 1 repräsentiert die Bedingungen bei thermisch optimalen Standortbedingungen, wie sie z. B. im Granit auftreten, Variante 2 gibt die Bedingungen bei ungünstigen Standortbedingungen wie z. B. im Granodiorit wider. Von allen hier betrachteten möglichen Wirtsgesteinen beinhaltet Variante 3 mit Spessartit das mit Abstand ungünstigste thermischen Materialverhalten. Mit der Variation im Verhalten des Wirtsgesteins soll die Spannweite untersucht werden, die sich bei der Standortwahl ergeben kann.

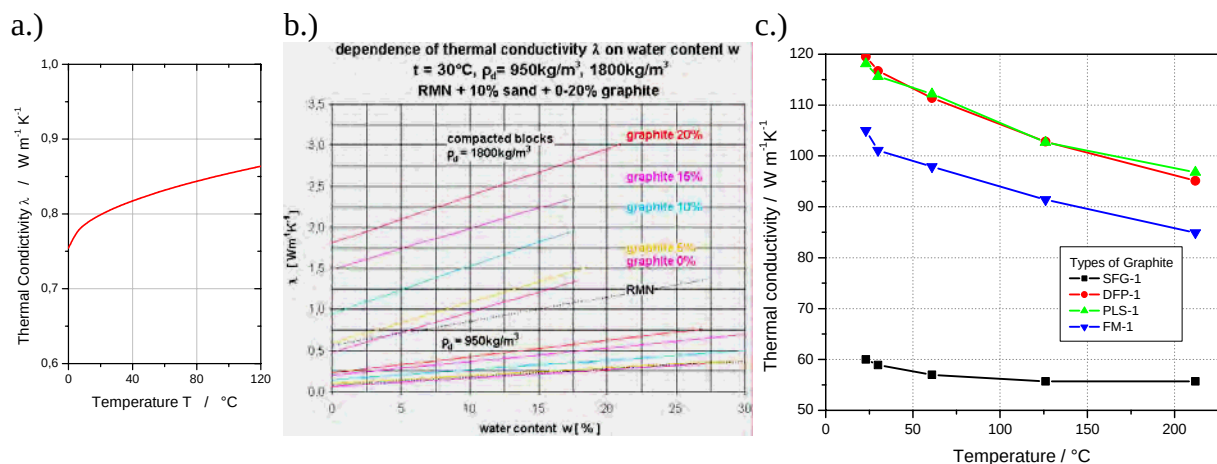
Die Wärmeleitfähigkeit von Bentonit wird mit Hilfe von Gleichung (3.3) berechnet. Dabei handelt es sich um einen empirischen Zusammenhang, der aus einer Reihe von Laborversuchen ermittelt wurde [Kahr & Müller-Von Moos 1982], [Knutsson 1983], [Börgesson 1988], [Börgesson et al. 1994].

$$\lambda_{Be} = -a_1 + a_2 \rho + a_3 w \rho^3 + a_4 \sqrt{T} + a_5 p \quad (3.3)$$

mit:

ρ	=	Dichte / kg m ⁻³
w	=	Wassergehalt / -
T	=	Temperatur / °C
p	=	Druck / MPa
a_i	=	Empirische Konstanten / -

Werden die Dichte, der Wassergehalt und der Druck konstant gehalten, beschreibt Gleichung (3.3) eine allein von der Temperatur abhängige Funktion der Wärmeleitfähigkeit des Bentonits, die in Abbildung 3-11 für eine Dichte von 1.800 kg/m³, einen Wassergehalt von 10 % und einen Druck von 0,17 MPa dargestellt ist. Die Werte für die Wärmeleitfähigkeit bewegen sich bei Temperaturen bis zu 100 °C im Bereich von 0,75-0,85 W/(m·K) und liegen damit um den Faktor 3 bis 5 unter denen des Wirtsgesteins. Die Wärmeleitfähigkeit des Bentonits lässt sich durch Beimischen von Graphit erhöhen. Diese Erhöhung hängt neben dem Graphitanteil auch vom Graphittyp ab, (Abbildung 3-11) [Sheppard et al. 2001].



- a.) ohne Graphit
b.) mit Graphit nach [Vašíček 2002]
c.) Wärmeleitfähigkeit unterschiedlicher Graphitsorten

Abbildung 3-11: Wärmeleitfähigkeit von Bentonit und Graphit

Die spezifische Wärmekapazität des Bentonits wird ebenfalls anhand eines empirischen Zusammenhangs gemäß Gleichung (3.4) berechnet [Kahr & Müller-Von Moos 1982], [Knutsson 1983], [Börgesson 1988], [Börgesson et al. 1994]. Mit einem Wassergehalt von 10 % ergibt sich die spezifische Wärmekapazität zu $1.050 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. Der Einfluss einer möglichen Graphitisierung bleibt unberücksichtigt.

$$c_p = (c_B + c_w \cdot w) / (1 + w) \quad (3.4)$$

mit:

- c_B : Spezifische Wärmekapazität von Bentonit / $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
 c_w : Spezifische Wärmekapazität von Wasser / $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

Für eine ggf. vorhandene Zwischenschicht zwischen Behälter und Bentonit gibt es z. Z. noch keine Materialauswahl. Werden lediglich thermische Kriterien zu Grunde gelegt, bieten sich aus wirtschaftlichen Gründen in erster Linie preiswerte Massenbaustoffe an. Die Wärmeleitfähigkeit ausgewählter Baustoffe ist in Abbildung 3-12 dargestellt. Sie liegt im Bereich zwischen $0,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und $1,4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Trockener Sand enthält einen hohen Luftanteil, so dass dieses Material eine Wärmeleitfähigkeit von $0,3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ aufweist. Der Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit dieser Materialien beträgt etwa $0,7 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Die Wärmekapazität des Zwischenschichtmaterials wird mit $1.000 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ angesetzt.

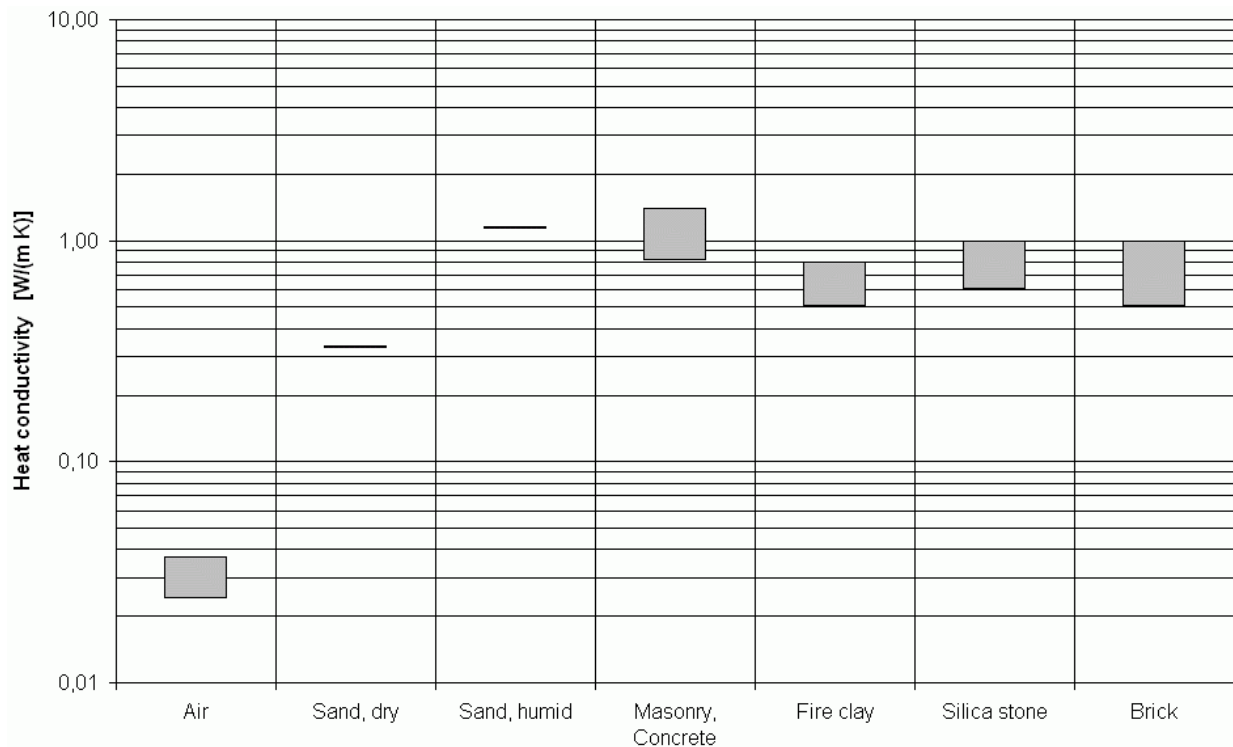


Abbildung 3-12: Wärmeleitfähigkeit unterschiedlicher möglicher Zwischenschichtmaterialien

Als Material für die Einlagerungsbehälter ist austenitischer Stahl vorgesehen. Die thermischen Materialparameter werden als konstant angenommen. Für die Wärmeleitfähigkeit wird ein Wert von $20 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ angesetzt und für die spezifische Wärmekapazität ein Wert von $600 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$.

Verglaster Abfall weist sowohl von seiner Wärmeleitfähigkeit her als auch von seiner Wärmekapazität her ein temperaturabhängiges Verhalten auf, was näherungsweise durch lineare Funktionen beschrieben wird (Abbildung 3-13).

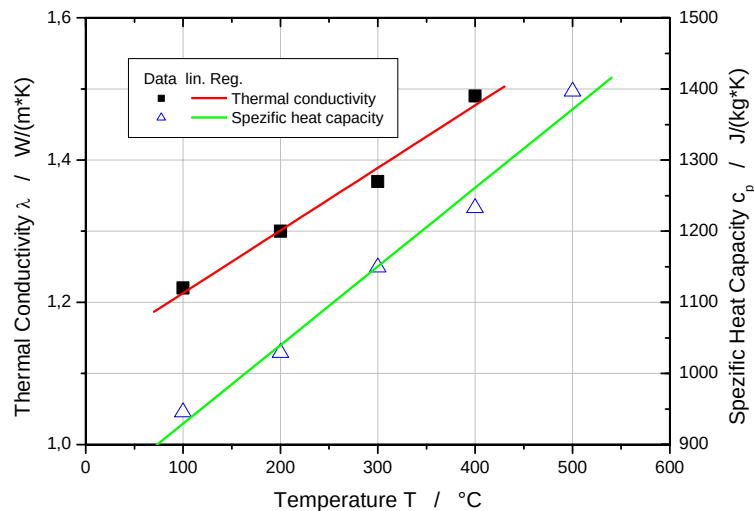


Abbildung 3-13: Gemessenes und angenähertes Verhalten der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität von verglastem Abfall

3.3.2 Berechnungsmodelle und deren Ergebnisse

In den folgenden Unterkapiteln werden die Modelle und die damit erzielten Ergebnissen zur thermische Auslegung des Feldes beschrieben. Die Auslegung erfolgt in mehreren Schritten: Zunächst wird das Verhalten eines einzelnen Bohrlochs untersucht, im zweiten Schritt wird anschließend auf der Basis der Ergebnisse des ersten Schritts eine Auslegung für ein Einlagerungsfeld bestimmt. Eine verbesserte Feldauslegung erfolgt im dritten Schritt. Abschließend wird auf der Basis der verbesserten Auslegung der Einfluss einzelner Modellparameter untersucht.

Vorab durchgeführte Berechnungen haben ergeben, dass vom Behälter durch die Dünnwandigkeit des Stahls kein wesentlicher Einfluss auf das Temperaturfeld ausgeht. Daher bleibt das Behältermaterial bei der Modellbildung unberücksichtigt. Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass handhabungsbedingte Ringspalte zwischen Behälter und anstehendem Material sowie zwischen Bentonit und Wirtsgestein ausgefüllt werden können, ohne dass sich daraus negative Folgen für die Wärmeausbreitung ergeben.

Die Berechnungen werden mit dem Programmsystem FLAC^{3D} (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions) durchgeführt [Itasca 2002]. Das Programm basiert auf der Methode der Finiten Differenzen (FDM). Mit dem Programm können thermomechanische Strukturberechnungen durchgeführt werden. Die Zeitintegration erfolgt über ein explizites Verfahren. Im Hinblick auf die Diskretisierung und das resultierende Gleichungssystem ergeben sich zwischen der Finite Elemente Methode (FEM) und der FDM keine Unterschiede, falls bei der FEM ein Elementansatz mit linearer Verschiebungsfunktion gewählt wird.

3.3.2.1 Auslegung eines Einzelbohrlochs

Im ersten Schritt wird die Berechnung auf der Basis der Startkonfiguration zum Einlagerungskonzept (Kapitel 3.2.1) durchgeführt, um die thermische Belastung der Barrieren durch die Cs/Sr Abfallbehälter zu bestimmen. Das Einlagerungskonzept sieht vor 15 Abfallbehälter abstandlos übereinander gestapelt in einem Bohrloch einzulagern, wobei sich die Berechnungen in diesem Schritt auf ein einzelnes Bohrloch beschränken. Ein Schema für diese Modells und die Diskretisierung des Berechnungsmodells mit den Materialbereichen ist in Abbildung 3-14 dargestellt.

Die Wandstärke des Bentonitrings wird mit 0,45 m angesetzt, so dass sich insgesamt ein Bohrllochdurchmesser von 1,35 m ergibt. Die Ausdehnung des Wirtsgesteins im Modell ist so

groß gewählt, dass innerhalb des Zeitraums, der für das Erreichen der Maximaltemperatur im Auslegungspunkt notwendigen ist, kein Einfluss von den Modellgrenzen ausgeht. Als Auslegungskriterium wird das Temperaturkriterium des Bentonits von 100°C verwendet.

Für das Materialverhalten des verglasten Abfalls wird in diesem Schritt im Gegensatz zum oben beschriebenen Materialverhalten jeweils ein konstanter Werte angenommen, die Wärmeleitfähigkeit beträgt 1 W/(m·K), die massspezifische Wärmekapazität 3.840 J/(kg·K) und die Dichte 4.000 kg/m³. Die Materialparameter des Wirtsgesteins entsprechen denen des Referenzmaterials.

Als Zwischenlagerzeit wird von 50 Jahren ausgegangen, da eine längere Abkühlzeit als unwirtschaftlich angesehen wird.

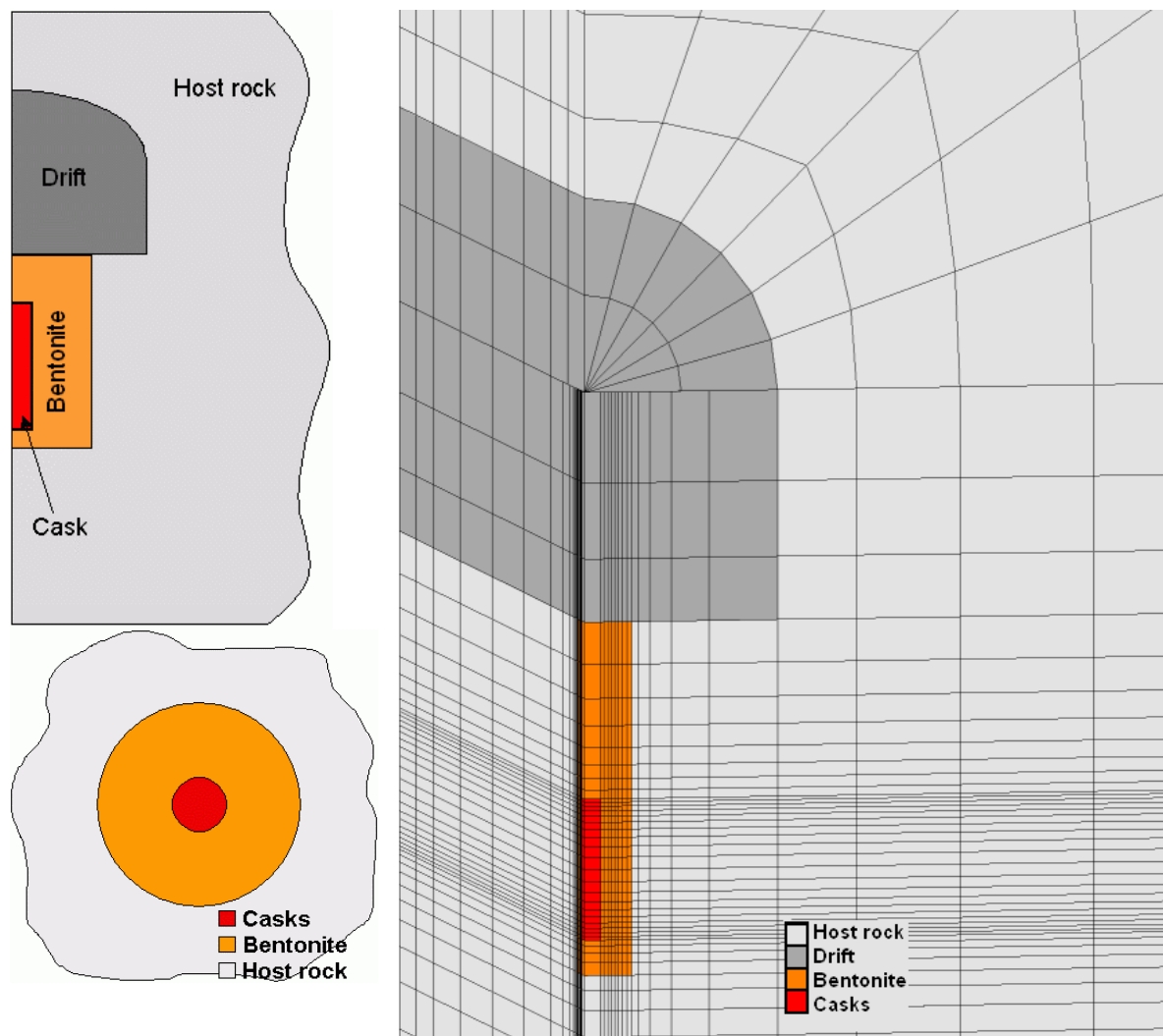
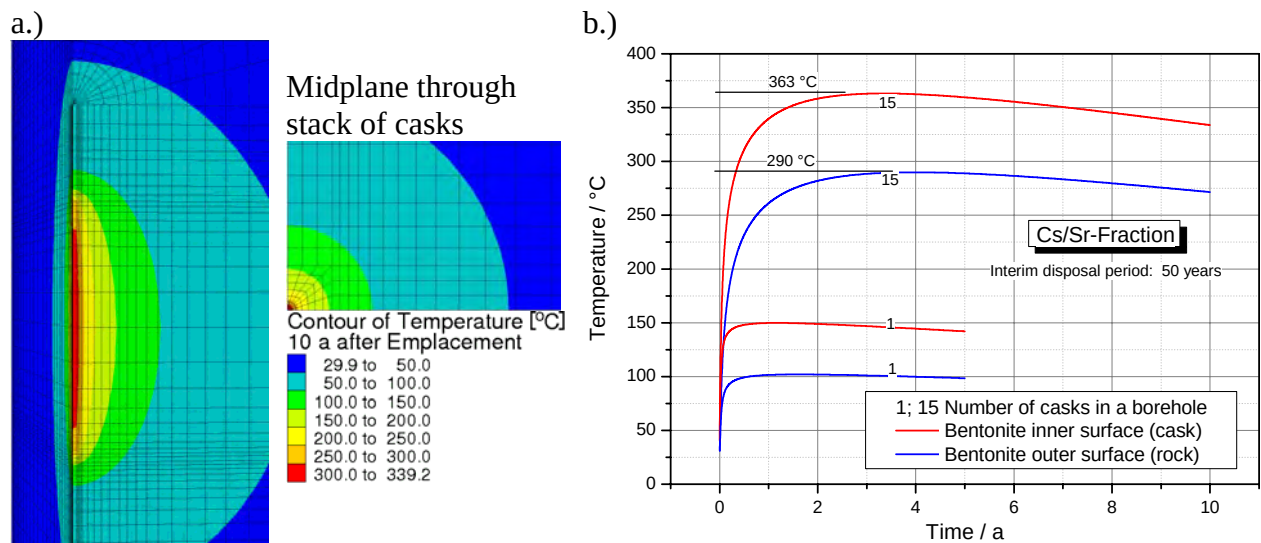


Abbildung 3-14: Schematische Darstellung der Modellgeometrie und Ausschnitt des diskretisierten Berechnungsmodells mit Stapelhöhe von 2 Behältern

In Abhängigkeit von der Zeit stellt sich ein Temperaturfeld ein, das einen deutlichen Abfall in Richtung auf den oberen und den unteren Rand des Behälterstapels aufweist, Abbildung 3-15. Daher tritt die größte Erwärmung in der horizontal verlaufenden Mittelebene des Behälterstapels auf. Für einen Punkt auf dem inneren Rand des Bentonits und einen Punkt dem äußeren Rand des Bentonits, der jeweils auf der Mittelebene liegt, ist der zeitliche Temperaturverlauf für unterschiedliche Stapelhöhen der Behälter in Abbildung 3-15 dargestellt. Bei einer vollständigen Beladung des 18 m langen Bohrlochs mit 15 Behältern, wie es der Startkonfiguration in Kapitel §.2.1 entspricht, erreicht die Temperaturen im Bentonit Werte von bis zu

363 °C. Damit wird die zulässige Temperatur des Bentonits von 100 °C deutlich überschritten. Doch selbst bei nur einem Behälter wird die Grenztemperatur im Auslegungspunkt noch um etwa 50°C deutlich überschritten.



a.) Temperaturverteilung 10 a nach Einlagerung bei der Einlagerung von 15 Abfallbehältern

b.) Temperatur-Zeit-Verlauf auf dem Innen- und Außenrand des Bentonits in der Mittelebene des Behälterstapels bei Einlagerung von 1 bzw. 15 Abfallbehältern

Abbildung 3-15: Temperaturentwicklung bei unmittelbarer Einlagerung in Bentonit

Soll das Einlagerungskonzept beibehalten werden, das die unmittelbare Einlagerung der Abfallbehälter in Bentonit vorsieht, muss die Wärmeleistung verringert werden, die ein Behälter bei seiner Einlagerung freisetzt. Eine Möglichkeit besteht in der Verlängerung der Zwischenlagerzeit bzw. der Abkühlzeit der Abfallbehälter. Der Einfluss der Zwischenlagerzeit bei der Einlagerung eines einzelnen Behälters ist in Abbildung 3-16 dargestellt. Näherungsweise ergibt sich eine Zwischenlagerzeit von mindestens 72 a, die notwendig ist, um eine Überhitzung des Bentonit zu vermeiden. Ein weitere Möglichkeit besteht darin, das Abfallinventars eines jeden Behälters zu verringern (Abbildung 3-16). Um die Auslegungstemperatur des Bentonits nicht zu überschreiten, ist eine Verringerung des Abfallinventars auf etwa 60 % erforderlich.

In beiden Fällen kann jeweils nur ein Behälter pro Bohrloch eingelagert werden, so dass von einem Vielfachen des erforderlichen Wirtsgesteinvolumens gegenüber der Ausgangskonfiguration ausgegangen werden muss. Im ersten Fall muss eine Zwischenlagerzeit von über 70 a in Kauf genommen werden und im zweiten Fall eine erheblich geringere Beladung, die mit 7.250 Behältern statt der angenommenen 4.350 Behältern die notwendige Einlagerungsfläche nochmals fast verdoppelt.

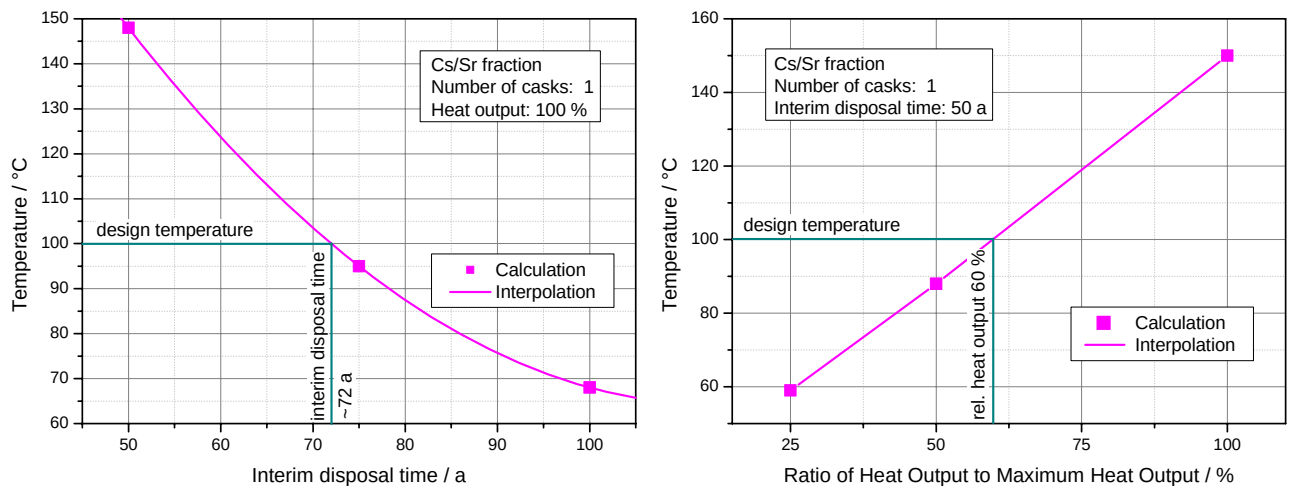


Abbildung 3-16: Einfluss der Zwischenlagerzeit und der Wärmeleistung des Abfallbehälters auf die Maximaltemperatur am Innenrand des Bentonits

Um diese, für den Flächenbedarf ungünstige Situation zu verhindern und um die thermische Belastung der Bentonitbarriere zu verringern, wird das Einlagerungskonzept dahingehend abgeändert, dass eine Zwischenschicht zwischen Behälter und Bentonit eingeführt wird (Abbildung 3-17). Bei unverändertem Bohrlochdurchmesser von 1,35 m wird der ursprünglich mit Bentonit verfüllte Ringraum in eine 0,11 m starke Zwischenschicht und eine 0,34 m starke Bentonitschicht unterteilt. Durch die Zwischenschicht wird die Oberfläche, durch die der Wärmestrom in den Bentonit fließt, vergrößert und damit die flächenspezifische Wärmeleistungsaufnahme des Bentonits reduziert.

Der Zwischenschicht wird mit 0,15 W/(m·K) [Sagmeister 1999] eine geringe Wärmeleitfähigkeit zugewiesen. Dies ist ein Wert, wie er u. a. auch von marktüblichen Wärmedämmsteinen erreicht wird. Die massespezifische Wärmekapazität beträgt im Berechnungsmodell 840 J/(kg·K) und die Dichte 1.800 kg/m³. Gegenüber dem vorangegangenen Modell wird für den Bentonit eine Wärmeleitfähigkeit von 3,6 W/(m·K) angesetzt. Diese erhöhte Wärmeleitfähigkeit kann durch die Beimischung von Graphit, hier etwa 5 % [Sheppard et al. 2001] erzielt werden. Die Materialparameter des Wirtsgesteins entsprechen weiterhin denen des Referenzmaterials. Ebenso wird die Zwischenlagerzeit von 50 a beibehalten.

Für einen Stapel von 3 Behältern der Cs/Sr-Fraktion ist der Temperatur-Zeit-Verlauf am für die Auslegung wesentlichen Bentonitinnenrand in Abbildung 3-18 dargestellt. Als maximale Temperatur wird gerade die zulässige Grenztemperatur von 100 °C erreicht. Gegenüber den vorherigen Berechnungen vergrößert sich durch die Zwischenschicht die Zeitdauer, über die am Bentonitinnenrand die nahezu maximale Temperatur ansteht. Diese zeitliche Ausweitung spielt aber für die thermische Auslegung des Endlagers keine Rolle.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass drei Behälter in einem Bohrloch eingelagert werden können. Zu dieser deutlich verringerten Maximaltemperatur des Bentonits tragen zwei Effekte bei:

Die durch die Zwischenschicht verringerte Leistungsdichte im Bentonit und der erhöhte Energieabtransport durch den Bentonit.

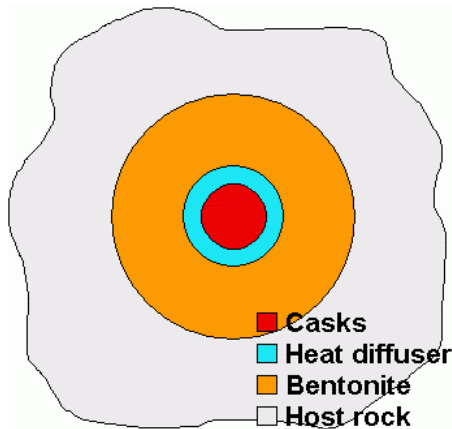


Abbildung 3-17:

Schematische Darstellung der modifizierten Modellgeometrie

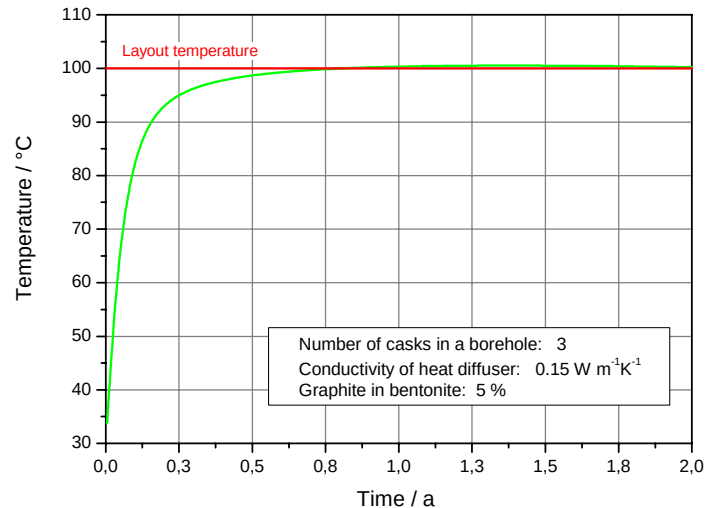


Abbildung 3-18:

Temperatur-Zeit-Verlauf am inneren Rand des Bentonits des modifizierten Modells bei drei Behältern

3.3.2.2 Auslegung eines Einlagerungsfelds

Im Anschluss an die Auslegung des Einzelbohrlochs wird der Mindestabstand ermittelt, der gegenüber weiteren Bohrlöchern einzuhalten ist, ohne dass es durch die gegenseitige Überlagerung der Temperaturfelder der einzelnen Bohrlöchern zu einer Verletzung des Auslegungskriteriums kommt.

Aus thermischer Sicht ist eine äquidistante hexagonale Anordnung von Einlagerungsbohrlöchern anzustreben, da hierbei das notwendige Wirtsgesteinsvolumen minimiert und die räumliche Wärmeabfuhr optimal ausgenutzt wird. Bei dieser Art der Anordnung sind die Abstände von einem Bohrloch ausgehend zu den umliegenden Bohrlöchern identisch. Diese Art der Anordnung erlaubt es, durch Ausnutzung von Symmetrieeigenschaften die thermischen Verhältnisse im Inneren eines sehr großen Einlagerungsfeldes auf die Modellierung von 2 Einlagerungsbohrlöchern zu reduzieren (Abbildung 3-19). Der thermische Einfluss aus den Abfallgebinden in den umgebenden Bohrlöchern wird auf Grund der gleichen Abstände durch die Reflektionsbedingung, das ist die Annahme eines adiabaten Verhaltens an den Modellrändern, berücksichtigt. Zusätzlich zum Schema des Modellgebietes sind in Abbildung 3-19 Ansichten und Ausschnitte des diskretisierten Berechnungsmodells dargestellt. Die im Modell verwendeten geometrischen Abmessungen und Materialparameter entsprechen denen der verbesserten Auslegung eines einzelnen Bohrlochs, insbesondere beträgt der Bohrl Lochdurchmesser 1,35 m bei einer 0,11 m dicken Zwischenschicht sowie einer 0,34 m dicken Bentonitschicht. Wie bei der verbesserten Auslegung des Einzelbohrlochs beträgt die Wärmeleitfähigkeit der Zwischenschicht 0,15 W/(m·K) und die des Bentonits 3,6 W/(m·K). Für das Wirtsgestein wird wiederum das Verhalten des Referenzmaterials angesetzt. Die Zwischenlagerzeit beträgt weiterhin 50 a. Als Auslegungskriterium wird das Temperaturkriterium des Bentonits verwendet.

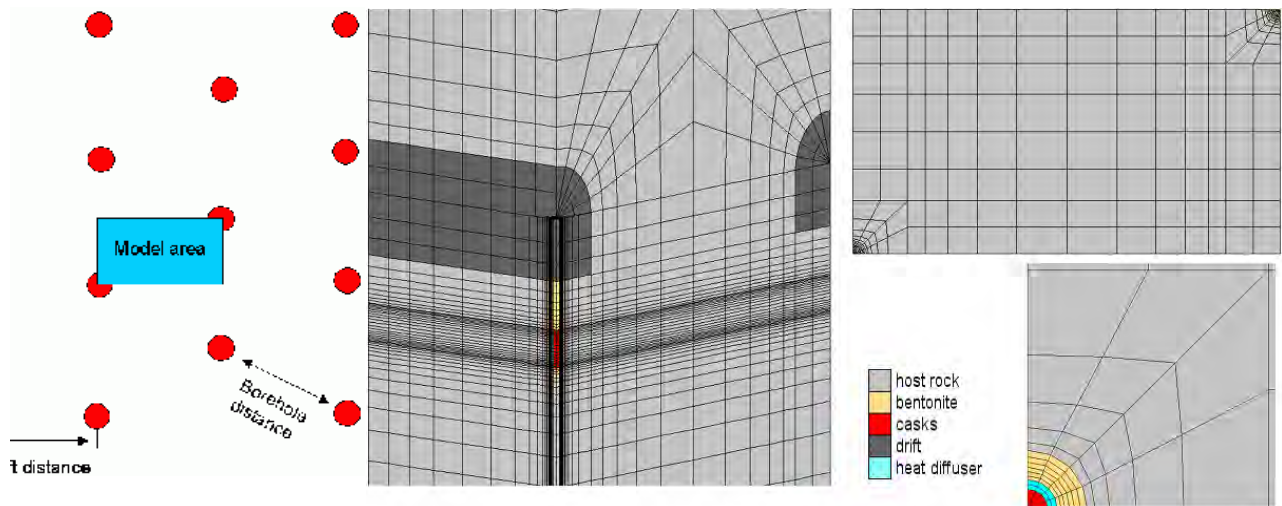
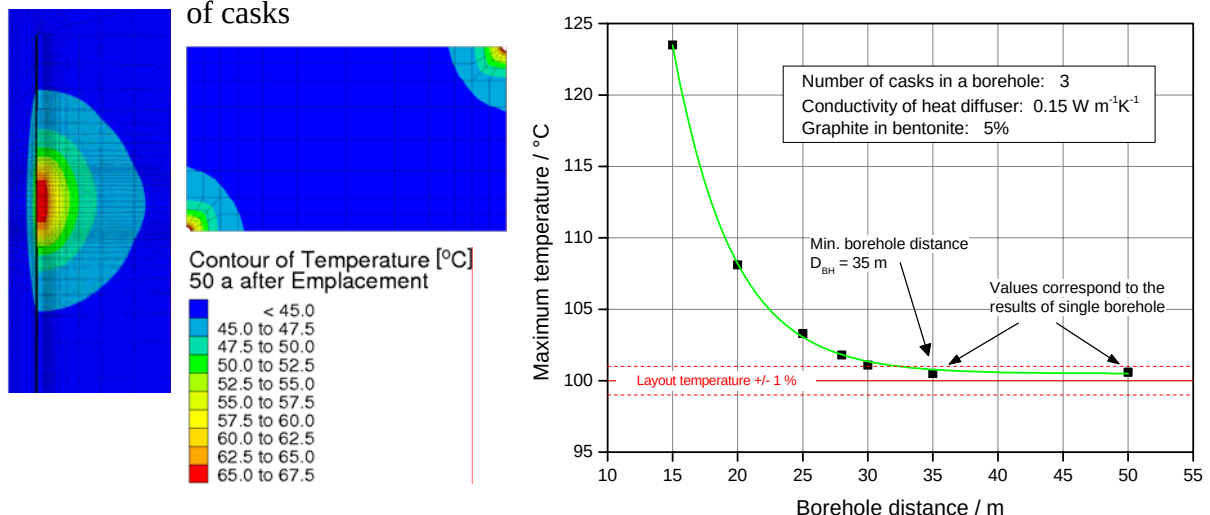


Abbildung 3-19: Schematische Darstellung der Bohrlochanordnung und Ausschnitte aus der Diskretisierung des Berechnungsmodells

Bei der gewählten Auslegung ist es bei einem Einzelbohrloch möglich, drei Behälter abstandslos in einem einzelnen Bohrloch zu stapeln und dabei gleichzeitig die Auslegungstemperatur des Bentonits einzuhalten. Wird diese Auslegung auf ein Bohrlochfeld angewendet, ergibt sich die in Abbildung 3-20 dargestellte Entwicklung der Maximaltemperatur in Abhängigkeit vom Bohrlochabstand. Die Maximaltemperatur nimmt mit wachsendem Abstand der Bohrlöcher exponentiell ab. Bei einem Bohrlochabstand von mehr als 35 m ist kein weiterer Einfluss des Abstands im Hinblick auf eine weitere Verringerung der Maximaltemperatur zu verzeichnen, sondern im Auslegungspunkt wird die Temperatur erreicht, die für ein einzelnes Bohrloch ohne thermische Überlagerung durch weitere Bohrlöcher bestimmt wird.

a.) Midplane through stack of casks b.)



a.) Temperaturverteilung im Bentonit und im Wirtsgestein 50 a nach Einlagerung bei 30 m Bohrlochabstand
b.) Maximaltemperatur auf dem Innenrand des Bentonits in Abhängigkeit vom Bohrlochabstand

Abbildung 3-20: Temperaturentwicklung in einem Einlagerungsfeld bei Einlagerung von drei Behältern je Bohrloch

Um den Einfluss der Behälteranzahl bei ansonsten gleicher Bohrlochkonfiguration zu bestimmen, wird eine Auslegung mit zwei Behältern pro Bohrloch zum Vergleich durchgeführt. Die wesentlichen Ergebnisse der beiden betrachteten Fälle von 2 bzw. 3 Behältern pro Bohrloch sind in Tabelle 3-3 gegenübergestellt. Bei gleichbleibender Abfallmenge erhöht sich zwar bei

der Einlagerung von nur 2 Behältern pro Bohrloch die Anzahl der benötigten Bohrlöcher um 50 % gegenüber der 3-Behälter-Variante. Dieser Mehraufwand wird jedoch durch die Abnahme des Bohrlochabstands um etwa 30 %, das ist eine Änderung des Bohrlochabstands von 35 auf 25 m, mehr als ausgeglichen. Der nominal erforderliche Flächenbedarf verkleinert sich um 300.000 m².

		3 Behälter je Bohrung	2 Behälter je Bohrung
Zwischenlagerzeit	[a]	50	50
max. Temperatur auf Behälteroberfläche	[°C]	399	380
Bohrlochabstand	[m]	35	25
benötigte Fläche (nominal)	[m ²]	1,5·10 ⁶	1,2·10 ⁶
Anzahl der Bohrungen	[-]	1.450	2.175

Tabelle 3-3: Gegenüberstellung charakteristischer Größen bei der Einlagerung von 2 bzw. 3 Behältern pro Bohrloch

3.3.2.3 Verbesserung der Auslegung eines Einlagerungsfelds

Die auf der Grundlage der modifizierten Startkonfiguration des Endlagers vorgenommenen thermischen Berechnungen haben gezeigt, dass durch die Temperaturentwicklung bei einer abstandlosen Stapelung der Behälter im Bohrloch nur eine geringe Anzahl an Behältern pro Bohrloch eingelagert werden können. Das zieht eine große Anzahl an Bohrlöchern und demzufolge ein großes Einlagerungsfeld nach sich. Darüber hinaus muss ein Sicherheitsabstand zwischen Unterfahrungsstrecke und Einlagerungsstrecke beachtet werden, so dass entweder das zwischen den beiden Strecken liegende Bohrloch entsprechend lang sein muss, was zu einem geringen Ausnutzungsgrad des Bohrlochs für die Einlagerung führt, oder die beiden Strecken müssen den gebirgsmechanisch erforderlichen seitlichen Versatz aufweisen, wodurch entsprechend lange Zugänge zwischen Bohrloch und Unterfahrungsstrecke erforderlich sind.

Daher wird im folgenden die Auslegung des Einlagerungsfelds auf der Basis der modifizierten Startkonfiguration weiter verbessert. Der wesentliche Unterschied gegenüber der modifizierten Startkonfiguration besteht darin, dass die Abfallbehälter nun nicht mehr unmittelbar aufeinander gestapelt werden, sondern in einem Abstand voneinander in das Bohrloch eingebracht werden (Abbildung 3-21).

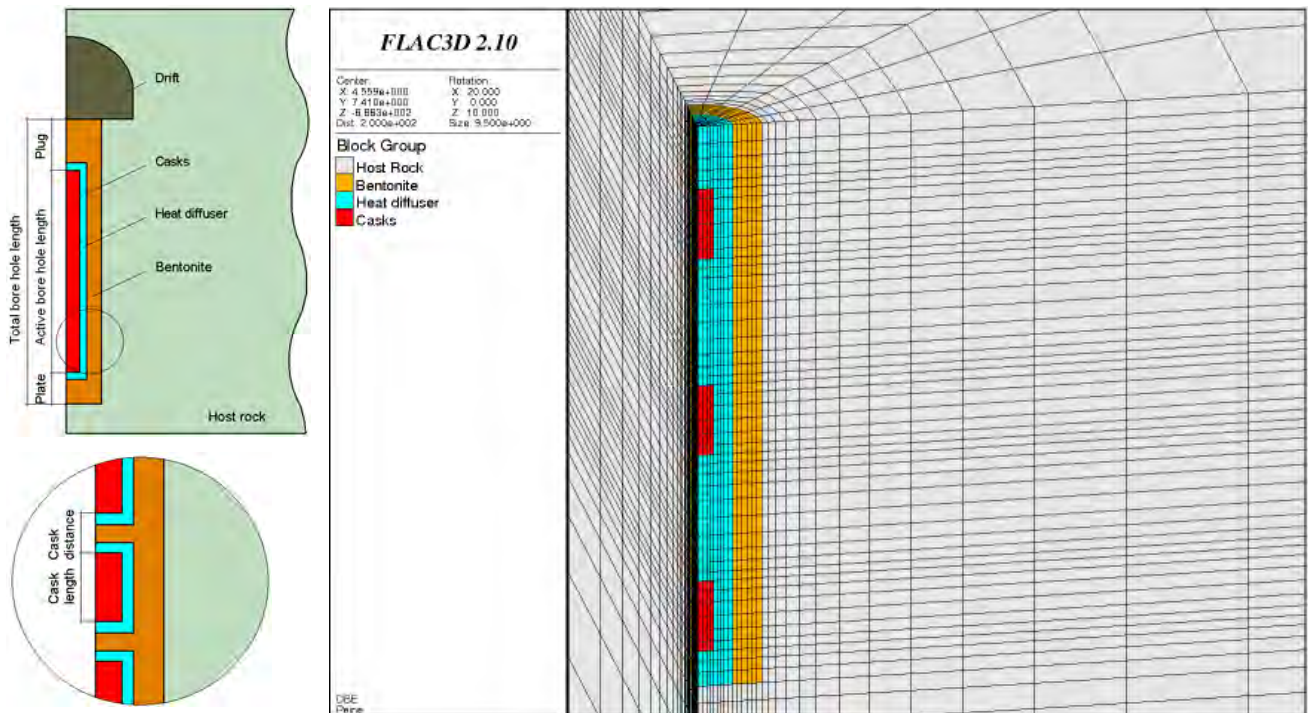


Abbildung 3-21: Schematische Darstellung der verbesserten Bohrlochkonfiguration und Ausschnitt aus der Diskretisierung des Berechnungsmodells

In dem Berechnungsmodell werden die folgenden Abmessungen zu Grunde gelegt:

- Gesamtb Bohrlochlänge : 18 m
- aktive Bohrlochlänge : 15 m
- Bohrlochabstand : 30 m
- Behälterdurchmesser : 0,45 m
- Behälterlänge : 1,0 m
- Behälteranzahl pro Bohrloch: 6
- Wandstärke des Behälters : 7 mm
- Stärke der Zwischenschicht : 0,25 m
- Stärke des Bentonitrings : 0,4 m

Entsprechend der Startkonfiguration wird die Gesamtb Bohrlochlänge in die aktive Bohrlochlänge von 15 m, den Bohrlochstopfen von 2,0 m und die Fußplatte von 0,5 m unterteilt. Der Behälterabstand folgt aus einer gleichmäßigen Verteilung der 6 Behälter innerhalb der aktiven Bohrlochlänge, so dass der Behälterabstand 1,8 m beträgt. Der Bohrlochdurchmesser ergibt sich aus dem Behälterdurchmesser, der Zwischenschicht und dem Bentonit zu 1,75 m. Wie in den vorangegangenen Modellen wird davon ausgegangen, dass ein zur Handhabung erforderlicher Luftspalt zwischen Behälter und Zwischenschicht mit einem Material verfüllt werden kann, das ein Verhalten wie die Zwischenschicht aufweist, und dass der Spalt zwischen Bentonit und Wirtsgestein mit bentonitähnlichem Material verfüllt werden kann.

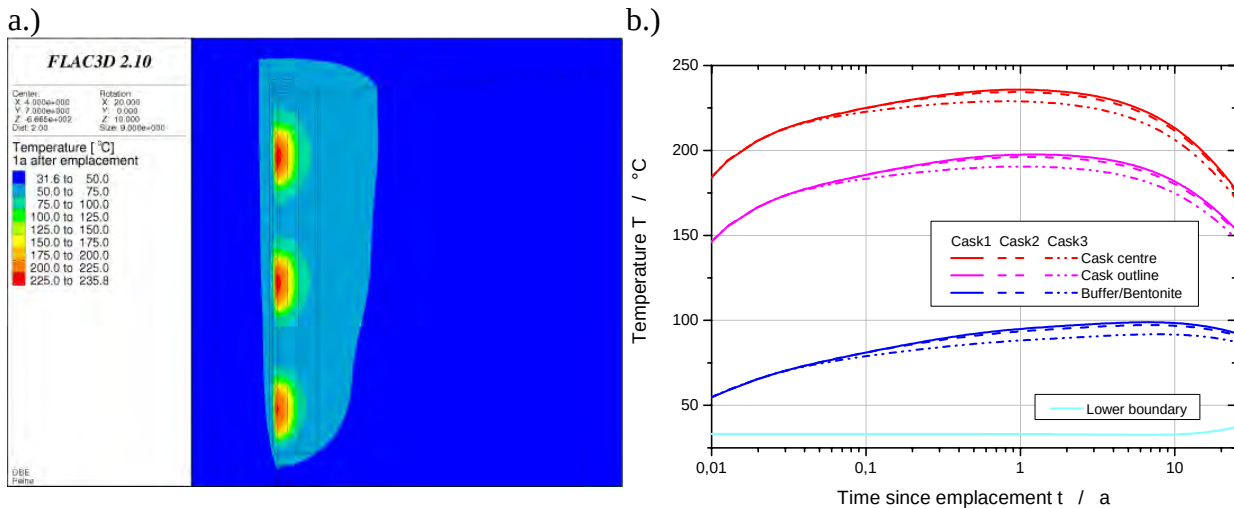
Durch die unterschiedlichen Längen von Bohrlochstopfen und –fußplatte einerseits und das geotherme Temperaturfeld andererseits ergibt sich eine geringfügige Unsymmetrie des berechneten Temperaturfelds in vertikaler Richtung. Die voranstehenden Ergebnisse zeigen jedoch, dass dieser Einfluss gering ist, Abbildung 3-15 und Abbildung 3-20. Daher wird das Berechnungsmodell auf die untere Bohrlochhälfte beschränkt. Ein Ausschnitt des Berechnungsmodells ist in Abbildung 3-21 mit enthalten. Vorabberechnungen haben gezeigt, dass im Hinblick auf die Temperaturen in den Auslegungspunkten ein zu vernachlässigender Unterschied besteht, ob zwischen den Behältern neben der Zwischenschicht auch Bentonit verwen-

det wird, wie es im Schema dargestellt ist, oder nur Material der Zwischenschicht, wie es im Berechnungsmodell dargestellt ist. Vereinfachend wird im Berechnungsmodell zwischen den Behältern ausschließlich Material der Zwischenschicht verwendet.

Die Materialparameter entsprechen den in Kapitel §.3.1.3 angegebenen Werten. Für das Zwischenschichtmaterial werden konstante Materialparameter angenommen, das ist eine Wärmeleitfähigkeit von $0,7 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, eine spezifische Wärmekapazität von $1.000 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ und eine Dichte von 2.000 kg/m^3 . Im Fall des Bentonits wird von seiner Graphitisierung ausgegangen. Da die Wärmeleitfähigkeit des Graphits eine erhebliche Abhängigkeit vom Graphittyp aufweist, Abbildung 3-11 [Sheppard et al. 2001], wird der Einfluss des Graphits vereinfachend durch eine Verdoppelung der Funktion für die Wärmeleitfähigkeit des ungraphitisierten Bentonits berücksichtigt. Im Temperaturbereich bis zu $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ergibt sich so eine Wärmeleitfähigkeit des Bentonit zwischen $1,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ und $1,7 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, das ist ein Wertebereich, der unterhalb der Hälfte des in den vorangegangenen Berechnungen verwendeten Wertes liegt. Auf der Basis der Ergebnisse in [Vašíček 2002] wird die hier verwendete Wärmeleitfähigkeit etwa bei einem Graphitanteil von 10 % erreicht. Die Materialparameter des Wirtsgesteins entsprechen denen des Referenzmaterials. Die Zeitdauer für die Zwischenlagerzeit beträgt 50 a. Als Auslegungskriterium wird zusätzlich zum Bentonitkriterium auch das Kriterium des verglasten Abfalls verwendet.

Das Temperaturfeld zum Zeitpunkt von 1 a nach Einlagerung der Behälter, das ist der Zeitpunkt des Temperaturmaximums innerhalb des verglasten Abfalls, ist in Abbildung 3-22 dargestellt. Im Anschluss an diesen Zeitpunkt kühlen die Behälter wieder ab, im Nah- und Fernfeld um die Behälter steigen die Temperaturen jedoch noch an. Für ausgewählte Punkte ist die zeitliche Entwicklung der Temperatur in Abbildung 3-22 mit dargestellt. Die Ausgabepunkte liegen jeweils auf der horizontalen Ebene durch die Mitte der einzelnen Behälter und beschreiben die maximale Temperaturentwicklung in den Auslegungspunkten innerhalb der einzelnen Materialien. Dabei steht das Behälterzentrum für den verglasten Abfall, die Behälteroberfläche für das Behältermaterial und der Übergang zwischen Zwischenschicht und Bentonit für den Bentonit. In den Abbildungen ist der Einfluss aus der endlichen Bohrlochlänge durch die Temperaturabnahme hin zu den Rändern erkennbar. Zusätzlich zum Temperaturverlauf in den Auslegungspunkten ist in Abbildung 3-22 der Temperaturverlauf auf dem unteren Rand mit dargestellt. Ein Temperaturanstieg auf dem unteren Rand stellt sich erst nach Überschreiten der Temperaturmaxima in den Auslegungspunkten ein, das thermische Berechnungsmodell ist also ausreichend groß dimensioniert.

Im Unterschied zur Startkonfiguration mit einer abstandslosen Stapelung der Behälter ist bei einem Abstand von 1,8 m zwischen den Behältern und einem Bohrlochabstand von 30 m die Einlagerung von 6 Behältern pro Bohrloch möglich, ohne dass dabei ein thermisches Auslegungskriterium überschritten wird. Die maximale Temperatur im verglasten Abfall beträgt $235,8 \text{ }^\circ\text{C}$ und im Bentonit $98,9 \text{ }^\circ\text{C}$. Die zusätzlich ausgewiesene Maximaltemperatur auf der Oberfläche der Behälter beträgt $197,6 \text{ }^\circ\text{C}$. Die nominale Feldgröße beträgt bei der weiter verbesserten Konfiguration 565.000 m^2 .



a.) Temperaturverteilung 1 a nach Einlagerung

b.) Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Zeit für ausgewählte Punkte

Abbildung 3-22: Temperaturentwicklung bei verbesserter Auslegung des Einlagerungsfelds

3.3.2.4 Variation der Modellparameter

3.3.2.4.1 Variation einzelner Parameter

Die im Kapitel 3.3.2.2 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass eine Einlagerung von 6 Behältern pro Bohrloch bei einem Bohrlochabstand von 30 m möglich ist, ohne ein thermisches Auslegungskriterium zu überschreiten. Diese Lösung wird daher im folgenden als Referenz herangezogen. Im Vergleich mit dieser Referenz wird untersucht, welchen Einfluss die einzelnen Modellparameter auf die Maximaltemperatur im verglasten Abfall und im Bentonit des zentralen Behälters haben. Auf Grund der zeitabhängigen Energiefreisetzung der Abfallgebinde und der z. T. temperaturabhängigen Materialparameter handelt es sich bei dem zu untersuchenden System um ein nichtlineares Problem der Wärmeausbreitung. Gegenüber der Referenzkonfiguration wird daher nur jeweils ein Parameter variiert, während die übrigen Parameter unverändert beibehalten werden. Insgesamt wird der Einfluss der in Tabelle 3-4 genannten elf Parameter untersucht. Diese Untersuchung beschreibt den Einfluss der einzelnen Parameter auf das Systemverhalten, so dass die in den Variationen verwendete Bandbreite teilweise deutlich über das technisch realisierbare Maß hinausgeht. Anzumerken ist, dass bei der Variation des thermischen Verhaltens des Wirtsgesteins die Wärmeleitfähigkeit gleichzeitig mit der Wärmekapazität variiert wird. Diese gemeinsame Variation ergibt sich aus dem in Abbildung 3-10 dargestellten Verhalten.

<u>Materialparameter:</u>	<u>Geometrieparameter:</u>
• Wärmeleitfähigkeit des verglasten Abfalls • Wärmekapazität des verglasten Abfalls • Wärmeleitfähigkeit der Zwischenschicht • Wärmekapazität der Zwischenschicht • Wärmeleitfähigkeit des Bentonits • Wärmekapazität des Bentonits • Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Wirtsgesteins	• Wandstärke der Zwischenschicht • Wandstärke des Bentonits • Bohrlochabstand • Behälteranzahl

Tabelle 3-4: Modellgrößen der Variation

Der Einfluss der einzelnen Parameter auf die Maximaltemperatur des verglasten Abfalls ist in Abbildung 3-23 dargestellt, der Einfluss auf das Temperaturkriterium des Bentonits in Abbildung 3-24. In den Abbildungen ist der Wert der variierten Größe auf den entsprechenden Wert des Referenzfalls bezogen. Wird z. B. der Einfluss von 8 Behältern untersucht, im Referenzfall werden 6 Behälter verwendet, beträgt der Wert des Variationskoeffizienten $\alpha/\alpha_{ref} = 1,667$. Im Hinblick auf den Variationskoeffizienten stellt der Bohrlochabstand eine Ausnahme dar. In diesem Fall wird an Stelle des Verhältnisses der Bohrlochabstände das Verhältnis des Gesteinsvolumens verwendet, so dass sich unter der Annahme des gleichen Teufeneinflusses das Quadrat des Bohrlochabstandsverhältnisses $\alpha/\alpha_{ref} = (d_{BH}/d_{BH,ref})^2$ als Variationskoeffizienten ergibt. Eine weitere Ausnahme ist die Variation der Materialparameter des Wirtsgesteins. Wie oben bereits erwähnt wird in diesem Fall die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität des Wirtsgesteins gemeinsam variiert, Abbildung 3-10 und Tabelle 3-2. Die Größe des Variationskoeffizienten wird durch das Produkt der Verhältnisse aus Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität $\alpha/\alpha_{ref} = (\lambda_{HR}/\lambda_{HR,ref}) \cdot (c_{p,HR}/c_{p,HR,ref})$ bestimmt. Zusätzlich sei darauf hingewiesen, dass die Materialparameter des Wirtsgesteins nur für die vier in Abbildung 3-10 dargestellten Varianten erfolgt. Damit ist eine erhebliche Variationsspannweite des Wirtsgesteins in Richtung auf eine geringere Wärmeleitfähigkeit gegeben, jedoch nur eine geringe zu höherer Wärmeleitfähigkeit. Unabhängig davon wird jedoch so die Spannweite der möglichen Wirtsgesteine im Nishnekansker Granitoidmassiv erfasst.

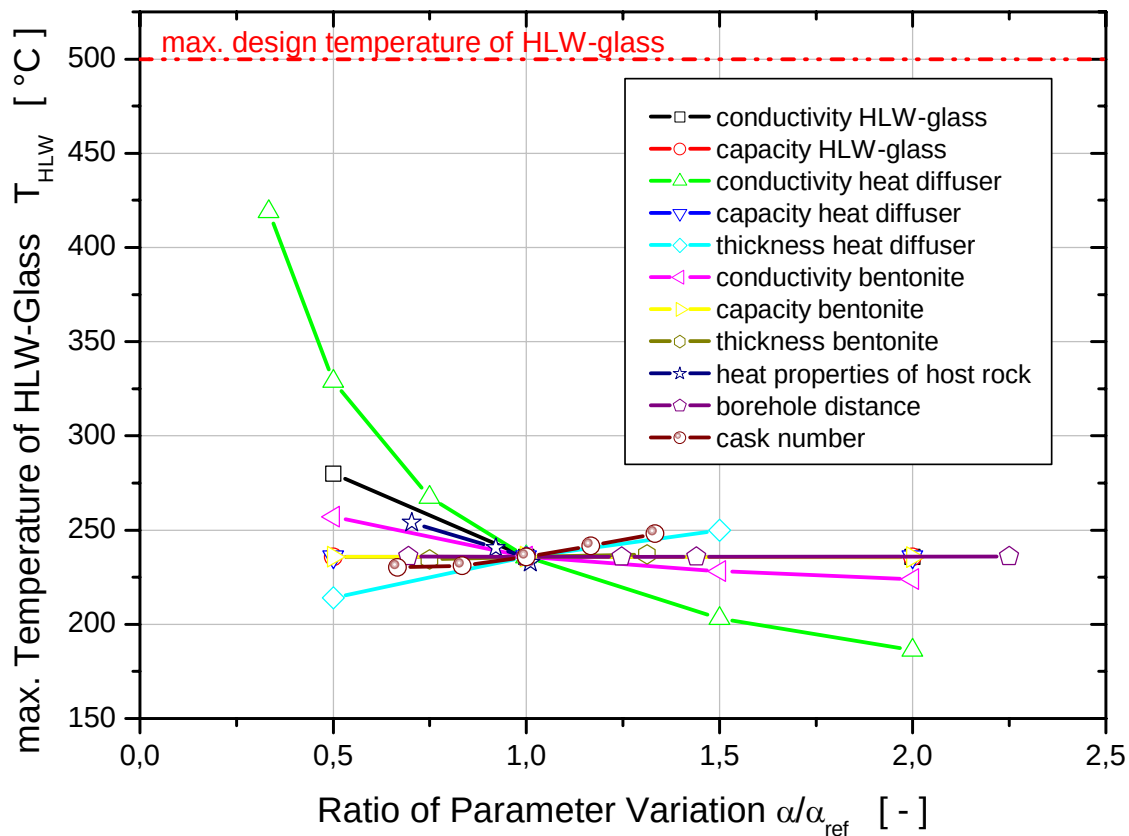


Abbildung 3-23: Einfluss der Variationen auf die Maximaltemperatur des verglasten Abfalls

Im Hinblick auf das Auslegungskriterium des verglasten Abfalls wird die zulässige Temperatur von 500 °C im Referenzfall mit einer erzielten Maximaltemperatur von 235,8 °C nur etwa zur Hälfte ausgenutzt. Der größte Einfluss bei diesem Auslegungskriterium geht von der Wärmeleitfähigkeit der Zwischenschicht aus (Abbildung 3-23). Um allein durch die Variation dieser Wärmeleitfähigkeit die Auslegungstemperatur von 500 °C zu überschreiten, muss sie einen Wert unterhalb eines Viertels des Wertes des Referenzwerts aufweisen, was einem Wert von unter 0,175 W/(m·K) entspricht. Da die Zwischenschicht nur einen ausreichenden Abstand zwischen Behälter und Bentonit sicherstellen soll, kann durch eine geeignete Materialauswahl eine hinreichend große Wärmeleitfähigkeit gewährleistet werden. Weitere wesentliche Parameter sind in der Reihenfolge ihrer Einflussgröße das thermische Verhalten des Wirtsgesteins, die Wandstärke der Zwischenschicht, die Behälteranzahl sowie die Wärmeleitfähigkeit des verglasten Abfalls und die des Bentonits. Die übrigen Parameter haben nur einen geringen Einfluss oder wie die Wärmekapazität der einzelnen im Berechnungsmodell berücksichtigten Materialien keinen Einfluss. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass, solange für die Zwischenschicht ein Material mit hinreichend hoher Wärmeleitfähigkeit verwendet wird, das ist ein Wert, der in der Größe des Referenzwerts liegt, auch durch die Variation mehrerer Parameter in deren technisch sinnvollen Grenzen die maximal zulässige Temperatur der Glasmatrix nur schwer überschritten werden kann.

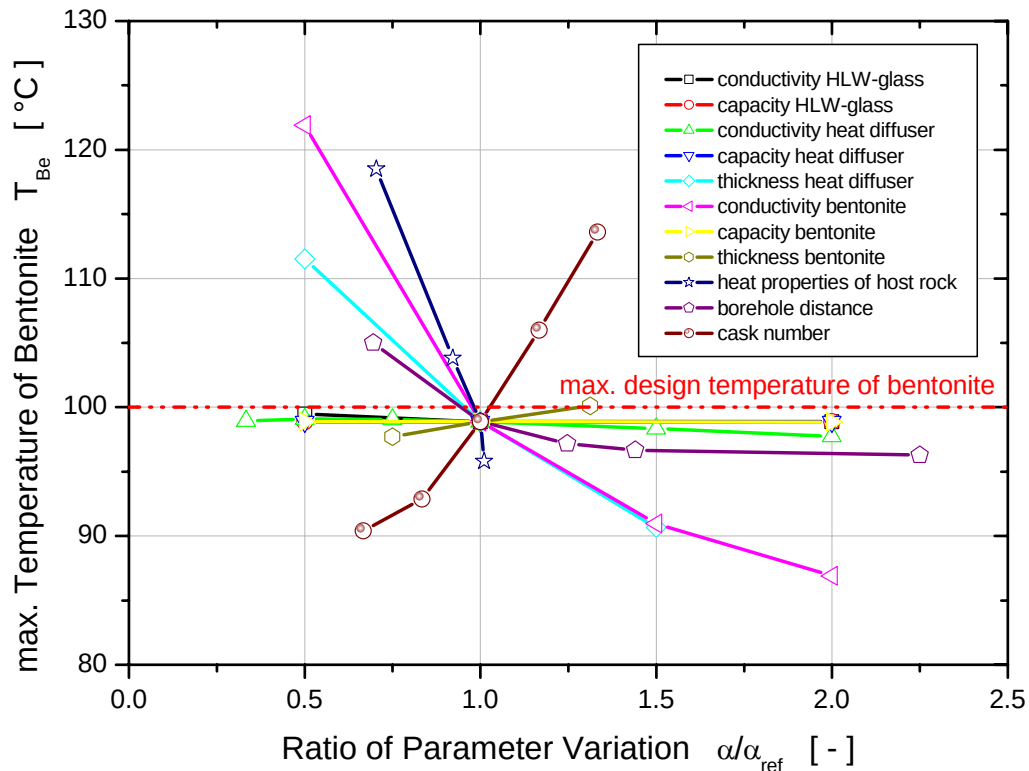


Abbildung 3-24: Einfluss der Variationen auf die Maximaltemperatur des Bentonits

Die zulässige Temperatur des Bentonits von 100 °C wird im Referenzfall mit einer erzielten Maximaltemperatur von 98,9 °C nahezu vollständig ausgenutzt. Auf der Basis der Referenzkonfiguration ist das thermische Verhalten des Wirtsgesteins die wesentlichste Einflussgröße, Abbildung 3-24, gefolgt von der Behälteranzahl, der Wärmeleitfähigkeit des Bentonits, der Wandstärke der Zwischenschicht und dem Bohrlochabstand. Innerhalb der Variationsbandbreite wird von diesen Parametern eine Temperaturänderung im Bereich von -12 K bis +24 K erzielt. Die übrigen Parameter haben nur einen geringen Einfluss oder, ebenso wie beim verglasten Abfall, wie die Wärmekapazität der einzelnen Materialien keinen Einfluss. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass in der Referenzkonfiguration der Bentonit thermisch ausgenutzt ist und dass eine Änderung der Konfiguration bei gleichzeitiger thermischer Ausnutzung nur im Zusammenspiel der oben genannten fünf Einflussgrößen möglich ist. So ist z. B. die Einlagerung von mehr als sechs Behältern in einem Bohrloch auch bei Einlagerung in das am besten wärmeleitende Wirtsgestein nicht möglich, da mit diesem Wechsel des Wirtsgesteins lediglich eine Absenkung der Maximaltemperatur im Bentonit um etwa 3 K erzielt werden kann, während bereits ein Behälter mehr je Bohrloch zu einem Temperaturanstieg von etwa 7 K führt. Um das Auslegungskriterium bei dieser geänderten Konfiguration einzuhalten, muss mindestens noch eine weitere, auf die Temperatur einwirkende Größe verändert werden.

Der Einfluss der zu variierenden Größen auf die Maximaltemperatur in den beiden Auslegungspunkten gegenüber der Referenzkonfiguration ist in Tabelle 3-5 zusammengefasst. Ein großer Einfluss „++“ liegt vor, wenn der Betrag des zentralen Differenzenquotienten um den Auslegungspunkt der Referenzlösung größer als 5 % ist, ein geringer Einfluss „o“ liegt im Bereich von 0,5 % bis 5 % und unterhalb von 0,5 % besteht kein Einfluss „-“.

Variation	Thermischer Einfluss auf	
	HAW-Glas	Bentonit
Wärmeleitfähigkeit des verglasten Abfalls	++	-
Wärmekapazität des verglasten Abfalls	-	-
Wärmeleitfähigkeit der Zwischenschicht	++	o
Wärmekapazität der Zwischenschicht	-	-
Wandstärke der Zwischenschicht	++	++
Wärmeleitfähigkeit des Bentonits	++	++
Wärmekapazität des Bentonits	-	-
Wandstärke des Bentonits	o	o
Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Wirtsgesteins	++	++
Bohrlochabstand	-	++
Behälteranzahl	++	++

Tabelle 3-5: Einfluss der Variationen einzelner Parameter auf die Maximaltemperatur des verglasten Abfalls und des Bentonits (++ großer, o geringer, - kein Einfluss)

Wird der Einfluss der einzelnen Parameter auf das Auslegungskriterium der Glastemperatur mit dem der Bentonittemperatur verglichen, gibt es mit der Wärmeleitfähigkeit des verglasten Abfalls, der Wärmeleitfähigkeit der Zwischenschicht und dem Bohrlochabstand Parameter, die auf die beiden Auslegungskriterien unterschiedlich einwirken. So wirkt sich z. B. die Änderung der Wärmeleitfähigkeit des verglasten Abfalls im Hinblick auf die thermische Belastung des Glases besonders stark aus, während seine Auswirkungen auf den Bentonit nahezu zu vernachlässigen sind. Umgekehrt spielt der Bohrlochabstand bei der Maximaltemperatur im verglasten Abfall keine Rolle, sehr wohl aber eine bei der Maximaltemperatur im Bentonit. Der Einfluss der übrigen acht Parameter ist für beide Auslegungskriterien gleich. Insbesondere gilt dies für die Wärmekapazität der im Berechnungsmodell berücksichtigten Materialien, die keinen Einfluss haben. Bei beiden Auslegungskriterien ändert sich die Temperatur bei der Variation eines Parameters in die selbe Richtung. So führt z. B. eine dickere Bentonitschicht in beiden Fällen zu steigenden Maximaltemperaturen. Die einzige Ausnahme stellt die Wandstärke der Zwischenschicht dar, indem eine Vergrößerung dieser Schicht zu einem Temperaturanstieg im Behälter führt, jedoch zu einem Temperaturabfall im Bentonit.

Bei einer Übertragung auf Einlagerungskonzepte mit abweichenden Parameterwerten können sich teilweise andere Abhängigkeiten einstellen. Dieses gilt insbesondere im Hinblick auf das Verhältnis der Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Materialien zueinander. So führt z. B. im vorliegenden Fall eine Vergrößerung der Schichtdicke des Bentonits zu einer Erhöhung der maximalen Bentonittemperatur. Die Ursache dafür ist die geringere Wärmeleitung des Bentonits im Vergleich mit der des Wirtsgesteins. Wird dagegen ein stärker graphitisierter Bentonit zu Grunde gelegt, dessen Wärmeleitung größer als die des Wirtsgesteins ist, führt eine Vergrößerung der Bentonitschichtdicke zu einer abnehmenden Maximaltemperatur des Bentonits.

Ergänzend ist in Abbildung 3-25 der Parametereinfluss auf die Temperatur des Behältermantels dargestellt. Im Referenzfall beträgt die Behältermaximaltemperatur rechnerisch 197,6 °C. Wie beim Auslegungskriterium des verglasten Abfalls ist für diesen Auslegungspunkt die Wärmeleitfähigkeit der Zwischenschicht die wesentlichste Einflussgröße. Der Einfluss der übrigen Parameter beträgt im untersuchten Variationsbereich maximal ± 23 K.

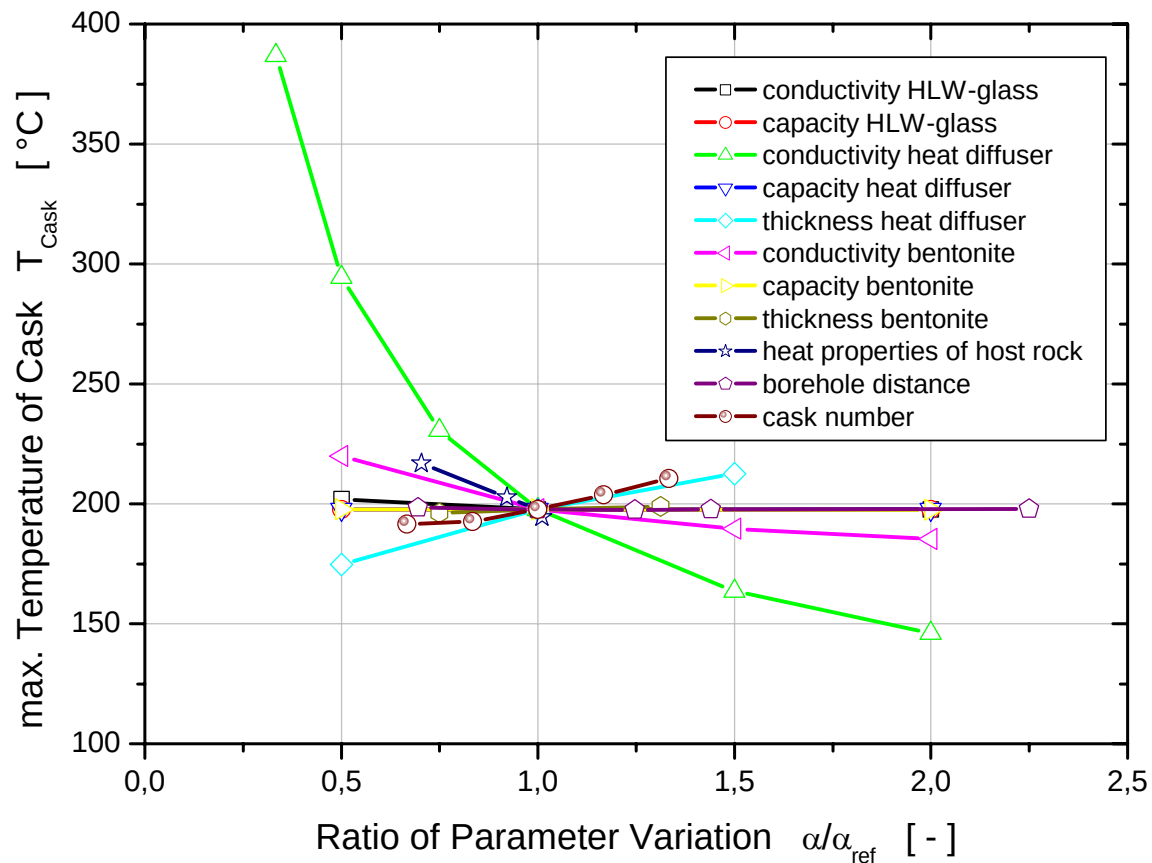


Abbildung 3-25: Einfluss der Variationen auf die Maximaltemperatur des Behältermantels

Die Auslegung des Referenzfalls erfolgte im Hinblick darauf, dass die Maximaltemperatur des verglasten Abfalls die Auslegungstemperatur von 500 °C nicht überschreitet und dass die Maximaltemperatur des Bentonits nicht die Auslegungstemperatur von 100 °C überschreitet. Die maximal zulässige thermische Belastung des Bentonits nahezu erreicht, eine große verfügbare Temperaturspanne steht noch beim verglasten Abfall zur Verfügung. Da das Auslegungskriterium des verglasten Abfalls durch die geeignete Wahl des Zwischenschichtmaterials leicht zu beeinflussen ist, stellt das Auslegungskriterium des Bentonits das wesentlich schwieriger einzuhaltende Kriterium dar. Die Parameter mit dem größten Einfluss im Hinblick auf das Auslegungskriterium des Bentonits sind in der Reihenfolge der Größe ihres Einflusses:

- das Wirtsgestein mit seinen thermischen Materialparametern,
- die Behälteranzahl,
- die Wärmeleitfähigkeit des Bentonits,
- die Wandstärke der Zwischenschicht und
- der Bohrlochabstand.

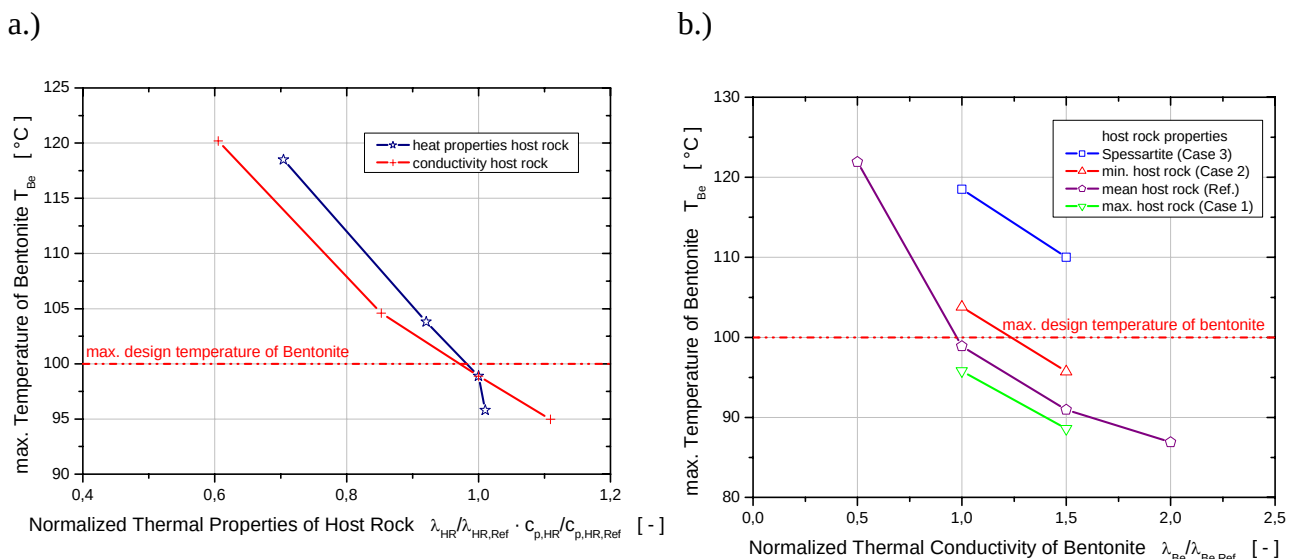
Die übrigen, hier nicht erwähnten Parameter haben keinen oder nur einen untergeordneten Einfluss auf die maximale Temperatur des Bentonits. Wird von der Einlagerung in einem gegebenen Wirtsgestein ausgegangen, verbleiben von den o. g. Größen noch vier, die für eine

weitergehende Verbesserung des Endlagerkonzepts herangezogen werden können. Davon ist die Wärmeleitfähigkeit des Bentonits die einzige weitere Materialkenngröße. Zusätzlich zur technischen Umsetzbarkeit einer angestrebten Parameteränderung muss der wirtschaftliche Aspekt der Änderung berücksichtigt werden.

3.3.2.4.2 Weitergehende Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Wirtsgesteine

Im folgenden Kapitel wird der Einfluss des Wirtsgesteins näher betrachtet. Wie bereits in Kapitel 3.3.1.3 beschrieben, ist die Wärmeleitfähigkeit zusammen mit der Wärmekapazität zu variieren. Abweichend davon zeigt eine separate Variation allein der Wärmeleitfähigkeit des Wirtsgesteins, dass die Temperaturänderung im wesentlichen auf die Änderung der Wärmeleitfähigkeit zurückzuführen ist (Abbildung 3-26). Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass sich eine geringere Wärmeleitfähigkeit stärker bemerkbar macht als eine höhere. Bei der Standortauswahl ist daher aus thermischer Sicht der Standort mit der geringeren Wärmeleitfähigkeit des Wirtsgesteins zu meiden.

Der Einfluss der Graphitisierung des Bentonits ist für die vier unterschiedlichen Wirtsgesteine in Abbildung 3-26 dargestellt. Durch die zusätzliche Graphitisierung sinkt die Maximaltemperatur in den Auslegungspunkten, allerdings verringert sich mit zunehmender Graphitisierung bei gleichbleibendem Wirtsgestein die Temperaturabsenkung. Weiterhin fällt die Temperaturabsenkung durch die erhöhte Graphitisierung um so größer aus, je geringer die Wärmeleitfähigkeit des Wirtsgesteins ist.



- a.) Vergleich zwischen Einfluss einzelner Materialparameter des Wirtsgesteins auf die Maximaltemperatur des Bentonits
b.) Einfluss des Wirtsgesteins bei unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit des Bentonits auf die Maximaltemperatur des Bentonits

Abbildung 3-26: Einfluss einzelner Materialparameter auf die Maximaltemperatur des Bentonits

Für das zu planende Endlager existieren mehrere mögliche Wirtsgesteine. Der Einfluss des Bohrlochabstands bei den unterschiedlichen Wirtsgesteinen ist in Abbildung 3-27 dargestellt. Bei jedem Wirtsgestein gibt es einen Grenzwert des Bohrlochabstands, ab dem die Maximaltemperatur des Bentonits nicht mehr von den Behältern der umliegenden Bohrlöcher beeinflusst wird. Daher wirkt sich eine Vergrößerung des Bohrlochabstands über diesen Grenzwert hinaus nicht mehr auf eine weitere Verringerung der Maximaltemperatur des Bentonits aus. Ein Wirtsgestein mit geringerer Wärmeleitfähigkeit weist einen geringeren Grenzwert des Bohrlochabstands auf als ein Wirtsgestein mit höherer Wärmeleitfähigkeit.

keit. Auf der Basis der zu Grunde liegenden Konfiguration zeigt sich bei den hier untersuchten Varianten des Wirtsgesteins, dass ein Bohrlochabstand von mehr als 36 m nur noch einen geringen Einfluss mehr auf die Maximaltemperatur hat. So beträgt z. B. die Maximaltemperatur des Bentonits im Referenzfall 98,9 °C, bei 36 m Bohrlochabstand 96,7 °C und bei beliebig großem Bohrlochabstand rechnerisch 96,1 °C. Wird darüber hinaus berücksichtigt, dass der Mindestabstand aus bergmännischen Anforderungen auf 29 m festgelegt ist, wird deutlich, dass die Variation des Bohrlochabstands nur einen geringen Beitrag zur Temperatursenkung leisten kann.

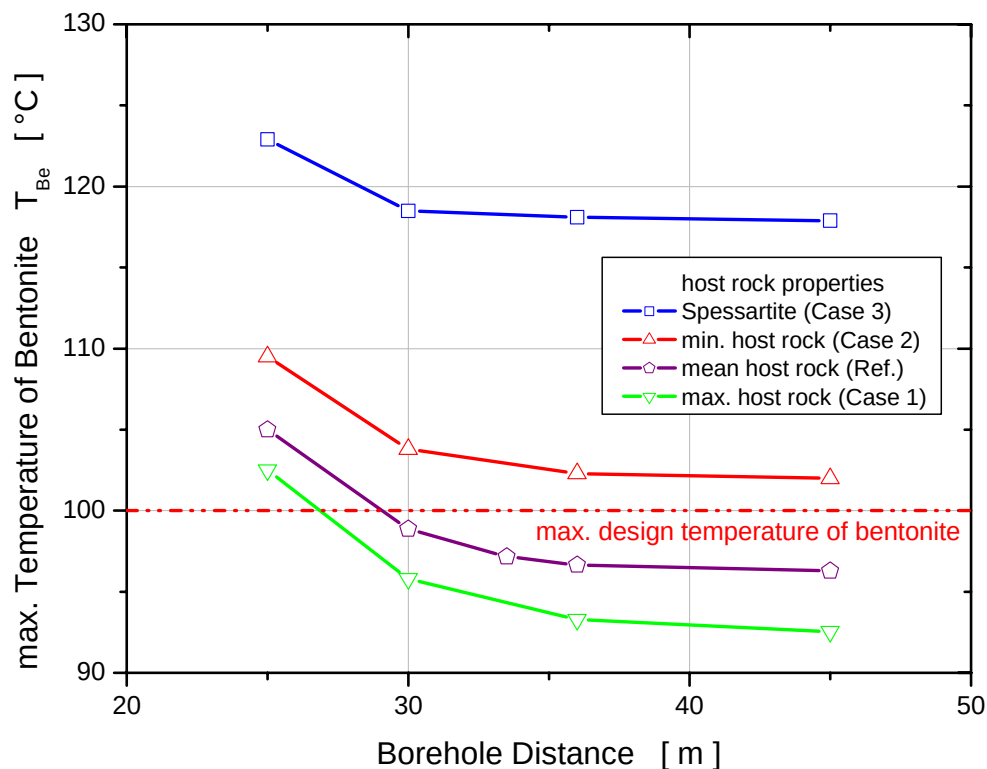


Abbildung 3-27: Einfluss des Bohrlochabstands bei unterschiedlichen Materialparametern des Wirtsgesteins auf die Maximaltemperatur des Bentonits

Im folgenden wird der Einfluss des Wirtsgesteins bei optimaler Feldauslegung untersucht. Ausgangspunkt sind die Ergebnisse der verbesserten Feldauslegung der Parametervariation sowie die Ausnutzung der Auslegungstemperatur des Bentonits von 100 °C. Bei 6 Behältern je Bohrloch und dem Referenzwirtsgestein beträgt der erforderliche Bohrlochabstand etwa 28,4 m, Abbildung 3-27. Die 4.350 angenommenen Behälter erfordern bei diesem Füllfaktor 725 Bohrlöcher für ihre Endlagerung, so dass sich die nominale Größe des Einlagerungsfeldes, das ist die Größe des reinen Bohrlochfeldes bei hexagonaler Anordnung, zu 0,51 km² ergibt, Abbildung 3-28. Bei einem Wirtsgestein entsprechend Variation 1 beträgt der Bohrlochabstand 26,3 m bzw. die nominale Feldgröße 0,43 km², bei einem Wirtsgestein entsprechend Variation 2 oder 3 kann allein durch die Veränderung des Bohrlochabstands das Temperaturkriterium nicht eingehalten werden. Wird der minimale Bohrlochabstand von 29 m berücksichtigt, zeigt sich, dass die beiden erfolgreichen Varianten unterhalb dieses Mindestmaßes liegen. Die tatsächlich realisierbare nominale Feldgröße auf der Basis des minimale Bohrlochabstands beträgt daher 0,53 km².

Wird die Behälteranzahl je Bohrloch von 6 auf 5 verringert, ergibt sich entsprechend der Parametervariation eine Temperaturverringerung von etwa 6 K. Das Auslegungstemperatur des Bentonits kann daher zusätzlich mit Variante 2 erfüllt werden, jedoch nicht mit Variante 3,

Abbildung 3-28. Die Ergebnisse der weiteren Variationen der Behälteranzahl je Bohrloch sind in der Abbildung mit dargestellt.

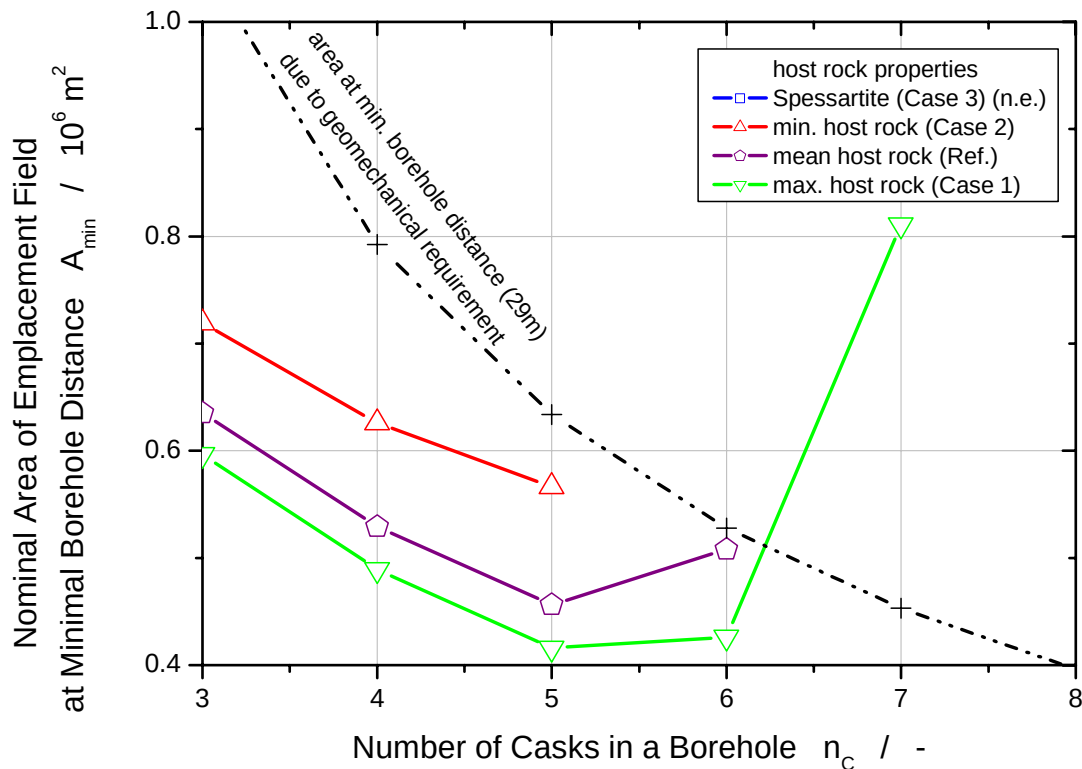


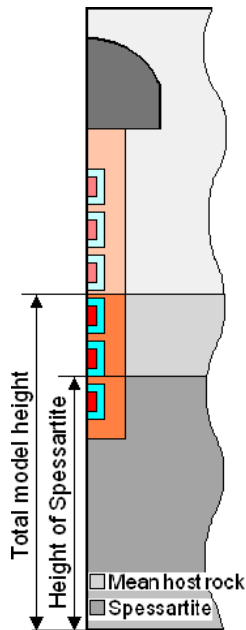
Abbildung 3-28: Nominaler Flächenbedarf des Einlagerungsfelds in Abhängigkeit von der Behälteranzahl

Wird die verbesserte Feldauslegung zu Grunde gelegt, ergibt sich die geringste nominale Feldgröße bei 6 Behältern. Dazu ist ein Wirtsgestein entsprechend dem Referenzmaterial oder der Variante 1 erforderlich. Die nominal erforderliche Feldgröße wird allerdings durch den geomechanisch erforderlichen Bohrlochabstand bestimmt und beträgt $0,53 \text{ km}^2$. Da der geomechanisch erforderliche Bohrlochabstand auch bei geringerer Behälteranzahl limitierend ist, nimmt die Feldgröße durch die zunehmende Bohrlochanzahl zu. Der Vorteil einer größeren Behälteranzahl je Bohrloch im Fall des Wirtsgesteins der Variante 1 wird durch den thermisch bedingten Bohrlochabstand aufgehoben. Eine Einlagerung von 7 und mehr Behältern je Bohrloch erfordert die Vergrößerung der Zwischenschichtdicke bzw. Bentonit mit weiter verbesserter Wärmeleitfähigkeit.

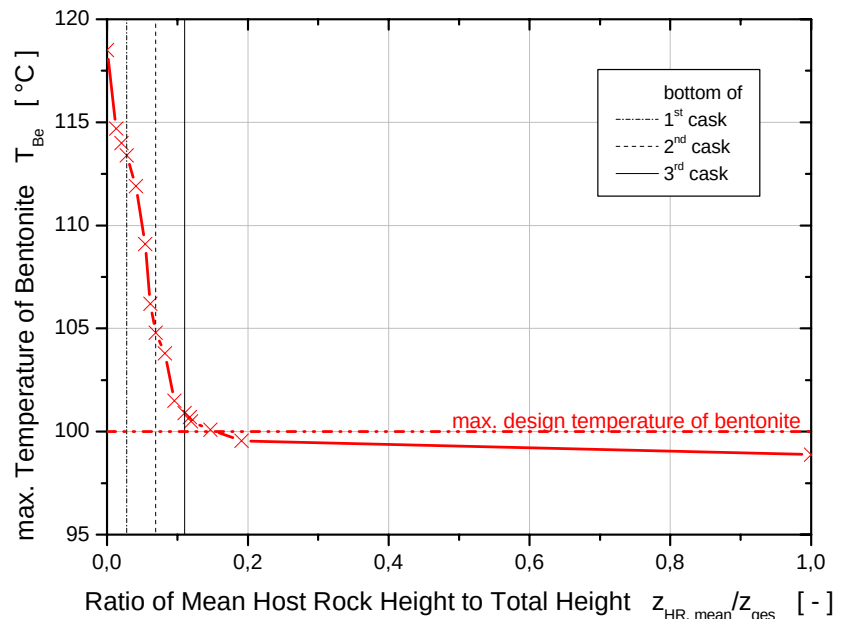
Abschließend wird der Einfluss eines heterogen geschichteten Wirtsgesteins untersucht, wobei angenommen wird, dass im oberen Teil ein Materialverhalten wie im Referenzfall vorliegt, während im unteren Teil ein Materialverhalten wie Spessartit angenommen wird. Als Maß für die Variation wird das Verhältnis zwischen der Höhe des Referenzmaterials und der Gesamthöhe des Modells, die 68 m beträgt, verwendet. Die Werte, bei denen der Spessartit den jeweiligen Behälterfuß erreicht, sind in Abbildung 3-29 besonders gekennzeichnet. Im Fall der heterogenen Schichtung tritt die Maximaltemperatur nicht in jedem Fall im zentrumsnächsten Behälter auf, sondern es sind alle drei Behälter zu betrachten. Der wesentliche Anstieg in der Maximaltemperatur des Bentonits wird erst erzielt, wenn die Behälter dicht an den Spessartit heranreichen (Abbildung 3-29). Im Bereich der aktiven Bohrlochlänge ändert sich die Maximaltemperatur nahezu konstant mit dem Anteil des Spessartits am Wirtsgestein. Qualitativ

entspricht der Einfluss des Spessartits auf die Maximaltemperatur des verglasten Abfalls dem des in Abbildung 3-29 dargestellten Verlaufs.

a.)



b.)



a.) Schema für das Berechnungsmodell

b.) Maximaltemperatur des Bentonits

Abbildung 3-29: Einfluss eines horizontal mit Referenzmaterial oben und Spessartit unten geschichteten Wirtsgesteins

Im Rahmen der Vorauslegung sind eine Fülle an Berechnungen durchgeführt worden. Diese Vielzahl an Berechnungen und der erhebliche numerische Aufwand konnte nur zu Lasten der räumlichen und zeitliche Diskretisierung erbracht werden. Vergleichsrechnungen mit verfeinerter Diskretisierung zeigen, dass die Ergebnisse im Rahmen der Modellannahmen eine geringe Ungenauigkeit im Hinblick auf die maximale Temperaturänderung in den Auslegungspunkten aufweisen. Diese Ungenauigkeit wird vor dem Hintergrund der Unbestimmtheit der Materialparameter als ausreichend angesehen.

3.3.3 Anforderungen an die technische Barriere aus thermischer Sicht

Neben den thermischen Schutzziele existieren weitere Schutzziele, die sich aus gebirgsmechanischen, radiologischen, chemischen und weiteren Aspekten ergeben. Diese Schutzziele mit den sich daraus ergebenden Anforderungen sind jedoch nicht Gegenstand dieser Untersuchung. Daher existieren für die technische Barriere weitere als die im folgenden genannten Anforderungen.

Im Rahmen der hier betrachteten Berechnungsergebnisse besteht die technischen Barriere aus dem verglasten Abfall, dem eigentlichen Behälter, der Zwischenschicht sowie dem Bentonit. Für diese Materialien werden im folgenden die aus thermischer Sicht wesentlichen Anforderungen beschrieben.

Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit des verglasten Abfalls wirken sich im wesentlichen auf die Maximaltemperatur des verglasten Abfalls selbst aus. Bei diesem Auslegungskriterium besteht ein genügend großer Spielraum bis zum Erreichen der zulässigen Maximaltemperatur, so dass sich keine thermisch veranlassten Bedingungen für den verglasten Abfall ergeben.

Für das Behältermaterial ergeben sich ebenfalls keine thermisch veranlassten Bedingungen, solange für die Einlagerung von dünnwandigen, metallischen Behältern ausgegangen wird. Die Wärmeleitfähigkeit des Behälters liegt eine Größenordnung und mehr über der Wärmeleitfähigkeit der übrigen vorhandenen Materialien, die Wärmekapazität ist bei der Dünnwandigkeit des Behälters vernachlässigbar.

Durch die Materialstärke der Zwischenschicht wird sowohl die Maximaltemperatur der Einlagerungsbehälter und die des darin enthaltenen verglasten Abfalls beeinflusst als auch die Maximaltemperatur des Bentonits. Die Wärmeleitfähigkeit der Zwischenschicht ist die wesentliche Einflussgröße für die Maximaltemperatur des Einlagerungsbehälters und des Abfalls. Selbst bei einer gegenüber dem Referenzfall verringerten Wärmeleitfähigkeit von etwa $0,3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, wie sie sich z. B. durch die Verwendung von trockenem Sand ergibt, besteht ein genügend großer Spielraum im Hinblick auf das Auslegungskriterium des verglasten Abfalls von 500°C . Bei weiter verringerter Wärmeleitfähigkeit der Zwischenschicht steigt die Maximaltemperatur von Behälter und Abfall weiter an und führt bei einer Wärmeleitfähigkeit von unter $0,2 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ letztendlich zum Überschreiten des Temperaturkriteriums im verglasten Abfall, so dass Materialien mit diesen Eigenschaften nicht einsetzbar sind. Unter der Annahme einer möglichen Zeitstandfestigkeit der Behälter lässt sich für die Zwischenschicht zusammenfassend feststellen, dass die Wärmeleitfähigkeit unabhängig von den übrigen Auslegungsgrößen größer als etwa $0,3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ sein sollte.

Von den Eigenschaften des Bentonits wirkt sich in erster Linie dessen Wärmeleitfähigkeit auf die Maximaltemperatur des Bentonits selbst aus. Die Dicke des Bentonits hat einen untergeordneten Einfluss auf das Auslegungskriterium des Bentonits. Weitere wesentliche Einflussgrößen sind die Wärmeleitfähigkeit des Wirtsgesteins, der Behälterabstand im Bohrloch, die Dicke der Zwischenschicht und der Bohrlochabstand. Mit Ausnahme der Wärmeleitfähigkeit des Wirtsgesteins handelt es sich bei den übrigen drei Größen um geometrische Größen. Im Hinblick auf das Auslegungskriterium und die bestehende Verbesserung im Auslegungskonzept ist wegen des gegenseitigen Einflusses aller Einflussgrößen die genaue Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit des Bentonits besonders wichtig, insbesondere gilt dieses unter dem Aspekt einer durch Graphit erhöhten Wärmeleitfähigkeit. Auf Grund dieser gegenseitigen Beeinflussung lässt sich eine Erhöhung in der Wärmeleitfähigkeit des Bentonits zur Verringerung der geometrischen Größen ausnutzen.

3.3.4 Zusammenfassung der thermischen Auslegung

Die Einlagerung von 6 Behältern je 18 m-Bohrloch der Cs/Sr-Abfallfraktionen ist unter Einhaltung des Temperaturkriteriums des verglasten Abfalls und des Temperaturkriteriums des Bentonits möglich. Der Behälterabstand beträgt 1,8 m und der Bohrlochdurchmesser 1,75 m, wobei die Zwischenschichtdicke 0,25 m beträgt und die Bentonitschichtdicke 0,4 m.

Die thermische Auslegung wird bei gegebener Wärmefreisetzung in erster Linie durch das Bentonit-Temperaturkriterium bestimmt. Im Hinblick auf eine Verbesserung der Endlagerauslegung sind das Wirtsgestein, die Behälteranzahl, die Wärmeleitfähigkeit des Bentonits, die Wandstärke der Zwischenschicht und der Bohrlochabstand die wesentlichen Einflussgrößen. Bei gegebenem Wirtsgestein stellt die genaue Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit des Bentonits die wesentliche Materialkenngröße für eine Verbesserung des Einlagerungskonzeptes dar.

Die Wirkrichtung der einzelnen Einflussgrößen ist im Hinblick auf die jeweiligen thermischen Auslegungskriterien bei allen Einflussgrößen identisch. Eine Ausnahme bildet lediglich die Wandstärke der Zwischenschicht, bei der eine Vergrößerung der Wandstärke zu einer Temperaturerhöhung im Behälter führt, im Bentonit jedoch zu einer Verringerung.

Das Einlagerungskonzept ist standortspezifisch anzupassen. Aus thermischer Sicht ist dazu in erster Linie die Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit des Wirtsgesteins unter endlagerrelevanten

Bedingungen von Bedeutung. Insbesondere gilt dies für das Wirtsgestein im Nahfeld des Einlagerungsortes. So ist die unmittelbare Einlagerung in gering wärmeleitendes Wirtsgestein, wie es z. B. Spessartit darstellt, zu vermeiden, soll die zur Endlagerung erforderliche Feldgröße möglichst klein bleiben. Generell ist die Einlagerung in Wirtsgesteine mit guter bis sehr guter Wärmeleitfähigkeit zu bevorzugen.

Für Wirtsgesteine auf der Basis von Gneis und Granit stellt die Einlagerung von 6 Behältern je 18 m-Bohrloch bei den gewählten Geometrie- und Materialgrößen das Optimum der Feldgröße dar. Die Feldgröße wird dabei jedoch nicht durch die thermischen Anforderungen bestimmt, sondern durch den geomechanisch erforderlichen Streckenmindestabstand. Eine weitergehende Verringerung der Feldgröße erfordert neben dem Bohrlochabstand die Veränderung weiterer Geometrie- und Materialgrößen.

Als Mindestwert für die Wärmeleitfähigkeit der Zwischenschicht wird ein Wert von $0,3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ angesehen. Bei gegebenem Standort ist die Wärmeleitfähigkeit des Bentonits für eine wirtschaftliche Auslegung des Einlagerungsfelds die wesentliche, frei wählbare Materialkenngröße. Da mit einem möglichen Graphitzusatz ein erhebliches Potenzial für Veränderungen in der Auslegung besteht, ist die genaue Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit des Bentonits von besonderer Bedeutung.

Eine weitere Größe, die bei zukünftigen Arbeiten mit untersucht werden sollte, stellt die Bohrlochlänge dar. Sowohl die Maximaltemperatur des verglasten Abfalls wie auch die des Behälters lässt sich wesentlich durch die Materialwahl der Zwischenschicht beeinflussen ohne dass sich daraus Folgen für die Auslegung des Bentonits ergeben würden.

3.4 Standzeit der Behälter für wärmeentwickelnde Abfälle

3.4.1 Grundlagen

Das Barrierenkonzept für die wärmeentwickelnden Abfälle der Fraktion Cs-Sr sieht entsprechend den internationalen Anforderungen an geologische Endlager für radioaktive Abfälle folgende technische Barrieren vor:

- Abfallmatrix aus Borsilikatglas oder keramischen Werkstoff
- Abfallbehälter
- Bentonitumhüllung

Abbildung 3-30 zeigt ein Schema des technischen Barrierenkonzepts für die Endlagerung der Cs-Sr Abfälle.

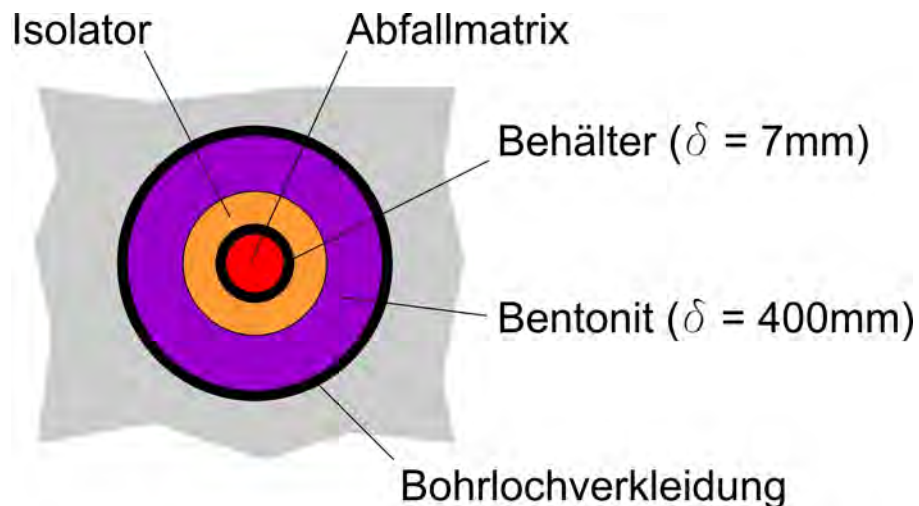


Abbildung 3-30: Technisches Barrierenkonzept Cs-Sr Abfälle

Die auf der Abb. 3-30 gezeigte Isolatorschicht stellt aufgrund ihrer Porosität keine Barriere dar. Des weiteren wird die metallische Bohrlochverkleidung bei der Sicherheitsbewertung nicht als eine Barriere berücksichtigt.

Der Abfallbehälter hat in diesem Barrierenkonzept die Funktion, einen sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle über einen langen Zeitraum zu gewährleisten und den Zutritt von Wasser zu der Abfallmatrix, als die Voraussetzung für eine Mobilisierung der eingeschlossenen Radionuklide, auszuschließen.

Die Aktivität und Wärmeabgabe der Behälter mit Abfällen der Fraktion Cs-Sr werden von dem hohen Anteil der Radionuklide ^{137}Cs und ^{90}Sr bestimmt. Diese Radionuklide sind aufgrund ihrer kurzen Halbwertszeit von 30,1 und 28,8 Jahren nach 300 - 500 Jahren weitestgehend zerfallen und sind für eine thermische Beeinflussung der Bentonitbarriere und der geologischen Barriere sowie für die Langzeitsicherheit nicht mehr relevant. Das bedeutet, dass die Behälter einen sicheren Einschluss dieser Abfälle über einen Zeitraum von ca. 500 Jahren gewährleisten müssen.

Die thermischen Berechnungen (Kap. 3.3.4) haben gezeigt, dass bei der angenommenen Endlagerkonzeption eine Temperatur des Behältermantels von maximal. 230 °C erreicht wird, die nach kurzer Zeit (ca. 3-5 Jahren) rasch abfällt. Demzufolge ist für eine Standzeitbewertung der Behälter nur ein relativ kurzer Zeitraum einer hohen thermischen Belastung zu berücksichtigen.

3.4.2 Behälterkorrosion

Nach den Angaben [VNIPI PT 2002] sind für die Endlagerung der verglasten Abfälle der Cs-Sr Fraktion Behälter aus nichtrostendem Stahl mit einer Wandstärke von 7 mm vorgesehen.

Die Korrosionsrate der Austenitstahlbehälter wird wie folgt angegeben [VNIPI PT, 2002]:

- Bei 150 °C und in Wasserdampfatosphäre – 2×10^{-3} mm/a
- Bei 75 °C im Kontakt mit Bentonit – 1×10^{-3} mm/a

Die Materialmarke ist nicht bekannt.

In der russischen Atomindustrie werden als nichtrostendes Material Stähle der Marken 08Ch18N10T (russische Bezeichnung 08X18H10T, W.Nr. 1.4541) sowie 12Ch18N10T (rus-

sische Bezeichnung 12X18H10T) nach GOST 5632-72 verbreitet eingesetzt. Deshalb werden für eine Bewertung der Korrosionsrate der Behälter die o. g. genannte Materiale zugrunde gelegt.

Die chemische Zusammensetzung dieser Stähle ist wie folgt:

Stahlmarke	Zusammensetzung Gew. %, max.							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Ti
08Ch18N10T	0,08	0,8	2	17-19	9-11	0,02	0,035	Min. 5xC Max. 0,7
12Ch18N10T	0,12	0,8	2	17-19	9-11	0,2	0,035	Min. 5xC Max 0,8

Tabelle 3-6: Chemische Zusammensetzung der Stähle 08Ch18N10T und 12Ch18N10T nach GOST 5632-72

Das Korrosionsverhalten von Materialien für Container für die Endlagerung radioaktiver Abfälle wird weltweit intensiv untersucht.

In Belgien wurden verschiedene Materialien sowohl in situ als auch in Labors getestet [Kursten et al. 2001], [ONDRA 2001], [Smailos et al. 1997]. Im Untertagelabor in Boom-Ton wurden u. a. Kohlenstoffstähle, rostfrei Stähle, Titan- und Nickellegierungen bei Temperaturen 16°C, 90°C und 170°C getestet. Die chemische Zusammensetzung einiger dieser Stähle ist in Tabelle 3-7 aufgeführt.

Marke	Bezeichnung	Zusammensetzung Gew. %								
		Cr	Ni	Mn	Si	C	Ti	Mo	Cu	S
AISI 309	Nichtrostender Austenitstahl	23	13	2	1	0.2				<0,03
AISI	Nichtrostender Ferritstahl	16,5			0,37	<0,08				<0,03
DIN 1-4571	Nichtrostender Austenitstahl mit Ti	16-18	10-14				1	2-3		
1803 MoT	Nichtrostender Ferritstahl	18	0,28				0,36	2		
UHB 904L	Nichtrostender Austenitstahl	18,7	26,3	1,1		0,02		4,5	0,12	<0,035
AISI 316	Nichtrostender Austenitstahl	17,8	10,8	1,6	0,6	<0,08		2,1		
AISI 316L	Nichtrostender Austenitstahl	16,9	11,0	1,54	0,54	0,017		2,08		0,001
AISI 316hMo	Nichtrostender Austenitstahl	17,6	12,5	1,16	0,61	0,015		2,84		0,001
AISI 316Ti	Nichtrostender Austenitstahl	16,8	10,7	1,08		0,044	0,3	2,05		0,009

Tabelle 3-7: Chemische Zusammensetzung in Belgien untersuchter Stähle für Endlagercontainer

Die Testbedingungen waren prinzipiell folgende [Cornelius et al. 1993]

- Direkter Kontakt des Materials mit Boom-Ton,
- Kontakt mit einer Atmosphäre im Gleichgewicht mit dem Boom-Ton,
- Kontakt mit einer Atmosphäre im Gleichgewicht mit Beton im Kontakt mit Boom-Ton.

Die Dauer der Experimente betrug zwischen zwei und sieben Jahren.

Im Ergebnis der Experimente wurden für die Proben aus rostfreiem Stahl folgende grundsätzliche Aussagen getroffen [ONDRA, 2001]:

- Bei den In-situ Versuchen zeigten alle Proben bei den unterschiedlichen Versuchsanordnungen, Temperaturen und Vorbereitung der Proben keinerlei Korrosionsspuren oder messbare Gewichtsverluste.
- Bezüglich des Stahles AISI 316 wurde weiterhin festgestellt, dass dieser Stahl bei Testtemperaturen im Bereich 16°C bis 90°C und einem Cl⁻-Gehalt von 16 ppm (natürlicher Gehalt im Boom-Ton) resistent gegenüber Korrosion ist [Smailos et al. 1997]. Bei hohem Cl⁻-Gehalt von 1000 ppm bzw. 10000 ppm ist dieser Stahl anfällig gegenüber Loch- und Spaltkorrosion.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Backfill and Material Behaviour in Underground Salt Repositories“ wurden Langzeitversuche zur Korrosion von Materialien für Endlagerbehälter über einen Zeitraum von mehr als zehn Jahren bei Temperaturen von 90°C und 180°C durchgeführt [Bechthold et al., 2003]. Tabelle 3-8 zeigt die chemische Zusammensetzung der untersuchten Cr-Ni-Stähle.

Material	Zusammensetzung				
	Gew. %				
	Cr	Ni	C	Si	Mn
Cr-Ni Stahl 1.4306	18,3	11,8	0,01	0,9	1,9
Cr-Ni Stahl 1.4833	22,4	14,3	0,04	0,8	1,8

Tabelle 3-8: TSDE-Projekt – untersuchte Cr-Ni Stähle [Bechthold et al., 2003]

Im Ergebnis der in situ Untersuchungen in Steinsalz bei 90°C (Wasserkorrosion) und 180°C (Dampfkorrosion) wurde festgestellt, dass nach 3740 Tagen die mittlere allgemeine Korrosionsrate der Stähle bei beiden Temperaturen äußerst gering ist (0,02 – 0,98 µm/a) und lediglich der Stahl 1.4833 eine geringfügige Lochkorrosion bis max. 50 µm/a aufweist (s. Tabelle 3-9)

	Cr-Ni Stahl 1.4306		Cr-Ni Stahl 1.4833	
	90°C	180°C	90°C	180°C
Mittlere Korrosionsrate, µm/a	0,98 ± 0,90	0,03 ± 0,001	0,30 ± 0,20	0,02 ± 0,001
Lochkorrosion, µm	100	-	50	20

Tabelle 3-9: TSDE-Projekt – Korrosionsraten von Cr-Ni-Stählen

3.4.3 Bewertung der mittleren Behälterstandzeit

Entsprechend Kap. 3.4.2 kann festgestellt werden, dass Langzeituntersuchungen von Cr-Ni Stählen unter in-situ Bedingungen gezeigt haben, dass diese Stähle nur eine sehr geringe Neigung zur Korrosion aufweisen.

Die von VNIPI PT angegebenen Korrosionsraten für das Behältermaterial der Container mit Abfällen Cs-Sr

- bei 150 °C und in Wasserdampfatosphäre – 2 µm/a
- bei 75 °C im Kontakt mit Bentonit – 1 µm/a

liegen in der Größenordnung der in Kap. 3.4.2 aufgeführten Korrosionsraten vergleichbarer Cr-Ni Stähle von 0,02 bis 0,98 µm/a und können für die Bewertung der Standfestigkeit der Cs-Sr Behälter genutzt werden. Demnach beträgt die mittlere Lebensdauer dieser Behälter bezüglich der Korrosion ca. 3500 Jahre.

Wenn eine Lochkorrosion in der Größenordnung wie in Tabelle 3-9 aufgeführt für die Cs-Sr Behälter angenommen wird, kann festgestellt werden, dass die Lochkorrosion im Vergleich zur Oberflächenkorrosion nicht relevant ist.

3.5 Technisches Endlagerkonzept

Auf der Grundlage der Startkonfiguration des Endlagers und entsprechend den Ergebnissen der thermischen Auslegungsberechnungen wurde das nachfolgend beschriebene Endlagerkonzept entwickelt, das den sicherheitsanalytischen Berechnungen zu Grunde gelegt wurde.

3.5.1 Bohrlochlagerung der Fraktion Cs/Sr

Entsprechend dem in Kap. 1 aufgeführten Inventar sind insgesamt 4350 Behälter mit den in Abb. 3-1 aufgeführten Abmessungen einzulagern. Die Einlagerung erfolgt in vertikalen Bohrlöchern mit einem Durchmesser von 1,75 mm, wobei je Bohrloch sechs Abfallbehälter eingebracht werden. Die Behälter werden mit einer 25 cm starken Schicht aus einem wärmeisolierenden Material umgeben und in einem Abstand von 1,80 m von einander angeordnet. Der Ringspalt zwischen dem Isoliermaterial und der Bohrlochwand wird mit Bentonit verfüllt.

Unter Berücksichtigung der Bentonitbodenplatte mit einer Stärke von ca. 0,5 m und dem Bohrlochstopfen mit einer Stärke von 2,00 mm ergibt sich eine Bohrlochtiefe von 18 m. Die Über- und Unterfahrungsstrecke entsprechen den auf Abb. 3-2 und Abb. 3-3 gezeigten. Abb. 3-31 zeigt eine Gesamtübersicht der Bohrlochlagerung.

Die erforderlichen Größe des Endlagerfeldes wurde wie folgt bestimmt:

Der Abstand zwischen den Bohrlöchern beträgt entsprechend den thermischen Auslegungsberechnungen 30 m. Bei der gewählten hexagonalen Anordnung der Bohrlöcher ergibt sich ein Abstand zwischen den Achsen der Einlagerungsstrecken von ca. 26 m. Für die insgesamt 4350 endzulagernden Behälter sind insgesamt 725 Bohrlöcher erforderlich. Bei einer gewählten Streckenlänge von ca. 300 m können unter Berücksichtigung eines Streckenverschlusses jeweils 9 Bohrlöcher pro Strecke angeordnet werden. Damit sind ca. 81 Einlagerungsstrecken erforderlich. Abb. 3-32 zeigt die schematische Anordnung der Einlagerungsstrecken, aufgeteilt in vier Einlagerungsfelder. Bei der gewählten Anordnung ergibt sich eine Gesamtgröße des erforderlichen Endlagerbereiches für die Cs/Sr-Abfälle von 606 m x 1160 m, was einer Fläche von ca. 0,7 km² entspricht.

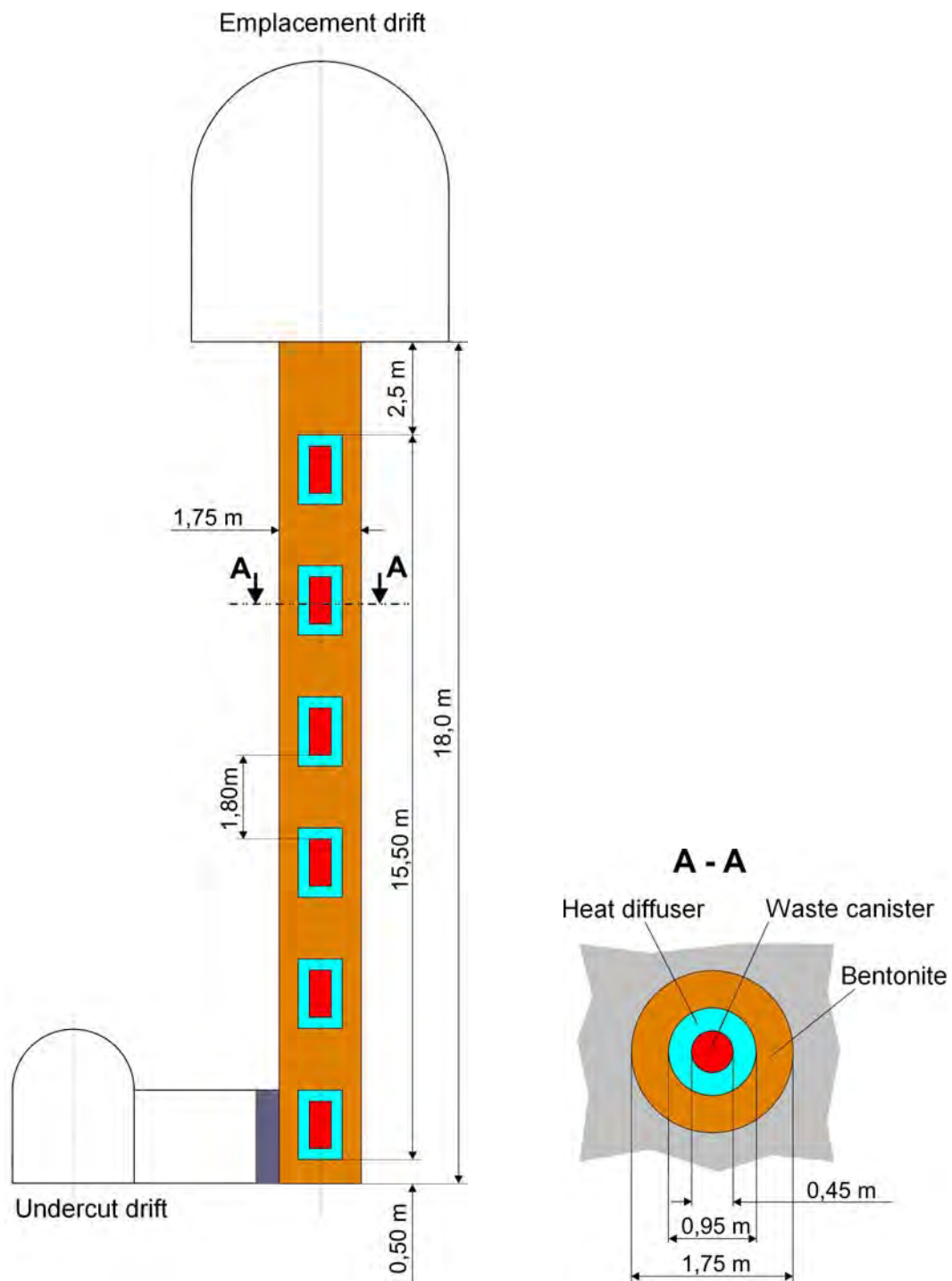


Abbildung 3-31: Gesamtübersicht Bohrlochlagerung

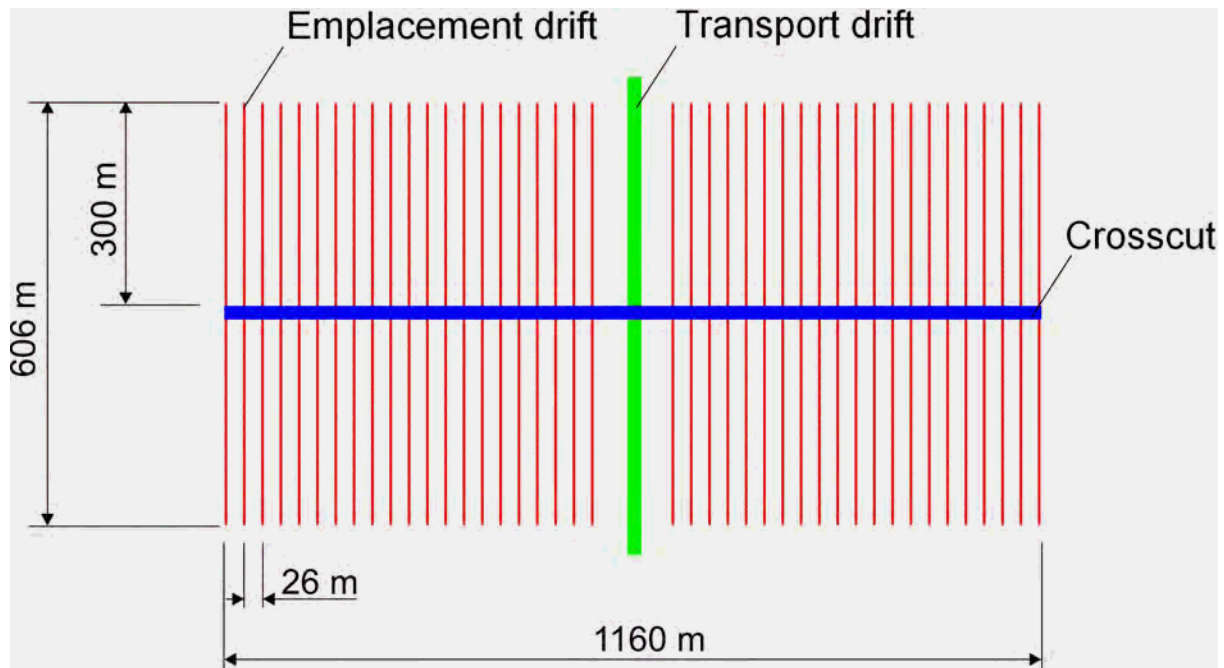


Abbildung 3-32: Bohrlochlagerungsfeld Cs/Sr-Fraktion

3.5.2 Streckenlagerung der schwach wärmeentwickelnden Abfälle

Die in Kap. 3.2.2 dargelegt Grundkonzeption der Streckenlagerung wurde beibehalten, wobei eine Einlagerung der drei unterschiedlichen Fraktionen in getrennten Endlagerstrecken vorgesehen wurde. Unter diesen Bedingungen ergibt sich eine Gesamtgröße des Einlagerungsfeldes für schwach wärmeentwickelnde Abfälle von 130 m x 75 m (Abb. 3-33).

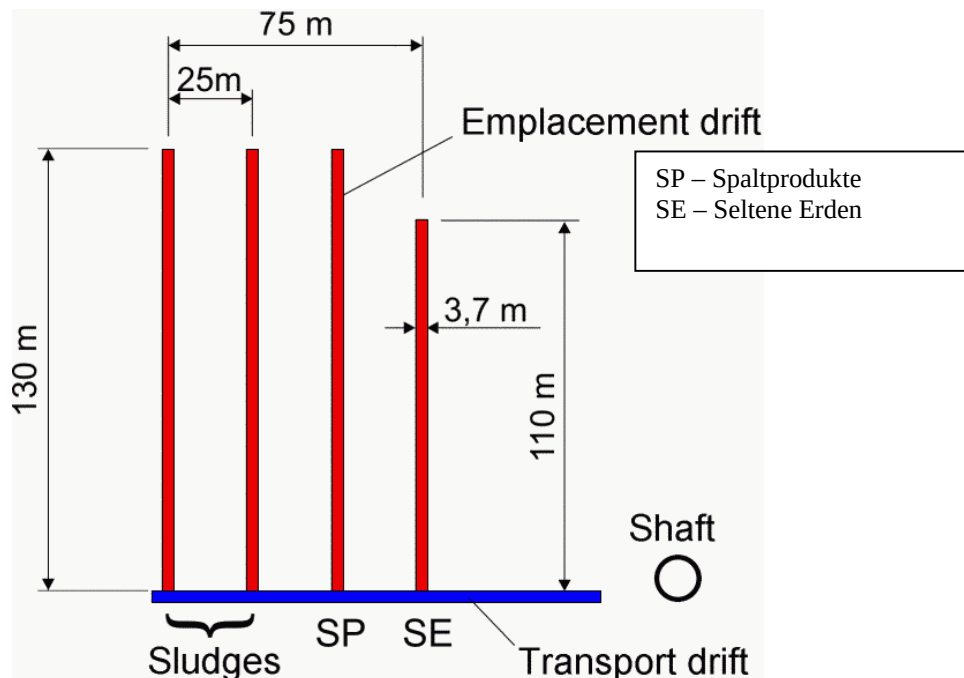


Abbildung 3-33: Streckenlagerungsfeld schwach wärmeentwickelnder Abfälle

3.6 Bewertung der für die Endlagerkonzeption vorhandenen Ausgangsdaten

Das im Kap. 3.5 beschriebene Endlagerkonzept wird maßgeblich durch die Endlagerung der stark wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle der Fraktion Cs-Sr bestimmt.

Die Entwicklung eines geeigneten Konzeptes zur Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle fußt sinnvoller Weise auf vorlaufenden Auslegungsberechnungen. Diese Berechnungen simulieren das thermo-mechanische Verhalten eines Endlagers sowie der gewählten Gebirgsformation unter dem Einfluss der durch die Abfälle eingebrachte Wärmemenge. Auf Basis dieser Berechnungen kann ein Endlagerkonzept, insbesondere hinsichtlich seiner geometrischen Bedingungen, derartig gestaltet werden, dass sicherheitstechnische Grenzwerte nicht überschritten werden.

Voraussetzung einer jeden Auslegungsberechnung ist eine geeignete Datengrundlage, ohne die belastbare Aussagen nicht zu erzielen sind. Diese grundlegenden Daten werden zunächst in einem sogenannten *konzeptuellen Modell* zusammengestellt.

Das *konzeptuelle Modell* lässt sich in fünf Teilbereiche unterteilen:

- Einzulagernde Behälter
- Geologische Situation
- Thermische Umgebungsbedingungen
- Thermophysikalische Parameter des Wirtsgesteins
- Thermophysikalische Parameter der technischen Barriere

Notwendigen Angaben über die einzulagernden Behälter sind das Abfallinventar, die Abfallmatrix, das Behältermaterial und seine geometrischen Abmessungen und insbesondere die Wärmeleistung eines einzelnen Behälters bzw. seines Inventars als Funktion der Zeit. Alle diese Angaben sind in Kapitel 1 ausführlich beschrieben. Die Daten lagen zu Beginn der Arbeiten vollständig und in für die Modellierungsaufgaben geeigneter Form und Qualität vor.

Für das im Kap. 3 beschriebene Endlagerkonzept wurde eine Teufe zwischen 650 bis 668 m angenommen. Die Annahme dieser Teufe beruht auf den geologischen Schnitt der Bohrung 1K-700 am Standort Kamennyj (s. Abb. 2-3), der in der genannten Teufe eine für die Errichtung eines Endlagers ausreichende Mächtigkeit einer weitestgehend homogenen Gesteinschicht ohne Wasserzuflüsse vermuten lässt. Dieser Standort und die genannte Endlagerteufe liegen den thermischen Auslegungsberechnungen zugrunde. Das bedeutet, dass bei einer Änderung des Standortes, die mit Veränderungen der thermischen Parameter des Wirtsgesteins verbunden ist, erneute thermischen Berechnungen erforderlich sind, die zu einer Veränderung der Endlagerauslegung führen können.

Die geologischen Situation des Standortes Kamennyj ist in Kapitel 2 beschrieben. Die erforderlichen Angaben zur Topographie und lithologischen Differenzierung, insbesondere im o. g. potenziellen Teufenbereich der zu planenden untertägigen Anlagen, lagen für den Zweck der Modellierung in ausreichender Form vor.

Die natürliche Gebirgstemperatur bestimmt die im Rahmen der thermischen Auslegung zulässige Temperaturerhöhung in der Behälterumgebung durch deren Wärmefreisetzung. Temperaturinformationen lagen aus den Bohrungen 1-K und 1-I vor. In beiden Bohrungen wurden kontinuierliche Temperaturlogs gefahren, die in Kapitel 2.7.4 dargestellt sind. Es lagen keine Angaben zur Stillstandszeit der Bohrungen nach Beendigung des Bohrvorganges vor. Das natürliche Temperaturfeld in der Umgebung der Bohrung wird durch den Spülvorgang während des Bohrens signifikant gestört. Der Wiederangleich an das natürliche Temperaturfeld kann, insbesondere bei tiefen Bohrungen durchaus mehrere Jahre dauern. Der Temperaturgradient der Bohrung 1-K, der sich aus dem Temperaturlog errechnet, liegt mit etwa 37 K/km in einer Größenordnung, die vermuten lässt, dass die Temperaturmessung nicht im unmittelba-

ren Anschluss an den Bohrvorgang durchgeführt wurde. Eine genaue Beurteilung, ob durch diese Messung die natürliche Gebirgstemperatur wiedergespiegelt wird, konnte nicht erfolgen, ebenso wenig eine entsprechende Abschätzung der sich daraus ergebenden Unsicherheiten.

Die zur Modellierung notwendigen thermischen Gesteinsparameter Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Dichte lagen für die relevanten lithologischen Einheiten anhand von Mittelwerten aus Messungen an Bohrkernmaterial inklusive Angaben zur Streuung in guter Qualität vor. Die Messungen an den einzelnen Proben wurden für drei verschiedene Temperaturen (18, 100 und 200°C) durchgeführt, so dass auch die Abhängigkeit der thermischen Gesteinsparameter von der Temperatur, die durch die Einlagerung ja signifikant beeinflusst wird, im Modell Berücksichtigung finden konnte.

Bezüglich der technischen Barrieren sind Angaben über die thermischen Eigenschaften der Abfallmatrix (in erster Linie des Borosilikatglases), des Behältermaterials, der Zwischenschicht und der Bentonitumhüllung erforderlich.

Die thermischen Eigenschaften von Borosilikatglas lagen aus der Literatur in Abhängigkeit von der Temperatur in guter Qualität vor, ebenso wie die von austenitischem Stahl. Der isolierenden Zwischenschicht zur Reduzierung der Temperaturbelastung des Bentonit wurden Eigenschaften von Sand mit entsprechender Streubreite zugewiesen, die ebenfalls der Literatur entnommen werden konnten.

Die thermischen Eigenschaften von Bentonit lagen zumindest für Na-Bentonit aus Literaturdaten und eigenen Labormessungen der DBE TECHNOLOGY in guter Qualität vor. Von den Eigenschaften des Bentonits wirkt sich in erster Linie dessen Wärmeleitfähigkeit auf die Maximaltemperatur des Bentonits selbst aus (s. Kap. 3.3.2.4). Es hat sich gezeigt, dass im Hinblick auf das Auslegungskriterium die genaue Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit des Bentonits besonders wichtig ist, insbesondere gilt dies unter dem Aspekt einer durch Graphit (oder einem ähnlich hoch leitfähigen Material) erhöhten Wärmeleitfähigkeit. Eine Erhöhung in der Wärmeleitfähigkeit des Bentonits kann zur Verringerung der geometrischen Größen des Endlagerkonzeptes ausgenutzt werden. Da mit einem möglichen Graphitzusatz ein erhebliches Potenzial für Veränderungen in der Auslegung besteht, ist die genaue Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit einer Bentonit-Graphitmischung von besonderer Bedeutung. Dies konnte im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nur rechnerisch abgeschätzt werden.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die Ausgangsdaten für die thermischen Auslegungsberechnungen und damit für die Entwicklung eines ersten Einlagerungskonzeptes als befriedigend angesehen werden können. Unsicherheiten verbleiben hinsichtlich der natürlichen Gebirgstemperatur und den thermischen Eigenschaften einer herzustellenden Bentonit-Graphit-Mischung.

4 SICHERHEITSANALYTISCHES ENDLAGER- UND STANDORTMODELL

4.1 Einleitung

Der Nachweis der Sicherheit des Endlagers während des Betriebs und in der Nachbetriebsphase wird standort- und konzeptspezifisch geführt. Der Langzeitsicherheitsnachweis basiert auf

- der Abfall- und Standortcharakterisierung,
- der geowissenschaftlichen Langzeitprognose, mit der sich langfristig negativ auf das Endlager auswirkende Einflüsse, wie Erdbeben, Gletschervorstöße u.ä., am Endlagerstandort ausschließen lassen,
- der Charakterisierung und Langzeitprognose der technischen Barrieren, die eine langfristige Sicherheit des unmittelbaren Nahfeldbereiches sicherstellt, sowie
- auf den Langzeitsicherheitsanalysen, die anhand von Modellrechnungen für das Gesamtsystem Nah- und Fernfeld sowie der Biosphäre eine langfristige Isolation der eingelagerten Abfälle garantiert.

Die deutschen Modellbetrachtungen der Sicherheitsanalyse ähneln denjenigen in Russland [Amosov 2002]. Ausgehend von einem Grundwasserzufluss in den einschlusswirksamen Endlagerbereich werden zunächst die Freisetzungsprozesse der Radionuklide z.B. aus der Glasmatrix, sowie aus den Abfallbehältern und ihre Diffusion durch den Bentonit betrachtet. Anschließend erfolgt unter Berücksichtigung von Sorption, Advektion, Diffusion/Dispersion und radioaktivem Zerfall eine Modellierung der Radionuklidmigration im Fernfeld, sowie eine Ermittlung der Strahlenexposition unter Berücksichtigung der relevanten Expositionspfade in der Biosphäre.

In Deutschland ist die Anwendung des Biosphärenmodells entgegen dem russischen Vorgehen für Langzeitsicherheitsanalysen per Verwaltungsvorschrift [AVV 1990] rechtsverbindlich vorgeschrieben. Der Schlüsselindikator für die Bewertung der Langzeitsicherheit und der Sicherstellung einer zuverlässigen Isolation der Radionuklide stellt weltweit diejenige Strahlenexposition dar, die vom Endlager ausgeht und zusätzlich zu der natürlichen Exposition in der Biosphäre wirkt. Ausgehend von den fundamentalen Sicherheitsprinzipien der IAEA sowie des Gesetzes zu dem Übereinkommen über nukleare Entsorgung für den sicheren Umgang mit radioaktiven Abfällen, soll die aus der Endlagerung resultierende Strahlenexposition für Mensch und Umwelt gegenüber der natürlichen Strahlung niedrig ausfallen. Die gesetzlichen Grenzwerte unterscheiden sich für verschiedene Länder. In Deutschland liegt das gesetzlich vorgeschriebene Schutzziel (deutsche Genehmigungskriterien für Endlager radioaktiver Abfälle) bei einer zusätzlich vom Endlager ausgehenden Strahlenexposition von 0,3 mSv/a, wobei die mittlere natürliche Strahlenexposition in Deutschland bei 2,4 mSv/a liegt. Die Sicherheitsbehörde der Schweiz legte das Schutzziel auf 0,1 mSv/a fest (Richtlinie 21 HSK/KSA 1993). In Russland liegt der Grenzwert für die prognostizierte zusätzliche Belastung bei 0,01 mSv/a (Sanitäre Regelungen zum Umgang mit radioaktiven Abfällen, SPORO 2002).

Im Folgenden wird die Erstellung eines Grundwasserströmungs- und Radionuklid-Transportmodells für eine Granitformation am Beispiel des Nishnekansker Granitoidmassivs beschrieben.

Die Modellierung wird durchgeführt, um

- eine erste grobe Einschätzung der Fließ- und Transportverhältnisse zu ermöglichen,
- durch Parametervariation einen Hinweis auf die bestimmenden Parameter und Unsicherheitsfaktoren bezüglich Strömung und Transport zu geben und

- eine Ableitung wichtiger Hinweise auf die potenzielle Strahlenexposition im Gebiet zu erlauben,

und auf dieser Grundlage Anforderungen an die Standorteigenschaften für Endlager radioaktiver Abfälle im Hartgestein zu formulieren und so zu der Wahl eines Endlagerstandortes beizutragen.

Die Vorgehensweise zur Erarbeitung des orientierenden sicherheitsanalytischen Modells zeigt die Abbildung 4-1. Hinsichtlich der Aufgabenstellung werden die zur Bearbeitung notwendigen Daten ermittelt und aus den Ergebnisberichten zur Standorterkundung herausgezogen, sowie eine Modellauswahl getroffen. Voraussetzung für die Einarbeitung der standortspezifischen Gegebenheiten in ein Modell ist die Schematisierung der Gebietseigenschaften. Dazu gehören vor allem die geologischen und hydrologischen Informationen. Auf der Grundlage dieser Vereinfachungen kann ein Strömungsmodell erstellt werden. Dieses lässt Aussagen über das Grundwasserregime zu. Ein sicherheitsanalytisches Modell erlaubt zudem eine Aussage über den Transport von Schadstoffen. Dazu werden die Transportprogramme GRAPOS, CHETMAD und EXMAS verwendet. Am Ende jeder Modellierung erfolgt eine Ergebnisdarstellung.

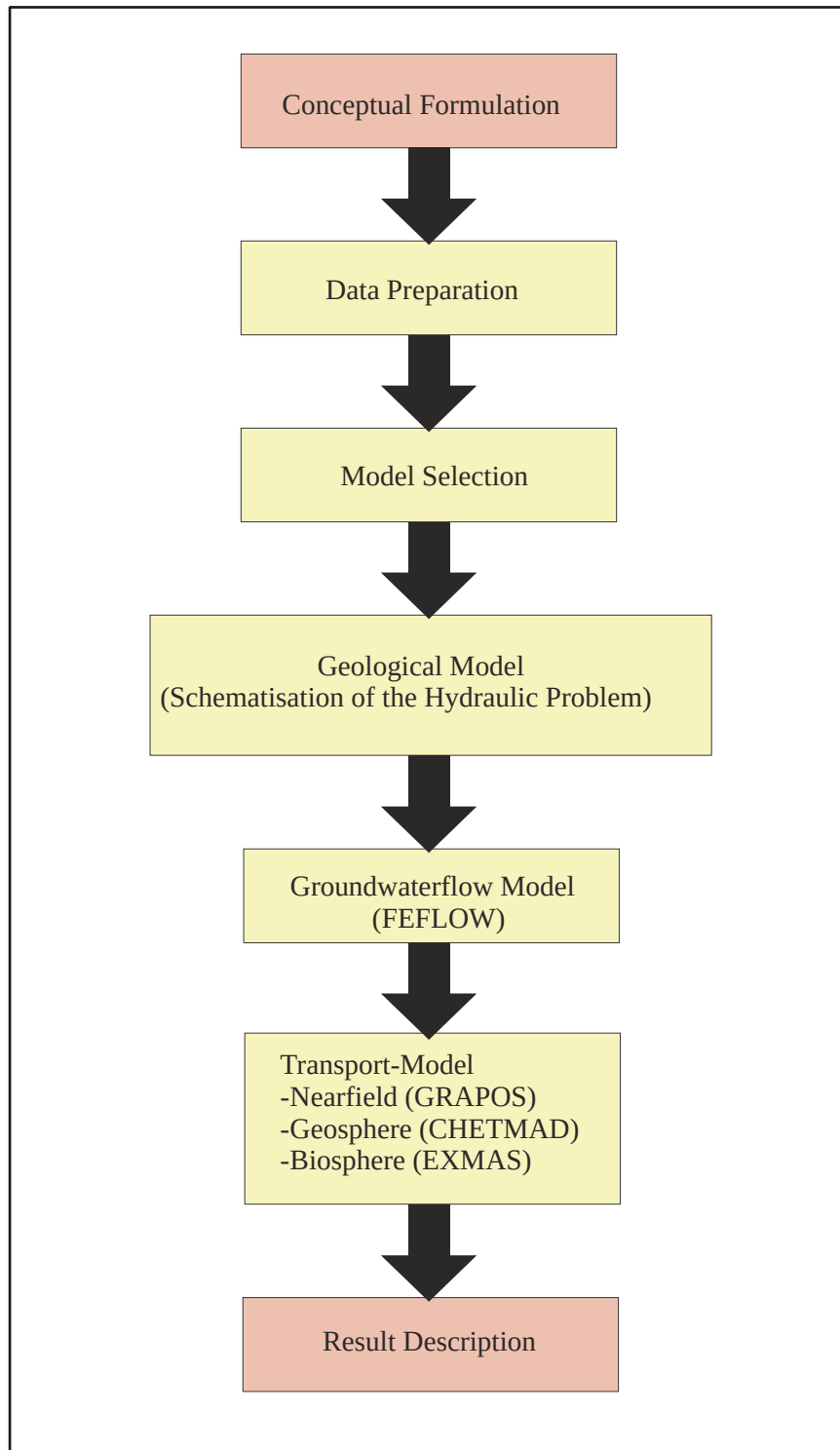


Abbildung 4- 1: Vorgehensweise zur Erarbeitung eines sicherheitsanalytischen Modells

Die Strömungsmodellierung erfolgt zunächst mit dem Programm FEFLOW (s. Anlage 2), das mit Hilfe von zwei- und dreidimensionalen Rechnungen eine umfassende Bewertung des hydraulischen Systems ermöglicht.

Um Kenntnisse über allgemeine sowie standortbezogene Strömungs- und Transportphänomene im geklüfteten Gestein zu erhalten, werden sowohl schematische Modellierungen durchgeführt, als auch ein standortspezifisches Modell erstellt. Die durchgeführten Studien ermöglichen einen Einblick in das Systemverhalten hinsichtlich der Grundwasserhydraulik, des Ra-

dionuklidtransports, sowie des potentiellen Freisetzungsgebietes. Die standortspezifischen Modellierungen stellen zudem wichtige Ausgangsdaten für das sich anschließende sicherheitsanalytische Transportmodell EMOS zur Verfügung. Die Transportweglänge und die Darcy-Geschwindigkeit werden für diese Arbeiten aus den FEFLOW-Rechnungen übernommen.

4.2 Das sicherheitsanalytische Modell

Der Transport aller betrachteten Nuklide wird mit dem Programmcode EMOS berechnet, der aus den Unterprogrammen GRAPOS, CHETMAD und EXMAS besteht.

Die Mobilisierung der Radionuklide im Abfallbehälter sowie der Transport durch die Bentonitbarriere und die EDZ (Excavation Disturbed Zone) im Nahfeld des Endlagers werden mit dem Computercode GRAPOS berechnet. Die zeitabhängige Konzentration der Radionuklide geht in den Code CHETMAD ein, der den Transport durch die Geosphäre berechnet. Die Darcy-Geschwindigkeit in der Kluftzone wird dabei aus den Ergebnissen des zuvor mit dem Programm FEFLOW erstellten Strömungsmodells übernommen. Die zeitabhängigen Konzentrationen der jeweiligen Radionuklide werden in einem letzten Schritt in das Biosphärenmodell EXMAS eingespeist, das in Abhängigkeit von den Lebens- und Verzehrgeohnheiten von Mensch und Tier eine Aussage über die Strahlenexposition erlaubt.

Das sicherheitsanalytische Modell ist ein wichtiges Werkzeug in bezug auf die Auswahl eines Endlagergebietes und seine technische Realisierung. Es gibt Aufschluss über

- die Wirksamkeit der Isolation der eingelagerten Abfälle,
- die Menge, Art und das zeitliche Auftreten austretender Schadstoffe,
- die in der Biosphäre zu erwartende Strahlenexposition,

und beantwortet damit die Fragen, die bezüglich der Langzeitsicherheit des Endlagers relevant sind.

Das Modell bezieht sich auf den gesamten Transportpfad der Radionuklide und berücksichtigt sowohl die technischen, hydraulisch interessanten und die Isolation begünstigenden Gegebenheiten des Nahfeldes des Endlagers (Behälter-Ausfallzeit, Bentonit-Mächtigkeit, etc.), als auch die hydraulischen Eigenschaften des Fernfeldes (hydraulische Leitfähigkeit, Kluftthäufigkeit etc.)

Es gibt auch die Lebens- und Verzehrgeohnheiten von Mensch und Tier in der Biosphäre wieder.

4.3 Verwendete Modelle und ihre Vernetzung

Die Fragestellung und Zielsetzung der Untersuchungen bestimmten die Anforderungen, die an das Modell gestellt wurden und damit die Modellauswahl. Eine besondere Herausforderung an die Modellierung wird mit den stark heterogenen hydraulischen Eigenschaften der Wirtsgesteine begründet, in die das Endlager eingebettet werden soll.

Folgende Anforderungen sollen von dem späteren Modell erfüllt werden:

- Möglichkeit zweidimensionaler sowie dreidimensionaler Strömungs- und Transportmodellierungen,
- Berücksichtigung der Dichteeffekte als Resultat unterschiedlicher Salzkonzentrationen aufgrund der betrachteten Abfälle und natürlicher bzw. künstlicher Temperaturfelder,
- Berücksichtigung freier Wasseroberflächen, um auch die oberflächennahen Bereiche einzubeziehen,
- Explizite Modellierung von Klüften,

- Berücksichtigung des radioaktiven Zerfalls,
- Schnittstelle zu einem Geoinformationssystem (GIS).

Eine Studie der vorhandenen Computercodes zeigte, dass es z.Zt. kein Modell gibt, das alle gestellten Anforderungen lückenlos erfüllt. Einige von ihnen besitzen zwar die Möglichkeit Klüfte als Elemente niedrigerer Dimension in das Modell zu integrieren, jedoch fehlt in den meisten Programmen die Anbindung an ein Geoinformationssystem, sowie die Möglichkeit eine freie Grundwasseroberfläche zu berücksichtigen. Die Betrachtung des Radionuklidtransports ist eine so spezielle Thematik, dass er in keinem der verbreiteten Computercodes vorgesehen ist. Nach eingehender Recherche wurde daher beschlossen, zwei verschiedene Programmcodes zu verwenden, die sich gegenseitig ergänzen (Abbildung 4-1). Eine kurze Programmbeschreibung ist in Anlage 2 beigefügt.

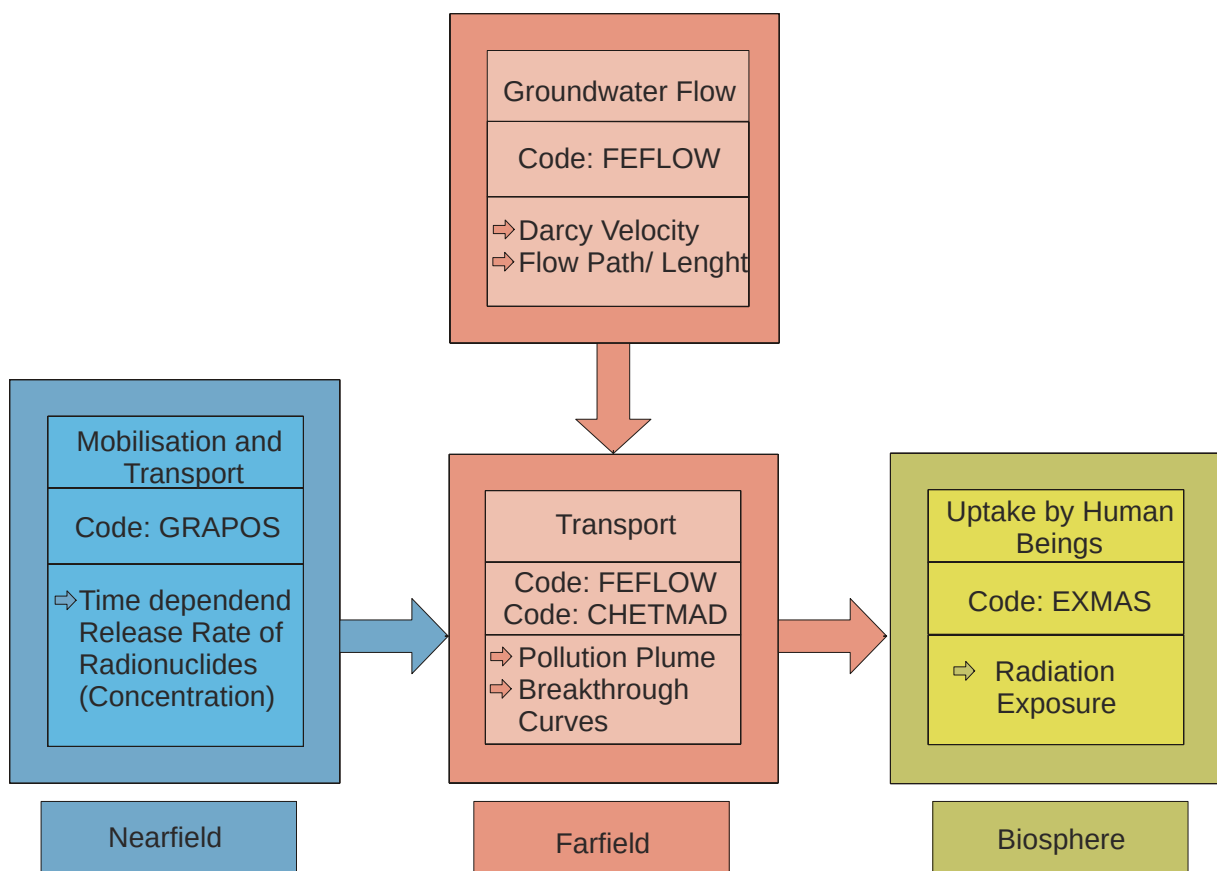


Abbildung 4- 2: Vernetzung der unterschiedlichen Computercodes

Es erweist sich als notwendig, die Transportmodellierung in mehreren Teilschritten durchzuführen. Dieses Vorgehen ermöglicht eine schrittweise Vergrößerung der Komplexität der Modelle. Durch dieses Vorgehen werden auch die unterschiedlichen Eigenschaften der einzelnen Programme berücksichtigt. Während das Programm EMOS speziell für die deutsche Langzeitsicherheitsanalyse entwickelt worden ist und daher für komplexe Berechnungen des Radionuklidtransports und der Strahlenexposition prädestiniert ist, jedoch keine räumliche Aussage über den Transportverlauf zulässt, handelt es sich bei dem Programm FEFLOW um ein Feldfeldmodell, dass zwar bisher lediglich die Ausbreitung eines Schadstoffes in geklüfteten/porösen Medien berechnen kann, aber dafür zwei- und dreidimensionale Rechnungen ermöglicht. Daher werden zunächst schematische zweidimensionale Modellierungen mit

dem Programm FEFLOW durchgeführt, um ein grundsätzliches Systemverständnis zu erlangen. Ein im Anschluss mit FEFLOW erstelltes dreidimensionales Grundwasserströmungsmodell gibt über die lokale Grundwasserhydraulik Auskunft. Auf seiner Grundlage wird die räumliche Lage des Profilschnittes für das zweidimensionale Modell ausgewählt und sein geologisches Strukturmodell erzeugt. Nach Strömungsberechnungen folgen Transportrechnungen mit Hilfe eines Tracers. Anschließend werden eindimensionale Rechnungen für das komplette Radionuklidinventar bis in die Biosphäre mit dem Programm EMOS durchgeführt. Im Anschluss daran werden zweidimensionale Rechnungen mit dem Programm FEFLOW realisiert. Als Leitnuklid wird der aus dem Nahfeldmodell GRAPOS stammende Quellterm von Cäsium-135 in den Rechnungen verwendet. Danach wird mit den Programmen CHETMAD und EXMAS die Ausbreitung im Fernfeld sowie der zeitliche Verlauf der Strahlenexposition in der Biosphäre berechnet. Die durchgeführten Modellrechnungen sind in Abbildung 4-3 dargestellt. Die Modelle stützen sich auf die bekannten Standorteigenschaften. In den Rechnungen wurde die hydraulische Durchlässigkeit des geklüfteten Gesteinsbereiches und des Kluftsystems sowie die Kluftöffnungsweite variiert. Zudem wurde die Auswirkung des natürlichen Wärmegradienten untersucht.

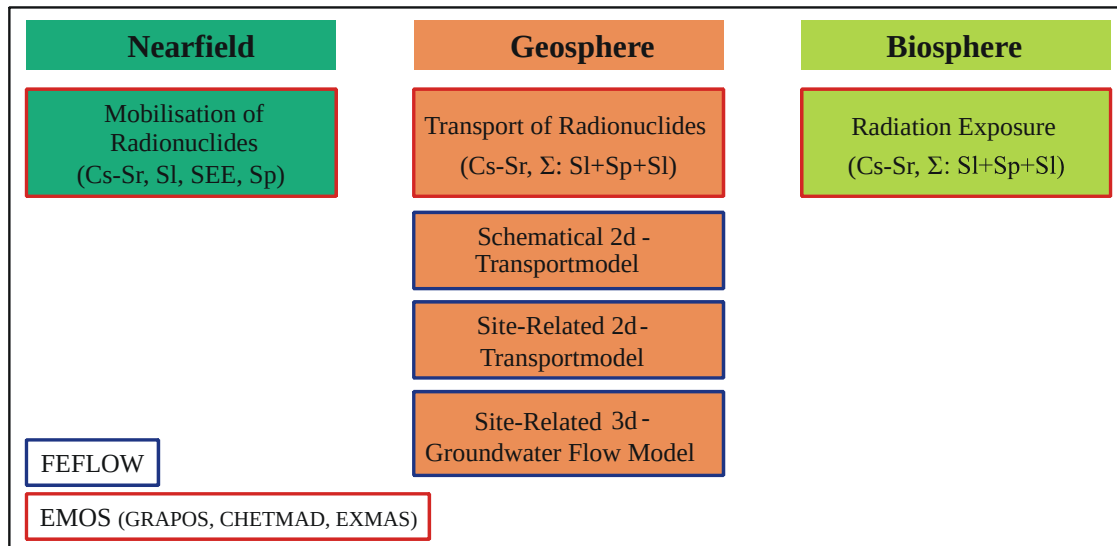


Abbildung 4- 3: Durchgeführte Modellrechnungen für die verschiedenen Fraktionen: Cäsium-Strontium (Cs-Sr), Schlamm (Sl), Seltene Erden Elemente (SEE) und Spaltprodukte (Sp)

4.4 Strömungs- und Transportmodellierungen im Nishnekansker Massiv

Auf der Grundlage der von 1993 bis 1996 durchgeführten Erkundungsarbeiten wurden im Nord-West-Teil des Nishnekansker Granitoid-Massivs das Gebiet „Verchne-Itatskij“, das die beiden Teilgebiete „Itatskij“ und „Kamennij“ enthält, sowie „Jenniseiskij“ als potentielle Standortgebiete für ein HLW-Endlager vorausgewählt. Aufgrund der im Jahre 2001 verfügbaren Daten standen für die Strömungs- und Transportmodellierungen nur die Gebiete „Itatskij“ und „Kamennij“ zur Auswahl (Abbildung 4-4).

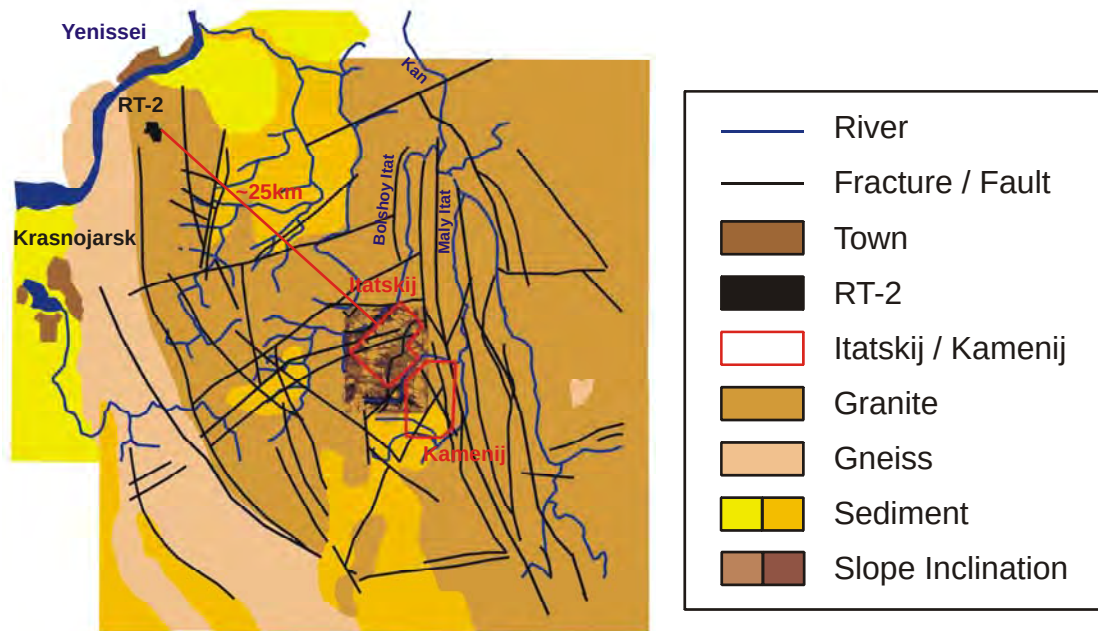


Abbildung 4- 4: Lage der vorausgewählten Standorte Itatskij und Kamennij
Verschneidung diverser Abbildungen im GIS

Für die weitere Bearbeitung wurde das Gebiet Itatskij ausgewählt. Die Wahl des Modellgebietes erfolgte auf der Grundlage der für diese Gebiete verfügbaren hydrogeologisch relevanten Daten und deren Auswertung im Hinblick auf endlagerrelevante Standortgegebenheiten. So weisen Bohrungen im Untersuchungsgebiet Kamennij auf vergleichsweise starke Deformationen und metamorphe Überprägungen der Gesteine hin. Desweiteren durchziehen große Störungszonen einen Großteil des Gebietes. Ein weiterer Teilbereich wird durch Flussniederungen eingenommen. Die häufige Anbindung von Flüssen an Schwäche zonen wie Kataklaste- und Zerrüttungsbereiche im Gestein, sowie die Gefahr aufsteigenden Grundwassers, lässt dieses Gebiet als ungünstig im Hinblick auf die Endlagerung erscheinen. Zum anderen ist die im Untersuchungsgebiet Itatskij existierende Wasserscheide für das Abteufen von Schächten zur Errichtung von Endlagern besonders geeignet, da sie ein wenig gegliedertes Relief aufweist und die stabilen Blöcke nur wenig von den randlich verlaufenden Störungszonen beeinflusst werden. Das Gebiet Itatskij erstreckt sich über eine Fläche von ungefähr 40 km² und wird von Klüften und Störungen unterschiedlicher Ordnung durchzogen (Abb. 4-9). Diese streichen hauptsächlich in NS- bis NW/SE- selten in OW-Richtung. Allen gemein ist ein steiles Einfallen von 80-90° sowie eine intensive Kataklaste und Mylonitisierung. Die Geländehöhen belaufen sich auf Werte zwischen 250 und 440 m_{üNN} (Abb. 4-7).

4.4.1 Modellaufbau FEFLOW

Der Aufbau eines Modells ist eine langwierige Aufgabe und wird mit jeder zusätzlichen standortbezogenen Information, ob geologische Schicht, Beobachtungsbrunnen, Kluftstruktur oder mit zunehmender Dimension komplexer. Die Basis für eine Modellerstellung ist ein genaues Wissen über das Modellgebiet und seine hydraulischen Eigenschaften.

Der Aufbau eines FEFLOW-Modells erfolgt schrittweise mit der

1. Auswahl eines Modellgebietes,
2. Erstellung eines Finite-Elemente-Netzes,
3. Erarbeitung eines Geologischen Strukturmodells,

4. Belegung der Modellgrenzen mit Randbedingungen,
5. Eingabe von Anfangsbedingungen,
6. Eingabe von hydraulischen Parametern,
7. Eingabe von Transport-Parametern,
8. Eingabe von Wärme-Parametern.

Für die Modellgeometrie und deren Belegung mit Rand- und Anfangsbedingungen sowie mit Hydraulik-, Wärme- und Transportparametern ist eine Vielzahl an Informationen erforderlich. Da diese vielfach nicht in ausreichender Menge und Güte vorhanden sind, ist es notwendig, sich durch verschiedene Realisationen bestmöglich an die tatsächlichen Gegebenheiten anzunähern. Ob dies gelungen ist, zeigt der Vergleich von gemessenen mit modellierten Werten.

4.4.1.1 Datenakquisition und –aufbereitung

Die Zusammenstellung und Aufbereitung des für eine Strömungs- und Transportmodellierung notwendigen Datenmaterials ist eine wichtige und langwierige Aufgabe, die maßgeblich über die Qualität des späteren Modells entscheidet. Es gilt dabei die Balance zwischen vorhandenen und notwendigen Informationen zu finden, die schließlich die gebietsspezifischen Gegebenheiten in ausreichender Genauigkeit erfassen. Trotz der notwendigen Schematisierung des vielfach sehr komplexen hydraulischen Systems müssen die wesentlichen geometrischen Strukturen sowie strömungs- und transportrelevanten Eigenschaften so exakt wie nötig wiedergegeben und nicht vorhandene Daten durch die Ergebnisse anderer Untersuchungen oder Erfahrungswerte sinnvoll ergänzt werden. Dazu ist ein umfangreiches Datenmaterial erforderlich, das einerseits die topographischen, hydrologischen und hydrogeologischen Standortdaten, andererseits aber auch die technischen Details des Endlagers und der endzulagernden Behälter, sowie die in ihnen enthaltenen Abfälle hinreichend genau beschreibt. Zudem sind auch die chemischen und physikalischen Transporteigenschaften der zu betrachtenden Radionuklide sowie ihre Zerfallscharakteristika notwendig. Eine detaillierte Zusammenstellung der für die Strömungs- und Transportmodellierung benötigten Daten findet sich in den nachfolgenden Modellbeschreibungen. Abbildung 4-5 gibt einen Überblick über die benötigten grundlegenden Daten. Für die Modellierung in FEFLOW sind lediglich die Daten des Fernfeldes relevant.

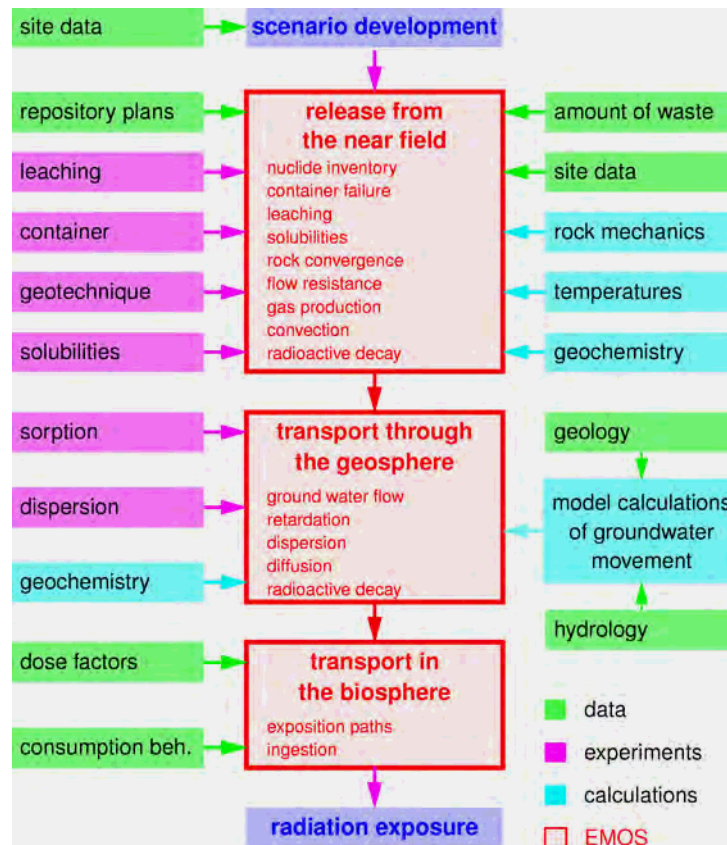


Abbildung 4- 5: Notwendige Daten für das Programmpaket EMOS

Im Fall der Datenaufbereitung für den Standort Krasnojarsk bestand eine besondere Schwierigkeit in den stark variierenden Kartenmaßstäben, zahlreichen Ungenauigkeiten bei der Kartenerstellung sowie den fehlenden Ortskoordinaten. Die vorliegenden Informationen konnten daher nicht ohne weiteres transferiert und zusammenfassend dargestellt werden. Es galt daher in einem ersten Schritt die unterschiedlichen Maßstäbe ohne Zuhilfenahme von Koordinaten bestmöglich anzupassen. Um dies zu bewerkstelligen, wurden die Informationen in Form von Tabellen und Grafiken in ein Geoinformationssystem (GIS) übertragen. Dieses System erleichtert den Umgang mit der Vielzahl von Daten. Es ermöglicht einen schnellen Überblick über die vorhandenen Informationen und stellt damit eine große Arbeitserleichterung dar. Weiterhin erfolgte im GIS die Zusammenstellung verschiedener vorher digitalisierter Informationen in Form von Grafiken, die Weiterbearbeitung der Rohdaten sowie die Erstellung der notwendigen Modelleingangsdaten. Um dieses komplexe und zeitlich sehr aufwändige Vorgehen zu verdeutlichen, wird im Folgenden exemplarisch die Entwicklung des digitalen Geländemodells (DGM) dargestellt (Abbildung 4-6 und Abbildung 4-7). Dieses stellt einen wesentlichen Bestandteil der erzeugten FEFLOW-Modelle dar, da auf seiner Grundlage die Grundwasseroberfläche und die geologischen Schichten erzeugt wurden.

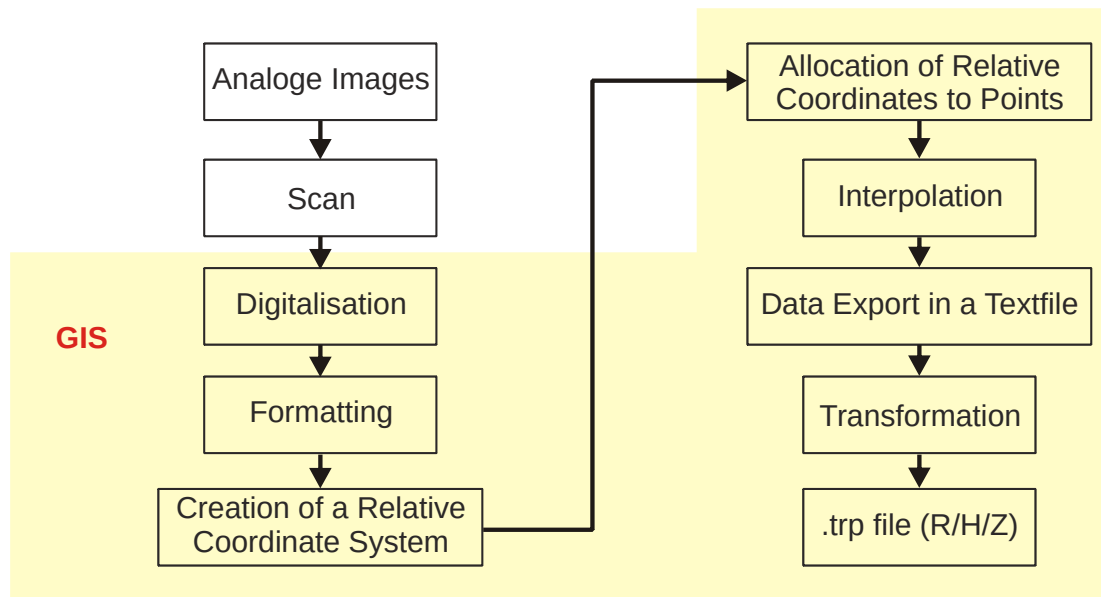


Abbildung 4- 6 Erstellung des digitalen Geländemodells für die Modellierungen mit dem Programm FEFLOW

Da keine topographische Karte zur Verfügung stand, wurde die Hangneigungskarte aus [Lopatin, Anderson, Dzenko] als Grundlage für das DGM verwendet. Die Hangneigungskarte wurde zunächst eingescannt und im GIS digitalisiert. Danach erfolgte die maßstabsgerechte Wiedergabe unter der Verwendung eines relativen Koordinatensystems. Schließlich wurde ein ausreichend dichtes Punktgitter (grid) erzeugt, das neben den Punkt-Koordinaten auch deren Höhenwerte beinhaltet. Durch Interpolation dieser räumlich festgelegten Höhendaten wird eine digitale Höhenkarte erstellt. Diese wurde anschließend mittels GIS und einem Textverarbeitungsprogramm in eine modellkompatible Form konvertiert. Abbildung 4-7 zeigt im oberen Bildteil die Hangneigungskarte und im unteren Teil das daraus für einen Teilbereich erzeugte digitale Geländemodell. Dieses ist vergleichbar mit der im Kapitel 2 gemachten absoluten Höhenangabe zwischen Malij Itat und Bolshoj Itat von bis zu 480 m sowie einer Höhendifferenz im Bereich Verchne Itatskij zwischen 100 und 250 m.

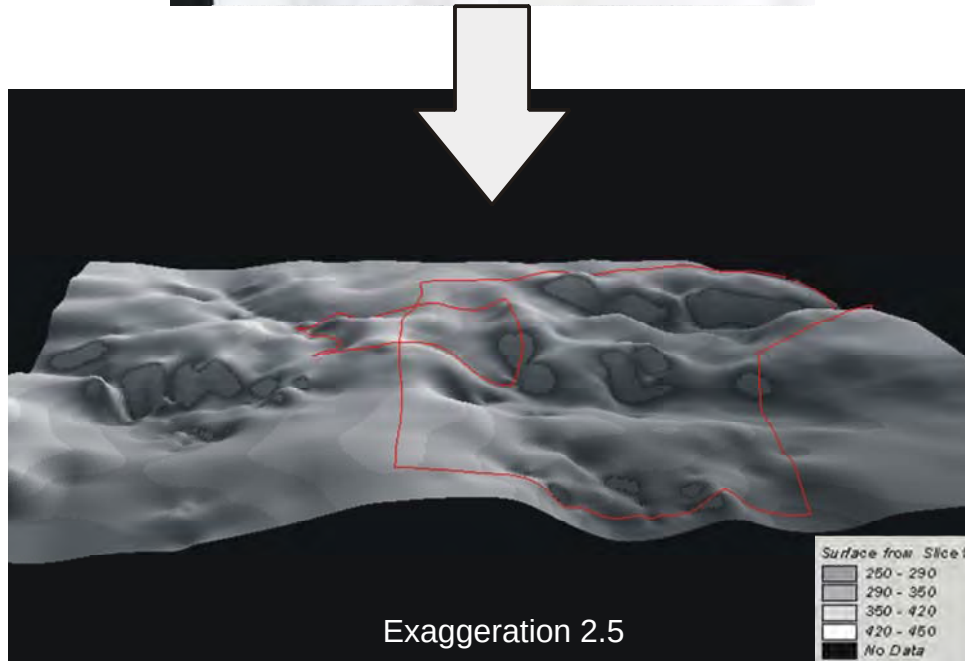


Abbildung 4- 7: Entwicklung des digitalen Geländemodells (DGM) (unten) aus der Hangneigungskarte (oben) aus [Lopatin, Anderson, Dazenko]

4.4.1.2 Schematisierte zweidimensionale Rechnungen mit FEFLOW

Um einen Eindruck von dem Systemverhalten beim Schadstofftransport in einem Kluftsystem zu erhalten, werden vereinfachte Kluftformationen in vier verschiedenen zweidimensionalen Modellen untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen zu einem grundlegenden Systemverständnis führen und bei der Interpretation der Ergebnisse der sich daran anschließenden Modellrechnungen helfen.

Der betrachtete Modellblock ist 100 m tief und 200 m lang und besitzt ein gleichmäßig dichtes Gitternetz mit einer Elementgröße von 1 bis 2 m². Allen schematischen Modellen liegt ein vom linken zum rechten Rand hin von 120 m auf 108,6 m gleichmäßig abfallender hydraulischer Gradient von $5,7 \cdot 10^{-2}$ zugrunde. Dieser Wert wurde als erste grobe Näherung aus den verfügbaren Angaben der Geländehöhen und der Entfernung zwischen Grundwasserscheide und Niederung gewonnen. Der tatsächliche Wert wird kleiner ausfallen, da der Grundwasserspiegel das Relief lediglich in abgeschwächter Form wiedergibt.

In den Präzisierungen von VNIPI PT und den Darlegungen in [Amosov 2002] werden hydraulische Gradienten zwischen 10^{-3} und 10^{-7} angegeben, wobei Erläuterungen zur Begründung dieser Daten nicht vorliegen.

Beide Ränder sind durch eine Festpotentialrandbedingung (Dirichlet) belegt. Es handelt sich um einen gespannten und voll fluid-gesättigten Aquifer. Abbildung 4-8 veranschaulicht die gemachten Aussagen.

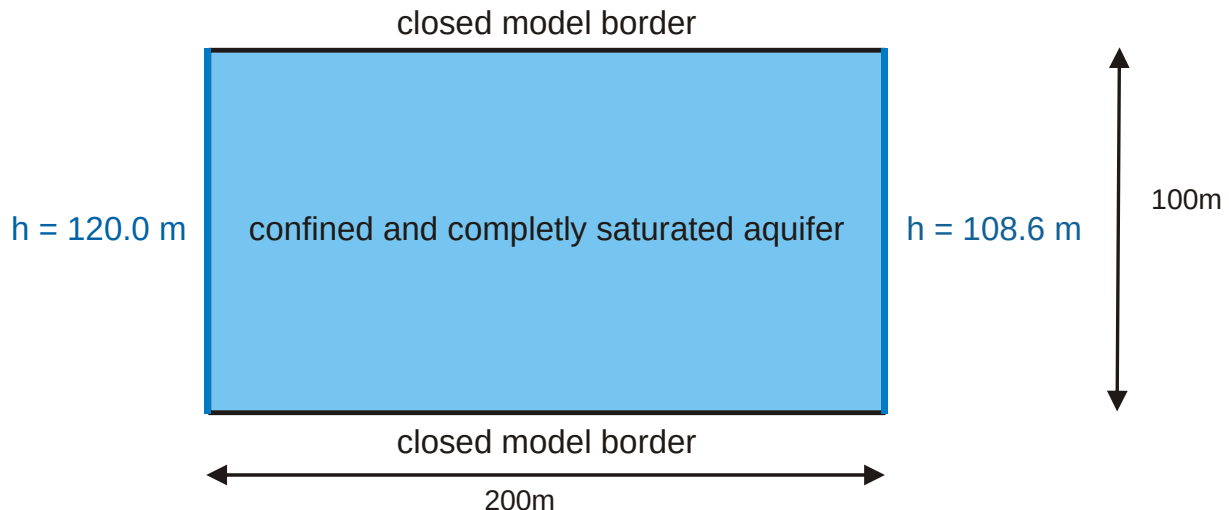


Abbildung 4- 8: Modellannahmen für die zweidimensionalen schematischen Rechnungen

Für die Gesteinsmatrix wird zunächst der Mittelwert als Durchlässigkeitsbeiwert von $5,7 \cdot 10^{-8}$ m/s angenommen. Um den Einfluss des Durchlässigkeitsbeiwertes auf den Schadstofftransport zu untersuchen, wurde dieser in einem zweiten Schritt auf $1 \cdot 10^{-9}$ m/s und in einem dritten auf den Wert von $5 \cdot 10^{-11}$ m/s gesetzt. Dieses entspricht dem Median-Wert der russischen Angaben. Der letztgenannte Wert ist mit demjenigen vergleichbar, den die NAGRA mit $4,2 \cdot 10^{-11}$ m/s für Grimsel ermittelt hat [NAGRA 1993], und der auch für das Endlager im Nishne-kansker Granitoidmassiv angenommen wird. Der Wert für die effektive Porosität wurde aus dem Bericht [Gupalo et al 2002] übernommen. Der Wert für die Diffusion stammt aus der Studie Kristallin I [NAGRA 1994]. Aufgrund der Annahme, dass in der Gesteinsmatrix die Advektion stark unterdrückt wird und Diffusion überwiegt, wurde die Dispersion vernachlässigt. Die Klüfte wurden als diskrete Elemente mit einer Kluftzone von 10 cm in das Modell implementiert. Die Schadstoffquelle wird in einer horizontal verlaufenden Kluft angenommen. Es wird von einer Kluftfüllung ausgegangen, die mit $1,2 \cdot 10^{-6}$ m/s eine viel größere

Durchlässigkeit aufweist als die Gesteinsmatrix. Daher wird in den Klüften die Advektion überwiegen. Es wird davon ausgegangen, dass der Schadstoff nicht zerfällt und auch nicht sorbiert wird. In den Modellen 1 bis 3 wird von einer kontinuierlichen, zeitlich konstanten Schadstoffquelle mit 1 mg/l, im Modell 4 von einer sich zeitabhängig langsam aufbauenden Schadstoffquelle mit maximal 2 mg/l ausgegangen. Eine Übersicht der eingegebenen Modellparameter enthält Tabelle 4-1.

	Variation 1	Variation 2	Variation 3
Hydraulisches Potential	$5,7 \cdot 10^{-2}$		
Quelle [mg/l]	Modell 1-3: kontinuierlich Modell 4: zeitabhängig 2		
Matrix:			
Kf-Wert [m/s]	$5,8 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-11}$
Effektive Porosität [-]	0,02		
Molekulare Diffusion [m ² /s]	$3,17 \cdot 10^{-11}$		
Longitudinale Dispersion [m]	0		
Transversale Dispersion [m]	0		
Kluft:			
kf-Wert [m/s]	$1,2 \cdot 10^{-6}$		
Effektive Porosität [-]	0,1		
Diffusion [m ² /s]	$3,17 \cdot 10^{-11}$		
Longitudinale Dispersion [m]	5		
Transversale Dispersion [m]	0,1		
Öffnungsweite [m]	0,1		

Tabelle 4- 1: Modellparameter für die zweidimensionalen schematischen Rechnungen

4.4.1.3 2d und 3d Modelle im Untersuchungsgebiet Itatskij

Neben den eindimensionalen Transportrechnungen mit EMOS werden für das Gebiet Itatskij auch ein zwei- sowie ein dreidimensionales Modell erstellt. Sie geben eine räumliche Vorstellung über die regionale Grundwasserhydraulik, die eingeschlagenen Transportpfade durch das Fernfeld und über die im Transportverlauf wirkenden Prozesse. Die Variation der hydraulischen Parameter führt zu einer Einschätzung ihrer Relevanz in Bezug auf Strömung und Transport.

Schematisierung des hydraulischen Systems

Festlegung der Modellgrenzen

Das Modellgebiet wurde so gewählt, dass es das für eine Endlagerung aussichtsreichste Areal enthält. Für die Ermittlung eines potentiell geeigneten Endlagerstandortes wurden verschiede-

ne Aspekte in die Betrachtung einbezogen. Es galt dabei ein Gebiet mit geeigneter Größe auszuweisen, das möglichst weit von Flusssystemen und mächtigen Störungszonen entfernt und zudem im Bereich einer Grundwasserscheide liegt, um einen großen Oberflächenabfluss und Interflow zu gewährleisten. Damit wird sichergestellt, dass nur ein geringer Grundwasserübergang in das Kluftsystem stattfindet. Bei der Auswahl eines potenziellen Endlagerstandortes wird um die im Untersuchungsgebiet vorhandenen großen Störungszonen ein Sicherheitsabstand von insgesamt 500 Metern angenommen. Dieser Sicherheitsabstand verringert deutlich den für ein Endlagergebiet in Frage kommenden Bereich. Unter Einbeziehung der zuvor angesprochenen Aspekte gelangt man zu der Erkenntnis, dass der süd-westlich gelegene Teil des Gebietes Itatskij für eine Endlagerung am ehesten in Betracht kommen könnte (Abbildung 4-9). Innerhalb dieses Gebietes wurde zunächst eine Fläche von circa 11 km² als regionales Modellgebiet für eine dreidimensionale Modellierung ausgewählt (Abbildung 4-10). Seine Modellgrenzen verlaufen entlang von Kluft- und Störungszonen sowie der Grundwasserscheide. Diese Wahl vereinfacht die spätere Ausweisung von Randbedingungen.

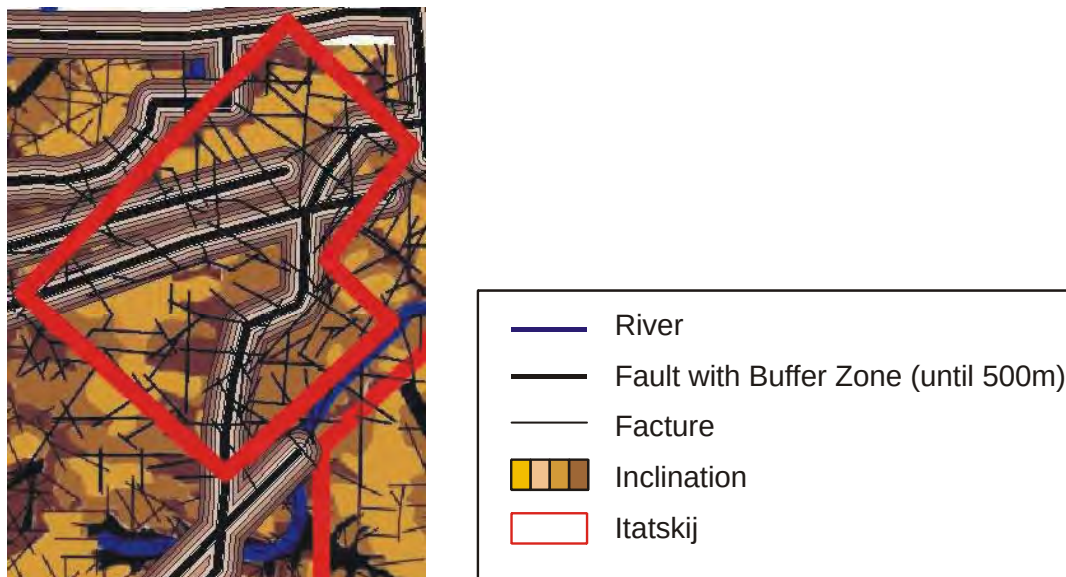


Abbildung 4- 9: Das Gebiet Itatskij mit seinen Kluftstrukturen und einer bis zu 500 Meter breiten Pufferzone als Sicherheitsabstand

Innerhalb dieses Bereiches wurde ein kleines Gebiet ausgewiesen, das als potentieller Endlagerbereich in Frage kommen könnte. Dieses Areal liegt im Einzugsbereich einer Wasserscheide (Abbildung 4-10). Der Gesteinsblock ist nahezu ungestört, besitzt eine Fläche von ungefähr 1,5 km² und ist umgeben von kleineren Klüften IV. und V. Ordnung. Der potenzielle Endlagerbereich entspricht damit der in Kap. 3 in erster Näherung ausgewiesenen Endlagergebietsgröße für eine großdimensionierte Bohrlochlagerung.

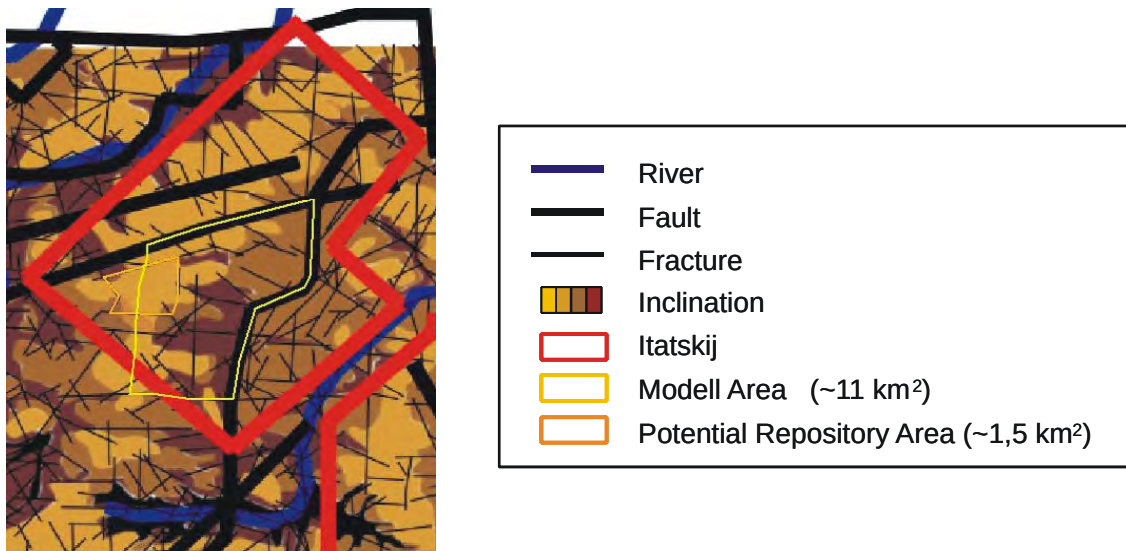


Abbildung 4- 10: Modellgebiet und weitestgehend ungestörter Gesteinsbereich

Das geologische Strukturmodell

Das geologische Strukturmodell bildet die Grundlage des späteren Strömungs- und Transportmodells. Die Abfolge der geologischen Schichten wurde aus Bohrergebnissen in Kamenij und Itatskij sowie aus Analogiebetrachtungen zu Daten, die auf der Kola-Halbinsel gewonnen wurden abgeleitet. Aufgrund des geringen Oberflächenreliefs, der intensiven Verwitterung und Bodenbildung ist das monolithische Ausgangsgestein im gesamten Gebiet mit einer Verwitterungszone und teilweise mit jurassischen Sedimenten bedeckt (Abbildung 4-11). Es wird davon ausgegangen, dass in den höher gelegenen Bereichen diese überlagernden Schichten aufgrund von Erosionsprozessen von geringerer Mächtigkeit sind als in den Niederungen. Weiterhin wird vereinfachend angenommen, dass es sich bei ihnen um homogene poröse bzw. quasi-poröse Medien mit guten hydraulischen Eigenschaften handelt (Tabelle 4-3). Die Behandlung der Verwitterungszone als quasi-poröse Zone ist aufgrund der intensiven exogenen Kluftdichte eine vertretbare Vereinfachung. Das sich darunter anschließende Ausgangsgestein, ein Batholith aus spätproterozoischen Graniten und Quarzdioriten hat bis in eine Tiefe von ungefähr einem Kilometer nur eine geringe Überprägung erfahren. Trotzdem ist er aufgrund wechselnder Spannungsmuster unterschiedlich stark geklüftet. Mit diesen Annahmen werden bereits die grundlegenden hydraulischen Gegebenheiten beschrieben.

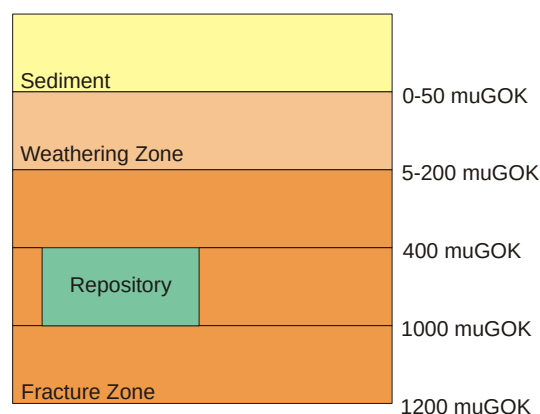


Abbildung 4- 11: Schematisiertes Schichtenmodell

Eine qualitative Beschreibung der Schichten erfolgt durch die Belegung mit den jeweiligen hydraulischen Parametern. Die hydraulischen Gesteins- und Klufteigenschaften des Nishnekansker Granitoidmassivs sind bisher nur ansatzweise bekannt. Soweit wie möglich wurde auf Erkundungsdaten, die am Standort Krasnojarsk ermittelt wurden, zurückgegriffen [Tabelle 4-2]. Informationslücken wurden mit Hilfe von Messdaten aus dem schweizerischen Felslabor Grimsel [NAGRA 1993] geschlossen. Die große Bandbreite der Werte in Tabelle 4-2 lässt sich auf stark wechselnde mechanische Beanspruchung zurückführen.

In Tabelle 4-3 wurden die Durchlässigkeitsbeiwerte aus russischen und schweizer sowie deutschen Datenbeständen zusammengetragen. Die Parameter wurden innerhalb der Spannweiten variiert. Die Verwitterungszone erhält entsprechend den Angaben in Tabelle 4-3 einen geringeren Durchlässigkeitsbeiwert als die Sedimente. Eine Literaturstudie zeigt, dass die Durchlässigkeiten der Verwitterungsschicht jedoch häufig größer ist, z.B. [Balla 2000].

Einige Ergebnisse durchgeführter Variationen sind in Kapitel 4.4.3.3. aufgeführt.

	Einfallswinkel	Streichen	Kluftfüllung	Kluftweite	Kf-Wert		Effektive Porosität	Sonstiges
Sediment					$1,2 \cdot 10^{-6} - 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$			
Verwitterungszone					$1,2 \cdot 10^{-8} - 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ Kola Halbinsel: $5,8 \cdot 10^{-3} - 1 \text{ m/d}$			
Lagerklüfte	5-20°	NW 320-345°		Sehr klein, mit Tiefe stark abnehmend	$10^{-1} - 10^{-7} \text{ m/d}$	$10^{-7} - 10^{-5} \text{ m/d}$		Intensive Mylonitisierung und Kataklasten Lokale Verschiebungsflächen Große Variationsbreite der Kf-Werte Kluftöffnung im Bereich des Endlagers: 0,1-1,5 mm
Querklüfte	80-90°	SN	Lamprophy, Quarz, Mikrosyenit, Aplit, Diabasporphyrit, Xenolith, Pegmatit	Groß			Bis 82%	
Längsclüfte (selten)		WO		Sehr klein, mit Tiefe stark abnehmend				
Sekundäre Klüfte								
Monolithische Granitmatrix					$4 \cdot 10^{-4} - 10^{-2} - 10^{-9} \text{ m/d}$	$10^{-9} - 10^{-7} \text{ m/d}$	0,26-0,52%	
Gneismatrix					0,03-0,4 mm/d			
Schieferzone					0,007 m/d-0,1 m/a	$8,1 \cdot 10^{-8} - 3 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$		

Tabelle 4- 2: Hydraulischer Parameter für die Granite des Nishnekansker Massivs [Anderson et al. 1998], [Anderson et al 2001], [Shabalev et al. 2001], Velichkin et al. 2001]

	Russische Daten für Krasnojarsk	Analogiedaten zur Kola-Halbinsel min/max	Nagra		AkEnd	Sonstiges Nagra
Sediment	$1,2 \cdot 10^{-6}$ - $1,2 \cdot 10^{-4}$					
Verwitterungszone	$5,7 \cdot 10^{-8}$ - $5,8 \cdot 10^{-6}$	$5,7 \cdot 10^{-8}$ - $1,2 \cdot 10^{-5}$				
Granitmatrix	$1,16 \cdot 10^{-7}$ - $1,16 \cdot 10^{-14}$ $1,16 \cdot 10^{-12}$ - $1,16 \cdot 10^{-14}$	$1,16 \cdot 10^{-7}$ - $1,16 \cdot 10^{-14}$	10^{-10} - 10^{-12}	10^{-6} - 10^{-10} 10^{-10} - 10^{-11} in 1500m Tiefe: $4 \cdot 10^{-10}$	$2,23 \cdot 10^{-15}$ - $4 \cdot 10^{-4}$ Mittelwert: 10^{-7}	
Gneismatrix	$3,47 \cdot 10^{-10}$ - $4 \cdot 10^{-9}$				$1,57 \cdot 10^{-5}$ - $1 \cdot 10^{-13}$	
Klüfte	$6,9 \cdot 10^{-5}$ $1,16 \cdot 10^{-6}$ - $1,16 \cdot 10^{-12}$ $1,2 \cdot 10^{-10}$ - $3,5 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-14}$ - $1,2 \cdot 10^{-6}$				
Störungen			10^{-8} - 10^{-9}			
Schieferungszone	$8,1 \cdot 10^{-8}$ - $3 \cdot 10^{-9}$ $8,1 \cdot 10^{-8}$					0,15-130m breit 0,5-10mm Kluftöff- nung
Kontaktbereich basi- scher Dikes mit Ne- bengestein	$5,7 \cdot 10^{-8}$					

Tabelle 4- 3: Vergleich der Durchlässigkeiten für Granit und Gneis aus russischem, schweizerischem und deutschem Datenbestand in m/s.

Das dreidimensionale Modell

Das ausgewiesene regionale Modellgebiet (vgl. Kapitel 4.4.1.2) besitzt eine Fläche von ungefähr 11 km² und eine Tiefe von 1 000 m. Es wurde mit einem Finite-Elementen-Netz vermascht, das im Bereich der Kluftzonen, in denen ein großer Konzentrationsgradient erwartet wird, verfeinert wurde, um numerische Stabilität zu gewährleisten. Jede Modellebene enthält ungefähr 51 000 Elemente (Abbildung 4-12).

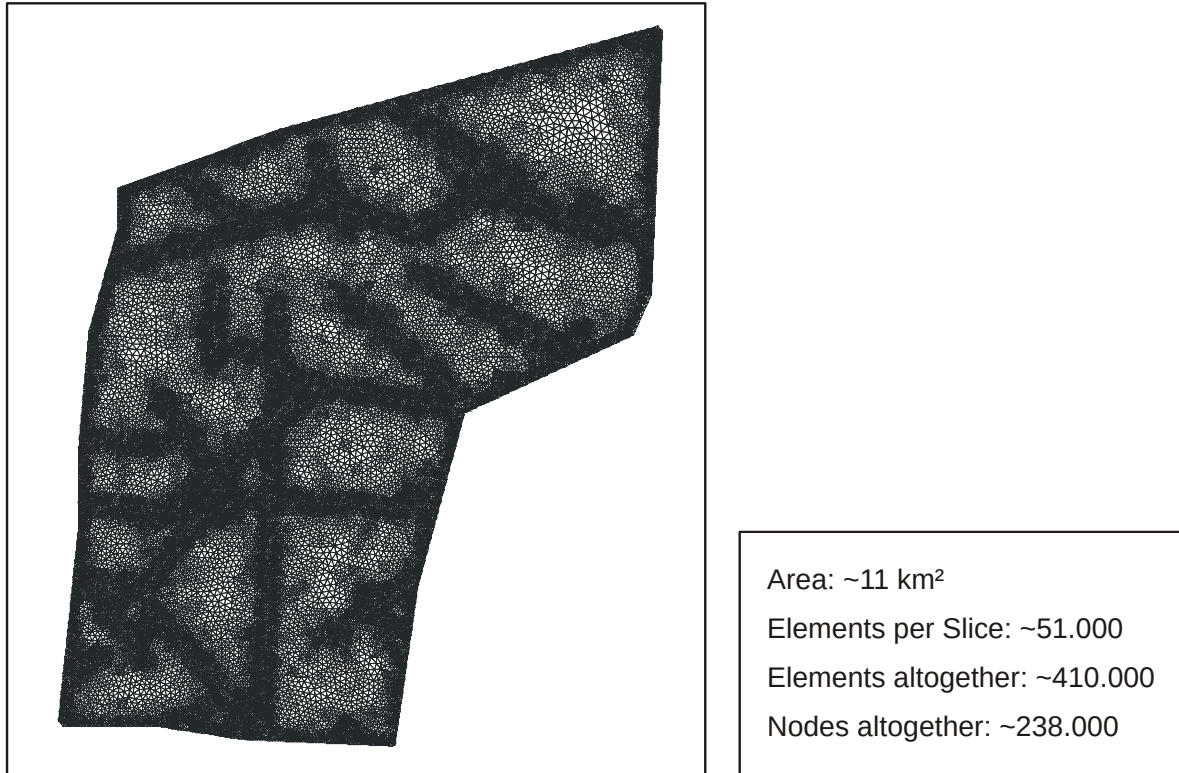


Abbildung 4- 12: Gitternetz des geologischen Strukturmodells

Die vertikale Unterteilung mit Hilfe von acht Schichtflächen, sogenannten Slices, die unterschiedliche Aufgaben erfüllen:

- vier dienen der Abgrenzung der hydrogeologischen Einheiten,
- zwei weisen die Tiefenlage des Endlagergebietes aus und
- die restlichen dienen der numerischen Stabilität.

Die Topographie wurde von dem zuvor erzeugten digitalen Geländemodell übernommen (vgl. Kapitel 4.4.1.1). Die Tiefenangaben der geologischen Schichtgrenzen basieren auf Relationswerten zur Geländeoberfläche aus [Lopatin et al.] und damit auf den Absolutwerten des digitalen Geländemodells (DGM) (Tabelle 4-4) .

Zone	Slice	Slice-Begrenzung	Modelleingabe	Originaldaten Nishnekansker Massiv	Analogiedaten zur Kola Halbinsel [muGOK]
	Slice1	GOK	262-441mNN	Verchne-Itatskij: 230-480 müNN	-
Zone 1	Slice2	Unterkante Sedimente	212-436mNN	5-50 muGOK	-
Zone 2	Slice3	Unterkante Verwitterungs- zone	192-291mNN	60-150 muGOK	0-100
Zone 3-5	Slice4	Oberkantekante Endlager	50mNN	400 muGOK	-
	Slice5	Stüttschicht	-200mNN		
	Slice6	Stüttschicht	-450mNN		
	Slice7	Unterkante Endlager	-554mNN	1000 muGOK	-
	Slice8	Unterkante Kluftzone	-950mNN	100-1000 muGOK	100-7000

Tabelle 4- 4: Hydrogeologisch relevante Schichtgrenzen

Die Tiefenangaben für die Gitterpunkte des Rasternetzes wurden mit Hilfe des DGMs durch Extrapolation erzeugt. Auf der Grundlage des verfügbaren Kartenmaterials [Lopatin, Anderson Dazenko et al], wurden in das regionale Modellgebiet 33 Klüfte in Form von quadrilateralen zweidimensionalen Elementen implementiert (s. Abb. 4-13). Für alle Klüfte wurde eine Kluftneigung von 90° angenommen, da im Bereich Krasnojarsk vorwiegend NW-SE, NS bzw. WE streichende Quer- und Längsklüfte solcher Neigung vorkommen, vgl. Kap. 2 und die Berücksichtigung abweichender Kluftneigungen in einer dreidimensionalen Modellierung nicht nur einen sehr großen Aufwand bei der Modellerstellung bedeutet, sondern auch eine erheblich größere numerische Rechenleistung verursacht.

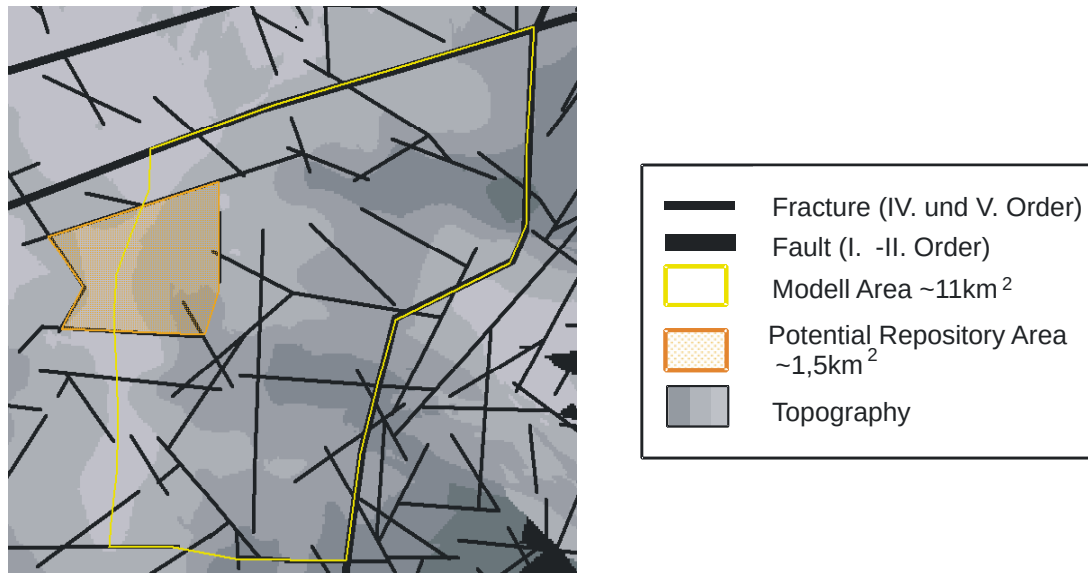


Abbildung 4- 13: Modelliertes Kluftnetzwerk, auf der Grundlage des Kartenmaterials von [Lopatin, Anderson, und Dozenko et al.]

Das zweidimensionale Modell

Die Auswirkungen der Kluftneigung auf die Grundwasserströmung werden in einem zweidimensionalen Modell untersucht. Die Kluftöffnungsweite wurde gemäß [Anderson et al. 1998] im Bereich zwischen einem Zentimeter bis hin zu einem Meter variiert. Der geologische Profilschnitt des zweidimensionalen Modells wurde im zuvor für die dreidimensionale Modellierung ausgewiesenen Bereich lokalisiert. Der Schnitt verläuft entlang der Ausbreitungsrichtung der Radionuklide vom potentiellen Endlagergebiet im Westen in östlicher Richtung (Abbildung 4-14 und Abbildung 4-16). Das geologische Profil besitzt eine Länge von etwa 2,2 Kilometern und eine Tiefe von 1,4 km. Es beginnt im Westen in Höhe einer Wasserscheide und endet im Osten im Bereich einer Niederung. In seinem Verlauf werden mehrere Klüfte geschnitten (Abbildung 4-14).

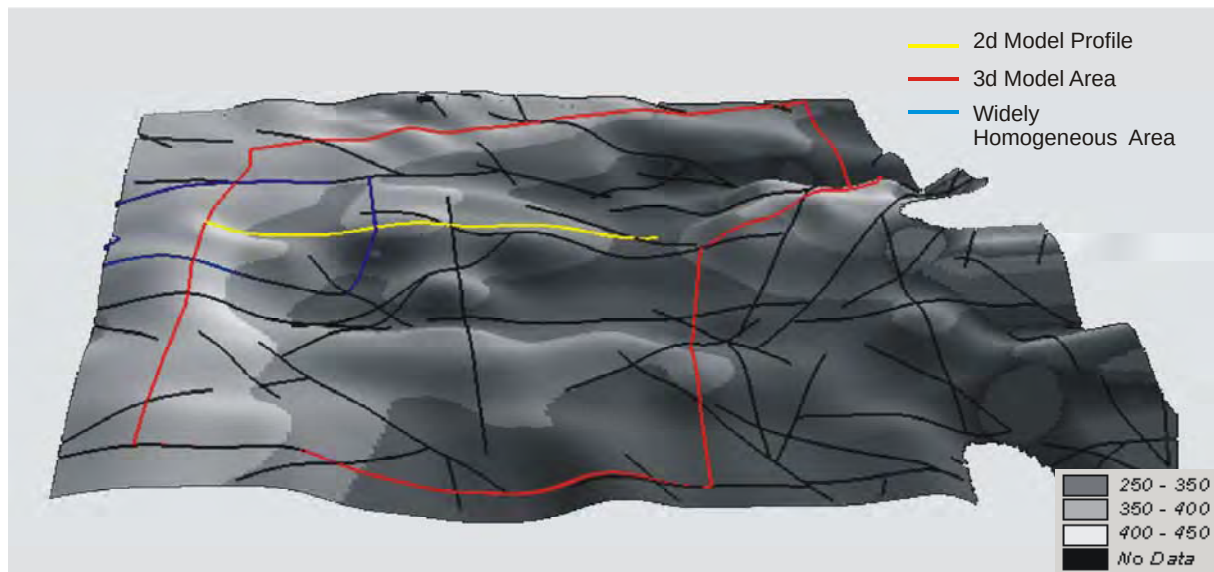


Abbildung 4- 14: Digitales Geländemodell mit Kluftnetzwerk, dreidimensionalem Modellgebiet (rot) und zweidimensionalem Profilschnitt (gelb)

Die Fläche von etwa $3,1 \text{ km}^2$ wird mit einem Finiten-Elemente-Netz belegt, das etwa 61 000 Elemente und 31 000 Knoten enthält. Auch in diesem Modell wird im Bereich der Schichtgrenzen und Kluftzonen feiner diskretisiert. Wie schon die stark vereinfachte hydrogeologische Darstellung in Abb. 4-11 zeigt das dargestellte geologische Profil in Abb. 4-15 deutlich die beiden unterschiedlichen Grundwasserleiter. An der Oberfläche befindet sich die Verwitterungszone, die im Modell als quasi-poröses Medium betrachtet wird. Im östlichen Niederungsbereich wird die Verwitterungszone von einer sedimentären Deckschicht überlagert. Der darunter befindliche Kluftgrundwasserleiter besteht aus nahezu horizontal und vertikal verlaufenden Klüften und Schieferungszonen, welche die Gesteinsmatrix in verschiedenen große Blöcke untergliedert, wie es für Festgesteine charakteristisch ist. In das Modell wurden vier Einzelklüfte sowie zwei Schieferungszonen unterschiedlicher Mächtigkeit und Kluftanzahl implementiert. Die sich von der Gesteinsmatrix unterscheidende Leitfähigkeit der Schieferungszonen ist Ausdruck der unzähligen kleinen und im Modell aufgrund des gewählten Maßstabs in diesem Bereich nicht betrachteten Gesteinsrisse. Die Klüfte werden mit Hilfe eindimensionaler Elemente abgebildet.

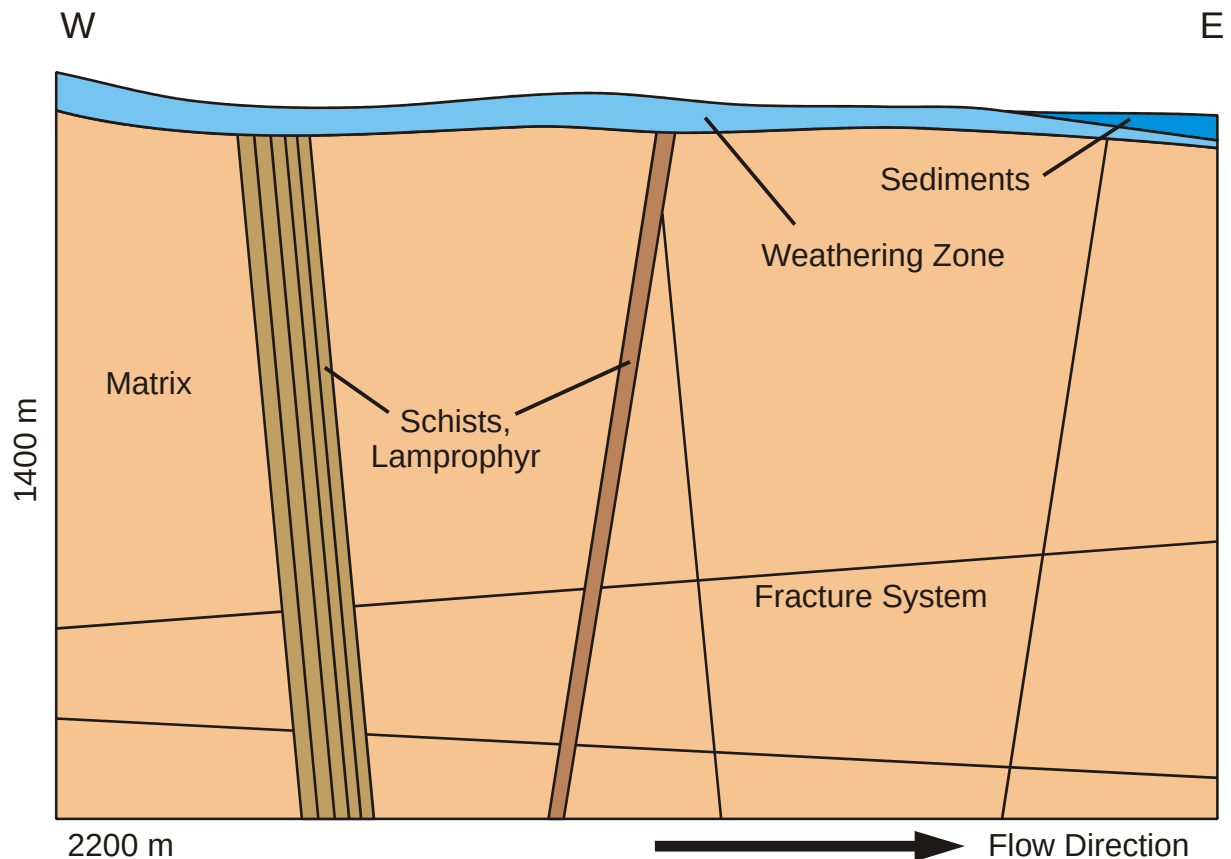


Abbildung 4- 15: Profilschnitt im Untersuchungsgebiet Itatskij, erzeugt auf der Grundlage des dreidimensionalen geologischen Strukturmodells

Anfangs- und Randbedingungen

Damit das Programm die Strömungs- und Transportgleichung lösen kann, ist die Eingabe von Anfangs- und Randbedingungen notwendig. Die aus den Ergebnissen der Standorterkundung verfügbaren Angaben wurden mit Hilfe von Analogieschlüssen vervollständigt.

Die Grundwasseroberfläche wiederholt in geglätteter Form das Relief und wurde aus den Werten des Berichtes [Anderson et al. 1998] und auf der Grundlage des erstellten DGMs erzeugt (Abb. 4-7). Der Grundwasserstand beläuft sich demnach auf Werte zwischen 20 bis 30 m uGOK im Bereich der Grundwasserscheide und 2 bis 10 m uGOK in den Niederungen. Der Grundwasserstand fällt damit im Modellgebiet von Westen nach Osten hin ab und gibt die Grundwasserströmungsrichtung vor (Abb. 4-16). Es handelt sich um eine freie Grundwasseroberfläche, die auch dementsprechend in das dreidimensionale Modell implementiert wurde.

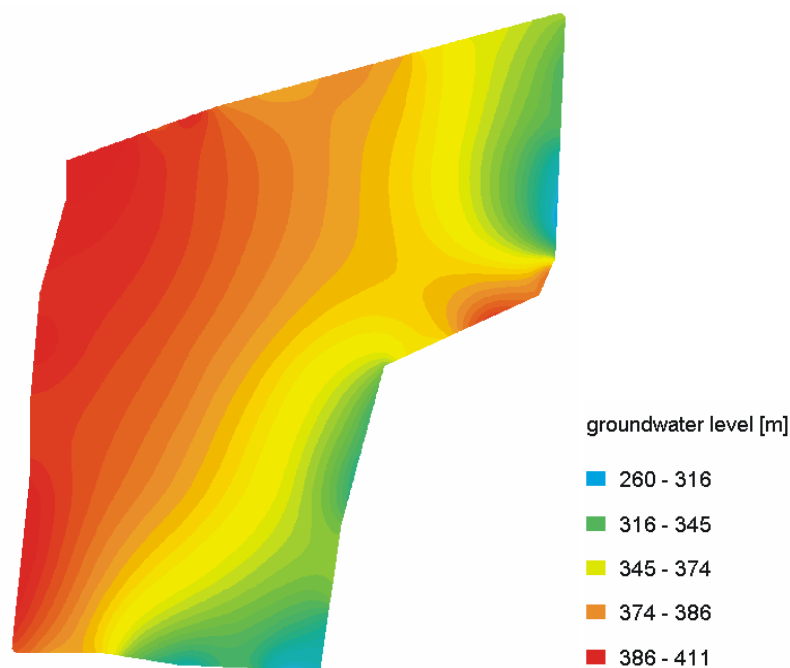


Abbildung 4- 16: Grundwasseroberfläche im Modellgebiet

Als Grundwasserneubildung wurde ein im zeitlichen Verlauf konstanter, über das gesamte Gebiet gleichmäßig verteilter Wert von $1,64 \cdot 10^{-4}$ m/d angenommen (Abbildung 4-17). Dieser wurde aus den vorhandenen Niederschlags- und Evapotranspirationsdaten abgeschätzt (s. Tabelle 4-5 und Kapitel 2.1). Da das Gebiet zwischen Malij Itat und Bolshoj Itat intensiven Pflanzenwuchs aufweist und die oberflächennahen porösen bzw. quasi-porösen Deckschichten gut durchlässig sind, ist ein nur geringer Oberflächenabfluss zu erwarten. Daher erscheint eine Abschätzung der Grundwasserneubildung aus den vorhandenen Niederschlags- und Evapotranspirationsdaten gerechtfertigt.

Niederschlag [mm/a]	540-560
Evapotranspiration [mm/a]	480-500

Tabelle 4- 5: Niederschlag und Evapotranspiration in Krasnojarsk

Als hydraulische Randbedingung wurde die Dirichletbedingung gewählt und mit den Grundwasserhöhen entsprechend der Grundwasseroberfläche belegt (Abbildung 4-17). Der untere Modellrand ist für einen Grundwasserein- bzw. -ausstrom undurchlässig.

Das zweidimensionale Modell enthält neben den hydraulischen auch zeitunabhängige Wärme-randbedingungen, die das natürliche Wärmefeld im Untergrund beschreiben. Die Wärme-randbedingung wurde am oberen Modellrand entsprechend den Angaben zum Temperaturverlauf in Kap. 2.7.4 auf 2 °C festgelegt. Der untere Modellrand in 1 400 m Tiefe hat einen Wert von 42 °C, was einem Wärmegradienten von ungefähr 3 °C pro 100 m entspricht. Die Eingabewerte für die Wärmeparameter sind in Tabelle 4-6 enthalten.

Als Quellterm wurde zum einen ein zeitunabhängiger Tracer, zum anderen der zeitabhängige Konzentrationsverlauf des Leitnuklids Cäsium-135 aus der 1d-Nahfeldmodellierung mit GRAPOS gewählt.

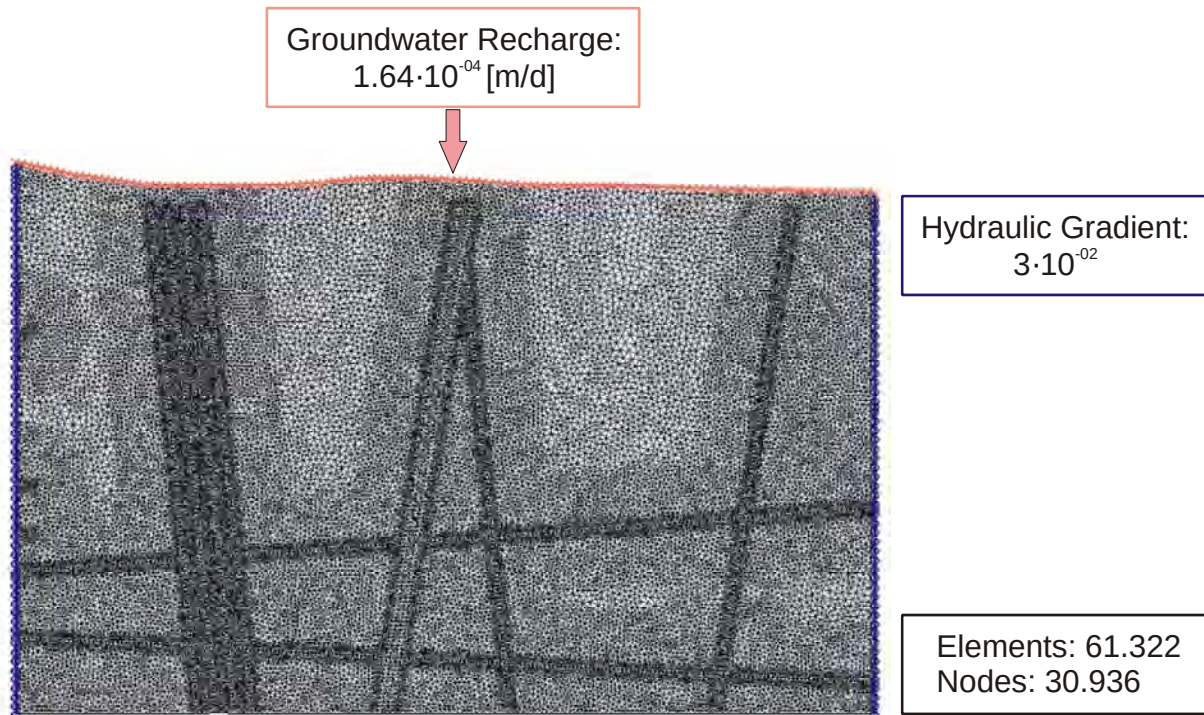


Abbildung 4- 17: Zweidimensionales Modellgebiet mit Randbedingungen und Diskretisierung.

	Wärmekapazität [$10^6 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$]	Wärmeleitfähigkeit [$\text{J/m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$]
Fluid	4,17	0,60
Solid	2,14	2,90

Tabelle 4- 6: Parameter zum Wärmetransport

4.4.2 Modellaufbau EMOS

Mit dem Programm EMOS werden dreidimensionale Transportvorgänge eindimensional modelliert. Dieses ist nur statthaft, wenn charakteristische Ausbreitungspfade definiert werden können. Da davon ausgegangen wird, dass der Transport der Radionuklide vom Endlager bis hin zu den oberflächennahen Deckschichten aufgrund der Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeit im Gesteinsmassiv bevorzugt innerhalb des Kluftsystems erfolgt, ist diese Voraussetzung erfüllt. Die Modellierung wurde auf der Grundlage der verfügbaren Daten zum vorgesehenen Standort Itatskij sowie der aus den 3d-Studien gewonnenen Ergebnisse durchgeführt. Sowohl im Bereich des Nahfeldes als auch für das Fernfeld und die Biosphäre sind Datendefizite zu verzeichnen. Aufgrund der Datenlage haben die Rechnungen lediglich einen orientierenden Charakter. Für eine belastbare Sicherheitsanalyse ist es notwendig, die Anzahl der belastbaren Daten zu erhöhen und in den Modellen zu verwenden. Ein Überblick zu den berechneten Modell-Varianten ist in Abbildung 4-18 dargestellt.

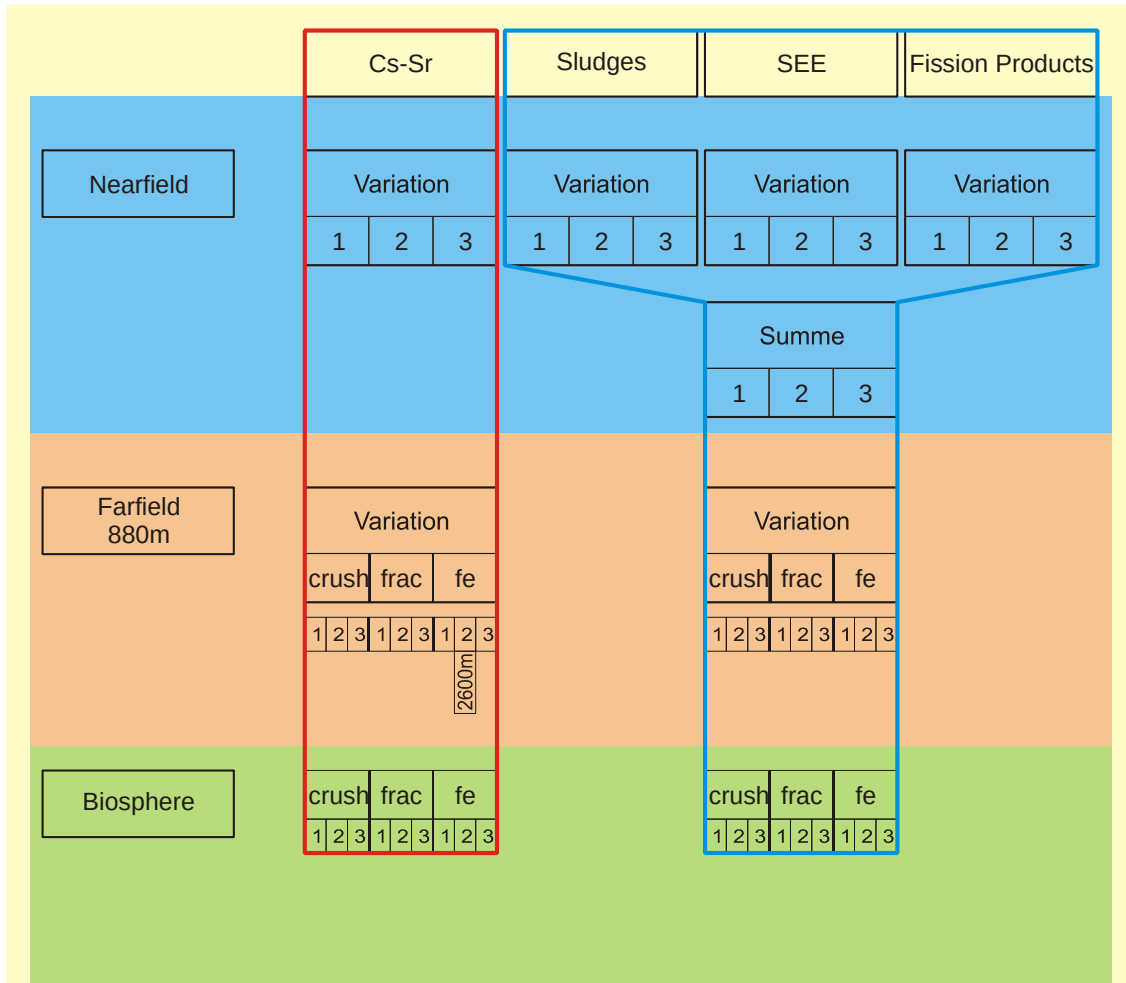


Abbildung 4- 18: EMOS - Überblick der Modell-Varianten

4.4.2.1 Die Nahfeldmodellierung GRAPOS

Aufgrund der noch in der Planung befindlichen Endlagerauslegungsrechnungen besteht bis heute keine endgültige Entscheidung über die Endlagergeometrie der vier Teilbereiche für die Fraktionen Cs-Sr, Schlamm, Seltene Erden und Spaltprodukte. Das Nahfeldmodell wurde dem letzten Stand des Endlagerkonzeptes angepasst (s. Abbildung 4-19, Abbildung 4-20, Abbildung 4-21 und Abbildung 4-22). Es gilt jedoch als sicher, dass die Cs-Sr Fraktion aufgrund ihrer hohen Wärmeproduktion von den übrigen Abfällen getrennt eingelagert wird und ihre Behälter in Abhängigkeit dem sie umgebenden Isolationsmaterial in einem gewissen Mindestabstand voneinander aufbewahrt werden müssen. Dies hat die Notwendigkeit einer Bohrlochlagerung mit nur wenigen Behältern pro Bohrloch und damit eine erheblich größere Endlagerfläche als für die Streckenlagerung der übrigen Fraktionen zur Folge.

Es ist geplant die anfallende Abfallmenge in vier verschiedene Fraktionen auf 10 040 Gebinde aufzuteilen (s. Tabelle 1-13). Davon entfallen 4 350 auf die Cs-Sr-Fraktion, 3 000 auf die Schlamm-Fraktion, 1 250 auf die Seltene Erden-Fraktion und 1 440 auf die Fraktion der Spaltprodukte. Alle Behälter werden nach einer Zwischenlagerzeit von 50 Jahren in die verschiedenen Teilbereiche eingelagert (Abbildung 4-19 und Abbildung 4-20). Die Behälteranzahl, die Strecken- und Bohrlochgeometrie sowie der einzuhaltende Mindestabstand zwischen den Behältern ergibt für den Schlamm eine Einlagerungsfläche von 962 m², für die Seltenen Erden von 400 m², für die Spaltprodukte von 460 m² und für die Cs-Sr Fraktion von 702 960 m².

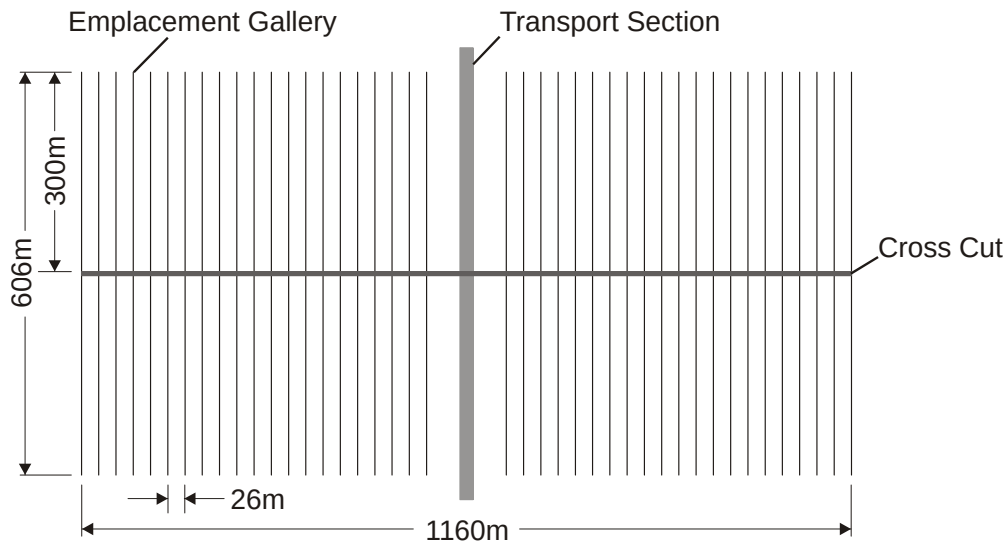


Abbildung 4- 19: Vorläufige Endlagerauslegung für die Bohrlochlagerung der stark wärmeentwickelnden Cs-Sr Fraktion

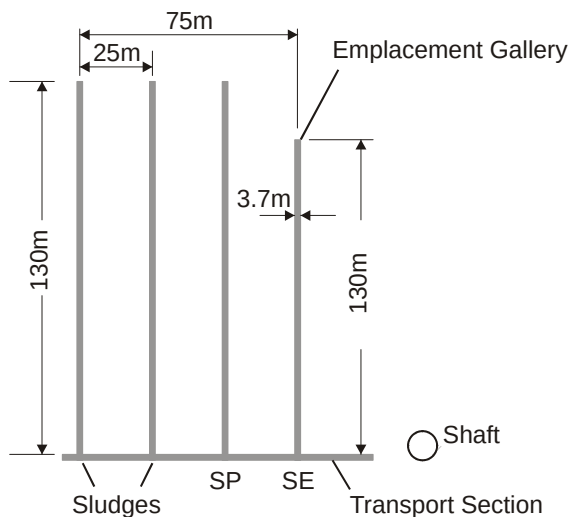


Abbildung 4- 20: Vorläufige Endlagerauslegung für die verschiedenen Teilbereiche der Streckenlagerung der Schlämme sowie der schwach wärmeentwickelnden Fraktionen Seltenen Erden (SE) und Spaltprodukte (SP)

Die Berechnungen des Nahfeldes werden für jede Fraktion getrennt durchgeführt. Für die Bohrlochlagerung sind zwei, für die Streckenlagerung ein Nahfeld-Modell notwendig. Das Nahfeldmodell GRAPOS ist für radialen Schadstofftransport entwickelt worden. Dies macht im Modell eine Vereinfachung der Stollengeometrie der Streckenlagerung erforderlich. Die geplanten Endlagergeometrien für die Bohrloch- und Streckenlagerung sowie ihre Umsetzung in die Nahfeldmodelle sind in Abbildung 4-21 und Abbildung 4-22 dargestellt (vgl. Kapitel 3-5). Eine weitere Vereinfachung stellt die Zusammenlegung mehrerer Behälter pro Bohrloch bzw. Endlagerstrecke zu einem Gebinde dar. Für die Modellrechnungen wurden bei der Cäsium-Strontium-Bohrlocheinlagerung sechs Behälter pro Bohrloch, im Fall der in Strecken eingelagerten Abfälle vierzehn übereinander gestapelten Behälter zu einem Gebinde zusammen-

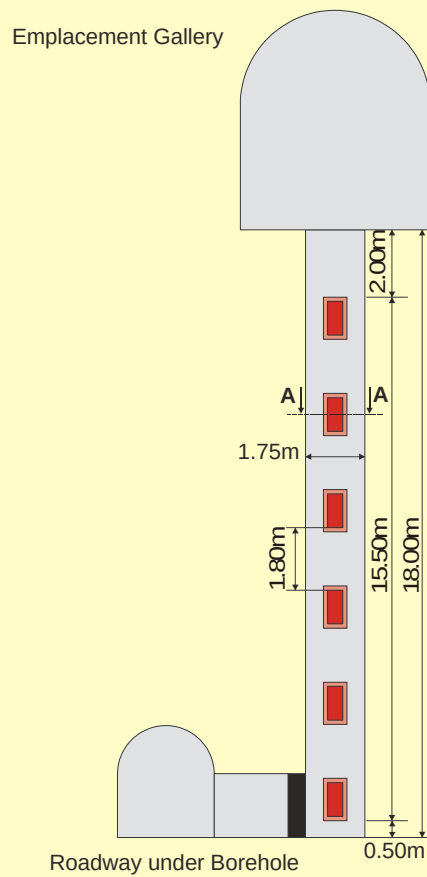
gefasst. Es wird davon ausgegangen, dass diese Vereinfachung nur geringe Auswirkungen auf den, das Nahfeld verlassenden Radionuklidstrom hat. Die Rechnungen werden für jeweils ein Bohrloch bzw. ein Gebinde einer Strecke durchgeführt. Der daraus resultierende Radionuklidstrom wird in einem weiteren Schritt an die tatsächliche Gebindeanzahl angepasst. Auswirkungen der Temperaturerhöhung auf die Prozesse im Nahfeld werden nicht berücksichtigt. Die Modelldaten stammen vom VNIPI PT, sowie aus den Untersuchungs- und Modellergebnissen zum Endlagerkonzept (s. Kap.1 und 3) sowie aus der SAM- bzw. Kristallin I-Studie.

Für die Nahfeldmodellierung aller vier Abfallarten wurden jeweils drei verschiedene Variationen betrachtet (Abbildung 4-18). Sie unterscheiden sich in geometrischer und chemischer Hinsicht. In Variante 1 wurden zunächst Datenlücken in bezug auf die Mobilisierungsraten, Löslichkeiten und Verteilungskoeffizienten durch Untersuchungsergebnisse der Schweizer Studie Kristallin I [NAGRA 1994], sowie mittels Analogieschluss vervollständigt. In den beiden anderen Varianten wurden modifizierte Mobilisierungsraten, Löslichkeiten und Verteilungskoeffizienten im Modell verwendet. Die Eingangsdaten für die Modelle sind in Tabelle 4-10, Tabelle 4-11 und Tabelle 4-12, zusammengestellt. Die Behälterstandzeiten werden nach Einschätzung in Kap. 3.4.3 mit 3 500 Jahren für die Varianten 1 und 2 angenommen. Eine dritte Variante geht dagegen von einem sofortigen Behälterausfall aus. Bei der Bohrlochlagerung ist die hohe Wärmeleistung der Behälter kritisch. Daher wurde in den Varianten 2 und 3 ein thermischer Isolator zwischen Behälter und Bentonitring eingebracht. Dieser gewährleistet aufgrund seiner hohen Wärmeleitfähigkeit, dass eine maximale Temperatur des Einlagerungsbereichs von 100 °C nicht überschritten wird. Da der Isolator aus Schamott besteht und eine effektive Porosität von 10 bis 30 % besitzt, wird sein Volumen dem Hohlraumvolumen der Behälter zugeschlagen.

Der Wert für das Hohlraumvolumen von $0,03 \text{ m}^3$ für die Behälter der Bohrlochlagerung wurde aus der SAM Studie [SAM 1989] für HAW-Kokillen übernommen. Diese besitzen mit einem Durchmesser von 43 cm und einer Höhe von 1,335 m eine den russischen Behältern ähnliche Geometrie. Für deutsche Kokillen ähnlicher Ausmaße sind vergleichbare Werte für das Hohlraumvolumen angegeben.

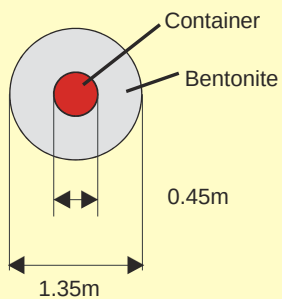
Eine Übersicht über die notwendigen und für die Modellrechnungen gewählten Eingabedaten der drei Varianten ist in Tabelle 4-7 dargestellt.

Concept



Model

Variant 1



Variant 2 and 3

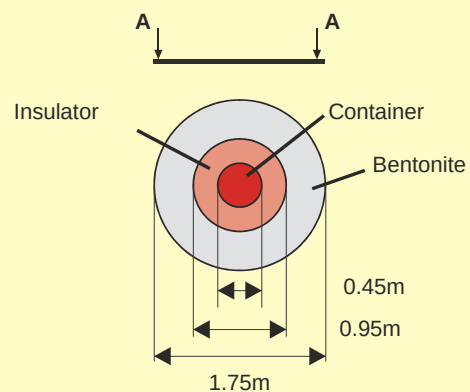
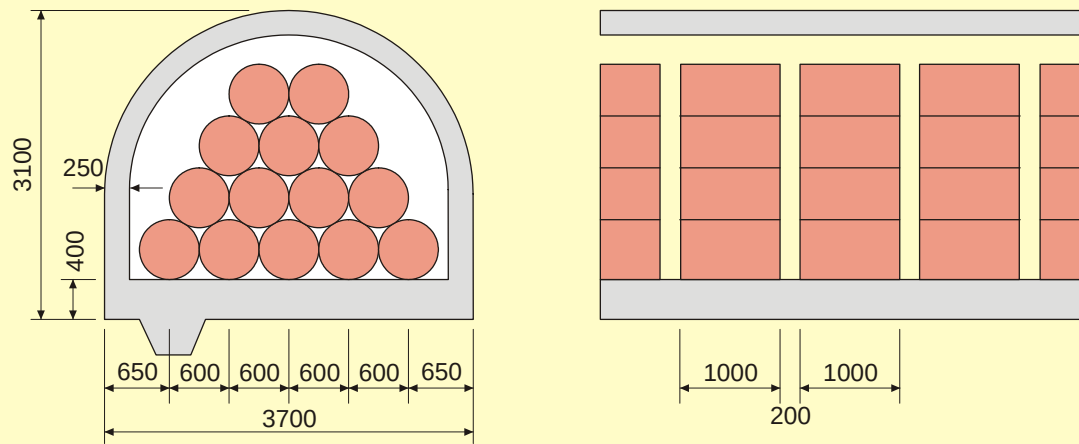


Abbildung 4- 21: Endlagerkonzept und Modellumsetzung der Bohrlochlagerung

Concept



Model

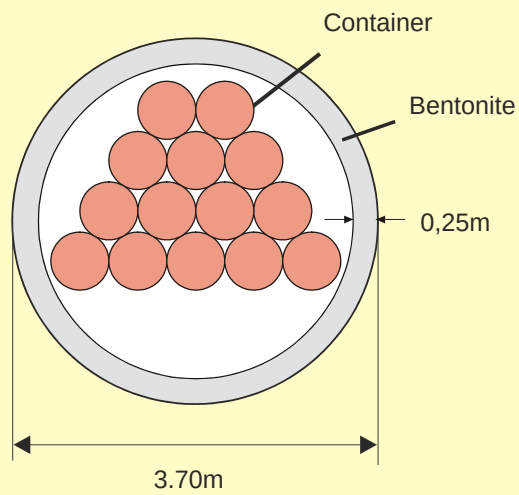


Abbildung 4- 22: Endlagerkonzept und Modellumsetzung der Streckenlagerung

Parameter		Variation 1	Variation 2	Variation 3
Behälter	Anzahl [Stück]	725 ¹		
	Höhe [m]	6 ¹		
	Standzeit [a]	3 500 ¹		
	Zwischenlagerzeit [a]	50 ¹		
	Wassergefülltes Hohlraumvolumen [m ³]	0,18	3,48 ²	
Isolator	Mächtigkeit [m]	-	0,25 ¹	
	Mittlere Effektive Porosität [%]	-	20 ¹	
Bentonit	Mächtigkeit [m]	0,45 ³	0,4 ¹	
	Dichte [kg/m ³]	2 800 ¹		
	Diffusionskoeffizient [m ² /s]	5,0·10 ^{-10 4}		
	Verteilungskoeffizient [m ³ /kg]	vgl. Tabelle 4-12		
EDZ	Volumenstrom [m ³ /a]	vgl. Tabelle 4-13		
Endlagergeometrie	Fläche [m ²]	7,03·10 ^{5 1}		
Chemische Parameter	Radionuklidinventar [Bq]	vgl. Tabelle 4-9		
	Mobilisierungsrate [1/a]	vgl. Tabelle 4-10		
	Löslichkeit [mol/m ³]	vgl. Tabelle 4-11		

¹ Daten gem. Kap 1 und 3² Daten aus [SAM 1989]⁴ Daten aus Studie Kristallin I [NAGRA 1994]

Tabelle 4- 7: Parameter für die Nahfeldmodellierung der Cs-Sr Fraktion

Parameter		Schlamm	SEE	Spaltprodukte
Behälter	Anzahl [Stück]	215 ¹	90 ¹	103 ¹
	Höhe [m]	1 ¹		
	Standzeit [a]	Varianten 1 und 2: 3 500 ¹ Variante 3: -		
	Zwischenlagerzeit [a]	50 ¹		
	Wassergefülltes Hohlraumvolumen [m ³]	0,7 ⁵		
Bentonit	Mächtigkeit [m]	0,25 ¹		
	Dichte [kg/m ³]	2 800 ³⁴		
	Diffusionskoeffizient [m ² /s]	5,0·10 ^{-10 4}		
	Verteilungskoeffizient [m ³ /kg]	vgl. Tabelle 4-12		
EDZ	Volumenstrom [m ³ /a]	vgl. Tabelle 4-13		
Endlagergeometrie	Fläche [m ²]	6 500 ³	3 250 ³	
Chemische Parameter	Radionuklidinventar [Bq]	vgl. Tabelle 4-9		
	Mobilisierungsrate [1/a]	vgl. Tabelle 4-10		
	Löslichkeit [mol/m ³]	vgl. Tabelle 4-11		

¹ Daten gemäß Kap 1 und 3

² Daten aus [SAM 1989]

³ Daten aus Studie Kristallin I [NAGRA 1994]

⁴ Daten entsprechend geometrischer Annahmen

Tabelle 4- 8: Parameter für die Nahfeldmodellierung der Fraktionen Schlamm, Seltene Erden und Spaltprodukte

Radionuklidinventare

In Tabelle 4-9 sind die Radionuklidinventare für den Zeitpunkt zehn Jahre nach Entnahme aus dem Reaktor für die einzelnen Gebinde dargestellt (s. Kapitel 1-5, Tabellen 1-5 bis 1-8). Die in Tabelle 4-9 angegebenen Inventare beziehen sich bei der Cs-Sr-Fraktion auf sechs, bei den drei anderen Abfallarten auf jeweils vierzehn Behälter (Abbildung 4-21 und Abbildung 4-22). Für die Berechnungen wurden nur Radionuklide betrachtet, deren Halbwertszeit größer als 20 Jahre ist.

	Cs/Sr	Schlamm	Seltene Erden	Spaltprodukte
Radionuklidinventar [Bq]	Sr-90: $3,37 \cdot 10^{16}$ Cs-137: $4,46 \cdot 10^{16}$ Cs-135: $2,22 \cdot 10^{11}$ Sm-151: $4,44 \cdot 10^{10}$ Am-241: $5,33 \cdot 10^{11}$ Cm-244: $4,66 \cdot 10^{11}$	Sr-90: $2,90 \cdot 10^{15}$ Cs-137: $1,56 \cdot 10^{15}$ Pu-239: $6,22 \cdot 10^{12}$ U-238: $3,32 \cdot 10^{10}$	Sm-151: $8,70 \cdot 10^{14}$ Ho-166: $1,66 \cdot 10^{08}$ Zr-93: $5,28 \cdot 10^{12}$ Am-241: $1,14 \cdot 10^{10}$ Am-243: $1,04 \cdot 10^{08}$ Cm-244: $1,24 \cdot 10^{10}$ Cm-245: $1,55 \cdot 10^{06}$ Np-237: $7,25 \cdot 10^{11}$	Sm-151: $1,24 \cdot 10^{12}$ Cm-245: $1,14 \cdot 10^{07}$ Pd-107: $4,14 \cdot 10^{11}$ Am-241: $5,18 \cdot 10^{11}$ Cm-244: $1,04 \cdot 10^{11}$ Sn-126: $1,87 \cdot 10^{12}$ Am-243: $5,28 \cdot 10^{09}$ Se-79: $1,24 \cdot 10^{12}$ Tc-99: $3,94 \cdot 10^{11}$

Tabelle 4- 9: Radionuklid-Inventare der konstruierten Gebinde 10 Jahre nach der Entnahme aus dem Reaktor

Mobilisierungsraten der Radionuklide

Die Cäsium-Strontium-Fraktion und die Schlämme sind in eine Glas-Silikatmatrix, die Fraktionen Seltene Erden und Spaltprodukte in eine Mineralmatrix eingebunden. Daher unterscheiden sich die Mobilisierungsraten gleicher, aber in verschiedener Matrix vorkommender Radionuklide voneinander. Nur für einzelne Radionuklide lagen Angaben zur Mobilisierungsrate aus der Glas-Silikat- bzw. Mineralmatrix vor, wobei zu den Daten keine detaillierten Informationen zu ihrer Herkunft vorhanden waren, beispielsweise unter welchen Bedingungen sie bestimmt oder wie sie aus Experimenten abgeleitet wurden. Generell erscheinen diese Raten relativ hoch, insbesondere wenn man davon ausgeht, dass zum Zeitpunkt des Behälterausfalls nach 3 500 Jahren die Umgebungstemperatur wieder annähernd Gebirgstemperatur erreicht. Auffällig ist, dass die Mobilisierungsraten derselben Radionuklide aus der Schlamm-Matrix höher sind als die der Cäsium-Strontium-Fraktion.

Die für die Variante 1 verwendeten Daten sind in der Tabelle 4-10 aufgeführt. Für die Cäsium-Strontium-Fraktion wurden für die Radionuklide Cäsium und Strontium die Daten aus Kap. 1 als orientierende Werte genutzt. Für Americium, Samarium und Curium, die ebenfalls in dieser Fraktion enthalten sind, lagen keine Daten vor. Für sie wurde die Rate von Strontium verwendet, da angenommen wird, dass ihre Mobilisierung nicht schneller als die des Strontiums erfolgt. Für die Schlämme wurden für Uran und Plutonium die Werte aus Kap. 1, für die Nuklide Cäsium und Strontium die Raten aus der Cäsium-Strontium-Fraktion übernommen. Für die übrigen Elemente sind die Werte von Plutonium verwendet worden. Für die Seltenen Erden und Spaltprodukte erschienen die vorliegenden Daten zum Teil inkonsistent. Daher wurde für alle Radionuklide die Freisetzungsrates des Americiums aus der Fraktion Seltene Erden verwendet.

Für die Varianten 2 und 3 wurden bis auf die Radionuklide Strontium und Cäsium der Schlämme dieselben Mobilisierungsraten wie für die Variante 1 genutzt. Für Strontium und Cäsium wurden von VNIPI PT angegebene Werte verwendet (s. Tabelle 4-10).

	Cs/Sr	Schlamm	Seltene Erden	Spaltprodukte
Mobilisierungsrate [1/a] (Abfall-Matrix)	Sr: $4,6 \cdot 10^{-4}$ ¹ Cs: $1,6 \cdot 10^{-3}$ ¹ Am: $4,6 \cdot 10^{-4}$ ² Sm: $4,6 \cdot 10^{-4}$ ² Cm: $4,6 \cdot 10^{-4}$ ² Np: $4,6 \cdot 10^{-4}$ ² Pu: $4,6 \cdot 10^{-4}$ ² Th: $4,6 \cdot 10^{-4}$ ² U: $4,6 \cdot 10^{-4}$ ²	Variante 1: Sr: $4,6 \cdot 10^{-4}$ ² Cs: $1,6 \cdot 10^{-3}$ ² U: $1,8 \cdot 10^{-2}$ ¹ Pu: $5,5 \cdot 10^{-3}$ ¹ Pa: $5,5 \cdot 10^{-3}$ ² Ra: $5,5 \cdot 10^{-3}$ ² Th: $5,5 \cdot 10^{-3}$ ² Variante 2 und 3: Sr: $1,3 \cdot 10^{-2}$ ³ Cs: $3,5 \cdot 10^{-2}$ ³	Pa: $1 \cdot 10^{-4}$ ² Sm: $1 \cdot 10^{-4}$ ² Am: $1 \cdot 10^{-4}$ ² Cm: $1 \cdot 10^{-4}$ ² Np: $1 \cdot 10^{-4}$ ² U: $1 \cdot 10^{-4}$ ² Th: $1 \cdot 10^{-4}$ ² Ho: $1 \cdot 10^{-4}$ ² Zr: $1 \cdot 10^{-4}$ ² Pu: $1 \cdot 10^{-4}$ ²	Se: $1 \cdot 10^{-4}$ ² Tc: $1 \cdot 10^{-4}$ ² Pd: $1 \cdot 10^{-4}$ ² Sn: $1 \cdot 10^{-4}$ ² Sm: $1 \cdot 10^{-4}$ ² Cm: $1 \cdot 10^{-4}$ ² Am: $1 \cdot 10^{-4}$ ² Pu: $1 \cdot 10^{-4}$ ² Np: $1 \cdot 10^{-4}$ ² Pa: $1 \cdot 10^{-4}$ ² Th: $1 \cdot 10^{-4}$ ² U: $1 \cdot 10^{-4}$ ²

¹ Daten aus Kap. 1

² Daten in Analogie zu Kap. 1 mit Orientierung an Werten aus der Studie Kristallin I [NAGRA 1994]

³ Daten VNIPI PT

Tabelle 4- 10: Mobilisierungsraten

Löslichkeit der Radionuklide

Für die Variante 1 wurden die Angaben zur Löslichkeit der Radionuklide aus der Studie Kristallin I [NAGRA 1994] übernommen, da davon ausgegangen wird, dass sich aufgrund der Verwendung von Bentonit als Puffermaterial und der Einlagerung der Abfälle in Stahlbehälter ähnliche geochemische Verhältnisse im Resthohlraumvolumen des Behälters einstellen werden. Die geochemischen Verhältnisse werden durch die Wechselwirkung des zufließenden Grundwassers mit dem Bentonit und den Abfällen bestimmt. Aufgrund der großen Eisenmengen des Behälters und reduzierender Spurenminerale im Bentonit, wie z.B. Pyrit, wird davon ausgegangen, dass sich reduzierende Bedingungen im Nahfeldbereich einstellen. Nach Rechnungen von Curti et al. [6] stellt sich der pH-Wert des Wassers im Gleichgewicht mit dem Bentonit im Bereich von 8 bis 9 ein. Für diese geochemischen Bedingungen wurden in der Studie Kristallin I [NAGRA 1994] Löslichkeiten für die Radionuklide abgeleitet.

Für die Varianten 2 und 3 wurden die Löslichkeitsdaten auf der Grundlage der Daten aus der Studie Kristallin I [NAGRA 1994] abgeleitet. Die Veränderungen gegenüber diesen Daten werden damit begründet, dass die Referenzdaten der NAGRA auf einer Stärke der Bentonitschicht von 138 cm beruhen, während im vorliegenden Beispiel mit 25 bis 45 cm eine wesentlich geringere Bentonitmächtigkeit vorliegt. Es wird daher davon ausgegangen, dass analoge Redoxbedingungen lediglich über einen kurzen Zeitraum herrschen und die Löslichkeiten langfristig höhere Werte aufweisen.

Löslichkeit [mol/m ³]	Variante 1 ¹		Varianten 2 ² und 3 ²	
	Se: 1·10 ⁻⁵	Cm: 1·10 ⁻²	Se: 1·10 ⁻⁴	Cm: 1·10 ⁻²
	Sr: 1·10 ⁻²	Am: 1·10 ⁻²	Sr: 1·10 ⁻¹	Am: 1·10 ⁻²
	Zr: 5·10 ⁻⁶	Np: 1·10 ⁻⁷	Zr: 5·10 ⁻⁴	Np: 1·10 ⁻⁵
	Tc: 1·10 ⁻⁴	Pu: 1·10 ⁻⁵	Tc: high	Pu: 1·10 ⁻³
	Pd: 1·10 ⁻⁸	U: 1·10 ⁻⁴	Pd: 1·10 ⁻³	U: 1·10 ⁻²
	Sn: 1·10 ⁻²	Th: 5·10 ⁻⁶	Sn: 1·10 ⁻²	Th: 5·10 ⁻⁴
	Cs: high	Pa: 1·10 ⁻⁷	Cs: high	Pa: 1·10 ⁻⁴
	Sm: 1·10 ⁻²	Ra: 1·10 ⁻³	Sm: 1·10 ⁻²	Ra: 1·10 ⁻¹
	Ho: 1·10 ⁻²		Ho: 1·10 ⁻²	

¹ Daten aus bzw. in Analogie zur Studie Kristallin I [NAGRA 1994]

² Daten VNIPI PT

Tabelle 4- 11: Löslichkeiten

Verteilungskoeffizienten im Bentonit

Für die Sorption im Bentonit wird von einer linearen Sorptionsisotherme ausgegangen.

In Variante 1 wurden aufgrund fehlenden Datenmaterials die Werte der Studie Kristallin I [NAGRA 1994] übernommen. Im Fall des darin nicht enthaltenen Holmiums wurde der Verteilungskoeffizient des Americiums übernommen, da beide ähnliche chemische Eigenschaften aufweisen.

In den Varianten 2 und 3 wurden Daten des VNIPI PT verwendet.

Die Verteilungskoeffizienten der einzelnen Radionuklide sind in Tabelle 4-12 aufgeführt.

Verteilungskoeffizient (Bentonit) [m ³ /kg]	Variante 1 ¹		Varianten 2 ² und 3 ²	
	Se: 5·10 ⁻³	Am: 5·10 ⁰	Se: 1·10 ⁻³	Am: 5·10 ⁻¹
	Tc: 1·10 ⁻¹	Cm: 5·10 ⁰	Tc: 5·10 ⁻²	Cm: 5·10 ⁻¹
	Pd: 1·10 ⁰	Np: 5·10 ⁰	Pd: 1·10 ⁻¹	Np: 5·10 ⁻¹
	Sn: 1·10 ⁰	Pu: 5·10 ⁰	Sn: 1·10 ⁻¹	Pu: 5·10 ⁻¹
	Sr: 1·10 ⁻²	U: 5·10 ⁰	Sr: 1·10 ⁻³	U: 5·10 ⁻¹
	Cs: 1·10 ⁻²	Th: 5·10 ⁰	Cs: 1·10 ⁻³	Th: 5·10 ⁻¹
	Zr: 1·10 ⁰	Pa: 1·10 ⁰	Zr: 1·10 ⁻¹	Pa: 1·10 ⁻¹
	Ho: 5·10 ⁰	Ra: 1·10 ⁻²	Ho: 5·10 ⁻¹	Ra: 1·10 ⁻³
	Sm: 5·10 ⁰		Sm: 5·10 ⁻¹	

¹ Daten aus bzw. in Analogie zur Studie Kristallin I [NAGRA 1994]

² Daten VNIPI PT

Tabelle 4- 12: Verteilungskoeffizient der Radionuklide im Bentonit

Volumenstrom in der EDZ

Der Volumenstrom in der EDZ bestimmt ganz wesentlich die Höhe der Radionukliddiffusion durch den Bentonit. Der Volumenstrom durch den jeweiligen Endlagerbereich ergibt sich als Produkt aus der Fläche des Endlagerbereichs und der Darcy-Geschwindigkeit. Die Fläche für den Endlagerteilbereich der einzelnen Fraktionen wurde aus den vorläufigen Berechnungen zum Endlagerkonzept s. (Kapitel 3.5), übernommen. Die Darcy-Geschwindigkeit berechnet sich als Produkt aus dem hydraulischen Gradienten mit dem Median-Wert des Durchlässigkeitsbeiwertes aus Tabelle 4-3 zu 9·10⁻⁵ m/a. Für die Bohrlochlagerung wird davon ausgegan-

gen, dass nur 10% des die gesamte Endlagerfläche durchfließenden Volumenstroms durch die Auflockerungszone der Bohrlöcher hindurch fließt. Da die Strecken einen deutlich größeren Querschnitt als die Bohrlöcher haben, wird davon ausgegangen, dass 20% des Volumenstroms durch diese hindurchfließt. Die Modellwerte für den Volumenstrom sind in Tabelle 4-13 aufgeführt.

	Cs/Sr	Schlamm	Seltene Erden	Spaltprodukte
Volumenstrom in der EDZ [m ³ /a]	$6,32 \cdot 10^0$	$1,17 \cdot 10^{-1}$	$5,84 \cdot 10^{-2}$	

Tabelle 4- 13: Volumenstrom der verschiedenen Abfallfraktionen durch die EDZ

4.4.2.2 Die Fernfeldmodellierung CHETMAD

Das Fernfeldmodell beginnt mit seiner Betrachtung an der Grenzfläche zwischen der Excavation Disturbed Zone (EDZ) und dem ungestörten Kristallin und ist damit unmittelbar an das Nahfeldmodell gekoppelt, vgl. Kapitel 4.3.2.2. Es beschreibt den Transport des kompletten langlebigen Radionuklidinventars der unterschiedlichen Abfallgebinde bis hin zu den oberflächennahen Deckschichten. Die Nuklidfreisetzungsraten aus dem Fernfeld werden als Eingangsdaten für das Biosphärenmodell bereitgestellt. Der Transport der Radionuklide durch die Geosphäre wird von einer ganzen Reihe von Prozessen beeinflusst. Neben Dispersion, Advektion, Matrixdiffusion und Sorption sowie dem radioaktiven Zerfall mit dem Aufbau von Tochternukliden können auch die Ausfällung sowie die Wechselwirkung mit Kolloiden den Transport der Radionuklide beeinflussen. Die beiden letztgenannten Prozesse werden in diesem Modell jedoch nicht berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass der Transport der Radionuklide vom Endlager bis hin zu den oberflächennahen Deckschichten aufgrund der Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeit im Gesteinsmassiv bevorzugt innerhalb des Kluftsystems erfolgt. Der von den Radionukliden durchströmte Festgesteinsbereich kann in seiner Struktur und Textur sehr unterschiedlich ausgeprägt sein. Neben wenig gestörten Bereichen mit offenen Einzelklüften kann es auch Zonen mit stark gestörtem und verwittertem Gestein mit hoher Kluftdichte und verschiedenen Kluftfüllungscharakteristika geben (Abbildung 4-23 und Abbildung 4-24). Es erweist sich daher als notwendig, verschiedene Modell-Varianten zu betrachten, die diesen unterschiedlichen Gesteinscharakteristika gerecht werden, so dass deren Einfluss auf den Radionuklidtransport untersucht werden kann. Auf der Grundlage der zu dieser Thematik bisher ungenügenden standortbezogenen Kenntnisse und der stark variierenden Angaben in Bezug auf Eindringtiefe, Fließporosität, Klufthäufigkeit und Kluftöffnungsweite in den verschiedenen Gesteinsbereichen werden die drei verschiedenen Fernfeld-Varianten „crush“, „frac“ und „fe“ untersucht, die sich in den Werten der genannten Parameter unterscheiden und damit die Gesteinsbereiche unterschiedlicher hydraulischer Eigenschaften beschreiben (s. Tabelle 4-15). Es wird erwartet, dass mit diesen Realisationen weite Bereiche des Fernfeldes, das die Radionuklide auf ihrem Transportweg durchlaufen, abgedeckt werden. Dabei stellen die Varianten „frac“ und „crush“ Modellbeispiele aus der Studie SPA [8] dar. Sie basieren auf der Grundlage der in der Studie Kristallin I [2] verwendeten Modell-daten. Die Variante „crush“ beschreibt eine stark zerrüttete Gesteinszone, die mit Verwitterungsprodukten angereichert ist wie man sie z.B. in Schieferungszonen erwartet (Abbildung 4-23). Die Variante „frac“ enthält offene unverfüllte Kluftstrukturen mit einer deutlich geringeren Kluftöffnungsweite als in die Variante „crush“ und kann in einem wenig gestörten Gesteinsbereich angetroffen werden (Abbildung 4-24). Die dritte Variante „fe“ beruht auf den Angaben in Berichten VNIPI PT von 1996 und 2001 zum im Nishnekansker Massiv vorkommenden Granit. In allen Realisationen wird eine planare Kluftgeometrie angenommen.

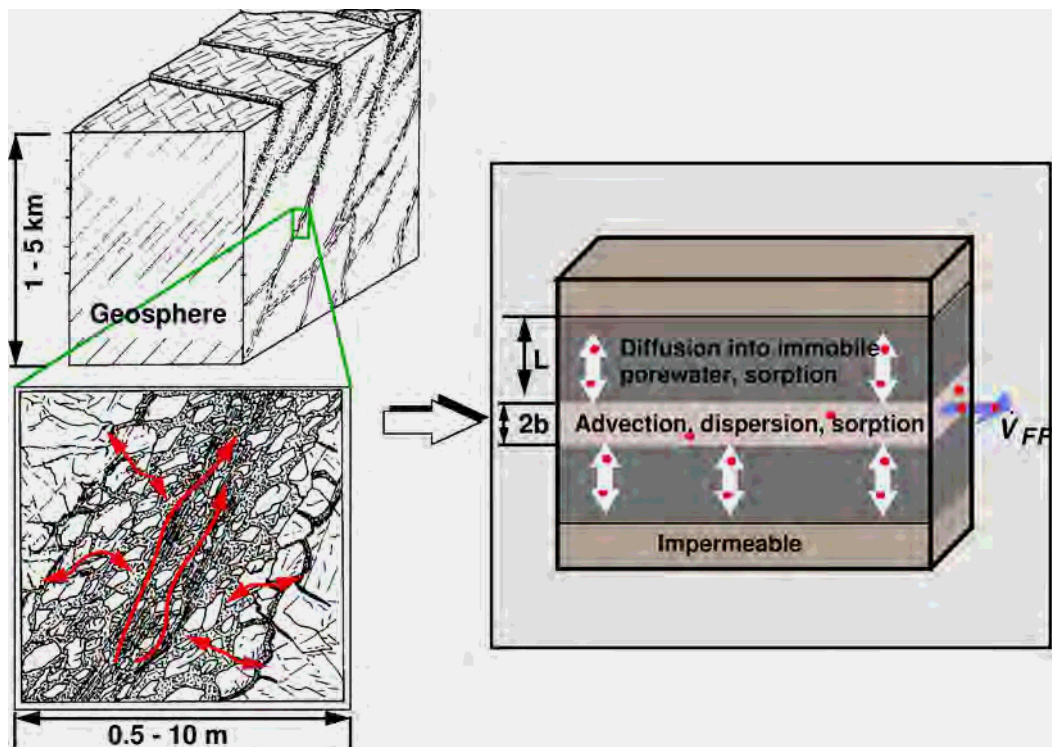


Abbildung 4- 23: Zone hoher Kluftdichte und ihre Umsetzung im Fernfeld-Modell „crush“

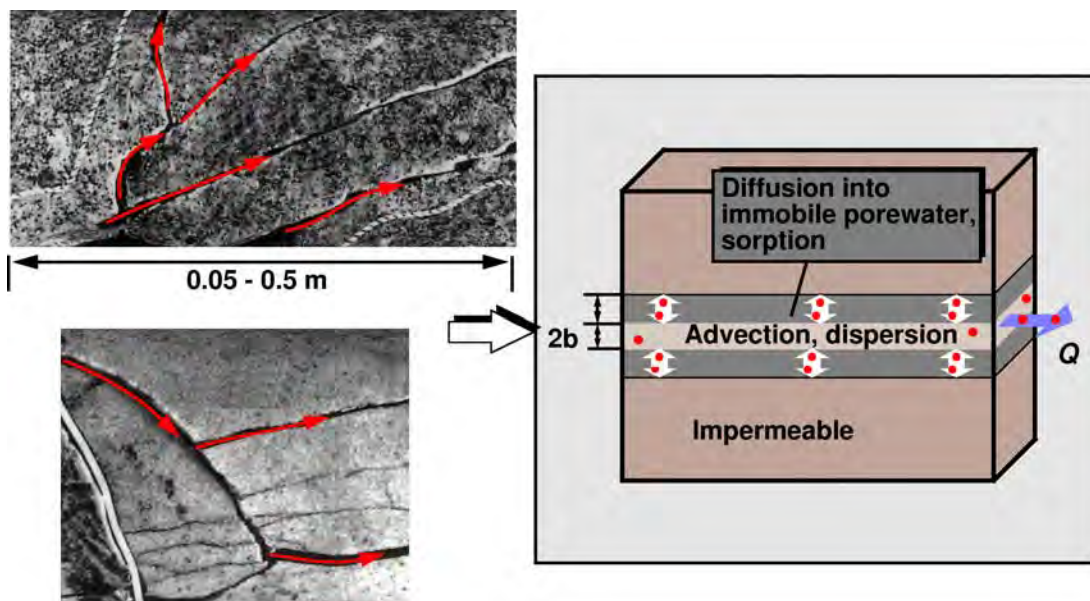


Abbildung 4- 24: Zone mit unverfüllten Klüften und ihre Umsetzung im Fernfeld-Modell „frac“

Tabelle 4-14 gibt einen Überblick über die in den verschiedenen Abfallarten enthaltenen Radionuklide. Sie verdeutlicht das für die Schlämme sowie die Fraktionen Seltene Erden und Spaltprodukte zusammengefasste Radionuklidinventar.

Tabelle 4-15 enthält die verwendeten Modelldaten. Die Peclet Zahl gibt das Verhältnis der Transportweglänge zur Dispersionslänge an. Die Volumenströme für die einzelnen Fraktionen ergeben sich aus dem Produkt der Querschnittsflächen der verschiedenen Endlagerteilbereiche mit der Darcy-Geschwindigkeit. Da die Endlagerteile für die Schlämme sowie die Fraktionen

Seltene Erden und Spaltprodukte einen gemeinsamen Endlagerbereich besitzen, werden ihre Radionuklidströme aus dem Nahfeldbereich für die Eingabe in das Fernfeldmodell zusammengefasst (s. Abbildung 4-20).

	Cs-Sr	Schlamm	Seltene Erden Elemente	Spaltprodukte
Sr-90	×	×		
Cs-135	×			
Cs-137	×	×		
Sm-151	×		×	×
Cm-244	×		×	×
Pu-240	×		×	×
U-236	×		×	×
Th-232	×		×	×
Am-241	×		×	×
Np-237	×		×	×
U-233	×		×	×
Th-229	×		×	×
U-238		×		
U-234		×		
Th-230		×		
Ra-226		×		
Pu-239		×	×	×
U-235		×	×	×
Pa-231		×	×	×
Zr-93			×	
Ho-166			×	
U-232			×	×
Cm-245			×	×
Am-243			×	×
Se-79				×
Tc-99				×
Pd-107				×
Sn-126				×

Tabelle 4- 14: Verteilung der Radionuklide auf die verschiedenen Abfallarten

	crush	frac	fe
Radionuklidinventar [-]	s. Tabelle 4-9		
Peclet-Zahl [-]	10		
Fließporosität [-]	$0,3^1$	1^1	$0,02^2$
Gesteinsdichte [kg/m^3]	$2\,670^2$		
Matrixdiffusion [m^2/a]	$1\text{e}^{-3\,1}$		
Matrixporosität [-]	$3,9\text{e}^{-3\,2}$		
Eindringtiefe [m]	1^1	$0,5^1$	3^2
Kd-Wert Granit [m^3/kg]	s. Tabelle 4-16		
Volumenstrom der Fraktion Cäsium/Strontium [m^3/a]	$6,32 \cdot 10^{13}$		
Volumenstrom im Fernfeld der Fraktionen Schlamm, Seltene Erden und Spaltprodukte [m^3/a]	$1,17 \cdot 10^{03}$		
Klufthäufigkeit [m/m^2]	$5 \cdot 10^{-2\,1}$	$1 \cdot 10^{-2\,1}$	$2 \cdot 10^{-3\,2}$
Kluftöffnungsweite [m]	$3 \cdot 10^{-1\,1}$	$8 \cdot 10^{-4\,1}$	$3 \cdot 10^{-1\,2}$

¹ Daten aus bzw. in Analogie zur Studie Kristallin I [NAGRA 1994]

² Daten aus Berichte VNIPI PT 1996 und 2001 bzw. daraus resultierende Werte

³ Daten entsprechend geometrischen Modellannahmen

Tabelle 4- 15: Parameter für die verschiedenen Fernfeld- Varianten „crush“, „frac“ und „fe“

Für die Verteilungskoeffizienten der Radionuklide im Granitgestein wurden zwei verschiedene Datensätze verwendet (s. Tabelle 4-16). Für die Variante 1 wurden die Werte für die Radionuklide Americium, Plutonium und Neptunium aus [Anderson et al. 2003] (s. Kap. 2.7.5) verwendet. Bis auf den Wert für Holmium resultieren alle anderen Werte aus der Studie Kristallin I [NAGRA 1994]. Für das Holmium wurde der Wert von Americium verwendet. Die Varianten 2 und 3 enthalten modifizierten Verteilungskoeffizienten.

Verteilungskoeffizient (Granit) [m ³ /kg]	Variante 1		Variante 2 und 3	
	Sr: $1 \cdot 10^{-2}$ ¹ Cs: $4,2 \cdot 10^{-2}$ ¹ Am: $2,4 \cdot 10^0$ ² Np: $1 \cdot 10^{-3}$ ² U: $1 \cdot 10^0$ ¹ Th: $1 \cdot 10^0$ ¹ Sm: $5 \cdot 10^0$ ¹ Pu: $5 \cdot 10^{-1}$ ¹ Cm: $5 \cdot 10^0$ ¹	Pa: $1 \cdot 10^0$ ¹ Ra: $5 \cdot 10^{-1}$ ¹ Zr: $1 \cdot 10^0$ ¹ Ho: $2,4 \cdot 10^0$ ² Se: $1 \cdot 10^{-2}$ ¹ Tc: $5 \cdot 10^{-1}$ ¹ Pd: $5 \cdot 10^{-1}$ ¹ Sn: $5 \cdot 10^{-1}$ ¹	Sr: $1 \cdot 10^{-3}$ ³ Cs: $8,4 \cdot 10^{-3}$ ³ Am: $1 \cdot 10^0$ ³ Np: $5 \cdot 10^{-2}$ ³ U: $5 \cdot 10^{-2}$ ³ Th: $5 \cdot 10^{-1}$ ³ Sm: $5 \cdot 10^{-1}$ ³ Pu: $5 \cdot 10^{-1}$ ³ Cm: $5 \cdot 10^{-1}$ ³	Pa: $1 \cdot 10^{-1}$ ³ Ra: $1 \cdot 10^{-1}$ ³ Se: $1 \cdot 10^{-3}$ ³ Tc: $5 \cdot 10^{-2}$ ³ Pd: $5 \cdot 10^{-2}$ ³ Sn: $5 \cdot 10^{-2}$ ³ Zr: $1 \cdot 10^{-1}$ ³ Ho: $2,4 \cdot 10^0$ ³

¹ Daten aus bzw. in Analogie zur Studie Kristallin I [NAGRA 1994]

² Daten aus Bericht VNIPI PT 1996 mit Orientierung an Werten aus der Studie Kristallin I

³ modifizierte Daten VNIPI PT

Tabelle 4- 16: Verteilungskoeffizienten der einzelnen Radionuklide im Granit

4.4.2.3 Das Biosphärenmodell EXMAS

In dem Biosphärenmodell EXMAS wird die Radionuklidkonzentration im oberflächennahen Aquifer aus den von CHETMAD berechneten Radionuklidfreisetzungsraten aus dem Festgestein und dem Volumenstrom im oberflächennahen porösen Aquifer ermittelt. Die individuelle Strahlenexposition errechnet sich aus den Beiträgen der im Kapitel 4.3.2.3 beschriebenen Expositionspfade. In der Biosphärenmodellierung werden zusätzlich zu den bisher betrachteten Radionukliden kurzlebige Tochternuklide berücksichtigt, da diese einen wichtigen Beitrag zur Strahlenexposition leisten können (Tabelle 4-17). Aufgrund ihrer Kurzlebigkeit wird angenommen, dass sie im radioaktiven Gleichgewicht zu ihren Mutternukliden stehen.

	Cs-Sr	Schlamm	Seltene Erden	Spaltprodukte
Zusätzlich betrachtete Radionuklide	Pa-233	Pb-210	Ra-228	Pu-241
	Ra-225	Pu-239	Th-228	Ra-225
	Ac-225	Ac-227	Ra-225	Ac-227
		Th-227	Ac-227	Ac-225
			Ac-225	Th-227
			Th-227	Ra-228
				Pa-233
				Th-228

Tabelle 4- 17: In der Biosphäre zusätzlich betrachtete Radionuklide

Die restlichen Eingangsparameter für das Biosphärenmodell sind in Tabelle 4-18 zusammengefasst. Ihre Werte für den oberflächennahen Aquifer wurden aus der SPA-Studie [Lührmann et al. 2000] übernommen und entsprechen denen eines mittleren Sandes.

Gesteinsporosität an der Grenzfläche zur Biosphäre [-]	0,2
Gesteinsdichte an der Grenzfläche zur Biosphäre [kg/m ³]	2 500
Verdünnungsfaktor für die poröse Deckschicht [-]	1
Volumenstrom in der Geosphäre [m ³ /a]	8·10 ⁶

Tabelle 4- 18: Modellparameter für das Biosphärenmodell

4.4.3 Ergebnisse der Variationsrechnungen

Im Folgenden wird auf die Ergebnisse der durchgeführten Strömungs- und Transportmodellierungen eingegangen.

4.4.3.1 Ergebnisse der schematischen zweidimensionalen Transportmodellierungen

Im Folgenden werden vier verschiedene Modelle dargestellt, die sich in der Anordnung der Kluftstrukturen unterscheiden. Die Kluftanordnungen sollen einige in der Natur immer wiederkehrende Kreuzungsmuster repräsentieren. Jedes Modell wurde in drei verschiedenen Versionen berechnet, die sich in der Matrixdurchlässigkeit unterscheiden. Die drei Varianten zeigen eine deutliche Abhängigkeit des Transports von den Durchlässigkeitsbeiwerten der Gesteinsmatrix. Nur bei großen Durchlässigkeitsunterschieden zwischen Matrix und Klüftung ergibt sich auch eine große Abhängigkeit zwischen Schadstofftransport und Kluftsystem. Ansonsten erfolgt der Schadstofftransport nahezu unabhängig vom Kluftsystem innerhalb der Gesteinsmatrix. Aufgrund der höheren Matrixdurchlässigkeit in Version 1 erfolgt die Schadstoffausbreitung in dieser schneller als in den Versionen 2 und 3.

Modell 1 (Abbildung 4-25)

Dieses Modell enthält drei zueinander versetzte Klüfte, die horizontal in Richtung des hydraulischen Potentials angeordnet sind. Man kann diese auch als in sich versetzte Lagerkluft bezeichnen. Die Lage der Klüfte ermöglicht die Untersuchung des Schadstoffübergangs zwischen benachbarten und nicht miteinander verbundenen Klüften. Der Schadstofftransport der Versionen 1 und 2 bzw. 3 zeigt vollständig unterschiedliche Transportmuster. Während die Klüfte in Version 1 kaum eine Auswirkung auf den Transport ausüben, wird dieser in Version 2 und 3 außerordentlich stark von ihnen beeinflusst. Die Schadstoffausbreitung findet in Version 1 im wesentlichen in der Gesteinsmatrix statt. In den Versionen 2 und 3 bewegt sich die Schadstofffahne bevorzugt advektiv innerhalb des Kluftsystems, gelangt jedoch durch Diffusion auch in die angrenzende Gesteinsmatrix. Der Kluftversatz führt in den Versionen 2 und 3 dazu, dass der Raum zwischen den Klüften durch den Prozess der Diffusion überbrückt werden muss. Bei gleichmäßiger und lang anhaltender Schadstoffbelastung bildet sich mit der Zeit eine weitgehend gleichmäßige Schadstoffverteilung aus, deren Breite von dem Kluftversatz abhängt. Der Schadstoff innerhalb der Gesteinsmatrix bleibt lange Zeit erhalten.

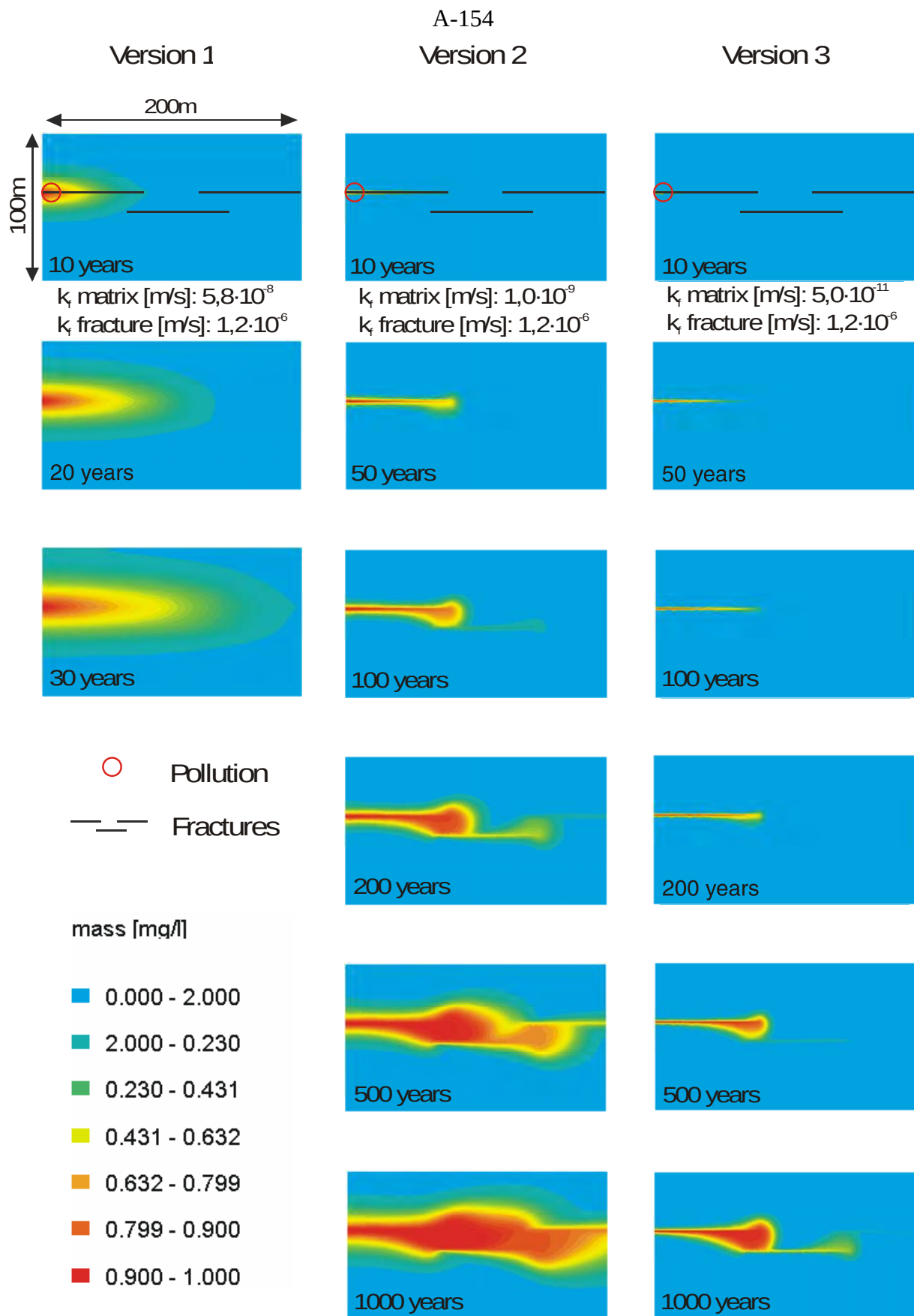


Abbildung 4- 25: Schadstoffausbreitung im Modell 1 mit permanenter Schadstoffquelle

Modell 2 (Abbildung 4-26)

Dieses Modell enthält zwei zueinander senkrecht angeordnete Klüfte. Die eine horizontale Kluft liegt in und die andere senkrecht zur Grundwasserströmung. Ziel ist es, die Auswirkung von quer zur Grundwasserströmung angeordneten Kluftstrukturen für den Schadstofftransport zu untersuchen.

Wie schon bei Modell 1 ist die weitgehende Unabhängigkeit der Schadstoffausbreitung von dem Kluftsystem in Version 1 sowie deren enge Bindung an dieses in den Versionen 2 und 3 erkennbar. Die quer zur Strömungsrichtung ausgerichtete Kluft verursacht in Version 1 lediglich eine leichte Fluktuation im Bereich des Randes der Schadstofffahne.

In den Versionen 2 und 3 zeigt sich ein komplett anderer Ausbreitungscharakter. Obwohl die Grundwasserströmung in der quer zur Strömungsrichtung liegenden Kluft stagniert und daher für den advektiven Transport nicht zur Verfügung steht, wird ersichtlich, dass diese dennoch für die Verteilung des Schadstoffes eine große Rolle besitzt. Sie führt durch Diffusion zu einer Verteilung des Schadstoffes über die gesamte Kluftlänge. Die Kontaktfläche zur Matrix wird dadurch um ein Vielfaches größer und damit auch die Menge des pro Zeiteinheit in das Gestein diffundierenden Schadstoffes. Letztendlich resultiert daraus eine Schadstofffahne, deren Breite eine Abhängigkeit von der Länge der Querkluft aufweist.

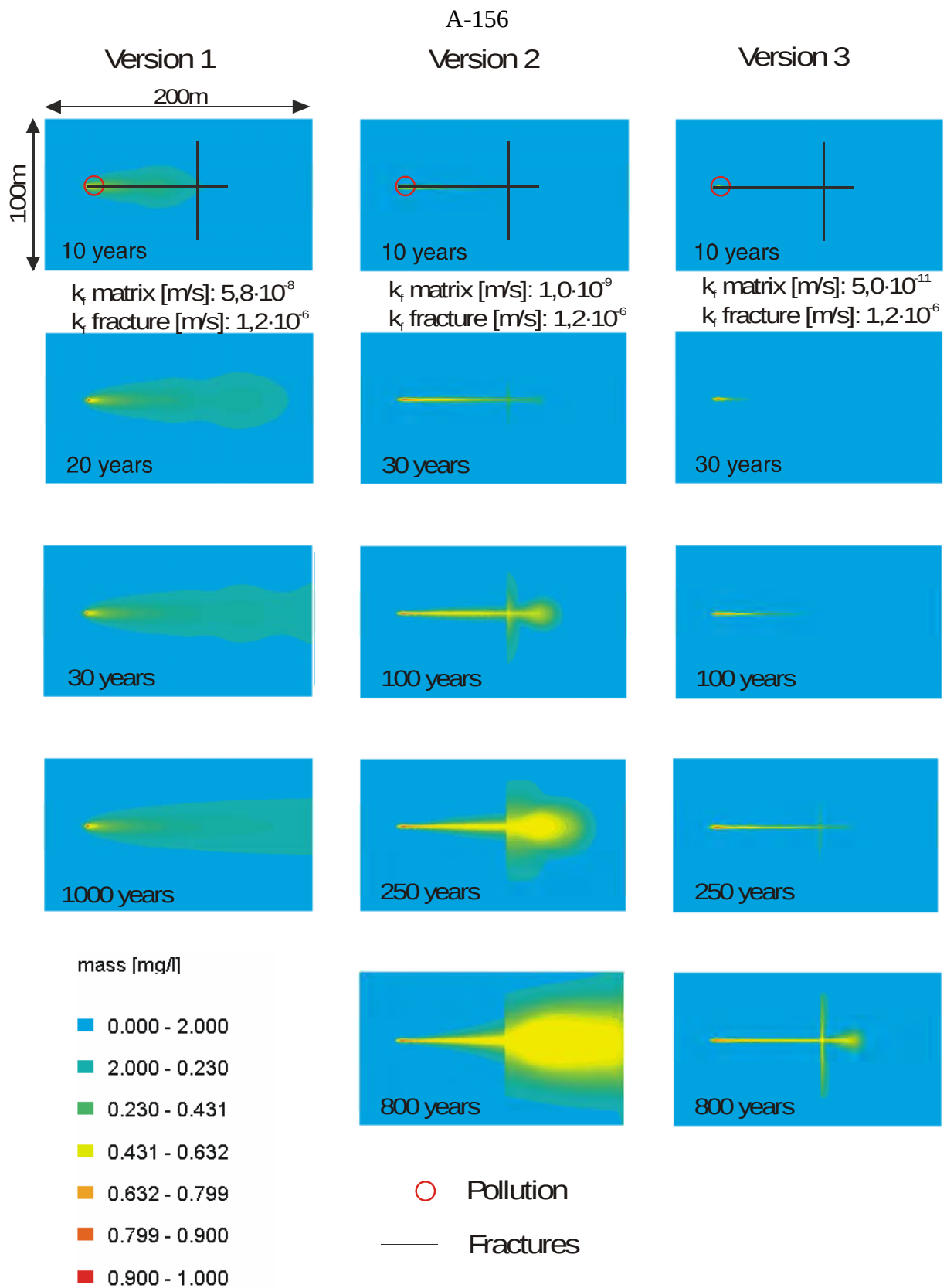


Abbildung 4- 26: Schadstoffausbreitung im Modell 2 mit permanenter Schadstoffquelle

Modell 3 (Abbildung 4-27)

Dieses Modell enthält zwei Klüfte, wobei eine in Richtung der Grundwasserströmung verläuft. Diese wird von einer anderen flach einfallenden Kluft gekreuzt. Mit Hilfe dieser Anordnung wird die Auswirkung von flach einfallenden und die Hauptströmungsrichtung kreuzenden Klüften im Hinblick auf den Transport untersucht.

Ähnlich den Modellen 1 und 2 zeigt sich auch in diesem Fallbeispiel, dass für den Schadstofftransport die Klüfte in Version 1 weitgehend keine und in den Versionen 2 und 3 eine sehr große Bedeutung haben. Daher ähneln sich die Ergebnisse der Version 1 mit denen der Version 1 des Modells 2. In den Versionen 2 und 3 spielt für die Schadstoffausbreitung wiederum die geneigte Kluft eine große Rolle. Sie führt durch Diffusion und Advektion zu einer Verbreiterung der Schadstofffahne. Da jedoch die Advektion eine größere Auswirkung auf den Transport ausübt, kommt es zu einer asymmetrischen Verteilung der Schadstoffausbreitung. Die Breite der Fahne wird dadurch im wesentlichen durch den Kluftteil bestimmt, der in Richtung der Grundwasserströmung geneigt ist. Auf der entgegengesetzten Kluftseite kommt es dagegen zu einer verlangsamten Ausbreitung durch vorwiegend diffusive Prozesse und zu einer Schadstoff-Akummulation in der Matrix vor der Kluft.

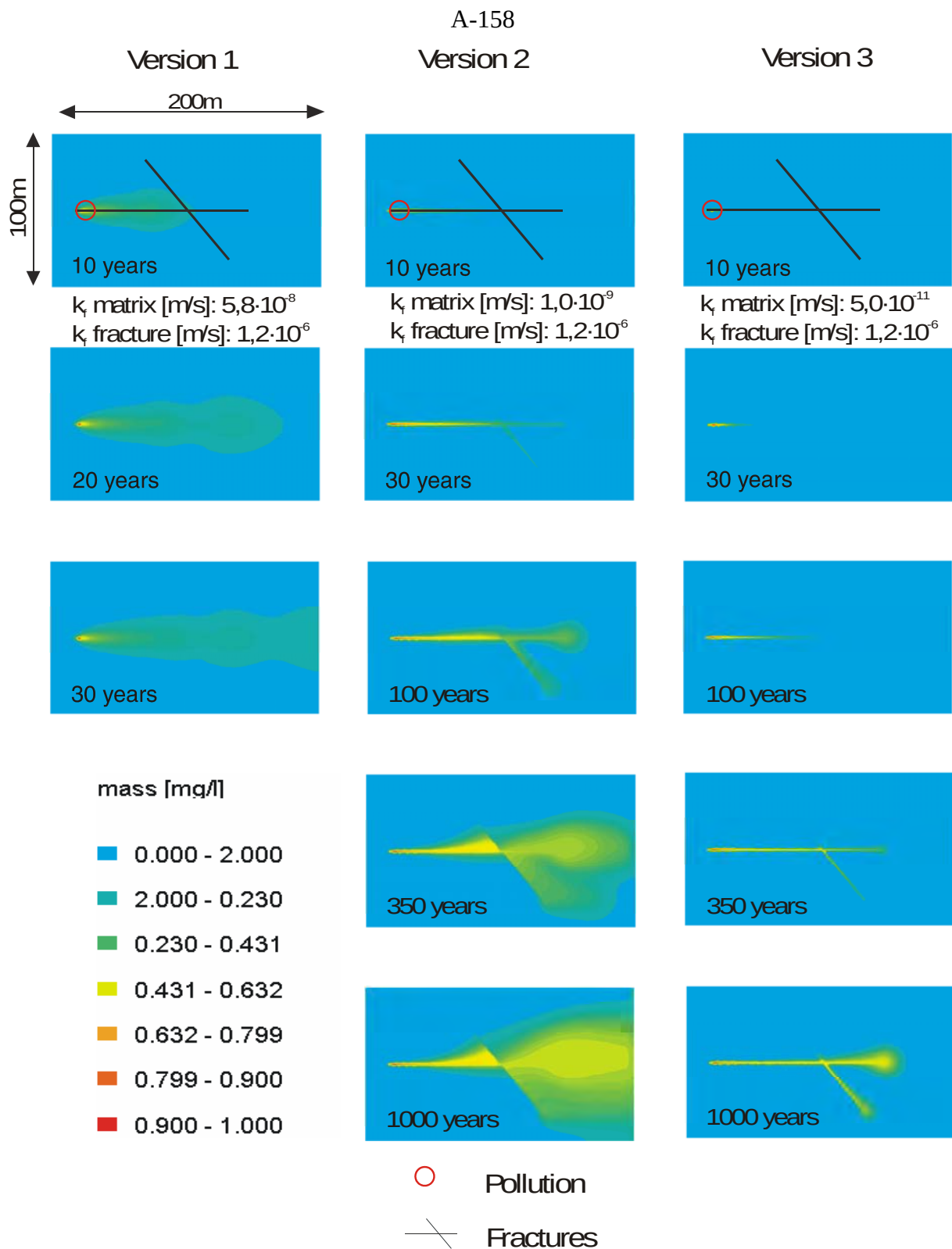


Abbildung 4- 27: Schadstoffausbreitung in Modell 3 mit permanenter Schadstoffquelle

Modell 4 (Abbildung 4-28)

Das vierte Modell beinhaltet eine einzelne horizontal liegende Kluft in Richtung des hydraulischen Potentials. Ziel der Modellierung ist es, den Schadstofftransport ausgehend von einer zeitabhängigen Schadstoffquelle nachzubilden.

In Version 1 breitet sich die Schadstofffahne wie auch schon in den anderen Modellen weit in die Gesteinsmatrix hinein aus. Die Kluft spielt nur eine geringe Rolle für den Transport. Nach Versiegen der Schadstoffquelle bleiben in der Gesteinsmatrix Restmengen des Schadstoffs zurück.

Die Versionen 2 und 3 zeigen, dass der Schadstoff zunächst durch advektiven Transport entlang der Kluft abgeführt wird. Ein erheblicher Teil gelangt jedoch durch Diffusion in die angrenzende Matrix und verbleibt dort über einen sehr langen Zeitraum. Aufgrund der Tatsache, dass innerhalb der Matrix ein nur sehr langsamer diffusiver Schadstofftransport stattfindet, baut sich mit der Zeit eine über einen langen Zeitraum stabile Konzentrationsverteilung zwischen Kluft und Matrix auf. Die Richtung des Schadstofftransportes kehrt sich aufgrund des angestrebten Konzentrationsausgleiches erst wieder sehr viel später in Richtung Kluft um. Die Schadstofffreigabe aus der Gesteinsmatrix findet nur äußerst langsam statt.

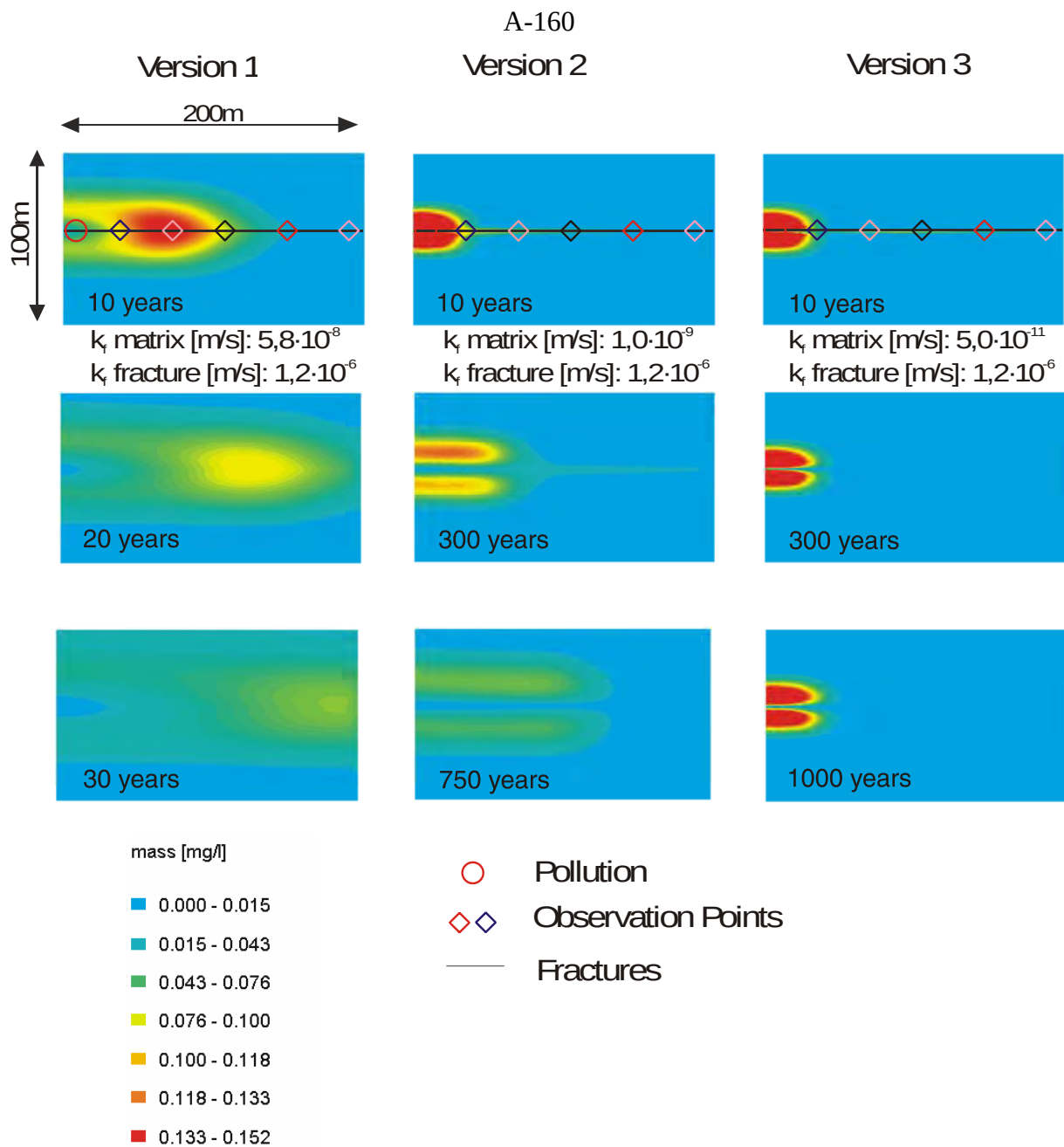


Abbildung 4- 28: Schadstoffausbreitung in Modell 4 mit zeitabhängiger Schadstoffquelle

Beobachtungspunkte, die entlang der Kluft angeordnet sind, zeigen typische Durchbruchskurven, die in Abbildung 4-29 dargestellt sind. Je weiter die Beobachtungspunkte von der Schadstoffquelle entfernt sind, desto kleiner ist die maximale Konzentration, die dort gemessen wird und desto größer ist der „tailing“-Effekt. Der Grund dafür sind die Effekte der Advektion und Diffusion.

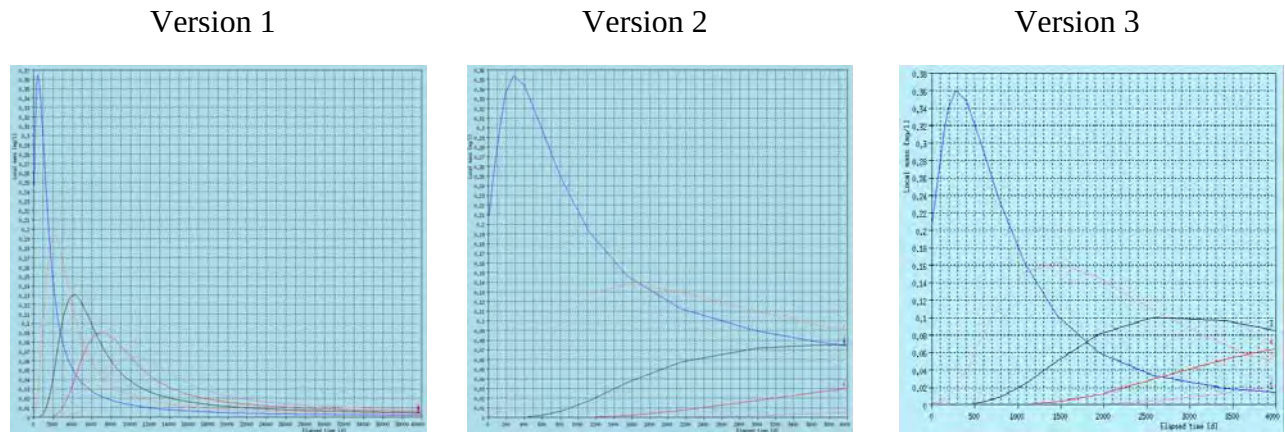


Abbildung 4- 29: Durchbruchkurven für Beobachtungspunkte entlang der in Modell 4 untersuchten Kluft (s. Abb. 4-28)

4.4.3.2 Sicherheitsanalytische Modellrechnungen

Im Folgenden werden die mit dem Programm EMOS erzeugten Ergebnisse der Nahfeld-, Fernfeld- und Biosphärenmodellierungen für die Abfall-Fraktionen Cäsium-Strontium, Schlamm, Seltene Erden und Spaltprodukte vorgestellt. Modellvariationen des Nah- und Fernfeldes wurden durchgeführt, um Aussagen über

- die Relevanz einzelner Modell-Parameter in Bezug auf den Schadstofftransport,
- die Relevanz des Fernfeldes für die Radionuklid-Rückhaltung und
- die Auswirkungen eines frühen Behälterausfalls

zu machen, sowie unterschiedliche

- Nahfeld-Geometrien und
- Fernfeld-Eigenschaften

betrachten zu können.

4.4.3.2.1 Cäsium-Strontium-Fraktion

Modellrechnung für das Nahfeld

Der aus dem Nahfeld der Cäsium-Strontium-Fraktion austretende Nuklidstrom der verschiedenen Varianten ist in Abbildung 4-30, Abbildung 4-31 und Abbildung 4-32 dargestellt. Zu beachten ist der gegenüber den ersten beiden Varianten veränderte Maßstabsbereich des Diagramms für die Variante 3.

Von den insgesamt 12 betrachteten Radionukliden weisen neben Cs-135 lediglich die Radionuklide Pu-240 und U-236 aus der Thorium-Zerfallsreihe sowie die Radionuklide Np-237, U-233 und Th-229 der Neptunium-Zerfallsreihe einen Aktivitätsstrom von mehr als 100 Bq/a auf. Die übrigen Radionuklide sind bis zur Behälter-Ausfallzeit nach 3 500 Jahren weitestge-

hend zerfallen und daher von geringer Bedeutung. In den Varianten 1 und 2 wird der Nuklidstrom lange Zeit vom Cs-135 dominiert, das unmittelbar mit dem Behälterausfall nach 3 500 Jahren aus dem Nahfeldbereich austritt. Die hohe Konzentration lässt sich auf seine gute Löslichkeit zurückführen. Der geringe Verteilungskoeffizient im Bentonit erlaubt einen schnellen Transport durch die technische Barriere und einen frühen Austritt aus dem Nahfeldbereich. Die übrigen Radionuklide werden in Variante 1 aufgrund ihrer hohen Sorption am Bentonit stark, in Variante 2 aufgrund der geringeren K_d -Werte weniger stark zurückgehalten. Speziell beim Pu-240 führt dies zu einer starken Erhöhung der Freisetzungsrates, da es auf Grund des schnelleren Transports weniger stark zerfallen ist.

Die dritte Variante unterscheidet sich grundlegend von den beiden ersten. Durch den frühzeitigen Behälterausfall gewinnen die kurzlebigen Radionuklide Sr-90 und Cs-137 stark an Bedeutung. Ihr geringer Verteilungskoeffizient im Bentonit führt zu einem schnellen Durchsatz durch die technische Barriere. Aufgrund ihres hohen Inventars dominieren diese beiden Nuklide in den ersten 400 Jahren nach der Einlagerung den aus dem Nahfeld austretenden Radionuklidstrom. Aufgrund ihrer kurzen Halbwertszeit erreichen sie bereits nach 50 Jahren ihre maximale Konzentration, die danach schnell wieder abnimmt, so dass nach 500 Jahren das Cäsium-135 wieder die entscheidende Rolle im Aktivitätsstrom übernimmt.

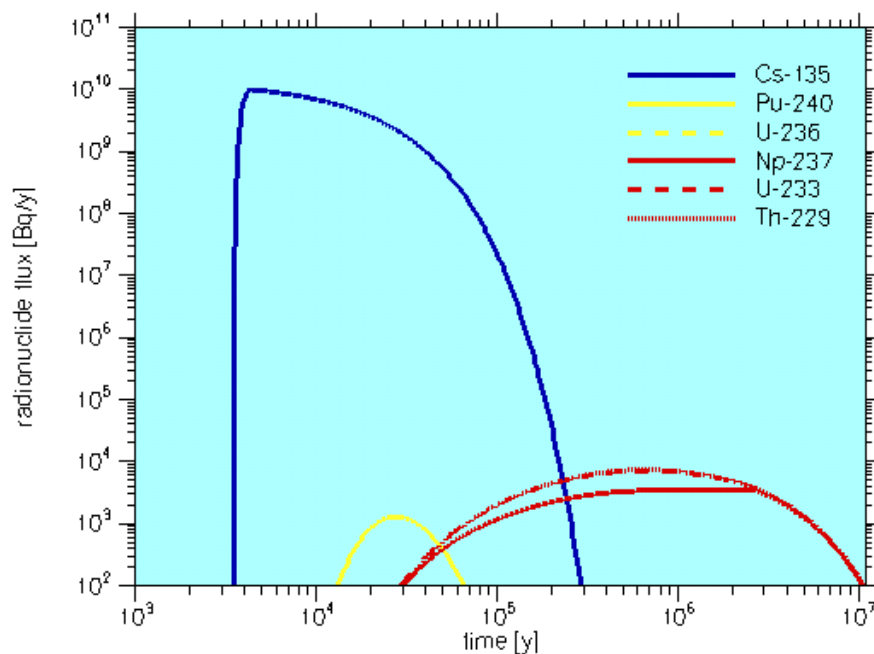


Abbildung 4- 30: Nuklidstrom aus dem Nahfeld der Cäsium-Strontium-Fraktion, Variante 1

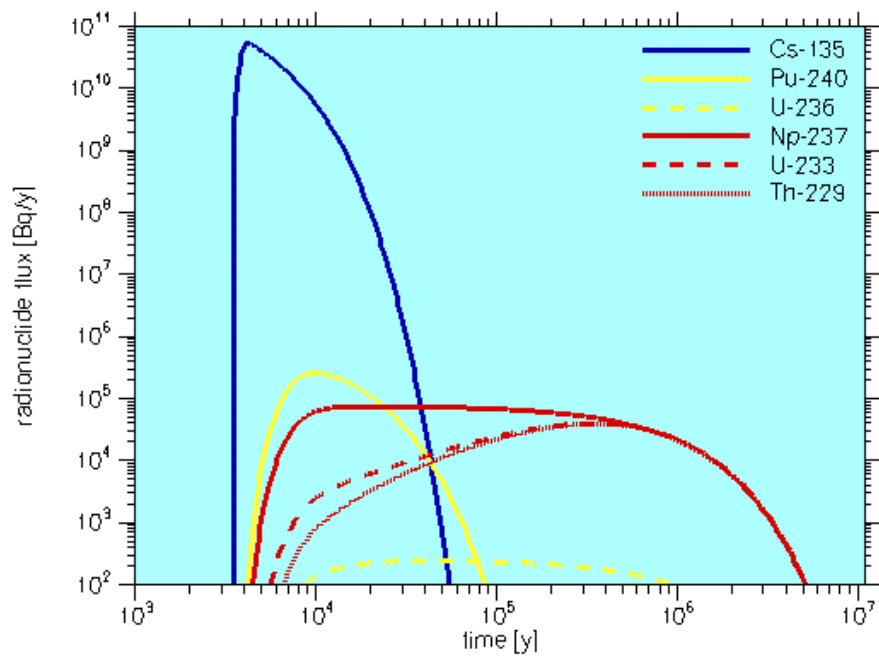


Abbildung 4- 31: Nuklidstrom aus dem Nahfeld der Cäsium-Strontium-Fraktion, Variante 2

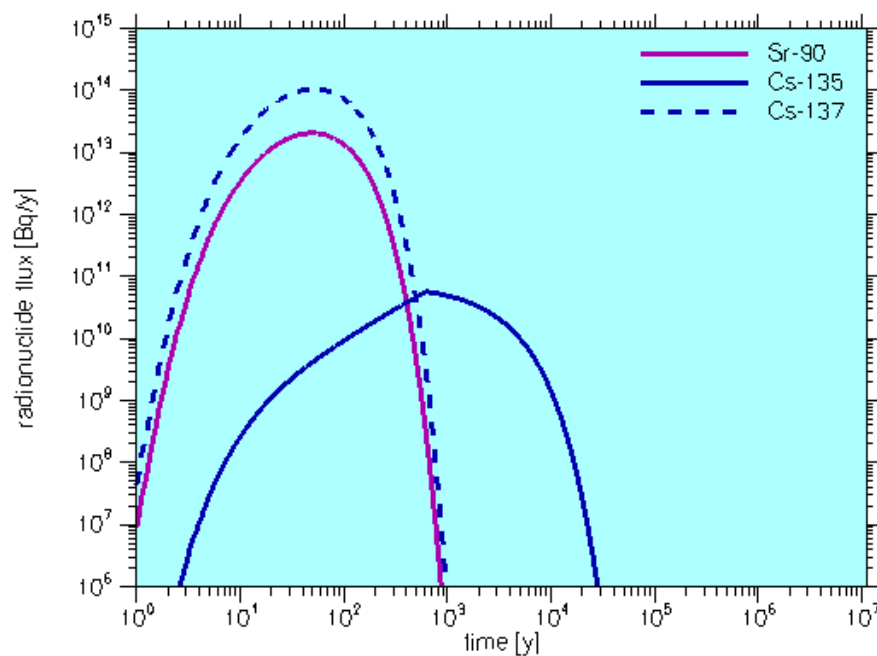


Abbildung 4- 32: Nuklidstrom aus dem Nahfeld Cäsium-Strontium-Fraktion Variante 3

Modellrechnungen für das Fernfeld

Das in allen drei Nahfeld-Varianten ab spätestens 500 Jahren nach Einlagerung dominierende Radionuklid Cs-135 gelangt als erstes in den Fernfeldbereich. Auf Grund seines niedrigen Verteilungskoeffizienten im Granit wird es auch dort sehr schnell transportiert und erreicht die höchsten Konzentrationen im Nuklidstrom.

Beispielhaft für die verschiedenen Varianten und Fernfeld-Realisationen wird der Nuklidstrom von Cs-135 und Np-237 im Fernfeld für die Realisationen „frac“ und „fe“ der Variante 2 untersucht (Abbildung 4-33). Diese wurde gewählt, da sie von den drei gewählten Variationen diejenige mit der höchsten Eintrittswahrscheinlichkeit ist. Die Freisetzungsrate des Np-237 liegt dabei Größenordnungen unter derjenigen des Cs-135. Die Höhe der Radionuklidrückhaltung im Granit wird durch seinen Verteilungskoeffizienten, sowie die Matrixdiffusion bestimmt. Die gegenüber der Realisation „fe“ größere Klufthäufigkeit führt in der Variante „frac“ zu einer verstärkten Matrixdiffusion. Die Radionuklide erfahren dadurch während des Transports durch das Fernfeld eine stärkere Retardation. In den Grafiken wird dieser Effekt anhand der im Fernfeldverlauf zunehmenden Abflachung und Verbreiterung der Freisetzungskurven sichtbar.

Eine Variation der Eindringtiefe in Variante 2 „frac“ macht die Abhängigkeit des Radionuklidtransports von diesem Parameter deutlich (Abbildung 4-34). Durch das tiefere Eindringen der Radionuklide in die Granitmatrix wird ihre maximale Konzentration im Nuklidstrom reduziert und ihre Freisetzung aus dem Fernfeld z.T. extrem verlängert, was auch als „tailing“-Effekt bezeichnet wird.

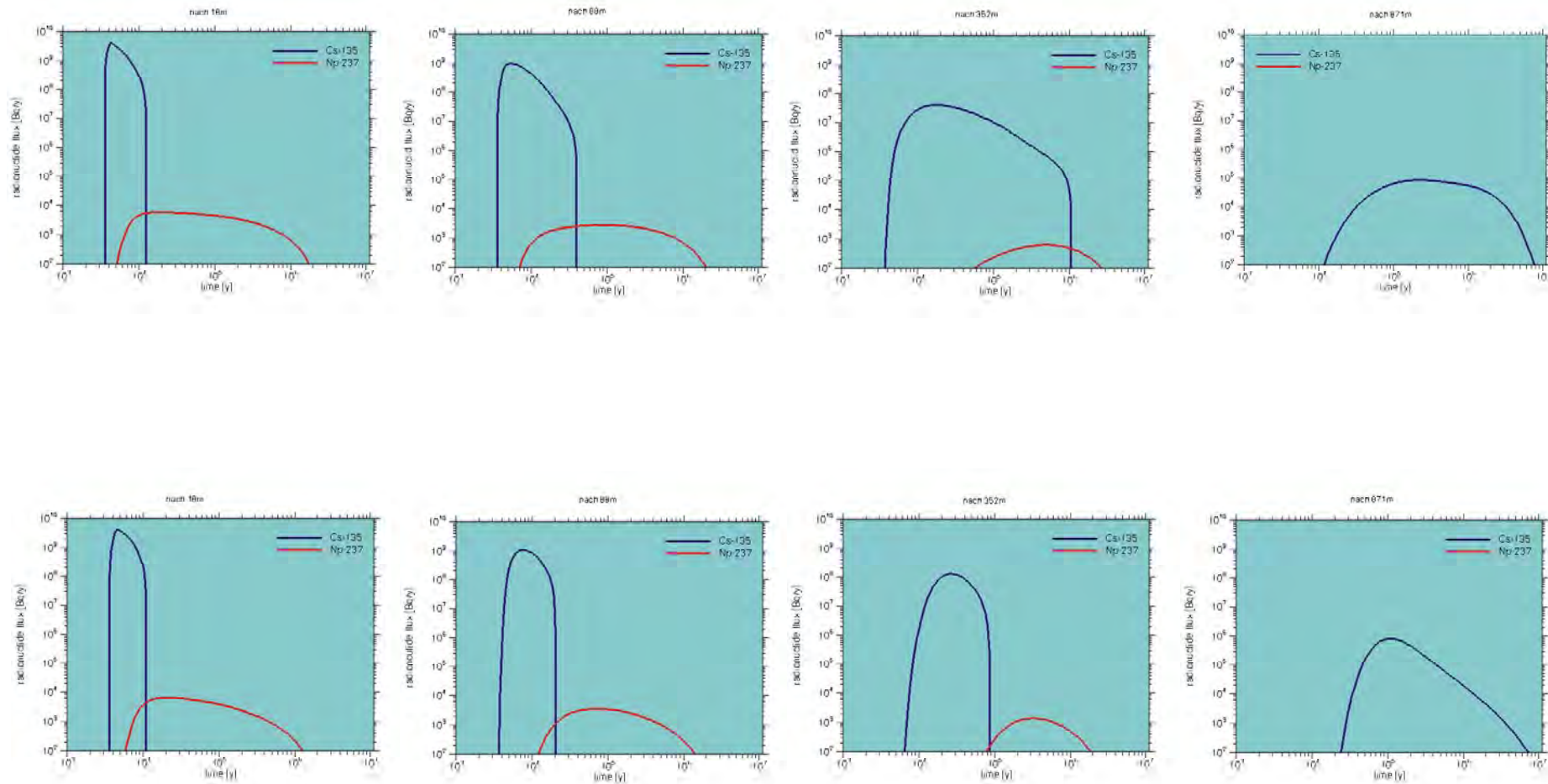


Abbildung 4- 33: Radionuklidstrom für Cs-135 und Np-237 im Fernfeld, Variante 2 „frac“ (oben) und „fe“ (unten)

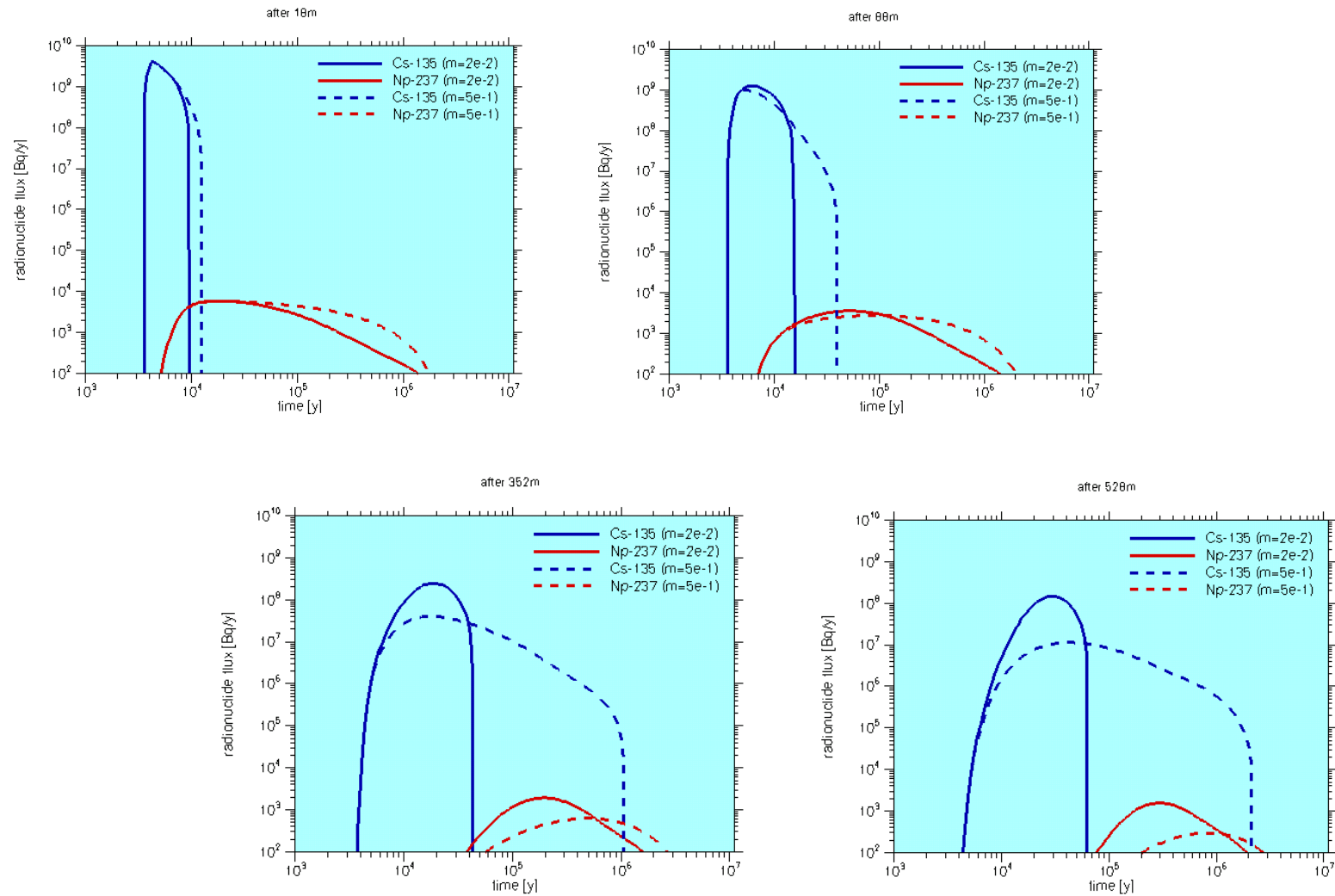


Abbildung 4- 34: Radionuklidstrom für Cs-135 und Np-237 in Variante 2 „frac“ mit unterschiedlichen Eindringtiefen m

Modellrechnungen für die Biosphäre nach 880 m Fernfeld

Von den betrachteten 15 Radionukliden dominieren in den Berechnungen der Biosphäre aller Nahfeld- und Fernfeld-Varianten die Radionuklide Cs-135 und Np-237 (Abbildung 4-35, Abbildung 4-36 und Abbildung 4-37).

Der entscheidende Unterschied zwischen den verschiedenen Fernfeld-Realisationen liegt in der maximal erreichten Strahlenexposition und deren zeitlichem Auftreten (Tabelle 4-19). Diese sind von der maximalen Fließgeschwindigkeit im Fernfeld abhängig, die im Fall der Realisation „frac“ am höchsten und im Fall der Realisation „crush“ am geringsten ist. Daher tritt die Strahlenexposition der Fernfeld-Realisation „frac“ in allen drei Varianten als erste auf, gefolgt von derjenigen der Fernfeld-Realisation „fe“, während diejenige von „crush“ erst 130 000 bis 300 000 Jahren später eintritt.

Die maximal erreichte Strahlenexposition ist in der Fernfeld-Variante „fe“ in allen drei Realisationen am größten, gefolgt von „frac“ und „crush“. Sie erreicht in den Realisationen 2 und 3 mit $4 \cdot 10^{-6}$ Sv/a die höchsten Werte. Dagegen ist diejenige von „crush“ mit Werten zwischen 1 und $4 \cdot 10^{-9}$ Sv/a am geringsten.

Die kurzlebigen Radionuklide Sr-90 und Cs-137, die in Variante 3 den Nuklidstrom aus dem Nahfeld dominieren, spielen in der Biosphäre keine Rolle mehr, da sie während des Transports im Fernfeld zerfallen (s. Abbildung 4-32).

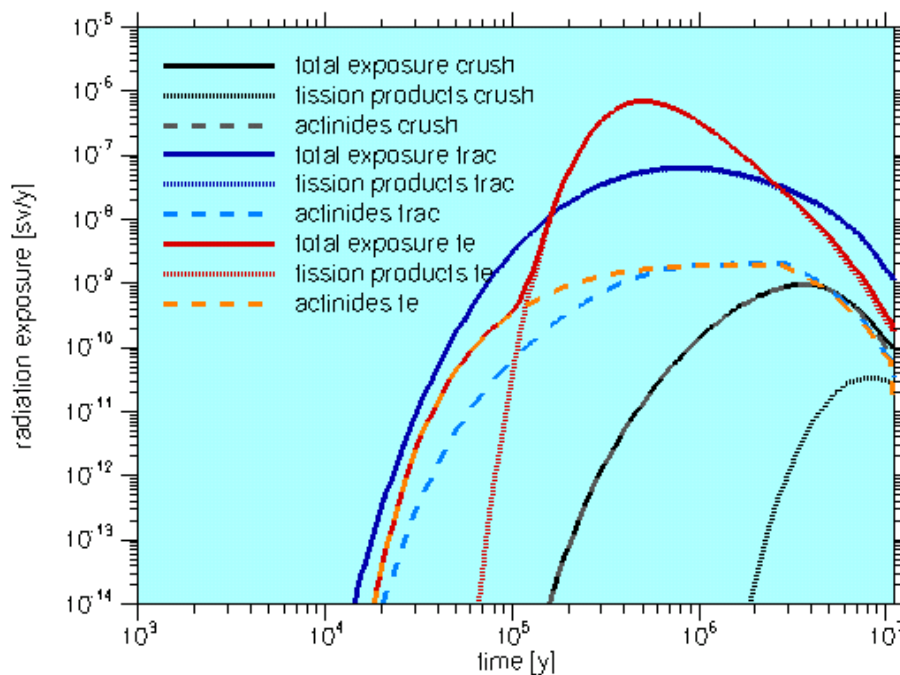


Abbildung 4- 35: Strahlenexposition der Cäsium-Strontium-Fraktion in der Biosphäre für die Realisationen „frac“, „fe“ und „crush“ in Variante 1

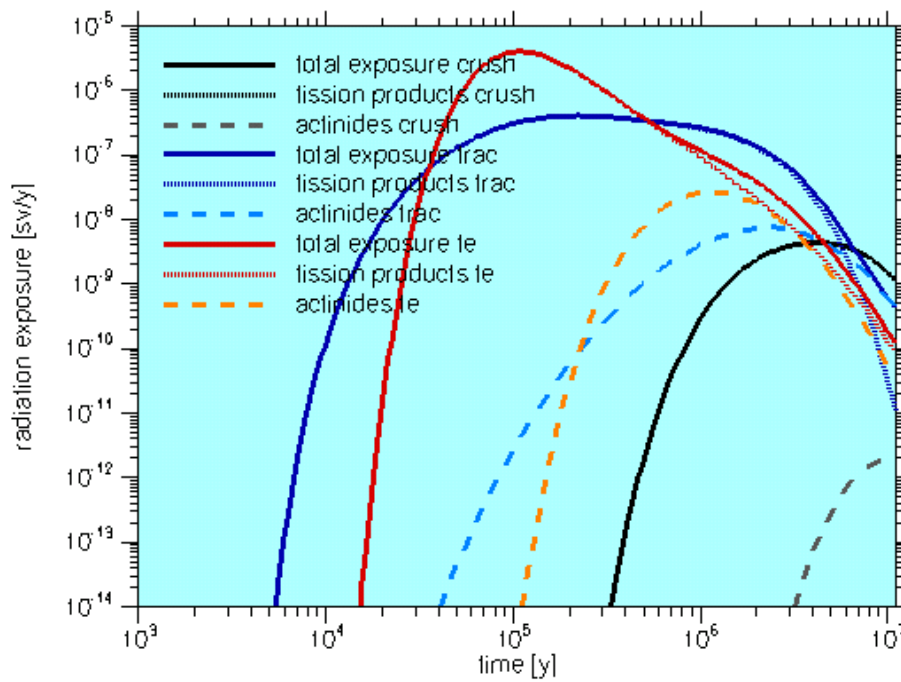


Abbildung 4- 36: Strahlenexposition der Cäsium-Strontium-Fraktion in der Biosphäre für die Realisationen „frac“, „fe“ und „crush“ in Variante 2

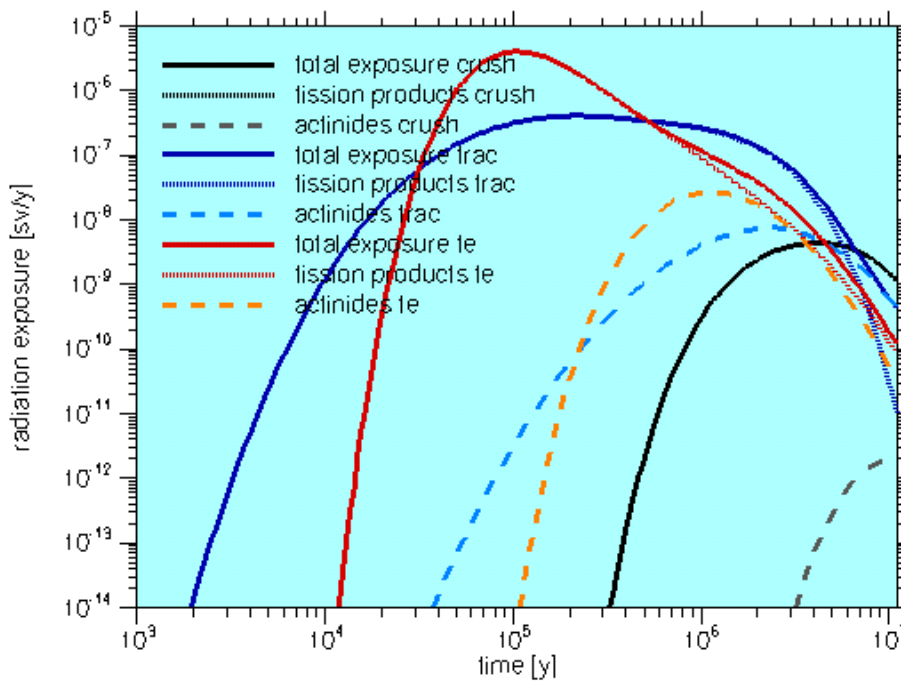


Abbildung 4- 37: Strahlenexposition der Cäsium-Strontium-Fraktion in der Biosphäre für die Realisationen „frac“, „fe“ und „crush“ in Variante 3

	Zeitpunkt der maximalen Strahlenexposition [y]	Maximale Strahlenexposition [Sv/a]
Variante 1, crush	$3 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^{-9}$
Variante 2, crush	$4 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^{-9}$
Variante 3, crush	$4 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^{-9}$
Variante 1, frac	$6 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^{-8}$
Variante 2, frac	$2 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^{-7}$
Variante 3, frac	$2 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^{-7}$
Variante 1, fe	$4 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^{-7}$
Variante 2, fe	$1 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^{-6}$
Variante 3, fe	$1 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^{-6}$

Tabelle 4- 19: Ergebnisse der Biosphärenmodelle für die drei Nah- und Fernfeld-Realisationen für die Cs-Sr-Fraktion

Um die Barrierewirksamkeit des Fernfeldes für den Transport der Radionuklide aus der Cs-Sr-Fraktion zu untersuchen, wurde für die Realisation „fe“ der Variante 2 ein Testfall für eine Transportweglänge von 880 m und 2 600 m gerechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-38 dargestellt. Während die Strahlenexposition nach dem Transport durch 880 m Fernfeld nach $1 \cdot 10^5$ Jahren einen maximalen Wert von $4 \cdot 10^{-6}$ Sv/a erreicht, sind es nach einer Fernfelddistanz von 2 600 m nach $3 \cdot 10^5$ Jahren $7 \cdot 10^{-7}$ Sv/a. Die dreifache Transportweglänge im Granit verursacht demnach eine Verzögerung des Auftretens der maximalen Strahlenexposition um $2 \cdot 10^5$ Jahre und verringert sie in ihrer Höhe um den Faktor 6.

Die Auswirkungen eines sofortigen Behälterausfalls auf die Strahlenexposition in der Biosphäre sind für die Variante 2 für eine Fernfelddistanz von 880 m und 2600 m in Abbildung 4-39 dargestellt. Der frühzeitige Behälterausfall bewirkt im Vergleich zu Abb. 4-29 keine merklichen Änderungen in Bezug auf die maximale Strahlenexposition und lässt die Radionuklide nur geringfügig eher aus dem Fernfeld austreten. Erklären lässt sich dies mit der Dominanz des von Bentonit und Granit wenig sorbierten Cs-135.

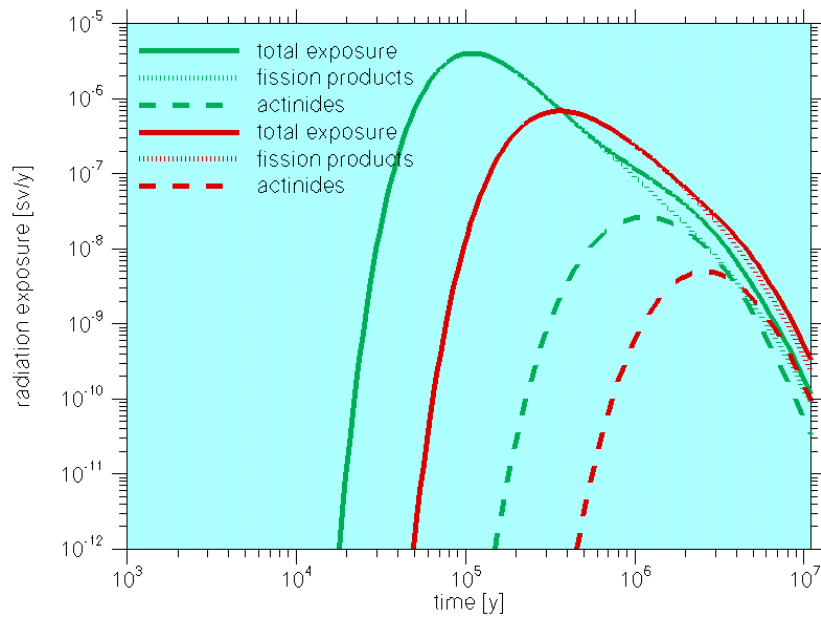
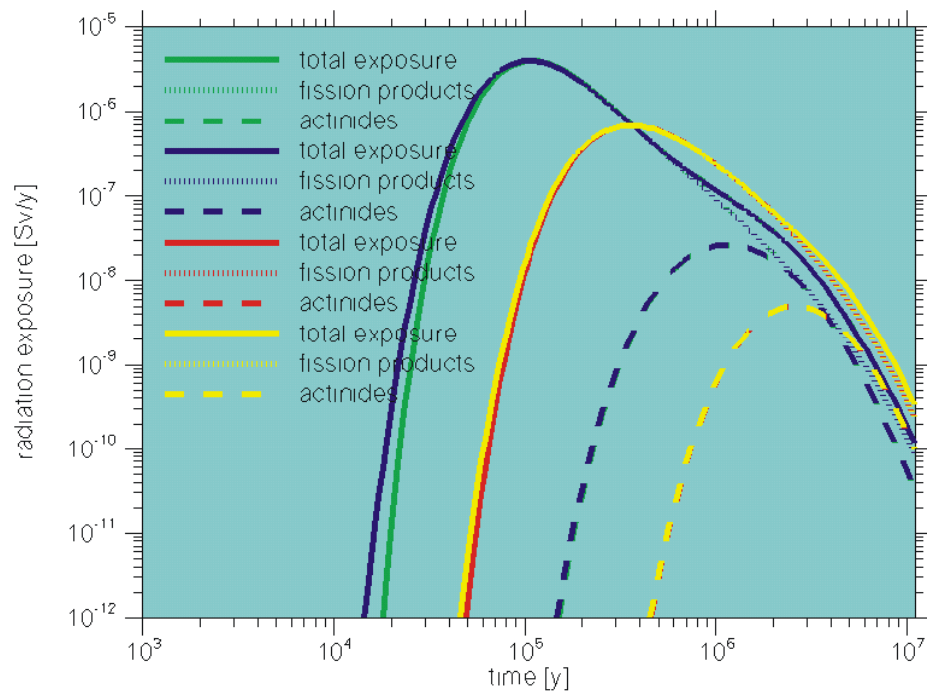


Abbildung 4- 38: Resultierende Strahlenexposition in der Biosphäre für die Variante 2 nach 880 m (grün) und 2 600 m (rot) Fernfeld



- Nahfeld-Variante 2 nach 880m Fernfeld
- Nahfeld-Variante 3 nach 880m Fernfeld
- Nahfeld-Variante 2 nach 2600m Fernfeld
- Nahfeld-Variante 3 nach 2600m Fernfeld

Abbildung 4- 39: Vergleich der resultierenden Strahlenexpositionen in der Biosphäre für die Varianten 2 und 3 nach 880 m und 2 600 m Fernfeld

4.4.3.2.2 Schlämme, Fraktionen Seltene Erden und Spaltprodukte

Modellrechnungen für das Nahfeld der Schlämme

Der aus dem Nahfeld der Schlämme austretende Nuklidstrom über 10 Bq/a für die Variation 1 ist in Abbildung 4-40 dargestellt. Die Freisetzungsraten werden wie auch in Variation 2 durch die Nuklide Th-230 und Ra-226 der Uran-Zerfallsreihe und die Nuklide Pu-239 und Pa-231 der Americium-Zerfallsreihe bestimmt (Abbildung 4-40 und Abbildung 4-41). Das Ra-226, das durch den Zerfall der Mutternuklide aufgebaut wird, besitzt auf Grund seiner gegenüber Uran und Thorium höheren Löslichkeit und der sehr geringen Rückhaltung im Bentonit, die frühesten und höchsten Freisetzungsraten. Für einen kurzen Zeitraum ist Pu-239 in der Nahfeld-Variante 1 das zweitwichtigste und in der Variante 2 sogar das dominierende Nuklid im Aktivitätsstrom, verliert jedoch auf Grund seines radioaktiven Zerfalls im Laufe der Zeit wieder an Bedeutung. Die Nuklide der Uran-Zerfallsreihe sind gering löslich. In Variation 2 treten die genannten Radionuklide auf Grund der geringeren Bentonitmächtigkeit und kleineren Verteilungskoeffizienten in ihm, sowie der höheren Löslichkeitsgrenze, schneller und in höherer Konzentration aus dem Nahfeld aus. Das Ergebnis der dritten Variation unterscheidet sich im Hinblick auf die Relevanz der eingelagerten kurzlebigen Radionuklide Sr-90 und Cs-137 (Abbildung 4-42). Sie dominieren die ersten 700 Jahre den austretenden Radionuklidstrom auf Grund des frühen Behälterausfalls. Ab diesem Zeitpunkt beherrschen dann wieder das Th-230 und Ra-226 der Uran-Zerfallsreihe und die Nuklide Pu-239 und Pa-231 der Americium-Zerfallsreihe den Aktivitätsstrom.

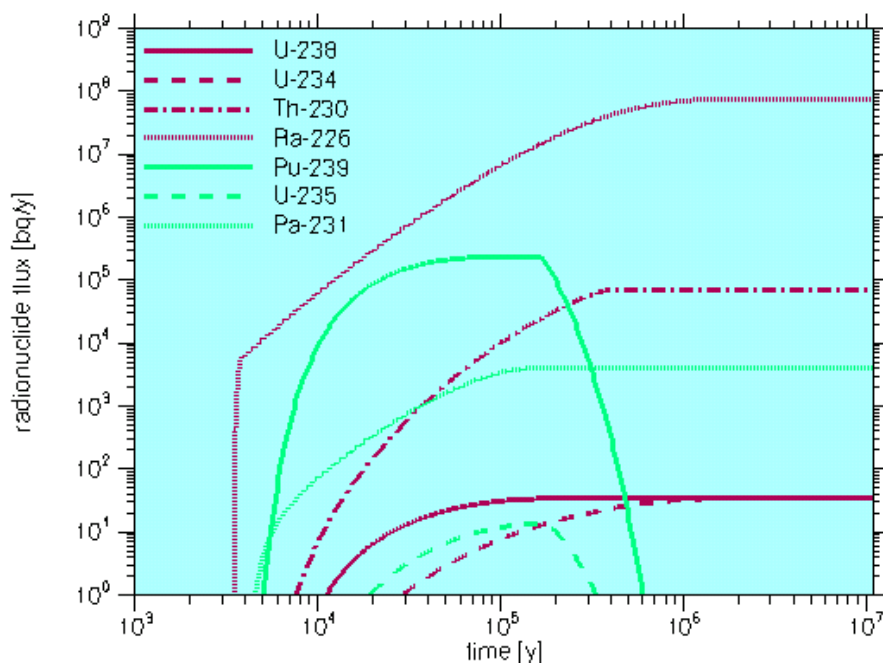


Abbildung 4- 40: Nuklidstrom aus dem Nahfeld der Schlämme, Variante 1

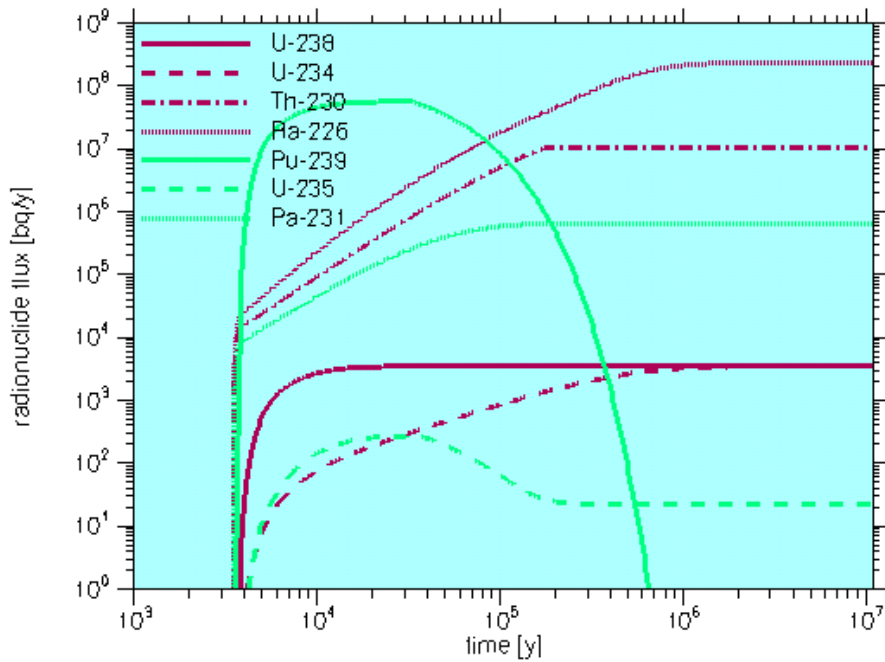


Abbildung 4-41: Nuklidstrom aus dem Nahfeld der Schlämme, Variante 2

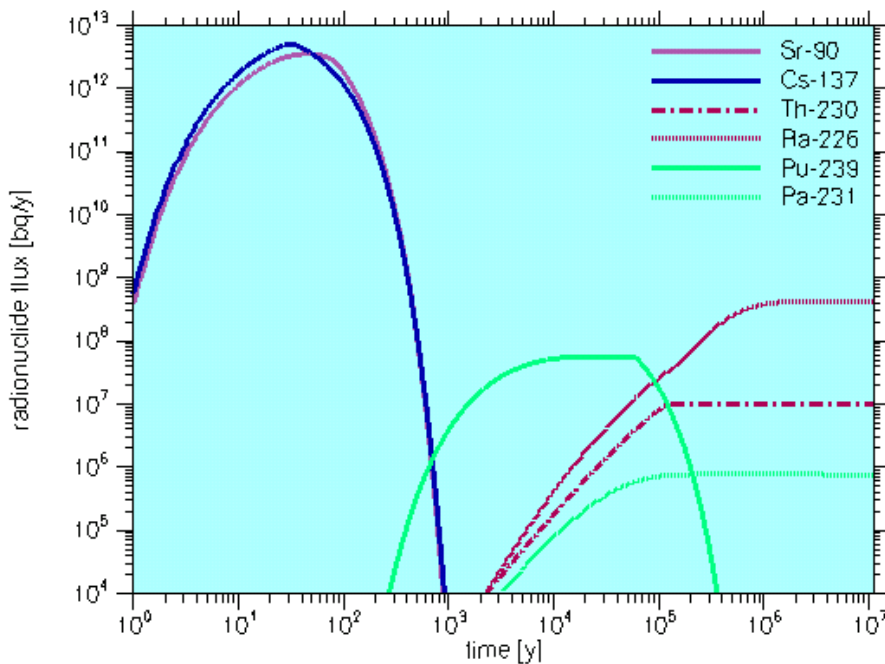


Abbildung 4-42: Nuklidstrom aus dem Nahfeld der Schlämme, Variante 3

Modellrechnungen für das Nahfeld der Fraktion Seltene Erden

Für Variante 1 ist der Nuklidstrom aus dem Nahfeld des Endlagerteils für die Fraktion Seltene Erden in Abbildung 4-43 veranschaulicht. Von den 17 betrachteten Radionukliden weisen wie auch in der Variation 2 (s. Abb. 4-44) die Radionuklide U-233 und Th-229 aus der Neptunium-Zerfallsreihe den größten Aktivitätsstrom auf. Sie werden durch Zerfall des Np-237 gebildet, dessen Inventar in dieser Abfallfraktion sehr hoch ist. Aufgrund der niedrigen Löslichkeit des Neptuniums liegt dessen Freisetzungsrates deutlich unter derjenigen des U-233 und Th-229, die sich nahezu im radioaktiven Gleichgewicht befinden. Wie das Np-237 liefert das Zr-93 aufgrund seines hohen Inventars einen großen Beitrag zum Nuklidstrom. Es wird auf

Grund seines kleineren Verteilungskoeffizienten im Bentonit zu einem etwas früheren Zeitpunkt als das U-233 und das Th-229 aus dem Nahfeld freigesetzt. Auf Grund der in Variation 2 gewählten geringeren Verteilungskoeffizienten im Bentonit findet der gesamte Nuklidausstrom frühzeitiger als in Variation 1 statt. Der in Variation 3 angenommene instantane Behälterausfall verursacht einen erheblich früheren Austritt der Radionuklide aus dem Nahfeldbereich (s. Abbildung 4-45). Abweichend von den beiden vorherigen Variationen findet auch ein Ausstrom des kurzlebigen Sm-151 statt, das zwischen 200 und 900 Jahren sogar den Nuklidstrom dominiert.

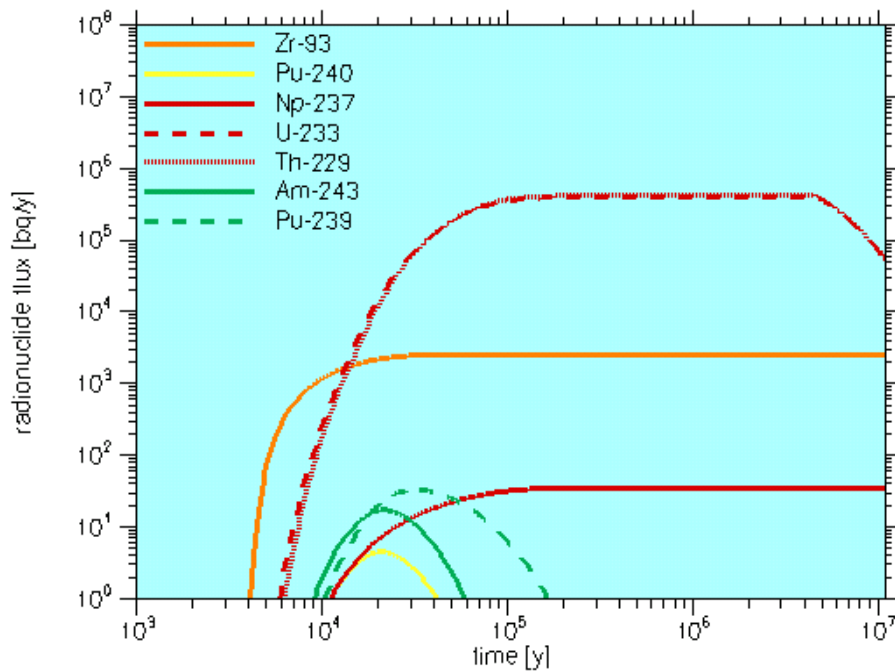


Abbildung 4- 43: Nuklidstrom aus dem Nahfeld der Fraktion Seltene Erden, Variante 1

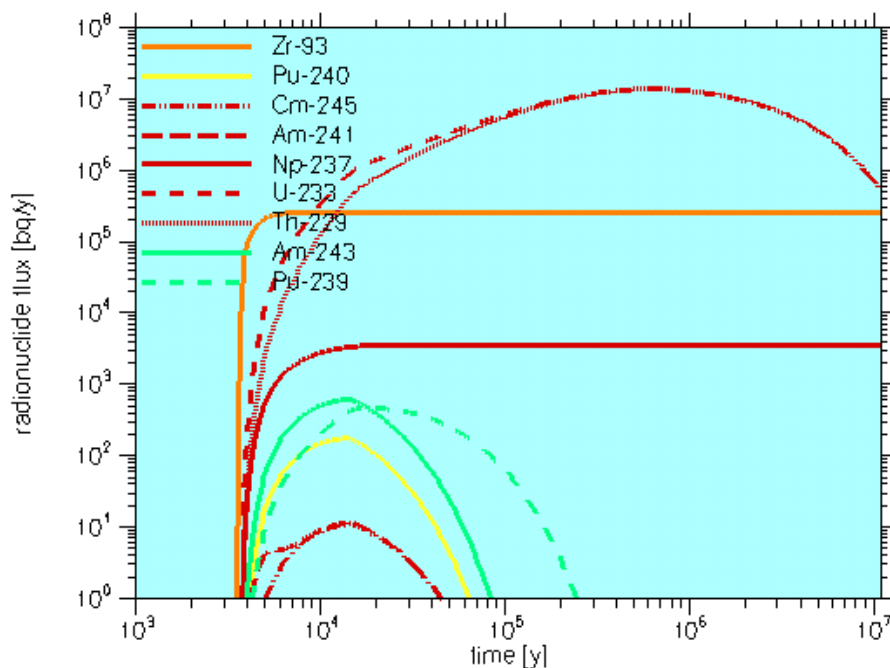


Abbildung 4- 44: Nuklidstrom aus dem Nahfeld der Fraktion Seltene Erden, Variante 2

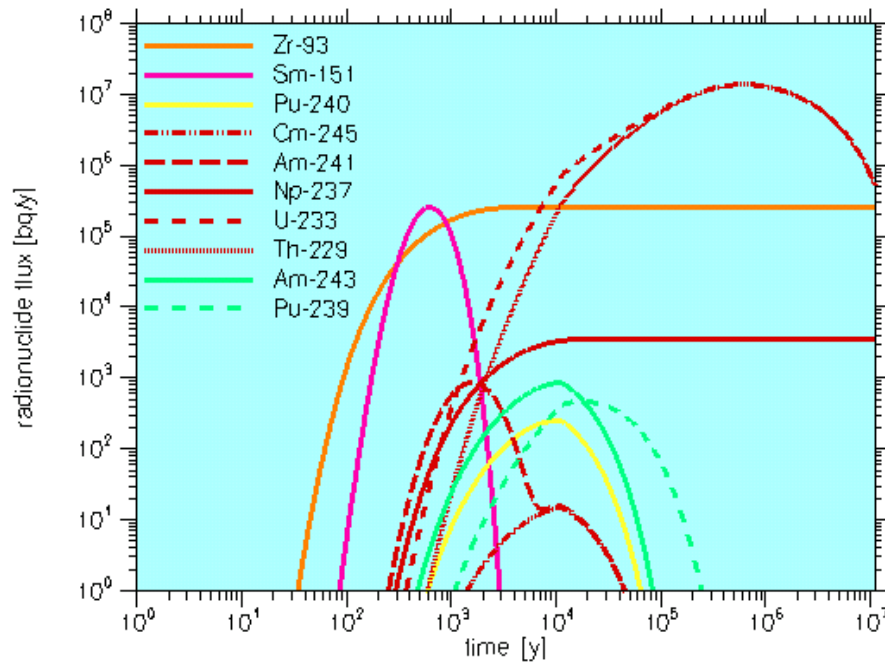


Abbildung 4- 45: Nuklidstrom aus dem Nahfeld der Fraktion Seltene Erden, Variante 3

Modellrechnungen für das Nahfeld der Fraktion Spaltprodukte

Für die Variation 1 ist der Nuklidstrom aus dem Nahfeld des Endlagerteils für die Fraktion der Spaltprodukte in Abbildung 4-46 veranschaulicht. Von den betrachteten 19 Radionukliden werden Se-79 und Tc-99 auf Grund ihrer geringen Rückhaltung im Bentonit direkt nach dem Behälterausfall aus dem Nahfeld freigesetzt. Hinsichtlich des maximalen Nuklidstroms ist Sn-126 das bedeutendste Radionuklid. Grund hierfür ist vor allem seine höhere Löslichkeit im Vergleich zu Se-79 und Tc-99. Daneben spielen im Zeitbereich von 7 000 bis 200 000 Jahren die stärker am Bentonit sorbierten Radionuklide Am-243 und Pu-239 der Americium-Zerfallsreihe eine recht große Rolle. Das Ergebnis der zweiten Variation ähnelt demjenigen der ersten (Abbildung 4-47). Auf Grund der veränderten Bentonit-Verteilungskoeffizienten treten die genannten Radionuklide jedoch früher aus dem Nahfeld aus. Zusätzlich gewinnen Pd-107 und Tc-99 durch eine deutliche Erhöhung ihrer Löslichkeitsgrenze erheblich an Bedeutung. In Variante 3 kommt es aufgrund des instantanen Behälterausfalls zu einer erheblich früheren Radionuklidfreisetzung aus dem Nahfeld (Abbildung 4-48). Auf Grund der Tatsache, dass die dominierenden Radionuklide des austretenden Radionuklidstroms löslichkeitsbegrenzt sind, hat dies jedoch keine Auswirkungen auf den maximal erreichten Nuklidstrom der meisten Nuklide.

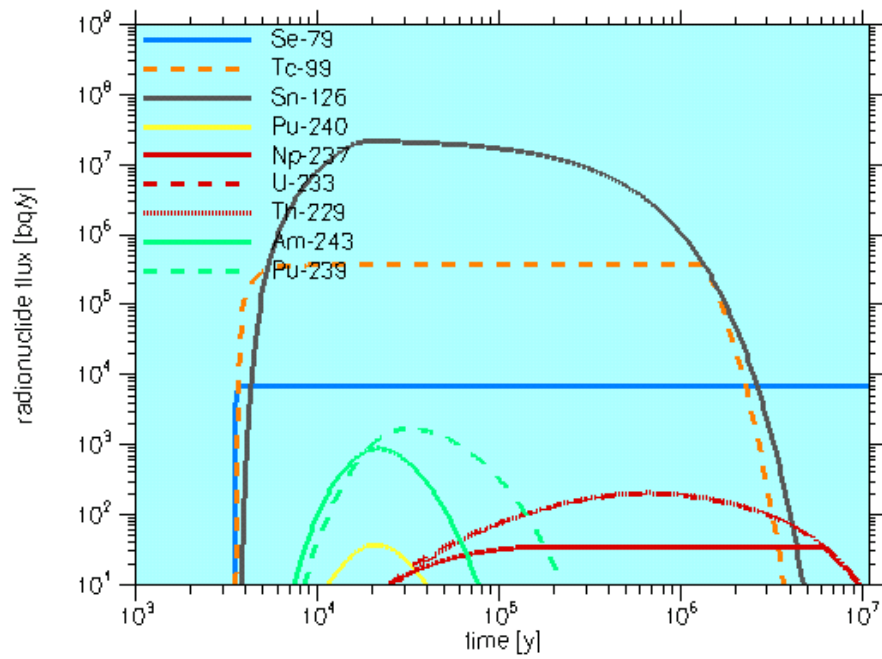


Abbildung 4- 46: Nuklidstrom aus dem Nahfeld der Fraktion Spaltprodukte, Variante 1

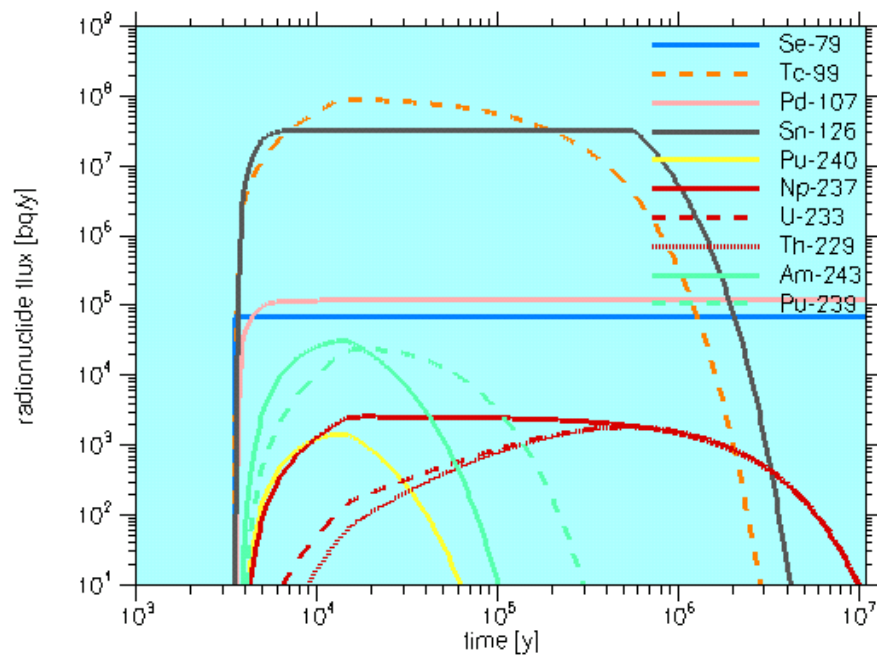


Abbildung 4- 47: Nuklidstrom aus dem Nahfeld der Fraktion Spaltprodukte, Variante 2

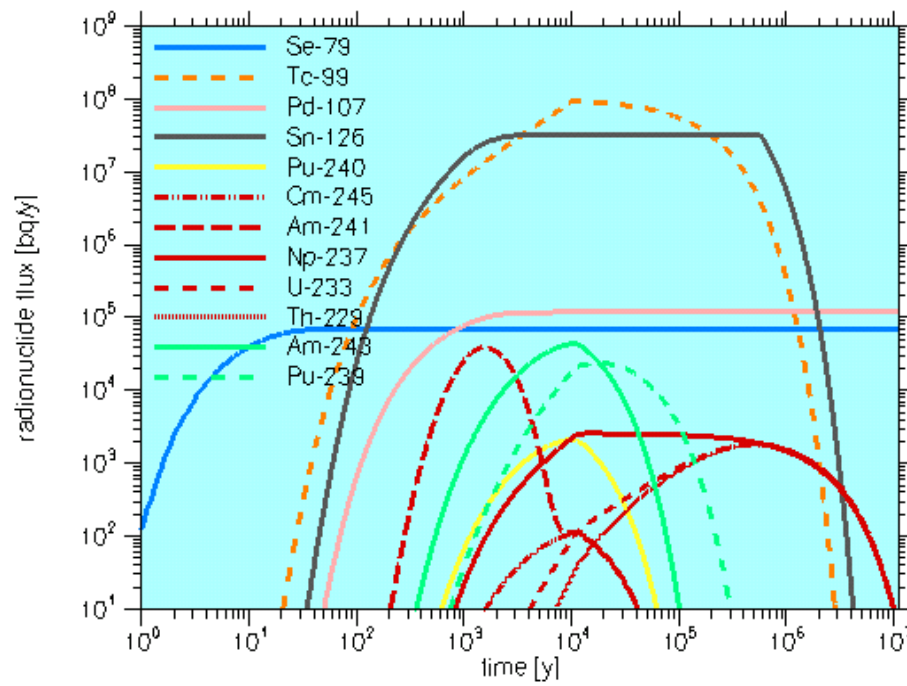


Abbildung 4- 48: Nuklidstrom aus dem Nahfeld der Fraktion Spaltprodukte, Variante 3

Modellrechnungen für die Biosphäre der Schlämme sowie der Fraktionen Seltene Erden und Spaltprodukte

Die Radionuklidströme der einzelnen Nahfeldbereiche der Schlämme, Seltene Erden und Spaltprodukte werden auf Grund der räumlichen Nähe ihrer Einlagerung für die Transportrechnungen im Fernfeld und der Biosphäre zusammengefasst. So ergibt sich eine Anzahl von 27 betrachteten Radionukliden für den Transport durch das Fernfeld und von 37 für die Biosphäre. Die Strahlenexposition wird in der Biosphäre im wesentlichen durch die Radionuklide Se-79 und Sn-126 aus der Abfallfraktion der Spaltprodukte, Np-237 und dessen Zerfallsprodukte aus den Abfallfraktionen Seltener Erden und Spaltprodukte bestimmt, wie in Abbildung 4-49 beispielhaft für Variante 2 „fe“ gezeigt wird. Während Se-79 und die Radionuklide der Neptuniumreihe durch ihre lange Halbwertszeit kontinuierlich zur Strahlenexposition beitragen, ist Sn-126 nur kurzzeitig von Bedeutung. Aufgrund seines Zerfalls nimmt es nur über einen relativ kurzen Zeitraum die dominierende Rolle im Nuklidstrom ein und bewirkt damit eine Unregelmäßigkeit in der Kurve der Strahlenexposition. Diese wird lediglich in den Realisationen „fe“ und „frac“ sichtbar (s. Abbildung 4-50, Abbildung 4-51 und Abbildung 4-52). Für die Realisation „crush“ tritt das Radionuklid Sn-126 nicht in Erscheinung, da es aufgrund der langen Transportzeit im Fernfeld schon weitestgehend zerfallen ist.

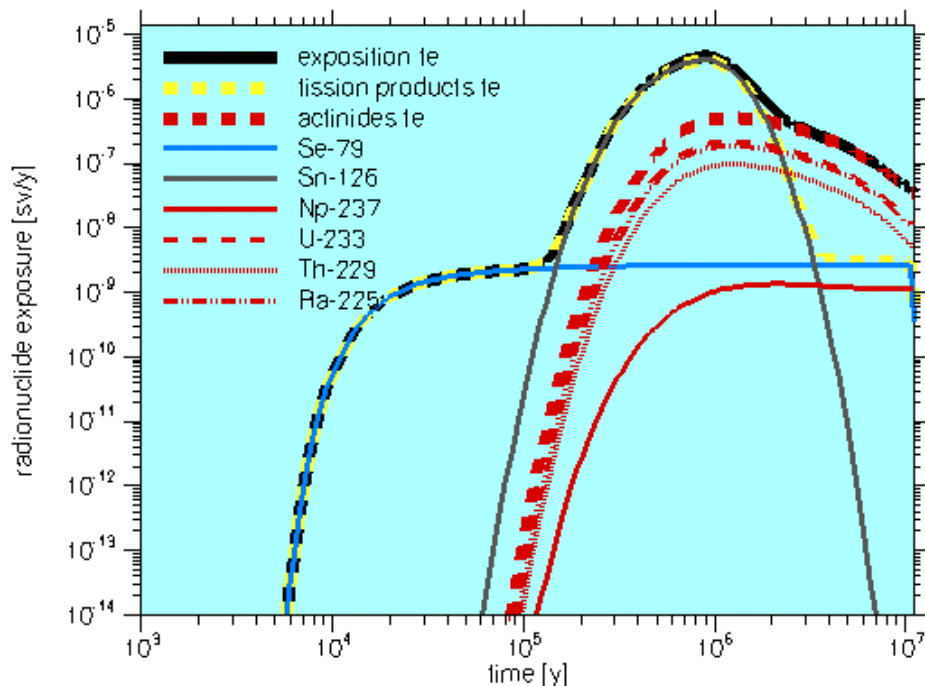


Abbildung 4-49: Strahlenexposition für die Variante 2 „fe“

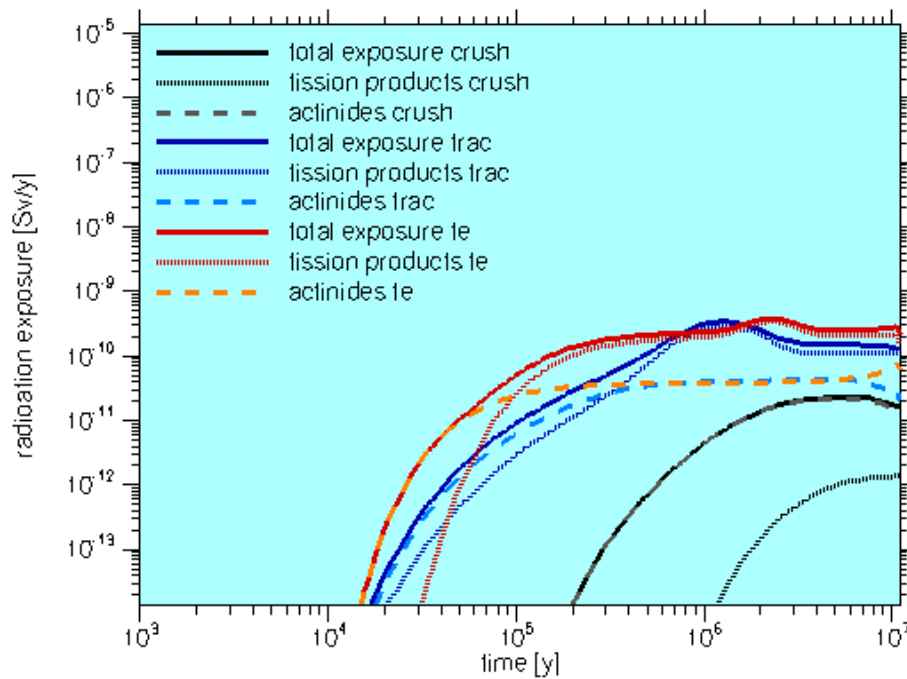


Abbildung 4- 50: Strahlenexposition der Schlämme sowie der Fraktionen Seltene Erden und Spaltprodukte in der Biosphäre für die drei Fernfeld-Realisationen, Variante 1

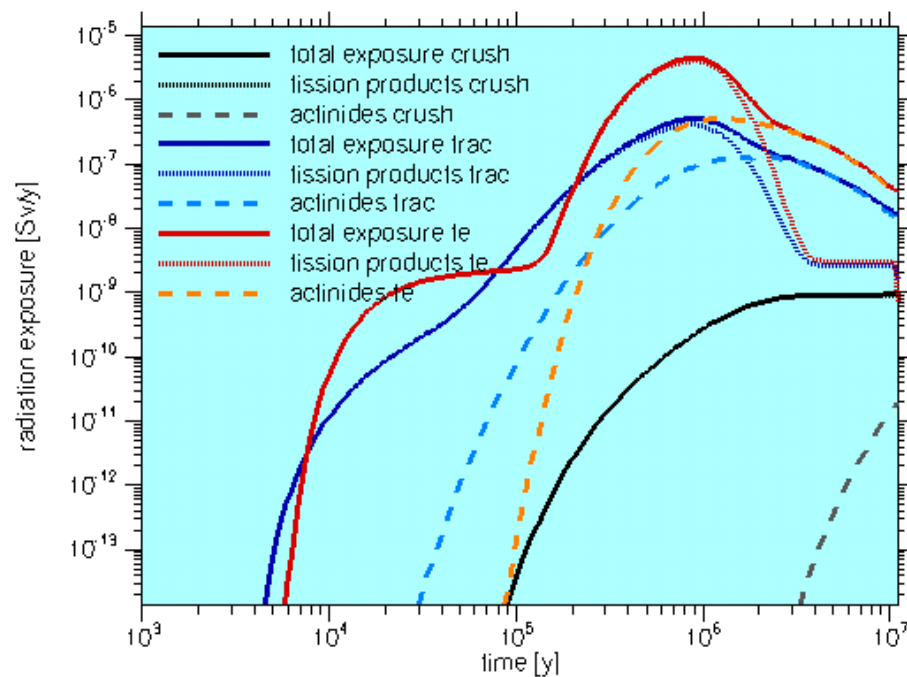


Abbildung 4- 51: Strahlenexposition der Schlämme sowie der Fraktionen Seltene Erden und Spaltprodukte in der Biosphäre für die drei Fernfeld-Realisationen, Variante 2

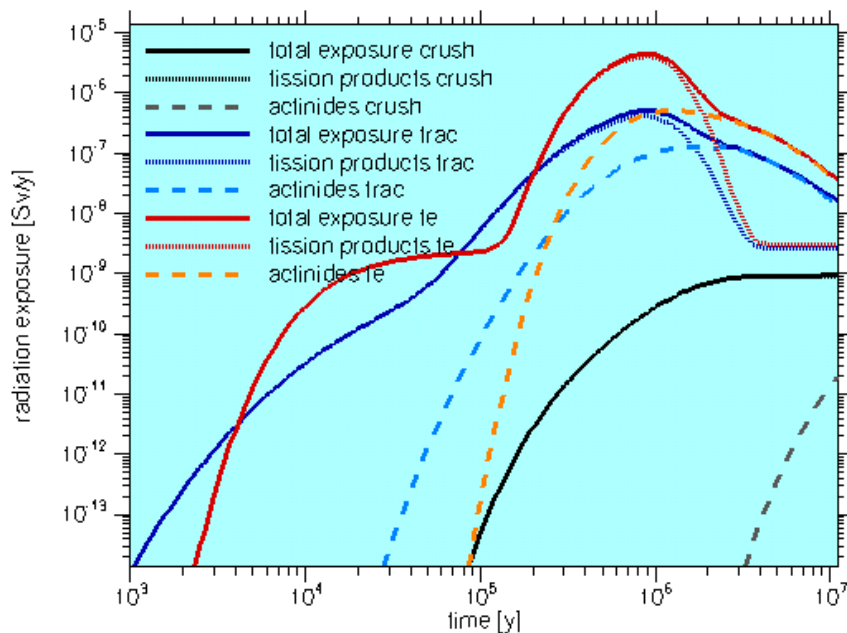


Abbildung 4- 52: Strahlenexposition der Schlämme sowie der Fraktionen Seltene Erden und Spaltprodukte in der Biosphäre für die drei Fernfeld-Realisationen, Variante 3

4.4.3.3 Ergebnisse der 2d-Modellierung

Die schematischen Modelle haben gezeigt, wie sich bestimmte Kluftanordnungen auf den Schadstofftransport auswirken können (s. Abbildung 4-53). In die standortabhängige 2d-Modellierung lassen sich diese Ergebnisse z.T. übertragen, verkomplizieren sich jedoch aufgrund der größeren Kluftanzahl, einer lokal unterschiedlichen Kluftdichte sowie zusätzlicher Randbedingungen.

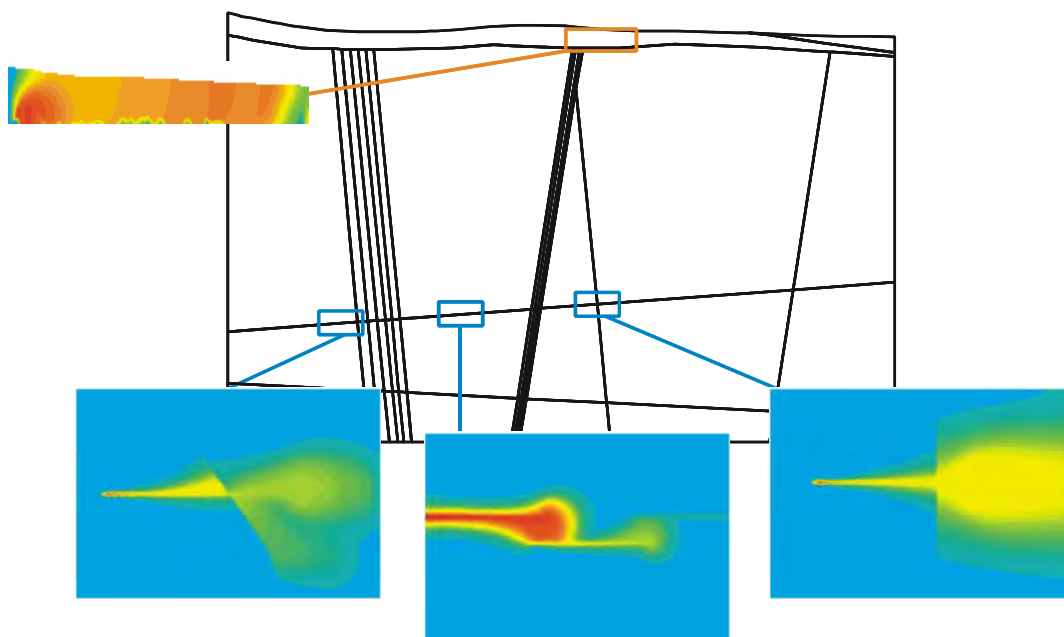


Abbildung 4- 53: Ausbreitungscharakteristika für verschiedene Kluftanordnungen

Der Vergleich der Kluftströmungsgeschwindigkeiten für unterschiedliche Kluftanordnungen unter der Annahme, dass alle Klüfte dieselben Durchlässigkeiten besitzen, führt zu der Erkenntnis, dass die parallel zur Grundwasserströmung Lagerklüfte die höchsten Fließgeschwindigkeiten aufweisen (s. Abbildung 4-54). Die quer zur Grundwasserströmung angeordneten Querklüfte und Schieferungszonen weisen dagegen viel geringere Fließgeschwindigkeiten auf.

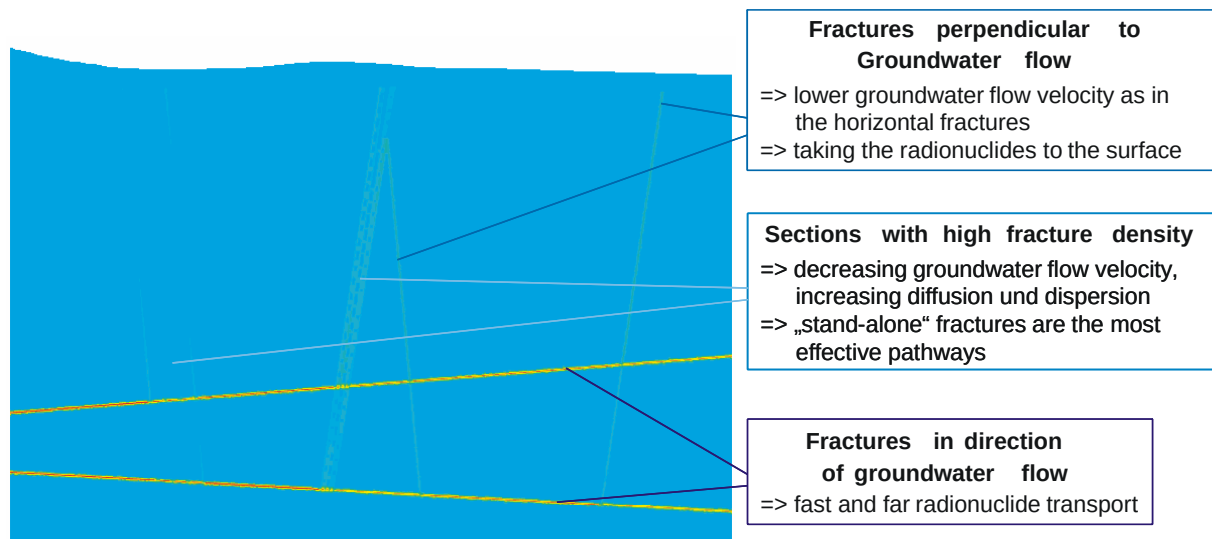
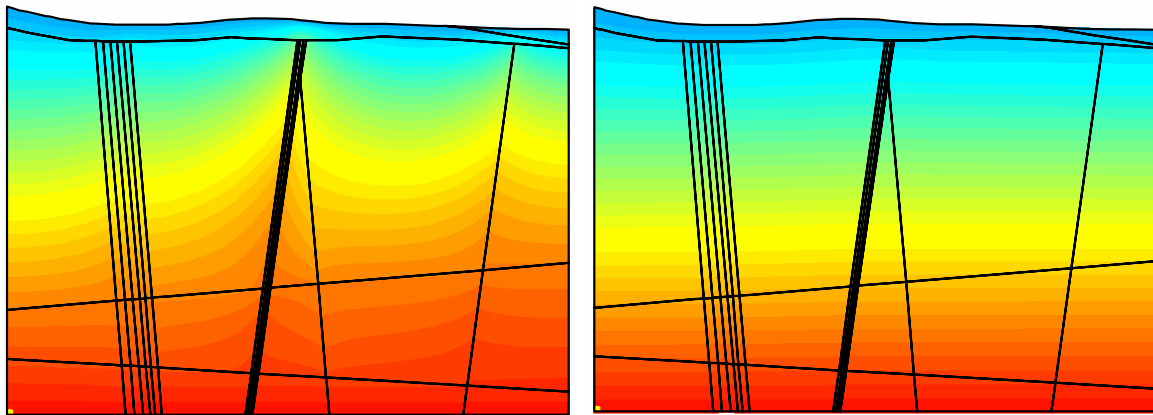


Abbildung 4- 54: Strömungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Kluftanordnung

Das Wärmefeld im Untergrund ist abhängig von der Temperatur-Randbedingung und der Fließgeschwindigkeit in der Gesteinsmatrix bzw. im Kluftsystem. In einem nahezu homogenen Gesteinsbereich, in dem der Durchlässigkeitsbeiwert in den Klüften durch Mineralisation oder eine andere Art der dichteren Verfüllung verringert ist, wird ein nahezu homogenes Wärmefeld ausgebildet (s. Abbildung 4-55 rechts). Besitzen Gesteinsmatrix und Kluftsystem stark unterschiedliche Durchlässigkeitsbeiwerte, kommt es zu der Ausbildung eines inhomogenen Wärmefeldes (s. Abbildung 4-55 links). Dieses kann mit den thermischen Gesteinsparametern und des Wassers begründet werden. Während die Wärmeleitfähigkeit im Gestein größer ist als im Wasser, besitzt Wasser eine höhere Wärmekapazität als das Gestein. Im ungestörten Gesteinsbereich wird sich daher auf Grund der geringen Gesteinsdurchlässigkeit vor allem die Wärmeleitfähigkeit auf das Wärmefeld auswirken. Wenn die Klüfte eine hohe Durchlässigkeit besitzen, wird die im Wasser gespeicherte Wärme in diesen mittransportiert und bildet in Querklüften mit aufsteigendem Grundwasser Wärmespitzen aus.

matrix k_f : $4 \cdot 10^{-10}$ [m/s]
 fracture aperture: 50 [cm]



fracture k_f : $7 \cdot 10^{-5}$ [m/s]

fracture k_f : $6 \cdot 10^{-7}$ [m/s]

Abbildung 4- 55: Wärmefelder in Abhängigkeit von der Grundwasserströmung

Die Ergebnisse des Transportmodells in Abbildung 4-56 zeigen, wie sich die unterschiedlichen Wärmefelder auf die Grundwasserströmung und den Transport auswirken. Anhand eines Tracers, der in die obere Lagerkluft eingegeben wurde, lässt sich der Transport in einem homogenen Wärmefeld mit geringerer Kluftdurchlässigkeit (rechts) und in einem inhomogenen Wärmefeld mit hoher Kluftdurchlässigkeit (links) verfolgen. Die auffälligsten Unterschiede sind:

- stark unterschiedliche Transportzeiten,
- große Unterschiede bezüglich der retardierenden Wirkung von Diffusion und Dispersion,
- unterschiedliche Transportpfade.

Um die Möglichkeit zu schaffen, die Ergebnisse der Berechnungen des Nahfeldes in GRAPOS als Quellterm für die Berechnungen in FEFLOW zu nutzen, wurde ein Konverter entwickelt. Da FEFLOW erst in der nächsten Version die Möglichkeit bietet, parallel den Transport mehrerer Radionuklide zu berechnen, wird zunächst der zeitabhängige Konzentrationsverlauf des in der Cs-Sr-Fraktion den Radionuklidstrom dominierenden Cs-135 als Quellterm genutzt. Ergebnisse bei Variationen der Kluftöffnungsweiten und Kluftdurchlässigkeiten im Fernfeld mit und ohne Sorption sind in Abbildung 4-57 und Abbildung 4-58 dargestellt.

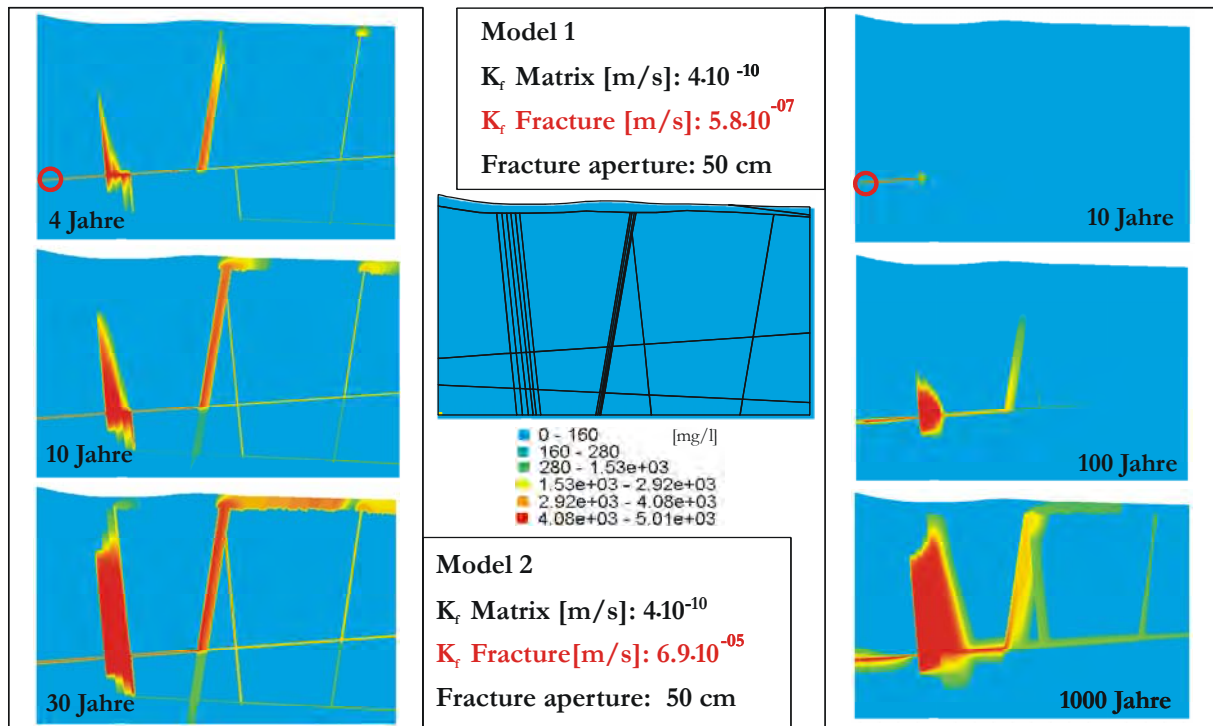


Abbildung 4- 56: Transportmodellierung mit einem Tracer

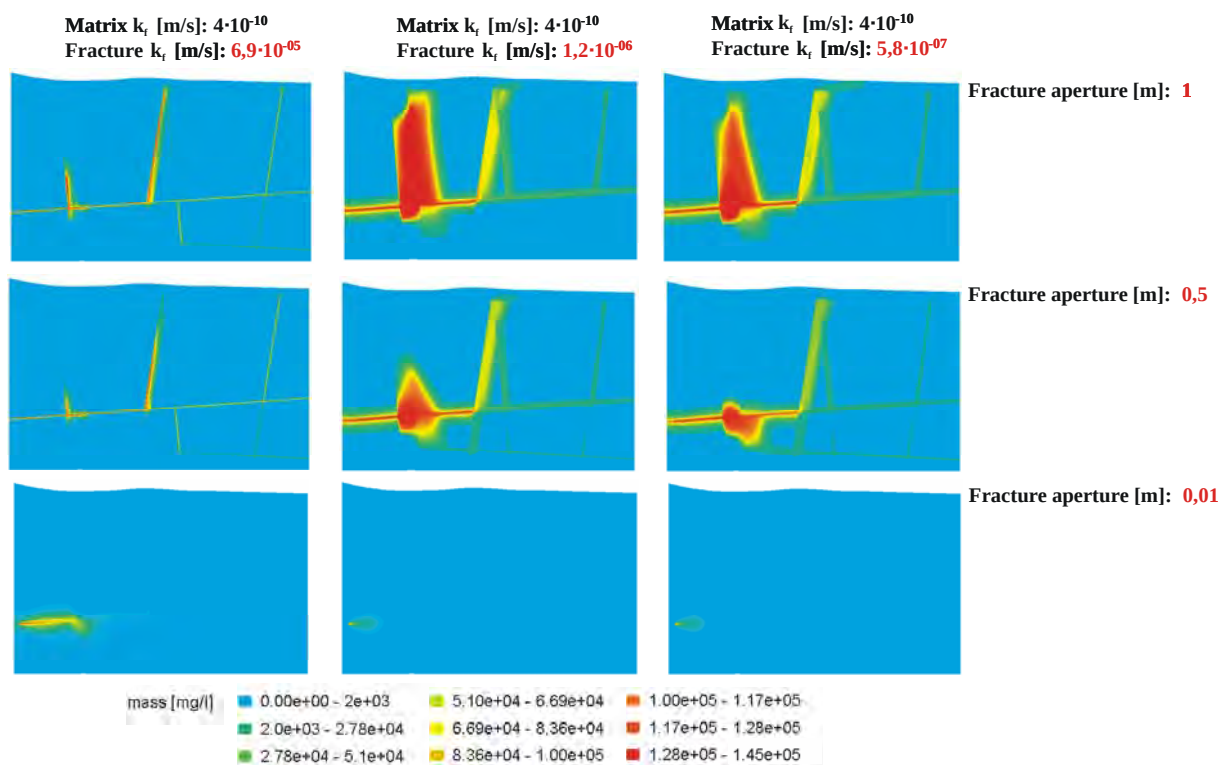


Abbildung 4- 57: Ausbreitung von Cs-135 im Fernfeld mit natürlichem Wärmefeld ohne Berücksichtigung der Sorption im Granit nach 10 000 Jahren

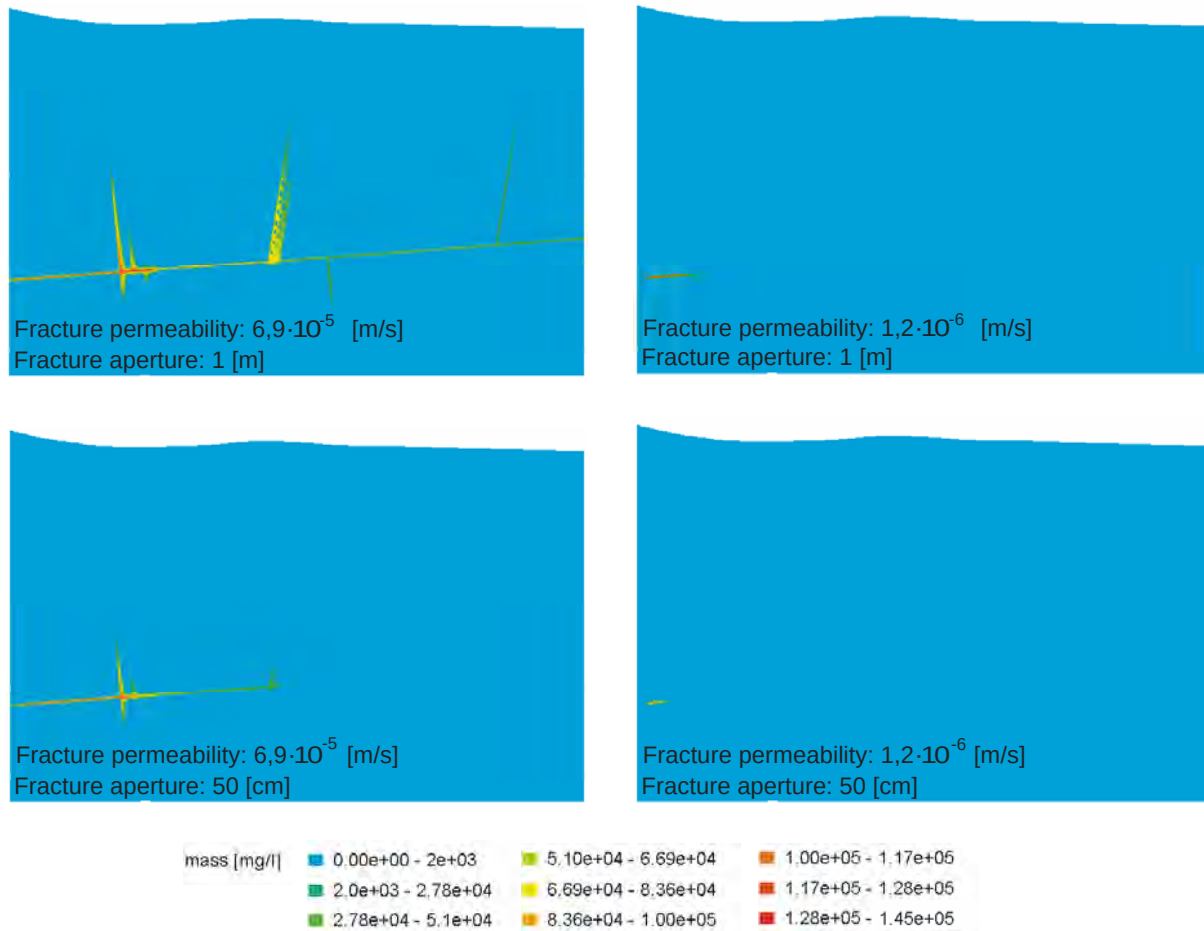


Abbildung 4- 58: Ausbreitung von Cs-135 im Fernfeld mit natürlichem Wärmefeld unter Berücksichtigung der Sorption im Granit

Die durchgeführten Modellvariationen machen deutlich, dass die Strömungsgeschwindigkeit innerhalb des Kluftsystems besonders stark von der Kluftart, der Kluftöffnung und –orientierung, sowie von den Durchlässigkeiten von Kluft und Matrix abhängt. Einzelklüfte weisen gegenüber Bereichen hoher Kluftdichte eine besonders große Strömungsgeschwindigkeit auf. Die Matrixdiffusion steht in unmittelbarem Zusammenhang mit der vor Ort herrschenden Schadstoffkonzentration und korreliert damit indirekt mit der Transportgeschwindigkeit. Die Dispersion hängt dagegen von der Transportweglänge ab. Handelt es sich um Einzelklüfte, die in Richtung des hydraulischen Potentials angeordnet sind, wie z.B. Lagerklüfte, so ist die Strömungsgeschwindigkeit in diesen, im Vergleich zu Querklüften gleicher Durchlässigkeit, besonders hoch. Der Schadstofftransport kann daher schnell und weit erfolgen. Dies kann dazu führen, dass der Schadstoff durch eine weiter entfernt liegende Einzelkluft schneller an die Erdoberfläche transportiert wird, als durch einen näher an der Schadstoffquelle gelegenen Bereich größerer Kluftdichte, wie z.B. eine Schieferungszone. Die Verlangsamung des Transports in diesem Bereich gegenüber einer einzelnen Kluft lässt sich durch eine gegenüber den Einzelklüften erheblich kleinere Strömungsgeschwindigkeit sowie einen vielfach längeren Transportweg erklären, wodurch für den Schadstoff mehr Zeit zur Verfügung steht, in die Gesteinsmatrix zu diffundieren. Da die Grundwasserströmung eine Abhängigkeit vom Wärmegradienten aufweist, kann eine unterschiedliche Ausbildung von Wärmefeldern dazu führen, dass sich die Grundwasserströmungsrichtungen verändern.

4.4.3.4 Ergebnisse der 3d-Strömungsmodellierung

Das Modell liefert aus den rekonstruierten Grundwasserspiegelständen und deren Interpolation zunächst eine Vorstellung über das lokale Grundwasserregime. Darauf aufbauend erfolgt die Berechnung der Grundwasserströmung. Die Verteilung der Fließgeschwindigkeiten in 900 m Tiefe ist in Abbildung 4-59 dargestellt. Die Abbildung lässt die hydraulischen Eigenheiten des Modellgebietes in dieser Tiefe deutlich hervortreten. Die von der Wasserscheide im Westen her anfallenden Wassermassen werden im Wesentlichen von den Kluftstrukturen aufgenommen und in Richtung Osten weitergeleitet. Dabei zeigt sich, dass die Klüfte den Hauptströmungsweg für das Grundwasser in dieser Tiefe darstellen. Bei der genaueren Betrachtung der Kluftströmung fällt auf, dass sie nicht in allen Bereichen gleich groß ist. Dass einige Kluftabschnitte stärker durchströmt werden als andere, liegt vor allem an ihrer räumlichen Orientierung. Bei einer günstigen Lage zum hydraulischen Potential, d.h. in W-E Richtung, werden sie stark durchströmt, während bei ungünstiger Lage kaum oder keine Durchströmung stattfindet [Petitta 2003].

Um einen Eindruck von dem zu erwartenden Fließpfad aus dem ungestörten Gesteinsbereich heraus zu erhalten, wurde eine Particle Tracking Rechnung durchgeführt (s. Abbildung 4-60). Diese erfolgt stationär und kann deshalb nur als erste Schätzung dienen. Ein im Gebiet des potenziellen Endlagers gestartetes Partikel nimmt dabei den Weg durch die weitestgehend ungestörte Gesteinsmatrix bis hin zum nächstgelegenen Kluftsystem und wird in ihm in Richtung Osten geleitet. Eine an den Fließpfad angelegte Zeitskala macht noch einmal den großen Unterschied zwischen der Durchströmungsgeschwindigkeit der Matrix und der Kluft deutlich. Um den lediglich 600 m langen Bereich der weitestgehend ungestörten Gesteinsmatrix bis hin zur ersten Kluft zu durchströmen werden etwa $2 \cdot 10^6$ Jahre benötigt. Innerhalb der Kluft wird für die gleiche Distanz mit etwa 5 000 Jahren nur ein Bruchteil dieser Zeit gebraucht (s. Abb. 4-60).

A-185

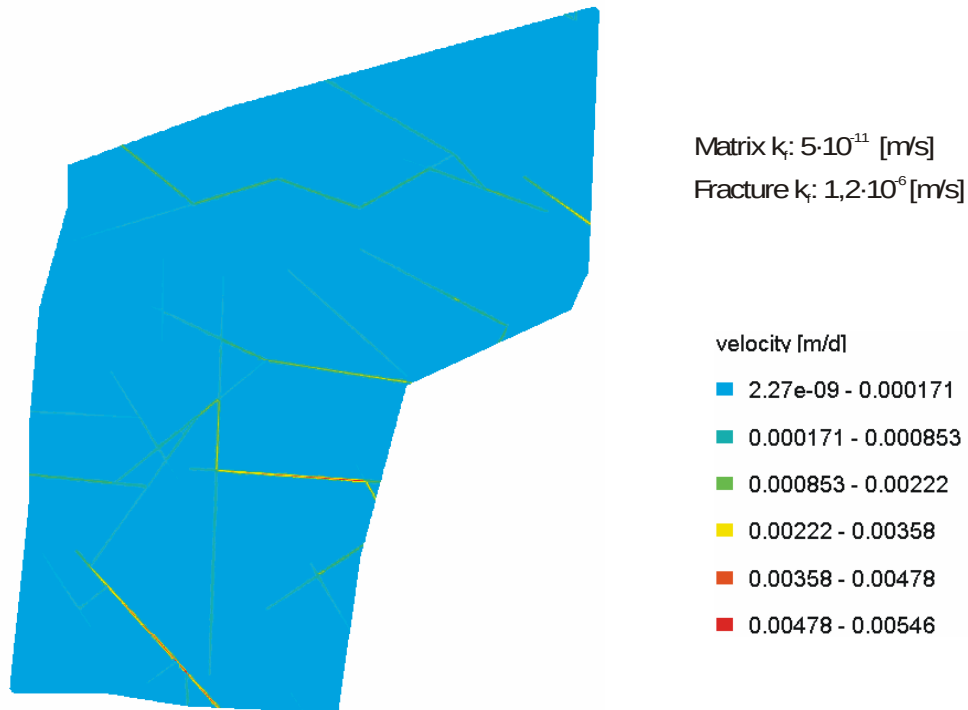


Abbildung 4- 59: Grundwasserfließgeschwindigkeiten in rund 900 m Tiefe

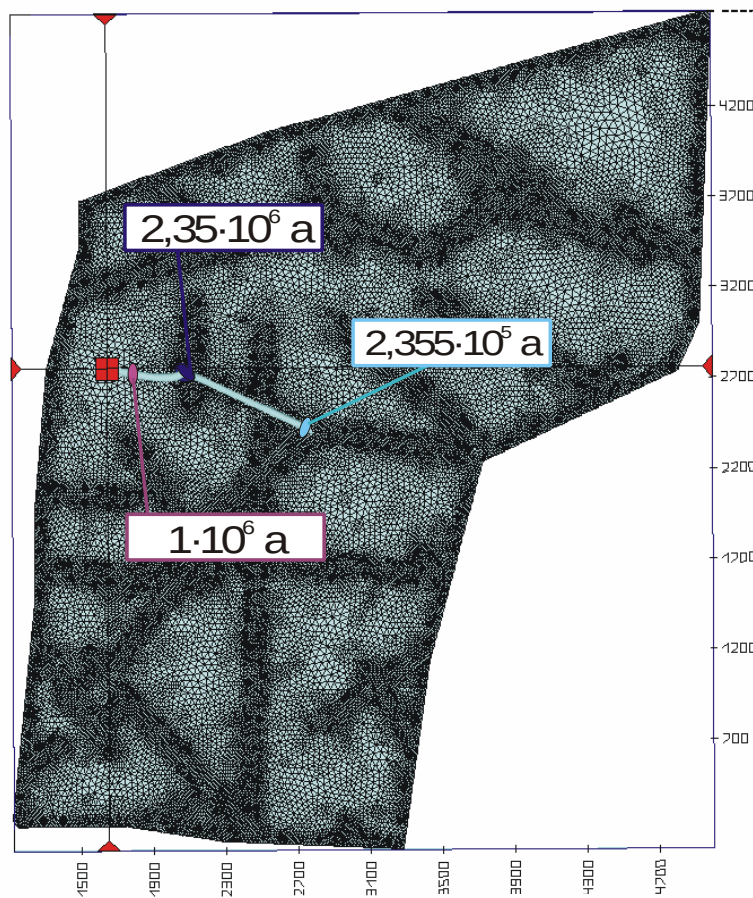


Abbildung 4- 60: Modell 2: Räumlicher und zeitlicher Verlauf des Fließpfades

4.4.4 Diskussion und Ausblick

4.4.4.1 Diskussion der Modellierungsergebnisse

Aus den bisherigen Studien konnten verschiedene neue und bestätigende Erkenntnisse gewonnen, sowie Verbesserungen für zukünftige Modellierungen abgeleitet werden. Im Folgenden wird daher eine Bewertung der erstellten Modelle vorgenommen und eine Diskussion der Modellierungsergebnisse durchgeführt. Außerdem wird auf eine mögliche Weiterentwicklung der verwendeten Programme eingegangen.

Die Bewertung der Eingangsdaten, sowie die Notwendigkeit weiterer Standortuntersuchungen und deren Auflistung erfolgt im Kapitel 4.5.

Die mit den Programmcodes FEFLOW und EMOS durchgeführten Grundwasserströmungs- und Radionuklidtransportmodellierungen sowie die Ermittlung der zu erwartenden Strahlenexposition stellen eine übliche Vorgehensweise bei der Beurteilung der Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle dar. Auf Grund der Datenlage konnten bisher lediglich orientierende Rechnungen durchgeführt werden, in denen das grundsätzliche Systemverhalten untersucht wurde. Es wurde dabei ersichtlich, dass die beschriebenen Programmcodes unterschiedliche Stärken und Schwächen besitzen. Soweit möglich wurden für alle Modellrechnungen standortbezogenen Erkundungsdaten verwendet. Ansonsten wurden sie mit Hilfe von Analogieschlüssen oder an Hand von Literatur- und Erfahrungswerten ergänzt.

Im Verlaufe der Modellrechnungen wurden verschiedene Variationen vorgenommen, um

- die Unsicherheiten in den Ausgangsdaten in Bezug auf Mobilisierung, Löslichkeit und Sorption Rechnung zu berücksichtigen,
- Änderungen der Endlagergeometrie, der Behälteranzahl je Bohrloch oder der Einführung eines Wärmeisolators, die aus den thermischen Endlagerauslegungsrechnungen resultieren (s. Kap. 3), in das Modell aufzunehmen,
- die Auswirkungen eines instantanen Behälterausfalls zu untersuchen,
- unterschiedliche Gesteinscharakteristika, die in einem Granit angetroffen werden können, wie
 - Durchlässigkeitsbeiwerte von Kluft und Matrix,
 - die Kluftöffnungsweite,
 - Kluft Häufigkeit,
 - Kluftanordnung und -neigung,
 - Eindringtiefe der Matrixdiffusion
 zu berücksichtigen und
- den Einfluss des natürlichen Wärmefeldes zu untersuchen

Ein Überblick der untersuchten Parameter-Variationen ist in Abbildung 4-61 dargestellt.

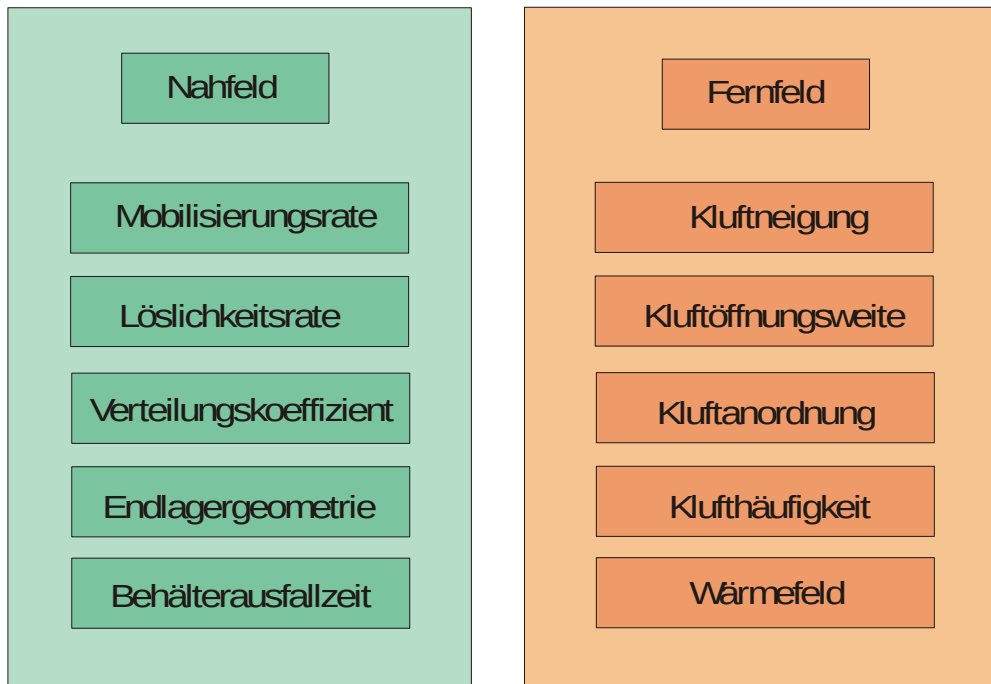


Abbildung 4- 61: Durchgeführte Parameter-Variationen

Die bisherigen Modelle lassen anhand durchgeführter Parametervariationen Rückschlüsse auf die Sensitivität ihrer Eingangsparameter zu. Die Modellierungen haben gezeigt, dass die Grundwasserströmung und der Schadstofftransport in einem geklüfteten Aquifer im Wesentlichen von der hydraulischen Durchlässigkeit der Gesteinsmatrix und ihrer Klüfte beeinflusst werden. Das Kluftnetzwerk nimmt an Bedeutung zu, je größer der Unterschied zwischen Matrix- und Kluftdurchlässigkeit ist. Die Strömungs- bzw. Transportgeschwindigkeit innerhalb des Kluftsystems ist abhängig von der Kluftart, der Kluftöffnung und -orientierung. Einzelklüfte weisen gegenüber Bereichen hoher Kluftdichte eine besonders große Strömungsgeschwindigkeit auf.

Die Wirkung der Matrixdiffusion steht in unmittelbarem Zusammenhang mit der in der Kluft herrschenden Schadstoffkonzentration und korreliert damit indirekt mit der Transportgeschwindigkeit. Die Dispersion ist dagegen von der Transportweglänge und der Klufthäufigkeit abhängig. Handelt es sich um Einzelklüfte, die in Richtung des hydraulischen Potentials angeordnet sind wie z.B. Lagerklüfte, so ist die Strömungsgeschwindigkeit in diesen, im Vergleich zu Querklüften gleicher Durchlässigkeit, besonders hoch. Der Schadstofftransport kann daher schnell erfolgen. Dies kann dazu führen, dass der Schadstoff durch eine weiter entfernt liegende Einzelkluft schneller an die Erdoberfläche transportiert wird, als durch eine näher an der Schadstoffquelle gelegene Zone größerer Kluftdichte, wie z.B. eine Schieferungszone. Dies lässt sich durch eine gegenüber Einzelklüften erheblich geringere Strömungsgeschwindigkeit und mit größeren Auswirkungen von Dispersion und Matrixdiffusion erklären. Hierdurch wird der Transport in diesem Bereich gegenüber einer einzelnen Kluft stark verlangsamt.

Aus Standorterkundungsdaten kann man entnehmen, dass die vertikal verlaufenden Klüfte für die Grundwasserströmung bei weitem bedeutungsvoller sind als die horizontalen. Das liegt daran, dass die Anzahl der horizontalen Klüfte mit der Tiefe abnimmt und diese zudem häufig mit dicht auskristallisierten Mineralen gefüllt sind. Im Gegensatz dazu weisen vertikale Klüfte

oft ein weitgehend gut durchlässiges Füllmaterial auf. Wesentlichen Einfluss auf die Kluftöffnungsweiten haben die im Massiv herrschenden Spannungsverteilungen (s. Kap. 2). Hierdurch besitzen die vertikalen Klüfte z. T. einen bis zu zehn mal größeren Durchlässigkeitsbeiwert [Fernandez 2003]. Wesentlichen Einfluss auf die Kluftöffnungsweiten haben die im Massiv herrschenden Spannungsverteilungen (s. Kap. 2).

Das natürliche Wärmefeld führt eine Beschleunigung der Grundwasserströmung herbei und kann den Transportpfad der Radionuklide stark verändern. Das Wärmefeld im Untergrund ist von der Temperatur-Randbedingung und der Fließgeschwindigkeit in der Gesteinsmatrix bzw. im Kluftsystem abhängig. In einem nahezu homogenen Gesteinsbereich, in dem die Differenz des Durchlässigkeitsbeiwerts in den durch Mineralisation oder auf andere Weise verfüllten Klüften zum Durchlässigkeitsbeiwert des Gesteins gering ist, wird ein weitgehend homogenes Wärmefeld mit parallel zur Erdoberfläche verlaufende Isotherme ausgebildet. Besitzen Gesteinsmatrix und Kluftsystem dagegen stark unterschiedliche Durchlässigkeitsbeiwerte, kommt es zu der Ausbildung eines inhomogenen Wärmefeldes. Dieses kann mit den Parametern zur Modellierung des Wärmetransports im Gestein und im Wasser begründet werden. Während die Wärmeleitfähigkeit im Gestein größer ist als im Wasser, besitzt Wasser eine höhere Wärmekapazität als das Gestein. Wenn die Klüfte eine hohe Durchlässigkeit besitzen, wird die im Wasser gespeicherte Wärme mittransportiert und es bilden sich in Kluftnähe Wärmespitzen aus, während es in ihrer unmittelbaren Nähe zur Ausbildung von Wärmesenken kommt. Die Grundwasserfließgeschwindigkeit nimmt zu und reduziert den Effekt der Matrixdiffusion. Da die Grundwasserströmung eine Abhängigkeit vom Wärmegradienten aufweist, kann eine Ausbildung unterschiedlicher Wärmefelder dazu führen, dass sich die Grundwasserströmungsrichtung und damit der Transportpfad verändert.

Die dreidimensionale Strömungsmodellierung ermöglicht eine Aussage über das regionale hydraulische Systemverhalten. Fließpfade aus dem potenziellen Endlagergebiet heraus lassen Vorhersagen über Gebiete zu, in denen dieses Wasser aufsteigt und damit möglicherweise zu einer Kontamination des oberflächennahen Grundwasserleiters und zu einer erhöhten Strahlenexposition in der Biosphäre führt. Damit lassen sich gefährdete Areale sowie der Beginn ihrer Verschmutzung eingrenzen. In Abbildung 4-62 sind die potenziell gefährdeten Gebiete, die sich für die zur Zeit vorhandenen Eingabedaten ergeben, kenntlich gemacht.

Des Weiteren wurde gezeigt, dass dem anfänglich diffusiven Transport durch die dichte und geringdurchlässige Gesteinsmatrix der Geosphäre eine besondere Bedeutung zukommt, da diese die Gesamttransportzeit ganz wesentlich bestimmt.

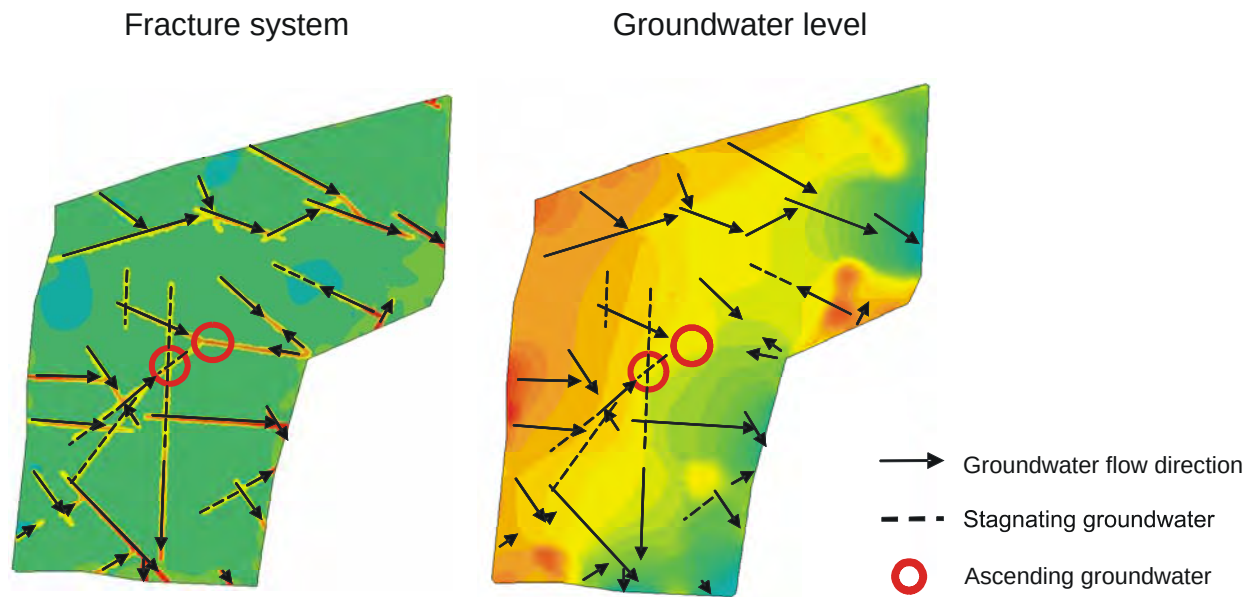


Abbildung 4- 62: Darstellung der vorherrschenden Fließrichtung in den Klüften mit den Strömungsgeschwindigkeiten (links) und der Grundwasseroberfläche (rechts) als Hintergrundbilder

Die bisherigen orientierenden Berechnungen mit EMOS führten unter Verwendung der vorhandenen Daten und Modellannahmen zu einer Strahlenexposition, die in keinem Fall den deutschen und russischen Grenzwert von $3 \cdot 10^{-4}$ bzw. $1 \cdot 10^{-5}$ Sv/a erreicht. Für die Cs-Sr-Fraktion in den Varianten 2 und 3 „fe“ ergeben sich jedoch bereits Strahlenexpositionen zwischen $4 \cdot 10^{-7}$ und $4 \cdot 10^{-6}$ Sv/a, für die Summe der Fraktionen Schlamm, Seltene Erden und Spaltprodukte beider Varianten $4 \cdot 10^{-6}$ Sv/a. Die Grenzwerte werden damit, selbst bei Annahme eines sofortigen Behälterausfalls unterschritten, da die kurzlebigen Radionuklide Sr-90 und Cs-137, die in der Variante 3 den Nuklidstrom aus dem Nahfeld dominieren, in der Biosphäre keine Rolle mehr spielen. Der Grund dafür liegt in ihrer kurzen Halbwertszeit, wodurch sie während des Transports im Fernfeld weitgehend zerfallen. Hinsichtlich der Strahlenexposition erwiesen sich Cs-135, Np-237 und seine Zerfallsprodukte sowie Sn-126 und Se-79 als wichtigste Radionuklide. Sie zeichnen sich durch hohe Inventare in der jeweiligen Fraktion, eine relativ gute Löslichkeit und eine schwach bis mäßige Sorption im Bentonit und Granit aus. Die in den Realisationen betrachteten unterschiedlichen Eigenschaften des Fernfeldes haben einen großen Einfluss auf das Transportverhalten vieler Radionuklide und in Folge daraus, auf die maximal erreichte Strahlenexposition und deren zeitliches Auftreten gezeigt.

In Fortsetzung der bisherigen Arbeiten müssten die zum Teil stark vereinfachenden Modellannahmen überarbeitet und die aufgetretenen, noch nicht ausreichend untersuchten Modellunsicherheiten genauer bestimmt und untersucht werden.

Für eine belastbare Sicherheitsanalyse ist es unbedingt notwendig, konsistente Daten zu verwenden und die Modelle im Hinblick auf die geometrischen Annahmen der Kluftstruktur bzw. der Endlagerauslegung sowie der Parametereingabe zu verfeinern. So ist die bisherige modellhafte Abbildung des Nahfeldes bzw. des geklüfteten Festgesteinsbereichs derzeit noch nicht ausreichend, um belastbare Prognosen über das Langzeitverhalten der Radionuklide anzustellen.

Die im Nahfeldmodell GRAPOS verwendete Endlagergeometrie kann bisher nur als vorläufige Variante bezeichnet werden, da sie sich auf die vorläufigen Ergebnisse der thermischen Endlagerauslegungsrechnungen (s. Kapitel 3.3) stützt. Eine Veränderung der Einlagerungsfläche bzw. Bohrloch- oder Streckengeometrie wirkt sich vor allem auf den Volumenstrom aus, der ein wichtiger Parameter für die Höhe der Freisetzungsrates aus dem Nahfeld sowie die Transportzeit durch das Fernfeld darstellt.

Bei der Berechnung der Radionuklidfreisetzung aus der Abfallmatrix wird der potenzielle Barriereeffekt der Behälter vernachlässigt und die Radionuklidfreisetzung in das Lösungsvolumen erfolgt unmittelbar nach dem Versagen der Behälter. Eine Berücksichtigung der Barrierenwirkung der Behälter würde die Freisetzungsrates verändern.

Das künstlich durch die stark wärmeentwickelnden Abfälle erzeugte Wärmefeld im Nahfeldbereich sollte mit in die Modellrechnungen aufgenommen werden, da es die Mobilisierungsrates der Radionuklide erhöht, so dass die Freisetzungsrates ansteigt.

Die unterschiedlichen Eigenschaften des durch verschiedene Spannungsmuster geprägten umgebenden Gesteins sind bisher ebenfalls nicht differenziert in das Modell eingeflossen. Die erstellten Modelle geben daher bisher nur in stark vereinfachter Form die Kluftgeometrie wieder und enthalten keine differenzierten Angaben über Kluftcharakteristika wie Öffnungsweite und Durchlässigkeitsbeiwerte. In CHETMAD sind zwar drei Gesteinsvarianten betrachtet worden, diese verändern sich jedoch vom Nahfeldbereich bis zur porösen Deckschicht nicht. Es bietet sich daher an, die Modelle dahingehend zu erweitern und eine stärkere Unterscheidung in Bezug auf Klufthäufigkeit, –öffnungsweite und –durchlässigkeit vorzunehmen, die sich in Abhängigkeit von der Kluftneigung und -tieflage, der Dauer und Stärke der innerhalb der Kluftzone stattfindenden Alterations- bzw. Verwitterungsprozesse, z.B. durch Bildung von Tonmineralen, sowie der sich lokal unterscheidenden Gesteinszusammensetzung verändert, z.B. im Kontaktbereich zwischen Granitmatrix und Lamprophyrgang, schrittweise den tatsächlichen Gegebenheiten anzupassen. So ließen sich auch die Zonen unterschiedlicher Gebirgsspannung im Modell wiedergeben. Dann könnte auch der Tatsache Rechnung getragen werden, dass die flach einfallenden Lagerklüfte, wie viele wissenschaftliche Studien zeigen, ohne Reaktivierung, aufgrund ihrer meist kleinen und stark mineralisierten Kluftöffnungsweite, viel kleinere Transportgeschwindigkeiten besitzen als Querklüfte. Diese weisen meist größere Kluftöffnungsweiten auf und sind mit Verwitterungsmaterial gefüllt, womit sie die wirkungsvolleren hydraulischen Wegsamkeiten darstellen.

Eine Verkleinerung der Modellfläche könnte durch den größeren Maßstab zu einem verfeinerten geologischen Strukturmodell beitragen, worin auch kleinere Kluftstrukturen, wie die alterierte Gesteinszone im Kontaktbereich Kluft-Gesteinsmatrix, eingearbeitet werden könnten.

Da derzeit keine genaueren Informationen über die Kluftgeometrie vorhanden sind, sollte man die bisher verwendete einer eingehenden Prüfung unterziehen und weitere Modelle mit möglichen Variationen des Kluftnetzwerkes erstellen und untersuchen.

Das bisher erstellte Fernfeldmodell CHETMAD berücksichtigt zur Zeit lediglich einen eindimensionalen Schadstofftransport mit einer gleichbleibenden Geschwindigkeit. Die Veränderung der Transportgeschwindigkeit in Folge unterschiedlicher Transportrichtungen könnte durch die Variation des Volumenstroms berücksichtigt werden.

Das Biosphärenmodell ist bisher nur auf deutsche Klimaverhältnisse, sowie Lebens- und Verzehrgeohnheiten ausgelegt und spiegelt daher nicht die Situation am vorgesehenen Standort des Endlagers im Nishnekansker Massiv wider. Daher müssten die Expositionspfade der Radionuklide gegebenenfalls angepasst werden.

Die Kopplung der tiefen Grundwasserzirkulation an das oberflächennahe regionale Grundwasserregime macht die genauere Betrachtung der dortigen Eingabeparameter notwendig. Auf Grund des betrachteten sehr großen Modellzeitraums wurde lediglich auf langjährige klimatische und hydrologische Mittelwerte zurückgegriffen. Der hydraulische Gradient wurde lediglich als grobe Näherung aus den konstruierten Modelldaten abgeleitet.

Die Verwitterungszone erhält entsprechend den russischen Angaben einen geringeren Durchlässigkeitsbeiwert als die Sedimente, obwohl eine Literaturstudie zeigt, dass die Durchlässigkeiten der Verwitterungsschicht häufig größer sind, z.B. [Balla 2000]. Dies sollte näher untersucht werden.

Des Weiteren wurde der Einfluss von Kolloiden auf das Transportverhalten der Radionuklide nicht berücksichtigt.

Die Ergebnisse legen nahe, für eine Endlagerung radioaktiven Abfalls im Hartgestein eine möglichst große Entfernung zur nächsten Kluft einzuhalten. Dem anfänglichen diffusiven Transport durch die wenig gestörte und daher gering durchlässige Gesteinsmatrix kommt im Hinblick auf das Isolationspotenzial der geologischen Barriere eine besonders große Bedeutung zu, da dieser Gesteinsbereich die Gesamttransportzeit ganz wesentlich bestimmt. Weiterhin sind in Grundwasserströmungsrichtung verlaufende Lagerklüfte mit hohem Transportpotenzial zu vermeiden und der Nachweis und Verlauf von Einzelklüften in Endlagernähe zu untersuchen.

Aus den Untersuchungen wird ersichtlich, dass es im Hartgestein aufgrund der Wasserwegsamkeiten innerhalb des Kluftnetzwerks schnell zu einem Austrag der Radionuklide in die Biosphäre mit entsprechend hohen Expositionsraten kommen kann. Der technischen Endlagerbarriere kommt daher eine besondere Bedeutung zu.

4.4.4.2 Mögliche Weiterentwicklung der Programme

Das Nahfeld-Programm GRAPOS besitzt eine Vielzahl an Erweiterungsmöglichkeiten.

Zunächst sollte die Möglichkeit der Eingabe von Behälterausfallzeiten in Form einer Wahrscheinlichkeitsverteilung geschaffen werden. Dadurch könnte der Behälterausfall realistischer beschrieben werden.

Die lang anhaltende hohe Temperatur, die durch stark wärmeentwickelnde Abfälle wie die Cs-Sr-Fraktion erzeugt wird, führt zu einer Erhöhung der Mobilisierungsrate und der Diffusion durch den Bentonit. Es bietet sich daher an, diese beiden Parameter zeitabhängig zu berücksichtigen.

Des weiteren könnte die Endlagergeometrie von der heute radialen Form an die tatsächlichen Gegebenheiten angepasst werden und damit eine bessere Nachbildung der Geometrie einer Streckenlagerung erlauben. Hierfür müsste gegebenenfalls ein anderes Programm entwickelt werden. Eine zusätzliche Zone im Nahfeldbereich, die sich in ihren physikalischen Eigenschaften vom Bentonit abhebt, wie z.B. der Isolator, könnte ebenfalls separat in die Modellierung aufgenommen werden.

Die Tatsache, dass ein Endlager im Hartgestein in einem wenig gestörten Gesteinsbereich geplant wird, der jedoch nur ein begrenztes Volumen besitzt und von Bereichen stärker geklüfteten Gesteins oder von größeren Klüften umgeben ist, macht eine stärkere Differenzierung der Gesteinsbereiche notwendig. So sollte in direktem Anschluss an die EDZ des Nahfeldes die Aufnahme eines schwach geklüfteten Gesteinsbereiches möglich werden.

Die Fernfeldmodellierung mit dem Programm FEFLOW hilft bisher lediglich bei dem Verständnis des regionalen Grundwasserregimes und lässt Aussagen über die Strömungsgeschwindigkeiten, den eingeschlagenen Transportweg, sowie den Transport eines einzelnen Radionuklids zu. Um belastbare Aussagen zur Endlagersicherheit zu ermöglichen, muss die Möglichkeit geschaffen werden, den Transport ganzer Radionuklidzerfallsreihen zu berechnen und jedes Nuklid mit einem elementabhängigen Sorptionswert belegen zu können. Des weiteren sollte eine Belegung von Matrixbereichen mit bestimmten Kluftwahrscheinlichkeiten ermöglicht werden. Ein großer Fortschritt wäre zudem die Umstellung der Rechnungen auf einen Parallelrechner. Dies würde eine starke Verkürzung der Rechenzeit bedeuten und durch eine feinere Diskretisierung das Einbringen zusätzlicher Klüfte erlauben.

4.5 Bewertung der vorliegenden Standortdaten im Hinblick auf das sicherheitsanalytische Modell sowie Empfehlung für zusätzliche Erkundungsmaßnahmen und Laborexperimente

Zur Erarbeitung einer umfassenden und belastbaren Langzeitsicherheitsanalyse ist es notwendig, die Modellunsicherheiten genauer zu untersuchen und für die Eingangsdaten der Modelle ein in sich konsistentes Datenmaterial zu schaffen (s. dazu auch Kap. 6). Auf Grund der hohen Anzahl fehlender bzw. stark inhomogener Daten, vor allem aus dem Bereich der Hydrogeologie, ist es notwendig, die erzeugten Modelle zu hinterfragen und neue Daten einzuarbeiten. Am Ende steht eine Kalibrierung bzw. Validierung, die es erlaubt, gerechtfertigte Prognosen für eine künftige Ausbreitung der Radionuklide abzugeben. Bis dahin liefern die Modelle lediglich Anhaltspunkte für Strömung und Transport, sowie Aussagen über die Sensitivität der Modellparameter. Eine systematische Parameterstudie wäre ein wichtiger Schritt und könnte einen wertvollen Beitrag in Bezug auf eine gezielte „Messkampagne“ leisten, um deren Umfang und damit die Kosten gering zu halten.

Sowohl im Bereich des Nahfeldes als auch für das Fernfeld und die Biosphäre sind erhebliche Datendefizite zu verzeichnen. Auf Grund der Datenlage haben die Rechnungen lediglich einen orientierenden Charakter und geben nur das grundsätzliche Systemverhalten wieder. In Tabelle 4-20 sind die wesentlichen Modellparameter der Programmcodes EMOS und FEFLOW aufgeführt. Die bisher erhaltenen sowie die noch ausstehenden bzw. nicht zufriedenstellenden Daten sind darin markiert. Wie aus der Tabelle hervorgeht, beruhen die bisher durchgeführten Modellierungen weitgehend auf Annahmen, die einer Überprüfung bedürfen.

GRAPOS	CHETMAD	FEFLOW	EXMAS
flow rate [m³/a]		conductivity [m/s]	additional radionuclides
area and geometry of the repository [m]	porosity [-]		porosity and density of the interface layer to the biosphere
distribution coefficient [m³/kg]			
radionuclides and their daughter nuclides	radionuclide decay and build-up	groundwater recharge [m/d]	distribution coefficient for the porous layer
activity [Bq/cask]	fracture geometry (aperture [m] /frequency [m/m²])		flow rate in the geosphere
water filled volume [m³]	diffusion through the granite [m²/s]		assumptions according to AVV
releasing and mobilisation rates	free surface of groundwater [m u surface]		
diffusion through the bentonit [m²/s]			
length and amount of container	pathlength [m]	dispersion (long./trans.)	☐ no data ☐ only a few data ☐ available data
density of bentonit and granite [kg/m³]	rock density [kg/m³]	geological interfaces [m]	
porosity of bentonit and granite [-]	penetration depth [m]		
inner- and outer radius of the bentonit [m]			

Tabelle 4- 20: Eingabeparameter der verschiedenen Programme

Aufgrund der Datenlage wurde für die Durchlässigkeitsbeiwerte im Granit, die sehr sensitive Parameter darstellen, eine Literaturstudie durchgeführt. Diese ermöglicht einen besseren Vergleich und eine Bewertung der russischen Daten. Die Werte sind in Tabelle 4-20 zusammengestellt. Da die Umstände der Datenermittlung häufig nicht bekannt waren, bestand eine große Schwierigkeit in Bezug auf ihre Interpretation und die Prüfung ihrer Glaubwürdigkeit. Ein Beispiel dafür sind die Mobilisierungsraten der Radionuklide aus der Glas- bzw. Mineralmatrix. Generell erscheinen diese Raten relativ hoch, insbesondere wenn man davon ausgeht, dass zum Zeitpunkt eines Behälterausfalls nach 3 500 Jahren die Umgebungstemperatur wieder annähernd Gebirgstemperatur erreicht. Auffällig ist, dass die Mobilisierungsraten derselben Radionuklide aus der Schlamm-Matrix schneller mobilisiert werden als aus der Cs-Sr Fraktion und sich daher die Freisetzungsraten einzelner Elemente aus der gleichen Matrix unterscheiden. An dieser Stelle sollten die Experimente und gegebenenfalls Modellrechnungen beschrieben werden, auf deren Grundlage die Ableitung der Raten erfolgt ist. Weiterhin ist die Konsistenz der Daten zu überprüfen. Auch für die Bestimmung der Verteilungskoeffizienten im Granit lag keine Beschreibung der Experimente vor, die zu den Daten geführt haben.

Durch Parametervariationen wurde bestätigt, dass die hydraulische Durchlässigkeit von Gesteinsmatrix und Kluftsystem für das Grundwasserströmungsverhalten in einem geklüfteten Grundwasserleiter die wichtigste Größe darstellt. Die Matrixdurchlässigkeit bestimmt wie schnell der Transport durch den weitgehend ungestörten Gesteinsbereich, in den das Endlager eingebettet wird, erfolgt. Da dem anfänglichen Gesteinsbereich eine besonders große Bedeutung in Bezug auf die Gesamttransportzeit zukommt, ist dies von ganz entscheidender Bedeutung für die Isolation der eingelagerten Abfälle. Die Differenz zwischen Matrix- und Kluftdurchlässigkeit nimmt Einfluss darauf, wie stark die Retardation der Gesteinsmatrix wirkt und inwieweit der Transport auf das Kluftsystem beschränkt ist. Zudem verursacht ein großer Durchlässigkeitsunterschied zwischen Kluft- und Matrix die Ausbildung von Inhomogenitäten im Wärmefeld und damit eine besonders schnelle Schadstoffausbreitung im Kluftnetzwerk. Neben dem Zeitpunkt, an dem die Emission in die Biosphäre erfolgt, ist die Durchläss-

sigkeitsverteilung im Gestein zusammen mit der Kluftorientierung maßgeblich daran beteiligt, an welcher Stelle der Schadstoffaustrag in diese stattfindet.

Die Parameteränderung der verschiedenen Realisationen für das Fernfeld hat einen großen Einfluss auf das Transportverhalten vieler Radionuklide gezeigt. Dies macht die große Bedeutung und die Notwendigkeit genauer Informationen über diese Gesteinsdaten für ein realistisches Standortmodell deutlich.

Auf Grund der großen Relevanz der stark einfallenden Klüfte auf den Schadstofftransport sollte eine deren genaue Untersuchung erfolgen.

Die Transportstrecke der Radionuklide kann durch Variation der Kluftgeometrie, aber auch durch Einbeziehung des natürlichen Wärmefeldes stark verändert werden. Es ist daher anzunehmen, dass auch das aus dem radioaktiven Zerfall künstlich erzeugte Wärmefeld Einfluss auf den Transportweg der Radionuklide nimmt, weshalb es genauer untersucht werden sollte. Die Grundwasserströmung im Kluftsystem erfolgt auf der Grundlage des regionalen Grundwasserregimes. Daher sind Kenntnisse über die Topographie und die Lage des Grundwasserspiegels notwendig.

Die Durchlässigkeitsbeiwerte der porösen Deckschicht und der Verwitterungszone, sowie Informationen über den Pflanzenbewuchs helfen bei der Abschätzung der Grundwasserneubildung und des Grundwasserumsatzes von oberflächennahen Grundwässern in das Kluftsystem.

Eine wichtige Voraussetzung im Vorfeld der Erstellung eines standortspezifischen Modells stellt die Aufbereitung der Geodaten, auch im Hinblick auf die Benutzung eines GIS dar. Dazu ist die Angabe eines gemeinsamen Koordinatensystems von entscheidender Bedeutung. Nur so kann sichergestellt werden, dass die Flächendaten korrekt in Übereinstimmung gebracht werden.

Die bisherigen Untersuchungen legen nahe, insbesondere folgende Parameter und Sachverhalte genau zu überprüfen, um den Transport der Radionuklide durch das Nah- und Fernfeld besser beurteilen zu können:

- die Vollständigkeit des Radionuklidinventars,
- Auswirkungen der Verwendung eines Isolators,
- der Chemismus des Grundwassers, da dieser große Auswirkungen auf die Freisetzungsraten und die Rückhaltung der Radionuklide hat.
- die Löslichkeiten und Mobilisierungsraten der Radionuklide im Grundwasser der entsprechenden Hartgesteinsformation,
- die Verteilungskoeffizienten in Bentonit und Granit um konsistente und abgesicherte Datensätze zu erhalten,
- die Kluftparameter in Abhängigkeit des Ortes und der Tiefe:
- Kluftorientierung,
- Klufthäufigkeit,
- Kluftöffnungsweite,
- Durchlässigkeitsbeiwert.
- Ausdehnung des alterierten Bereiches,
- Dies kann auf messtechnischen Verfahren und/oder auf geologischem Sachverstand beruhen. So kann zunächst versucht werden, die Systematik der Kluftsysteme auf der Grundlage ihrer Entstehungsgeschichte zu verstehen. Damit wäre es möglich die Kluftorientierung bestimmter Kluftnetzwerke zu vervollständigen und aus ihrem Entstehungsalter Rückschlüsse auf die Alteration und den Füllungsgrad der Einzelklüfte zu ziehen.

- Welche Kluftcharakteristika im Bereich des Fernfeldes würden bei Annahme einer festgesetzten Behälterausfallwahrscheinlichkeit zu einer Verletzung der Richtwerte der erlaubten Strahlenexposition führen?
- die orts- und tiefenabhängige Matrixdurchlässigkeit,
- die Grundwasserstandsdaten,
- die Untersuchung des Einflusses des durch den radioaktiven Zerfall erzeugten, sich mit der Zeit verändernden künstlichen Wärmefeldes auf das Strömungsfeld des Grundwassers, da bisherige Untersuchungen zeigen, dass sich die Strömung in Abhängigkeit eines sich ausbildenden Wärmefeldes grundlegend verändern kann
- die Berücksichtigung eines kolloidgetragenen Radionuklidtransports und einer dadurch erhöhten Transportgeschwindigkeit.
Diese ist bisher nicht erfolgt. Es ist jedoch am Außenrand der Bentonitbarriere möglich, dass kolloidale Tonbestandteile gelöst werden. An diese können die Radionuklide im Transportverlauf durch das Fernfeld gebunden und dadurch schneller transportiert werden.
- der Einfluss der Mikroorganismen auf die Strömung bzw. den Schadstofftransport im Kluftsystem, da es Hinweise darauf gibt, dass durch Mikroorganismen entstehende Kluft-häute den Übergang des Kluftwassers in die Gesteinsmatrix durch eine Verkleinerung der Porosität und Vergrößerung der Tortuosität erschweren. Ebenfalls werden Diffusion und Sorption wesentlich beeinflusst [Sharp 2003]. Die Mikroorganismen spielen auch im Zusammenhang mit dem im Grundwasser häufig enthaltenen Mangan und Eisen eine wichtige Rolle. Durch Reduktion bewirken sie eine Ausfällung, welche die Kluft-häute noch undurchlässiger gestaltet. Dieser Themenkomplex befindet sich noch in der Forschung und fand bisher daher in noch keinem bestehenden Modell Eingang.

5 ENTWURF DREIDIMENSIONALER GEOLOGISCHER STANDORTMODELLE FÜR DIE GEBIETE „VERCHNE-ITATSKIJ“ UND „JENNISSEJSKIJ“

5.1 Ziele und Aussagemöglichkeiten der 3D-Modellierung

Ausgehend von geologischen Gesichtspunkten ist die Auswahl von langzeitsicheren Standorten für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Magmatiten bzw. Metamorphiten vor allem auf die Suche nach ausreichend großen Gesteinsblöcken (siehe Kap. 3) ausgerichtet, die durch eine fehlende bzw. sehr schwache Grundwasserströmung, eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit von seismischen Erschütterungen und von Bewegungen entlang neotektonisch aktiver Störungszonen charakterisiert sind.

Der in Langzeitsicherheitsbetrachtungen für den Fall des teilweisen bzw. völligen Versagens der technischen und geotechnischen Barrieren zu erbringende Nachweis eines lang andauernden Verweilens der Radionuklide im Einlagerungsbereich des zukünftigen Endlagers stellt an die Resultate der geologischen Standorterkundung zahlreiche Anforderungen. Im Ergebnis detaillierter geologisch-geophysikalischer Erkundungsarbeiten und ergänzender Laborexperimente müssen, neben exakten Angaben zu den hydraulischen Eigenschaften und zum Radionuklid-Rückhaltevermögen der Wirtsgesteine, klare Vorstellungen zum geologischen Tiefenbau des Untersuchungsgebietes vorliegen. Dazu gehören z. B. Informationen:

- zur Verbreitung unterschiedlicher Gesteinstypen und zum Vorkommen von Inhomogenitäten,
- zur hydrogeologischen Zonierung im Untergrund des Standortes und zum weitgehenden Fehlen tief reichender Grundwasserleiter mit sauerstoffreichen, meteorischen Wässern,
- zur Verteilung und Größe $\pm$ monolithischer, nur schwach geklüfteter Gesteinsbereiche,
- zum Fehlen von mächtigen, hydraulisch und neotektonisch aktiven Störungszonen im unmittelbaren Einlagerungsbereich sowie
- zum Vorhandensein ausreichender Retentionsräume mit hohem Schadstoffrückhaltevermögen.

Die genannten Voraussetzungen für die Auswahl eines geeigneten Endlagerstandortes sind ohne eine räumliche Darstellung der Ergebnisse der Erkundungsarbeiten nur sehr schwer und ungenau überprüfbar.

Die 3D-Modellierung aller zum Standort vorliegenden geologisch-geophysikalischen Informationen ist eine notwendige Voraussetzung zur detaillierten Analyse und komplexen Interpretation der Erkundungsergebnisse. Sie dient zum Abgleich der geophysikalischen Daten mit bereits vorhandenen geologischen Befunden und ist ein wichtiges Werkzeug zur Auswertung sowie Interpretation insbesondere von geophysikalischen Primärdaten.

Geologische 3D-Modelle stellen wichtige Ausgangsinformationen zur Bewertung des Eignungsgrades potenzieller Endlagerstandorte und für modellhafte Berechnungen von Deformations-, Wärmetransport- sowie Radionuklidausbreitungsprozessen dar. Sie bilden damit eine wichtige Grundlage für die Einschätzung der Langzeitsicherheit von Endlagern. Außerdem liefern 3D-Modelle wichtige Beiträge zur Planung bzw. Optimierung der weiteren geologisch-geophysikalischen Untersuchung vorausgewählter Endlagerregionen und sind effektive Instrumente zur Steigerung der Zielgerichtetheit und Effektivität der späteren bergmännischen Erschließung des ausgewählten Endlagerstandortes.

Die Synthese und räumliche Darstellung der Erkundungsergebnisse in einem 3D-Modell ermöglicht u. a.:

- die für den Nachweis der Eignung von Standorten in magmatischen Gesteinen besonders wichtige, vorwiegend auf geophysikalische und hydrogeologische Untersuchungsbefunde gestützte Abgrenzung von Gebirgsbereichen mit geringer Deformation und Klüftigkeit,
- Aussagen zum Vernetzungsgrad und zur räumlichen Lage bzw. Verteilung von Störungszonen oder Kluftsystemen, magmatischen Gängen, Intrusivkontakten und Einschlüssen, die als bevorzugte Migrationswege für Grundwässer dienen können,
- die Auswahl und modellgestützte Modifizierung der für die Standortcharakterisierung effektivsten Erkundungsmethoden,
- die gezielte Festlegung von Bohransatzpunkten und von geophysikalischen Messprofilen bzw. Messarrays für die Fortsetzung der detaillierten Standorterkundung,
- die Schaffung von Grundlagen für geomechanische Modellierungen, wie z. B. die Bestimmung und zeitlich-räumliche Prognose von Spannungszuständen und physikomechanischem Gesteinsverhalten oder die Modellierung der temporalen Entwicklung von Bruchzonen, und
- die modellgestützte Durchführung geohydraulischer Berechnungen, wie z. B. Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit von vernetzten Kluftsystemen, Eingrenzung von Gesteinsbereichen mit hoher Grundwasserzirkulation, Bestimmung der Ausbreitungspfade und -geschwindigkeiten von Schadstoffen.

Für die Ausweisung endlagergeeigneter Gebirgsbereiche in magmatischen bzw. metamorphen Gesteinskomplexen haben vor allem die Visualisierung und Interpretation von Störungszonen oder Schieferungs- und Kluftflächen sowie die räumliche Darstellung von Inhomogenitäten, wie z. B. von großen Einschlüssen, magmatischen Gängen und lithologischen Kontakten, eine außerordentlich große Bedeutung. Informationen zur räumlichen Lage und zur Ausbildung (z. B. Grad der Verschneidung, Kluftdichte, Volumen) sowie zu den hydraulischen Eigenschaften von Störungszonen und Klüften sind wichtig für den Nachweis von potenziell möglichen Grundwasserwegsamkeiten („Pfadsuche“) und für Berechnungen der Grundwasserströmung sowie des Radionuklidtransportes. Modellbetrachtungen zu möglichen Grundwasserbewegungen in magmatischen Gesteinen können durch die Vielfalt von potenziell wasserdurchlässigen und häufig kompliziert miteinander vernetzten Strukturelementen erschwert oder, beim Fehlen von Kenntnissen zum Detailaufbau der Gesteinskomplexe, unmöglich gemacht werden (z. B. [Kotschkin 1997]).

Im Rahmen der Detailcharakterisierungen der potenziellen Endlagerstandorte „Verchne-Itatskij“ und „Jennissejskij“ im Umfeld des BChK Shelesnogorsk wird das Programm „openGEO5“ zur Auswertung und 3D-Modellierung der geowissenschaftlichen Erkundungsdaten angewendet. Dabei handelt es sich um ein von der Firma „BiCad“, Hannover, entwickeltes und in Zusammenarbeit mit der BGR den Erfordernissen der geologischen Praxis fortlaufend angepasstes Programm. Eine Beschreibung des Programms „openGEO5“ ist in Anlage A1 des vorliegenden Berichtes enthalten.

Durch eine spezielle Anpassung von CAD-Systemen, die für die Erkundung von Salinarstrukturen entwickelt wurden, konnten die für eine Modellierung des geologischen Baus von magmatischen Wirtsgesteinen erforderlichen programmtechnischen Voraussetzungen bereits geschaffen werden. Im Ergebnis der Anwendung von „openGEO5“ bei der 3D-Modellierung der internen Strukturen von Salinarkörpern gelang es z. B., die geologische Vorfelderkundung des Endlagerstandortes Gorleben und die Erarbeitung von Solkonzepten für die Errichtung von Salzkavernen für die Erdgasspeicherung deutlich effektiver zu gestalten (z. B. [Bornemann et al. 2004]). Die Konstruktion komplexester Faltungen und komplizierter geologischer Körper erlaubte eine Optimierung des Auffahrens neuer Strecken und eine bessere Planung der Erkundungsbohrungen. Die Einbeziehung detaillierter Kenntnisse zur strukturell-texturellen Ausbil-

dung, Mineralogie/Geochemie und Feinstratigraphie der Salzfolgen in das geologische Modell ermöglichte eine gezieltere Kavernenplanung.

5.2 3D-Modellierung mittels „openGEO5“ – nutzbare Ausgangsdaten

Das Programm „openGEO5“ ist derart konzipiert, dass die unterschiedlichsten geologischen und geophysikalischen Erkundungsdaten eingeladen und bei der 3D-Modellierung berücksichtigt werden können. Dabei wird unterschieden zwischen „harten“ Modelldaten und „Daten zum Ansehen“, die lediglich die Konstruktionsentscheidungen unterstützen. Die „harten“ Grunddaten bleiben im Verlaufe der Modellierungsarbeiten erhalten, jede Veränderung wird gesondert dokumentiert. Ihre exakte Ausweisung bzw. Abgrenzung ist notwendig, um die der Konstruktion der 3D-Modelle zugrunde liegende unterschiedliche Aufschluss- bzw. Datendichte zu verdeutlichen.

Für die Eingabe in „openGEO5“ eignen sich folgende, auf Koordinaten (z. B. Gauß-Krüger) bezogene Erkundungsdaten bzw. Messergebnisse:

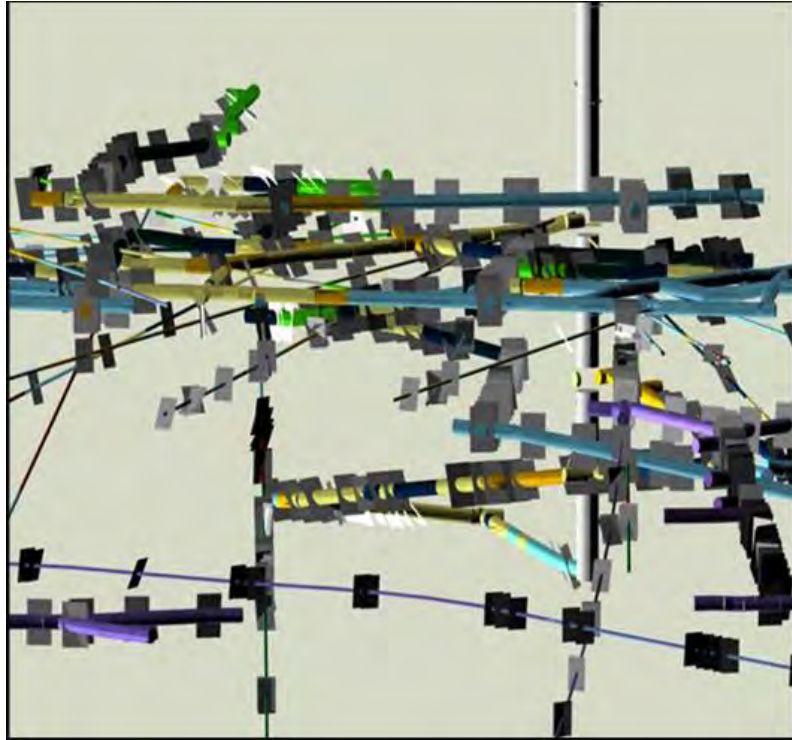
- Topographie der Geländeoberfläche,
- Markscheiderische Vermessungsergebnisse von bergmännischen Auffahrungen, Bohrungen und Messpunkten auf geophysikalischen Profilen,
- Bohrungsdaten, wie z. B. die auf den Bohrlochverlauf projizierten Kurzschichtenverzeichnisse mit oder ohne Orientierungen des Schichtungsverlaufs bzw. von Kontaktflächen zwischen unterschiedlichen Lithotypen, sowie geophysikalische Bohrlochmesskurven
- Ergebnisse von Schacht- bzw. Streckenkartierungen, inklusive Angaben zum Vorkommen von Klüften bzw. Störungszonen und zu ihrer räumlichen Orientierung,
- Bereits existierende geologische oder geologisch-geophysikalische Horizontal- und Vertikalschnitte,
- Digital vorliegende geologische und hydrogeologische Karten, wie z. B. Isolinienkarten der Quartärbasis oder des Tops schwach durchlässiger Gebirgsbereiche,
- Digitalisierte tektonische Karten bzw. Schemata (Lage und Verteilung von Störungszonen und Angaben zu ihrem Einfallen sowie zur Mächtigkeit), auch als Resultate der Dechiffrierung von Luftbild- und Satellitenaufnahmen,
- Parameterverteilungskarten, wie z. B. U- oder Ra-Verteilung im Boden oder He-Gehalte in der Bodenluft,
- Aero- und oberflächengeophysikalische Messergebnisse sowie die Produkte ihrer Auswertung, wie z. B. Resultate der Hubschrauber-geophysik, oberflächige geoelektrische Messdaten oder raumlagerichtige Darstellung der aus Radar- oder Seismikmessungen ermittelten Reflektoren sowie
- Digitalisierte Karten- bzw. Profildarstellungen, in denen geophysikalische Messergebnisse in geologische Aussagen, wie z. B. wahrscheinliche lithologische Grenzen und Störungszonen, umgesetzt wurden.

Zur Gewährleistung einer hohen Qualität der Modellierungsarbeiten und zur Sicherstellung einer universellen, in Kap. 5.1 beschriebenen Nutzbarkeit der erzeugten Modelle müssen sich alle Ausgangsdaten auf ein einheitliches (möglicherweise relatives) Koordinatensystem beziehen und maßstabsgerecht in das Modell eingefügt werden. Nach der Übernahme der Daten in das 3D-Modell werden sie einer Konsistenzprüfung unterzogen. Durch eine möglichst geringe Anzahl von Freiheitsgraden bei den Konstruktionsarbeiten, d. h. durch eine hohe Qualität und möglichst große Menge der den Modellierungsarbeiten zugrunde liegenden Ausgangsdaten, erhöhen sich die Qualität und Richtigkeit der Modelle. „openGEO5“ ist in der Lage, sehr große Datenmengen zu verarbeiten und verfügt über Schnittstellen zum Import von Daten z. B. im ASCII-Format oder aus den Datenbanksystemen „MS-Access“ und „Oracle“.

„openGEO5“ gestattet neben der 3D-Modellierung eine effektive Verwaltung der Erkundungs- und Vermessungsdaten auf der Basis von Ecktkoordinaten bzw. relativen Koordinatensystemen. Die Konstruktion geologischer Körper auf der Grundlage von Koordinaten-bezogenen Erkundungsergebnissen eröffnet breite Möglichkeiten zur gleichzeitigen Einbeziehung von Daten bzw. Informationen aus verschiedenen geologisch-geophysikalischen Methoden und aus unterschiedlichen Erkundungsstadien in die Modellierungsarbeiten. So kann im Rahmen der 3D-Modellierungen für das Gebiet „Jennissejskij“ z. B. eine vergleichende Gegenüberstellung und gemeinsame Auswertung der Ergebnisse kleinmaßstäblicher (1 : 200 000, 1974) und großmaßstäblicher (1 : 50 000, seit 2001) gravimetrischer Untersuchungen vorgenommen werden, bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Resultate anderer Analyseverfahren. Die Untersuchungsergebnisse können vom Bearbeiter entsprechend ihrer Qualität und Detailliertheit im Verlaufe der Konstruktionsarbeiten unterschiedlich gewertet werden, aber in jedem Fall ist ihre Einbeziehung in die 3D-Modellierung im Komplex mit den anderen vorliegenden Daten möglich.

Eine Besonderheit der Anwendung von „openGEO5“ bei der Rekonstruktion des geologischen Tiefenbaus von magmatischen Gesteinskomplexen besteht darin, dass dieses Programm umfangreiche Möglichkeiten zur Analyse der Orientierungen von Kluft- und Störungszonen bietet. Die Streich- und Einfallrichtungen sowie Einfallwinkel von Schicht- bzw. Kontaktflächen, Klüften oder Störungszonen werden am Ort ihrer Messung programmtechnisch als skalierbare, raumlagerichtige 3D-Flächen dargestellt (Abb. 5-1). Die räumlich entsprechend diesen Messungen orientierten Plättchen erleichtern die Konstruktions- und Visualisierungsarbeiten der genannten potenziellen Wasserwegsamkeiten. Bei der Rekonstruktion des Vernetzungsgrades der potenziellen Grundwasserfließwege ist es sinnvoll, mit einem einfachen Modell, in dem nur die Hauptkluftflächen erfasst werden, zu beginnen.

Parallel zu dieser Auswertung der Raumlage und des Vernetzungsgrades ist es mittels „openGEO5“ möglich, die im Modell erfassten Störungszonen bzw. Klüfte nach bestimmten Attributen zu filtern bzw. ein- oder auszublenden. Die Flächen sind dazu mit Informationen z. B. zum Versatz und Bewegungssinn der Störungen, zum Kluftvolumen bzw. zur Kluftöffnungsweite oder zur hydraulischen Durchlässigkeit (ermittelt im Ergebnis hydrogeologischer Feldmessungen, wie Packertest oder Pumpversuch) verknüpft. Dies ermöglicht eine Analyse der räumlichen Verteilung dieser Parameter.



Auf der Darstellung sind deutlich ein Schacht und mehrere Querschläge bzw. Strecken sowie aus den bergmännischen Auffahrungen niedergebrachte Erkundungsbohrungen sichtbar. Die Plättchen geben die räumliche Orientierung der im Zuge der Detailkartierung nachgewiesenen lithologischen Kontakte und der mit geophysikalischen Methoden (Radar- und Seismikmessungen) erfassten Reflektoren wider.

Abbildung 5-1: Beispiel für den Import von Daten aus der Streckenkartierung, Bohrkernaufnahme und aus geophysikalischen Untertagemessungen sowie von Angaben zur Schicht-, Kontakt- oder Kluftorientierung in das „openGEO5“-Modell eines Salzstockes

5.3 Modellierung des geologischen Untergrundes am Standort „Kamennyj“

Das im Ergebnis von Voruntersuchungen für eine detaillierte Standortcharakterisierung ausgewählte Gebiet „Verchne-Itatskij“ im NE des Nishnekansker Granitoidkomplexes gliedert sich in die jeweils etwa 25 km² großen Teilgebiete „Kamennyj“ und „Itatskij“ (siehe Kap. 2.1). Aufgrund einer z. Zt. nicht ausreichenden Datenfülle zum Gebiet „Itatskij“ (siehe Kap. 5.5.1) konzentrieren sich im Augenblick die Modellierungen unter Zugrundelegung der bisher von der russischen Seite zur Verfügung gestellten Erkundungsergebnisse und Kartenmaterialien auf den Standort „Kamennyj“.

Das bisher erarbeitete 3D-Modell stützt sich hauptsächlich auf die mittels audiomagnetotellurischer und vertikaler elektrischer Sondierung (AMTS und VES) sowie mit Hilfe der radioelektromagnetischen Profilierung (REMP) konstruierten geophysikalisch-geologischen Profilschnitte im Maßstab 1 : 25 000 (Abb. 5-2) und auf die aus photogeologischen sowie geologisch-geomorphologischen Untersuchungen abgeleiteten Karten zur oberflächigen Verteilung von tektonischen Störungszonen (Abb. 5-3). Für die Modellierungsarbeiten standen außerdem eine relativ ungenaue topographische Karte mit Angaben zur Lage der geophysikalischen Messprofile und Erkundungsbohrungen (Abb. 2-3) sowie Kernbeschreibungen für die Bohrungen 1-I und 1-K [Velitschkin et al. 2001] zur Verfügung.

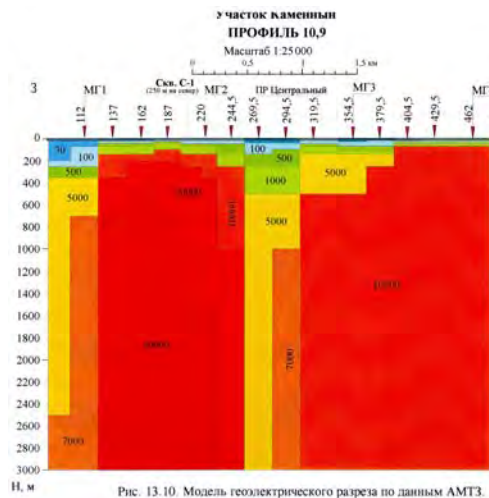


Рис. 13.10. Модель геоэлектрического разреза по данным АМТЗ.

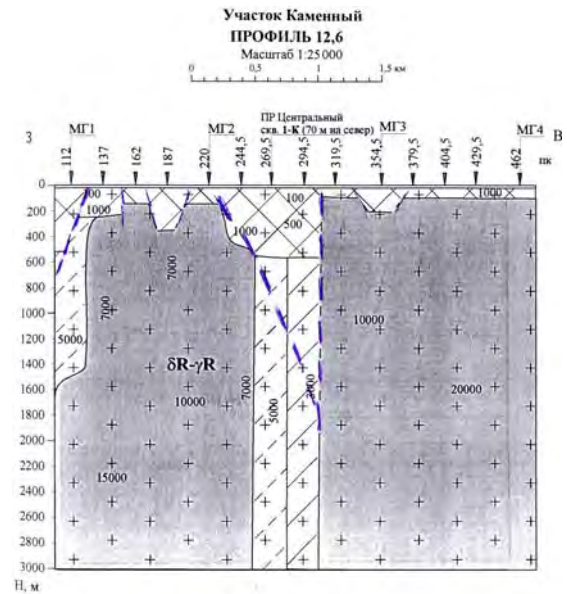
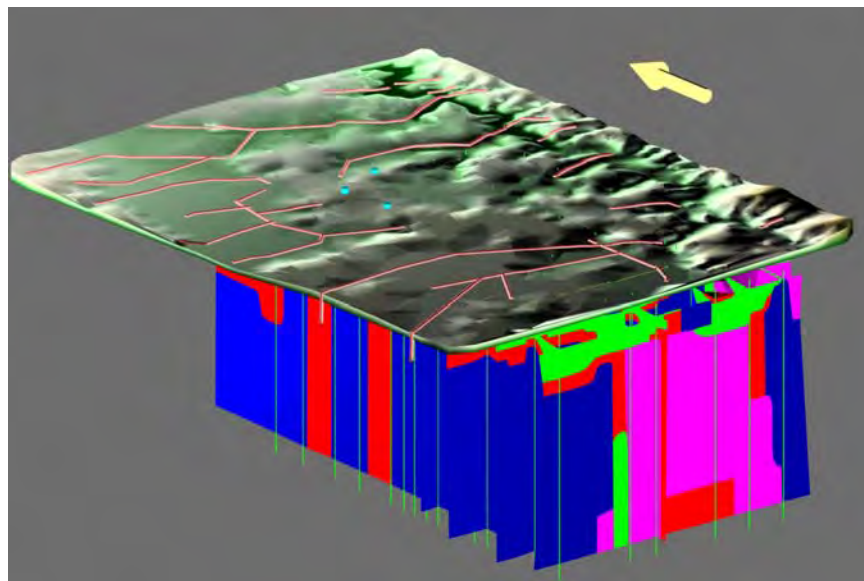


Рис. 13.6. Модель геоэлектрического разреза по данным АМТЗ.

Die angegebenen Ziffern geben die Messpunkte auf den oberflächigen Geophysik-Profilen und die spezifischen elektrischen Widerstände der Gesteine wider.

Abbildung 5-2:

Auf der Grundlage geoelektrischer Messungen (vorwiegend mittels audiomagnetotellurischer Sondierung – AMTS) konstruierte geologisch-geophysikalische Profilschnitte, die in die 3D-Modellierung des geologischen Tiefenbaus des Gebietes „Kamennyj“ eingeflossen sind



Die grün und rosa gefärbten Bereiche entsprechen Gesteinen mit geringen elektrischen Widerständen (hohen hydraulischen Durchlässigkeiten). Die blau und rot markierten Abschnitte sind ± monolithische Gesteine mit hohen elektrischen Widerständen. Auf der topographischen Karte ist rechts der Fluss Malyj Itat gut zu erkennen. Außerdem sind die oberflächlich nachgewiesenen Störungszonen (Dazenko, in: Anderson et al. 1998) rot und die Erkundungsbohrungen als blaue Punkte eingezeichnet.

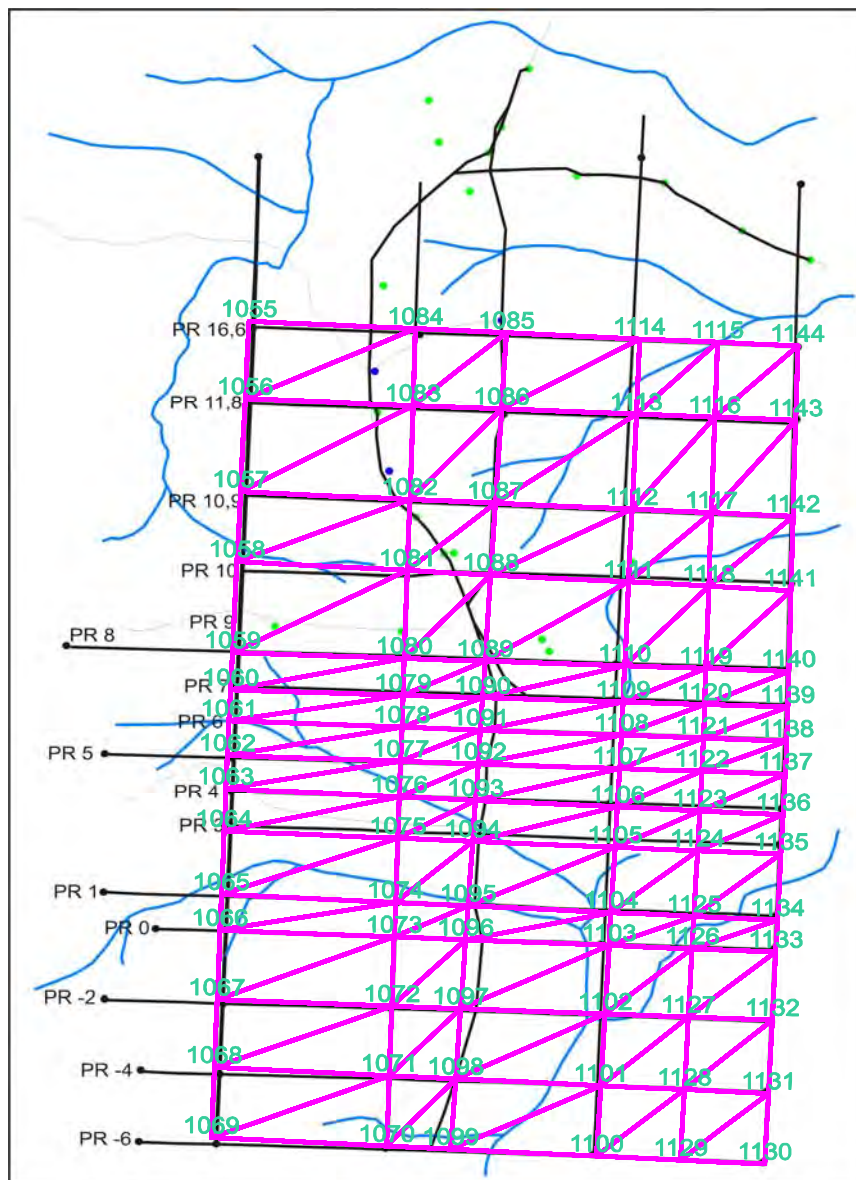
Abbildung 5-3:

Draufsicht auf die Reliefkarte des Gebietes „Kamennyj“

Auf der Reliefkarte Abb. 5-3 ist die Lage der oberflächlich nachgewiesener bzw. im Ergebnis der Dechiffrierung von Luftbild- und Satellitenaufnahmen vermuteter Störungszonen (siehe auch

Abb. 2-12) vermerkt. Darunter wurde ein erstes 3D-Teilmodell des Gebietes Kamennij angeordnet.

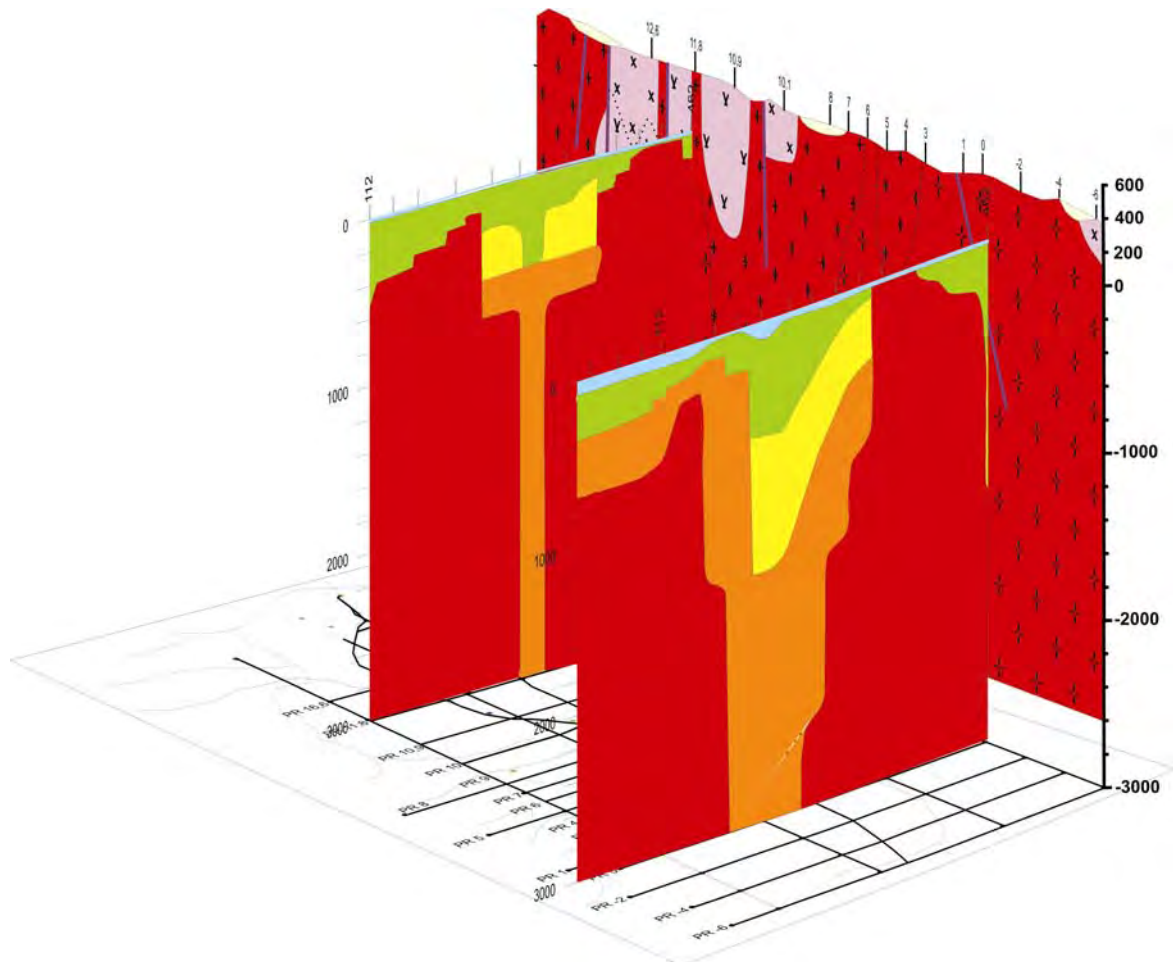
Ausgehend von diesen Untersuchungsbefunden konnten die Modellierungsarbeiten vorerst lediglich das Ziel haben, schwach durchlässige, möglichst homogene Gebirgsbereiche, in denen tief reichende Störungszonen weitestgehend fehlen, bis in eine Tiefe von ca. 2 bis 3 km auszuweisen. Dazu wurde für das Gebiet „Kamennij“ unter Zugrundelegung der geophysikalischen Messprofile eine Leitkarte (Abb. 5-4) entworfen. Auf der Grundlage dieser Leitkarte bzw. dieses Konstruktionsgitters werden die geologisch-geophysikalischen Erkundungsergebnisse in das Modell eingefügt und die 3D-Konstruktionsarbeiten in den Dreiecksprismen durchgeführt (siehe Anlage A1).



Gut sichtbar sind das Flusssystem und die im Gebiet niedergebrachten Erkundungsbohrungen (blaue und grüne Punkte). Rot markiert sind die Konstruktionsdreiecke bzw. -prismen, auf deren Seitenflächen die geologischen Profile für die 3D-Modellierung konstruiert werden.

Abbildung 5-4: Leitkarte für die 3D-Modellierungen des geologischen Untergrundes im Gebiet „Kamennij“, entworfen auf der Grundlage der bisher realisierten geophysikalischen Messprofile (siehe Abb. 2-3)

Abb. 5-5 illustriert anschaulich die Vorgehensweise beim Einfügen der geologischen Erkundungsdaten in das Modell. Auf den entsprechend ihren Koordinaten im Gelände orientierten Messprofilen werden die geologisch-geophysikalischen Profile bei Berücksichtigung ihres Höhenbezuges in das 3D-Modell eingegeben und dienen als Ausgangsdaten für die 3D-Konstruktionsarbeiten (siehe Anlage A1).



Im unteren Teil der Abbildung sind das Messprofilnetz und das Flusssystem dargestellt. Die drei vertikal angeordneten geophysikalisch-geologischen Profile stehen stellvertretend für mehr als 20 geoelektrische Messprofile, die im Rahmen der detaillierten Standorterkundung untersucht wurden. Rote und orange Farbgebungen kennzeichnen Bereiche hoher elektrischer Widerstände (geringer hydraulischer Durchlässigkeiten). Gelbe, grüne und blaue Abschnitte repräsentieren stark geklüftete Tiefenbereiche mit geringen spezifischen elektrischen Widerständen, wobei die blaue Farbe die Verbreitung der jurassischen und quartären Sedimente widerspiegelt.

Abbildung 5-5: Koordinaten- bzw. Messprofil-bezogene Eingabe von Erkundungsergebnissen in das geologische 3D-Modell des Gebietes „Kamennyj“

5.4 3D-Modellierung des geologischen Baus des Standortes „Jennissejskij“

Die Arbeiten zur geologischen Modellierung des Tiefenbaus des Gebietes „Jennissejskij“, das sich im Kontaktbereich des Nishnekansker Granitoidkomplexes mit seinen hochmetamorphen Rahmengesteinen befindet, stehen ganz am Anfang. Bis Ende November 2004 werden durch VNIPI Promtehnologii folgende Grunddaten für die 3D-Modellierung zur Verfügung gestellt:

- Prinzipielles Schema des Reliefs,
- Strukturell-tektonisches Schema des Gebietes, erstellt auf der Grundlage von Dechiffrierungsergebnissen von Luftbild- und Satellitenaufnahmen,
- Vorläufige geologische Karte (bei abgedecktem Quartär) mit den dazugehörigen vorläufigen geologischen Schnitten,
- Karte der Anomalien des Magnetfeldes T_a ,
- Geoelektrische Schnitte auf der Grundlage von AMTS-, VES- und REMP-Messungen für insgesamt 8 Profile,
- Ergebnisse von seismischen Messungen (Reflektions- und Refraktionsseismik) auf diesen Profilen,
- Detaillierte Bohrkernbeschreibungen für die drei bisher im Gebiet niedergebrachten, jeweils 100 m tiefen Erkundungsbohrungen und
- Laborergebnisse zur Bestimmung der petrophysikalischen Eigenschaften der Gesteine (Dichte, magnetische Suszeptibilität, spezifischer elektrischer Widerstand, Ausbreitungsgeschwindigkeiten akustischer Wellen).

Erst nach Vorlage und Einfügen dieser Daten kann mit der Modellierung begonnen werden. Die Ergebnisse der 3D-Modellierung werden gemeinsam mit den russischen Kollegen diskutiert, modifiziert und interpretiert.

5.5 Auswertung der 3D-Modelle

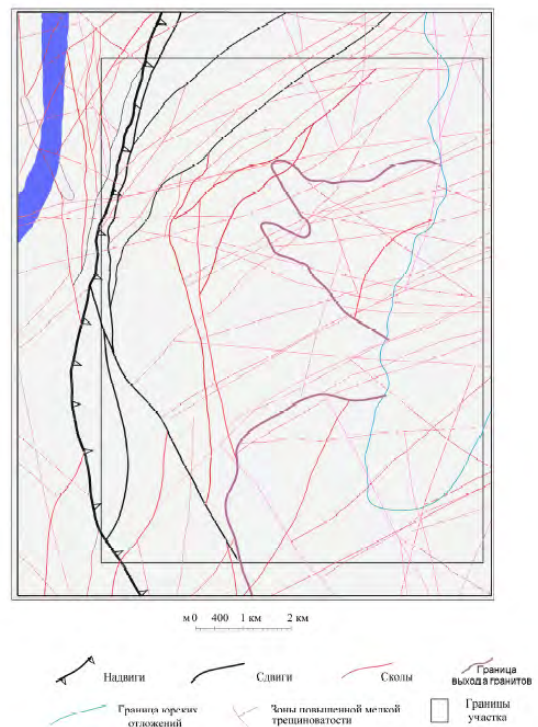
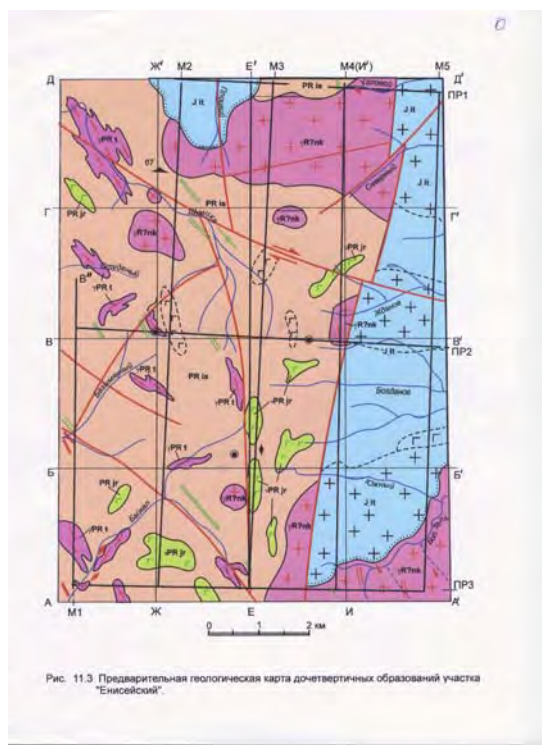
5.5.1 Probleme bei der Durchführung der Modellierungsarbeiten und Bewertung der Ausgangsdaten

Ausgehend von den, der deutschen Seite vorliegenden Informationen zu den bisher durchgeführten Standortuntersuchungen und von den Erfahrungen der BGR bei der 3D-Modellierung geologischer Körper, sind Menge und Qualität der zu beiden Standorten vorhandenen Erkundungsergebnisse wahrscheinlich ausreichend für die Konstruktion qualitativ hochwertiger geologischer Standortmodelle. Einen Überblick zu den an beiden Standorten durchgeführten geologisch-geophysikalischen Erkundungsarbeiten liefert Kap. 2.8.1. Durch eine stärkere Einbeziehung russischer Partnereinrichtungen (VNIPI Promtehnologii und Chlopin-Institut St. Petersburg) ist in Zukunft eine Verbreiterung der Datenbasis und die Einbeziehung von Ergebnissen anderer, an den Standorten bereits durchgeführter geophysikalischer Untersuchungsverfahren (Geomagnetik, Seismik, Gravimetrie, Aerogeophysik) in die geologischen Modelle vorgesehen. Neben der Schaffung und vielfältigen Nutzung (siehe Kap. 5.1) weitgehend realistischer Standortmodelle besteht ein weiteres Ziel der gemeinsamen Arbeiten darin, anhand der 3D-Modelle eine vergleichende Bewertung der Eignungsgrade beider alternativ betrachteter Standorte vorzunehmen.

Bei der Modellierung mit „openGEO5“ werden die Ausgangsdaten für die Konstruktionsarbeiten Koordinaten-bezogen in das Programm eingestellt. Ohne genauen Koordinatenbezug ist eine Modellierung, insbesondere mit der Perspektive der Nutzung des Modells bei der Planung weiterführender Erkundungsarbeiten und der bergmännischen Erschließung des Untertageendlagers, sinnlos. Die mit der russischen Seite, in Abweichung von der normalen Vorgehensweise, vereinbarte Arbeit mit einem relativen Koordinatensystem stellt eine Kompromisslösung dar.

Eine Durchsicht der zu beiden Standorten vorliegenden Karten, Schemata und Profile offenbarte Unexaktheiten, die zum größten Teil mit Ungenauigkeiten bei der Erstellung dieser Unterlagen durch Subauftragnehmer begründet werden müssen. Eine Reihe dieser Mängel sind prinzipieller Art und bedürfen vor dem Einfügen der Daten in das Modell einer Korrektur bzw. Klä-

rung, wie z. B. das Fehlen eines Reliefs und Höhenbezuges auf den AMTS-Profilen. Auch stimmen z. B. Flussverläufe oder Positionen von Messpunkten bzw. Bohrungen auf unterschiedlichen Karten nicht überein oder wurden Darstellungsmaßstäbe bei der Anfertigung von Unterlagen nicht exakt eingehalten. Für die weitere Erhöhung der Qualität der Ausgangsdaten für die Modellierungsarbeiten ist eine strengere Qualitätskontrolle durch den Auftraggeber bei der Datenübernahme erforderlich. Im Falle von Mängeln muss der Auftraggeber gegenüber dem Subauftragnehmer auf einer Fehlerkorrektur bestehen. Negativ für die Modellierungsarbeiten ist außerdem, dass in den meisten Ergebnisberichten, aus denen die Ausgangsdaten entnommen wurden, Informationen zur Belastbarkeit der Daten und zu methodischen Details, die für die Auswertung und Interpretation der Messungen erforderlich sind, weitgehend fehlen.



links: prinzipielle geologische Karte des Krasnojarsker Instituts für Geologie und mineralische Rohstoffe (KNIIGMS), rechts: strukturelles Schema, erstellt durch VNIPI Promtehnologii.

Die dünne blaue Linie auf der rechten Abbildung gibt den Grenzverlauf der jurassischen Ablagerungen wider, die auf der linken Karte blau eingefärbt sind. Es ist ein völlig unterschiedlicher Verlauf selbst der mächtigsten Störungszonen (links: rote Linien, rechts: dicke schwarze und rote Linien) sichtbar.

Abbildung 5-6: Gegenüberstellung von konträren Vorstellungen zum strukturellen Bau des Gebietes „Jennissejskij“

Besonders problematisch für die Modellierung möglicher Grundwassermigrationswege ist das Fehlen von Angaben zur räumlichen Orientierung, Verschneidung und Ausbildung (z. B. Öffnungsweite, hydraulische Durchlässigkeit) von in den Bohrungen festgestellten Störungszonen, bedingt durch die fehlende Entnahme orientierter Bohrkerne und den Nichteinsatz des akustischen Bohrlochfernsehens.

Bei der Bewertung eines Teils der Ausgangsdaten für die Modellierungsarbeiten sind die schlechten Aufschlussverhältnisse an beiden Standorten zu berücksichtigen. Dies führt z. B. zu völlig unterschiedlichen Auffassungen bezüglich des Auftretens von Störungszonen im Gebiet „Jennissejskij“, was sich in grundsätzlich verschiedenartigen strukturellen Schemata widerspiegelt (Abb. 5-6).

5.5.2 Erste Ergebnisse der durchgeführten Modellierungsarbeiten

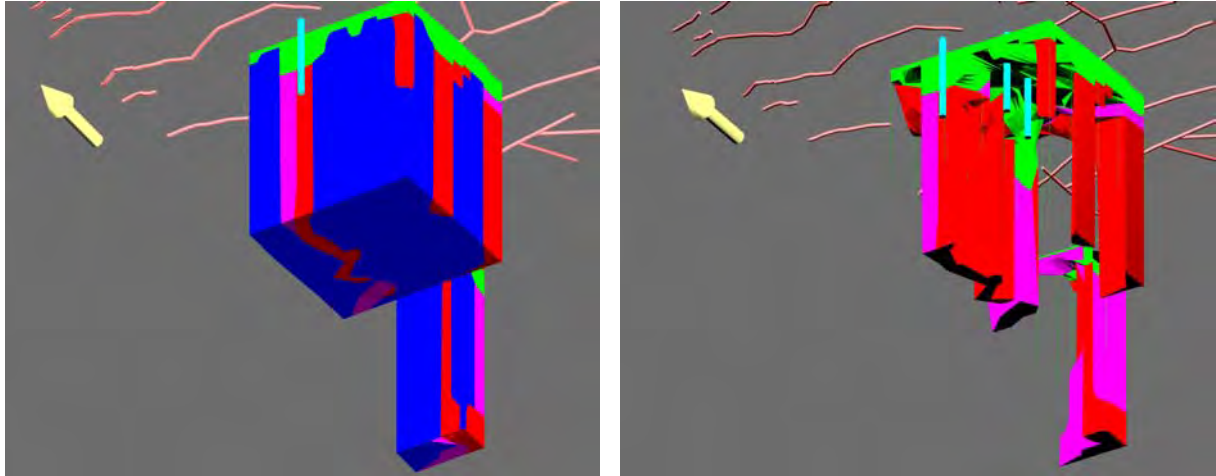
Aufgrund der in Kap. 5.3 und 5.4 skizzierten Datenlage sowie der in Kap. 5.5.1 aufgezeigten Probleme, insbesondere bezüglich des bisher fehlenden Koordinaten- und Höhenbezuges eines Großteils der Erkundungsdaten, beschränken sich die bisher durchgeführten Modellierungsarbeiten auf die Erstellung übersichtsmäßiger, sehr ungenauer Teilmodelle für den Standort „Kamennyj“ mit nur geringer praktischer Relevanz (siehe als Beispiel Abb. 5-3 und 5-7).

Trotzdem lassen die bisher mittels „openGEO5“ konstruierten räumlichen Verteilungen von Gebirgsbereichen mit unterschiedlichen spezifischen elektrischen Widerständen erste Schlussfolgerungen zu folgenden Problemstellungen zu:

- zur räumlichen Verteilung $\pm$ monolithischer Gesteinspartien und von Bereichen erhöhter Klüftigkeit bzw. von Störungszonen,
- zur Teufe und zum Relief des Daches schwach durchlässiger Granitoidblöcke,
- zur Homogenität und Klüftung der Gesteine und
- zur Verteilung von Lockersedimenten mit geringen spezifischen elektrischen Widerständen (Quartärsedimente, Verwitterungskruste der Granitoide, jurassische Sedimente im Südtail des Gebietes „Kamennyj“).

Im zentralen Nordteil des Untersuchungsgebietes „Kamennyj“ zwischen den Profilen 9 und 12,6 sowie den Magistralen MG 1 und MG 2 (siehe Abb. 5-4) kann ein etwa 8 km³ umfassender Block schwach durchlässiger Granitoide ausgewiesen werden.

Die bisher durchgeführten Modellierungsarbeiten lassen die Schlussfolgerung zu, dass nur ein Teil der durch Dechiffrierung von Luftbild- und Satellitenaufnahmen bzw. durch geomorphologische Untersuchungen angenommenen Störungszonen im 3D-Modell, das bisher lediglich auf geoelektrischen Erkundungsdaten beruht, wiedergefunden werden kann. Aus dem Modell wird die z. T. komplizierte Morphologie der Störungszonen deutlich (Abb. 5-7). Gleichzeitig wurde anhand des Modells sichtbar, dass die Bohrung 1-K in einer Zone erhöhter Klüftigkeit bzw. niedriger elektrischer Widerstände positioniert ist und deshalb für Aussagen bezüglich der Eignung des Gebietes „Kamennyj“ für eine unterirdische HAW-Endlagerung nicht genutzt werden kann (Abb. 5-7).



In der linken Abbildung sind der fertig modellierte NW-Teil und ein kleiner Bereich im SE des Gebietes in der Ansicht von unten dargestellt. Von oben auf den modellierten Block sind in rosa die mittels geomorphologischer Untersuchungen und Dechiffrierung von Luftbild- und Satellitenaufnahmen nachgewiesenen bzw. vermuteten Störungszonen gelegt. Blaue Bereiche entsprechen Abschnitten mit sehr hohen elektrischen Widerständen (geringen hydraulischen Durchlässigkeiten). Rote, violette und grüne Modellteile kennzeichnen Gebiete mit erhöhter Klüftigkeit.

Im rechten Bild ist der Bereich geringer hydraulischer Durchlässigkeit ausgeblendet. Deutlich sichtbar sind die niedergebrachten Bohrungen. Die Erkundungsbohrung 1-K im vorderen Abschnitt des modellierten NW-Teils des Gebietes „Kamennyj“ liegt genau in einer mächtigen Störungszone.

Abbildung 5-7: Beispiel für die Auswertung von mittels „openGEO5“ generierten geologisch-geophysikalischen 3D-Modellen für den Standort „Kamennyj“

6 GEOWISSENSCHAFTLICHE LANGZEITPROGNOSE

6.1 Grundlagen, Zielstellung und Ausgangsdaten

Zur Gewährleistung einer einheitlichen methodischen Herangehensweise sowie zwecks Sicherstellung der notwendigen Öffentlichkeit und Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse bzw. Schlussfolgerungen sind die Auswahl und die Bewertung von Standorten für HAW-Endlager in den meisten betroffenen Ländern durch gesetzliche Vorgaben reglementiert. Die Genehmigungsverfahren für HAW-Endlager orientieren sich in der Regel an den Empfehlungen der IAEA und weisen geringe länderspezifische Besonderheiten auf. In Deutschland ist die Vorgehensweise bei der für eine Genehmigung erforderlichen Bewertung der Langzeitsicherheit potenzieller Endlagerstandorte rechtsverbindlich mittels Verwaltungsvorschrift (AVV 1990) geregelt (siehe Kap. 4.1).

Aufgrund der Vielfalt und Komplexität der zu berücksichtigenden Einflussfaktoren auf die langzeitliche Endlagersicherheit ist die geowissenschaftliche Langzeitprognose sehr schwierig und aufwändig. Sie stellt ein außerordentlich wichtiges Element des Genehmigungsverfahrens für ein Endlager dar und dient zur Beweisführung einer sicheren Entsorgung der Abfälle. Ihre Hauptanliegen sind der Nachweis der Funktionsfähigkeit des Multibarrierensystems sowie modellgestützte Beweise für die Standsicherheit des Endlagerbergwerkes in der Betriebs- und Nachbetriebsphase und für die Einhaltung der behördlich festgelegten Schutzziele bezüglich der Radionuklidfreisetzung in die Biosphäre im vorgegebenen Zeitraum. Dazu sind vor allem Kenntnisse über die wahrscheinliche Langzeitentwicklung der geologischen, strukturell-tektonischen, hydrogeologischen und geochemischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet erforderlich. Sie bilden die Basis für die Beurteilung der Schutz- und Barrierefunktionen der Geosphäre über sehr lange Zeiträume und dienen damit zur Bewertung der langfristigen Auswirkungen des Endlagers auf die Umwelt.

Die geowissenschaftliche Langzeitprognose ist Bestandteil der für jedes Standortauswahlverfahren vorgeschriebenen Langzeitsicherheitsanalyse. Diese umfasst vor allem umfangreiche Modellierungen der Radionuklidfreisetzung und -migration aus den Abfallbehältern bis in die Biosphäre (siehe Kap. 4). Grundlage jeder geowissenschaftlichen Langzeitprognose ist eine Szenarienanalyse, bei der standortbezogen sicherheitsrelevante Zustände, Prozesse und Ereignisse (FEP: features, events and processes) in ihrer Wirkung auf das geplante Endlager betrachtet werden. Für den in den Sicherheitszielen festgelegten Zeitraum sollte, um Ungewissheiten in der Langzeitentwicklung auszugleichen, die Variabilität der betrachteten Einflussgrößen bekannt sein oder durch Parametervariationen in den Modellbetrachtungen bzw. Berechnungen berücksichtigt werden (Analyse alternativer Szenarien). Dazu werden, gestützt auf umfangreiche Kenntnisse zur historischen Entwicklung des Standortes, aus einer NEA-Datenbank [www.nea.fr] die für den potenziellen Endlagerstandort relevanten FEP's herausgefiltert.

Für die Prognose der langfristigen geologischen Entwicklung eines potenziellen Endlagerstandortes ist es notwendig, mögliche langzeitliche Auswirkungen von Veränderungen endogener und exogener Einflussfaktoren auf die Endlagersicherheit zu bewerten. Die wichtigsten, z. T. miteinander wechselwirkenden Einflussparameter auf die langfristige Sicherheit von HAW-Endlagern wurden in Tabelle 6-1 zusammengestellt.

Besonders schwierig sind im Rahmen einer Langzeitsicherheitsanalyse Vorhersagen der wahrscheinlichen Veränderungen der Niederschlags- und Temperaturverhältnisse sowie eine Prognose des Klimaeinflusses auf das Relief und auf die Intensität der Erosions- und Denudationsprozesse. Neben der Anwendung des Aktualismus-Prinzips, d. h. einer Prognose der zukünftigen Klimaentwicklung auf der Grundlage einer detaillierten Analyse dieser Parameter bzw. Prozesse in der Vergangenheit, muss der Einfluss des anthropogenen Faktors auf das

globale Klima sowie die Abhängigkeit des Erdklimas von planetaren bzw. kosmischen Rhythmen berücksichtigt werden. Durch eine Mindesteinlagerungstiefe, die u. a. vom Relief, von den Eigenschaften der Gesteine, von den Hebungsgeschwindigkeiten der Krustenblöcke, von der geodynamischen Entwicklung der Region und vom Klima bestimmt wird, soll eine Beeinträchtigung der geologischen Barriere durch Erosionsprozesse weitgehend ausgeschlossen werden.

Endogene Parameter	Exogene Einflussfaktoren
Klüftigkeit der Gesteine (Primär- bzw. Absonderungsklüfte)	Niederschlags- und Temperaturänderungen
Störungszonen unterschiedlicher Mächtigkeit und Hydrodynamik	Meeresspiegelvariationen durch Niederschläge und Klimaschwankungen
Vertikal- und Horizontalbewegungen, Überschiebungen, Blockverschiebungen	Oberflächenentwässerung und Grundwasserneubildung
regionale Absenkungen (Subsidenz)	Vergletscherung
Verteilung von tektonischen Spannungen	Sedimentation
seismische Aktivitäten und daran gebundene Veränderungen der Spannungsfelder und der Klüftigkeit	Veränderung der Geomorphologie durch Erosion und flächenhafte Abtragung (Denudation)
Plattentektonik und Kontinentaldrift sowie daran gebundene tektonische Prozesse	Auswirkungen der Erosion bzw. Denudation auf die geologische Barriere
Vulkanismus	Bergrutschungen und Muren
Wasserdurchlässigkeiten der Gesteinsmatrix und von Störungszonen	Abbau C_{org} - und Fe^{2+} -Gehalte in Gesteinen
Inhomogenitäten der Gesteine (z. B. Einschlüsse und Intrusivkontakte)	Redoxpotenzial der Grundwässer

Tabelle 6-1: Zusammenstellung der für Langzeitbetrachtungen wichtigsten endogenen und exogenen Einflussparameter auf die Sicherheit eines unterirdischen HAW-Endlagers

[Kotschkin & Patyk-Kara 1999] unterstrichen die Wichtigkeit einer auf geomorphologischen Befunden basierenden langfristigen Prognose der Denudationsgeschwindigkeit für die Bewertung der Langzeitsicherheit eines Endlagerstandortes. Intensive Denudations- bzw. Erosionsprozesse würden eine Reduzierung der Überdeckung des Endlagers hervorrufen und damit die Mächtigkeit sowie das Volumen der zur Verfügung stehenden geologischen Barriere verringern. Dies könnte auch zu signifikanten Erhöhungen der hydraulischen Durchlässigkeiten der Gesteine bzw. der Störungszonen oberhalb des Endlagers führen. Zur Senkung dieser Gefahr fordert die IAEA die Platzierung von HAW-Endlagern in relativ großen Tiefen (mehrere hundert Meter). Das hat u. a. folgende positive Effekte für die Sicherheit von Endlagern:

- Vergrößerung des Vorrates an geologischer Barriere für eine Sorption von Radionukliden und für eine Reduktion der Menge von im Grundwasser gelösten radioaktiven Substanzen, z. B. durch Dispersion,

- Verlängerung der Grundwassermigrationswege (Verzögerung des Radionuklidtransportes) und daran gebundene Zunahme der Möglichkeiten einer Verdünnung der Konzentrationen der radioaktiven Elemente im Grundwasser,
- Abnahme der Klüftigkeit der Gesteine und der Durchlässigkeit von potenziellen Grundwassermigrationsbahnen mit zunehmender Tiefe,
- Abnahme des Sauerstoffgehaltes der Grundwässer und Überwiegen reduzierender Verhältnisse in den Tiefengrundwässern, was die Radionuklidlöslichkeit in den Grundwässern deutlich senkt,
- Schutz der technischen, geotechnischen und geologischen Barrieren vor Gletschererosion sowie
- Senkung des Risikos eines zufälligen oder bewussten Eindringens von Menschen.

Zur Bewertung der möglichen Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf das potenzielle Endlager sind umfangreiche Informationen zur topographischen, geomorphologischen und hydrogeologischen Situation im Untersuchungsgebiet notwendig. Aufgrund der für den sibirischen Raum realistischen Gefahr einer neuen Kaltzeit und daran gebundener großflächiger Inlandvereisungen sind für diese Region spezielle Kenntnisse zu den in einer Kaltzeit ablaufenden geologischen und hydrologischen Prozessen sowie Angaben zum Ausmaß und zur Verbreitung von Inlandeis und Permafrost während der letzten Kaltzeit erforderlich (siehe Kap. 6.2).

Sehr wichtig für geologische Langzeitbetrachtungen sind außerdem Aussagen zur langfristigen tektonischen Entwicklung, zur zeitlich-räumlichen Verteilung tektonischer Spannungen und zur Erdbebengefährdung in der Endlagerregion. Aus der Häufigkeit und dem Charakter der tektonischen Bewegungen in der geologischen Vergangenheit wird für den potenziellen Endlagerstandort eine Prognose der zukünftigen Deformationsprozesse erstellt und die Wahrscheinlichkeit einer Wiederbelebung von Störungs- bzw. Kluftzonen abgeschätzt.

Geowissenschaftliche Langzeitprognosen müssen aus geologisch-mineralogischer Sicht auch auf den Nachweis des Vorhandenseins bzw. der wahrscheinlichen Entwicklung günstiger, den Radionuklidtransport und die Wärmeabgabe behindernder Wirtsgesteinseigenschaften ausgerichtet sein, wie z. B. auf:

- feldgeologische Beweise für eine geringe Grundwasserführung und niedrige hydraulische Durchlässigkeiten der Gesteinsmatrix und der im Umfeld des geplanten Einlagerungsbereiches vorkommenden Störungszonen,
- den Nachweis reduzierender Bedingungen in den Grundwässern im Tiefenniveau des geplanten Endlagers,
- eine Bestätigung des Selbstabdichtungsvermögens und der breiten Entwicklung von die Radionuklidfixierung fördernden geochemischen Immobilisierungs- bzw. Rückhalteeigenschaften der Gesteine im Ergebnis von Alterationsprozessen (siehe Kap. 2.7) und
- eine hohe wärmephysikalische und geomechanische Stabilität der Gesteine.

6.2 Langzeitliche geologische Entwicklung des Standortes „Nishnekansker Granitoidmassiv“

Eine den international fortgeschrittenen Stand der Szenarienanalyse für granitoide Wirtsgesteine (ausführlich dargelegt z. B. in [SKB 2001] und [Jones et al. 2004]) berücksichtigende detaillierte geowissenschaftliche Langzeitprognose steht für die Standorte „Verchne-Itatskij“ und „Jennissejskij“ (siehe Abb. 2-2) noch aus. Ein großer Teil der dafür erforderlichen Daten liegt inzwischen vor. Noch fehlende standortbezogene Erkundungsergebnisse müssen durch ein intensives Literaturstudium noch zusammengetragen bzw. aufbereitet werden oder können durch gezielte Erweiterungen des Untersuchungsprogramms ergänzt werden (siehe Kap. 2.8.2 und 8).

Grundvoraussetzung für die Einschätzung der langfristigen Endlagersicherheit ist die, auf umfangreiche Kenntnisse zur historischen Entwicklung des Standortes gestützte Vorhersage der perspektivisch in der Region erwarteten geologischen Prozesse (siehe Kap. 6.1). Im Ergebnis der geologischen Langzeitprognose für ein Endlager in magmatischen Wirtsgesteinen ist vor allem zu klären, ob Prozesse wahrscheinlich sind, die zur Bildung hydraulischer Verbindungen zwischen Einlagerungsniveau und oberflächennahem Bereich (mit O₂-reichen Grundwässern) oder zu deutlichen Zunahmen der hydraulischen Durchlässigkeiten der Gesteinsmatrix bzw. der im Umfeld des geplanten Einlagerungsbereiches vorkommenden Störungszonen führen können. Ein möglichst detailliert untersuchter Standort ist nur dann als HAW-Endlager geeignet, wenn im Ergebnis von Szenarienanalysen und Modellrechnungen bewiesen wird, dass ein Eintritt von Radionukliden in die Biosphäre über den Schutzzeitraum hinaus verzögert oder praktisch vollständig ausgeschlossen werden kann.

Ausgehend von den bisher vorliegenden geologisch-geophysikalischen Erkundungsergebnissen kann, vorbehaltlich einer gründlicheren Auseinandersetzung mit dieser Themenstellung, für das Gebiet des Nishnekansker Granitoidmassivs eine für die HAW-Endlagerung geeignete langzeitliche geologische Entwicklung prognostiziert werden. Der Nishnekansker Magmatitkomplex ist Bestandteil eines erdgeschichtlich sehr früh konsolidierten Krustenblocks, der mindestens in den letzten 300 bis 400 Mio. Jahren ein stabiles tektonisches und Temperatur-Regime aufwies [Dushkov & Sokolova 1997, Anderson et al. 2001]. Die im tiefen Untergrund der Sibirischen Plattform auftretenden abyssalen und mesoabyssalen Kompaktionszonen bzw. -bereiche wirken isostatisch einer regionalen Erdkrustendurchbiegung entgegen und garantieren langfristig eine geringe tektonische Aktivität, niedrige Seismizität, sehr geringe Geschwindigkeiten von Vertikalbewegungen und ein weitgehend stabiles natürliches Wärmeregime in diesem Gebiet [Sherkasov 1999]. Durch die Zugehörigkeit zum Randbereich einer tektonisch stabilen Plattform ist die Bandbreite möglicher geologischer Entwicklungsszenarien stark eingeschränkt.

Intensive Denudations- bzw. Erosionsprozesse sowie tektonisch bedingte Heraushebungen von Krustenblöcken können eine Gefahr für die langfristige Sicherheit von HAW-Endlagern darstellen, insbesondere dann, wenn das Einlagerungsniveau dadurch in den Verwitterungsbereich bzw. in die Zone erhöhten Wasseraustausches gelangt und O₂-reiche Grundwässer mit den Abfallgebinden in Kontakt treten können. Eine langzeitliche Prognose der Denudation ist durch eine Extrapolation der mittleren Denudationsgeschwindigkeit und der Ergebnisse geodätischer Messungen von uplift-Raten an der Erdoberfläche bzw. von Vertikalverschiebungen in den Untertageanlagen des BChK möglich (siehe Kap. 2.1 und 2.5). Voraussetzung dafür ist die Beibehaltung des regionalgeologischen Strukturplanes bzw. der im Gebiet vorherrschenden Spannungsverteilungen, des geodynamischen Regimes und der tektonischen Stabilität der Region [Kotschkin & Patyk-Kara 1999].

Ausgehend von geomorphologischen Analysen wurden sehr geringe Heraushebungsraten (0,051 bis 0,093 mm/a) für das Untersuchungsgebiet prognostiziert (Lukina 1996, 2001). Die mittlere Erosionsgeschwindigkeit der Flüsse schätzten [Zuev et al. 2000] auf 0,0135 mm/a, während [Lukina 2001] Werte zwischen 0,024 und 0,052 mm/a mitteilte. Die geringen Hebungsbeträge werden durch die Ergebnisse präziser geodätischer Messungen der uplift-Raten im Zeitraum von 1963 bis 1986 ($< 1,5$ mm/a, [Kolmogorova & Kolmogorov 2004] und von Messungen der Vertikalverschiebungen im Niveau der Untertageanlagen des BChK Shelesnogorsk (1976 bis 1998: +0,09 mm/a, [Gupalo et al. 1998], [Gupalo 2003] bestätigt. Bei einer bisher angenommenen Endlagertiefe von ca. 500 m und unter Berücksichtigung der geringen Heraushebungstendenz sowie der bisher allerdings nur grob prognostizierten klimatischen Verhältnisse in der Region Krasnojarsk, besteht durch Erosions- und Denudationsprozesse keine Gefahr für die Langzeitsicherheit des Endlagers im zu betrachtenden Schutzzeitraum. Die langfristig geringe Heraushebung des Jennissejsker Höhenzuges (deutlich < 1 mm/a seit

dem Ende des Pliozäns, d. h. seit etwa 1,5 Mio. Jahren) beugt auch der Gefahr von Überflutungen vor.

Geomorphologische Analysen und Untersuchungen der subrezentektonischen Deformationen [Lukina 2000] ergaben für das Gebiet des Nishnekansker Granitoidmassivs für die nächsten 130 000 Jahre eine nur sehr geringe Wahrscheinlichkeit von Veränderungen der Klüftigkeit sowie der Spannungsfelder infolge von neotektonischen Erschütterungen. Vulkanische Prozesse sind im Umfeld des Nishnekansker Massives geologisch unwahrscheinlich (Kap. 2).

Belastbare Aussagen zur künftigen Klimaentwicklung liegen für den Standort Shelesnogorsk noch nicht vor. Im Verlaufe weiterführender Untersuchungen ist insbesondere die Wahrscheinlichkeit der Entstehung von mächtigen Inlandeispansern im südwestlichen Randbereich der Sibirischen Plattform zu klären. Eine Überdeckung des Gebietes mit Inlandeis und Permafrost würden zu deutlichen Veränderungen der Geomorphologie und der hydrogeologischen Verhältnisse führen [Keller 1998], wie z. B. zur:

- Umgestaltung der Landschaftsformen und Erosions- bzw. Sedimentakkumulationsprozesse (z. B. Entstehung von Eisstauseen, Bildung von Grund- und Endmoränen),
- Veränderung der hydraulischen und hydrochemischen Bedingungen im Untergrund,
- Entstehung von unter Druck stehenden Schmelzwässern und
- Bildung von tiefen Rinnenstrukturen durch glaziale Tiefenerosion der Gletscher.

Die in den Gesteinen z. T. bereits feststellbaren [Velitschkin et al. 2001] und in Zukunft zumindest im oberen Teufenabschnitt und im Umfeld von Störungszonen wahrscheinlich zunehmenden Spuren von metasomatischen Alterationsprozessen (siehe Kap. 2.7) werden dazu führen, dass die granitoiden Wirtsgesteine zukünftig effektiver als hydraulische, Sorptions- und geochemische Barrieren wirken. Sie sind dadurch in der Lage, nachhaltig den Zutritt von O₂-haltigen Grundwässern in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich und die Radionuklidmigration aus dem Endlager zu behindern. Im geplanten Einlagerungsniveau herrschen auch in Zukunft stabile reduzierende geochemische Bedingungen, d. h. die Wirtsgesteine liefern langfristig ein für die Radionuklidrückhaltung und das Langzeitverhalten der technischen bzw. geotechnischen Barrieren günstiges Milieu. Außerdem verfügen die Granitoide über sehr gute felsmechanischen Eigenschaften, welche die bautechnische Machbarkeit eines unterirdischen Endlagers gewährleisten.

Im Untersuchungsgebiet fehlen abbauwürdige Rohstoffressourcen, so dass Nutzungskonflikte und unabsichtliches menschliches Eindringen in der Zukunft weitgehend ausgeschlossen sind.

Aus Sicht der geowissenschaftlichen Langzeitprognose und unter Berücksichtigung der in Kap. 2.8.2 vorgenommenen Bewertung der bisher durchgeführten Erkundungsarbeiten fehlen für eine abschließende Bewertung der Langzeitsicherheit der beiden vorausgewählten Endlagergebiete nach derzeitigem Kenntnisstand noch standortbezogene Erkundungsdaten zu folgenden Themenkomplexen:

- 1) Unzureichend sind die in den bisherigen Erkundungsberichten enthaltenen Darstellungen des Kenntnisstandes zur seismischen Gefährdung des Untersuchungsgebietes. Die Notwendigkeit detaillierter Angaben zur Lage von Epizentren sowie zur Intensität bzw. Magnitude von im Umfeld des Untersuchungsgebietes abgelaufenen Erdbeben ergibt sich aus der Position des Jennissejsker Gebirgskette am SW-Rand der Sibirischen Plattform und aus der relativen räumlichen Nähe des seismisch aktiven Altaj-Sajan-Gebietes (siehe Kap. 2.5).
- 2) Es fehlen detaillierte Angaben zum Vorkommen und zur räumlichen Orientierung neotektonisch bzw. seismisch aktiver Störungszonen in beiden Endlagergebieten. Generell ist der Kenntnisstand zur Verteilung, Tiefenreichweite, räumlichen Orientierung und zum Alter

bzw. Reaktivierungszeitraum von im Untersuchungsgebiet vorkommenden Störungszonen noch zu gering.

- 3) Die bisherigen Mitteilungen zu den Untersuchungsergebnissen geodätischer Messungen der uplift-Raten an der Erdoberfläche und des Geomonitorings disjunktiver Strukturelemente in den Untertageanlagen des BChK enthalten zu wenige Messdaten und bedürfen, ebenso wie die Abschätzungen der Denudations- und Erosionsraten im Untersuchungsgebiet, einer Ergänzung bzw. Präzisierung. Hilfreich für eine öffentliche Darstellung der Untersuchungsergebnisse wäre eine spezielle Aufarbeitung der Messergebnisse mit dem Ziel einer allgemeinverständlichen Auswertung und Interpretation der Messdaten.
- 4) Unter Berücksichtigung ihrer großen Bedeutung für die Langzeitsicherheit von HAW-Endlagern in magmatischen Wirtsgesteinen sind die bisher vorliegenden Angaben zur räumlichen Verbreitung, Verschneidung und zu den hydraulischen Eigenschaften von potenziellen Grundwasserwegsamkeiten in den Gesteinen (vor allem Störungszonen, intensiv geklüftete Gesteinspartien, lithologische Kontakte und Inhomogenitäten) nicht ausreichend. Es fehlen detaillierte Untersuchungen zum Einfluss von Alterationsprozessen und der im Gesteinsmassiv wirkenden Spannungsverteilungen auf die hydraulischen Eigenschaften der Störungszonen bzw. intensiv geklüfteten Gesteinsbereiche.
- 5) Abgesehen von wenigen, z. T. schlecht dokumentierten Messungen in den Bohrungen 1-I, 1-K und 2-K („Verchne-Itatskij“-Gebiet) und 1-E bis 3-E (Gebiet „Jennissejskij“) fehlen feldgeologische Befunde zur Grundwasserführung sowie zu den hydraulischen Eigenschaften der Gesteine und Störungszonen. Unbedingt erforderlich für die Langzeitsicherheitsanalysen sind Pumpversuche in den mit Packern abgetrennten, stark geklüfteten Teufenintervallen in den Bohrungen, um den advektiven Radionuklidtransport im Nah- und Fernfeld des Endlagers besser modellieren zu können.
- 6) Durch den Nicht-Einsatz akustischer Bohrlochmessungen und die Entnahme unorientierter Bohrkerns existieren keine Angaben zur räumlichen Orientierung und Verschneidung von Störungszonen, die in den Erkundungsbohrungen angetroffen wurden. Dies erschwert die Modellierung des Radionuklidtransportes erheblich (siehe Kap. 4).
- 7) Die bisherigen element- und isotopengeochemischen Untersuchungen der Grundwässer sind noch nicht ausreichend, insbesondere fehlen Altersbestimmungen der tiefen Grundwässer und Angaben zu ihrer Physikochemie.
- 8) Die in den Erkundungsbohrungen durchgeführten Temperaturmessungen sind zu ungenau und gestatten keine detaillierte Charakterisierung des natürlichen Wärmefeldes bzw. der Temperaturverteilung im Gesteinsmassiv bei zunehmender Tiefe. Diese Daten werden für eine Präzisierung des Endlagerkonzeptes (siehe Kap. 3) und für die sicherheitsanalytischen Modellrechnungen (siehe Kap. 4) benötigt.

7 STANDORTANFORDERUNGEN

7.1 Geowissenschaftliche Anforderungen an Endlagerstandorte in magmatischen Gesteinen

Eine langfristig sichere Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle, d. h. die Verhinderung von Wechselwirkungen der Radionuklide mit der Biosphäre, ist entsprechend den Empfehlungen der IAEA (1990) nur in tiefen geologischen Formationen und bei Zugrundelegung der Mehrbarrieren-Konzeption möglich. In Ergänzung zu den technischen und geotechnischen Barrieren muss das geologische Milieu des Endlagers eine zuverlässige und langfristige Isolation der Radionuklide garantieren bzw. ihren Eintritt in die Biosphäre deutlich verzögern oder ganz verhindern. Zur sicheren Bewertung der Eignung magmatischer Wirtsgesteine für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle und zur Einschätzung des Risikos einer Umweltverschmutzung durch Radionuklide sind umfangreiche standortbezogene Informationen u. a. zu folgenden Themenschwerpunkten erforderlich (siehe auch Kap. 4 und 6):

- tektonische und seismische Situation in der Region, wie z. B. Vorkommen von neotektonisch aktiven Störungszonen und subrezentem Vulkanismus, Einschätzung der seismischen Gefährdung, Analyse der Spannungsverteilungen innerhalb des Gesteinsmassivs und Abschätzung von Senkungs- bzw. Hebungsgeschwindigkeiten einzelner Krustenblöcke,
- detaillierte Daten zur Klüftigkeit, Homogenität und Einschlussführung der Gesteine sowie zum Auftreten von hydraulisch aktiven Störungszonen im Nah- und Fernfeld des geplanten Endlagers,
- Intensität von Denudations- und Erosionsprozessen, gekoppelt mit Aussagen zu voraussichtlichen geomorphologischen und klimatischen Veränderungen in der Region,
- hydrogeologische Standortbedingungen, wie z. B. Grundwasserführung und hydraulische Eigenschaften der Gesteine, insbesondere in der Nähe des geplanten Einlagerungsniveaus; Hydrochemie und Alter der Grundwässer; Grundwasserneubildungsrate; Auftreten von Grundwasserstauern oberhalb des Einlagerungsniveaus; Morphologie, Vernetzung und hydraulische Eigenschaften von mächtigen, hydraulisch aktiven Störungszonen, sowie
- physikomechanische, wärmephysikalische, Filtrations- und Sorptionseigenschaften der Wirtsgesteine.

Die endgültige Auswahl eines Endlagerstandortes erfolgt auf der Grundlage einer standortspezifischen Sicherheitsanalyse. Vorgelagert ist die Vorauswahl eines potentiell geeigneten Standortes in einer vergleichenden Gegenüberstellung alternativ zu betrachtender Standorte anhand der gesammelten geologisch-geophysikalischen Erkundungsdaten und mineralisch-geochemischen Untersuchungsbefunde. Sowohl beim Standortvergleich als auch bei der Standortauswahl spielen Aussagen zur Einhaltung der Anforderungen an den Endlagerstandort (siehe Kap. 7.1.1 bis 7.3), Modellbetrachtungen zur Wärmewirkung der radioaktiven Abfälle auf das Nebengestein, zur Radionuklidfreisetzung und -migration (siehe Kap. 3 und 4) sowie Prognosen zur langzeitlichen geologischen Entwicklung der zu bewertenden Standortvarianten (siehe Kap. 6) eine sehr wesentliche Rolle (z. B. [Chapman & McKinley 1987], [Savage 1995]).

Zusammenstellungen von Kriterien für die Standortauswahl von HAW-Endlagern für unterschiedliche Wirtsgesteine wurden sowohl in Russland (z. B. Laverov et al. 1994, 2001, Morozov & Tatarinov 1996, Kedrovskij & Shishchic 1997, Lapotschkin 1997, 1998, Anderson et al. 2000, Kotschkin 2000), als auch in Deutschland [AkEnd 2002] und anderen europäischen Ländern entwickelt.

Die Suche nach geeigneten Endlagerstandorten ist in Russland z. Zt. dadurch geprägt, dass ROSATOM (ehemals: MINATOM) bei der Standortauswahl das Ziel verfolgt, die anfallenden radioaktiven Abfälle möglichst in unmittelbarer Nähe der großen Abfallerzeuger endzulagern.

Damit sollen aufwändige Transporte über die Weiten des Landes vermieden und der Entsorgungszyklus von der Abfallentstehung bis zur Endlagerung territorial und organisatorisch konzentriert werden. Laverov et al. wiesen in diesem Zusammenhang bereits 1994 darauf hin, dass sich die Suche nach HAW-Endlagerstandorten in Russland vorerst auf die Auswahl optimaler geologischer Rahmenbedingungen innerhalb der „Sanitären Schutzzonen“ bereits bestehender Betriebe der Atomindustrie beschränken wird. Parallel dazu wurde von Laverov et al. (2000) angeregt, die schwach, mittel und hoch radioaktiven langlebigen Fraktionen der Abfälle getrennt und in unterschiedlichen Tiefen endzulagern.

Trotz dieser Einschränkungen bei der Standortauswahl basiert die Suche nach geeigneten HAW-Endlagerstandorten in Russland in Übereinstimmung mit den IAEA-Empfehlungen auf einer komplexen Analyse möglicher langfristiger Umweltauswirkungen alternativ zu bewertender Standortvarianten. Die geowissenschaftlichen Anforderungen an derartige Standorte für die Endlagerung radioaktiver Abfälle ergeben sich aus den, von den Genehmigungsbehörden geforderten langzeitlichen Sicherheitsbetrachtungen, unter Berücksichtigung von in speziellen Vorschriften festgelegten Schutzziele (siehe Kap. 4 und 6). Für die Standortauswahl in magmatischen Wirtsgesteinen lassen sie sich in folgende, z. T. untereinander wechselwirkende Gruppen unterteilen:

- Regionalgeologische und strukturgeologisch-tektonische Kriterien,
- Geomorphologisch-hydrographische Anforderungen an Endlagerstandorte,
- Hydrogeologische Standortauswahlfaktoren,
- Petrophysikalische Auswahlkriterien und
- Mineralogisch-geochemische Anforderungen.

Die aus den Langzeitsicherheitsanalysen abgeleiteten Standortanforderungen und Sicherheitskriterien dienen als Entscheidungshilfe bei der Standortauswahl, als Planungsgrundlage für das Endlager-Bergwerk und zur Formulierung der Anforderungen an die zu deponierenden Abfälle. Menge, Art und Beschaffenheit der Abfälle sowie die zur Verfügung stehenden, dem jeweiligen Wirtsgestein und dem Abfallinventar angepassten technischen bzw. geotechnischen Barrieren bestimmen neben den Eigenschaften der Wirtsgesteine das Einlagerungskonzept (siehe Kap. 3). Dieses wiederum regelt die Mindestanforderungen an den potenziellen Endlagerstandort bezüglich Größe, stofflich-struktureller Beschaffenheit und notwendigem Isolationspotenzial der geologischen Barriere.

Bei der Beurteilung des Eignungsgrades alternativ zu betrachtender Standorte erfolgt eine Abwägung der Standortauswahlkriterien entsprechend ihrer Bedeutung für die langfristige Endlagersicherheit. Aufgrund verschiedenartiger Wirtsgesteinsinformationen und unterschiedlicher nationaler Einlagerungskonzepte werden die Anforderungen an die Wirtsgesteine und technischen sowie geotechnischen Barrieren international unterschiedlich gewichtet. Einige Länder konzentrieren sich bei der Gewährleistung der Langzeitsicherheit von HAW-Endlagern auf die Schaffung von Voraussetzungen für eine hohe Stabilität der Abfallbehälter bzw. für gute Isolationseigenschaften der Ingenieurbarrieren (z. B. Schweden, USA). Andere Nationen sehen neben der ständigen Vervollkommnung der technischen und geotechnischen Barrieren einen besonderen Schwerpunkt der Arbeiten zur Standortauswahl in dem Nachweis günstiger petrophysikalischer, hydrogeologischer und strukturgeologisch-tektonischer Isolationseigenschaften der Wirtsgesteine (z. B. Schweiz, Kanada, Deutschland).

7.1.1 Regionalgeologische und strukturgeologisch-tektonische Kriterien

Zur Gewährleistung seiner Langzeitsicherheit sollte der zukünftige Endlagerstandort für den zu prognostizierenden Zeitraum durch geringe seismische und neotektonische Aktivitäten (in Deutschland entsprechend AkEnd (2002): Erdbebenzone 1 nach DIN 4149) sowie minimale Hebungs- oder Absenkungsbeträge deutlich kleiner 1 mm/a charakterisiert sein. Eine nur

schwach ausgebildete Hebungstendenz und daran gebundene geringe Erosionsgeschwindigkeiten minimieren die Gefahren einer Freilegung des Endlagers bzw. einer drastischen Reduzierung der geologischen Barriere sowie der Schaffung neuer Grundwasserwegsamkeiten durch Verwitterungs- und Erosionsprozesse (siehe Kap. 6). Im Endlagergebiet dürfen keine Anzeichen für Erschütterungen infolge von zukünftig einsetzendem Vulkanismus vorhanden sein. Das Gebiet soll eine langfristige geodynamische bzw. tektonische Stabilität aufweisen, im günstigsten Fall Bestandteil einer alten, präkambrischen Plattform bzw. eines alten Schildes sein.

Die Errichtung von Endlagern für hoch radioaktive Abfälle in magmatischen Gesteinen setzt eine möglichst geringe tektonische Überprägung und Klüftigkeit der Magmatite bis in Tiefen von 1 – 1,5 km voraus. Allerdings können aufgrund des genetisch bedingten Vorkommens von Absonderungsklüften in diesen Gesteinen im Ergebnis der Standorterkundungsarbeiten keine völlig klüftfreien Gebiete abgegrenzt werden (siehe Kap. 2.8.2). Vielmehr sind solche Massivbereiche auszugliedern, in denen mächtige, hydrodynamisch aktive Störungszonen fehlen. Günstig für eine Radionuklidfixierung ist das Vorkommen alterierter Gesteinsvarietäten mit guten Sorptionseigenschaften in diesen Gebieten. Zwischen eventuell auftretenden, hydrogeologisch relevanten Störungszonen müssen unter Beachtung von Sicherheitsabständen möglichst homogene und minimal deformierte Gesteinsblöcke geringer Durchlässigkeit ausgewiesen werden, deren Ausmaße das sich aus dem Endlagerkonzept (Kap. 3) ergebende Minimalvolumen überschreiten.

Die Geometrie von Endlager-geeigneten Bereichen in magmatischen Wirtsgesteinen wird demzufolge vor allem durch das Vorkommen von tektonisch und hydraulisch aktiven Störungszonen geregelt. Deshalb ist für den Nachweis der Standorteignung eine detaillierte Erfassung und hydrogeologische Bewertung des strukturellen Inventars der Magmatite erforderlich, wie z. B. die Bestimmung der räumlichen Lage, Ausbildung, Teufenerstreckung, des Vernetzungsgrades und der hydraulischen Durchlässigkeit von Störungszonen sowie von Klüften, Schieferungs- bzw. Schichtungsflächen (in metamorph überprägten Magmatiten oder Paramagmatiten) und lithologischen Kontakten (z. B. magmatische Gänge, Einschlüsse).

7.1.2 Geomorphologisch-hydrographische Anforderungen an Endlagerstandorte

Die Endlagerregion sollte sich durch ein schwach gegliedertes Relief, geringe Denudations- bzw. Erosionsraten sowie möglichst große Unterschiede in den absoluten Höhenlagen des geplanten Einlagerungsbereiches und der für das Ende des vorgegebenen Isolationszeitraumes prognostizierten Erosionsbasis auszeichnen. Nach Möglichkeit sollte sich der Standort der abzuteufenden Schachtanlage im Bereich einer oberflächigen Wasserscheide befinden und durch große Entfernungen zum Vorfluter charakterisiert sein. Begünstigend für die Standortauswahl sind außerdem niedrige Grundwasserneubildungsraten und ein möglichst tief gelegener Grundwasserspiegel deutlich oberhalb der Oberkante des Endlager-Bergwerkes.

7.1.3 Hydrogeologische Standortfaktoren

Eine potenzielle Endlagerregion muss sich durch das weitgehende Fehlen hydraulisch aktiver, untereinander vernetzter Grundwasserfließwege sowie durch niedrige Gebirgsdurchlässigkeiten und geringe hydraulische Gradienten, d. h. möglichst niedrige Grundwasserfließgeschwindigkeiten auszeichnen. Bei einem Ausfall der technischen und geotechnischen Barrieren müssen die aus dem Endlager-Bergwerk austretenden kontaminierten Lösungen durch effektiv wirkende Grundwasserstauer bzw. gering durchlässige, möglichst schwach geklüftete Wirtsgesteine in ihrer Ausbreitung behindert oder bei ihrem Vordringen in höhere, oberflächennahe Grundwasserstockwerke möglichst schnell verdünnt werden. In Deutschland liegt entsprechend den AkEnd (2002)-Forderungen eine hydrogeologische Eignung von Endlagerstandorten vor, wenn der einschlusswirksame Gebirgsbereich durch geringe effektive Porositäten, niedrige spezifi-

sche hydraulische Gradienten ($< 10^{-2}$) und Abstandsgeschwindigkeiten deutlich kleiner 1 mm/a charakterisiert ist.

Die Einlagerungsregion sollte durch große Entfernungen zum Vorfluter sowie stabile hydraulische und hydrochemische Bedingungen, weitgehend unabhängig von den klimatischen Verhältnissen an der Erdoberfläche, gekennzeichnet sein. Besonders günstige hydrogeologische Rahmenbedingungen liegen vor, wenn das Endlager durch eine wasserundurchlässige, tonreiche Sedimentschicht vor dem Zutritt von O_2 -reichen Grundwässern geschützt wird (siehe z. B. Endlager Konrad, bei Salzgitter, Deutschland).

Ausgehend von einer erhöhten Radionuklid-Löslichkeit in oxydierenden Wässern, sollten im Einlagerungsniveau die in Granitoiden meist gering mineralisierten, $\pm$ neutralen bis schwach basischen Grundwässer über negative Redoxpotenziale verfügen [Krauskopf 1986], [Krauskopf 1988]. Die Mehrheit der Grundwässer in magmatischen Gesteinen erfüllt ab einer Tiefe von ca. 200 bis 250 m diese Bedingungen (siehe Kap. 2.6.5). Möglichst geringe Gehalte von Kolloiden bzw. Komplexbildnern in den Grundwässern wirken einem Radionuklidtransport ebenso entgegen, wie geringe Karbonatkonzentrationen. Erhöhte CO_3^{2-} -Gehalte im Grundwasser führen zu einer Abnahme freier Bindungskapazitäten in den gesteinsbildenden und sekundären Mineralen der Granitoide, d. h. zu einer geringeren Radionuklidsorption.

7.1.4 *Petrophysikalische Auswahlkriterien*

Die Endlagerwirtsgesteine sollten durch folgende geomechanische und thermophysikalische Eigenschaften charakterisiert sein:

- eine hohe Standfestigkeit,
- geringe Spannungen und niedrige Deformationsraten,
- eine hohe Wärme- und Strahlungsbeständigkeit,
- eine hohe Wärmeleitfähigkeit und
- hohe Elastizitätswerte.

Günstigstenfalls weisen die Wirtsgesteine unter in-situ-Bedingungen eine plastisch-viskose Deformationsfähigkeit ohne Dilatanz (d. h. ohne Rissbildung noch vor dem Bruch) sowie eine nur geringe Neigung zu einer thermomechanisch bedingten Sekundärpermeabilität auf [AkEnd 2002]. Erstrebenswert ist der Nachweis von Bereichen innerhalb des Gesteinsmassivs, die sich durch eine minimale Anisotropie der physikalischen Eigenschaften und der Zusammensetzung der Gesteine auszeichnen und in denen ein verstärktes Auftreten von Sekundärmineralen mit hohem Sorptionsvermögen beobachtet werden kann.

Der Auswahl von Endlagerstandorten muss eine detaillierte Analyse der geodynamischen Entwicklung der Region und der zeitlich-räumlichen Evolution der im Wirtsgestein vorherrschenden Spannungsregime zugrunde liegen. In deren Ergebnis werden potenziell geeignete stabile Krustenabschnitte ausgegliedert, in denen die Folgen möglicher tektonischer Beanspruchungen, wie z. B. Reaktivierung bzw. Neubildung von Störungszonen oder Zunahme der Öffnungsweiten von Klüften bestimmter Orientierung, am geringsten sind.

Kontaktbereiche von Plutoniten sind aufgrund ihres häufig zu beobachtenden Einschlussreichtums, intensiverer Klüftigkeit und erhöhter Gebirgsspannungen meist schlechter zur HAW-Endlagerung geeignet als der Zentralteil von Intrusivkörpern. Dies bestätigen z. B. die im Rahmen der Standortsuche für ein HAW-Endlager im Umfeld des BChK vorgenommenen Untersuchungen des Belogorsker Granitoidmassivs, das nördlich des Nishnekansker Plutons liegt (siehe Abb. 2-6). Im Ergebnis gravimetrischer und aeromagnetischer Analysen sowie geologischer Kartierungsarbeiten im Maßstab 1 : 50 000 wurden besonders im Randbereich des Intrusivkörpers Spuren intensiver Deformationen und ein hoher Inhomogenitätsgrad festgestellt. Lediglich im Zentralteil des Massivs konnte ein etwa 16 km² großes, $\pm$ homogen zusammenge-

setztes, für die HAW-Endlagerung geeignetes Gebiet ausgegliedert werden (Anderson et al. 1996).

7.1.5 Mineralogisch-geochemische Anforderungen

Die Gesteine der geologischen Barriere sollten im Nah- und Fernfeld des Endlagers über gut ausgebildete Isolations- bzw. Radionuklidfixierungseigenschaften verfügen. In magmatischen Wirtsgesteinen zählen dazu vor allem:

- ein gutes Sorptionsvermögen der Gesteine durch sekundär, im Ergebnis von Alterationsprozessen gebildete Tonminerale, d. h. hohe Gehalte an Mineralphasen mit großen reaktiven Oberflächen,
- geringe effektive Porositäten, niedrige Matrixdurchlässigkeiten und geringe Diffusionskoeffizienten,
- ein weitgehendes Fehlen von hydraulisch aktiven Störungszonen, d. h. ein „Verheilen“ von ursprünglich offenen Klüften in den Gesteinen durch hydrothermal-metasomatische Alterationsprodukte,
- gering mineralisiertes, neutrales bis schwach alkalisches, reduzierendes Gleichgewichtsgrundwasser im Einlagerungsniveau, mit niedrigen Gehalten von Komplexbildnern und Kolloiden.

Entsprechend den AkEnd (2002)-Empfehlungen sollten in deutschen Endlagern im einschlusswirksamen Gebirgsbereich effektive Diffusionskoeffizienten von $< 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ und Verteilungskoeffizienten (k_d -Werte) für die Mehrzahl der langzeitrelevanten Radionuklide von $\leq 0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$ vorliegen.

Häufig verbessert sich durch Alterationsprozesse, d. h. durch die Entstehung von sekundären Tonmineralen aus den gesteinsbildenden Feldspäten und Glimmern, das Schadstoffrückhaltevermögen von Magmatiten (siehe Kap. 2.7.6). Stark verwitterte oder metasomatisch überprägte Gesteinsbereiche stellen oft effektiv wirkende geochemische und Sorptionsbarrieren für migrierende Radionuklide dar. Das an derartige metasomatische Veränderungen der Gesteine gebundene Verheilen von Klüften führt zu einer Senkung der Gebirgsdurchlässigkeiten. Nach [Laverov et al. 2001] lassen Klüfte mit Öffnungsweiten $< 0,01 \text{ mm}$ eine freie Bewegung von wässrigen Lösungen nicht mehr zu. Der Transport von Radionukliden über Diffusionsprozesse ist in magmatischen Gesteinen sehr gering und beträgt nach [Smell & Rosbolt 1984] maximal 20 cm in 0,5 Millionen Jahren (siehe auch Kap. 4).

7.1.6 Besonderheiten von Granitoiden als Endlager-Wirtsgesteine

Granitoide, als die am weitesten verbreiteten Gesteine innerhalb der kontinentalen Erdkruste, eignen sich bei Berücksichtigung besonderer Standortanforderungen (Kap. 7.1.1 bis 7.1.5) gut zur Endlagerung radioaktiver Abfälle, z. B. [Milnes et al. 1980]. Eine von [Herrmann & Röttemeyer 1998] vorgenommene Bewertung der Eignung unterschiedlicher Wirtsgesteinstypen für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen ergab, bei Bestwerten für Steinsalz, für Granite eine deutlich bessere Einstufung als für Tonschiefer. Lediglich die Tendenz von Graniten zu Bruchformen bzw. zu offenen Klüften und die geringe Neigung dieses Gesteinstyps zu plastischer Verformung stellen möglicherweise negative Eigenschaften für die HAW-Endlagerung dar. Zu ähnlichen Schlussfolgerungen kam auch [Kotschkin 2000].

Diese positiven Bewertungen und die geologischen Gegebenheiten in einem Teil der betroffenen Länder haben zur Einrichtung mehrerer Untertagelabors geführt, in denen detaillierte in-situ-Untersuchungen zu den Barriereigenschaften granitoider Gesteine erfolgen. Parallel dazu ist weltweit mit der Erkundung und dem Bau von Endlagern für schwach bis hoch radioaktive Abfälle in diesem Gesteinstyp begonnen worden. Die Endlagerprojekte konzentrieren sich auf alte, präkambrische Schilde bzw. Plattformen (z. B. Schweden, Finnland, Kanada, Russland,

Indien, China) und phanerozoische, meist variszische Granite/Granodiorite (z. B. Frankreich, Schweiz, Spanien, Ungarn). Im Ergebnis detaillierter hydrogeologischer Untersuchungen gelang der Nachweis, dass selbst Granitvorkommen in allochthonen Einheiten des alpidischen Faltengürtels Europas aufgrund ihrer geringen Durchlässigkeitsbeiwerte als potenzielle Endlager-Wirtsgesteine in Frage kommen können (Balla et al. 2000, Balla 2004).

Die Eignung von Granitoiden zur Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle basiert vor allem auf (z. B. [Milnes et al. 1980], [Papp 1997], [Herrmann & Röthemeyer 1998], [Petrov 2001], [Laverov et al. 2001]):

- der großen Druckfestigkeit der Gesteine, was bei Beachtung der Spannungsverteilungen eine hohe Standfestigkeit der bergmännischen Auffahrungen auch in großen Tiefen garantiert,
- dem oft sehr großen Volumen saurer Magmatitkomplexe,
- der meist $\pm$ homogenen Zusammensetzung von Granitoiden, insbesondere im Zentralteil der Intrusivkörper,
- einer großen Stabilität gegenüber Wärme- und Strahlungseinwirkungen. Granitoide besitzen eine hohe, weitgehend temperaturunabhängige Wärmeleitfähigkeit und geringe Wärmeausdehnungskoeffizienten, was geringe thermisch induzierte Spannungen in den Gesteinen zur Folge hätte.
- der geringen Wasserlöslichkeit der Gesteine. Die in Granitoiden fließenden, in der Regel schwach alkalischen Grundwässer sind meist nur gering mineralisiert und in der Regel ab Teufen von ca. 200 bis 250 m reduzierend, was sich negativ auf das Migrationsvermögen von Radionukliden auswirkt.
- einer untergeordneten Rolle von Diffusionsprozessen innerhalb der Gesteinsmatrix (siehe Kap. 2.7.5) und
- der Bildung von sekundären Tonmineralen mit stark erhöhten Sorptionskapazitäten im Ergebnis der Verwitterung bzw. metasomatischen Überprägung von Granitoiden, ggf. unterstützt durch die Zirkulation von erhitzten Wässern im Endlagernahfeld. Die Mineralum- und -neubildungen können zu einem zumindest partiellen Verschluss von Klüften führen (siehe Kap. 2.7.6, [Laverov et al. 1994]).

Schwach geklüftete Granitoide weisen im Vergleich zu Tonen einige Vorteile für die Endlagerung von hoch radioaktiven wärmeproduzierenden Abfällen auf. Der vergleichsweise hohe Wassergehalt von Tonen hat bei Erhitzung die Freisetzung von z. T. hochaggressiven fluiden Phasen zur Folge. Die hohe Plastizität von tonigen Gesteinen führt zu deutlich schlechteren geomechanischen Eigenschaften, insbesondere in Bezug auf die Standsicherheit von bergmännischen Auffahrungen. Tone sind gegenüber Granitoiden instabiler bei Wärme- und Strahlungseinwirkungen und verfügen über eine schlechtere Wärmeleitfähigkeit als Granitoide. Dies hat kostspielige Konsequenzen für die Endlagerauslegung bzw. für die Zusammensetzung der geotechnischen Barrieren.

Im Gegensatz zum plastischen Verhalten von Salzen neigen Granitoide aufgrund ihrer erhöhten Sprödigkeit bei mechanischer Beanspruchung zur Ausbildung von Bruchformen bzw. Klüften, d. h. von potenziellen Grundwassermigrationsbahnen. Abgesehen von der Bildung von Alterationsprodukten und vom möglichen Verschließen der Hohlräume bei tektonisch bedingten Änderungen der Spannungsverteilungen im Gesteinsmassiv, unterliegen die Klüfte keiner Selbstheilung. Ausgehend davon erlangen für granitoide Wirtsgesteine

- der Nachweis und die hydrogeologische Charakterisierung von Störungszonen bzw. offenen Kluftsystemen, d. h. von potenziellen Grundwasserwegsamkeiten,
- die geologisch-geophysikalische Ausgrenzung von Gebieten erhöhter Klüftigkeit und
- die Optimierung der technischen und geotechnischen Barrieren

eine besondere Bedeutung. Werden im Umfeld des geplanten Endlagers hydraulisch aktive Grundwasserwegsamkeiten nachgewiesen, so erfolgt der Radionuklidtransport vorwiegend advektiv über Klüfte (siehe Kap. 4). Demzufolge konzentriert sich die Suche nach geeigneten Endlagerstandorten auf das Auffinden von $\pm$ homogenen, wenig gestörten Magmatitbereichen in seismisch, vulkanisch und tektonisch lang anhaltend inaktiven Zonen mit einer geringen Grundwasserströmung bzw. niedrigen Grundwasserfließgeschwindigkeiten. Für ein Endlager geeignete magmatische Gesteinsblöcke zeichnen sich durch einen relativ einfachen Internaufbau, gekoppelt mit einer geringen stofflich-strukturellen Variationsbreite, sowie eine möglichst geringe, weitmaschige Klüftung aus und befinden sich fernab von mächtigen, tief reichenden Störungszonen.

7.1.7 *Vergleich der bisher vorliegenden Erkundungsdaten mit den geowissenschaftlichen Standortanforderungen*

Eine ausführliche Darstellung des Standes der bisher an den potenziellen Endlagerstandorten „Verchne-Itatskij“ und „Jennissejskij“ durchgeführten geologisch-geophysikalischen Erkundungsarbeiten ist in Kap. 2.8 enthalten. Dort erfolgte auch eine erste Bewertung der methodischen Herangehensweise an den Prozess der Standorterkundung sowie der Qualität und Vollständigkeit der Daten für die Durchführung eines Standortauswahlverfahrens. Diese, vorwiegend auf Erfahrungen bei der Bearbeitung ähnlicher Aufgabenstellungen basierenden Einschätzungen müssen unter Einbeziehung langzeitsicherheitsanalytischer Betrachtungen ergänzt werden. Notwendig ist ein Vergleich der geowissenschaftlichen Standortanforderungen (Kap. 7.1.1 bis 7.1.5), die unter Zugrundelegung des überwiegend wärmephysikalisch hergeleiteten Endlagerkonzeptes (siehe Kap. 3) sowie umfangreicher Langzeitsicherheitsanalysen bzw. -prognosen (siehe Kap. 4 und 6) formuliert wurden, mit dem zur Zeit vorhandenen Kenntnisstand zum geologisch-hydrogeologischen Tiefenbau der beiden vorausgewählten Gebiete. Dies ermöglicht fachlich fundierte Aussagen dazu, ob die bisher durchgeführten Standortuntersuchungen quantitativ und qualitativ ausreichende Informationen zur Auswahl eines langzeitsicheren HAW-Endlagerstandortes zur Verfügung stellen.

Für die Auswahl eines geeigneten Standortes für ein unterirdisches HAW-Endlager in magmatischen Wirtsgesteinen sind ausgehend von geowissenschaftlichen Langzeitsicherheitsüberlegungen vor allem detaillierte standortbezogene struktur- und hydrogeologische, seismologische, neotektonische sowie mineralogisch-geochemische Informationen erforderlich. Dazu zählen vor allem (siehe auch Kap. 6.2):

- Angaben zum Vorkommen, zur räumlichen Orientierung und Verteilung, Verschneidung sowie zum Öffnungsgrad bzw. zur mineralogischen Ausfüllung von Störungszonen und Inhomogenitäten in den potenziellen Wirtsgesteinen. In konsolidierten Magmatiten erfolgt der Radionuklidtransport bevorzugt über:
 - hydraulisch (meist auch tektonisch) aktive Störungszonen und sie begleitende Kluftsysteme,
 - unverheilte, durch die Spannungsverteilung im Gesteinsmassiv zumindest z. T. geöffnete Absonderungsklüfte der Magmatite,
 - Kontakte der Magmatite mit Einschlüssen, magmatischen Gängen und Rahmengesteinen sowie zwischen den verschiedenen Intrusionsphasen,
 - Schieferungsflächen in metamorph überprägten Magmatiten sowie
 - eventuell vorhandene rudimentäre Schichtungsflächen in Paramagmatiten bzw. in Einschlüssen metamorpher Gesteine innerhalb des Intrusivkomplexes.

Eine möglichst detaillierte Erfassung dieser potenziellen Grundwassermigrationsbahnen und ihre umfassende hydraulische Charakterisierung durch in-situ-Untersuchungen (z. B.

Pumpversuche) sind wichtige Voraussetzungen für eine Bewertung der hydrogeologischen Eignung des Gebietes (siehe Kap. 2.8.2 und 6).

- Informationen zur hydrogeologischen Zonierung des geologischen Untergrundes, zum Vorkommen von Poren- und Kluftgrundwasserleitern sowie zur Physikochemie und zum Alter der Grundwässer,
- Daten zu den Spannungsverteilungen und wahrscheinlichen Deformationsraten im geplanten Einlagerungsbereich sowie
- durch präzise seismologische Beobachtungen, geomorphologische Analysen bzw. geodätische Messungen gestützte Angaben zu den seismischen und neotektonischen Aktivitäten und zu den Hebungs- bzw. Absenkungsraten im Untersuchungsgebiet.

Bereits in einem relativ frühen Stadium der Standorterkundung müssen durch den Einsatz oberflächen- und ggf. bohrlochgeophysikalischer Untersuchungsmethoden sowie durch gezielt niedergebrachte Erkundungsbohrungen mächtige Störungszonen und Gesteinsblöcke mit einer erhöhten Klüftigkeit ausgegliedert werden. Außerdem muss im Ergebnis der Standorterkundungsarbeiten nachgewiesen werden, dass im geplanten Einlagerungsbereich Grundwassermigrationspfade weitgehend fehlen.

Vor allem der Einsatz seismischer und geoelektrischer Verfahren ist gut für die Bestimmung von Diskontinuitäten, Störungszonen bzw. Inhomogenitäten in magmatischen Gesteinen geeignet. Der Nachweis von Scher- bzw. Verwerfungszonen ist durch Veränderungen in den Ausbreitungsgeschwindigkeiten seismischer Wellen und im Einfallen von Reflektoren bzw. Refraktoren möglich [Lange & Eberle 1999]. Insbesondere die Hochfrequenz-Refraktionsseismik gestattet in Kombination mit der Vertikalen Elektrischen Sondierung (VES) neben der Feststellung des Grundwasserspiegels und der Bestimmung schlecht konsolidierter Gesteinsbereiche, wie z. B. von sedimentären Überdeckungen des Grundgebirges bzw. von Verwitterungskrusten, die Rekonstruktion des strukturellen und lithologischen Aufbaus des Untergrundes. Die häufig als Ergänzung eingesetzte Reflexionsseismik ist zwar nicht in der Lage, die geologischen Strukturen in den oberen 20 bis 30 m der Messprofile zu rekonstruieren, erfasst aber die darunter liegenden Grenzflächen, Kontakte und Störungszonen mit einem sehr hohen Auflösungsvermögen (siehe Kap. 2.8.2 und 8.3).

Die bisher durchgeführten Standortuntersuchungen liefern für beide Gebiete noch keine klaren Vorstellungen zum Vorkommen, zur räumlichen Orientierung und Vernetzung von hydraulisch aktiven Störungszonen sowie zur Verbreitung von $\pm$ monolithischen Gesteinsblöcken. Für beide Standorte existiert eine Vielzahl von strukturell-tektonischen Karten bzw. Schemas mit widersprüchlichen Aussagen, die auf unterschiedlichen Daten (z. B. Geomorphologie, Aerogeophysik, Luftbilddaufnahmen, Oberflächengeophysik) basieren. Auch Angaben zur Lage von Störungszonen mit Mächtigkeiten von mehreren hundert Metern differieren für die weitgehend mit quartären Sedimenten überdeckten Untersuchungsgebiete.

Ähnlicher Klärungsbedarf wie bei den struktureologischen Daten besteht z. Zt. bezüglich der vorliegenden Informationen zum hydrogeologischen Aufbau des geologischen Untergrundes und zu den hydraulischen Eigenschaften der im Untersuchungsgebiet vorkommenden Störungszonen bzw. Grundwasserwegsamkeiten (siehe auch Kap. 2.8 und 6.2). Die Ergebnisse der Modellierung der Strömungs- und Transportprozesse (Kap. 4) und die mineralogisch-petrographischen Beobachtungen zum Alterationsgrad der Gesteine (Kap. 2.7.6) zeigen zwar, dass es aus Gründen der Sicherheit des Endlagers nicht erforderlich ist, im Prozess des Standortauswahlverfahrens und auch im Stadium der unterirdischen Detailerkundung jede Kluft bzw. Störungszone zu bestimmen. Trotzdem ist es bereits bei der Standortauswahl notwendig, hydraulisch aktive Bereiche im Umfeld der geplanten Einlagerungsbereiche auszugliedern und ihre hydraulischen Eigenschaften, wie Durchlässigkeitsbeiwerte und Fließgeschwindigkeiten, zu bestimmen. Die hydrogeologische Eignung von Standorten kann nur durch detaillierte geophy-

sikalische, hydraulische und hydrochemische Messungen in Erkundungsbohrungen, die bis in das geplante Einlagerungsniveau hinabreichen, sowie durch experimentelle Untersuchungen in einem Untertagelabor exakt eingeschätzt werden.

Im Ergebnis der Erkundungsarbeiten und von Langzeitsicherheitsanalysen müssen für den Endlagerstandort und sein näheres Umfeld intensive seismische Erschütterungen und das Vorkommen von neotektonisch aktiven Störungszonen ausgeschlossen werden können. Für die Erfassung derartiger Strukturen in überdeckten Magmatiten eignen sich Kombinationen unterschiedlicher geophysikalischer Erkundungsmethoden (siehe Kap. 2.8) sowie präzise geodätische Messungen bzw. detaillierte seismologische und geomorphologische Beobachtungen (siehe Kap. 2.5).

Abschätzungen der zukünftig in der Region Shelesnogorsk zu erwartenden tektonischen Bewegungen und seismischen Erschütterungen beruhen bisher lediglich auf geomorphologischen Untersuchungsergebnissen (z. B. Lukina 2001) und allgemeinen Bewertungen des seismischen Gefährungsgrades (siehe Kap. 2.5). Obwohl derartige Daten aufgrund der regionalgeologischen Position des Untersuchungsgebietes für eine Langzeitsicherheitsprognose erforderlich sind (siehe Kap. 6.2), liegen konkrete Resultate geodätischer Messungen, die z. B. in den Untertageanlagen des BChK durchgeführt wurden, bisher nicht vor. Die vorliegenden Unterlagen enthalten keine systematischen, für den Leser nachvollziehbaren Darstellungen der Untersuchungsergebnisse des seit 1963 durch KNIIGMS durchgeführten Langzeitmonitorings der seismischen Aktivitäten in der Region Shelesnogorsk. Entsprechende Bewertungen beschränken sich auf verbale Einschätzungen, ohne Bezug auf konkrete Messergebnisse.

Bisher fehlen auch in Feldversuchen bestimmte Angaben zur Größe und räumlichen Verteilung von Gebirgsspannungen innerhalb des Nishnekansker Granitoidmassivs und Berechnungen der wahrscheinlichen Deformationsraten. Gleiches gilt für auf statistischer Grundlage (Erdbebenkatalog) und exakten geomechanischen Berechnungen basierende Ableitungen der Wahrscheinlichkeit von Kluftbildungen bzw. -veränderungen durch geodynamische Prozesse sowie für Aussagen zum Einfluss Erdbeben-induzierter Scherdeformationen auf im Untersuchungsgebiet existierende Störungszonen und Untertageanlagen. Derartige Berechnungen sind notwendig für die Optimierung der technischen und geotechnischen Barrieren mit dem Ziel einer besseren „Verdauung“ von Erdbeben-induzierten Scherdeformationen bei Überschreitung zulässiger plastischer Deformationen.

7.2. Anforderungen an den Standort Nishnekansker Granitoidmassiv aus sicherheitsanalytischer Sicht

Die bisher durchgeführten sicherheitsanalytischen Modellrechnungen liefern aufgrund von Datendefiziten, insbesondere bei der Charakterisierung der Grundwassermigrationswege, und durch die daran geknüpften Schematisierungen bzw. Vereinfachungen der geologisch-hydrogeologischen Rahmenbedingungen nur erste, orientierende Angaben zur Grundwasserströmung und zum Radionuklidtransport im Endlagerumfeld. Trotzdem konnten durch gezielte Parametervariationen zahlreiche Hinweise auf für die Langzeitsicherheit des geplanten HAW-Endlagers besonders sensitive Einflussgrößen bzw. Standortparameter gewonnen werden.

Die Strömungsmodellierungen mit FEFLOW und die sicherheitsanalytischen Transportmodellierungen mittels EMOS haben deutlich gezeigt, dass beide Prozesse in einem magmatischen Wirtsgestein vor allem von den hydraulischen Durchlässigkeiten der Gesteinsmatrix und der Klüfte bzw. Störungszonen sowie vom Verhältnis der Durchlässigkeitsbeiwerte geregelt werden. Die Differenz zwischen Matrix- und Kluftdurchlässigkeiten bestimmt die Intensität, mit der die Radionuklide durch die Gesteinsmatrix retardiert werden und regelt damit, inwieweit sich der Radionuklidtransport auf das Kluft- und Störungsnetz beschränkt. Die Bedeutung des kluftgebundenen, advektiven Schadstofftransportes nimmt bei größer werdenden Unterschie-

den zwischen den k_f -Werten der Gesteinsmatrix und der Klüfte deutlich zu. In stärker durchlässigen Gesteinsblöcken (mit Durchlässigkeitsbeiwerten von z. B. 10^{-8} m/s im Vergleich zu praktisch undurchlässigen Gesteinen mit 10^{-11} m/s) steigt der Anteil der durch Diffusionsprozesse erfolgenden Schadstoffausbreitung im Vergleich zum kluftgebundenen Transport (mit k_f -Werten von ca. 10^{-6} m/s) signifikant an.

Die durchgeführten Modellierungen unterstreichen die Wichtigkeit, im Ergebnis der Standorterkundungsarbeiten möglichst kluftarme, gering durchlässige Gesteinsblöcke für das geplante HAW-Endlager zu bestimmen. Die Berechnungen belegen, dass die Gesamttransportzeit der Radionuklide aus dem Einlagerungsbereich bis in die Biosphäre entscheidend durch den diffusiven Transport in einer gering durchlässigen, möglichst wenig gestörten Gesteinsmatrix verzögert wird. Eine Verlängerung der in gering geklüfteten Wirtsgesteinen zurückzulegenden Fernfeld-Distanz von 800 m auf 2 600 m führte in einem an die realen Verhältnisse im Gebiet „Verchne-Itatskij“ angelehnten Berechnungsbeispiel zu einer Verzögerung im Auftreten der maximalen Strahlenexposition in der Biosphäre von $2 \cdot 10^5$ Jahren sowie zu einer deutlichen Senkung der Strahlenexposition von $4 \cdot 10^{-6}$ Sv/a auf $7 \cdot 10^{-7}$ Sv/a (Kap. 4.4.3).

Die Ergebnisse der Modellierung der Radionuklidtransportprozesse legen nahe, für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle in magmatischen Wirtsgesteinen eine möglichst große Entfernung zu hydraulisch aktiven Störungszonen bzw. Klüften einzuhalten. Aus den Untersuchungen wird ersichtlich, dass es in Magmatiten durch eine Vernetzung von Wasserwegsamkeiten innerhalb des Kluftnetzwerks schnell zu einem Austrag der Radionuklide in die Biosphäre mit entsprechend hohen Expositionsraten kommen kann. Daher kommt den technischen und geotechnischen Endlagerbarrieren sowie detaillierten struktur- und hydrogeologischen Standortuntersuchungen eine besondere Bedeutung zu.

Die schematisierten 2D-Modellrechnungen mit FEFLOW (Kap. 4.4.3.1) demonstrieren den Einfluss der räumlichen Anordnung von Klüften in Beziehung zur Grundwasserströmung auf den Schadstofftransport und unterstreichen damit die Notwendigkeit einer detaillierten Erfassung der Verbreitung und räumlichen Orientierung von hydraulisch aktiven Klüften in Endlagernähe. Ausgehend von den Transportmodellierungen stellen Klüfte, die in Richtung der Grundwasserströmung angeordnet sind, wie z. B. Lagerklüfte bei $\pm$ horizontaler Grundwasserströmung, aufgrund ihres hohen Transportpotenzials eine besonders große Gefahr für die Endlagersicherheit dar. Quer oder schräg zur Grundwasserströmung angeordnete Klüfte führen bei geringen Wasserdurchlässigkeiten der Gesteinsmatrix zur Bildung von Schadstoffbahnen im Schatten der Querklüfte (Kap. 4.4.3).

Ausgehend von den Ergebnissen der Langzeitsicherheitsanalyse ist für den potenziellen Endlagerstandort außerdem zu klären, ob Prozesse wahrscheinlich sind, die zur Bildung hydraulischer Verbindungen zwischen Einlagerungsniveau und oberflächennahem Bereich (mit O_2 -reichen Grundwässern) führen können. Als Belege für eine fehlende Kommunikation zwischen Erdoberfläche und einzulagernden Abfallgebinden dienen ein hohes Alter der im Einlagerungsniveau angetroffenen Grundwässer, der fehlende Nachweis von Tritium und ^{14}C in diesen Grundwässern sowie hydrochemische Indikatoren für das Nichtvorhandensein einer solchen Verbindung. Entsprechende Angaben fehlen für das Gebiet „Verchne-Itatskij“ vollständig, während für das „Jennissejskij“-Gebiet derartige Untersuchungen im Jahre 2003 begonnen wurden (Gupalo et al. 2004).

7.3 Anforderungen an den Standort Nishnekansker Granitmassiv aus Sicht des Endlagerkonzeptes

Unter Berücksichtigung der sich aus dem Endlagerkonzept ergebenden Anforderungen sind im wesentlichen folgende Standortfaktoren im Verlaufe der Erkundungsarbeiten detailliert zu analysieren:

- Größe und Geometrie weitestgehend homogener Gesteinsblöcke,
- lokale bzw. regionale Temperaturverhältnisse in den Gesteinen und
- thermophysikalische Gesteinsparameter.

Im Rahmen des in Kap. 3 beschriebenen Endlagerkonzeptes wurde für die wärmeentwickelnden Abfälle eine Größe der erforderlichen Endlagerfelder von insgesamt 606 m x 1160 m ausgewiesen, was einer Fläche von ca. 0,7 km² entspricht. Für die schwach wärmeentwickelnden Abfälle ist eine Feldgröße von ca. 130 m x 75 m erforderlich. Damit kann abgeschätzt werden, dass im Ergebnis der Standorterkundung für die unterirdischen Anlagen des Endlagers insgesamt ein $\pm$ homogen zusammengesetzter Gesteinsblock mit einer Grundfläche von ca. 1 bis 1,5 km² und, unter Berücksichtigung von Sicherheitsabständen, einer Mächtigkeit von etwa 100 m ausgewiesen werden muss.

Die natürliche Gebirgstemperatur in der Einlagerungsteufe bestimmt die zulässige Temperaturerhöhung, die durch die Einbringung der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle verursacht werden darf, ohne dass Sicherheitskriterien verletzt werden. Aus diesem Grund ist ein Standort zu wählen, der in einer Region mit möglichst geringer Zunahme der Temperatur mit der Tiefe, also mit möglichst geringem Temperaturgradienten, angesiedelt ist. Je geringer die Temperatur in der potenziellen Einlagerungsteufe ist, desto kompakter kann die geometrische Anordnung der Abfallbehälter gewählt werden oder desto geringere Zeiten können für eine Abkühlung der wärmeentwickelnden Abfälle in einem Zwischenlager angesetzt werden.

Die thermophysikalischen Gesteinsparameter, und hierbei insbesondere die Wärmeleitfähigkeit des Wirtsgesteins, bestimmen entscheidend die Geschwindigkeit der Wärmeabfuhr in das Gebirge und damit die Höhe der Maximaltemperaturen in Behälternähe. Grundsätzlich sind demnach solche Lithotypen für die Einlagerung zu wählen, die eine möglichst hohe Wärmeleitfähigkeit besitzen. Gleichzeitig sollte darauf geachtet werden, dass lithologische Einheiten mit sehr geringer Wärmeleitfähigkeit, wie beispielsweise Spessartit, nicht in unmittelbarer Nähe des Endlagers anzutreffen sind, da diese als Wärmestauer agieren. Dies stellt erhöhte Anforderungen an den Nachweis dieser basischen Gänge im Umfeld des geplanten Einlagerungsbereiches mittels geophysikalischer Verfahren bzw. durch Erkundungsbohrungen.

8 EMPFEHLUNGEN FÜR DIE WEITERE STANDORTUNTERSUCHUNG IM NISHNEKANSKER GRANITOIDMASSIV

8.1 Definition der detaillierter zu untersuchenden Parameter

In Übereinstimmung mit dem methodischen Ansatz des vorliegenden Forschungsvorhabens (siehe Kap. 1.2) basieren die Empfehlungen zur weiteren Untersuchung der beiden potenziellen Endlagerstandorte vor allem auf:

- einer detaillierten Zusammenstellung, komplexen Auswertung (möglichst unter Zuhilfenahme eines 3D-Modells, siehe Kap. 5) sowie Bewertung der bisher durchgeführten geologisch-geophysikalischen Erkundungsarbeiten,
- einem Vergleich der vorliegenden standortbezogenen Daten mit den Standortanforderungen (Kap. 7),
- dem zusätzlichen Informationsbedarf für die Durchführung langzeitlicher Prognosen der geologischen Entwicklung der Region (Kap. 6),
- den für eine Präzisierung des Endlagerkonzeptes (Kap. 3) erforderlichen ergänzenden Daten zu den wärmephysikalischen Eigenschaften und zur Verteilung unterschiedlicher Lithotypen, sowie
- den Ergebnissen langzeitsicherheitlicher Analysen von Grundwasserströmungs- und Radionuklidtransportprozessen sowie zum Einfluss einzelner Standortparameter auf den Stoff- bzw. Wärmetransport (Sensitivitätsbetrachtungen) im Umfeld des geplanten Endlagers und damit auch auf das Endlagerkonzept (Kap. 4). Durch gezielte Variationen der Eingangsparameter können im Ergebnis der Modellierungsarbeiten die Wirtsgesteinseigenschaften bestimmt werden, die einen besonders großen Einfluss auf die Langzeitsicherheit des Endlagers haben.

Unter Zugrundelegung der Bewertungs- und Modellierungsergebnisse sowie der aufgezeigten Datendefizite ist es möglich, die weitere Standorterkundung auf eine detaillierte Erfassung der z. Zt. noch fehlenden oder nicht in der erforderlichen Qualität und Quantität vorliegenden, aber für die Sicherheit des Endlagers besonders sensiblen Standortparameter auszurichten. Für Festlegungen bezüglich der noch notwendigen Standortuntersuchungen sind detaillierte Interpretationen der geologisch-geophysikalischen Erkundungsergebnisse und Bewertungen der zukünftigen geologischen Entwicklung der Region auf der Grundlage einer komplexen Auswertung aller Standorterkundungsdaten erforderlich. Das dafür erstellte geologische 3D-Modell und die Überprüfung der Modellierungsergebnisse durch Tiefbohrungen bzw. Tiefenaufschlüsse ermöglichen Aussagen zur Effektivität und Notwendigkeit der bisher eingesetzten Erkundungsmethoden. Eine modellgestützte Analyse der standortbezogenen Daten gestattet es auch, eine Wichtung eventuell vorzuschlagender, ergänzender Erkundungsarbeiten vorzunehmen.

Trotz der inzwischen an beiden Standorten durchgeführten umfangreichen geologisch-geophysikalischen Erkundungsarbeiten (siehe Kap. 2.8.1) fehlen einige, insbesondere aus Sicht des Langzeitsicherheitsnachweises für das geplante HAW-Endlager unbedingt erforderliche Daten. Aus Gründen einer übersichtlicheren Zusammenstellung wurden die Empfehlungen für die weitere Standortuntersuchung thematisch gegliedert und tabellarisch aufgelistet.

Für exakte langzeitsicherheitsanalytische Berechnungen ist eine Ergänzung der für beide Standorte vorliegenden Informationen zum strukturgeologischen Bau des Untergrundes notwendig (s. Tabelle 8-1 und Tabelle 8-2)), insbesondere zum Vorkommen, zur räumlichen Orientierung, zur Verschneidung bzw. zum Vernetzungsgrad von hydraulisch aktiven Störungszonen oder stark geklüfteten Gesteinsbereichen, zu den Klufthäufigkeiten, -öffnungsweiten

und -füllungen sowie zu den Permeabilitäten (siehe Kap. 6 und 7.1.7). Den bisherigen Modellen liegen nur stark vereinfachte Vorstellungen zur Kluftorientierung und -verschneidung zugrunde. Zur Verbesserung des Kenntnisstandes auf diesem Gebiet können, abgesehen von seismischen Untersuchungen (s. Anlage A3) nur in seltenen Fällen ergänzende oberflächen-geophysikalische Messungen beitragen. Notwendig sind vor allem:

- eine gründlichere und komplexe Interpretation aller bereits vorliegenden geologisch-geophysikalischen Erkundungsdaten (siehe Kap. 2.8.2 und 5),
- eine zielgerichtete Überprüfung der oberflächengeophysikalischen Befunde durch tiefe Erkundungsbohrungen und gegebenenfalls eine daran anschließende Korrektur der Interpretationen der geophysikalischen Messergebnisse,
- eine exaktere Durchführung der bohrlochgeophysikalischen Untersuchungen, unter Einschluss akustischer Bohrlochmessungen (siehe Kap. 8.2.3 und Anlage A4), zur Lokalisierung, hydrogeologischen Charakterisierung und Bestimmung der räumlichen Orientierung von in den Bohrungen angetroffenen Störungszonen,
- die Entnahme sowie detaillierte strukturgeologische und mineralogische Bearbeitung orientierter Bohrkerne sowie
- die gerätetechnische und personelle Absicherung qualitativ hochwertiger, komplex bohrlochgeophysikalisch und hydrogeologisch untersuchter Erkundungsbohrungen mit hohem Kerngewinn.

Die Abgrenzung mächtiger, hydraulisch aktiver Störungszonen sowie die detaillierte Erfassung und hydrogeologische Bewertung des strukturellen Inventars der Magmatite sind Grundvoraussetzungen für die Ausgliederung der laut Endlagerkonzept erforderlichen Volumina von Endlager-geeigneten Bereichen innerhalb des Gesteinsmassivs.

Die zu diesen Komplexen empfohlenen weiteren Erkundungsarbeiten sind in den Tabellen 8-1 und 8-2 zusammengefasst.

Darüber hinaus sind vertiefende Untersuchungen zur Wirksamkeit der technischen Barrieren und zu deren möglichen Beeinträchtigung unter den vorherrschenden Standortbedingungen unentbehrlich, da die bisher durchgeführten Modellrechnungen gezeigt haben, dass die diesbezüglich getroffenen Annahmen die Sicherheitsaussage maßgeblich beeinflussen. Hierzu zählen neben Untersuchungen zum Sorptionsvermögen der Bentonitbarrriere und zur Radionuklidlöslichkeit, insbesondere die Untersuchung natürlicher (geogene) und technogener Einwirkungen auf die Barrieren Abfallmatrix, Behälter und Bentonitpuffer, die zu einem teilweisen oder vollständigen Versagen der Barrieren führen können. In diesem Zusammenhang ist zu analysieren, wie die technischen Barrieren zweckmäßig ausgelegt werden können, um ihre ungestörte Wirksamkeit zu gewährleisten und welche Grenzen dabei gesetzt sind (s. Tabelle 8-4).

Detaillierter zu bestimmende Standortparameter	Vorschläge zur Ergänzung des Untersuchungsprogramms
Verteilung, räumliche Orientierung und Vernetzung hydraulisch aktiver Störungszonen, Ausgliederung $\pm$ monolithischer Gesteinsblöcke	- seismische Untersuchungen (Kap. 8.2.1, Anlage A3) - komplexe bohrlochgeophysikalische Untersuchungen unter Einbeziehung akustischer Verfahren (Kap. 8.2.2, Anlage A4) - Entnahme orientierter Bohrkerne
Häufigkeit, Öffnungsgrad und mineralogische Ausfüllung von Störungszonen, Ausdehnung alterierter Bereiche im Umfeld von Klüften bzw. Störungszonen	- detaillierte bohrlochgeophysikalische Untersuchungen unter Einbeziehung akustischer Verfahren (Kap. 8.2.2, Anlage A4) - detaillierte strukturgeologische und mineralogische Kernaufnahme - Entnahme orientierter Bohrkerne und Senkung der Kernverluste durch Optimierung der Bohrtechnologie, Verbesserung der Bohrtechnik und strenge vor-Ort-Kontrolle der Bohrarbeiten (Kap. 8.2.2)

Tabelle 8-1: Empfehlungen zur Erweiterung des Kenntnisstandes zum strukturgeologischen Bau des Gesteinsmassivs

Unter Berücksichtigung ihres großen Einflusses auf den Schadstofftransport sind insbesondere die standortbezogenen hydrogeologisch relevanten Informationen zu ungenau. Es gibt z. B. noch zu wenige Ergebnisse von Feldmessungen der Grundwasserströmungsrichtungen und -geschwindigkeiten im geologischen Untergrund. Die bisher in den Modellrechnungen verwendeten Angaben zur Grundwasserneubildung sind nur geschätzt. Nicht ausreichend sind bisher auch die Angaben zur Chemie der im geplanten Einlagerungsniveau vorkommenden Grundwässer, da sowohl die mögliche Freisetzung der Radionuklide aus den technischen Barrieren als auch die Rückhaltung der Schadstoffe in den geotechnischen Barrieren und im Wirtsgestein entscheidend durch die chemische Zusammensetzung der Grundwässer bestimmt werden. Für beide Standorte fehlen ebenfalls Prognosen zu möglichen langzeitlichen Veränderungen der hydrodynamischen und hydrochemischen Verhältnisse im Umfeld des geplanten Endlagers, wie z. B. Untersuchungen zum Einfluss von Alterationsprozessen sowie von Veränderungen der im Gesteinsmassiv wirkenden Spannungsverteilungen auf die hydraulischen Eigenschaften von Störungszonen.

Der Ermittlung der hydraulischen Eigenschaften der Kluftzonen und vor allem der im Umfeld des geplanten Einlagerungsbereiches vorkommenden potenziellen Grundwassermigrationswege, kommt eine Schlüsselrolle bei der weiteren Standortuntersuchung zu (siehe auch Kap. 7). Die in den metamorphen Wirtsgesteinen der Untertageanlagen des BChK ermittelten diesbezüglichen Daten können nicht ohne Vorbehalt auf die Granitoide oder auf metamorphe Gesteine in anderen Untersuchungsgebieten übertragen werden. Dringend erforderlich sind Pumpversuche in durch Packersysteme abgegrenzten, geringmächtigen Intervallen der Erkundungsbohrungen (s. Anlage A4). Dadurch könnten die für die sicherheitsanalytischen Berechnungen dringend erforderlichen hydraulischen Eigenschaften von Störungszonen bzw. Bereichen erhöhter Klüftigkeit sowie der $\pm$ monolithischen Gesteinsmatrix genauer erfasst werden.

Detaillierter zu bestimmende Standortparameter	Vorschläge zur Ergänzung des Untersuchungsprogramms
Vorkommen und räumliche Orientierung von Kluftgrundwasserleitern	siehe Tab. 8.1
Dynamik der Grundwasserbewegungen, Grundwasserströmungsrichtungen, Topographie und Lage des Grundwasserspiegels	- Bestimmung der Grundwasserneubildung - Niederbringen weiterer Erkundungsbohrungen - Regelmäßige Messungen der Grundwasserspiegel in den Erkundungsbohrungen - Pumpversuche und Slug & Bail-Tests - Tracerversuche - Flowmetermessungen - Peclet-Zahl-Analyse (s. Kap. 8.2.3)
Matrix- und Kluftdurchlässigkeiten, Bestimmung der Teufenabhängigkeit der Matrixdurchlässigkeit	- Förder- und Injektionstests zur Untersuchung individueller Kluftzonen - Slug & Bail-Tests - Flowmetermessungen
Physikochemie und Alter der tiefen Grundwässer	- detaillierte geochemische Analyse der Grundwässer - Bestimmung der Tritium- und ^{14}C-Gehalte in Grundwässern

Tabelle 8-2: Empfohlene Erweiterungen des Standortuntersuchungsprogramms zur besseren Charakterisierung der hydrogeologischen Bedingungen im Endlagerumfeld

Die Kenntnisse zu den geologischen Verhältnissen im Untergrund beider Untersuchungsgebiete basieren bisher überwiegend auf den Ergebnissen umfangreicher oberflächengeophysikalischer Untersuchungen. Es gibt noch zu wenige direkte, aus Bohrungen oder Aufschlüssen gewonnene Hinweise zum geologischen Bau der Region (siehe Kap. 2.8.1) und zu den in-situ-Eigenschaften der Wirtsgesteine. Die bisher niedergebrachten Erkundungsbohrungen sind durch z. T. sehr große Kernverluste (teilweise > 50%) charakterisiert. Die in den Bohrungen durchgeführten bohrlochgeophysikalischen und hydrogeologischen Untersuchungen gestatten nur eingeschränkte Aussagen zur Grundwasserführung und zu den hydraulischen Eigenschaften der Wirtsgesteine.

In den bisher erstellten Dokumentationen werden nur selten Aussagen zur wahrscheinlichen langzeitlichen Entwicklung der geologisch-tektonischen, klimatischen, hydrogeologischen und geochemischen Verhältnisse in der Region getroffen. Ergänzungsbedürftig sind z. B. die Darstellungen des bisherigen Kenntnisstandes zur seismischen Gefährdung des Untersuchungsgebietes und zu den möglichen Folgen einer großflächigen Inlandvereisung auf die Endlagerstandorte (siehe Kap. 6). Vor allem struktur- und hydrogeologische Messungen, Bestimmungen von Hebungs- und Absenkungsbeträgen einzelner Krustenblöcke sowie geologisch-geophysikalische Studien müssen für die potenzielle Endlagerregion das Fehlen tieferreichender, tektonisch und hydraulisch aktiver Bruchstrukturen bzw. große Entfernungen zu derartigen Tiefenbrüchen belegen. Zum Nachweis der Langzeitsicherheit des Endlagerstandortes sind ergänzende Daten zu ingenieurseismologischen Standortuntersuchungen und zu den Messungen im Rahmen des Geomonitorings der Untertageanlagen des BChK erforderlich (Tab. 8-3).

Detaillierter zu bestimmende Standortparameter	Vorschläge zur Ergänzung des Untersuchungsprogramms
Seismische Aktivität des Gebietes	- Detaillierte Auswertung bereits vorhandener Daten zu Epizentren, Intensität und Magnitude von im Umfeld des Gebietes stattgefundenen Erdbeben - Langzeitmonitoring durch seismologische Messstationen (KNIGiMS und Untertageanlagen)
Vorkommen und Verteilung von neotektonisch aktiven Störungszonen	- siehe Tab. 8.1 - Geomonitoring regionaler Störungszonen durch GPS-Messungen aus dem Kosmos - Präzise geodätische Messungen an der Erdoberfläche oder in Untertageanlagen des BChK (Auswertung des Geomonitorings diskontinuierlicher Strukturelemente)
Präzisierung der uplift-, Erosions- und Denudationsraten im Gebiet	- siehe oben - Literatúrauswertung
Größe und räumliche Verteilung von Gebirgsspannungen, wahrscheinliche Deformationen und Deformationsraten	- Überbohrversuche - Bohrlochkranzversuche - Modellmäßige Ableitung der Möglichkeit von Kluftbildungen bzw. -veränderungen durch thermisch induzierte Spannungen, geodynamische Prozesse oder Erdbeben-induzierte Scherdeformationen

Tabelle 8-3: Empfehlungen zur Erweiterung der Kenntnisse bezüglich der seismischen und neotektonischen Gefährdung sowie des Spannungszustandes und der uplift-Raten des Untersuchungsgebietes

Nicht ausreichend für langzeitsicherheitliche Bewertungen beider Standorte, aber insbesondere des Gebietes „Jennissejskij“, sind die bisher vorliegenden Kenntnisse zu den petrophysikalischen und Sorptionseigenschaften der im Umfeld des geplanten Endlagers vorkommenden Gesteine, vor allem der Metamorphite. Möglicherweise stehen aus dem Betrieb bzw. der Überwachung der Untertageanlagen des BChK Schelesnogorsk umfangreiche diesbezügliche Daten zur Verfügung, die bisher noch nicht in die Standorterkundungsberichte eingearbeitet wurden.

Vorschläge zur Ergänzung des Programms der weiteren Untersuchungen bezüglich der Wirtsgesteinseigenschaften sowie der Wirksamkeit der technischen und geotechnischen Barrieren sind in Tabelle 8-4 zusammengefasst.

Detaillierter zu bestimmende Standortparameter sowie vertiefende Untersuchungen	Vorschläge zur Ergänzung des Untersuchungsprogramms
relative Freisetzungsmengen aus dem Abfallgebinde und Nahfeld der Abfallbehälter, Behälterstandzeiten	- Auslaugungsversuche zur Präzisierung der Radionuklidfreisetzungsraten aus der Glas- bzw. Mineralmatrix - Vervollständigung der Angaben zum Radionuklidinventar
Rückhalteeigenschaften der technischen Barrieren Abfallmatrix, Behälter und Bentonitpuffer sowie der geologischen Barriere	- Detaillierte Untersuchung der Zusammensetzung und der physikalisch-chemischen (inclusive Sorptionsvermögen) sowie wärmephysikalischen Eigenschaften von Proben potenziell für diese Zwecke nutzbarer Bentonite - Präzisierung der Angaben zur Löslichkeit der Radionuklide im Gleichgewichtsgrundwasser der vorkommenden Lithotypen unter Berücksichtigung der Bentonitbarriere - Präzisierung der Radionuklidverteilungskoeffizienten für die Bentonitbarriere und die Wirtsgesteine (Durchführung von Säulen-, Batch- und Diffusionsversuchen) - Rechnerische Bestimmung der maximal zulässigen Scherverformung eines Behälters durch Erdbebeninduzierte Kluftbewegungen unter Berücksichtigung einer möglichen „Puffer-Wirkung“ der Bentonitummantelung - Abschätzung von Behälter-Korrosionsraten unter den potenziellen Standortbedingungen in Krasnojarsk, Ermittlung der Gasdruckentwicklung basierend auf dem vorgeschlagenen Einlagerungskonzept und Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich der Barrierenintegrität - Detaillierte in-situ Untersuchungen zum Einfluss lokaler Flüssigkeitszutritte aus Klüften auf eine Bentonitummantelung und Bewertung der Ergebnisse im Hinblick auf die Barrierenintegrität
Sorptions Eigenschaften der Wirtsgesteine	- siehe oben - Ergänzung und Präzisierung der Angaben zur Löslichkeit der Radionuklide im Grundwasser und zum Grundwasserchemismus - experimentelle Untersuchungen zum Einfluss von Alterationsprozessen in Gesteinen auf die Radionuklid-sorption und den Transport der Radionuklide - Analyse des Einflusses der Wärmeausbreitung im Endlagerumfeld auf die Sorptionseigenschaften der Gesteine und das Migrationsvermögen der Radionuklide
Natürliches Wärmefeld, Temperaturgradient, thermophysikalische Eigenschaften der Gesteine, einschließlich ihrer Anisotropie	- Kontinuierliche hochauflösende Temperaturmessungen in den Erkundungsbohrungen (bei einer neuen Bohrung zu unterschiedlichen Zeiten) (s. Kap. 8.2.3) - Experimentelle Bestimmung der thermophysikalischen Parameter (Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität) in Abhängigkeit von der Temperatur für alle vorkommenden Lithotypen, insbesondere für die Metamorphite (Einbeziehung von Daten aus den Untertageanlagen)

Tabelle 8-4: Empfehlungen zur Vervollständigung der Daten zu den Wirtsgesteinseigenschaften sowie zur Untersuchung der Wirksamkeit der technischen und geotechnischen Barrieren

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse und Rahmenbedingungen der geologisch-geophysikalischen Erkundungsarbeiten offenbart Fortschritte in der Methodik und Zielgerichtetheit der Standortuntersuchungen im Gebiet „Jennissejskij“ im Vergleich zum „Verchne-

Itatskij“-Gebiet. Hervorzuheben sind z. B. die konsequente schrittweise Reduzierung der detaillierter zu untersuchenden Flächen im Gebiet „Jennissejskij“, sowie eine bessere Koordination, fachliche Betreuung und Kontrolle der Erkundungsarbeiten. Die Einrichtung des „Zentrums für die Entwicklung von Technologien zur unterirdischen Isolierung von radioaktiven Abfällen“ am VNIPI Promtehnologii und die damit verbundene Übertragung der fachlichen und organisatorischen Leitungsfunktionen an diese Einrichtung sowie die schöpferische Übernahme von Erfahrungen aus der Erkundung des Gebietes „Verchne-Itatskij“ haben zu einer besseren Qualität der Erkundungsergebnisse und zu einem effektiveren Mitteleinsatz geführt. Trotz deutlicher Verbesserungen bei der Durchführung der Erkundungsarbeiten werden folgende Maßnahmen zur weiteren Steigerung der Qualität und Effektivität der Arbeiten zur Standortcharakterisierung empfohlen:

- Finanzielle und organisatorische Absicherung einer stärkeren Kontrolle und vor-Ort-Betreuung der Arbeiten der Subauftragnehmer, insbesondere bei der Durchführung der Bohrarbeiten sowie der bohrlochgeophysikalischen und hydrogeologischen Untersuchungen,
- eine strengere Qualitätskontrolle der Ergebnisberichte und Interpretationen der Messergebnisse durch VNIPI Promtehnologii, gegebenenfalls Zurückweisung von Berichten,
- Einführung einer systematischen Archivierung der Originaldaten bzw. Feldunterlagen, wie z. B. der geophysikalischen Messergebnisse oder des Bohrjournals (siehe Kap. 2.8.2), sowie
- Erstellung eines geologischen 3D-Modells auf der Grundlage einer komplexen Auswertung aller geologisch-geophysikalischen Erkundungsdaten.

8.2 Detaillierte Empfehlungen zu ausgewählten Problemen der weiteren Standortuntersuchung

8.2.1 Empfehlungen für die seismische Erkundung

Für die Erkundung eines potentiellen Standortgebietes für ein Endlager radioaktiver Abfälle ist der Einsatz einer Vielzahl unterschiedlicher Methoden international üblich, um aus der Interpretation der Ergebnisse, die mit den unterschiedlichen Methoden gewonnen wurden, eine möglichst gesicherte Vorstellung von der geologischen Struktur des Untersuchungsgebietes zu erhalten. Dazu gehört auch der Einsatz unterschiedlicher geophysikalischer Messverfahren, durch deren Kombination die Zuverlässigkeit der Interpretation der Ergebnisse erhöht werden kann.

Mit seismischen Messungen können vielschichtige, vertikale, strukturelle und stratigraphische Änderungen, ebenso wie ihre räumliche Ausdehnung, erkannt und hervorgehoben werden, während die meisten anderen geophysikalischen Methoden, wie Magnetik und Gravimetrie, lediglich horizontale Änderungen einer Variablen messen. Die Interpretation seismischer Messungen wird allerdings erheblich erschwert, wenn die geologische Struktur und Stratigraphie komplizierter werden. Steil stehende Horizonte, Änderungen der Stratigraphie oder einfach nur homogene Gesteine, die keine Reflexionen hervorrufen, können die Aussagefähigkeit seismischer Messungen stark beeinträchtigen. Zusätzlich können nicht geeignete Oberflächenbedingungen, wie mächtige wassergesättigte Verwitterungsschichten oder Karstbildungen, unüberwindliche Probleme für die Ausbreitung seismischer Kompressionswellen im Untergrund darstellen.

Am vorausgewählten Standort Jennisseiskij werden einige der oben genannten Schwierigkeiten erwartet. Wie aus vorangegangenen geowissenschaftlichen Untersuchungen bekannt ist, sind magmatische Intrusionskörper, Horst- und Grabentektonik, sowie Kluftsysteme und unterschiedliche Sedimentmächtigkeiten auf einem kristallinen Fundament im Untersuchungsgebiet zu erwarten. Steil stehende Schichten, vertikale Störungen und ausgedehnte Kluftsys-

teme werden zur Zerstreuung der seismischen Wellen führen. Weiterhin ist zu erwarten, dass die unterschiedliche Ausprägung der oberflächennahen Schichten zu Problemen mit den statischen Korrekturen führen kann und das unwegsame Gelände die Ausführung der Messungen erschweren wird. Die typischen seismischen Messparameter der Erdöl-Explorationsindustrie aus Sedimentbecken mit annähernd flacher Lagerung der Gesteinsschichten können daher nicht einfach auf dieses Projekt übertragen werden. Außerdem besteht wenig Erfahrung mit seismischen Messungen im Kristallin. Erst in den letzten Jahren hat es erste seismische Projekte im Kristallin gegeben, um Erzvorkommen nachzuweisen oder auch um geeignete Standorte für Endlager zu suchen.

Anlage A3 enthält detaillierte Empfehlungen für die Durchführung seismischer Messungen zur Charakterisierung kristalliner Formationen, wobei nach Möglichkeit bereits bekannte geologische Verhältnisse des Standortes Jennisseiskij genutzt wurden. Diese Empfehlungen beruhen zum einen auf Erfahrungen bei der Durchführung seismischer Erkundungsarbeiten an den Endlagerstandorten Morsleben und Gorleben, zum anderen auf internationalen Erfahrungen bei der Erkundung kristalliner Formationen mit seismischen Methoden. Die wesentlichsten Empfehlungen werden nachfolgend zusammengefasst.

Für den Standort Jennisseiskij wurde der Einsatz sowohl der Refraktionsseismik als auch der Reflexionsseismik betrachtet.

Die Refraktionsseismik kommt in erster Linie für die Erkundung der Verwitterungsschicht in Frage. Hier sind Kurzrefraktionsmessungen (Nahlinien) nützlich, um die statischen Korrekturen zu berechnen, die für das Prozessing reflexionsseismischer Daten und damit für die Qualität der reflexionsseismischen Ergebnisse insgesamt von erheblicher Bedeutung sind.

Die Reflexionsseismik stellt ein wichtiges Werkzeug für die Erstellung von detaillierten unterirdischen geologischen Karten dar, da sie nicht nur die laterale Veränderung eines physikalischen Wertes misst, wie die meisten anderen geophysikalischen Untersuchungsmethoden, sondern die Beobachtung des Verlaufs vieler aufeinander folgender geologischer Schichten ermöglicht. Günstige geologische Verhältnisse am Standort vorausgesetzt, können nach Datenverarbeitung und Interpretation der gewonnenen Daten Schichtgrenzen und Störflächen im Untergrund in ihrem korrekten räumlichen Verlauf angegeben werden.

Wichtige Voraussetzungen für die Planung der seismischen Messungen sind:

- Vorhandensein von topographischen Kartenmaterial im Maßstab 1:10000 oder 1:5000,
- Festlegen der topographischen Festpunkte,
- Vermessen der topographischen Festpunkte mit definierter Messgenauigkeit.
- Einarbeiten aller vorausgegangenen geophysikalischen Messarbeiten, wie Bohrlochmessungen in Tiefbohrungen, Seismik, angewandte Geophysik,
- Identifizieren und Festlegen der zu erkundenden Ziele,
- Festlegen der seismischen Profilverläufe und Tiefbohrungslokation.

Besonders zu betonen ist die Bedeutung der Genauigkeit der topographischen Vermessungsarbeiten, da diese für die Bearbeitung der reflexionsseismischen Daten von entscheidender Bedeutung ist. Darüber hinaus müssen die mit der Seismik georteten Schichtgrenzen koordinatentreu in das endgültige 3-D-Modell eingearbeitet werden können.

Von wesentlicher Bedeutung ist die Gewährleistung einer permanenten Qualitätskontrolle. Tägliche Testarbeiten sind unabdingbar und Industriestandard. Die Qualität des Messequipments muss laufend nachgewiesen werden und untermauert die Glaubwürdigkeit der Messergebnisse. Weiterhin müssen alle Feldparameter dokumentiert und später den seismischen Daten zugeordnet werden. Es ist notwendig die Rohdaten im Feldbüro oder Messwagen nach Durchführung einer vorläufigen Datenbearbeitung zu begutachten. Somit können die Daten

täglich kontrolliert werden. Änderungen der Datenqualität können dadurch schnell erkannt und durch Parameteränderungen sofort im Feld korrigiert werden, um die Vermessung sinnlose Profilkilometer mit schlechter Datenqualität zu verhindern. Bei der zu erwartenden komplexen Geologie ist die Datenverarbeitung äußerst sorgfältig durchzuführen. Die Reihenfolge der Prozessing-Stufen kann entscheidende Auswirkungen auf das Endergebnis haben und muss den Daten individuell angepasst werden. Zur Qualitätssicherung gehört auch die Gewährleistung der Arbeitssicherheit.

Im Allgemeinen sind bei seismischen Messungen im Kristallin, bedingt unter anderem durch das schwache Signal/Rausch-Verhältnis und den komplizierten Reflektorenverlauf, Schwierigkeiten zu erwarten. Für ein bestmöglichstes Ergebnis müssen alle Messparameter optimiert werden. Eine wesentliche Empfehlung ist daher, vor Beginn weiterer Profilmessungen intensive Testarbeiten zur Optimierung der seismischen Feldparameter, wie z. B. Abstand der seismischen Anregungspunkte und der seismischen Empfänger, Art und Stärke der seismischen Anregung, Länge der Empfängerauslage usw. durchzuführen. Diese Arbeiten sollten an einem bekannten Zielobjekt, z.B. Klüftflächen oder Schichtgrenzen mit bekanntem Verlauf im Untergrund durchgeführt werden. Ein großer Vorteil wäre die unmittelbare Nähe zu einer geologisch erkundeten Bohrung zur Korrelation der Ergebnisse. Besonders zu empfehlen wäre in diesem Zusammenhang auch die Aufnahme einer VSP-Messung (Vertikales seismisches Profil) in einem Bohrloch, um die Möglichkeiten zur Erfassung steilstehender Klüfte oder Störungszonen mit diesem Verfahren zu überprüfen.

8.2.2 Empfehlungen für das Niederbringen einer Tiefbohrung sowie zur Anwendung bohrlochgeophysikalischer Untersuchungen zwecks Erkundung der petrophysikalischen Eigenschaften und der Klüftigkeit der Endlager-Wirtsgesteine

8.2.2.1 Empfehlungen für das Niederbringen einer Tiefbohrung

Für die Präzisierung und Vervollständigung der für die Bewertung des Standortes Jennissejskij notwendigen Daten (s. Tabelle 8-1 und Tabelle 8-2) sind weitere Erkundungsbohrungen am Standort erforderlich.

Für das Gebiet Jennissejskij werden zwei Varianten einer Bohrung vorgeschlagen (siehe Anlage A4), deren Enddurchmesser und somit auch die Bohrlochgeometrien in erster Linie vom Umfang der vorgesehenen hydraulischen Tests bestimmt werden:

- Bohrung, die aufgrund ihrer Dimensionen umfangreiche hydraulische Tests und Grundwasserprobenahmen aus definierten Abschnitten auch in größeren Teufen ermöglicht,
- Bohrung ohne hydraulische Tests im tieferen Bohrlochabschnitt.

In Bezug auf die Möglichkeiten hinsichtlich der bohrlochgeophysikalischen Untersuchungen gibt es keine Unterschiede zwischen beiden Varianten.

Um Laboruntersuchungen an weitgehend ungestörtem Gesteinsmaterial zu ermöglichen, ist die Bohrung als durchgehende Kernbohrung vorgesehen, wobei zur Vermeidung eines Gesteinsausbaus beim Ziehen des Kernes das Seilkernbohrverfahren unter Verwendung eines Doppelkernrohrs vorgeschlagen wird.

Während des Abteufens der Bohrung wird Spülung verwendet, die in vorhandene Kluft- und Porenräume eindringt und sich mit dem Grundwasser vermischt. Um bei der Probennahme entscheiden zu können, ob das gewonnene Grundwasser von Spülung beeinflusst ist, wird angeregt, diese mit einem Tracer (z.B. Uranin) zu versetzen und so lange zu pumpen, bis der Tracergehalt eine vorher festgelegte Konzentration unterschreitet.

In der Anlage A4 werden ausführliche Empfehlungen bezüglich des Abteufens einer Tiefbohrung gegeben.

8.2.2.2 Empfehlungen zur Durchführung bohrlochgeophysikalischer und hydraulischer Untersuchungen

In Kap 8.1 wurde eine Reihe von Empfehlungen zur Durchführung bohrlochphysikalischer Messungen gegeben. Tabelle 8-5 zeigt eine Übersicht über zu den in Bohrungen einsetzbaren geophysikalischen Methoden für den Nachweis und die Charakterisierung von Klüften bzw. Störungszonen. Ergänzend dazu werden in Anlage A4 Verfahren vorgestellt, die es erlauben, Aussagen zu erhalten

- zum Bohrl Lochdurchmesser und zur räumlichen Lage der Bohrung (Neigung, Azimut),
- zum lithologischen und strukturgeologischen Gebirgsaufbau,
- zu den petrophysikalischen Parametern,
- zur Interpretation seismischer Untersuchungen und
- zum Zustand der Verrohrungen und der eingesetzten Spülung.

Geophysikalisches Verfahren	Art der Hinweise auf Klüfte
geoelektrischer Widerstandslog (Mehrpunktanordnung oder fokussierend)	erkennt offene Klüfte und Ton in Klüften sowie Bohrlochvergrößerungen
Dichte-Log	erkennt offene Klüfte und Ton in Klüften sowie Bohrlochvergrößerungen
Gamma-Ray-Log	Nachweis von Tonmineralen und radioaktiven Mineralen in Klüften
Kaliber-Log	Nachweis von Bohrlochausbrüchen
Neutron-Log	erkennt Tonminerale (mit Wassermolekülen) und Porosität bzw. Wasserführung
Temperatur-Log	Registrierung von Temperaturänderungen in Spülflüssigkeit infolge von Wasserzufluss aus Klüften (Nachweis Zuflusshorizonte)
Leitfähigkeits-Log	Salinitätsänderungen in Spülflüssigkeit infolge von Wasserzufluss aus Klüften
Flowmeter-Log	Nachweis von Kluftströmung infolge von Wasserzutritten bzw. -abflüssen
Akustik-Log	erkennt Porosität und Klüftigkeit durch Änderung der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit
Borehole-Televue (akustisches Bohrlochfernsehen)	erkennt Klüfte, Aussagen zu Kluftöffnungsweiten, Kluftdichte und Kluftorientierung

Tabelle 8-5: Übersicht zu den in Bohrungen einsetzbaren geophysikalischen Methoden für den Nachweis und die Charakterisierung von Klüften bzw. Störungszonen

Unter Berücksichtigung der in Tabelle 8-5 aufgeführten prinzipiellen Möglichkeiten des Kluftnachweises mittels Bohrlochgeophysik und der im Geozentrum Hannover vorhandenen Messapparaturen wird, soweit dies organisatorisch, finanziell und messtechnisch möglich ist, eine Ergänzung der bisher durchgeführten Bohrlochmessungen für die bereits niedergebrachten Erkundungsbohrungen und für neu abzuteufende Bohrungen vorgeschlagen (Tabelle 8-6 und Anlage A4).

Die im unteren Teil der Tabelle 8-6 aufgeführte Methode des vertikalen seismischen Profilierens (VSP) dient zur Zwischenfelderkundung und zur besseren Auswertung der seismischen Profilmessungen an der Erdoberfläche (siehe Anlagen A3 und A4). Alle in Tabelle 8-6 aufgelisteten Methoden stehen unter der Voraussetzung der Durchführung der Messungen durch Spezialisten des Geozentrums Hannover für entsprechende Untersuchungen am Standort Krasnojarsk zur Verfügung.

Die Abb. 8-1 und 8-2 vermitteln beispielhaft einen Eindruck vom Aufbau und von den Ausmaßen der für die Standorterkundungsarbeiten nutzbaren Messsonden des Geozentrums Hannover. Abb. 8-3 steht beispielhaft für die Möglichkeiten, mittels akustischer Bohrlochmessungen detaillierte Informationen zur Klüftigkeit, insbesondere zur Kluftmächtigkeit und zur Kluftorientierung zu erhalten.

Methode	Ziel der Anwendung / mögliche Schlussfolgerungen aus den Messungen	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)
Messung der Temperatur und Salinität der Bohrspülung (TSAL+FLOW)	Ausgliederung von Zonen erhöhter Klüftigkeit bzw. von Störungszonen	50	70
Fokussierte Geoelektrik (FEL)	Abgrenzung unterschiedlicher Lithotypen, Nachweis von Zonen erhöhter Klüftigkeit	35	55
Akustische Bohrlochmessungen (SONIC)	Vorkommen von Klüften, Störungszonen und lithologischen Kontakten	42 (75)	80
Borehole Televiewer – BHTV	Vorkommen und räumliche Orientierung von Klüften, Störungszonen und lithologischen Kontakten	58	70
Spektrale Gamma-Messungen (SGR)	Messung der Gamma-Radioaktivität von ⁴⁰ K, ²³⁸ U и ²³² Th, Nachweis von Alterationszonen (Tonminerale), Trennung saurer und basischer Gesteine	52	70
Neutron-Neutron-Methode (N-N)	Nachweis von wasserführenden Zonen und von Bereichen erhöhter Tonmineralgehalte	43	70
Vertikale seismische Profilierung (VSP)	Nachweis von lithologischen Kontakten und von Störungszonen	50	75
Induzierte Polarisation (IP)	Nachweis von verheilten, mineralisierten Klüften (z. B.: Auftreten von Sulfiden)	48	60

d₁ – Durchmesser der Messsonde, d₂ – erforderlicher Durchmesser der Bohrung

Tabelle 8-6: Vorschläge zur Ergänzung des Bohrlochgeophysik-Messprogramms für den Nachweis von Störungszonen

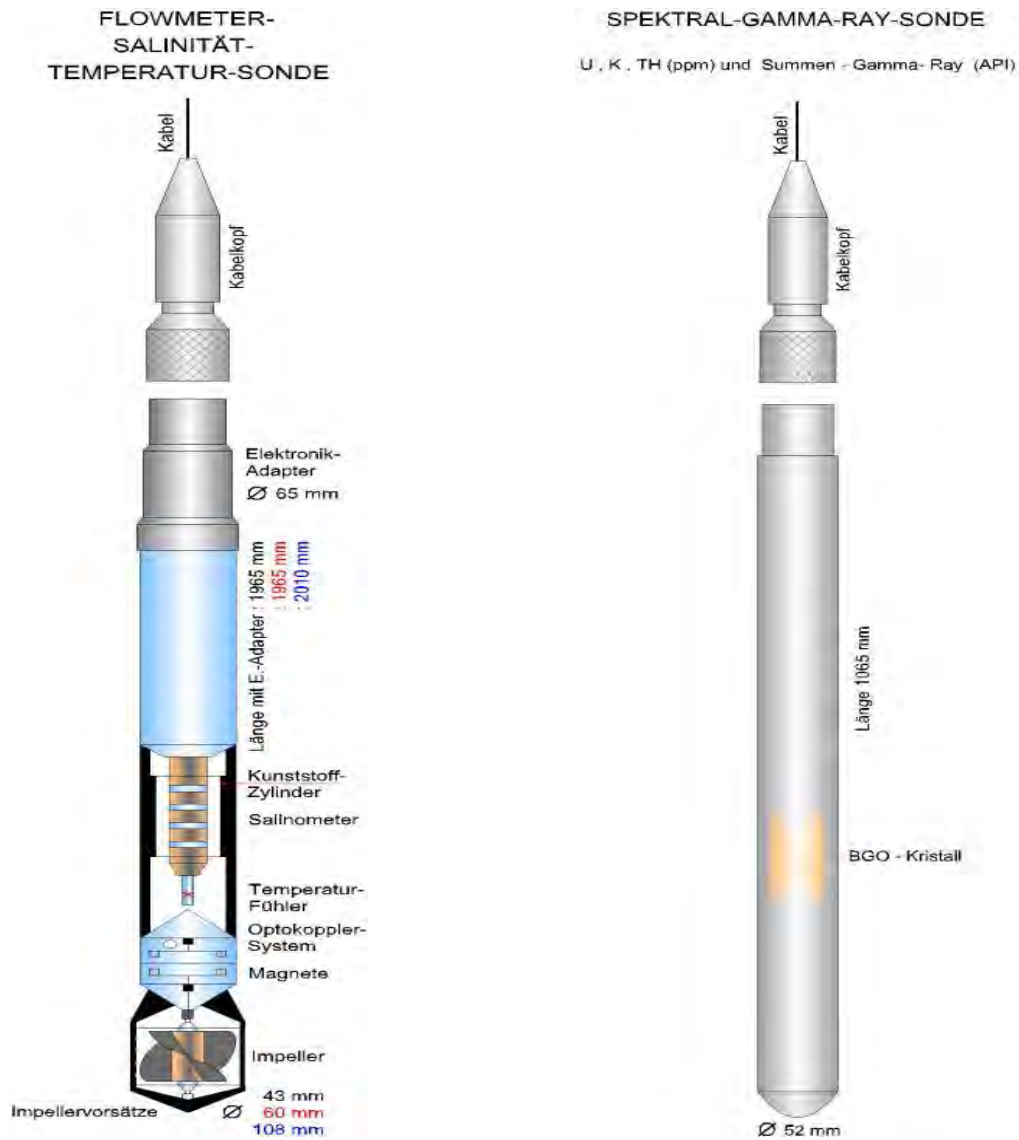


Abbildung 8-1: Prinzipieller Aufbau und Ausmaße des für die Standortuntersuchungen nutzbaren Flowmeters (inclusive Temperatur- und Salinitätsmessungen, links) und der Spektralen Gamma-Messsonde (rechts)

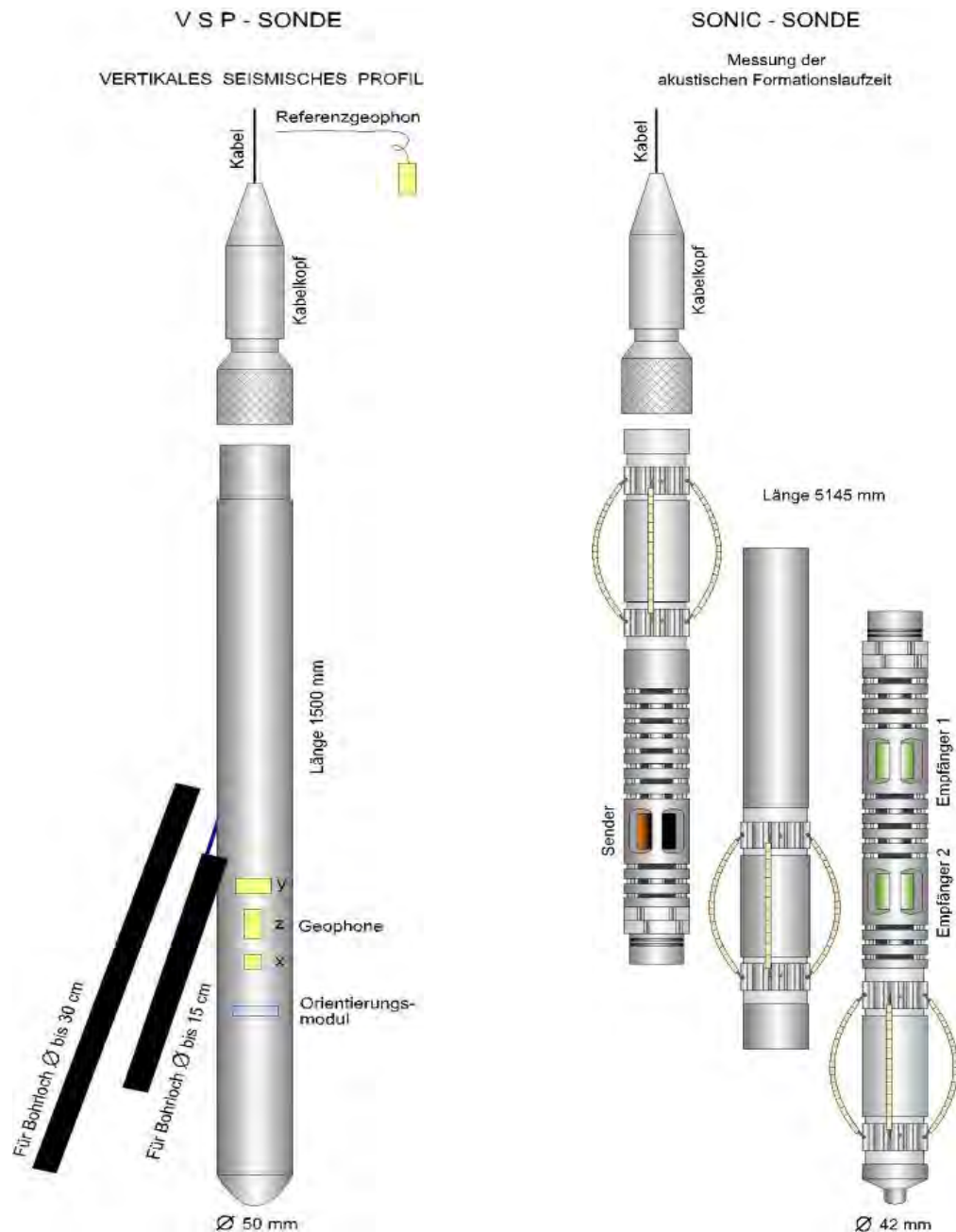


Abbildung 8-2: Aufbau und Ausmaße der Messsonden für das vertikale seismische Profilieren (VSP, links) und die akustischen Bohrlochmessungen (SONIC, rechts)

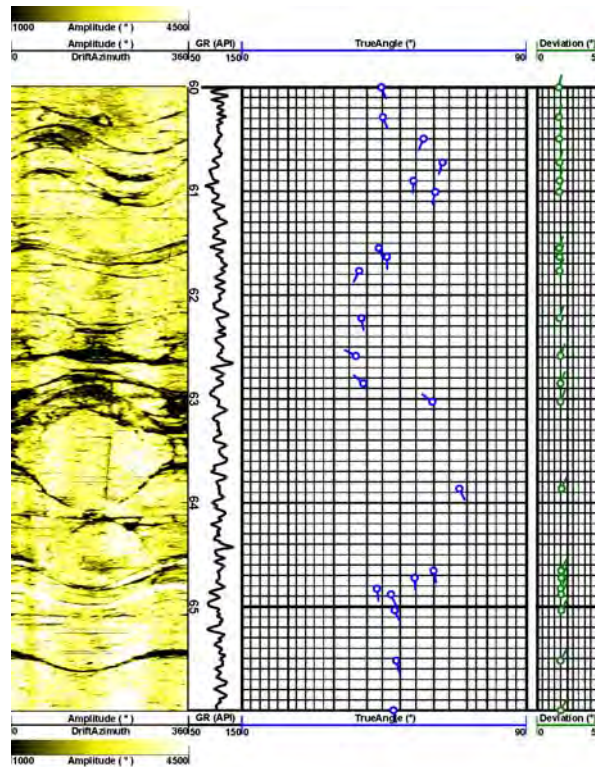


Abbildung 8-3: Beispiel für die mittels Akustischem Bohrlochfernsehen gewinnbaren Informationen zur Kluftausbildung und -orientierung in magmatischen Wirtsgesteinen

Für die Bestimmung der hydrogeologischen Verhältnisse wurden in den letzten Jahren Verfahren entwickelt, die es erlauben, mehrere eng begrenzte Bereiche eines Bohrlochabschnitts ohne zwischendurch erforderlichen Ausbau des Teststranges zu untersuchen. Bestimmt werden hierbei der Druck und die Temperatur des Grundwassers, die Gesteinsmatrix- bzw. Kluftpermeabilität des Gebirges sowie die Zulaufmengen und ggf. das Injektionsverhalten des Gebirges. Anlage A4 stellt dazu entsprechende Verfahren vor, die auch die Entnahme von Grundwasserproben aus definierten Teufenbereichen ermöglichen.

8.2.3 Empfehlungen zur Untersuchung der thermophysikalischen Eigenschaften der Gesteine

8.2.3.1 Grundlagen

Für eine endgültige Auslegung des Endlagers unter den gegebenen Standortbedingungen ist die Kenntnis der thermophysikalischen Gesteinsparameter erforderlich. Auslegungsrelevant in diesem Zusammenhang sind die Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmekapazität und die Dichte (Abb.8-4).

3D instationäre Wärmetransportgleichung

$$\frac{\partial(\rho c)_e T}{\partial t} = \underbrace{\nabla \cdot \lambda_e \nabla T}_{\text{konduktiver Transport}} - \underbrace{v(\rho c)_f \nabla T}_{\text{advektiver Transport}} + \underbrace{H}_{\text{Wärme-produktion}}$$

Auslegungs-relevant

T = Temperatur / K
 ρ = Dichte / kg m^{-3}
 c = spezifische Wärmekapazität / $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
 λ = Wärmeleitfähigkeit / $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
 v = Filtergeschwindigkeit / m s^{-1}
 H = Wärmeproduktionsrate / $\mu\text{W m}^{-3}$
 ∇ = Nabla Operator ($\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z$)
 Indices:
 f = bezogen auf Fluid
 e = bezogen auf effektives Matrix-Fluid System

Abbildung 8-4: Wärmetransportgleichung und auslegungsrelevante Größen

Grundlage für thermische Auslegungsberechnungen ist die in Abbildung 8-4 dargestellte dreidimensionale Wärmetransportgleichung, die sich prinzipiell in drei Faktoren aufteilen lässt: den konduktiven Wärmetransport, den advektiven Wärmetransport und die radiogene Wärmeproduktion. Letztere ist in ihrer Wärmeleistung derart gering, dass sie für die thermische Auslegung keine Rolle spielt. Der advektive Wärmetransport innerhalb des gering permeablen kristallinen Wirtsgesteins ist für die thermische Auslegung nur dann von Bedeutung, wenn signifikante Fluidbewegungen in nahegelegenen Kluftstrukturen vorhanden sind. Eine sorgfältige Analyse der Temperaturinformationen erlaubt allerdings, z.B. durch eine Peclet-Zahl-Analyse, Rückschlüsse auf regionale Fluidbewegungen, die für eine Betrachtung der langfristigen Sicherheit eines Endlagers von Bedeutung sein können.

Der konduktive Wärmetransport ist der bedeutendste Faktor im Rahmen der thermischen Auslegung. Die in Abbildung 8-4 aufgezeigten Parameter spielen daher die entscheidende Rolle für die Temperaturentwicklung innerhalb der technischen Barriere und des Wirtsgesteins so dass ihre genaue Kenntnis von großer Bedeutung ist.

Die aufgezeigten Parameter sind abhängig von Temperatur, Druck, Mineralzusammensetzung, Porosität und Porenfüllung. Die Größe, die durch die Einbringung der wärmeentwickelnden Abfälle signifikant verändert wird, ist die Temperatur. Aus diesem Grund sollen die thermophysikalischen Gesteinsparameter in Abhängigkeit von der signifikant veränderlichen Größe Temperatur im Rahmen von Laborversuchen ermittelt werden. Die gemessenen Abhängigkeiten sollen mathematisch beschrieben und in geeignete Computerprogramme zur Simulation der Temperaturentwicklung implementiert werden.

8.2.3.1 Empfehlungen für ein Messprogramm

Voraussetzung für die Laborversuche ist, dass aus jeder lithologischen Einheit, die im Rahmen der geologischen Bohrkernaufnahme angetroffen wird, Bohrkernmaterial für die Untersuchungen bereitgestellt wird. Die Bohrkernstücke sollten so dimensioniert sein, dass aus ihnen mindestens 3 bis 6 Proben zur Vermessung hergestellt werden können. Diese Anzahl von Proben ist mindestens nötig, um Streuungen der Messwerte, die sich durch unterschiedliche Mineralgröße, Mineralzusammensetzung und Porosität ergeben, erfassen zu können. Damit

lassen sich dann repräsentative Mittelwerte für die unterschiedlichen lithologischen Einheiten angeben.

An den einzelnen Proben sollten folgende Messungen durchgeführt werden:

1. Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Temperatur (und Druck)	$\lambda = f(T, p)$
2. Temperaturleitfähigkeit als Funktion der Temperatur (und Druck)	$\kappa = f(T, p)$
3. Spezifische Wärmekapazität als Funktion der Temperatur	$c_p = f(T)$

Die Proben haben durch die Entnahme aus dem natürlichen Gebirgsverbund eine Druckentlastung erfahren, die eine Öffnung von Mikrorissen zur Folge haben kann. Insbesondere die Messung der Wärmeleitfähigkeit ist dadurch deutlich beeinflusst. Aus diesem Grund sollten die Messungen in einer geeigneten Druckpresse durchgeführt werden, die in der Lage ist, den natürlichen Gebirgsdruck zu erzeugen, um sicher zu stellen, dass die Messwerte unter annähernd realen Druckbedingungen bestimmt werden.

Um Anisotropie-Effekte zu erfassen und zu quantifizieren, sollen speziell für die Messungen der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit aus jeder lithologischen Einheit mindestens eine Probe senkrecht und parallel zur Bohrachse vermessen werden.

Darüber hinaus sollten die Messungen an den einzelnen Proben sowohl im wassergesättigten als auch im trockenen Zustand durchgeführt werden, um den Einfluss der Porosität bzw. der Porenfüllung zu quantifizieren.

Auf eine Messung der Dichte der Proben kann ggf. bei Kenntnis der Temperaturleitfähigkeit verzichtet werden, da sich die Größen mit Gleichung (1) ineinander überführen lassen.

$$\kappa = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (1)$$

mit:

κ	=	Temperaturleitfähigkeit / $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
λ	=	Wärmeleitfähigkeit / $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
ρ	=	Dichte / kg m^{-3}
c	=	Spezifische Wärmekapazität / $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

Bei Kenntnis der eben genannten thermischen Parameter als Funktion der Tiefe kann in Verbindung mit einem Temperaturlog (vgl. Kap. 8.2.2 - Empfehlung für ein Untersuchungsprogramm einer Tiefbohrung -) eine vergleichsweise einfache Quantifizierung vertikaler Wasserbewegungen mittels einer Peclet-Zahl-Analyse durchgeführt werden.

Die Peclet-Zahl-Analyse (Abb. 8-5) ist ein Verfahren, das die Möglichkeit bietet, Temperaturlogs aus Bohrungen nach Hinweisen für einen vertikalen advektiven Wärmetransport und damit nach regionalen vertikalen Wasserbewegungen zu untersuchen. Bei der Peclet-Zahl handelt es sich um eine dimensionslose Zahl, die das Verhältnis zwischen dem Wärmetransport durch Advektion und durch Konduktion angibt. Sie kann mit folgendem vereinfachten Ansatz abgeschätzt werden:

$$\ln(q) = \ln(q_0) + z \text{ Pe}/L \quad (2)$$

mit q_0 als Wärmestromdichte bei z_0 .

Eine lineare Regression von $\ln(q) = az + b$ ergibt die Steigung der Regressionsgeraden Pe/L und den Achsenabschnitt $\ln(q_0)$. $q(z)$ kann numerisch durch Auswertung von $q(z) = -\lambda \, dT/dz$ bestimmt werden.

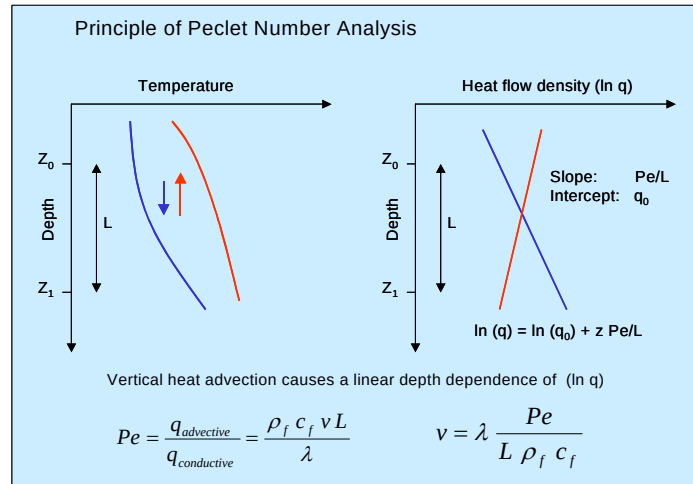


Abbildung 8-5: Prinzip einer Peclet-Zahl-Analyse

In Abbildung 8-6 wird beispielhaft die Bestimmung vertikaler Strömungsbewegungen mittels Peclet-Zahl-Analyse gezeigt. Nebeneinander dargestellt sind das Temperaturprofil, die Wärmeleitfähigkeiten und der natürliche Logarithmus der Wärmestromdicht, wobei letztere mit einer vereinfachten Lithologie hinterlegt ist. Die roten Linien zeigen abschnittsweise lineare Anpassungen, aus deren Steigung die Peclet-Zahl gewonnen wird. Die daraus gefolgerte Fließrichtung, die sich aus dem Vorzeichen der Steigung ergibt, ist dabei mit Pfeilen markiert.

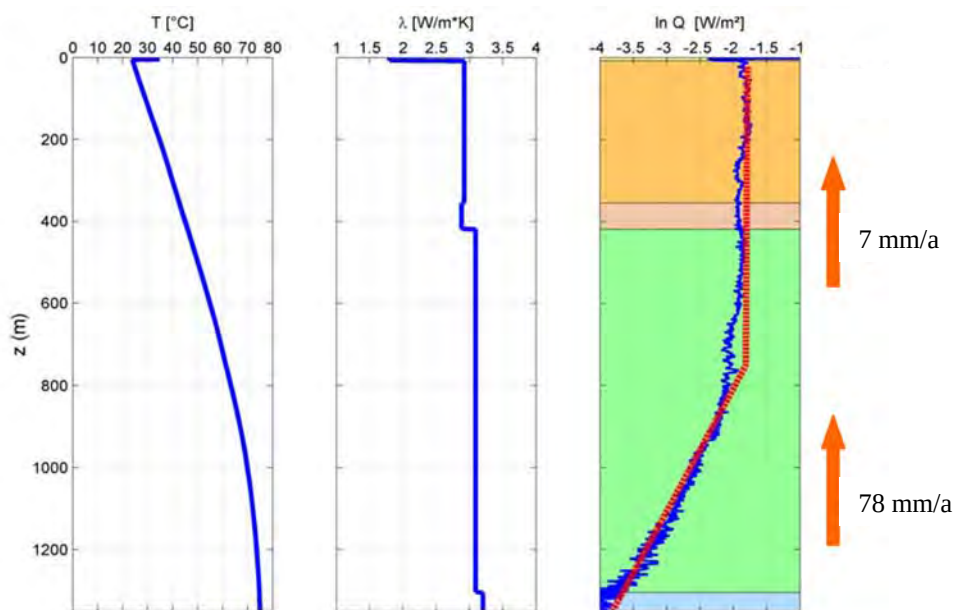


Abbildung 8-6: Bestimmung vertikaler Strömungsbewegungen mittels Peclet-Zahl-Analyse am Beispiel einer Bohrung in Deutschland [Clauser et al. 2002]

Voraussetzung ist, dass die Temperaturmessung die natürliche Gebirgstemperatur widerspiegelt, dass es sich also um ein ungestörtes Temperaturlog handelt und dass die thermophysikalischen Parameter des umgebenden Gesteins, z. B. aus Messungen an Bohrkernen, bekannt sind.

9 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

Ziel des vorliegenden deutsch-russischen Gemeinschaftsvorhabens „Anforderungen an die Standorterkundung für HAW-Endlager im Hartgestein“ war es, einen methodischen Ansatz zu entwickeln und schrittweise umzusetzen, der zu einem fundierten, auf die Belange der Endlagersicherheit ausgerichteten Standorterkundungs- und –auswahlprogramm führt. Die Bearbeitung erfolgte zunächst am Beispiel von zwei russischen Standortexplorationsprogrammen für HAW-Endlager in magmatischen Wirtsgesteinen:

- Standortsuche für ein Endlager im Nishnekansker Granitoidmassiv für hochradioaktive Abfälle der stillgelegten Waffenplutoniumproduktion und der geplanten Kernbrennstoffwiederaufarbeitung des Bergbau-Chemischen Kombinats Shelesnogorsk
- Standorterkundung für die Endlagerung von Wiederaufarbeitungsabfällen im Porphyritgestein am Standort der Wiederaufarbeitungsanlage Majak

Nach einer detaillierten Analyse der Problemstellungen zu beiden Endlagerprojekten vereinbarten die beteiligten Projektpartner, sich auf das Beispiel Endlager im Nishnekansker Granitoidmassiv zu konzentrieren, da einerseits zwischen beiden Konzepten eine Vielzahl von Parallelen bestehen und andererseits unter Berücksichtigung anderer Prioritäten am Standort Majak von russischer Seite gegenwärtig keine Erkundungsarbeiten erfolgen bzw. in naher Zukunft geplant sind.

Die Besonderheit des im vorliegenden Gemeinschaftsvorhaben verfolgten methodischen Ansatzes besteht darin, dass in einer vergleichsweise frühen Phase der Standortcharakterisierung und –bewertung begonnen wurde, auf der Grundlage der verfügbaren, teilweise noch stark eingeschränkten Datenbasis die drei maßgeblichen sicherheitsanalytischen Komponenten

- Geologisches Standortmodell zur Widerspiegelung des struktur- und hydrogeologischen Aufbaus des potenziellen Endlagerstandortes, einschließlich der geowissenschaftlichen Langzeitprognose,
- Technisches Endlagerkonzept, bestehend aus dem Einlagerungskonzept für die verschiedenen Abfallarten und der Auslegung der technischen und geotechnischen Barrieren
- Sicherheitsanalytisches Modell, bestehend aus den Modellen für die Grundwasserströmung, Radionuklidfreisetzung und -transport sowie für die resultierende Strahlenexposition

zu entwickeln und zusammenzuführen, um später eine Sicherheits- und Eignungsbewertung für den Standort unter Nutzung ergänzender Daten vornehmen zu können.

Wegen der noch eingeschränkten verfügbaren Datenbasis war es erforderlich, teilweise mit plausiblen Annahmen und generischen Modellen zu arbeiten. Trotzdem konnten auf diese Weise hinreichend konkret die Informationen bestimmt werden, die bei der Fortführung der Standortuntersuchungen vorrangig zu erheben und abzuleiten sind.

Grundsätzlich hat sich der gewählte methodische Ansatz der frühzeitigen gemeinsamen Analyse bzw. Betrachtung der drei Hauptkomponenten

- geologische Modellbildung,
- technisches Endlagerkonzept und
- sicherheitsanalytisches Modell

bewährt und sich als zielführend für die fundierte Ableitung von Empfehlungen für die weiterführende Erkundung und spätere Standortauswahl erwiesen.

Obwohl die vorliegenden Arbeiten sich auf Endlagerstandorte in magmatischen Wirtsgesteinen beziehen, ist unstrittig, dass die praktizierte Vorgehensweise auch für Endlagerprojekte in anderen Wirtsgesteinen, wie z. B. Ton und Salz, nicht nur anwendbar, sondern alternativlos ist, um sicherzustellen, dass die Standorterkundung frühzeitig auf die Belange der Endlagersicherheit und somit auf die Durchführung eines Standorteignungsnachweises ausgerichtet wird.

Darüber hinaus lieferte das Vorhaben die Möglichkeit, die Wissensbasis zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in magmatischen Wirtsgesteinen anhand konkreter Endlagerprojekte und Standorterkundungsvorhaben zielgerichtet weiterzuentwickeln.

Im Zuge der Erarbeitung geologischer Standortmodell mittels „open-GO5“ konnten erste anschauliche Beispiele digitalisierter 3D-Modelle für einen potenziellen Endlagerstandort in magmatischen Wirtsgesteinen erstellt werden. Ungeachtet noch bestehender Datendefizite und –unsicherheiten lässt die ganzheitliche und komplexe Analyse aller vorhandenen geologisch-geophysikalischen Erkundungsergebnisse erste Schlussfolgerungen zu folgenden Problemstellungen zu:

- räumliche Verteilung $\pm$ monolithischer Gesteinspartien sowie von Bereichen erhöhter Klüftigkeit und von Störungszonen,
- Teufe und Relief des Daches schwach durchlässiger Granitoidblöcke
- Homogenität und Klüftungsgrad der Gesteine
- Räumliche Verschneidung von Bereichen erhöhter Klüftigkeit bzw. hoher elektrischer Leitfähigkeit und
- Verteilung von Lockersedimenten mit geringen elektrischen Widerständen

Auf der Grundlage der 3D-Modellierungen ist eine Bewertung des Eignungsgrades unterschiedlicher geologisch-geophysikalischer Erkundungsmethoden zur Rekonstruktion des struktur- und hydrogeologischen Aufbaus des Endlagerstandortes möglich. Weiterhin bilden die geologischen 3D-Modelle die Basis für exakte langzeitsicherheitsanalytische Bewertungen des Standortes und hydrogeologische Modellrechnungen sowie, in Kombination mit Angaben zur Spannungsverteilung im Gesteinsmassiv, für geomechanische Berechnungen der Standsicherheit der notwendigen Untertageanlagen.

Im Rahmen der Erarbeitung von Empfehlungen für die systematische Verbesserung der standortbezogenen Datenbasis und im Ergebnis einer kritischen Analyse der verfügbaren Erkundungsergebnisse wurden methodische Anleitungen für die Optimierung seismischer Erkundungsverfahren insbesondere zum Nachweis und zur Charakterisierung von Kluftsystemen sowie für das Niederbringen von Tiefbohrungen und deren hydrologische und geophysikalische Untersuchung erstellt.

Im Zuge der Erarbeitung des technischen Endlagerkonzeptes wurden Einlagerungskonzepte für die verschiedenen Abfallfraktionen im magmatischen Wirtsgestein erarbeitet und entsprechende thermische Auslegungsrechnungen durchgeführt. Hervorzuheben ist dabei der Vorschlag einer Konzeptmodifikation, die den Einsatz einer thermischen Isolationsschicht zwischen Abfallbehälter und Bentonitbuffer vorsieht, um stark wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle zu einem möglichst frühen Zeitpunkt ohne Verletzung von bestehenden Temperaturgrenzwerten (z. B. $<100^{\circ}\text{C}$ im Bentonit) einlagern zu können. Dieser Lösungsansatz kann auch für andere Wirtsgesteine mit erheblichen thermi-

schen Restriktionen, wie z. B. Ton, von großem Interesse sein. Im Rahmen systematischer Variationsuntersuchungen sämtlicher in Frage kommender Einflussparameter konnte ferner gezeigt werden, dass die gezielte Auswahl der thermischen Eigenschaften (spezifischer Widerstand und Kapazität) einer solchen Isolationsschicht es gestatten, den Abstand zwischen den Einlagerungsbohrlöchern und die erforderliche Abklingzeit erheblich zu minimieren, ohne bestehende Temperaturbeschränkungen für den Bentonitbuffer, das Wirtsgestein und die Abfallmatrix zu verletzen. Ferner wurde gezeigt, dass die thermischen Parameter magmatischer Wirtsgesteine großen Einfluss auf die Größe des erforderlichen Einlagerungsfeldes haben. Die Variationen betragen bis zu 200 %.

Im Zuge der Arbeiten zum sicherheitsanalytischen Modell wurde ein durchgängiges System leistungsfähiger Simulationsprogramme mit den Komponenten

- FEFLOW – Strömungs- und Transportmodellierung
- EMOS, bestehend aus den Komponenten
 - GRAPOS – Nahfeldmodellierung
 - CHETMAD – Fernfeldmodellierung
 - EXMAS – Biosphärenmodell

implementiert und seine Anwendbarkeit für Endlager in magmatischen Wirtsgesteinen nachgewiesen.

In Anbetracht der zur Verfügung stehenden eingeschränkten Datenbasis war es teilweise erforderlich, den Modellen generische Daten zugrunde zu legen. Dies betrifft insbesondere die umfangreichen Sensitivitätsuntersuchungen hinsichtlich der hydraulischen Parameter des Wirtsgesteins und der Kluftsysteme. Ungeachtet dessen war es möglich, eine Reihe grundlegender Schlussfolgerungen abzuleiten:

Mit zunehmendem Unterschied zwischen Matrix- und Kluftdurchlässigkeit gewinnt der Schadstofftransport in den Klüften an Bedeutung, der in starkem Maße von Kluftart, -orientierung und -durchlässigkeit abhängt.

In Einzelklüften können gegenüber Bereichen mit hoher Kluftdichte besonders hohe Transportgeschwindigkeiten erreicht werden, ebenso in Klüften mit hohem Potenzialgradienten.

Die Matrixdiffusion korreliert indirekt mit der Transportgeschwindigkeit,

Die durch die Zerfallswärme endgelagerter Abfälle thermisch induzierten Dichteströmungen können den Schadstofftransport nachhaltig beeinflussen. Kluftsysteme mit deutlich höheren Durchlässigkeiten als die Gesteinsmatrix können wiederum zur Herausbildung deutlicher Inhomogenitäten im Wärmefeld führen.

Die durchgeführten orientierenden Berechnungen zur prognostizierten Strahlenexposition der hypothetischen kritischen Gruppe haben in keinem Fall zu Ergebnissen geführt, die über den deutschen bzw. russischen Grenzwerten liegen. Die grundsätzliche Realisierbarkeit eines Endlagers in der betrachteten Standortregion wird somit unter den getroffenen Annahmen nicht in Frage gestellt.

Die Zusammenarbeit deutscher und russischer Wissenschaftler im Rahmen des vorliegenden Gemeinschaftsvorhabens hat zur Entwicklung eines theoretisch fundierten methodischen Ansatzes für die Steuerung eines Standorterkundungsprogramms und für die spätere Standortauswahl geführt, der auf die Bewertung der Endlagersicherheit ausge-

richtet ist und mit dem erste konkrete Erfahrungen bei der Umsetzung der entwickelten Methodik anhand russischer Standortauswahlprojekte erlangt werden konnten.

Ausgehend von den Ergebnissen der Projektarbeiten halten die deutschen und russischen Spezialisten die Fortsetzung der Zusammenarbeit zu folgenden Komplexen für zweckmäßig:

1. Optimierung der Standortcharakterisierung für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in magmatischen Gesteinen mit den Schwerpunkten
 - Untersuchungen zur Optimierung und Erhöhung der Aussagefähigkeit geophysikalischer Erkundungsverfahren zur Charakterisierung des Isolationspotenzials der geologischen Barriere,
 - zielgerichteter Einsatz hydrogeologischer und bohrlochgeophysikalischer Untersuchungen in den Erkundungsbohrungen zur besseren Charakterisierung der hydraulischen Eigenschaften von Zonen erhöhter Klüftigkeit bzw. Störungszonen,
 - Integration der Ergebnisse verschiedener geophysikalischer Erkundungsverfahren in digitale 3D-Modelle und deren komplexe Interpretation zur Erhöhung der Aussagesicherheit der geologischen Standortmodelle zwecks Charakterisierung der geologischen Hauptbarriere,
 - Optimierung der geophysikalischen Oberflächen – und Bohrlochmessungen für die strukturelle tektonische 3D-Kartierung der Standorte,
 - Optimierung der seismischen und elektrischen Erkundungsmethoden für die Detaillierung der Lage von permeablen Zonen im Gesteinsmassiv
 - Einsatz von geophysikalischen und hydrogeologischen Methoden der Bohrlocherkundung zur Charakterisierung des Wasserflusses im untersuchtem Territorium.
2. Begründung der Anforderungen an das technische Barrierensystem, darunter
 - In situ-Untersuchungen zur Abdichtwirkung des Bentonitbuffers unter Berücksichtigung möglicher Imperfektionen in Zonen hoher Durchlässigkeitsunterschiede,
 - Bewertung seismischer Einwirkungen auf die Integrität der technischen Barrierenbehälter und des Bentonitbuffers,
 - Begründung der Abmessungen und Kenndaten des Mehrbarrierensystems der Endlagerung, der Technologie ihrer Errichtung und der Methoden für den Nachweis ihrer Funktionstüchtigkeit,
 - Geeignete Auslegung der technischen Barrieren hinsichtlich der Gewährleistung ihrer Integrität unter Berücksichtigung der korrosiven Gasbildung,
 - Analyse der Effektivität der Bentonitbarriere in Abhängigkeit von der Technologie ihrer Errichtung, der stofflichen Zusammensetzung sowie den natürlichen geologischen und hydrogeologischen Kenndaten permeabler Zonen,
 - Methodologische und apparative Ausrüstung von Systemen für die Kontrolle der Entwicklung der Hauptkennwerte des Wirtsgesteins und der Barrieren für eine Prognostizierung ihrer Veränderung über eine entsprechend den Sicherheitsanalysen geforderte Zeitdauer,

- Begründung der Auslegung des Mehrbarrierensystems eines Endlagers unter Berücksichtigung des realen Zustandes des Wirtsgesteinsmassivs und der Prognosen zu den natürlichen und technogenen Einflüssen.
3. Entwicklung von Anforderungen an die Ausgangsdaten für eine Langzeitsicherheitsanalyse sowie für die Standortauswahl für ein Endlager radioaktiver Abfälle, insbesondere
- Weitere Präzisierung der integrierten sicherheitsanalytischen Modelle mittels Substitution generischer Daten durch reale hydrogeologische und geochemische Standortdaten, sowie durch Berücksichtigung eines stochastischen Behälterausfalls,
 - Untersuchung des Einflusses der wärmeinduzierten Dichteströmung auf den Schadstofftransport bei realitätsnahen Randbedingungen,
 - Untersuchungen zur Relevanz des kolloidgebundenen Schadstofftransports und seine Einbindung in das sicherheitsanalytische Modell,
 - Durchführung eines detaillierten Vergleiches der geologischen und sicherheitsanalytischen Modellierungen beider Seiten sowie eine vergleichende Analyse der bisher erzielten Ergebnisse,
 - Herausarbeitung der relevanten natürlichen und technogenen Faktoren, die die Auswahl von Formationen für die Endlagerung langlebiger radioaktiver Abfälle bestimmen,
 - Untersuchung des Einflusses von Veränderungen der folgenden Kenndaten auf die Sicherheit der Endlagerung:
 - Bedingen des Wasseraustausches, sowie der hydrogeologischen und geochemischen Parameter der Grundwässer
 - Schadstofftransport bei thermischer Beeinflussung, darunter Kolloidtransport
 - Anordnung der geologischen Deformationszonen und quantitative Bewertung der Druck- und Zugdeformationen.

Durch die genannten gemeinsamen Arbeiten sollen ein theoretisch fundiertes und zugleich praxisnahes Verständnis für die maßgeblichen Faktoren der Endlagerstandortauswahl in magmatischen Wirtsgesteinen erarbeitet sowie die hierzu entwickelten Verfahren und Werkzeuge weiterentwickelt und objektbezogen erprobt werden.

Das Interesse der Seiten an eine Fortsetzung und Vertiefung der gegenseitig vorteilhaften Zusammenarbeit besteht im komplexen Herangehen an eine Optimierung der wissenschaftlichen Arbeiten, der geologischen Erkundungsarbeiten sowie von Planungsfragen und nationalen normativ-rechtlichen Fragen für die Realisierung der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen.

10 Literatur

- [AkEnd 2002] AkEnd Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des AkEnd. Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Berlin (2002), 45 S.
- [Aksjuk & Zarajskij 1994] Aksjuk, A. M., Zarajskij, G. P. Wechselwirkung zwischen Wasser und Gestein. Kurzer Überblick zum Problem in Verbindung mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle in geologischen Schichten (russ.). Abriss der physiko-chemischen Petrologie (russ.). Miass 18(1994), 17-63
- [Alekseev et al. 2001] Alekseev, E. P., Buldakov, M. V., Kudinov, K. G. et al. Resultate der Arbeiten mit der Methode der audiomagnetotellurischen Sondierung im Gebiet „I-tatskij“ (russ.). unveröff. Bericht, NIISK SPbGU, Sankt Petersburg (1997)
- [Amosov 2002] Amosov, P. V. Vereinfachtes Modell der Bewertung der Sicherheit der unterirdischen Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle und verbrannter Kernbrennstoffe in kristallinen Gesteinen (Szenarium der normalen Evolution) (russ.). Geoekologija (2002)6, 506-516
- [Anderson et al. 1993] Anderson, E. B., Dzenko, V. M., Kedrovskij, O. L. et al. Geologische Untersuchungen auf dem Territorium des Südteils des Jennissejsker Höhenrückens als Begründung für die Möglichkeit einer sicheren Endlagerung verfestigter hochaktiver Abfälle des Werkes RT-2 in tiefen geologischen Formationen (Verallgemeinerung und Analyse der Literatur, von Archivunterlagen und von Resultaten feldgeologischer Erkundungsarbeiten) (russ.). unveröff. Bericht, Chlopin-Institut, St. Petersburg (1993)
- [Anderson et al. 1996] Anderson, E. B., Velitschkin, V. I., Dzenko, V. M. et al. Geologisch-geophysikalische Untersuchung des Nordteils des Nischnekansker Massivs mit dem Ziel der Suche von monolithischen Granitoidblöcken mit Perspektiven für die Endlagerung verfestigter hochaktiver Abfälle des Werkes RT-2 (russ.). unveröff. Bericht Chlopin-Institut, St. Petersburg (1996)
- [Anderson et al. 1998] Anderson, E. B., Shabalev, S. I., Savonenkov, V. G. et al. Investigations of Nizhnekanskiy granitoid massif (Middle Siberia, Russia) as a promising site for deep geological disposal of HLW. Proc. of Internat. Conf. on Rad. Waste Disp., DisTec 98, Hamburg (1998), 105-110

- [Anderson et al. 1999] Anderson, E. B., Dzenko, V. M., Kirko, V. I. et al. Resultate der komplexen geologischen Untersuchungen des Nischnekansker Massivs als Begründung für die Möglichkeit seiner Nutzung zur Endlagerung verfestigter radioaktiver Abfälle (russ.). In: Untersuchungen der Granitoide des Nischnekansker Massivs zur HAW-Endlagerung (russ.). Chlopin-Institut, Sankt Petersburg (1999), 14 – 23
- [Anderson et al. 2000] Anderson, E. B., Savonenkov, V. G., Shabalev, S. I. Erarbeitung einer geologischen Konzeption und geologischer Kriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in granitoiden Formationen (am Beispiel des Nischnekansker Massivs im Jennissejsker Höhenrücken) (russ.). Preprint RI-255, ZNIIATOMINFORM, Moskau (2000), 28 S.
- [Anderson et al. 2001] Anderson, E. B., Lyubtseva, E. F., Savonenkov, V. G., Shabalev, S. I., Rogozin, Yu. M. The proposed geologic repository site at the Nizhnekanskiy granitoid massif near Krasnoyarsk, Russia. 9th Internat. High-level Radioactive Waste Management Conference, Las Vegas (2001)
- [Anderson et al. 2003] Anderson, E. B., Rogosin, J. M., Brysgalova, R. V., Smirnova, E. A., Shabalev, S. I. Untersuchungen des Radium-Institutes auf dem Gebiet der sorptiven Barriereigenschaften der Granitoide des Nischnekansker Massivs (russ.). Seminar VNIPI PT, Moskau (2003)
- [Arzhannikov et al. 2004] Arzhannikov, S. G., Gladkov, A. S., Semenov, R. M. Late Quaternary geodynamics and tectonic activity within the Kan fault system (southwestern Siberian Platform). Russian Geology and Geophysics 45(2004)4, 430-442
- [AVV 1990] Allgemeine Verwaltungsvorschrift (AVV) zu §45 Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen (21. Februar 1990). Erschienen im Bundesanzeiger, 42. Jg., Nummer 64a, 1990.
- [Balashov & Zarajskij 1982] Balashov, V. N., Zarajskij, G. P. Auflockerung der Gesteine durch Wärme als Faktor für die Bildung von hydrothermalen Lagerstätten (russ.). Abriss der physiko-chemischen Petrologie (russ.). Moskau, Nauka 10(1982), 69-109
- [Baer et al. 2003] Bae, D.-S., Koh, Y.-K., Kim, K.-S., Kim, Ch.-S., Kim, G.-Y. The hydrogeological and hydrochemical conditions of deep groundwater system in Yuseong

- granitic rock area, Korea. Proc. "Groundwater in fractured rocks", Prague (2003)
- [Balla 2004] Balla, Z. The Uveghuta site for LIL radioactive waste disposal in Palaeozoic granites (SW Hungary). In: Safety of Nuclear Technologies. Radioactive waste management. Proceed. VII. Internat. Conference, Saint-Petersburg, 27.09.-01.10.2004, PRoAtom (2004), 92-94
- [Balla et al. 2000] Balla, Z., Horvath, I., Toth, G. L/ILW disposal site Üveghuta in Variscan granite of Hungary and its hydrogeology. DisTec, sect. 2, oral presentation (2000), 70-75
- [Bear et al. 1993] Bear, J., Tsang, C.-F., de Marsily, G. Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock. Academic Press, San Diego (1993)
- [Bechthold et al., 2003] Bechthold W. et al., Final Report „Backfill and Material Behavior in Underground Salt Repositories, Phase II (BAMBUS II), 2003
- [BMWA-MINATOM 2003] Protokoll der 2. gemeinsamen Koordinierungssitzung der Expertengruppe des Ministeriums für Atomenergie (MINATOM) der Russischen Föderation und des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) zur Fortsetzung der wissenschaftlich-technischen Kooperation beider Länder auf den Gebieten der Reaktorsicherheitsforschung und der Endlagerforschung. Berlin 19/20. Mai 2003
- [BMW-i-MINATOM 2001] Protokoll der gemeinsamen Sitzung des Ministeriums für Atomenergie (MINATOM) der Russischen Föderation und des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMW-i) zur Fortsetzung der wissenschaftlich-technischen Kooperation beider Länder auf den Gebieten der Reaktorsicherheitsforschung und der Endlagerforschung. Moskau, 27. – 29. Juni 2001
- [Böckh et al. 1987] Böckh, E., Grisseman, C., Siebenhüner, M., Kolodziey, A. Beitrag zu den Methoden der Grundwasserprospektion im kristallinen Grundgebirge Westafrikas. Bericht über das Ergebnis von hydrogeologischen und geophysikalischen Untersuchungen in Burkina Faso. BGR (1987), Archiv-Nr. 105896
- [Börgesson 1988] Börgesson, L. Modelling of buffer material behaviour, some examples of material models and performance calculations. SKB Technical Report, Lund, Sweden (1988)
- [Börgesson et al. 1994] Börgesson, L., Fredrikson, A., Johannesson, L.-E. Heat conductivity of buffer materials. SKB Technical Report, Lund (1994)

- [Bornemann et al. 2004] Bornemann, O., Mingerzahn, G., Behlau, J., Schramm, M., Hammer, J. Der Salzdiapir Gorleben als potenzielles Endlager für radioaktive Abfälle in Deutschland – die wichtigsten Resultate der geologischen Erkundungsarbeiten (russ.). *Geoökologija* (2004)1, 1-10
- [Brookins 1984] Brookins, D. G. Geochemical aspects of radioactive waste disposal. New York, Springer-Verlag (1984)
- [Buhmann 1999] Buhmann, D. Das Programmpaket EMOS, Ein Instrumentarium zur Analyse der Langzeitsicherheit von Endlagern (1999)
- [Chapman & McKinley 1987] Chapman, N. A., McKinley, I. G. The geological disposal of nuclear waste. John Wileys & Sons Public., Chichester (1987), 280 pp.
- [Clauser et al. 2002] Clauser, Ch., Höhme, F., Hartmann, A., Rath, V., Dietjen, H., Rühaak, W., Schellschmidt, R., Zschocke, A. Erkennen und Quantifizieren von Strömung: Eine geothermische Rasteranalyse zur Klassifizierung des tiefen Untergrundes in Deutschland hinsichtlich der Eignung zur Endlagerung radioaktiver Stoffe. RWTA Aachen, GGA Hannover, 2002
- [Cornelius et al. 1993] Cornélis, B., Labat, S., Van Iseghem, P., In Situ Tests on Waste Packages Materials in Clay – concept and performance. Workshop In Situ Testing of Radioactive Waste Forms and Engineered Barriers, Corsendonk, Belgium, 13-16 October, 1992, Report EUR-15629EN, Brussels, CEC, 1993.
- [Dzenko 1995] Dzenko, V. M. Das Nischnekansker Massiv – Standard des Nischnekansker Komplexes (Jennissejsker Höhenrücken) (russ.). Novosibirsk, SNIIGGiMS (1995), 122 S.
- [Dolginow & Kropatschjow 1994] Dolginow, J. & Kropatschjow, S. Abriß der Geologie Russlands und angrenzender Staaten. Stuttgart, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (1994)
- [Dushkov & Sokolova 1997] Dushkov, A. D., Sokolova, L. S. Thermische Struktur der Lithosphäre der Sibirischen Plattform (russ.). *Geologija i Geofisika* 38(1997)2, 494-503
- [Enachescu et al. 2003] Enachescu, C., Molnar, P., Wozniewicz, J. Hydraulic characterisation of the Uveghuta granite in Bataapati, Hungary. In: Groundwater in fractured rocks. Prague, Czech Republic (2003), 57
- [Filbert et al. 1998] Filbert, W., Engelmann, H. J. Aktualisierung des Konzepts „Endlager Gorleben“, Abschlussbericht, DBE, Peine (1998)

- [FZ Karlsruhe 2002] Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle (2002 – 2006), Förderkonzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Forschungszentrum Karlsruhe (2002)
- [Gupalo 2001] Gupalo, T. A. Development of quantitative criteria for suitability of rock mass for safe long-term storage of waste from weapons-grade plutonium production, illustrated by Krasnoyarsk Mining Chemical Combine. Summary Technical Report, ISTC-Projekt 307B-97, Moscow (2001)
- [Gupalo 2003] Gupalo, T.A. Bewertung der thermomechanischen Einwirkungen auf die Gesteine in den Untertageanlagen des Bergbau- und Chemiekombinates (russ.). wiss. Bericht VNIPI Promtehnologii (2003)
- [Gupalo et al. 1998] Gupalo, T. A., Seleznev, N. I., Zhidkov, V. V., Gupalo, V. S. Analysis of results of on-site investigations of the rock mass and underground structures state at Krasnoyarsk Combine under long term impacts of large sources of heat induced by human activities. Proc. Intern. Congr. on Rad. Waste Dispos., DisTec, Hamburg (1998), 168-173
- [Gupalo et al. 2004] Gupalo, T. A., Milovidov, V. L., Muravev, A. A. Tektonischer Bau des NW-Teils des Nischnekansker Massives basierend auf Resultaten der Dechiffrierung von Kosmosaufnahmen zur Auswahl von Gebieten für den Bau eines Untertagelabors. In: Savonenkov, V. G., Zarycinaja, L. G. (Hrsg.): Lagerung und Verarbeitung von abgebrannten Brennelementen in der neuen Konzeption des Werkes RT-2. wiss. Tagung, Sankt Petersburg (2004), 113
- [Herrmann & Röthemeyer 1998] Herrmann, A.G., Röthemeyer, H. Langfristig sichere Deponien - Situation, Grundlagen, Realisierung, Springer Verlag (1998)
- [IAEA 1983] Safety Series N° 60, Criteria for underground disposal of solid radioactive waste; IAEA, Vienna (1983)
- [ISC-Bulletin 2001] ISC-On-line Bulletin. International Seismological Center, Thatcham, United Kingdom (2001), (see at: www.isc.ac.uk/Bull)
- [Jagelke et al. 2004] Jagelke, J., Schöniger, M. Durchführung von numerischen Simulationen im Mayak-Untersuchungsgebiet. unveröff. Bericht (2004)
- [Jones et al. 2004] Jones, J., Vahlund, F., Kautsky, U. Tensit – a novel probabilistic simulation tool for safety assessments –

- tests and verifications using biosphere models. SKB, Technical Report TR-04-07 (2004), 67 pp.
- [Kahr & Müller-von Moos 1982] Kahr, G. Müller-von Moos, M. Wärmeleitfähigkeit von Bentonit MX80 und von Montigel nach der Heizdrahtmethode, Institut für Grundbau und Bodenmechanik ETH Zürich, Nagra Technischer Bericht, Baden 82-06 (1982)
- [Kedrovskij et al. 1997] Kedrovskij, O. L., Schischtschiz, I. J. Methodologie der Begründung einer Konzeption für die Isolierung von verfestigten radioaktiven Abfällen in geologischen Formationen (russ.). *Geoekologija* (1997)5, 63-68
- [Keller 1998] Keller, S. Permafrost in der Weichsel-Kaltzeit und Langzeitprognose der hydrogeologischen Entwicklung in der Umgebung von Gorleben (NW-Deutschland). *Z. angew. Geol.* 44 (1998)2, 111-119
- [Khain 1994] Khain, V. E. Geology of northern Eurasia. Second part of the Geology of the USSR. Phanerozoic fold belts and young platforms. Berlin, Gebrüder Borntraeger (1994)
- [Knödel et al. 1997] Knödel, K., Krummel, H., Lange, G. Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 3 :Geophysik. Springer-Verlag (1997)
- [Knutsson 1983] Knutsson, S. On the thermal conductivity and thermal diffusivity of highly compacted bentonite, SKBF/KBS Technical Report (1983)
- [Kolmogorova et al. 2002] Kolmogorova, P. P., Kolmogorov, V. G. Recent vertical crustal movements in the Altai-Sayan province in relation to neotectonics and seismicity. *Russian Geology and Geophysics* 43(2002)6, 531-542
- [Kolmogorova et al. 2004] Kolmogorova, P. P., Kolmogorov, V. G. Recent vertical crustal movements in the region of Yenisei Ridge. *Russian Geology and Geophysics* 45(2004)4, 455-464
- [Kotschkin & Patyk-Kara 1999] Kotschkin, B. T., Patyk-Kara, N. G. Geomorphologische Bewertung von Territorien mit dem Ziel der Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (russ.). *Geologija rudnych mestoroschdenij* 41(1999), 154-161
- [Kotschkin 1997] Kotschkin, B. T. Bewertung der hydrogeologischen Bedingungen bei der Standortauswahl für ein Endlager für verfestigte radioaktive Abfälle (russ.). *Geoekologija* (1997)3, 68-78
- [Kotschkin 2000] Kotschkin, B. T. Konzeption der Standortauswahl für die Platzierung von Endlagern für radioaktive Abfälle (russ.). *Geoekologija* (2000)6, 483-494

- [Krauskopf 1986] Krauskopf, K. B. Thorium and rare-earth metals as analogs for actinide elements. *Chem. Geol.* 55(1986), 323-335
- [Krauskopf 1988] Krauskopf, K. B. Geology of high-level nuclear waste disposal. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 16(1988), 173-200
- [Kudinov et al. 2002] Kudinov, K.G. et al. Estimate of the sources of Plutonium-containing wastes generated from MOX fuel production in Russia. *Proceedings, WM'02 Conference, Tucson, February 24-28 (2002)*
- [Kurstien et al. 2001] B. Kursten, F. Druyts, P. Van Iseghem, „Methodology in corrosion testing of container materials for radioactive waste disposal in a geological clay repository“, *Proceedings ASME 2001* [Lange & Eberle 1999] Lange, G., Eberle, D. Workshop on geological/geophysical investigations to locate a potential waste dump site in the vicinity of the southwestern town of Luderitz. Session II: Geophysics. Windhook, Handout Manuscript (1999), 18 S.
- [Lange & Knödel 2003] Lange, G., Knödel, K. *Erkundungspraxis. Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 8.* Berlin, Springer-Verlag (2003), 949 S.
- [Lapotschkin 1997] Lapotschkin, B. K. Geoökologische Perspektiven des Salzbasins um Moskau für die sichere Endlagerung fester HAW (russ.). *Rasvedka i ochrana nedr* (1997)4, 28-31
- [Lapotschkin 1998] Lapotschkin, B. K. Geoökologische Probleme der Endlagerung fester radioaktiver Abfälle des europäischen Nordens Russlands (russ.). *Ökologie der industriellen Produktion* (russ.) 1-2(1998), 35-41
- [Laverov et al. 1994] Laverov, N. P., Omeljanenko, B. I., Velitschkin, V. I. Geologische Aspekte des Problems der Endlagerung radioaktiver Abfälle (russ.). *Geoekologija* (1994)6, 3 – 20
- [Laverov et al. 2000] Laverov, N. P., Velitschkin, V. I., Omeljanenko, B. I., Petrov, V. A., Tarasov, N. N. Neue Herangehensweisen an die unterirdische Endlagerung hochaktiver Abfälle in Russland (russ.). *Geoekologija* (2000)1, 3-12
- [Laverov et al. 2001] Laverov, N. P., Velitschkin, V. I., Omeljanenko, B. I. Isolationseigenschaften der kristallinen Gesteine in Verbindung mit dem Problem der Endlagerung hochaktiver Abfälle (russ.). *Geologija rudnych mestoroschdenij* 43 (2001), 6 – 23
- [Laverov et al. 2002] Laverov, N. P., Petrov, V. A., Velitschkin, V. I., Poluektov, V. V. et al. Petrophysikalische Eigenschaften der Granitoide des Nischnekansker Massivs: zur

- Frage der Auswahl von Gebieten für die Isolation von HAW und abgebrannten Kernbrennstäben (russ.). *Geoekologija* (2002)4, 293-310
- [Leydecker 1998] Leydecker, G. Earthquake catalogue for the Federal Republic of Germany and adjacent areas for the years 800 till 1993 (for damaging earthquakes until 1997). Datafile, Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, Hannover (1998)
- [Lind et al. 2001] Lind, E. N., Dazenko, V. M. et al. Resultate der komplexen wissenschaftlichen geologisch-geophysikalischen Forschungsarbeiten zur Untersuchung des Nischnekansker Granitoidmassivs (russ.). unveröff. Bericht KNIIGiMS, Krasnojarsk (2001)
- [Lisizin et al. 1997] Lisizin, A. K., Myskin, V. I., Ganina, N. I., Kotova, S. J., Schulik, L. S. Bewertung der Schutzeigenschaften des geologischen Milieus im Gebiet der PO "Majak" (russ.). *Geoekologija* (1997)2, 51-62
- [Ljubceva et al. 1999] Ljubceva, E. F., Alekseev, E. P., Buldakov, M. V. et al. Resultate der Arbeiten mittels der Methode der audiomagnetotellurischen Sondierung auf den Gebieten „I-tatskij“ und „Kamennyj“ (russ.). In: Untersuchungen der Granitoide des Nischnekansker Massivs für eine HAW-Endlagerung (russ.). Bergbau-Chemisches Kombinat Schelesnogorsk, Chlopin-Institut, St. Petersburg (1999), 24-34
- [Ljubceva et al. 2002] Ljubceva, E. F., Alekseev, E. P. et al. Bewertung der Granitoide des Gebietes Kamennyj als geologisches Milieu für die Langzeitlagerung von verfestigten RAW (stoffliche Zusammensetzung, Tektonik, physikomechanischer Zustand, Empfehlungen) auf der Grundlage von Resultaten der komplexen Interpretation von Geoelektrik-, Geomagnetik- und Gravimetrie-Daten (russ.). wiss. Bericht, Staatliche Universität, St. Petersburg (2002), 58 S.
- [Lührmann et al. 2000] Lührmann, L.; Noseck, U.; Storck, R. Spent Fuel Performance Assessment (SPA) for a Hypothetical Repository in Crystalline Formations in Germany, 2000.
- [Lukina 1996] Lukina, N. V. Prognose der tektonischen und geomorphologischen Entwicklung des Nordteils des Nischnekansker Granitoidmassivs für 10 000 Jahre und für 100 000 bis 130 000 Jahre im Voraus (russ.). unveröff. Bericht, NPP „Geodynamik und Ökologie“, Moskau (2000)
- [Lukina 2001] Lukina, N. V. Begründung der tektonischen Stabilität des Nordteils des Nischnekansker Granitoidmassivs (russ.). unveröff. Bericht, NPZ „Geodynamik und Ökologie“, Moskau (2001)

- [Maaranen et al. 2002] Maaranen, J., Lehtioksa, J., Timonen, J. Äspö Hard Rock Laboratory. Determination of porosity, permeability and diffusivity of rock samples from Äspö HRL using the Helium gas method. Svensk Kärnbränslehantering AB, IPR-02-17 (2002)
- [Milnes et al. 1980] Milnes, A. G., Buser, M., Wildi, W. Endlagerkonzepte für radioaktive Abfälle im Überblick. Ztschr. geol. Gesell. 131(1980), 359-385
- [Morozov et al. 1996] Morozov, V. N., Tatarinov, V. N. Methodik der Auswahl von Erdkrustenabschnitten für die Platzierung von ökologisch gefährlichen Abfällen (russ.). Geoekologija (1996)6, 109-119
- [Morozov et al. 2001] Morozov, V. N., Rodkin, M. V., Tatarinov, V. N. Zum Problem der geodynamischen Sicherheit von Objekten des Kernbrennstoff-Zyklusses (russ.). Geoekologija (2001)3, 227-238
- [NAGRA 1994] Kristallin-I. Safety Assessment Report. NAGRA Technical Report NTB 93-22, Wettingen, (1994)
- [NAGRA 2002] Entsorgungsnachweis für hochaktive Abfälle – Erdwissenschaftliche Grundlagen. NAGRA Bulletin, Wettingen 35(2002), 12-23
- [Naliwkin 1959] Naliwkin, D.W. Kurzer Abriss der Geologie der UdSSR. Berlin, Akademie-Verlag (1959)
- [Neretnieks 1986] Neretnieks, I. Some uses natural analogues in assessing the function of HLW repository. Chem. Geol. 55(1986), 175-188
- [Omeljanenko et al. 1993] Omeljanenko, B. I., Zarskiy, G. P., Starostin, V. I., Petrov, V. A., Yuditsev, S. V. The petrographic criteria of selection of geological environments for building high-level waste (HLW) repository. Proc. Int. Conf. on Nuclear Waste Manag. and Envir. Remed. Prague, New York, ASME (1993)1, 697-702
- [Omeljanenko et al. 1994] Omeljanenko, B.I., Petrov, V.A., Yuditsev, S.V., Zarskii, G.P. Petrographical criteria for the choice of geological environment for high-level radioactive waste disposal (russ.). In : Problems of environment and natural resources (russ.). Moscow, Vseros. Nauchno-Issled. Inst. Techn. Inform. (1994)1, 17-27
- [Omeljanenko et al. 1995] Omeljanenko, B.I., Nikonov, B.S., Shikina, N.D., Yuditsev, S.V. A new approach to the selection of materials for engineered barriers and appropriate host rocks for high level waste disposal. Proc. of Symp. Sci. Basis for Nucl. Waste Manag. XVIII, Pittsburgh 353(1995)1, 543-550
- [ONDRA 2001] ONDRAF/NIRAS "SAFIR 2 Report", NIROND 2001-06 E, December 2001
- [Papp 1997] Papp, R. (Hrsg.) GEISHA – Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein. Wiss.

- Ber. Forschungszentrum Karlsruhe, Technik und Umwelt, FZKA-PTE, Nr. 3 (1997)
- [Petitta 2003] Petitta, M. Präsentation auf der Konferenz "Groundwater in Fractured Rock", Prag (2003)
- [Petrov 2001] Petrov, V. A. Untersuchungen der petrophysikalischen Eigenschaften und des Spannungs-Deformations-Zustandes der Gesteine im Gebiet der PO "Majak" und des GChK in Verbindung mit der Auswahl von Polygonen für die Isolation von HAW (russ.). *Geologija rudnych mestoroschdenij* 43(2001)6, 478-494
- [Rumynin et al. 1999] Rumynin, V. G., Mironenko, V. A. Erfahrung der Untersuchung von Prozessen der Grundwasserverschmutzung in Gebieten der oberflächennahen Ablagerung von radioaktiven Abfällen (russ.). *Geoekologija* (1999)5, 437-454
- [Ryzenko et al. 1996] Ryzenko, B. N., Barsukov, V. L., Knjazeva, S. N. Chemische Charakterisierung (Zusammensetzung, pH, Eh) des Systems Gestein/Wasser. I. System Granitoide/Wasser (russ.). *Geochimija* (1996)5, 436-454
- [Ryzenko et al. 1997] Ryzenko, B. N., Barsukov, V. L. & Knjazeva, S. N. Chemische Charakterisierung (Zusammensetzung, pH, Eh) des Systems Gestein/Wasser. II. Systeme Diorit (Andesit)/Wasser und Gabbro (Basalt)/Wasser (russ.). *Geochimija* (1997)12, 1227-1254
- [Sagmeister 1999] Sagmeister, B. Mauersteine, wärmedämmend mit haufwerksporigem Leichtbeton, Sonderdruck aus BFT 7/99, Bauverlag GmbH, Walluf (1999)
- [SAM 1989] Projektgruppe Andere Entsorgungstechniken: Systemanalyse Mischkonzept (SAM), Datensammlung, Technischer Anhang 9, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Oktober 1989.
- [Savage 1995] Savage, D. (ed.) The scientific and regulatory basis for the geological disposal of radioactive waste. John Wiley & Sons Public., Chichester (1995), 437 pp
- [Shabalev et al. 2001] Shabalev, S. I., Anderson, E. B., Savonenkov, V. G., Rogozin, Yu. M., Garbuzov, V. M., Ushakov, S. V. Laboratory characterization of rock specimens from the Nizhnekanskij Massif (potential site for HLW final disposal in Middle Siberia, Russia). 9th Intern. High-level Radioact. Waste Management Conf., Las Vegas (2001)
- [Shebalin & Leydecker 1997] Shebalin, N. V., Leydecker, G. Earthquake catalogue for the former Soviet Union and borders up to 1988. European Commission, Report No. EUR 17245 EN, Nuclear Science and Technology Series (1997), 135 pp., 13 fig., ISSN 1018-5593, Office for official publications of the European Communities, Luxembourg

- [Sheppard et al. 2001] Sheppard, R. G., Mathes, D. M., Bray, D. J. Properties and characteristics of graphite - thermal conductivity - 5th printing, Poco Graphite, Inc., Decatur, Texas, USA (2001)
- [Sherkasov 1999] Sherkasov, S. V. Tiefenbau des Jennissejsker Höhenrückens und Verteilung der Goldvererzung (russ.). Doklady AN RF 368(1999)4, 522-524
- [SKB 2001] SKB Project SAFE – Scenario and system analysis. SKB, Report R-01-13 (2001), 118 pp.
- [Smailos et al. 1997] E.Smailos, I.Azkarate, J.A.Gago, P.Van Iseghem, B.Kursten, T.McMenamin, “Corrosion Studies on Metallic HLW Container Materials”, Proc. of the 4th European Conf. on Management and Disposal of Radioactive Waste, Luxembourg, 25-29 March 1996, pp. 209-223, T.McMenamin (Ed.), EUR 17543 (1997).
- [Smell & Rosbolt 1984] Smell, J. A. T., Rosholt, J. N. Radioactive disequilibria in mineralized fracture samples from two uranium occurrences in northern Sweden. Lithos 17(1984), 215-225
- [Starostin et al. 1995] Starostin, V. I., Velitschkin, V. I., Petrov, V. A., Volkov, A. B., Kotschkin, B. T. Strukturell-petrophysikalische und geodynamische Aspekte der Auswahl von Massiven kristalliner Gesteine in Verbindung mit den Problemen der Endlagerung radioaktiver Abfälle (russ.). Geoekologija (1995)6, 17-26
- [Tkashuk 1992] Tkashuk, E. K. Gesetzmäßigkeiten der vertikalen Veränderlichkeit von Kluftparametern und Filtrationseigenschaften felsiger Gesteinsmassive (russ.). Inschenernaja Geologija (1992) 4, 3-26
- [Valshak 1997] Valshak, V.I. Gravimetrische Erkundung im Maßstab 1 : 200 000 auf der Nischnekansker Fläche (russ.). unveröff. Bericht GPGE Nr. 3, Krasnojarsk (1997), 69 S.
- [Velitschkin et al. 2001] Velitschkin, V. I. et al. Untersuchung der mineralogisch-geochemischen und physiko-mechanischen Eigenschaften der Granitoide des Nischnekansker Massivs (russ.). unveröff. Bericht IGEM, Moskau (2001)
- [VNIPI PT 2002] VNIPI PT Standortspezifische Daten für den Bereich des Nishnekansker Granitmassivs und den Standort Mayak, schriftliche Mitteilung (2002)
- [Volobuev & Zukov 1961] Volobuev, M. I., Zukov, S. I. Zur Frage des absoluten Alters der Gesteine und Minerale des Jennissejsker Höhenzuges (russ.). Materialien zur Geologie und zu den Rohstoffen des Krasnojarsker Gebietes (russ.), Krasnojarsk (1961), 91-100

- [Watkins 2003] Watkins, D. C. Determining a representative hydraulic conductivity of the Cornmenellis Granite of Cornwall; UK, based on a range of sources of information. In: Groundwater in fractured rocks. Prague, Czech Republic (2003), 5 p.
- [Zarajskij 1994] Zarajskij, G. P. Experimentelle Modellierung des Zuwachsens einer einzelnen Kluft bei der Filtration von Wasser im Porphyrit (russ.). Abriss der physikochemischen Petrologie (russ.). Miass 18(1994), 139-165
- [Zuev et al. 2000] Zuev, V. A., Bukaty, M. B., Zueva, E. V. Analyse der Resultate von hydrogeologischen Feldarbeiten im Gebiet zwischen den Flüssen Bolschoj und Malyj Itat. unveröff. Bericht zu den Feldarbeiten 1999 (russ.). VNIPIET, Krasnojarsk (2000)

www.klima-info.de/klimadiagramme/asien

11 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1-1:	BChK - Radiochemische Produktionsanlagen für die Plutoniumgewinnung	A-2
Abbildung 1-2:	BChK -Wiederaufbereitungsanlage RT-2.....	A-3
Abbildung 1-3:	BChK – Wiederaufbereitungsanlage RT-2: Zwischenlager für ausgedienten Kernbrennstoff.....	A-3
Abbildung 2-1:	Geographische Lage des Untersuchungsgebietes (Krasnojarsk – rot umrandet).....	A-14
Abbildung 2-2:	Lage der detailliert bezüglich ihrer Eignung als Standorte für eine unterirdische Endlagerung radioaktiver Abfälle analysierten Gebiete „Verchne-Itatskij“ („Kamennyj“ und „Itatskij“, beide rechts unten) und „Jennissejskij“ (Mitte links) auf der schematisierten geologischen Karte des Umfeldes des Bergbau-Chemischen Kombines Shelesnogorsk (nach: Anderson et al. 2001)	A-15
Abbildung 2-3:	Topographische Karte des „Verchne-Itatskij“- Gebietes mit Angaben zur Lage der geophysikalischen Messprofile und Erkundungsbohrungen	A-16
Abbildung 2-4:	Langjährige Mittelwerte von Temperatur, Niederschlag und Luftdruck in der Region Krasnojarsk (Quelle: www.klima-info.de/klimadiagramme/asien).....	A-18
Abbildung 2-5:	Lage des Untersuchungsgebietes innerhalb der Blockstruktur des präkambrischen Fundamentes der Sibirischen Plattform (aus: [Dokembrijskaja geologija SSSR, 1988])	A-20
Abbildung 2-6:	Regionalgeologische Position des Nishnekansker Granitoidkomplexes im Südwestteil der Sibirischen Plattform (gezeichnet auf der Grundlage der „Geologischen Karte der UdSSR und angrenzender Aquatorien“ im Maßstab 1 : 2 500 000)	A-21
Abbildung 2-7:	Lage der Untersuchungsgebiete „Verchne-Itatskij“ und „Jennissejskij“ am Südwestrand der Sibirischen Plattform, gezeichnet auf der Grundlage der Geologischen Karte des Gebietes im Maßstab 1 : 750 000.....	A-23
Abbildung 2-8:	Position des Untersuchungsgebietes innerhalb der tektonischen Übersichtskarte des Grundgebirges der Sibirischen Plattform (nach Kogan 1979, aus: Dolginow & Kropatschjow 1994).....	A-24
Abbildung 2-9:	Verteilung von Erdbeben unterschiedlicher Magnitude im weiteren Umfeld von Krasnojarsk, gezeichnet auf der Grundlage der Datensammlung von [Shebalin & Leydecker 1997]. Der Kreis besitzt einen Durchmesser von 200 km.....	A-29

Abbildung 2-10: Räumliche Anordnung von Erdbeben unterschiedlicher Intensität in der Umgebung von Krasnojarsk (Erläuterungen siehe Abb. 2-8, I0-Epizentralintensität nach der 12-stufigen Medvedev-Sponheuer-Karnik-Skala, Kreisdurchmesser: 200 km)	A-30
Abbildung 2-11: Einordnung des Gebietes um Shelesnogorsk in die „Karte der allgemeinen seismischen Gliederung des Territoriums der russischen Föderation („OSR – 97 – S“)“	A-31
Abbildung 2-12: Schematischer hydrogeologischer Aufbau des geologischen Untergrundes im Bereich des Nishnekansker Granitoidmassivs und Angaben zur Geochemie der Oberflächen- und Grundwässer.....	A-35
Abbildung 2-13: Verteilung der wichtigsten Störungszonen innerhalb der detailliert geologisch-geophysikalisch untersuchten Gebiete „Kamennyj“ (Mitte unten) und „Itatskij“ (links oben) im Umfeld von Shelesnogorsk (aus: Anderson et al. 1998).....	A-41
Abbildung 2-14: Veränderung der Gebirgstemperatur mit zunehmender Teufe.....	A-53
Abbildung 2-15: Lage der im Ergebnis umfangreicher Voruntersuchungen ausgegliederten, potenziell geeigneten Endlager-Standorte im Umfeld des Bergbau-Chemischen Kombines Shelesnogorsk (Maßstab: 1 cm entspricht ca. 10 km)	A-59
Abbildung 2-16: Überblick zur räumlichen Verteilung der im Umfeld des BChK Schelesnogorsk bis 1999 durchgeführten geophysikalischen Erkundungsarbeiten.....	A-61
Abbildung 2-17: Lage der im Jahr 2001 realisierten zusätzlichen Geoelektrik-Profile, die zur räumlichen Abgrenzung der ± monolithischen Gesteinsblöcke „Bolshoj Itatskij Block“ (Westteil des „Itatsker“ Gebietes und dessen nordwestliche Fortsetzung) und „Malyj Itatskij Block“ (Nordteil des Gebietes „Kamennyj“ und dessen nordöstliche Fortsetzung) dienten	A-63
Abbildung 2-18: Bohrlochgeophysik-Messkurven für die Bohrung 1-I in der Gegenüberstellung mit der von [Velitschkin et al. 2001] vorgenommenen Bohrkernbeschreibung	A-66
Abbildung 2-19: Gegenüberstellung der von Velitschkin et al. (2001) vorgenommenen Bohrkernbeschreibung mit den Geophysik-Messkurven für die Bohrung 1-K	A-66
Abbildung 3-1: Technische Daten des Cs/Sr-Endlagerbehälters im Vergleich zur COGEMA-HAW-Kokille.	A-74
Abbildung 3-2: Querschnitt der Überfahrungs- bzw. Einlagerungsstrecke.....	A-75
Abbildung 3-3: Querschnitt der Unterfahrungsstrecke.....	A-75
Abbildung 3-4: Startkonfiguration der Bohrlochlagerung	A-76
Abbildung 3-5: Startkonfiguration – Bohrlochlagerungsfeld Cs/Sr-Fraktion	A-77
Abbildung 3-6: Streckenquerschnitt vernachlässigbar wärmeentwickelnder Abfälle (VWA).....	A-78

Abbildung 3-7: Startkonfiguration – Streckenlagerungsfeld schwach wärmeentwickelnder Abfälle	A-78
Abbildung 3-8: Angenommene Einlagerungsteufe und lokale Temperaturverhältnisse entsprechend den Untersuchungen in Bohrung 1K-700 [VNIPI PT 2002].....	A-80
Abbildung 3-9: Volumenspezifische Wärmeleistung der Cs/Sr-Abfallfraktionen als Funktion der Zeit im Vergleich mit anderen vorgesehenen Endlagerbehältern	A-81
Abbildung 3-10: Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität der im Nishnekansker Granitmassiv angetroffenen Gesteinsarten als Funktion der Temperatur [Laverov & Petrov 2002]	A-82
Abbildung 3-11: Wärmeleitfähigkeit von Bentonit und Graphit.....	A-83
Abbildung 3-12: Wärmeleitfähigkeit unterschiedlicher möglicher Zwischenschichtmaterialien.....	A-84
Abbildung 3-13: Gemessenes und angenähertes Verhalten der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität von verglastem Abfall.....	A-85
Abbildung 3-14: Schematische Darstellung der Modellgeometrie und Ausschnitt des diskretisierten Berechnungsmodells mit Stapelhöhe von 2 Behältern	A-86
Abbildung 3-15: Temperaturentwicklung bei unmittelbarer Einlagerung in Bentonit	A-87
Abbildung 3-16: Einfluss der Zwischenlagerzeit und der Wärmeleistung des Abfallbehälters auf die Maximaltemperatur am Innenrand des Bentonits	A-88
Abbildung 3-17: Schematische Darstellung der modifizierten Modellgeometrie.....	A-89
Abbildung 3-18: Temperatur-Zeit-Verlauf am inneren Rand des Bentonits des modifizierten Modells bei drei Behältern	A-89
Abbildung 3-19: Schematische Darstellung der Bohrlochanordnung und Ausschnitte aus der Diskretisierung des Berechnungsmodells.....	A-90
Abbildung 3-20: Temperaturentwicklung in einem Einlagerungsfeld bei Einlagerung von drei Behältern je Bohrloch.....	A-90
Abbildung 3-21: Schematische Darstellung der verbesserten Bohrlochkonfiguration und Ausschnitt aus der Diskretisierung des Berechnungsmodells.....	A-92
Abbildung 3-22: Temperaturentwicklung bei verbesserter Auslegung des Einlagerungsfelds.....	A-94
Abbildung 3-23: Einfluss der Variationen auf die Maximaltemperatur des verglasten Abfalls.....	A-96
Abbildung 3-24: Einfluss der Variationen auf die Maximaltemperatur des Bentonits	A-97
Abbildung 3-25: Einfluss der Variationen auf die Maximaltemperatur des Behältermantels.....	A-99
Abbildung 3-26: Einfluss einzelner Materialparameter auf die Maximaltemperatur des Bentonits	A-100

Abbildung 3-27: Einfluss des Bohrlochabstands bei unterschiedlichen Materialparametern des Wirtsgesteins auf die Maximaltemperatur des Bentonits	A-101
Abbildung 3-28: Nominaler Flächenbedarf des Einlagerungsfelds in Abhängigkeit von der Behälteranzahl	A-102
Abbildung 3-29: Einfluss eines horizontal mit Referenzmaterial oben und Spessartit unten geschichteten Wirtsgesteins.....	A-103
Abbildung 3-30: Technisches Barrierenkonzept Cs-Sr Abfälle	A-106
Abbildung 3-31: Gesamtübersicht Bohrlochlagerung	A-110
Abbildung 3-32: Bohrlochlagerungsfeld Cs/Sr-Fraktion	A-111
Abbildung 3-33: Streckenlagerungsfeld schwach wärmeentwickelnder Abfälle.....	A-111
Abbildung 4-1: Vorgehensweise zur Erarbeitung eines sicherheitsanalytischen Modells.....	A-116
Abbildung 4-2: Vernetzung der unterschiedlichen Computercodes.....	A-118
Abbildung 4-3: Durchgeführte Modellrechnungen für die verschiedenen Fraktionen: Cäsium-Strontium (Cs-Sr), Schlamm (Sl), Seltene Erden Elemente (SEE) und Spaltprodukte (Sp)	A-119
Abbildung 4-4: Lage der vorausgewählten Standorte Itatskij und Kamennij Verschneidung diverser Abbildungen im GIS	A-120
Abbildung 4-5: Notwendige Daten für das Programmpaket EMOS	A-122
Abbildung 4-6: Erstellung des digitalen Geländemodells für die Modellierungen mit dem Programm FEFLOW	A-123
Abbildung 4-7: Entwicklung des digitalen Geländemodells (DGM) (unten) aus der Hangneigungskarte (oben) aus [Lopatin, Anderson, Dzenko]	A-124
Abbildung 4-8: Modellannahmen für die zweidimensionalen schematischen Rechnungen.....	A-125
Abbildung 4-9: Das Gebiet Itatskij mit seinen Kluftstrukturen und einer bis zu 500 Meter breiten Pufferzone als Sicherheitsabstand	A-127
Abbildung 4-10: Modellgebiet und weitestgehend ungestörter Gesteinsbereich	A-128
Abbildung 4-11: Schematisiertes Schichtenmodell.....	A-128
Abbildung 4-12: Gitternetz des geologischen Strukturmodells.....	A-132
Abbildung 4-13: Modelliertes Kluftnetzwerk, auf der Grundlage des Kartenmaterials von [Lopatin, Anderson, und Dozenko et al.]	A-133
Abbildung 4-14: Digitales Geländemodell mit Kluftnetzwerk, dreidimensionalem Modellgebiet (rot) und zweidimensionalem Profilschnitt (gelb).....	A-134
Abbildung 4-15: Profilschnitt im Untersuchungsgebiet Itatskij, erzeugt auf der Grundlage des dreidimensionalen geologischen Strukturmodells	A-135
Abbildung 4-16: Grundwasseroberfläche im Modellgebiet	A-136
Abbildung 4-17: Zweidimensionales Modellgebiet mit Randbedingungen und Diskretisierung.	A-137
Abbildung 4-18: EMOS - Überblick der Modell-Varianten.....	A-138

Abbildung 4-19: Vorläufige Endlagerauslegung für die Bohrlochlagerung der stark wärmeentwickelnden Cs-Sr Fraktion	A-139
Abbildung 4-20: Vorläufige Endlagerauslegung für die verschiedenen Teilbereiche der Streckenlagerung der Schlämme sowie der schwach wärmeentwickelnden Fraktionen Seltenen Erden (SE) und Spaltprodukte (SP)	A-139
Abbildung 4-21: Endlagerkonzept und Modellumsetzung der Bohrlochlagerung.....	A-141
Abbildung 4-22: Endlagerkonzept und Modellumsetzung der Streckenlagerung.....	A-142
Abbildung 4-23: Zone hoher Kluftdichte und ihre Umsetzung im Fernfeld-Modell „crush“	A-149
Abbildung 4-24: Zone mit unverfüllten Klüften und ihre Umsetzung im Fernfeld-Modell „frac“	A-149
Abbildung 4-25: Schadstoffausbreitung im Modell 1 mit permanenter Schadstoffquelle	A-154
Abbildung 4-26: Schadstoffausbreitung im Modell 2 mit permanenter Schadstoffquelle	A-156
Abbildung 4-27: Schadstoffausbreitung in Modell 3 mit permanenter Schadstoffquelle	A-158
Abbildung 4-28: Schadstoffausbreitung in Modell 4 mit zeitabhängiger Schadstoffquelle	A-160
Abbildung 4-29: Durchbruchkurven für Beobachtungspunkte entlang der in Modell 4 untersuchten Kluft (s. Abb. 4-28).....	A-161
Abbildung 4-30: Nuklidstrom aus dem Nahfeld der Cäsium-Strontium-Fraktion, Variante 1	A-162
Abbildung 4-31: Nuklidstrom aus dem Nahfeld der Cäsium-Strontium-Fraktion, Variante 2	A-163
Abbildung 4-32: Nuklidstrom aus dem Nahfeld Cäsium-Strontium-Fraktion Variante 3	A-163
Abbildung 4-33: Radionuklidstrom für Cs-135 und Np-237 im Fernfeld, Variante 2 „frac“ (oben) und „fe“ (unten)	A-165
Abbildung 4-34: Radionuklidstrom für Cs-135 und Np-237 in Variante 2 „frac“ mit unterschiedlichen Eindringtiefen m	A-166
Abbildung 4-35: Strahlenexposition der Cäsium-Strontium-Fraktion in der Biosphäre für die Realisationen „frac“, „fe“ und „crush“ in Variante 1	A-167
Abbildung 4-36: Strahlenexposition der Cäsium-Strontium-Fraktion in der Biosphäre für die Realisationen „frac“, „fe“ und „crush“ in Variante 2	A-168
Abbildung 4-37: Strahlenexposition der Cäsium-Strontium-Fraktion in der Biosphäre für die Realisationen „frac“, „fe“ und „crush“ in Variante 3	A-168
Abbildung 4-38: Resultierende Strahlenexposition in der Biosphäre für die Variante 2 nach 880 m (grün) und 2 600 m (rot) Fernfeld.....	A-170
Abbildung 4-39: Vergleich der resultierenden Strahlenexpositionen in der Biosphäre für die Varianten 2 und 3 nach 880 m und 2 600 m Fernfeld	A-170

Abbildung 4-40: Nuklidstrom aus dem Nahfeld der Schlämme, Variante 1.....	A-171
Abbildung 4-41: Nuklidstrom aus dem Nahfeld der Schlämme, Variante 2.....	A-172
Abbildung 4-42: Nuklidstrom aus dem Nahfeld der Schlämme, Variante 3.....	A-172
Abbildung 4-43: Nuklidstrom aus dem Nahfeld der Fraktion Seltene Erden, Variante 1	A-173
Abbildung 4-44: Nuklidstrom aus dem Nahfeld der Fraktion Seltene Erden, Variante 2	A-173
Abbildung 4-45: Nuklidstrom aus dem Nahfeld der Fraktion Seltene Erden, Variante 3	A-174
Abbildung 4-46: Nuklidstrom aus dem Nahfeld der Fraktion Spaltprodukte, Variante 1	A-175
Abbildung 4-47: Nuklidstrom aus dem Nahfeld der Fraktion Spaltprodukte, Variante 2	A-175
Abbildung 4-48: Nuklidstrom aus dem Nahfeld der Fraktion Spaltprodukte, Variante 3	A-176
Abbildung 4-49: Strahlenexposition für die Variante 2 „fe“	A-177
Abbildung 4-50: Strahlenexposition der Schlämme sowie der Fraktionen Seltene Erden und Spaltprodukte in der Biosphäre für die drei Fernfeld- Realisationen, Variante 1	A-178
Abbildung 4-51: Strahlenexposition der Schlämme sowie der Fraktionen Seltene Erden und Spaltprodukte in der Biosphäre für die drei Fernfeld- Realisationen, Variante 2	A-178
Abbildung 4-52: Strahlenexposition der Schlämme sowie der Fraktionen Seltene Erden und Spaltprodukte in der Biosphäre für die drei Fernfeld- Realisationen, Variante 3	A-179
Abbildung 4-53: Ausbreitungscharakteristika für verschiedene Kluftanordnungen.....	A-179
Abbildung 4-54: Strömungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Kluftanordnung	A-180
Abbildung 4-55: Wärmefelder in Abhängigkeit von der Grundwasserströmung	A-181
Abbildung 4-56: Transportmodellierung mit einem Tracer	A-182
Abbildung 4-57: Ausbreitung von Cs-135 im Fernfeld mit natürlichem Wärmefeld ohne Berücksichtigung der Sorption im Granit nach 10 000 Jahren	A-182
Abbildung 4-58: Ausbreitung von Cs-135 im Fernfeld mit natürlichem Wärmefeld unter Berücksichtigung der Sorption im Granit	A-183
Abbildung 4-59: Grundwasserfließgeschwindigkeiten in rund 900 m Tiefe	A-185
Abbildung 4-60: Modell 2: Räumlicher und zeitlicher Verlauf des Fließpfades	A-185
Abbildung 4-61: Durchgeführte Parameter-Variationen	A-187
Abbildung 4-62: Darstellung der vorherrschenden Fließrichtung in den Klüften mit den Strömungsgeschwindigkeiten (links) und der Grundwasseroberfläche (rechts) als Hintergrundbilder	A-189

Abbildung 5-1:	Beispiel für den Import von Daten aus der Streckenkartierung, Bohrkernaufnahme und aus geophysikalischen Untertagemessungen sowie von Angaben zur Schicht-, Kontakt- oder Kluftorientierung in das „openGEO5“-Modell eines Salzstockes	A-217
Abbildung 5-2:	Auf der Grundlage geoelektrischer Messungen (vorwiegend mittels audiomagnetotellurischer Sondierung – AMTS) konstruierte geologisch-geophysikalische Profilschnitte, die in die 3D-Modellierung des geologischen Tiefenbaus des Gebietes „Kamennyj“ eingeflossen sind	A-218
Abbildung 5-3:	Draufsicht auf die Reliefkarte des Gebietes „Kamennyj“	A-218
Abbildung 5-4:	Leitkarte für die 3D-Modellierungen des geologischen Untergrundes im Gebiet „Kamennyj“, entworfen auf der Grundlage der bisher realisierten geophysikalischen Messprofile (siehe Abb. 2-3)	A-219
Abbildung 5-5:	Koordinaten- bzw. Messprofil-bezogene Eingabe von Erkundungsergebnissen in das geologische 3D-Modell des Gebietes „Kamennyj“	A-220
Abbildung 5-6:	Gegenüberstellung von konträren Vorstellungen zum strukturellen Bau des Gebietes „Jennissejskij“	A-222
Abbildung 5-7:	Beispiel für die Auswertung von mittels „openGEO5“ generierten geologisch-geophysikalischen 3D-Modellen für den Standort „Kamennyj“	A-224
Abbildung 8-1:	Prinzipieller Aufbau und Ausmaße des für die Standortuntersuchungen nutzbaren Flowmeters (inclusive Temperatur- und Salinitätsmessungen, links) und der Spektralen Gamma-Messsonde (rechts)	A-236
Abbildung 8-2:	Aufbau und Ausmaße der Messsonden für das vertikale seismische Profilieren (VSP, links) und die akustischen Bohrlochmessungen (SONIC, rechts)	A-237
Abbildung 8-3:	Beispiel für die mittels Akustischem Bohrlochfernsehen gewinnbaren Informationen zur Kluftausbildung und -orientierung in magmatischen Wirtsgesteinen	A-238
Abbildung 8-4:	Wärmetransportgleichung und auslegungsrelevante Größen	A-239
Abbildung 8-5:	Prinzip einer Peclet-Zahl-Analyse	A-241
Abbildung 8-6:	Bestimmung vertikaler Strömungsbewegungen mittels Peclet-Zahl-Analyse am Beispiel einer Bohrung in Deutschland [Clauser et al. 2002]	A-241

12 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1-1:	RT-2 - Kenndaten hochaktiver Abfälle	A-4
Tabelle 1-2:	RT-2 – Anfall verfestigter Abfälle	A-4
Tabelle 1-3:	Kennwerte der verfestigten HLW	A-6
Tabelle 1-4:	Auslaugungsgeschwindigkeit ausgewählter Radionuklide	A-6
Tabelle 1-5:	Radionuklidgehalt und -aktivität der Schlämme	A-7
Tabelle 1-6:	Radionuklidgehalt und –aktivität der Fraktion Cs-Sr	A-8
Tabelle 1-7::	Radionuklidgehalt und –aktivität der Fraktion Seltene Erden	A-9
Tabelle 1-8:	Radionuklidgehalt und –aktivität der Fraktion Spaltprodukte	A-10
Tabelle 1-9:	Gesamtaktivität der endzulagernden radioaktiven Abfälle	A-11
Tabelle 1-10:	Wärmeleistung der Fraktion Cs-Sr.....	A-12
Tabelle 1-11:	Wärmeleistung der Fraktion Seltene Erden	A-12
Tabelle 1-12:	Wärmeleistung der Fraktion Spaltprodukte	A-12
Tabelle 1-13:	BChK - Übersichtsdaten des Endlagerinventars	A-13
Tabelle 2-1:	Klimatische Bedingungen im Gebiet Krasnojarsk.....	A-17
Tabelle 2-2:	Chemische Zusammensetzung der Niederschläge, Flüsse und Quellen im Gebiet des Nizhnekansker Granitoidmassives (nach: [Zuev et al. 2000]).....	A-19
Tabelle 2-3:	Zusammenstellung von Erdbeben im SW-Teil der Sibirischen Plattform(nach: Arzhannikov et al. 2004).....	A-25
Tabelle 2-4:	Aus dem Erdbebenkatalog von Shebalin & Leydecker (1997) zusammengestellte Übersicht von Daten zu Erdbeben ab einer Intensität von 4 im Gebiet zwischen 52° bis 60° nördliche Breite und 88° bis 98° östliche Länge (bis zum Jahr 1988 erfaßte Erdbeben, Epizentralintensität nach der 12-stufigen MSK-Skala)	A-27
Tabelle 2-5:	Aus dem ISC-Katalog [ISC-Bulletin 2001] zusammengestellte Übersicht von Daten zu Erdbeben im Gebiet zwischen 52° bis 60° nördliche Breite und 88° bis 98° östliche Länge	A-28
Tabelle 2-6:	Modellvorstellungen zur Tiefenzonierung des geologischen Untergrundes im Gebiet des Nishnekansker Granitoidkomplexes aus: [Milovidov et al. 1998] (1 m/d entspricht etwa $1,2 \cdot 10^{-5}$ m/s).....	A-33
Tabelle 2-7:	Lithologie, Mächtigkeiten und wahrscheinliche Wasserdurchlässigkeiten der hydrogeologischen Zonen im Bereich des Nishnekansker Granitoidkomplexes	A-35
Tabelle 2-8:	Einteilung der im Umfeld des potenziellen Endlagerstandortes „Verchne-Itatskij“ möglicherweise auftretenden Störungszonen (nach: [Milovidov et al. 1998], für Kategorien I und V: [Anderson et al. 1996], [Anderson et al. 1998])	A-40

Tabelle 2-9:	Angaben zu den hydraulischen Durchlässigkeiten der in der Bohrung K-2 erbohrten Gesteine und zum Chemismus der beprobten Grundwässer (Quelle: VNIPI Promtehnologii, Moskau).....	A-44
Tabelle 2-10:	Mineralogische Zusammensetzung der wichtigsten Gesteinstypen des Nizhnekansker Granitoidkomplexes sowie der Spessartit-Gänge und der archaischen Rahmengesteine (Granitgneis), in Vol-%.....	A-47
Tabelle 2-11:	Chemische Zusammensetzung der Hauptgesteinstypen des Nizhnekansker Granitoidkomplexes (Kernproben der Bohrungen 1-I und 1-K, aus: Laverov et al. 2002), in Gew.-%.....	A-47
Tabelle 2-12:	Mittlere chemische Zusammensetzung der häufigsten Gesteinstypen des Nizhnekansker Granitoidmassivs (Oberflächenproben aus dem Gebiet „Itatskij“, aus: [Anderson et al. 1998]).....	A-48
Tabelle 2-13:	Zusammenstellung der wichtigsten physikomechanischen Parameter für die Hauptgesteinstypen des Nizhnekansker Granitoidmassivs (aus: [Anderson et al. 1998]).....	A-50
Tabelle 2-14:	Mittlere wärmephysikalische Parameter für die wichtigsten Gesteinsvarietäten des Nizhnekansker Intrusivkomplexes (aus: [Laverov et al. 2002]).....	A-52
Tabelle 2-15:	Vergleich des Am-Sorptionsvermögens der gesteinsbildenden Minerale von Nizhnekansker Granodioriten (aus: [Anderson et al. 2003]).....	A-54
Tabelle 2-16:	Verteilungskoeffizienten für Am, Pu und Np in den Granitoiden des Nizhnekansker Granitoidkomplexes (bestimmt an Probenpulvern, aus: [Anderson et al. 2003])	A-54
Tabelle 2-17:	Sorption von Am, Pu und Np an nicht aufgemahlene Gesteinsproben der Erkundungsbohrung 1-K (K _a – oberflächiger Verteilungskoeffizient, als Verhältnis zwischen dem Radionuklidgehalt pro Flächeneinheit der Gesteinsprobe und der Radionuklidkonzentration der Lösung; in cm; aus: [Anderson et al. 2001])	A-55
Tabelle 2-18:	Verteilungskoeffizienten K _d für langlebige Radionuklide, bestimmt an nicht aufgemahlene Granit- und Quarzdioritproben des Nishnekansker Massivs (nach: [Anderson et al. 2003])	A-55
Tabelle 2-19:	Vergleich der Radionuklid-Rückhalteeigenschaften monolithischer und geklüfteter Granitoide des Nishnekansker Massivs (Modellannahmen siehe Text, nach: [Anderson et al. 2000])	A-56
Tabelle 2-20:	Zusammenstellung der auf den möglichen Endlager-Standorten „Verchne Itatskij“ und „Jennissejskij“ durchgeführten geophysikalischen Untersuchungen	A-60

Tabelle 2-21:	Zusammenfassung der Bohr- und Ausbauparameter der in den Gebieten „Verchne-Itatskij“ und „Jennissejskij“ niedergebrachten Erkundungsbohrungen.....	A-64
Tabelle 2-22:	In den Bohrungen 1-I und 1-K eingesetzte geophysikalische Untersuchungsverfahren (Messungen durch „Südliche Geophysikalische Expedition“, Abakan)	A-65
Tabelle 3-1:	Dichte der in den Berechnungen verwendeten Materialien	81
Tabelle 3-2:	Parameter der Modellfunktionen des thermischen Verhaltens des Wirtsgesteins	82
Tabelle 3-3:	Gegenüberstellung charakteristischer Größen bei der Einlagerung von 2 bzw. 3 Behältern pro Bohrloch.....	91
Tabelle 3-4:	Modellgrößen der Variation	95
Tabelle 3-5:	Einfluss der Variationen einzelner Parameter auf die Maximaltemperatur des verglasten Abfalls und des Bentonits (++) größer, o geringer, - kein Einfluss).....	98
Tabelle 3-6:	Chemische Zusammensetzung der Stähle 08Ch18N10T und 12Ch18N10T nach GOST 5632-72	107
Tabelle 3-7:	Chemische Zusammensetzung in Belgien untersuchter Stähle für Endlagercontainer	107
Tabelle 3-8:	TSDE-Projekt – untersuchte Cr-Ni Stähle [Bechthold et al., 2003]	108
Tabelle 3-9:	TSDE-Projekt – Korrosionsraten von Cr-Ni-Stählen	108
Tabelle 4-1:	Modellparameter für die zweidimensionalen schematischen Rechnungen.....	126
Tabelle 4-2	Hydraulischer Parameter für die Granite des Nishnekansker Massivs [Anderson et al. 1998], [Anderson et al 2001], [Shabalev et al. 2001], Velichkin et al. 2001].....	130
Tabelle 4-3:	Vergleich der Durchlässigkeiten für Granit und Gneis aus russischem, schweizerischem und deutschem Datenbestand in m/s.	131
Tabelle 4-4:	Hydrogeologisch relevante Schichtgrenzen.....	133
Tabelle 4-5:	Niederschlag und Evapotranspiration in Krasnojarsk.....	136
Tabelle 4-6:	Parameter zum Wärmetransport.....	137
Tabelle 4-7:	Parameter für die Nahfeldmodellierung der Cs-Sr Fraktion	143
Tabelle 4-8:	Parameter für die Nahfeldmodellierung der Fraktionen Schlamm, Seltene Erden und Spaltprodukte	144
Tabelle 4-9:	Radionuklid-Inventare der konstruierten Gebinde 10 Jahre nach der Entnahme aus dem Reaktor.....	145
Tabelle 4-10:	Mobilisierungsraten.....	146
Tabelle 4-11:	Löslichkeiten	147
Tabelle 4-12:	Verteilungskoeffizient der Radionuklide im Bentonit	147

Tabelle 4-13:	Volumenstrom der verschiedenen Abfallfraktionen durch die EDZ	148
Tabelle 4-14:	Verteilung der Radionuklide auf die verschiedenen Abfallarten	150
Tabelle 4-15:	Parameter für die verschiedenen Fernfeld- Varianten „crush“, „frac“ und „fe“	151
Tabelle 4-16:	Verteilungskoeffizienten der einzelnen Radionuklide im Granit.....	152
Tabelle 4-17:	In der Biosphäre zusätzlich betrachtete Radionuklide	152
Tabelle 4-18:	Modellparameter für das Biosphärenmodell	153
Tabelle 4-19:	Ergebnisse der Biosphärenmodelle für die drei Nah- und Fernfeld-Realisationen für die Cs-Sr-Fraktion.....	169
Tabelle 4-20:	Eingabeparameter der verschiedenen Programme	193
 Tabelle 6-1:	 Zusammenstellung der für Langzeitbetrachtungen wichtigsten endogenen und exogenen Einflussparameter auf die Sicherheit eines unterirdischen HAW-Endlagers	 209
 Tabelle 8-1:	 Empfehlungen zur Erweiterung des Kenntnisstandes zum strukturgeologischen Bau des Gesteinsmassivs	 227
Tabelle 8-2:	Empfohlene Erweiterungen des Standortuntersuchungsprogramms zur besseren Charakterisierung der hydrogeologischen Bedingungen im Endlagerumfeld	228
Tabelle 8-3:	Empfehlungen zur Erweiterung der Kenntnisse bezüglich der seismischen und neotektonischen Gefährdung sowie des Spannungszustandes und der uplift-Raten des Untersuchungsgebietes.....	229
Tabelle 8-4:	Empfehlungen zur Vervollständigung der Daten zu den Wirtsgesteinseigenschaften sowie zur Untersuchung der Wirksamkeit der technischen und geotechnischen Barrieren	230
Tabelle 8-5:	Übersicht zu den in Bohrungen einsetzbaren geophysikalischen Methoden für den Nachweis und die Charakterisierung von Klüften bzw. Störungszonen	234
Tabelle 8-6:	Vorschläge zur Ergänzung des Bohrlochgeophysik-Messprogramms für den Nachweis von Störungszonen	235

Teil B
Endlagerung in Porphyrit

INHALT:

1	EINLEITUNG	B-3
2	INVENTAR	B-6
2.1	Abfallmengengerüst	B-6
2.3	Abfallbehälter.....	B-7
2.4	Abfallmatrix	B-7
2.5	Aktivität und Radionuklidgehalt.....	B-7
2.6	Wärmeleistung	B-9
2.7	Inventarübersicht.....	B-10
3	STANDORTBESCHREIBUNG	B-11
3.1	Regionalgeologische Lage des Gebietes.....	B-11
3.2	Lithologische Zusammensetzung der Endlager-Wirtsgesteine.....	B-15
3.3	Auftreten von Bruchstörungen und Klüften im Untersuchungsgebiet.....	B-16
3.4	Neotektonische Bewegungen und seismische Aktivitäten im Gebiet Majak	B-20
3.5	Hydrogeologie des Untersuchungsgebietes	B-22
3.6	Physiko-mechanische und wärmephysikalische Eigenschaften der Endlager- Wirtsgesteine.....	B-24
4	ENDLAGERKONZEPT	B-27
4.1	Stark wärmeentwickelnde Abfälle	B-27
4.2	Schwach wärmeentwickelnde Abfälle	B-27
4.3	Thermische Auslegungsberechnungen.....	B-27
4.3.1	Konzeptuelles Modell	B-27
4.3.1.1	Umgebungsbedingungen.....	B-28
4.3.1.2	Behälter und dessen Wärmefreisetzung	B-28
4.3.1.3	Thermische Materialparameter	B-29
4.3.1.4	Modellgeometrie	B-31
4.3.2	Berechnungsergebnisse	B-31
5	STRÖMUNGS- UND TRANSPORTMODELLIERUNGEN FÜR DEN STANDORT MAJAK	B-33
5.1	Das Untersuchungsgebiet.....	B-33
5.2	Das hydrogeologische Strukturmodell.....	B-34
5.3	Stationäre Strömungsmodellierung ohne Berücksichtigung des natürlichen Wärmefeldes	B-36
5.4	Transportmodellierung ohne Berücksichtigung des natürlichen Wärmefeldes	B-37
4.5	Transportmodellierung unter Berücksichtigung des natürlichen Wärmefeldes	B-38
5.5	Diskussion und Ausblick	B-41
6	LITERATUR.....	B-42
7	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	B-45
8	TABELLENVERZEICHNIS	B-47

1 EINLEITUNG

Entsprechend der in der Einleitung zum Abschlußbericht erwähnten Abstimmung der Projektpartner wurde als Referenzfall für die Erarbeitung eines detaillierten Programms der weiteren Standortuntersuchungen für ein geologisches Endlager in einer Porphyritformation auf der Grundlage des in Teil A Kap. 1.2 beschriebenen methodischen Ansatzes der Standort der Produktionsvereinigung Majak ausgewählt. Für die Endlagerung in dieser Formation sind die hochradioaktiven Abfälle der Produktionsvereinigung Majak vorgesehen.

Die Produktionsvereinigung Majak befindet sich im Gebiet Tscheljabinsk in der Nähe der Stadt Osersk im Südrural (Abb. 1-1).

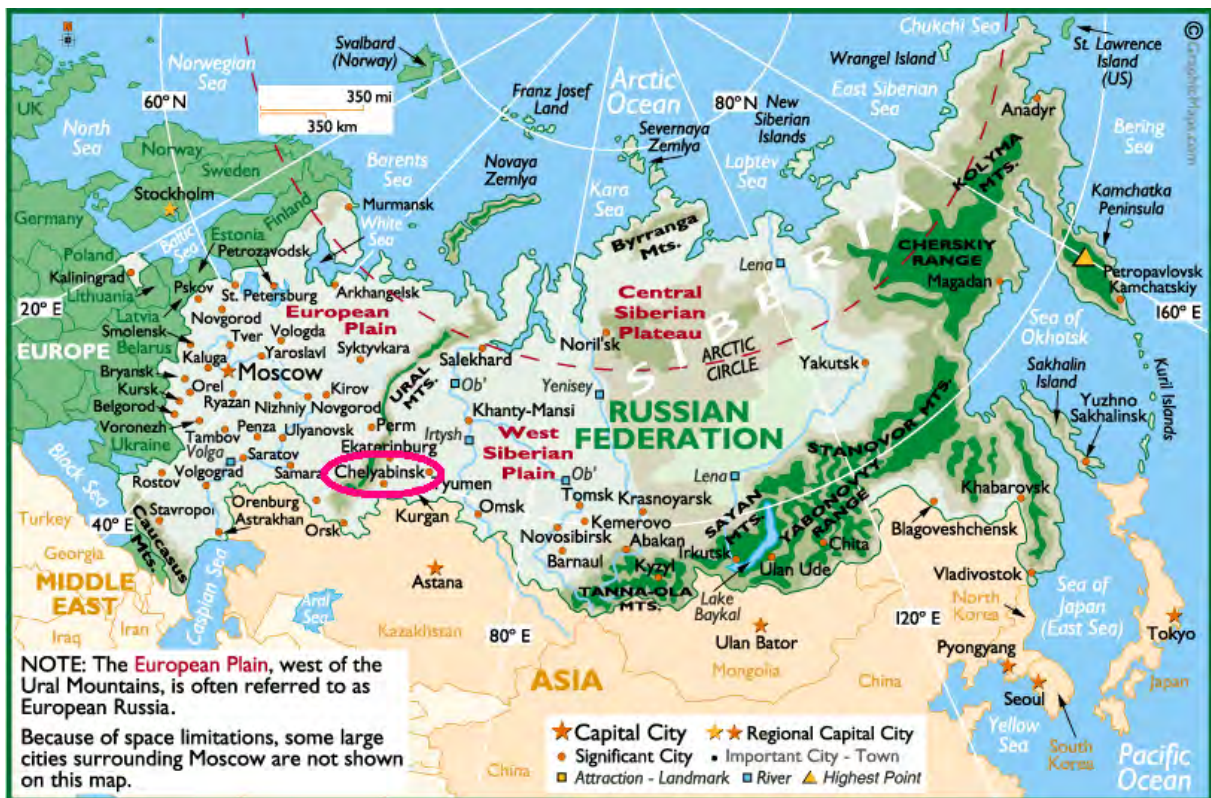


Abb. 1-1: Standort der Produktionsvereinigung Majak

Die Errichtung von Majak als Produktionsstätte für Waffenplutonium begann im November 1945. Der erste Reaktor wurde 1948 in Betrieb genommen. Insgesamt wurde an diesem Standort sechs Reaktoren für die Plutoniumproduktion errichtet, von denen fünf Graphit-moderierte und der sechste ursprünglich ein Leichtwasser-moderierter Reaktor war. Darüber hinaus gibt es am Standort einen Leichtwasserreaktor für die zivile Isotopenproduktion.



Abb. 1-2: Majak - Radiochemische Produktionsanlagen für die Plutoniumgewinnung

Die Reaktoren für die Plutoniumproduktion sind stillgelegt. Die erste radiochemische Produktionsanlage wurde 1948 in Betrieb genommen und bis 1961 betrieben. Die zweite radiochemische Anlage RT-1 wurde 1956 als Anlage für die Produktion von Waffenplutonium in Betrieb genommen.



Abb. 1-3: Majak RT-1 Zwischenlager für ausgediente Brennelemente

1976 wurde RT-1 zu einer Anlage für die Wiederaufbereitung von ausgedientem Kernbrennstoff verschiedener Reaktortypen (Schnelle Brüter BN-30, BN-600, Reaktoren der Atom-U-Boote und Atomeisbrecher, Leistungsreaktoren WWER-440) umgebaut. Diese Anlage ist auch gegenwärtig in Betrieb.

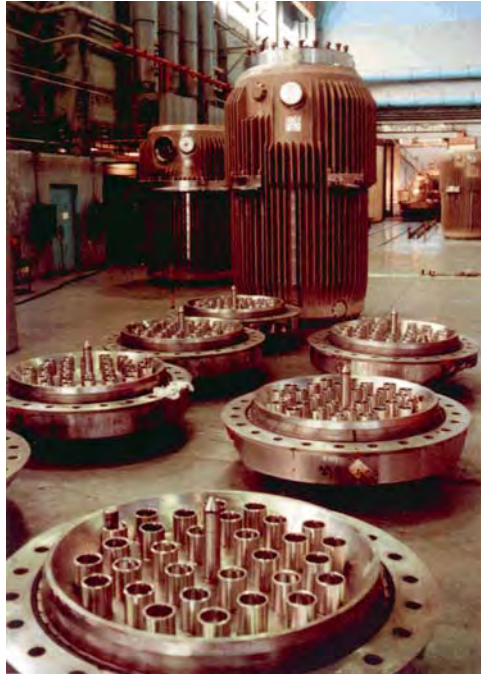


Abb. 1-4: Majak RT-1 Transportcontainer für ausgediente Brennelemente

Eine erste Anlage für die Verglasung hochradioaktiver Abfälle aus der radiochemischen Produktion wurde 1987 in Betrieb genommen, die dreizehn Monate betrieben wurde. 1991 wurde eine neue Verglasungsanlage in Betrieb genommen.



Abb. 1-5: Majak - Zwischenlager für verglaste HLW

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass am Standort gegenwärtig zwei Anlagen für die MOX-Kernbrennstoffproduktion in Betrieb sind.

2 INVENTAR

2.1 Abfallmengengerüst

Die radioaktiven Abfälle der Produktionsvereinigung Majak, die für die Endlagerung in einer tiefen Porphyritformation am Standort Majak vorgesehen sind, resultieren aus den o. g. Produktionsprozessen:

- Hochradioaktive Abfälle aus der Waffenplutoniumproduktion
- Hochradioaktive flüssige Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von ausgedientem Kernbrennstoff in der Anlage RT-1.

Nach [RADLEG, 1997] sind in Majak ca. 53 000 m³ verglaste hochaktive Abfälle aus der früheren Plutoniumproduktion mit einer Gesamtaktivität von ca. $1,06 \times 10^{19}$ Bq aus Plutoniumproduktion in einem Zwischenlager und ca. 30.700 m³ flüssige hochaktive Abfälle aus der Wiederaufbereitung von ausgedientem Kernbrennstoff in der Anlage RT-1 mit einer Gesamtaktivität von ca. $1,42 \times 10^{19}$ Bq in Tanks gelagert.

Die bereits verglasten hochradioaktiven Abfälle sind in einer Matrix aus Bor-Phosphatglas eingeschlossen und sind in Austenitstahlbehälter konditioniert. Es ist vorgesehen, die gegenwärtig zwischengelagerten flüssigen hochaktiven Abfälle gleichfalls in eine Matrix aus Bor-Phosphatglas einzuschließen. Daneben werden andere Matrixmaterialien auf ihre Eignung für den Einschluss der hochradioaktiven flüssigen Abfälle untersucht (Basalt, Porphyrite mit Zusätzen von Gabbro-Diabasen und Chromiten) [Minaev et al., 2001].

Nach den Angaben des VNIPI PT sollen die verglasten Abfälle gleichfalls in Austenitstahlbehälter konditioniert werden.

Da die Technologie der Verarbeitung der flüssigen radioaktiven Abfälle (Fraktionierung) sowie das Konditionierungsverfahren noch nicht feststehen, sind Angaben zum Volumen und zur Menge der endzulagernden Abfälle mit großen Unsicherheiten behaftet. Deshalb wurden als Grundlage für die Untersuchungen die im weiteren aufgeführten Angaben angenommen. Die Unsicherheiten dieser Angaben beeinflussen jedoch nicht wesentlich die grundsätzlichen Ergebnisse der Untersuchungen

Das Gesamtvolumen der verglasten hochradioaktiven Abfälle aus der radiochemischen Produktion wird mit 6400 m³ mit einem Gesamtgewicht von 19200 t und die Gesamtanzahl der endzulagernden Gebinde mit 32200 Stück angegeben. Die Aktivität dieser Abfälle wird im wesentlichen von dem Gehalt an ⁹⁰Sr und ¹³⁷Cs bestimmt. Die Wärmeentwicklung der verfestigten Abfälle soll nach 30 Jahren Zwischenlagerung ca. 0,2 W/l betragen.

Die Technologie zur Wiederaufarbeitung in der Anlage RT-1 sieht die Herauslösung von zwei Fraktionen aus den flüssigen Abfällen der Wiederaufarbeitung vor, die sich in der Restwärmeentwicklung und der potenziellen radiologischen Gefahr unterscheiden. Es ist vorgesehen, diese Fraktionen gleichfalls in eine Bor-Phosphat-Glas Matrix in Austenitstahlbehälter zu konditionieren.

Die Mengen der endzulagernden verfestigten Abfälle werden von VNIPI PT wie folgt angegeben (Tab. 2-1):

Fraktion	Gesamtvolumen m ³	Gesamtmasse t	Gebinde gesamt	Gebinde pro Jahr
Cs-Sr	2600	7800	97500	3900
Seltene Erden und Spaltprodukte	3900	11700	19500	780

Tabelle 2-1: Majak – Anfall endzulagernder Abfälle aus der Anlage RT-1

2.3 Abfallbehälter

Entsprechend den von VNIPI PT erhaltenen Informationen sollen sich die verglasten hochaktiven Abfälle aus der radiochemischen Produktion in Behältern aus Kohlenstoffstahl befinden, die für die Endlagerung in Austenitstahlbehälter verpackt werden sollen. Der äußere Austenitstahlbehälter hat einen Durchmesser von 600 mm und eine Höhe von 1000 mm.

Die verglaste Fraktion Cs-Sr soll in einem Austenitstahlbehälter mit einem Außendurchmesser von 450 mm und einer Höhe von 1000 mm endgelagert werden.

Die Fraktion Seltene Erden-Spaltprodukte soll in Austenitstahlbehältern mit einem Außendurchmesser von 600 mm und einer Höhe von 1000 mm endgelagert werden.

Angaben oder Skizzen zur Konstruktion der jeweiligen Behälter lagen nicht vor.

Die Korrosionsrate der Austenitstahlbehälter wird wie folgt angegeben:

- Bei 150 °C und in Wasserdampfatosphäre – 2×10^{-3} mm/a
- Bei 75 °C im Kontakt mit Bentonit – 1×10^{-3} mm/a

2.4 Abfallmatrix

Für die Konditionierung der fraktionierten hochradioaktiven Abfälle werden mehrere Varianten untersucht. Die Hauptvariante ist die Verglasung nach dem in Majak verfügbaren Verfahren mittels Bor-Phosphat-Glas. Die Dichte des Phosphatglases beträgt 2,36 g/cm³ und die Wärmeleitfähigkeit 2 – 2,5 W/m^{°K}. Die Auslaugungsgeschwindigkeit der Phosphatgläser wird zwischen 1×10^{-7} bis 3×10^{-6} g/cm²·d angegeben. Die zulässige Höchsttemperatur der Matrix wird mit 400 °C angegeben.

Nach [Minaev et al., 2001] werden Matrizen auf der Basis von basaltartigen und Chromit-Niobat Materialien untersucht. Die durchgeführten Untersuchungen derartiger Matrizen haben gezeigt, dass hochaktive Abfälle mit bis zu 20 Gew.% Plutonium eingeschlossen werden können. Die Auslaugungsrate dieser Matrizen soll im Bereich von 10^{-7} bis 10^{-8} g/cm²·d liegen.

2.5 Aktivität und Radionuklidgehalt

Die verfügbaren Daten zum Radionuklidgehalt der einzelnen Abfallströme und zur Aktivität sind im weiteren gegeben.

Die Radionuklidzusammensetzung und die mittlere Aktivität der Gebinde mit den bereits verglasten HLW aus der früheren radiochemischen Produktion sind in der Tabelle 2-2 gegeben.

Mittlere Aktivität, Ci/l	>30
Radionuklidgehalt, %	
$^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$	37,5
^{137}Cs	37,5
^{134}Cs	11
^{147}Pm	11
$^{144}\text{Ce} + ^{144}\text{Pr}$	1,5
$^{106}\text{Ru} + ^{106}\text{Rh}$	1,5

Tabelle 2-2: Majak – Aktivität und Radionuklidgehalt der verglasten HLW

Für die Gebinde mit den Fraktionen Cs-Sr sowie Seltene Erden/Spaltprodukte liegen die in der Tabelle 2-3 aufgeführten Daten zur mittleren Aktivität und der Radionuklidzusammensetzung vor.

Mittlere Aktivität, Ci/l	> 1000	
Radionuklidgehalt, %		
	Fraktion Cs-Sr	Fraktion Seltene Erden + Spaltprodukte
⁹⁰ Sr	35	2x10 ⁻²
¹³⁷ Cs	57	3,5x10 ⁻²
¹⁰⁶ Ru	6	-
¹²⁵ Sb	0,6	-
¹³⁴ Cs	1,6	-
¹⁴⁴ Ce	7x10 ⁻³	76
¹⁵⁴ Eu	-	20
²⁴¹ Am	2x10 ⁻⁴	1
²⁴⁴ Cm	6x10 ⁻⁴	3
²³⁷ Np	-	2x10 ⁻³
ΣU, g/t	≤0,6	≤62
ΣPu, g/t	≤0,3	≤31

Tabelle 2-3: Majak – Aktivität und Radionuklidgehalt der Gebinde mit fraktionierten HLW

Für den Gehalt von langlebigen Radionukliden in den Gebinden mit den Fraktionen Cs-Sr sowie Seltene Erden/Spaltprodukte und deren Aktivität liegen keine Angaben vor.

Eine Vorstellung über die Konzentration und Aktivität dieser Radionuklide in den Abfallgebinden liefern die verfügbaren Daten zum bestrahlten Kernbrennstoff der Reaktoren WWER-440, die in der Tabelle 2-4 zusammengestellt sind.

Radionuklid	Konzentration G/tU	Spezifische Aktivität Bq/tU
²³⁵ U	1,27 E4	1,06 E9
²³⁶ U	4,28 E3	1,04 E10
²³⁸ U	9,42 E5	1,18 E10
²³⁸ Pu*	7,41E1	4,75 E13
²³⁹ Pu	5,49 E3	1,25 E13
²⁴⁰ Pu	1,98 E3	1,70 E12
²⁴¹ Pu	7,97 E2	2,91 E15
²⁴¹ Am*	5,17 E2	6,62 E13
²⁴² Pu	3,70 E2	5,44 E10
^{242m} Am*	2,51 E-1	9,14 E10
²⁴² Am*	3,00 E-6	9,07 E10
²⁴² Cm*	6,12 E-4	7,59 E10
²⁴³ Am	6,93 E1	5,18 E11
²⁴³ Cm*	1,25 E-1	2,41 E11
²⁴⁴ Pu	1,24 E-2	8,21 E3
²⁴⁴ Cm*	1,48 E1	4,48 E13
²⁴⁵ Cm	9,68 E-1	6,21 E9
²⁴⁶ Cm	1,06 E-1	1,29 E9
²⁴⁷ Cm	1,23 E-3	4,27 E3
²⁴⁸ Cm	1,72 E-5	2,27 E3

* 10 Jahre Abklingzeit

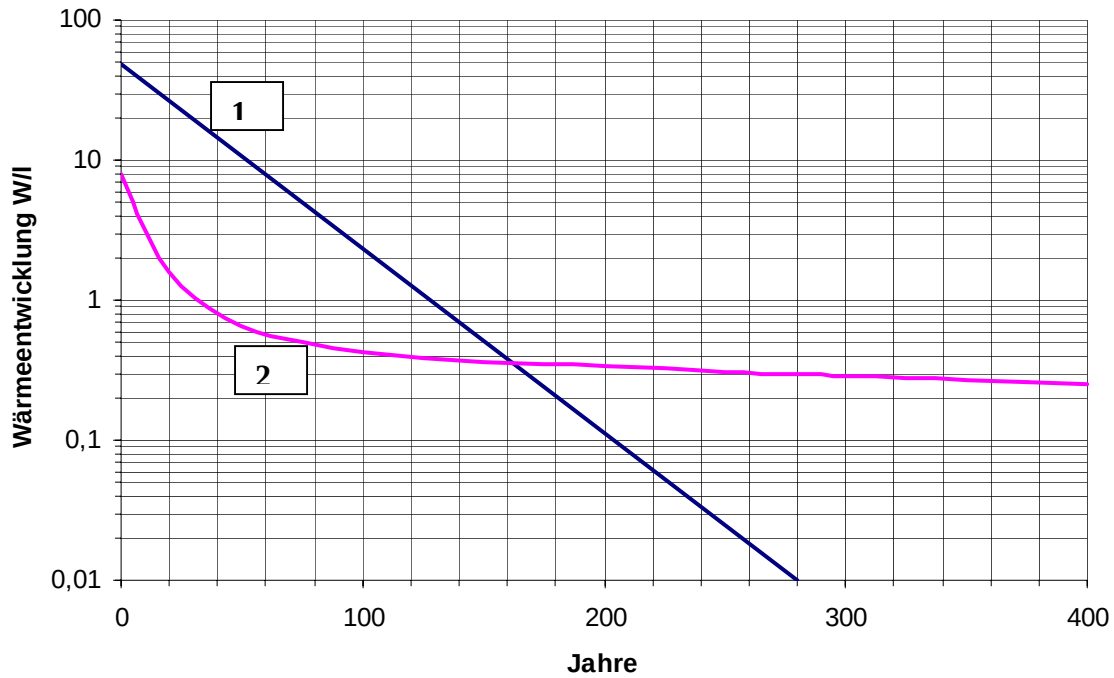
Tabelle 2-4: Konzentration und Aktivität von Aktinoiden im bestrahlten Kernbrennstoff WWER-440

2.6 Wärmeleistung

Die Wärmeleistung der Gebinde mit den verglasten HLW wird im wesentlichen durch den Gehalt an ¹³⁷Cs und ⁹⁰Sr bestimmt. Nach 30 Jahren Zwischenlagerung der Gebinde beträgt die spezifische Wärmeleistung nicht mehr als 0,2W/l.

Die berechnete Wärmeleistung der verfestigten Fraktion Cs-Sr beträgt nach 50 Jahren 10 W/l und der Fraktion Seltene Erden/ Spaltprodukte 0,6 W/l.

Auf der Abbildung 2-6 ist die Entwicklung der mittleren Wärmeerzeugung der Gebinde mit den beiden Fraktionen dargestellt.



1. Verfestigte Fraktion Sr-Cs u. Rafinat des VI. Zyklus
2. Verfestigte Fraktionen Seltene Erden/Spaltprodukte

Abb. 2-1: Zeitliche Entwicklung der Wärmeleistung der verglasten HLW-Fractionen

2.7 Inventarübersicht

Eine zusammenfassende Übersicht über das für die Endlagerung vorgesehene Inventar ist in der Tabelle 2-5 gegeben.

Bezeichnung	Maßeinheit	Verfestigte HLW	Fraktionen nach BE-Wiederaufbereitung	
			Cs+Sr	SE+SP*
1. Berechnete Volumina der verfestigten Abfälle	t m³	19200 6400	7800 2600	11700 3900
2. Spezifische Wärmeentwicklung:				
- nach 30 Jahren Lagerung der Schlämme	W/l	0,2	-	-
- nach 50 Jahren Lagerung der BE	W/l	-	10,0	0,6
3. Daten der Abfallcontainer:				
- Durchmesser	mm	600	450	600
- Höhe	mm	1000	1000	1000
- Abfallvolumen pro Container	l	200	80	200
- Abfallmasse pro Container	kg	600	264	760
4. Gesamtanzahl der Abfallcontainer	Stck.	32000	97500	19500
5. Jährliche Anlieferung der Gebinde	Stck.	1280	3900	780
6. Wärmeentwicklung der Abfälle in den Containern	W/lfd.m	40	800	120
7. Spezifische Aktivität der Abfälle	Ci/l	>30	>1000	>30

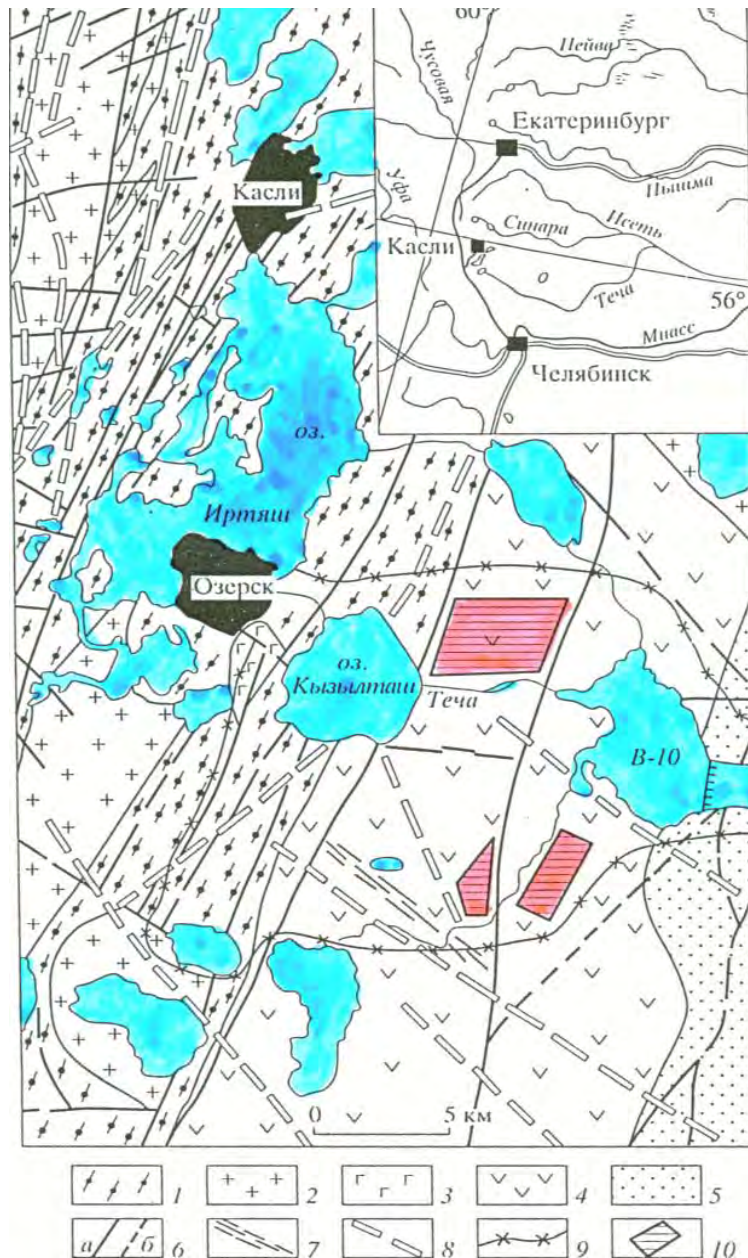
*SE+SP – Fraktionen Seltene Erden und Spaltprodukte

Tabelle 2-5: Majak – Übersicht über das endzulagernde Inventar

3 STANDORTBESCHREIBUNG

3.1 Regionalgeologische Lage des Gebietes

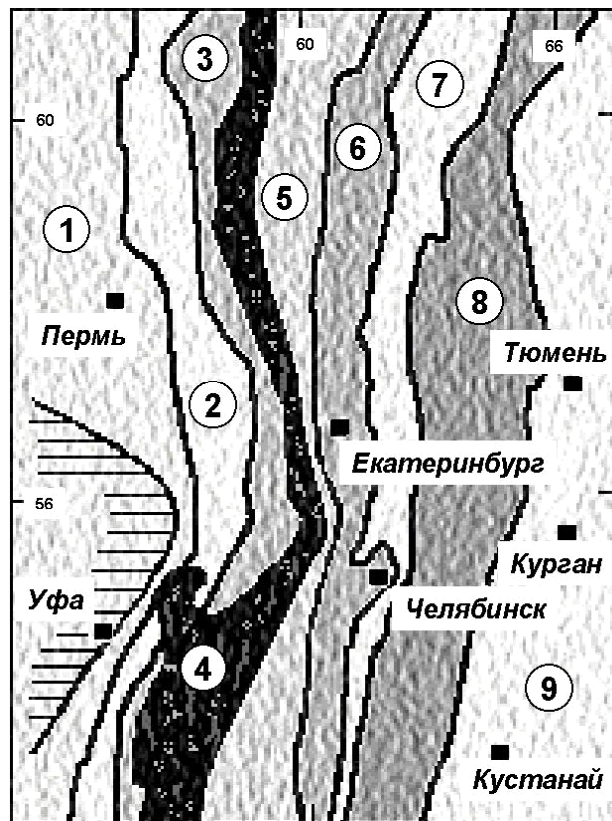
Das Territorium der Produktionsvereinigung Majak und des von russischer Seite innerhalb der Sanitären Schutzzone (SSZ) dieses Betriebes geplanten HAW-Endlagers liegt am Osthang des mittleren bis südlichen Urals, im Tscheljabinsker Gebiet (Abb. 3-1).



Symbole: 1 – Gneis-Amphibolit-Komplex ($Pr_3 - Pz_1$), 2 – Granite-Granodiorite (Pz_1), 3 – Gabbro (Pz_1), 4 – vulkanogen-sedimentärer Komplex ($S_1 - D_1$), 5 – vulkanogen-sedimentärer Komplex (C_{1-2}), 6 – Störungszonen (a – festgestellt, б – angenommen), 7 – Schieferungszonen, 8 – rezent aktive Störungen, 9 – Grenze der sanitären Schutzzone, 10 – Gebiete für weitere detaillierte Untersuchungen

Abb. 3-1: Lage der vom IGEM für Detailuntersuchungen empfohlenen potenziellen Endlagerstandorte im Umfeld der Produktionsvereinigung Majak (aus: [Laverov et al. 2000])

Dieser Teil des Urals, d. h. des Verschweißungsgebietes der alten, präkambrisch gebildeten Europäischen und Asiatischen Plattformen, ist der Übergangsbereich zwischen dem Faltungsgürtel des Urals und der Westsibirischen Platte. Im regionalgeologischen Sinn wird das Majak-Territorium der Ostural-Erhebung zugeordnet (Abb. 3-2). Nach [Kononenko et al. 1990] werden westlich der Produktionsvereinigung Majak das Zentrale Hebungsgebiet des Urals und die Tagilsker–Magnitogorsker Senke unterschieden, während sich östlich die Ostural-Senke, die Hinterural-Erhebung und die Tjumen-Kustanaj-Senke an das Majak-Territorium anschließen (Abb. 3-2).



Ausgehaltene Strukturzonen: 1 – Ostteil der Osteuropäischen Plattform, mit extra hervorgehobener Kontur des Ufimscher Vorsprungs, 2 – Vorural-Randsenke, 3 – Faltungszone des Westurals, 4 – Zentrale Ural-Erhebung, 5 – Tagiler-Magnitogorsker Senke, 6 – Ostural-Erhebung, 7 – Ostural-Senke, 8 – Hinterural-Erhebung, 9 – Tjumen-Kustanajsker Senke

Abb. 3-2: Tektonisches Schema des Urals und der östlichen Randgebiete der Osteuropäischen Plattform (Kononenko et al. 1990, aus: Velichkin et al. 2003)

Die Ostural-Erhebung stellt eine langgezogene, submeridional streichende Faltungsstruktur dar, die sich aus mehreren großen Antiklinalen, getrennt durch Synklinallzonen, zusammensetzt.

Die Region um den potenziellen Endlagerstandort gliedert sich in folgende Zonen:

- *Ostural-Erhebung*
 - Sysertscho-Ilmenogorsker Megaantiklinorium
 - Kysyltaschsker Synklinorium und
 - Argajaschsker Sattelstruktur
- *Ostural-Senke bzw. -Depression*
 - Kamensker Synklinorium
 - Tetscha-Brodsker Synklinale.

Die Produktionsvereinigung Majak liegt innerhalb des Kysyltaschsker Synklinoriums.

Das Sysertsko-Ilmenogorsker Megaantiklinorium wird im Umfeld des geplanten Endlagers durch das Vischnevogorsko-Ilmenogorsker Antiklinorium vertreten, das an den westlichen Rand der Sanitären Schutzzone Majaks angrenzt. Gebildet wird es hauptsächlich aus Gneisen, Magmatiten, Glimmerschiefern und kristallinen Schiefern, wahrscheinlich oberproterozoischen Alters.

Das Kysyltaschsker Synklinorium setzt sich innerhalb der SSZ aus alt- und mittelpaläozoischen Gesteinen zusammen. Im Altpaläozoikum treten Marmor, Gneise und kristalline Schiefer auf, während das Mittelpaläozoikum aus vulkanogen-sedimentären Gesteinen des S_2 - D_1 besteht, wie Tuffe und Laven von Andesit-Basalt-Porphyrten.

Der östliche Flügel des Kysyltaschsker Synklinoriums grenzt an die große Argajaschsker Sattelstruktur, die sich submeridial etwa zwischen dem Scheitel der Gorgensker Synklinale und der Argajaschsker Überschiebung hinzieht. Sie wird aus proterozoischen Gesteinen zusammengesetzt: Marmore, kristalline Schiefer und Gneise, die schmale submeridionale Falten mit einem steilen Einfallen der Schenkel bilden, verkompliziert durch eine Serie von großen tektonischen Störungen mit der selben Streichrichtung. Sie können z. T. bis in eine Tiefe von mindestens 3,5 km verfolgt werden.

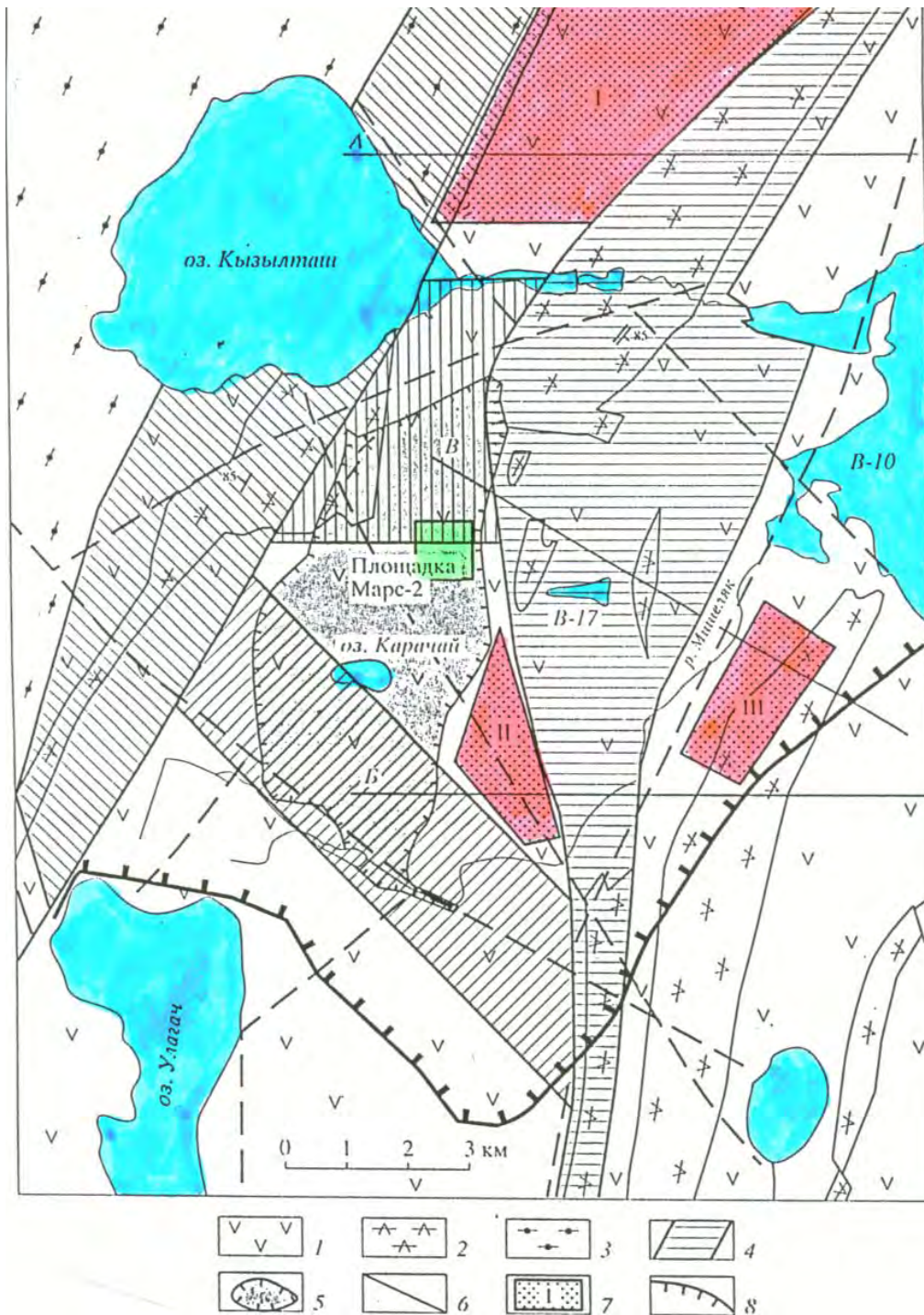
Durch die Argajaschsker Störung, die ihrem Charakter nach einer Über- bzw. Aufschiebung entspricht, wurden die Silur-Devon-Gesteine auf die terrigen-karbonatischen Ablagerungen des frühen Karbons überschoben. Die letzteren bilden die Sobolevsker Synklinale, die hier die äußerste westliche Struktur des Kamensker Synklinoriums der Ostural-Senke darstellt.

Aus diesen Beschreibungen wird deutlich, dass das Gebiet um die Produktionsvereinigung Majak durch einen komplizierten geologischen, mosaikartigen Blockaufbau (Abb. 3-3) charakterisiert ist. Innerhalb dieser Blockstruktur gehört das Majak-Territorium zum Isetsker Block. Die Bildung der verschiedenen Blöcke ist auf mächtige, im späten Neogen bis Quartär aktivierte tektonische Störungszonen zurückzuführen [Sigov & Schub 1972].

Zur Bewertung des Eignungsgrades des Majak-Umfeldes für ein HAW-Endlager erfolgten Ende der 80er Jahre durch VNIPI PT intensive geologische Erkundungsarbeiten. Im Rahmen dieser Arbeiten wurden auf dem Gebiet „Mars-2“ (Abb. 3-3) auf einer Fläche von 0,25 km² mehrere, bis zu 1200 m tiefe Erkundungsbohrungen niedergebracht, in denen umfangreiche hydrogeologische Untersuchungen realisiert wurden.

Detaillierte Informationen zur strukturell-tektonischen Entwicklung der Südural-Region liegen im Ergebnis von IGEM-Arbeiten vor, die bis Mitte der 90er Jahre erfolgten [Velichkin et al. 1993, 1994]) und unlängst insbesondere bezüglich der vorherrschenden Spannungsregime und Deformationsereignisse ergänzt wurden [Velichkin et al. 2003]. Im Ergebnis der IGEM-Untersuchungen wurden innerhalb der Sanitären Schutzzone (SSZ) zwei Gebiete mit Flächen von 1,5 bzw. 3 km² für weitergehende Untersuchungen empfohlen (Abb. 3-3).

Ausgehend vom insgesamt relativ hohen tektonischen Gestörtheitsgrad der als Wirtsgesteine vorgesehenen Andesit-Basalte wird eine Endlagerung der HAW in Bohrungen vorgeschlagen, d. h. der Bau eines Endlager-Bergwerkes mit Schächten und Einlagerungsstrecken für die hoch radioaktiven Abfälle abgelehnt.



Symbole und Signaturen: 1 – oberer Teil des vulkanogen-sedimentären Komplexes, 2 – unterer Teil des vulkanogen-sedimentären Komplexes, 3 – Gneis-Amphibolit-Komplex, 4 – Blöcke mit intensiver tektonischer Störung, 5 – Kontur des kontaminierten Grundwasserbereiches im Umfeld des Sees Karashaj, 6 – rezent aktive Störungszonen, 7 – perspektivische Gebiete I bis III, 8 – Kontur der Sanitären Schutzzone

Abb. 3-3: Blockstruktur und regionale Störungszonen im Umfeld der Produktionsvereinigung Majak, Südural (aus: [Laverov et al. 2000])

3.2 Lithologische Zusammensetzung der Endlager-Wirtsgesteine

Das geologische Umfeld der Produktionsvereinigung Majak ist durch das Auftreten der relativ flach einfallenden Argajaschsker Überschiebung und das dadurch bedingte Vorhandensein von mindestens zwei lithologisch-strukturellen Etagen, die durch die Überschiebung abgetrennt sind, charakterisiert (Abb. 3-7). Die untere, ältere Strukturetage westlich der Überschiebung (Irtjaschsker Block) entspricht dem wahrscheinlich proterozoischen Fundament der Westsibirischen Platte. Die in allochthoner Lagerung östlich der Argajaschsker Überschiebung vorkommenden Metavulkanite sind silurisch-devonischen Alters. Wie aus den Abbildungen 3-1 und 3-3 hervorgeht, dominieren im Umfeld der Produktionsvereinigung Majak hochmetamorphe Gneise, Amphibolite und kristalline Schiefer des späten Proterozoikums bis frühen Paläozoikums, vulkanogen-sedimentäre silurisch-devonische Komplexe sowie karbonatisch-terrigen Ablagerungen des Karbons. Westlich der Argajaschsker Überschiebung, die sich entlang der Seen Akakul, Tatysch, Kysyl-Tasch, Berdenisch, Bol und Kasli verfolgen lässt, überwiegen die PR₃-Pz₁-Gesteine, während im Zentralteil der Sanitären Schutzzone Geosynkinalablagerungen silurisch-devonischen Alters auftreten. Weiter östlich schließen sich meso- und känozoische Plattform-Sedimente an.

Die geplanten Endlager-Wirtsgesteine sind grünschieferfaziell überprägte Vulkanite basischer Zusammensetzung mit einer Gesamtmächtigkeit von ca. 2 km. Die Metavulkanite werden in eine vulkanogen-sedimentäre untere Schichtenfolge und in eine überwiegend vulkanogene obere Folge untergliedert. Im obersten Teil der unteren Folge treten verkieselte bzw. kohlig-SiO₂-reiche Schiefer auf, die zusammen mit Tuffiten und Tuffen einen etwa 200 m mächtigen Leithorizont bilden, mit dessen Hilfe die geologische Struktur (Faltenbau und Auftreten von Verwerfungen) im Gebiet rekonstruiert werden kann. Bei den Metavulkaniten handelt es sich um andesitisch-basaltische Porphyrite und ihre Tuffe bzw. Tufflaven, die insgesamt eine relativ homogene mineralogische und chemische Zusammensetzung aufweisen. Angaben zum mittleren Chemismus der Gesteine sind in Tabelle 3-1 zusammengetragen.

	1	2	3	4
SiO ₂	50,17	48,51	49,11	54,86
TiO ₂	0,85	0,78	0,75	0,54
Al ₂ O ₃	17,11	13,77	14,15	14,9
Fe ₂ O ₃	5,65	4,54	4,25	2,71
FeO	4,44	6,95	5,28	5,10
MnO	0,17	0,23	0,18	0,22
MgO	6,25	9,62	8,65	7,18
CaO	7,53	9,59	7,34	4,40
Na ₂ O	2,60	2,38	2,65	4,06
K ₂ O	0,35	0,55	0,85	1,90
H ₂ O ⁻	0,45	0,20	0,41	0,41
H ₂ O ⁺	4,26	3,30	2,95	3,32
CO ₂	0,29	0,47	2,49	0,05
Anzahl Proben	33	30	17	10

Erklärungen: 1, 2, 3 – oberer Horizont der Vulkanite; 1 – „Mars-2“, Bohrungen 8001 und 8002; 2 – Gebiet des Flusses Misheljak; 3 – Gebiet des Wasserbeckens Nr. 10; 4 – unterer Horizont der Vulkanite, Gebiet des Sees Kysyltasch

Tabelle 3-1: Durchschnittliche chemische Zusammensetzung der silurisch-devonischen Metavulkanite aus dem Territorium der Produktionsvereinigung Majak (Angaben in Gew.%; (aus: [Laverov et al. 2003])

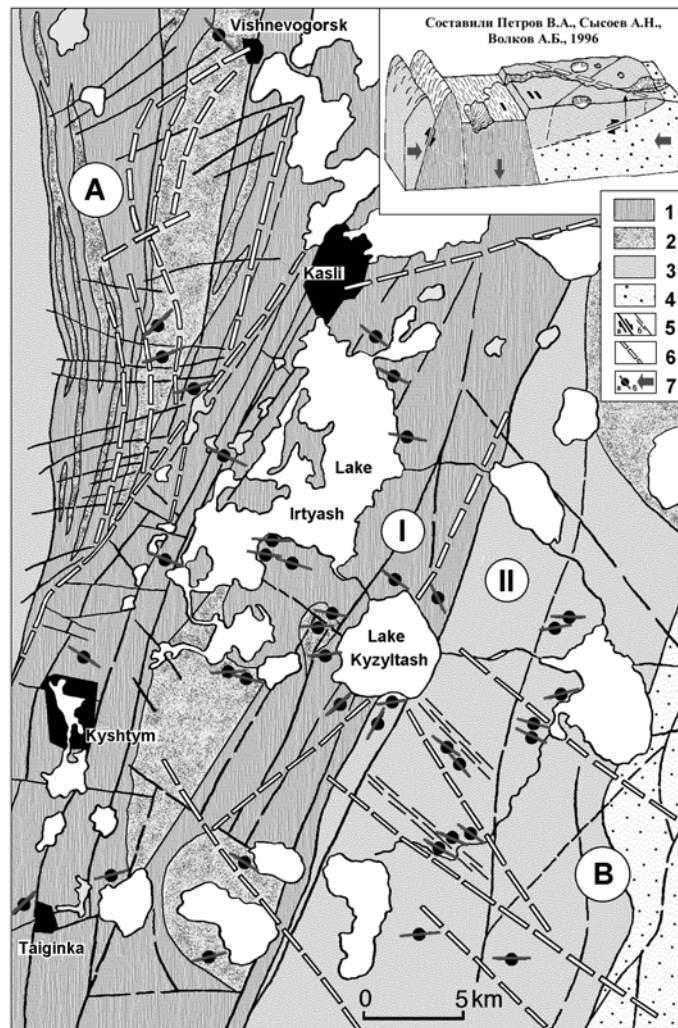
Durch dynamometamorphe Prozesse wurden die Gesteine zum größten Teil geschiefert und geringtemperiert hydrothermal-metasomatisch umgewandelt. Anstelle der primären gesteinsbildenden Minerale (Ca-Na-Feldspäte, Pyroxene, Hornblende) treten bevorzugt Epidot, Chlorit, Prehnit, Hydroglimmer, Karbonate, Fe- und Mn-Hydroxide sowie Tonminerale auf. Ein Großteil dieser Minerale verfügt über gute Sorptionseigenschaften für Radionuklide. Aufgrund der an die Bildung der Sekundärminerale gebundenen Volumenzunahme kommt es im Ergebnis der Alterationsprozesse zur zumindest partiellen Verheilung von Klüften [Laverov et al. 2000] (siehe auch Teil A, Kap. 2.6.5).

3.3 Auftreten von Bruchstörungen und Klüften im Untersuchungsgebiet

Die geologische Entwicklung, insbesondere die Deformationsgeschichte des Untersuchungsgebietes wird durch dessen Position zwischen zwei sich räumlich annähernden Massiven früher Konsolidierung bestimmt: die archaisch-proterozoische Osteuropäische Plattform im Westen und das kaledonische Kasachstan-Tjan-Shan-Massiv im Südosten.

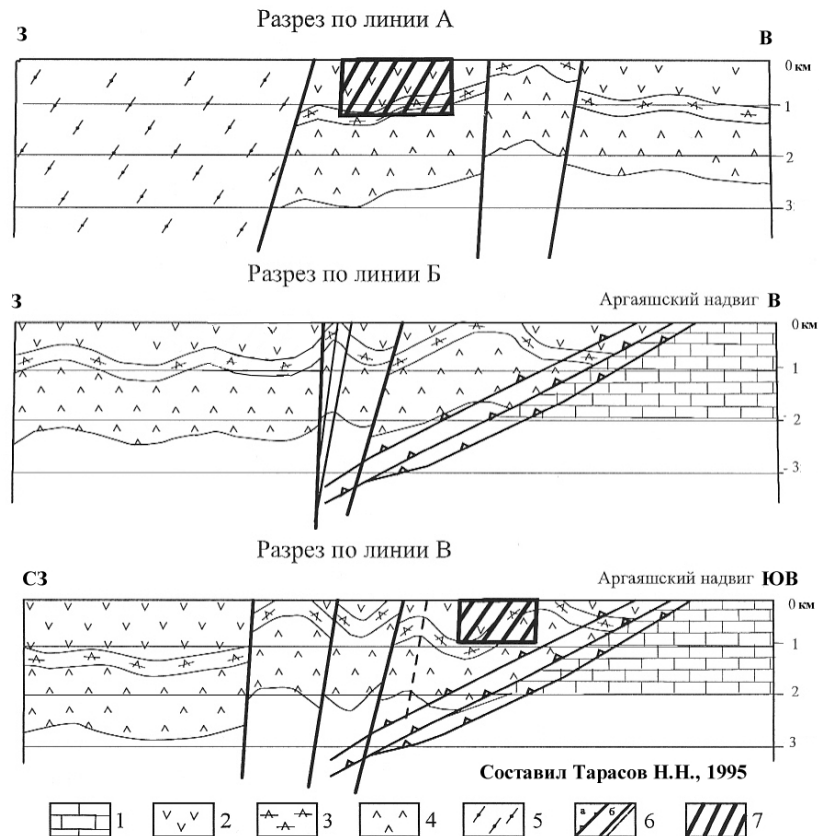
Aufgrund dieser regionalgeologischen Position ist das Untersuchungsgebiet durch einen relativ hohen, aber ungleichmäßigen tektonischen Gestörtheitsgrad gekennzeichnet und weist eine große Anzahl von langgezogenen (viele km) tektonischen Bruchstrukturen und sie begleitenden Schieferungszonen unterschiedlicher Orientierung und Mächtigkeit auf. Hinsichtlich der Streichrichtungen lassen sich neben den überwiegend beobachteten submeridionalen Störungszonen (mit „Ural-Streichen“) nordöstlich und nordwestlich sowie sub-E-W-streichende Störungssysteme aushalten. Viele der Störungszonen weisen ein subvertikales Einfallen und eine Mächtigkeit bis zu mehreren hundert Meter auf.

Eine im regionalen Plan besonders auffällige Störungszone stellt die Argajaschsker Überschiebung dar (Abb. 3-1 und 3-4). Dabei handelt es sich um eine submeridional orientierte Störung mit einem Einfallen von 15 bis 30 ° und einer Mächtigkeit von 1,5 bis 2,5 km, an der die silurisch-devonischen vulkanogen-sedimentären Gesteine über die terrigen-karbonatischen Gesteine des frühen Karbons geschoben wurden (Abb. 3-5).



Symbole und Signaturen: A – Gebiet der heutigen Heraushebung des Urals, B – Subplattform-Gebiet, I – Irtjaschsker struktureller Block, II – Argajaschsker struktureller Block, 1 – Gneis-Amphibolit-Komplex (PR_3 - PZ_1), 2 – Granite-Granodiorite und Gabbro (PZ_1), 3 – vulkanogen-sedimentärer Komplex (Metavulkanite, S_1 - D_1), 4 – karbonatisch-terrigen Komplex (C_{1-2}), 5 – Störungszonen und Richtungen der relativen Verschiebungen entlang von ihnen (a) und lineare Schieferungszonen (b), 6 – reliefbildende Störungszonen (Lineamente), 7 – Orientierung der Kompressionsachse, rekonstruiert für den Abschnitt der spätesten känozoischen Verschiebungen (a: nach Resultaten von tektonophysikalischen Geländemessungen, b: Richtungen der Verschiebung von Geomassen in tektonophysikalischen Modellen)

Abb. 3-4: Schema zur geologischen Struktur und zum tektonischen Störungsgrad sowie zum Spannungszustand im Gebiet der Produktionsvereinigung Majak (aus: Velichkin et al. 2003)



Символы: 1 - карбонатно-терригенный комплекс (C_{1-2}), 2 - 4 - вулканогенно-седиментарный комплекс (Метавулканы, S_1-D_1) (2 – верхняя серия, 3 – кварцевые и C_{org} -содержащие, кварцевые сланцы, 4 – нижняя серия), 5 - Гнейс-Амфиболит-комплекс (PR_3-PZ_1), 6 – поверхность сдвига Аргаяшского надвига (а) и других зон разлома (б), 7 – местоположение рекомендуемых районов в разрезах

Abb. 3-5: Geologische Schnitte zur Illustration der Rolle der Argajaschsker Überschiebung im Untersuchungsgebiet (Lage der Schnitte: siehe Abb. 3-3)

Hinsichtlich ihrer mineralogischen Ausbildung und Genese lassen sich nach [Velichkin et al. 2003] folgende Typen von Störungszonen ausgliedern:

- Tiefreichende Störungszonen in Form von Verquarzungszonen und Systemen von nah beieinander liegenden Quarzgängen,
- Schieferungszonen, die meist aus Albit, Sericit, Chlorit, Epidot und Aktinolith zusammengesetzt sind,
- Mylonitisierungs- und Breccienzonen,
- Quarz-Karbonat- und Karbonat-Trümmern sowie
- nicht mineralisierte Klüfte.

Während die tiefreichenden Verquarzungsbereiche und die Schieferungszonen als Störungen erster Ordnung meist die Grenzen zwischen den tektonischen Blöcken markieren, treten die Mylonitisierungs- und Breccienzonen sowie die mit Quarz, Epidot, Chlorit und/oder Karbonaten gefüllten Kluftsysteme innerhalb der Blöcke auf. Der überwiegende Teil der tektonischen Störungen entspricht Schieferungszonen und Mylonitisierungs- bzw. Zerrüttungszonen. Einen Eindruck von der räumlichen Orientierung, Häufigkeit, Kluftöffnungsweite und Genese der im Untersuchungsgebiet auftretenden Klüfte vermittelt Tabelle 3-2.

Gesteinstyp und deren Standort	System	Lagerungselemente der Kluftsysteme	Dichte α , cm	Öffnung m , mm	Genese
Laven, Tuffflaven, Tuffe, Standort Mars-2, P.45 (n=196)	I	300 Wink. 75-85	15	0,1	C
	II	355-0 Wink.60-65	40	0,4	C
	III	315 Wink. 45-55	100	0,1	C
	IV	350 Wink.25-30	20	2,0	O
Laven, Tuffflaven, Tuffe, Standort Mars-2, P.46 (n=213)	I	320 Wink.80-85	5	3,0	C
	II	300 Wink.45-50	30	0,1	C
	III	65 Wink.35-40	100	1,0	C
	IV	30 Wink.30-35	30	5,0	O
	V	275 Wink.70-75	50	1,0	C
Tuffe, Tuffflaven im Bereich des Fl. Mishelyak, Trasse der A-scheileitung, P.36 (n=210)	I	290 Wink.80-85	15	0,1	C
	II	300 Wink.75-80	10	0,1	C
	III	80 Wink 60	20	0,1	C
	IV	340 Wink 60-65	30	0,1	C
	V	20 Wink 40	30	0,3	?
Tuffe, Tuffflaven im Bereich des Fl. Mishelyak, Trasse der A-scheileitung, P.37 (n=209)	I	290 Wink 75-80	5	0,1	C
	II	30 Wink 65-70	15	0,1	C
	III	70 Wink 70	15	0,2	?
	IV	85-90 Wink.2..?	40	1,5	C
	V	330 Wink 35-40	40	5,0	O
Andesit-Basalt-Porphyrte, Novogornensker Tagebau P. 26-35 (n=577)	I	300 Wink 60-65	15	0,1	C
	II	290 Wink 75-80	30	0,2	C
	III	310 Wink 70-80	40	0,2	C
	IV	40 Wink 80-85	10	0,3	C
	V	340 Wink 25-35	60	0,5	O
	VI	0-10 Wink 15-25	150	20	O
Tuffe, Tuffsandsteine westl. Ufer von W-10 P. k2a (n=215)	I	280 Wink 70-80	3	0,1	C
	II	300 Wink 70-75	10	0,1	C
	III	345 Wink 45-50	30	0,1	C
	IV	315 Wink 65-70	25	0,1	C
	V	50 Wink 60-65	30	0,3	?

Erklärung: C – Gleit- bzw. Abscherungsklüfte («скол») O – Zugklüfte («отрыв»), ? – Klüfte mit einer unklaren Genese

Tabelle 3-2: Angaben zur Kluftorientierung und -ausbildung in den vulkanogen-sedimentären Gesteinen im Umfeld der Produktionsvereinigung Majak

Die im Untersuchungsgebiet auftretenden tektonischen Störungszonen und Klüfte sind auf unterschiedlich alte Deformationsprozesse zurückzuführen. [Laverov et al. 2003] unterscheiden drei Hauptetappen der Deformation im Untersuchungsgebiet. In der hercynischen Etappe kam es im Ergebnis einer Transpression und Grünschiefermetamorphose zur Bildung von Falten und Schieferungszonen sowie zur Anlage regionaler Überschiebungen. Bei Überschreitung des Festigkeitsgrenzwertes für Kompression bildeten sich Mylonitzonen und unterschiedliche Kluftsysteme heraus. Im Verlaufe der anschließenden mesozoischen Deformationsetappe waren die Achsen der Hauptnormalen der Spannungen subhorizontal orientiert, was zu Blockverschiebungen und zur Bildung von Breccienzonen sowie von mineralisierten Klüften führte. Die anschließende känozoische Etappe ist durch ein regionales sub-E-W-gerichtetes Kompressionsregime charakterisiert [Velichkin et al. 2003]. Einen guten Überblick zum Auftreten von Störungszonen und zum Deformationsgrad bzw. zur Orientierung der Kompressionsachsen liefert Abb. 3-5.

Lokal, vor allem in der Nähe von mächtigen regionalen Störungszonen, sind die Gesteine sehr stark geklüftet, intensiv geschiefert und z. T. zerstückelt. In einigen, im Gebiet „Mars-2“ niedergebrachten Bohrungen wurden in den Kernen unterhalb 120 m Tiefe, bis zu 20 Störungszonen mit Mächtigkeiten zwischen 0,2 und 8,9 m festgestellt. Ab einer Tiefe von ca. 400 m weisen die alterierten Gesteinsbereiche in der Regel Öffnungsweiten im mm-, selten im cm-

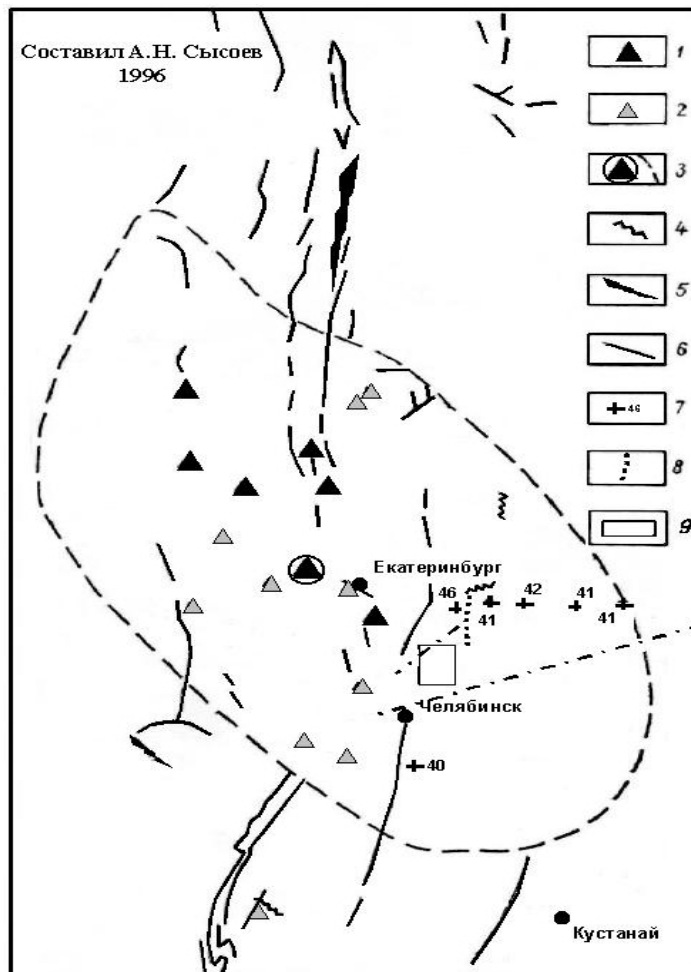
Bereich auf (siehe Kap. 2.5). Umfangreichere Untersuchungsergebnisse zur Morphologie, zum Internaufbau und zur räumlichen Lage sowie zu den räumlich-zeitlichen Beziehungen zwischen unterschiedlichen Kluftsystemen legten für das Untersuchungsgebiet Aduschkina et al. (1997), Petrov (2001) und Velichkin et al. (2003) vor.

3.4 Neotektonische Bewegungen und seismische Aktivitäten im Gebiet Majak

Die Südurals-Region ist seit dem Mesozoikum durch eine intensive lateritische Verwitterung und mindestens seit dem Ende des Oligozäns bzw. seit Beginn des Miozäns durch eine deutliche Tendenz zur Heraushebung und Peneplainbildung gekennzeichnet [Velichkin et al. 2003]. Ausgehend von der Rekonstruktion der Lage der Einebnungsflächen des Oligozäns und Miozäns schätzten [Kotschkin et al. 1997] die Denudationsgeschwindigkeit in der Region auf etwa 0,8 bis 1 m pro 1 Mio. Jahre, mit Maximalwerten von bis zu 3,5 m pro 1 Mio. Jahre im Miozän.

Durch das Vorhandensein zahlreicher neotektonisch aktiver Störungszonen wurden im Ergebnis von regelmäßig wiederholten Nivellierungsmessungen und eines detaillierten Geomonitorings der Relaxationsprozesse [Aduschkina et al. 1997] vertikale Verschiebungen einzelner tektonischer Blöcke gegeneinander von bis zu 7 mm/a gemessen. Im Beobachtungszeitraum von 1906 bis 1980 ergab sich für den mittleren und südlichen Ural eine mittlere Heraushebung von 3,5 mm/a, bei Schwankungen zwischen –4,3 und +10,6 mm/a [Velichkin et al. 2003].

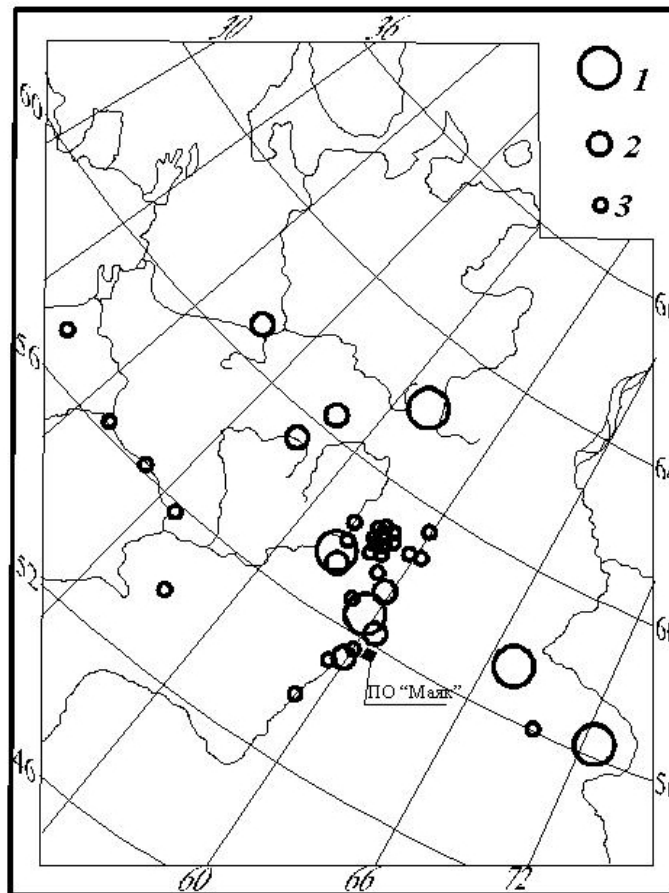
Der mittlere und der südliche Ural zeichnen sich durch eine erhöhte seismische Aktivität aus. Die seismischen Bewegungen sind vorwiegend an mächtige Störungszonen mit NW-SE-Orientierung gebunden (Abb. 3-6) und konzentrieren sich an der nördlichen Umrandung des Ufimsker Vorsprungs. Im weiteren Umfeld des Untersuchungsgebietes wurden mehrere Erdbeben mit Magnituden von 3 bis 4 festgestellt, deren Epizentren im Gebiet der Städte Kyshtym und Miass lagen (Abb. 3-7) [Novejschij Katalog 1977], [Kononenko et al. 1990].



Symbole: 1, 2 – Epizentren von Erdbeben, die in den letzten 100 Jahren registriert wurden (1 – Intensität von 5 bis 6, 2 – Intensität von 3 bis 4), 3 – Epizentrum des Erdbebens von Schigir-Schischimsk und ungefähre Grenze der Verbreitung von Wellen mit einer Intensität von 3 bis 4, 4 – rezente Störungszonen der Erdoberfläche, 5 – Störungszonen, entlang derer rezente Bewegungen registriert werden, 6 – sonstige rezente Störungszonen, 7 – Tiefen bis zur Moho-Oberfläche (nach seismischen Daten bei v gleich 6,2 bis 8,2 km/s), 8 – Sprünge im Relief der Moho-Oberfläche, 9 – Territorium der Produktionsvereinigung Majak

Abb. 3-6: Schema zur Seismizität der Mittel- bis Südural-Region (nach Angaben aus: Novjschij Katalog 1977, mit Ergänzungen, aus: Velichkin et al. 2003)

Die nach [Velichkin et al. 2003] seit dem Holozän im Untersuchungsgebiet feststellbare sub-E-W-gerichtete Kompression führt in Tiefen bis 300 m von der Oberfläche zur Entstehung von tektonischen Spannungen in der Größenordnung von 20 bis 40 MPa. Derartige Spannungsbeträge werden von diesen Autoren auch für die nächsten 10 000 Jahre vorausgesagt. Dieser sub-E-W-gerichtete Stress führt dazu, dass die NW- und NE- gerichteten Störungszonen durch seitliche Verschiebungen charakterisiert sind. Submeridional orientierte Störungszonen nehmen den Charakter von Auf- oder Abschiebungen an, während sub-E-W-gerichtete Störungen aufreißen und sich durch hohe hydraulische Durchlässigkeiten auszeichnen. Als Beleg für diese Auffassung dient die Ausbreitung der Kontaminationsfahne im Untergrund des Karashaj-Sees in sub-E-W-Richtung.



1 – Intensität 5,1 bis 6,0; 2 – Intensität 4,1 bis 5,0; 3 – Intensität bis 4,0

Abb. 3-7: Seismische Aktivitäten im Umfeld des Gebietes der Produktionsvereinigung Majak, im Vergleich zum europäischen Teil Russlands, zum Ural und zu Westsibirien (nach Angaben aus: Novejschij Katalog 1977, aus: Velichkin et al. 2003)

3.5 Hydrogeologie des Untersuchungsgebietes

Das geplante Endlagergebiet weist ein schwach gegliedertes, nach E geneigtes Relief und ein gemäßigtes Kontinentalklima auf. Die absoluten Höhenlagen schwanken im Untersuchungsgebiet zwischen 215 und 285 m, die Höhendifferenzen zwischen den tiefsten Punkten der Flusstäler und den benachbarten Wasserscheiden betragen maximal 30 bis 40 m. Das Majak-Gebiet ist durch flach geneigte Berghänge, breite Flusstäler und eine Vielzahl von Seen gekennzeichnet. Die langjährige durchschnittliche Lufttemperatur liegt bei +2,3 °C, bei Schwankungen der monatlichen Durchschnittstemperaturen zwischen +18,6 und –21,4 °C. Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge beträgt 396 mm, wobei die meisten Niederschläge im Sommer fallen – bis zu 84 % der Jahresmenge. Abb. 3.8 zeigt das Klimadiagramm von Tschaljabinsk.

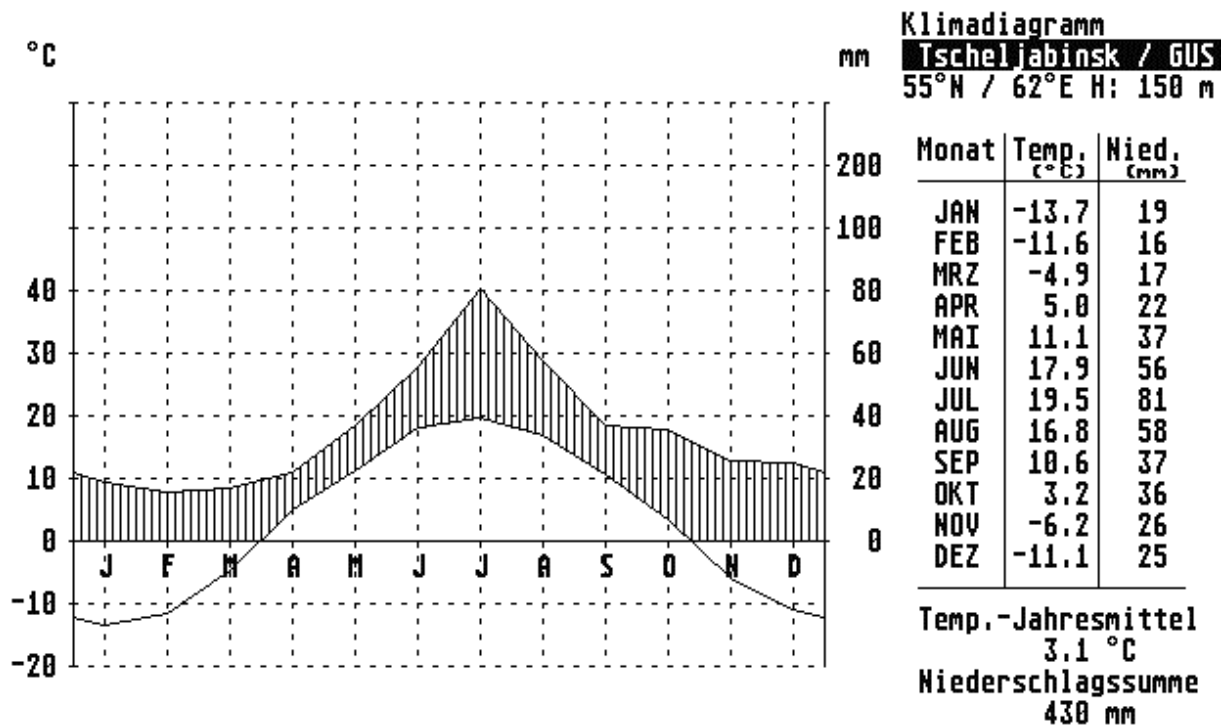


Abb. 3-8: Klimadiagramm Tscheljabinsk

Der lokale Vorfluter ist der stark mäandrierende Fluss Misheljak (Abb. 3-3). Die von der Mächtigkeit der Verwitterungszone und der Niederschlagsmenge abhängige Grundwasserneubildung beläuft sich auf etwa 10 bis 25 % der Jahresniederschlagsmenge und beträgt zwischen 11 und 55 mm/a bzw. $1,4 \cdot 10^{-4}$ bis $4 \cdot 10^{-5}$ m/d.

Der Wasserspiegel des ungespannten Grundwassers liegt im Untersuchungsgebiet in einer Tiefe zwischen 0,1 und 20 m u.GOK, durchschnittlich bei 5 bis 7 m u.GOK. Die Grundwasserführung der unverwitterten Vulkanite wird vor allem durch die Zonen erhöhter Klüftigkeit kontrolliert.

Ausgehend von den vorwiegend im Gebiet „Mars-2“ abgeteufte Erkundungsbohrungen und den in den Bohrungen realisierten hydrogeologischen Untersuchungen lässt sich der geologische Untergrund im Gebiet Majak in mehrere Zonen untergliedern, z. B. [Mironenko & Rumynin 1999]. Die oberflächlich anstehenden, meist nur wenige m bis 10-20 m mächtigen Deluvial- und Alluvial-Sedimente weisen Wasserdurchlässigkeiten meist < 1 m/d auf. Nur selten werden in sandig ausgebildeten alluvialen Ablagerungen k_f -Werte bis 10 m/d beobachtet. Unterhalb dieser Quartärsedimente wird ein Bereich intensiver Verwitterung der Vulkanite mit starker exogener Klüftigkeit ausgegliedert („Schicht- und Kluftwässer“). Die Mächtigkeit dieser Zone erreicht bis zu 50-80 m. Die Grundwasserfließrichtung zeichnet das Oberflächenrelief nach. Der von [Mironenko & Rumynin 1999] angegebene durchschnittliche k_f -Wert liegt in dieser Zone bei 0,4 m/d.

In noch größerer Tiefe schließt sich der Bereich der „Kluft- und Gangwässer“ an, dessen Grundwasserführung ausschließlich durch das Auftreten von Klüften und Störungszonen bestimmt wird. Die Grundwässer sind gespannt, die Durchlässigkeitsbeiwerte der Klüfte schwanken im Teufenbereich unterhalb 400 m zwischen $1,4 \cdot 10^{-2}$ und $6,7 \cdot 10^{-3}$ m/d. Die Gesteinsmatrix weist in dieser Tiefe einen durchschnittlichen k_f -Wert von $4 \cdot 10^{-4}$ m/d auf. Ab 400 m Tiefe sind die Grundwässer reduzierend und schwach basisch, was sich negativ auf das Migrationsverhalten der Radionuklide auswirkt. Velichkin et al. (2003) geben für unverwitterte Andesit-Basalte Filtrationsgeschwindigkeiten von $\leq 5 \cdot 10^{-5}$ m/a an.

3.6 Physiko-mechanische und wärmephysikalische Eigenschaften der Endlager-Wirtsgesteine

Aus den Kernen der am Standort „Mars-2“ niedergebrachten Erkundungsbohrungen sowie in einigen Blöcken der SSZ wurden repräsentative Proben der wichtigsten Typen der vulkanogen-sedimentären Schichtenfolgen entnommen und laborativ untersucht. Dabei wurden folgende Kennwerte ermittelt:

- Dichte,
- effektive Porosität,
- Wasserdurchlässigkeit,
- Widerstand gegen einachsigen Druck,
- Geschwindigkeit der Longitudinal- und Transversal-Ultraschallwellen sowie deren Anisotropie in trockenen und wassergesättigten Gesteinsproben,
- Elastizitätswerte der Gesteine,
- Jung-Modul,
- Modul der Verschiebung und
- Poisson-Koeffizient.

Darüber hinaus wurde die Wärmeausdehnung und Auflockerung der Gesteine im Temperaturbereich von 25 bis 400 °C bei atmosphärischem Druck sowie in Druckbehältern mit einem Wasserdruck von bis zu 1 kbar analysiert.

Insgesamt wurden keine wesentlichen Variationen der petrophysikalischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der primären Struktur und vom Stoffbestand der Gesteine festgestellt. Unter Berücksichtigung der petrographischen Zusammensetzung gehören die vulkanischen Gesteine entsprechend VNIPI PT zum „viskos-festen strukturellen Medium-Typ“. Die Porphyrite sowie deren Lavabreccien, Tufflaven und feinkörnige Tuffe zeichnen sich durch eine geringe Anisotropie der petrophysikalischen Eigenschaften aus und weisen relativ hohe Elastizitätsparameter sowie geringe effektive Porositäten und Durchlässigkeiten auf (Tabelle 3-3).

Gesteine	Dichte, g/cm ³	Effektive Porosität, %	Geschwindigkeit der Ultraschall-Wellen, km/s		Jung- Modul E, Mbar	Poisson- Koeffizient m
			V _p	V _s		
Andesit-Basalte, Porphyrite, feinkörnige Tuffe	2,99	0,19	4,71	3,32	0,87	0,19
	2,98	0,18	6,38	3,74	0,86	0,20
Lavabreccien von Porphyriten, Tufflaven	2,95	0,20	5,18	3,36	0,90	0,22
	2,94	0,24	6,23	3,72	0,94	0,21

Tabelle 3-3: Mittelwerte der physikomechanischen Parameter für die vulkanogen-sedimentären Gesteine im Umfeld der Produktionsvereinigung Majak

Lediglich Proben aus tektonisch gestörten bzw. hydrothermal-metasomatisch überprägten Vulkaniten, d. h. aus Mylonit- oder Breccienzonen oder aus ihrer unmittelbaren Nähe, zeichnen sich durch größere Abweichungen von den angegebenen Mittelwerten aus. Die höchsten Veränderungen der aufgeführten Gesteinsparameter sind für jene Zonen und Intervalle von Bruchstörungen typisch, in denen sekundäre, niedrigtemperierte Chlorit -und Karbonat-Mineralisationen auftreten.

Die Festigkeitsgrenzwerte der Vulkanite mit andesitisch-basaltischer Zusammensetzung bei einachsiger Druckbeanspruchung, Dehnung und Verschiebung sind in Tabelle 3-4 ausgewiesen.

$\sigma_{\text{Druck, MPa}}$		$\sigma_{\text{Dehnung, MPa}}$		$\sigma_{\text{Verschiebung, MPa}}$		Belastungsgeschwindigkeit, MPa/h
min/max	mittl.	min/max	mittl.	min/max	mittl.	
78/485	256,5	9,3/28,4	18,5	32,5/98,5	66,7	1,5-2,0
50/90	76,3					0,1-0,16

Tabelle 3-4: Festigkeitsgrenzwerte der Andesit-Basalte aus dem Majak-Umfeld

Die Gesteine lassen sich hinsichtlich ihres Widerstandes gegen einachsigen Druck in drei Gruppen unterteilen (Tabelle 3-5).

Kennwerte	Maßeinheit	Besonders feste Vulkanite	Feste Vulkanite	Mittelfeste Vulkanite
Widerstand gegen:				
- einachsigen Druck	MPa	242	178,8	137,2
- Dehnung	-«-	19,2	18,3	15,1
- Verschiebung	-«-	76,4	k. A.	34,5
Jung-Modul	-«-	86800	98564	83440
Poisson-Koeffizient		0,21	0,20	0,21
Räumliches Gewicht	g/cm ³	2,90	2,90	2,79
Dichte	g/cm ³	3,04	3,04	3,09
Porosität:				
- allgemeine	%	4,68	4,68	2,92
- aktive/effektive	%	0,095	0,058	k. A.

Tabelle 3-5: Zusammenstellung der wichtigsten physikomechanischen Kennwerte der Vulkanite aus dem Untergrund des Gebietes Majak, geordnet nach Festigkeitsgruppen der Gesteine (k. A. – keine Angaben)

Im Ergebnis von umfangreichen Laboruntersuchungen wurden für die silurisch-devonischen Vulkanite effektive Porositäten zwischen 0,07 und 0,69 % (Mittelwert: 0,26 %) sowie Durchlässigkeiten $< 1 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ bestimmt [Laverov et al. 2003]. Die höchsten effektiven Porositäten und Durchlässigkeiten wurden an Proben aus Schieferungszonen bzw. metasomatisch überprägten Andesit-Basalten gemessen. Detailliertere Angaben zur Veränderung der physikalischen bzw. physikomechanischen Gesteinsparameter im Bohrprofil einer 1200 m tiefen Bohrung im Gebiet „Mars-2“ sind bei [Laverov et al. 2000] enthalten. Diese Autoren fixierten bei Temperaturen bis 200 °C und erhöhten Drücken $\pm$ konstante effektive Porositäten der Vulkanitproben aus dem Majak-Umfeld.

Die wärmephysikalischen Eigenschaften der Vulkanite hängen nach den bisher vorliegenden Untersuchungsbefunden nicht von deren lithologischer Zusammensetzung oder von den physikomechanischen Eigenschaften der Andesit-Basalte ab. Die silurisch-devonischen Gesteine des Majak-Umfeldes weisen folgende mittlere Kennwerte auf:

- Wärmeleitfähigkeit: 2,66 W/mK,
- spezifische Wärmekapazität: 733 J/kgK,
- Temperaturleitfähigkeit: $1,16 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ und
- Koeffizient der linearen Wärmeausdehnung: $0,78 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

Die experimentellen Untersuchungen der Wärmeauswirkung auf die Wasserdurchlässigkeit der Gesteine ergaben sowohl unter atmosphärischem Druck als auch in Autoklaven in Anwesenheit von Wasser eine sprunghafte Zunahme der Durchlässigkeiten längs und quer zur Schieferung der Vulkanite bei Wärmezufuhr. Die Ergebnisse der Untersuchung von zwei geschieferten Tuff-Proben der Andesit-Basalt-Porphyrite sind in Tabelle 3-6 zusammengestellt.

Gesteine	Erwärmungs-Medium	Richtung	Temperatur °C	Durchlässigkeit K, mD
Geschieferter Tuff der Andesit-Basalt-Porphyrite mit einem Quarzgängchen	Ausgangsgestein Atm. Erwärmung $P_{\text{H}_2\text{O}}=1 \text{ kbar}$	Parallel zur Schieferung	300	$3,2 \cdot 10^{-5}$
			400	$2,3 \cdot 10^{-5}$
			150	$9,8 \cdot 10^{-5}$
			300	$3,5 \cdot 10^{-5}$
	Ausgangsgestein Atm. Erwärmung $P_{\text{H}_2\text{O}}=1 \text{ kbar}$	Senkrecht zur Schieferung	400	$2,7 \cdot 10^{-5}$
			300	$5,0 \cdot 10^{-5}$
			300	$1,1 \cdot 10^{-5}$
			400	$2,9 \cdot 10^{-5}$
Geschieferter Tuff der Andesit-Basalt-Porphyrite	Ausgangsgestein Atm. Erwärmung $P_{\text{H}_2\text{O}}=1 \text{ kbar}$	Senkrecht zur Schieferung	150	$2,2 \cdot 10^{-5}$
			300	$5,6 \cdot 10^{-5}$
			300	$1,1 \cdot 10^{-5}$
			400	$1,2 \cdot 10^{-5}$

Tabelle 3-6: Temperatur-induzierte Veränderung der Wasserdurchlässigkeit von geschieferten Tuffen aus dem Umfeld der Produktionsvereinigung Majak

4 ENDLAGERKONZEPT

Um das Ziel des Projektes zu erreichen, ist es auch hier erforderlich, für ein erstes generisches Endlagermodell ein technisches Endlagerkonzept, bestehend aus Einlagerungskonzept und Barrierenkonzept für die Endlagerung im Wirtsgestein Porphyry zu erstellen. Auch im Rahmen dieses Vorhabens wird für wärmeerzeugende Cs+Sr Abfälle im ersten Ansatz nur die Bohrlochlagerung untersucht. Für die schwach wärmeentwickelnden Abfälle ist auch hier eine Einlagerung in Strecken vorgesehen.

4.1 Stark wärmeentwickelnde Abfälle

Wie schon im Kapitel 2.2 ausgeführt, bestehen die stark wärmeentwickelnden Abfälle aus der Cs+Sr-Fraktion der flüssigen Wiederaufarbeitungsabfälle verfestigt in einer Bor-Phosphat-Glas Matrix.

Für die Endlagerung der Abfälle ist die Errichtung eines Endlagers ausgeführt als Tiefenlager im Wirtsgestein Porphyry vorgesehen. Das Planungskonzept entspricht dem für das Endlager in Krasnojarsk entwickelten Konzept der Bohrlochlagerung (s. Teil A Kap. 3.1.2), da die Abmessungen der Gebinde gleich sind und die Wärmeentwicklung auch dem Niveau der Wärmeentwicklung der Gebinde in Krasnojarsk entspricht. Der Hauptunterschied zu Krasnojarsk ist durch die wesentlich höhere Anzahl der endzulagernden Gebinde bedingt. Während in Krasnojarsk ca. 4 300 Gebinde in Bohrlöchern endzulagern sind, werden das von Majak ca. 97 000 Gebinde sein. Dadurch wird ein wesentlich größeres Einlagerungsfeld für diese HLW benötigt.

4.2 Schwach wärmeentwickelnde Abfälle

Die schwach wärmeentwickelnden Abfälle (HLW aus der früheren Plutoniumgewinnung, Fraktion Seltene Erden und Spaltprodukte aus der Wiederaufbereitung von ausgedienten Brennelementen) sollen wie im Endlager Krasnojarsk in Strecken endgelagert werden. Die Streckenkonfiguration und das Barrierenkonzept wurden wie in Krasnojarsk gewählt. Auch in diesem Fall besteht der Hauptunterschied in der weitaus höheren Gebindeanzahl (Krasnojarsk – 5 640 Gebinde, Majak – 51 700 Gebinde), was ein wesentlich größeres Streckenfeld für die Endlagerung erfordert. Die Feldgröße wäre im weiteren noch zu bestimmen.

4.3 Thermische Auslegungsberechnungen

Eine maßgebliche Einwirkung auf das Barriersystem, insbesondere auf den isolierenden Bentonit, ist die durch die wärmeerzeugenden Abfälle induzierte Temperaturerhöhung. Um schädigende Wirkungen auf die Bentonitabdichtung zu vermeiden, wurde als Randbedingungen für die Auslegung formuliert, dass die Temperatur im Bentonit an keiner Stelle 100°C übersteigen darf, so dass keine Dampfphase entstehen kann und Schrumpfung bzw. Rissbildung vermieden wird. Die Auslegungsberechnungen wurden für den potentiellen Standort Majak unter den dortigen standortspezifischen Bedingungen durchgeführt.

4.3.1 Konzeptuelles Modell

Die nachfolgenden Auslegungsberechnungen beziehen sich auf die Endlagerung der wärmeerzeugenden Cs/Sr Abfallfraktion der Produktionsvereinigung Majak und beinhalten Simulationen der Temperaturentstehung innerhalb der Barriere (Bentonit) und des örtlichen Wirtsgesteins. Das konzeptuelle Modell setzt sich zusammen aus

- Informationen über die Umgebungsbedingungen am Untersuchungsort,
- den Daten über die Wärmeleistung der einzulagernden Abfallbehälter,
- den thermophysikalischen Stoffgesetzen und Parametern des Wirtsgesteins

- den thermophysikalischen Stoffgesetzen und Parametern der technischen Barriere sowie
- den Annahmen zur Modellgeometrie.

4.3.1.1 Umgebungsbedingungen

Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde für den Standort Majak die gleiche Einlagerungsteufe zu Grunde gelegt wie für die Berechnungen zum Nishnekansker Granitmassiv. Anhand der vorliegenden Temperaturmesswerte aus der Bohrung 8002, [VNIPI PT 2002] ist in der angenommenen Einlagerungsteufe eine Temperatur von 13°C anzutreffen bei einem regionalen Temperaturgradienten von 12,1 mK m⁻¹ (Abb. 4-1). Das bedeutet, dass an diesem Standort eine maximale Temperaturerhöhung von 87°C zugelassen werden darf ohne dass die Auslegungstemperatur von 100°C überschritten wird.

Die Temperaturmessungen zeigen signifikante Unterschiede hinsichtlich der regionalen Temperaturverhältnisse der beiden potenziellen Standorte (Abb. 4-1). Der Standort in Majak zeichnet sich demnach durch eine negative thermische Anomalie aus, die grundsätzlich die Einlagerung stark wärmeentwickelnder Abfälle begünstigt.

4.3.1.2 Behälter und dessen Wärmefreisetzung

Wesentliches Element und Grundlage für die thermischen Auslegungsberechnungen ist die Wärmeleistung eines solchen Behälters. Diese ist in Abbildung 4-2 bezogen auf das Volumen als Funktion der Zeit dargestellt. Zum Vergleich wurden neben den Wärmeleistungen der Cs/Sr Abfallfraktionen auch die volumenspezifischen Wärmeleistungen anderer zur Endlagerung vorgesehener Behälter mit eingezeichnet. Dabei handelt es sich um den Endlagerbehälter mit 3 Brennelementen (BSK-3), die HAW-Kokille und den für die Einlagerung im Nishnekansker Granitmassiv vorgesehenen Behälter.

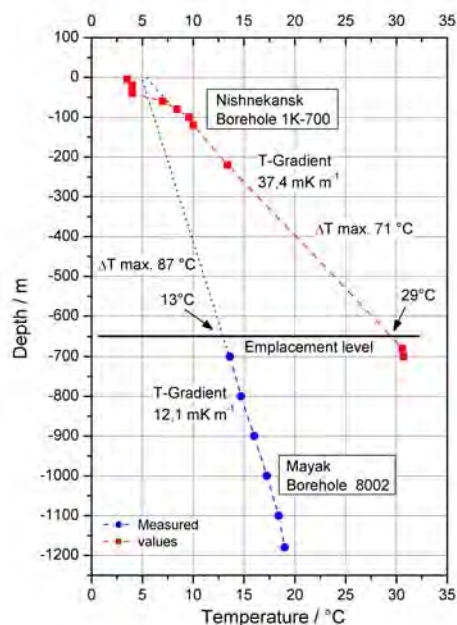


Abb. 4-1: Angenommene Einlagerungsteufe und lokale Temperaturverhältnisse gemäß entsprechender, als repräsentativ angenommener, Messungen in der Bohrung 1K-700 [VNIPI PT 2002]

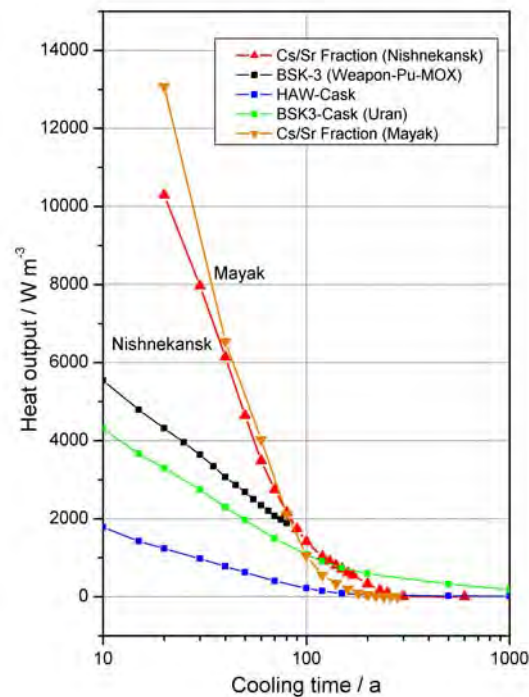


Abb. 4-2: Volumenspezifische Wärmeleistung der Cs/Sr Abfallfraktionen als Funktion der Zeit im Vergleich zu anderen zur Endlagerung vorgesehener Abfallbehälter.

Die für eine Einlagerung am Standort Majak vorgesehenen Cs/Sr Abfallfraktionen haben, vergleichbar mit denen zur Einlagerung im Nishnekausker Granitmassiv, in der Anfangszeit eine sehr hohe Wärmeleistung, zeigen aber im Vergleich zu den anderen einen erheblich steileren Wärmeleistungsabfall. Nach etwa 300 Jahren ist das Leistungsniveau auf etwa 10 W m^{-3} abgesunken und damit für die Auslegung thermisch nicht mehr relevant.

Bei der zur Einlagerung vorgesehenen Cs/Sr Fraktion handelt es sich zwar um eine starke Wärmequelle, jedoch mit einem vergleichsweise kurzen thermisch relevanten Zeitbereich.

4.3.1.3 Thermische Materialparameter

Wesentliche Größen für die Abfuhr der von dem Endlagerbehälter produzierte Wärme sind die Wärmeleitfähigkeit sowie die spezifische Wärmekapazität der den Behälter umgebenden Materialien, also der technischen Barriere und dem Wirtsgestein. Für letzteres liegen standortspezifisch Messdaten vor [Lawerov & Petrov 2002]. Abbildung 4-3 zeigt die Wärmeleitfähigkeiten und spezifischen Wärmekapazitäten der am Standort angetroffenen Gesteinsarten als Funktion der Temperatur. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt erwartungsgemäß mit der Temperatur ab während die spezifische Wärmekapazität ansteigt.

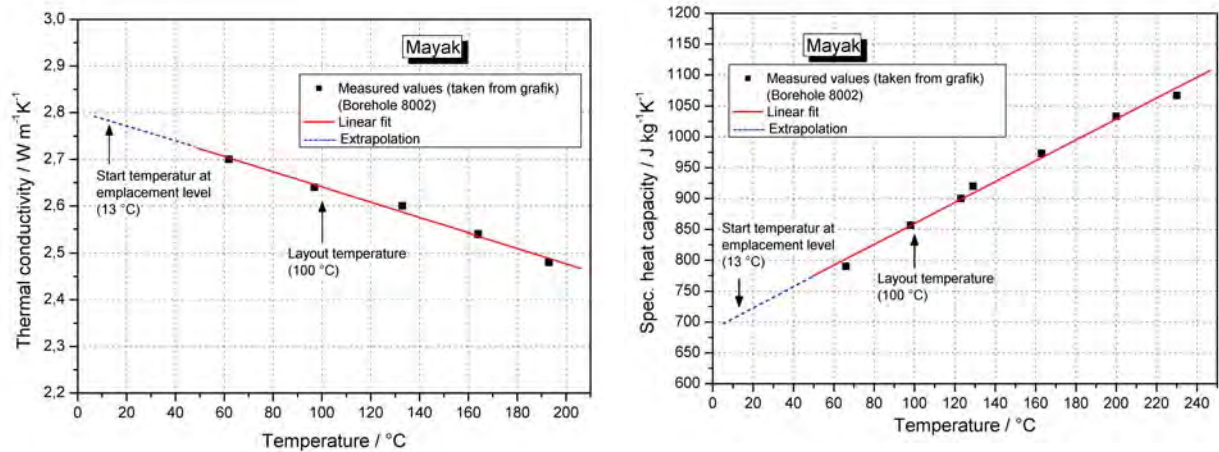


Abb. 4-3: Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität der am Standort Majak ange-troffenen Gesteinsarten als Funktion der Temperatur.

Die Messdaten für den Standort Majak wurden mittels Funktionen der Gestalt

$$\lambda = a + bT \quad \text{für die Wärmeleitfähigkeit und} \quad (4.1)$$

$$c_p = a + bT \quad \text{für die spez. Wärmekapazität} \quad (4.2)$$

mathematisch beschrieben und als Stoffgesetze in den Computercode implementiert.

Die Wärmeleitfähigkeit von Bentonit wird mit Hilfe von Gleichung (4.3) berechnet. Hierbei handelt es sich um einen empirischen Zusammenhang, der aus einer Reihe von Laborversuchen ermittelt wurde [Kahr & Müller-Von Moos 1982], [Knutsson 1983], [Börgesson 1988], [Börgesson et al. 1994].

$$\lambda = -a_1 + a_2 \rho + a_3 w \rho^3 + a_4 \sqrt{T} + a_5 P \quad (4.3)$$

mit:

- ρ = Dichte / kg m⁻³
- w = Wassergehalt / -
- T = Temperatur / °C
- P = Druck / MPa
- a_i = Empirische Konstanten / -

Die Werte für die Wärmeleitfähigkeit bewegen sich im Bereich von 0,7-1,3 W m⁻¹K⁻¹ und liegen damit etwa um den Faktor 3 niedriger als die des Wirtsgesteins.

Die spezifische Wärmekapazität wird ebenfalls anhand eines empirischen Zusammenhangs gemäß Gleichung (4.4) berechnet [Kahr & Müller-Von Moos 1982], [Knutsson 1983], [Börgesson 1988], [Börgesson et al. 1994], wobei ein Einbauwassergehalt von 10% angenommen wurde.

$$c_p = (c_B + c_w w_B) / (1 + w_B) \quad (4.4)$$

mit:

c_B	=	Spezifische Wärmekapazität von Bentonit
c_w	=	Spezifische Wärmekapazität von Wasser
w_B	=	Wassergehalt im Bentonit

4.3.1.4 Modellgeometrie

Wie bereits in Teil A Kap. 3.1.4.5 dargelegt, wurde der Modellierung eine hexagonale Anordnung der Einlagerungsbohrlöchern zugrunde gelegt. Die Modellierung erfolgte wie für Krasnojarsk mit dem Programmsystem FLAC3D [Itasca 2000].

4.3.2 Berechnungsergebnisse

Basierend auf den Ergebnissen der Auslegungsberechnungen für das Nishnekansker Granitmassiv (vgl. Teil A, Kap. 3.1.4.6) wurden zunächst Berechnungen angestellt unter der Annahme einer Einlagerung von zwei Behältern pro Bohrloch. Damit sollte geprüft werden, ob bei der leicht unterschiedlichen Wärmeleistung der Behälter und den veränderten thermischen Gesteinsparametern die Auslegungstemperatur von 100°C nicht überschritten wird. Der Einbau eines thermischen Isolators wurde in gleicher Weise vorausgesetzt wie bei den Berechnungen zum Nishnekansker Granitmassiv (vgl. Teil A Kap. 3.1.4). Abbildung 4-4 zeigt den Temperaturaufbau an der Grenze zwischen Isolator und Bentonit. Das Temperaturmaximum wird nach etwa 6 Jahren erreicht und verbleibt deutlich unterhalb von 100°C.

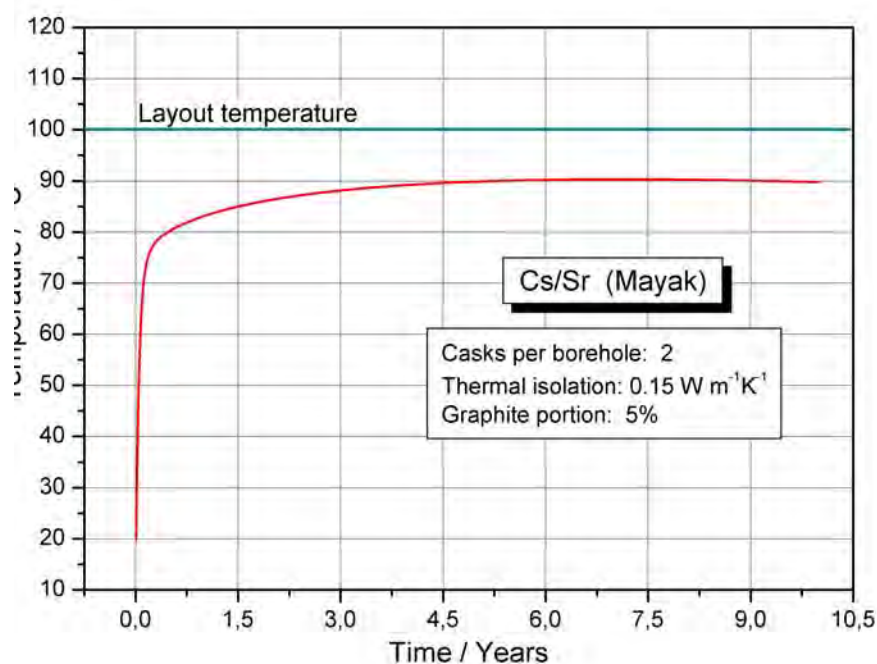


Abb. 4-4: Zeitlicher Temperaturaufbau an der Grenze zwischen Isolator und Bentonit

Die Grenztemperatur wird also unter den gegenüber dem Nishnekansker Granitmassiv veränderten Bedingungen am Standort Majak mit der 2-Behälter-Variante nicht überschritten.

Nach den Berechnungen zur Wärmeentwicklung an einem einzelnen Bohrloch, bei denen die Auslegungstemperatur unter den oben genannten Bedingungen nicht überschritten wird, wurden Berechnungen durchgeführt, um zu ermitteln, in welchen Mindestabständen weitere Bohrungen mit gleichen Wärmequellen bzw. Einbaukonfigurationen niedergebracht werden können ohne dass die Überlagerung der Wärmeausbreitung zu einer Erhöhung der maximalen Temperatur im Bentonit führt.

Der Mindestabstand zweier Bohrungen ergab sich aus den in Analogie zu den in Teil A durchgeführten Berechnungen zu 15 Meter. Tabelle 4-1 zeigt die relevanten Ergebnisse im Überblick.

	Standort Majak
Behälterzahl pro Bohrloch	2
Zwischenlagerzeit der Behälter	50 Jahre
Max. Temperatur Behälteroberfläche	390 °C
Minimaler Bohrlochabstand	15 m
Erforderliche flächenmäßige Ausdehnung	8,3 Mio. m ²

Tabelle 4-1: Ergebnisse der thermischen Auslegung für den Standort Majak.

5 STRÖMUNGS- UND TRANSPORTMODELLIERUNGEN FÜR DEN STANDORT MAJAK

Mit dem Programm FEFLOW wurden erste orientierende Rechnungen zur Grundwasserströmung und zum Schadstofftransport durchgeführt [Jagelke et al. 2004]. Das erstellte zweidimensionale Grundwasserströmungsmodell wurde dabei schrittweise um den Schadstofftransport ohne und später unter Berücksichtigung des natürlichen Wärme-gradienten im Gestein erweitert. Mit diesen Realisationen soll gezeigt werden, dass auf der Grundlage der derzeit zur Verfügung stehenden Standortdaten realistische Simulationsergebnisse erzielt werden können. Die durch die Einleitung flüssigen radioaktiven Abfalls aus der Wiederaufbereitung in den See Karachai verursachte großräumige Verunreinigung des Aquifers fand bisher noch keine Berücksichtigung. Eine Modellierung dieser Schadstofffahne, welche eine höhere Dichte aufweist als das Grundwasser ist modelltechnisch jedoch möglich und zudem von großem Interesse, da durch das großangelegte und regelmäßig beprobte Messstellennetz in diesem Gebiet eine Modellkalibrierung und spätere Validierung möglich wird.

5.1 Das Untersuchungsgebiet

In Abbildung 5-1 ist die Umgebung der Produktionsvereinigung Majak in einem Umkreis von 15 bis 20 km dargestellt. Das hier anstehende Gestein ist zum größten Teil vulkanogenen Ursprungs und wird von zahllosen Klüften zergliedert, vgl. Kapitel 2.

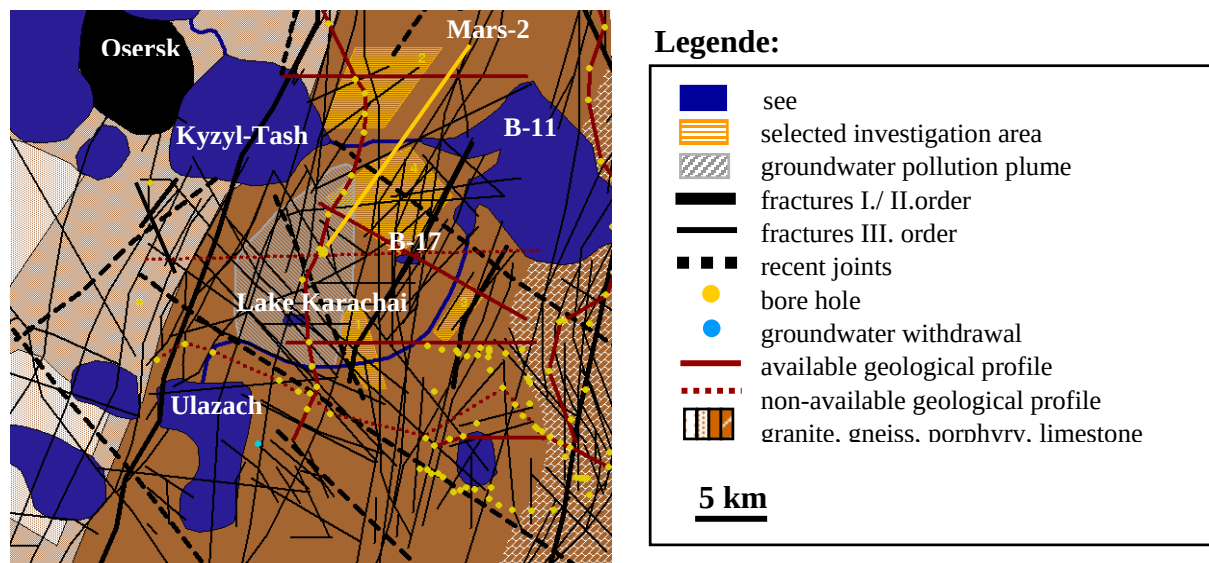


Abb. 5-1: Das Untersuchungsgebiet Majak

In Abbildung 5-2 ist eine zweidimensionale etwa 800 m breite und 1 000 m tiefe Prinzipskizze dargestellt, welche die hydrogeologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet wiedergibt. Der Untergrund teilt sich demnach in vier Teilbereiche auf. Diese unterscheiden sich in ihren hydraulischen Eigenschaften. Die Deckschicht besteht zunächst aus tonig-lehmigen bzw. kiesig-schotterigen Sedimenten und daran anschließend aus stark verwitterten Porphy. Zusammen können diese beiden Schichten bis in eine Tiefe von etwa 100 m reichen. Die beiden unteren Schichten bestehen aus weitgehend intaktem unverwittertem Pophyr und unterscheiden sich in ihrer Gesteinsdurchlässigkeit. Das Ausgangsgestein wurde bis in 1km Tiefe durch Bohrkern nachgewiesen und wird von Klüften stark zergliedert. Die dargestellten hydrogeologischen Verhältnisse bilden die Grundlage für das im Folgenden beschriebene Modell. Die Rechnungen wurden mit dem Programm FEFLOW durchgeführt.

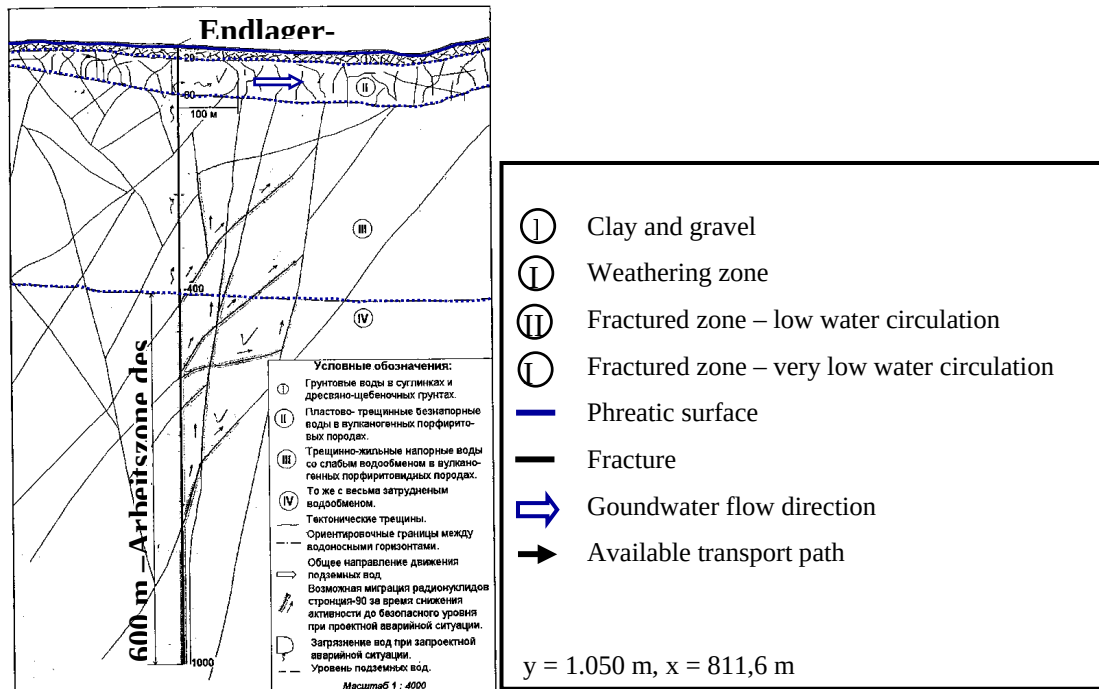


Abb. 5-2: Schema eines geologischen Profils [VNIPIPT 2002]

5.2 Das hydrogeologische Strukturmodell

Das geologische Strukturmodell basiert auf dem in Abbildung 5-2 dargestellten Profilschnitt. Es enthält die vier hydrogeologischen Teilbereiche und eine Auswahl von fünf steil einfallende Klüften mit Einfallswinkeln zwischen 50° und 90°. Modelliert werden somit poröse sowie geklüftete Medien.

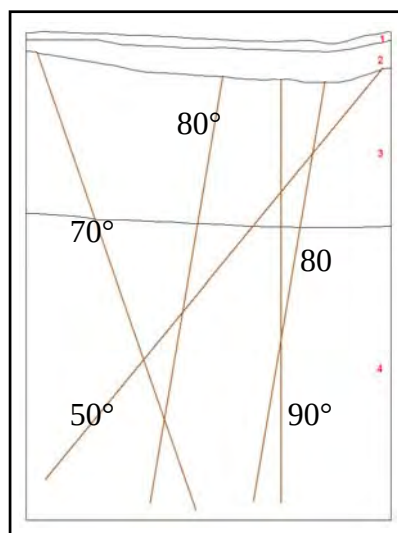


Abb. 5-3: Untergliederung des Modellgebietes in vier Zonen unterschiedlicher hydraulischer Eigenschaften und Kluftauswahl

Den einzelnen Schichten wurden Bereiche von Durchlässigkeitsbeiwerten zugewiesen, die sich an den aus russischen Feldmessungen im Gebiet Krasnojarsk gewonnenen Werten [VNIPIPT 2002] orientieren (vgl. Tabelle 5-1 und Abbildung 5-4). Aufgrund der Tatsache, dass der Porphyr im Gebiet Majak eine dichtere Gesteinsmatrix aufweist als der Granit im Nizhne-

kansker Massiv von Krasnojarsk, wird für diesen jeweils der untere Wert des Durchlässigkeitsspektrums verwendet. Die für die Modellierung verwendeten Werte sind farblich hervorgehoben.

Zone	Beschreibung	Tiefe [m]	K _f -Wert [m/d]	K _f -Wert [m/s]
1	tonig- kiesiges Sediment	bis 100m	$10^{-1} - 1,8$	$1,16 \cdot 10^{-6} - 2,08 \cdot 10^{-5}$
2	Porphy (verwittert)		$5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-1}$	$5,79 \cdot 10^{-8} - 5,79 \cdot 10^{-6}$
3	Porphy	nachgewiesen	$10^{-5} - 3 \cdot 10^{-2}$	$1,16 \cdot 10^{-10} - 3,47 \cdot 10^{-7}$
4	(massiv)	bis 1000m	$10^{-9} - 3 \cdot 10^{-7}$	$1,16 \cdot 10^{-14} - 3,47 \cdot 10^{-12}$

Tabelle 5-1: Gebirgsdurchlässigkeiten mit Angaben zu den im Modell verwendeten Werten

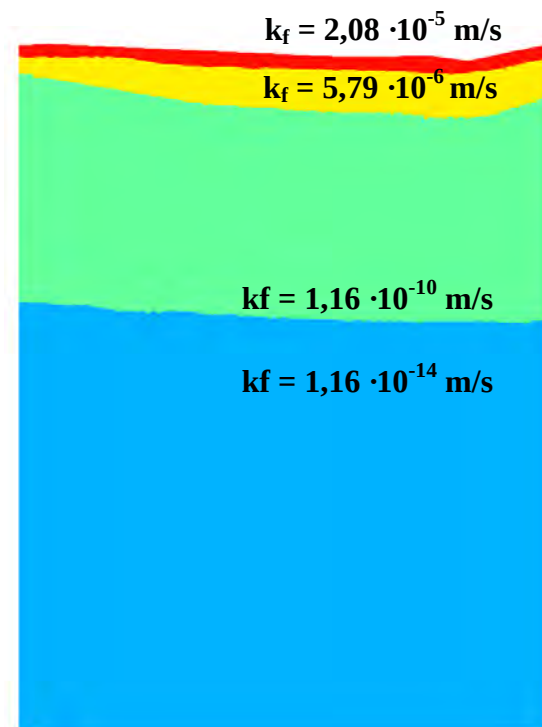


Abb. 5-4: Teufenspezifische Differenzierung der Gesteinsdurchlässigkeit

Laut russischen Angaben beträgt die Kluftweite in diesem Gebiet zwischen 0,1 und 5 mm [VNIPIPT 2002]. In der Modellierung werden die Klüfte mit einer Öffnungsweite von 5mm belegt. Der Wert für die Kluftdurchlässigkeit wurde mit $7,5 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ den russischen Daten entnommen [VNIPIPT 200203]. In Tabelle 5-2 sind die verwendeten Kluftparameter aufgeführt.

K _f -Wert [m d ⁻¹]	K _f -Wert [m s ⁻¹]	Kluftweite [mm]
$7,5 \cdot 10^{-6}$	$8,7 \cdot 10^{-11}$	5

Tabelle 5-2: Parameter zur Modellierung der Klüfte

5.3 Stationäre Strömungsmodellierung ohne Berücksichtigung des natürlichen Wärmefeldes

Der modellierte Vertikalschnitt umfasst eine Fläche von ungefähr $0,85 \text{ km}^2$ und wurde mit einem Finiten-Elemente-Netz vermascht, das aus rund 90.000 Elementen und ca. 45.000 Knoten besteht. Im Bereich des Kluftnetzwerks und den Schichtgrenzen wurde eine Verfeinerung des Gitternetzes vorgenommen, um eine numerische Stabilität im Bereich hoher Konzentrationsgradienten zu gewährleisten. Als hydraulische Randbedingungen wurden randliche Potenzialhöhen von 1 048,8 m auf der linken Seite bzw. 1 048,4 m auf der rechten Seite angenommen, wodurch ein äußerst geringes hydraulisches Potential von $4,9 \cdot 10^{-4}$ und damit ein Grundwasserfluss impliziert wird. Über den oberen Modellrand wird eine kontinuierliche Grundwasserneubildung von $1,13 \cdot 10^{-4} \text{ m/d}$ angenommen, während der untere Modellrand impermeabel ist. Die Grundwasserneubildung entspricht damit 10% der mittleren Niederschlagsmenge. Abbildung 5-5 zeigt sowohl die teufenabhängige Spezifizierung der Gesteinsdurchlässigkeiten (links) als auch die gewählten hydraulischen Randbedingungen (rechts). Die Ergebnisse lassen einen deutlichen Unterschied zwischen dem Strömungsverhalten im porösen oberflächennahen Grundwasserleiter gegenüber dem geklüfteten tieferen Festgesteinsgrundwasserleiter erkennen (s. Abbildung 5-6). Die Klüfte sind durch die in ihnen stattfindende Strömung deutlich erkennbar. Die Berechnungen zeigen, dass die Klüfte in der 3. und 4. Teufen-Zone in starkem Maße zur Gebirgsdurchlässigkeit beitragen.

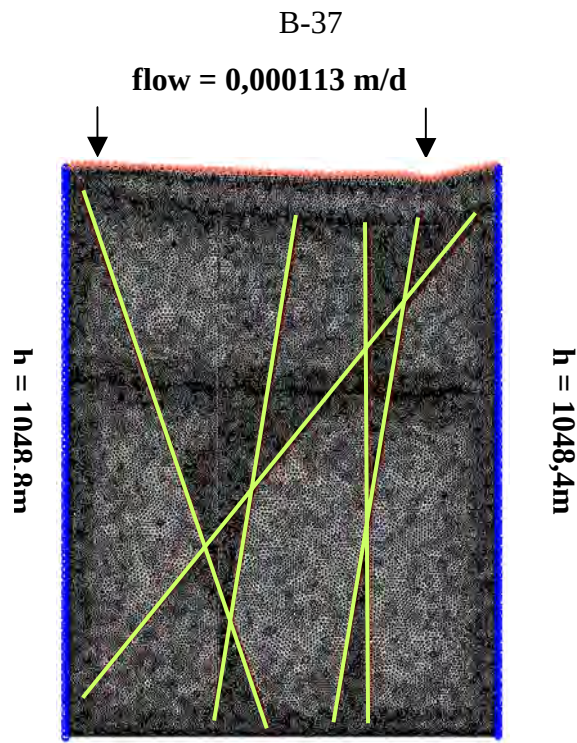


Abb. 5-5: oberer Modellrand (rot): konstante Grundwasserneubildung
seitliche Modellränder (blau): Grundwasserstandsangabe

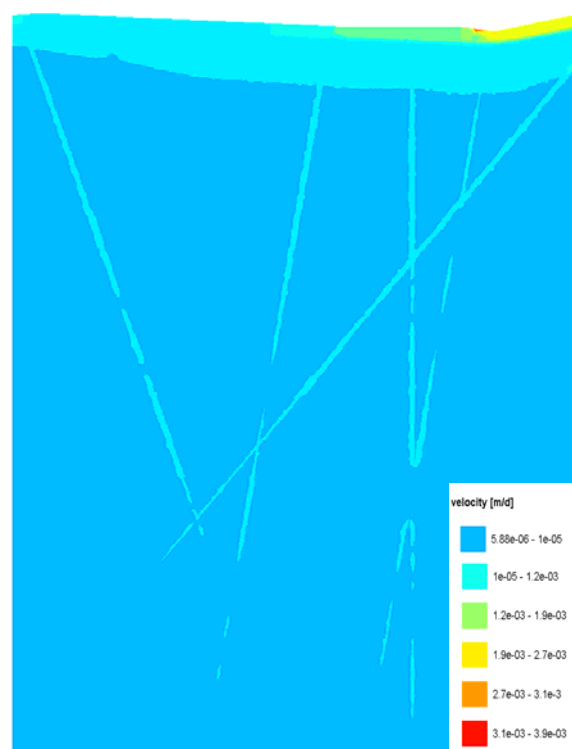


Abb. 5-6: Die Ergebnisse zum stationären Strömungsverhalten ohne Berücksichtigung des Wärmetransportes

5.4 Transportmodellierung ohne Berücksichtigung des natürlichen Wärmefeldes

Das in Kapitel 5.3 beschriebene Strömungsmodell wurde in einem weiteren Schritt zu einem Transportmodell erweitert. Dafür wurde in dem Kluftsystem eine konstante Schadstoffquelle angenommen und der Transport des Tracers durch den Gesteinskörper verfolgt. Der Schad-

stoff unterliegt weder Zerfall noch Sorption und erfährt somit keine Retardation. Wie erwartet findet die Schadstoffausbreitung aufgrund der großen Differenzen zwischen Matrix- und Kluftdurchlässigkeit nahezu ausschließlich im Kluftsystem statt (Abbildung 5-7). Die Effekte der Matrixdiffusion und Dispersion sind vernachlässigbar. Bereits nach weniger als 40 Jahren findet ein erheblicher Schadstoffaustrag an die Oberfläche bzw. die Deckschicht statt. Die Verschneidung mit Klüften absteigender Grundwasserfließrichtung führt aufgrund der Überlagerung von Schadstoffkonzentrationen aus verschiedenen Klufrichtungen zunächst zu einer schwankenden Schadstoffkonzentration innerhalb des Kluftsystems. Dieses Phänomen wurde bereits in [CGER 1996] beschrieben und wird in Durchbruchkurven sichtbar (vgl. Abbildung 5-7).

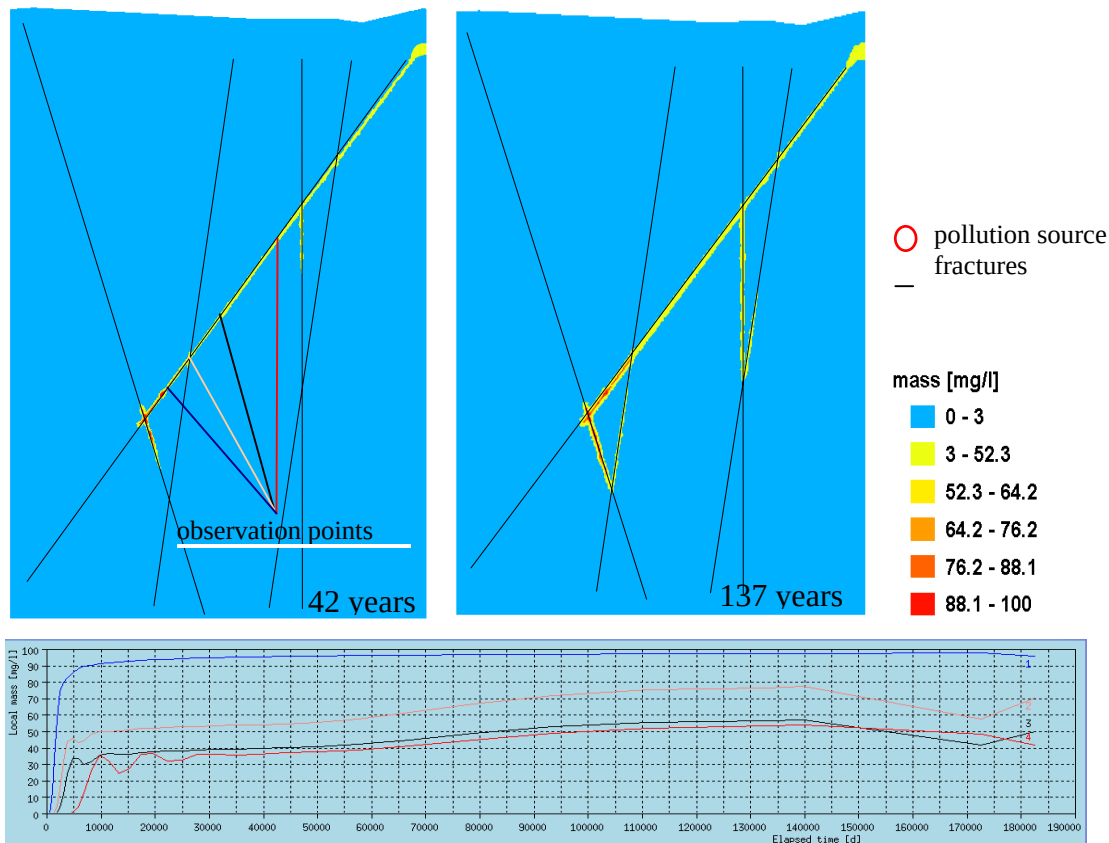


Abb. 5-7: oben: Räumliches Stoffausbreitungsverhalten im Gesteinskörper
unten: Durchbruchskurven verschiedener Beobachtungspunkte

4.5 Transportmodellierung unter Berücksichtigung des natürlichen Wärmefeldes

In einem weiteren Schritt wurde das bestehende und in Kapitel 5.3 beschriebene Strömungsmodell um den Einfluss des natürlichen Wärmefeldes erweitert. Dazu wurde am oberen Modellrand eine Temperatur von konstanten 2°C angegeben (s. Tabelle 5.3). Unter der Annahme eines Wärmegradienten von 0,03 m⁻¹ wurde der untere Modellrand mit einer Temperatur von 33,5°C belegt. Die eingegebenen Randbedingungen sowie das sich daraufhin ausbildende Wärmefeld sind in der Abbildung 5- dargestellt. Über die in das Modell eingegebenen thermischen Parameter informiert die Tabelle 4-3. Für das Porphyrgestein konnte dabei auf russische Angaben zurückgegriffen werden [VNIPIPT 2002]. Abbildung 4-8 zeigt die sich ausbildenden Isothemen.

	Wasser (20°C)	Gestein
spez. Wärmekapazität	4,17 J / (cm ³ · K)*	733 J / (kg · K)°
Wärmeleitfähigkeit	59,7 W / (cm · K)*	2,66 W / (m · K)°

* [Diersch 2004]

° [VNIPIPT 2002]

Tabelle 5-3: Parameter zur Wärmeausbreitung

Nach [Bear et al. 1993] ist die longitudinale Dispersion für Stoff- und Wärmetransport größenmäßig vergleichbar. Die sowohl im Wasser als auch im Gestein stattfindende Wärmediffusion aufgrund unterschiedlicher Dichten führt zu einer intensiven thermischen Durchmischung, so dass die Wärmedispersion bei natürlichen Strömungsverhältnissen im Untergrund im Vergleich zu den advektiven und diffusiven Wärmetransportprozessen in der Regel nur eine untergeordnete Rolle spielt. Folglich wird die Dispersion der Wärme analog zum Stofftransport durch eine longitudinale Dispersionslänge von 5 m und einer transversale Dispersionslänge von 0,5 m berücksichtigt.

Die sich ausbildende Grundwasserströmung ist eine nicht-lineare Überlagerung der Potentialströmung mit der aufgrund des Wärmefeldes entstehenden vertikal nach oben gerichteten Strömung.

2°C

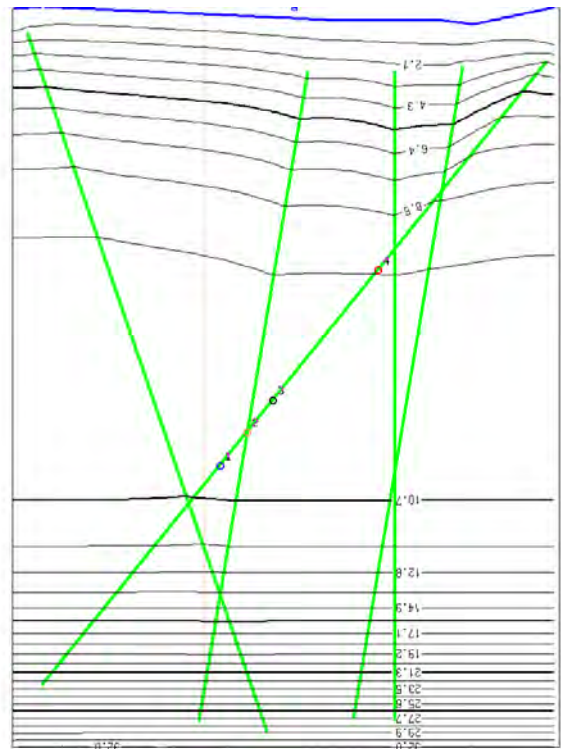
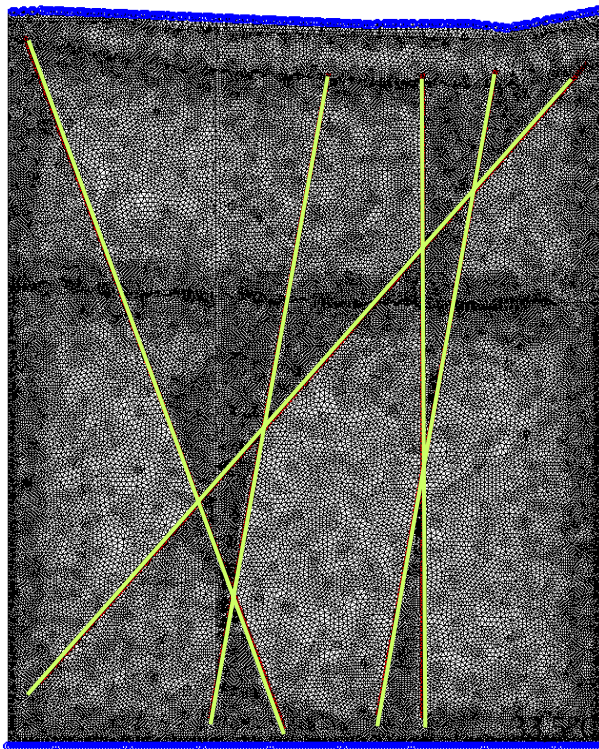


Abb. 5-8: links: Wärme-Randbedingungen
rechts: Ausbildung der Isothermen

Der Schadstoffeintrag wurde an zwei unterschiedlichen Orten zum einen der Gesteinsmatrix und zum anderen innerhalb des Kluftsystems untersucht. Es zeigt sich, dass der Schadstoff auch in diesem Modell nahezu ausschließlich innerhalb des Kluftsystem transportiert wird, jedoch einen anderen Transportweg einschlägt als in der Transportmodellierung ohne das natürliche Wärmefeld, vgl. Abbildung 5-9 und Abbildung 5-10. Dies lässt sich durch den auf-

grund der stärkeren Kluftneigung betragsmäßig größeren Wärmegradienten und damit schnelleren Strömungsgeschwindigkeit in dieser erklären. Nur sehr geringe Diffusionsvorgänge führen zu einem Stofftransport in die angrenzende Gesteinsmatrix.

Liegt die Stoffquelle jedoch in der Gesteinsmatrix, so findet aufgrund der geringen Matrixdurchlässigkeit lediglich ein sehr langsamer diffusiver Transport in die Gesteinsmatrix statt. Die gleichmäßige radiale Diffusion des Schadstoffs in die Gesteinsmatrix wird von der Grundwasserströmungsrichtung in dieser leicht überprägt. Aufgrund der geringen Gebirgsdurchlässigkeit in der Gesteinsmatrix bleibt die Schadstoffausbreitung in ihrer Ausdehnung auch nach etwa 500 Jahren auf 100 bis 120 m beschränkt, vgl. Abbildung 5-10.

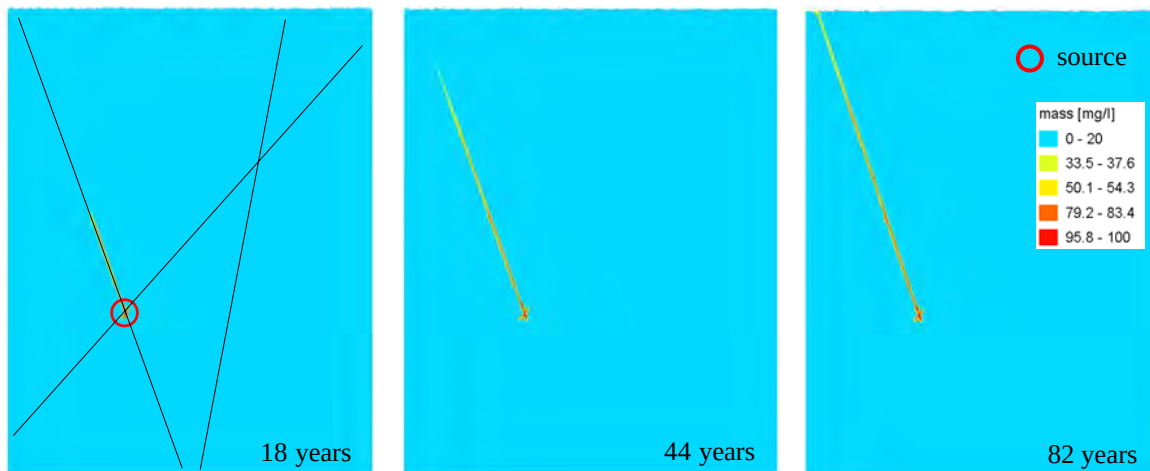


Abb. 5-9: Schadstoffausbreitung innerhalb des Kluftsystems unter Einfluss des natürlichen Wärmefeldes

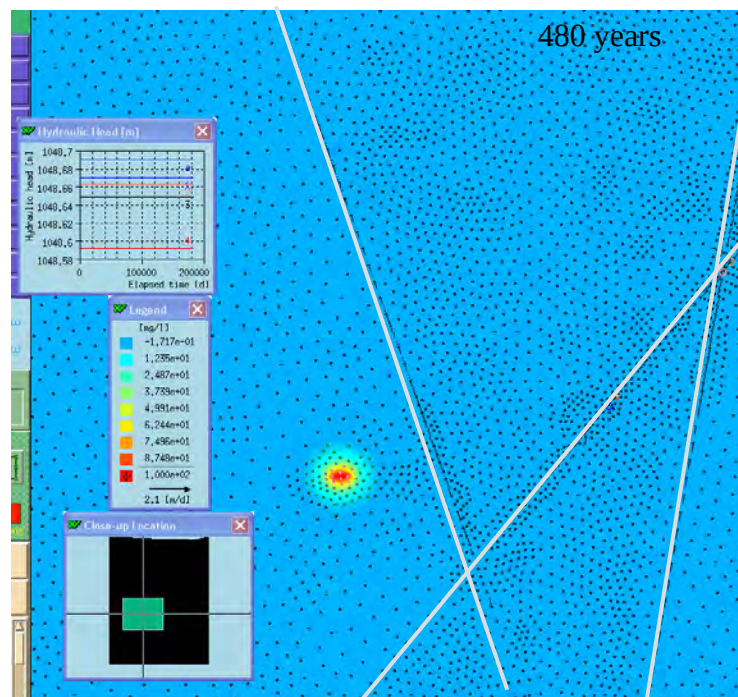


Abb. 5-10: Schadstoffausbreitung innerhalb der Gesteinsmatrix unter dem Einfluss des natürlichen Wärmefeldes

5.5 Diskussion und Ausblick

Die durchgeführten Simulationen zum Schadstofftransport mit und ohne Berücksichtigung des thermisch induzierten Dichteeffektes im Untersuchungsgebiet Majak befinden sich noch in ihrer Anfangsphase. Es hat sich jedoch bereits gezeigt, dass das verwendete Programm FEFLOW in der Lage ist, die vorhandenen feldgeologischen Informationen in einem schlüssigen 1-2 (3D)- Strukturmodell nachzubilden und nachvollziehbare Modellergebnisse zu erzielen. Die dokumentierten Realisationen basieren auf einem 2-d Profilmodell, in dem das Kluftsystem als 1-d Elemente integriert sind. Schrittweise sollte aus diesem ein 3-d Modellansatz entwickelt werden, um das wasserführende Kluftsystem auch räumlich erfassen zu können. Zudem werden dadurch die Voraussetzungen geschaffen, den See Karachai mit dem dortigen Einstrom der gegenüber dem Grundwasser dichteren Schadstofffahne in die Modellierung mit einzubeziehen. Das großangelegten und regelmäßig beprobte Messstellennetz bietet zudem die Möglichkeit eine Modellkalibrierung und spätere Validierung vorzunehmen.

Der direkte Vergleich der Schadstoffausbreitung im Kluftsystem und in der Gesteinsmatrix unter dem Einfluss des natürlichen Wärmegradienten verdeutlicht die Bedeutung einer Verifikation der hydrogeologischen Informationen bezüglich feldgeologischer Erhebungen der räumlichen Orientierung und der Parametrisierung des vorhandenen Kluftsystems. Es wird daher die Entwicklung eines Kluftnetzes mit kluftstatistischen Analysen vorgeschlagen.

6 LITERATUR

- Aduschkin, V. V. et al. 1997: Aduschkin, V. V. Loktev, D. N. & Spivak, A. A.: Diagnose von Gesteinsmassiven des Territoriums der PO „Majak“ auf der Grundlage der Resultate des Monitorings von Relaxationsprozessen (russ.). Voprosy radiacionnoj besopasnosti (1997)1, 18-30
- Bear et al. 1993: Bear, J., C.-F. Tsang & de Marsily, G.: Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock.- Academic Press, San Diego, 1993
- Börgesson 1988: Börgesson, L., Modelling of buffer material behaviour, some examples of material models and performance calculations, SKB Technical Report, Lund, 1988 Sweden.
- Börgesson 1994: Börgesson, L., Fredrikson, A., Johannesson, L.-E Heat conductivity of buffer materials, SKB Technical Report, Lund 1994, Sweden.
- CGER 1996: (Commission of Geosciences, Environment and resources): CGER (Commission of Geosciences, Environment and resources) Rock Fractures and Fluid Flow: Contemporary Understanding and Applications.- National Academy Press, Washington, D.C., 1996.
- Diersch 2004: Diersch, H.-J.: FEFLOW 5.1 Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System, User's Manual, 2004
- Filbert 1998: Filbert, W., Engelmann, H. J. DBE, Aktualisierung des Konzepts „Endlager GORleben“, Abschlussbericht, 1998, Peine.
- Itasca 2000: Itasca Consulting Group, Inc. 2000: FLAC3D, User's Guide.
- Kahr et al. 1982: G. Müller-Von Moos, M. 1982: Wärmeleitfähigkeit von Bentonit MX80 und von Montigel nach der Heizdrahtmethode, Institut für Grundbau und Bodenmechanik ETH Zürich, Nagra Technischer Bericht 82-06, Baden.
- Knutsson 1983: Knutsson, S. On the thermal conductivity and thermal diffusivity of highly compacted bentonite, SKBF/KBS Technical Report, 1983.
- Konenko et al. 1990: Kononenko, I. K., Chalevin, N. K., Bljumin, M. A. & Jashchenko, V. R.: Rezente Geodynamik des Urals (russ.). Sverdlovsk, Ural-Abteilung AdW SSSR (1990), 94 S.
- Kotschkin et al. 1997: Kotschkin, B. T., Patyk-Kara, N. G. & Spasskaja, I. I.: Langfristige Prognose der Denudation bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle (am Beispiel des Südurals) (russ.). Geologija rudnych mestorozhdenij 39(1997), 193-205
- Laverov et al. 2001: Laverov, N. P., Velitschkin, V. I., Omeljanenko, B. I., Petrov, V. A. & Tarasov, N. N.: Neue Herangehensweisen an die unterirdische Endlagerung hochaktiver Abfälle in Russland (russ.). Geoekologija (2000)1, 3-12

- Laverov et al. 2002: Laverov, N.P., Petrov, W.A. 2002: Petrophysikalische Eigenschaften der Granitoide des Nishnekansk Massivs - zur Frage der Standortwahl für die Endlagerung hochaktiver Abfälle und abgebrannter Brennelemente, *Geologie, Ingenieurgeologie, Hydrogeologie, Geokryologie*, Nr. 4, S. 293-310.
- Laverov et al. 2003: Laverov, N. P., Petrov, V. A., Velitschkin, V. I., Poluektov, V. V., Scharikov, A. V., Nasimov, R. M., Djaur, N. I., Rovnyj, S. I., Droschko, E. G. & Ivanov, I. A.: Petrophysikalische und mineralogisch-chemische Aspekte der Standortauswahl für die HAW-Isolierung in den Metavulkaniten der PO "Majak", Süduralsk (russ.). *Geoekologija* (2003)1, 5-22
- Minaev et al. 2001: Minaev et al., Proceedings, WM'01 Conference Tucson, February 25-March 1, 2001
- Novejschij Katalog 1977: Der neueste Katalog von starken Erdbeben auf dem Territorium der UdSSR seit uralten Zeiten bis 1975 (russ.). Moskau, Nauka (1977), 535 S.
- Petrov 2001: Petrov, V. A.: Untersuchungen der petrophysikalischen Eigenschaften und des Spannungs-Deformations-Zustandes der Gesteine im Gebiet der PO "Majak" und des GChK in Verbindung mit der Auswahl von Polygonen für die Isolation von HAW (russ.). *Geologija rudnych mestorozhdenij* 43(2001)6, 478-494
- RADLEG, 1997: RADLEG project 245, <http://www.kiae.ru/radleg/ch7e.htm>
- Sagmeister 1999: Sagmeister, B. 1999: Mauersteine, wärmedämmend mit haufwerksporigem Leichtbeton, Sonderdruck aus BFT 7/99, Bauverlag GmbH, Walluf.
- Sheppard et al. 2001: Sheppard, R. G., Mathes, D. M., Bray, D. J. 2001: Properties and characteristics of graphite - thermal conductivity - 5th printing, Poco Graphite, Inc., Decatur, Texas, USA.
- Velichkin et al. 1993 : Velichkin, V. I. et al.: Einschätzung der Barriereigenschaften des geologischen Milieus des Gebietes der Produktionsvereinigung "Majak" auf der Grundlage geologischer, hydrogeologischer und petrologischer Untersuchungen (russ.). Moskau, IGM (1993)
- Velichkin et al. 1994 : Velichkin, V. I. et al.: Einschätzung der Barriereigenschaften des geologischen Milieus des Gebietes der Produktionsvereinigung "Majak" auf der Grundlage geologischer, hydrogeologischer und petrologischer Untersuchungen (russ.). Moskau, IGM (1994)
- Velichkin et al. 2003 : Velichkin, V. I., Petrov, V. A., Kotschkin, B. T. & Malkovskij, V. I.: Langfristige Prognose der Veränderung der Parameter des HAW-Einlagerungsmilieus im Gebiet der Produktionsvereinigung „Majak“ unter dem Einfluss geologischer Faktoren auf der Grundlage von Paläorekonstruktionen und einer mathematischen Modellierung (russ.). *Wiss. Bericht*, Moskau, IGM (2003), 96 S.

VNIPI PT 2002:

VNIPI PT, Standortspezifische Daten für den Bereich des
Nishnekansker Granitmassivs und den Standort Majak,
schriftliche Mitteilung 2002

7 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1-1:	Standort der Produktionsvereinigung Majak.....	B-3
Abb. 1-2:	Majak - Radiochemische Produktionsanlagen für die Plutoniumgewinnung ...	B-4
Abb. 1-3:	Majak RT-1 Zwischenlager für ausgediente Brennelemente	B-4
Abb. 1-4:	Majak RT-1 Transportcontainer für ausgediente Brennelemente	B-5
Abb. 1-5:	Majak - Zwischenlager für verglaste HLW.....	B-5
Abb. 2-1:	Zeitliche Entwicklung der Wärmeleistung der verglasten HLW-Fraktionen	B-10
Abb. 3-1:	Lage der vom IGM für Detailuntersuchungen empfohlenen potenziellen Endlagerstandorte im Umfeld der Produktionsvereinigung Majak (aus: [Laverov et al. 2000]).....	B-11
Abb. 3-2:	Tektonisches Schema des Urals und der östlichen Randgebiete der Osteuropäischen Plattform (Kononenko et al. 1990, aus: Velichkin et al. 2003).....	B-12
Abb. 3-3:	Blockstruktur und regionale Störungszonen im Umfeld der Produktionsvereinigung Majak, Südural (aus: [Laverov et al. 2000]).....	B-14
Abb. 3-4:	Schema zur geologischen Struktur und zum tektonischen Störungsgrad sowie zum Spannungszustand im Gebiet der Produktionsvereinigung Majak (aus: Velichkin et al. 2003)	B-17
Abb. 3-5:	Geologische Schnitte zur Illustration der Rolle der Argajaschsker Überschiebung im Untersuchungsgebiet (Lage der Schnitte: siehe Abb. 3-3).....	B-18
Abb. 3-6:	Schema zur Seismizität der Mittel- bis Südural-Region (nach Angaben aus: Novejschij Katalog 1977, mit Ergänzungen, aus: Velichkin et al. 2003).....	B-21
Abb. 3-7:	Seismische Aktivitäten im Umfeld des Gebietes der Produktionsvereinigung Majak, im Vergleich zum europäischen Teil Russlands, zum Ural und zu Westsibirien (nach Angaben aus: Novejschij Katalog 1977, aus: Velichkin et al. 2003).....	B-22
Abb. 3-8:	Kliamdiagramm Tscheljabinsk.....	B-23
Abb. 4-1:	Angenommene Einlagerungsteufe und lokale Temperaturverhältnisse gemäß entsprechender, als repräsentativ angenommener, Messungen in der Bohrung 1K-700 [VNIPI PT 2002].....	B-28
Abb. 4-2:	Volumenspezifische Wärmeleistung der Cs/Sr Abfallfraktionen als Funktion der Zeit im Vergleich zu anderen zur Endlagerung vorgesehener Abfallbehälter.....	B-29
Abb. 4-3:	Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität der am Standort Majak angetroffenen Gesteinsarten als Funktion der Temperatur.	B-30
Abb. 4-4:	Zeitlicher Temperaturentwurf an der Grenze zwischen Isolator und Bentonit	B-31
Abb. 5-1:	Das Untersuchungsgebiet Majak.....	B-33

Abb. 5-2:	Schema eines geologischen Profils [Laverov et al. 2003].....	B-34
Abb. 5-3:	Untergliederung des Modellgebietes in vier Zonen unterschiedlicher hydraulischer Eigenschaften und Kluftauswahl	B-34
Abb. 5-4:	Teufenspezifische Differenzierung der Gesteinsdurchlässigkeit	B-35
Abb. 5-5:	oberer Modellrand (rot): konstante Grundwasserneubildung seitliche Modellränder (blau): Grundwasserstandsangabe	B-37
Abb. 5-6:	Die Ergebnisse zum stationären Strömungsverhalten ohne Berücksichtigung des Wärmetransportes	B-37
Abb. 5-7:	oben: Räumliches Stoffausbreitungsverhalten im Gesteinskörper unten: Durchbruchskurven verschiedener Beobachtungspunkte	B-38
Abb. 5-8:	links: Wärme-Randbedingungen rechts: Ausbildung der Isothermen	B-39
Abb. 5-9:	Schadstoffausbreitung innerhalb des Kluftsystems unter Einfluss des natürlichen Wärmefeldes.....	B-40
Abb. 5-10:	Schadstoffausbreitung innerhalb der Gesteinsmatrix unter dem Einfluss des natürlichen Wärmefeldes.....	B-40

8 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2-1: Majak – Anfall endzulagernder Abfälle aus der Anlage RT-1.....	B-7
Tabelle 2-2: Majak – Aktivität und Radionuklidgehalt der verglasten HLW	B-8
Tabelle 2-3: Majak – Aktivität und Radionuklidgehalt der Gebinde mit fraktionierten HLW	B-8
Tabelle 2-4: Konzentration und Aktivität von Aktinoiden im bestrahlten Kernbrennstoff WWER-440	B-9
Tabelle 2-5: Majak – Übersicht über das endzulagernde Inventar.....	B-10
Tabelle 3-1: Durchschnittliche chemische Zusammensetzung der silurisch-devonischen Metavulkanite aus dem Territorium der Produktionsvereinigung Majak (Angaben in Gew.%; (aus: [Laverov et al. 2003])	B-15
Tabelle 3-2: Angaben zur Kluftorientierung und -ausbildung in den vulkanogen-sedimen- tären Gesteinen im Umfeld der Produktionsvereinigung Majak.....	B-19
Tabelle 3-3: Mittelwerte der physikomechanischen Parameter für die vulkanogen- sedimen-tären Gesteine im Umfeld der Produktionsvereinigung Majak	B-24
Tabelle 3-4: Festigkeitsgrenzwerte der Andesit-Basalte aus dem Majak-Umfeld	B-25
Tabelle 3-5: Zusammenstellung der wichtigsten physikomechanischen Kennwerte der Vulkanite aus dem Untergrund des Gebietes Majak, geordnet nach Festigkeitsgruppen der Gesteine (k. A. – keine Angaben).....	B-25
Tabelle 3-6: Temperatur-induzierte Veränderung der Wasserdurchlässigkeit von geschieften Tuffen aus dem Umfeld der Produktionsvereinigung Majak.....	B-26
Tabelle 4-1: Ergebnisse der thermischen Auslegung für den Standort Majak.	B-32
Tabelle 5-1: Gebirgsdurchlässigkeiten mit Angaben zu den im Modell verwendeten Werten	B-35
Tabelle 5-2: Parameter zur Modellierung der Klüfte.....	B-35
Tabelle 5-3: Parameter zur Wärmeausbreitung	B-39

ANLAGE A1
KURZBESCHREIBUNG DES PROGRAMMS „OpenGeo5“

A1 Kurzbeschreibung des Programms „OpenGeo5“

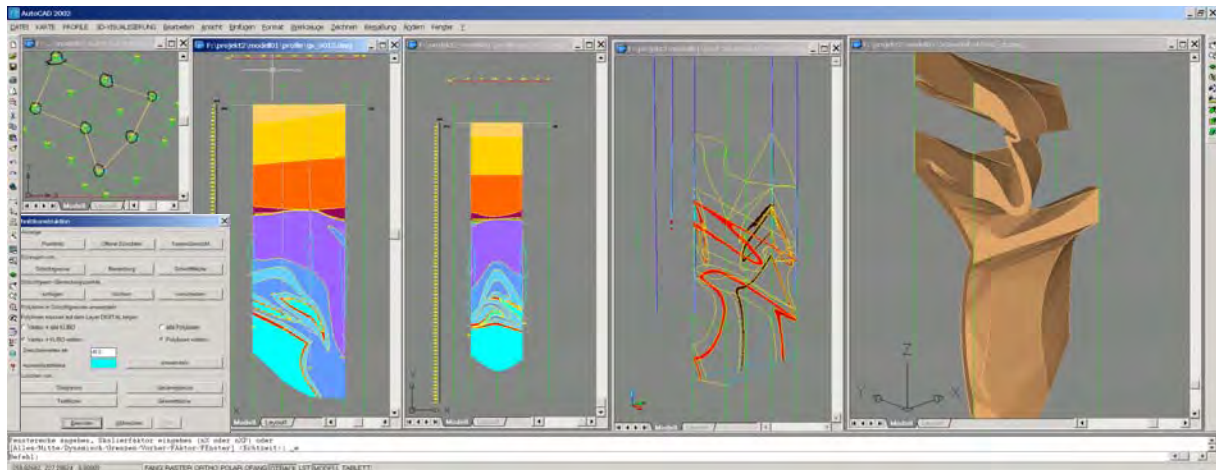
Für die Bearbeitung geologisch-tektonischer Problemstellungen, bei denen genaue Kenntnisse zum geologischen Bau komplexer Strukturen erforderlich sind, werden in zunehmendem Maße 3D-Modelle als Datengrundlage und Planungstool eingesetzt. Das mittels Personalcomputer anwendbare Programm „openGEO5“ (frühere Bezeichnung: „PROGIS 2003“) stellt einen speziell für die Konstruktion komplizierter geologischer 3D-Körper entwickelten Zusatz zum Programm „AutoCAD“ dar. „AutoCAD“ ist ein vielseitig genutztes und weit verbreitetes Programm, das speziell für die maßstabsgetreue Konstruktion räumlicher Körper auf der Grundlage exakter dreidimensionaler Koordinatensysteme entwickelt wurde.

Im Programm „openGEO5“ wurden die Konstruktions- und Datenmanagementfunktionen von „AutoCAD“ gezielt für geologische Aufgabenstellungen modifiziert und durch einen speziellen, neu entwickelten Rechenkern ergänzt. Dies ermöglicht die Konstruktion geologischer 3D-Modelle auf der Grundlage verschiedenster geologisch-geophysikalischer Erkundungsergebnisse (siehe Kap. 5.2) sowie die effektive Verwaltung der Ausgangsdaten und Modelle. Das Programm wurde von der Firma „BiCad“, Hannover, in enger Zusammenarbeit mit der BGR entwickelt und wird kontinuierlich den Anforderungen aus der geologischen Praxis angepasst.

„openGEO5“ ermöglicht im Unterschied zu anderen 3D-Modellierungsprogrammen (z. B. „gOCad“, „Datamine“, „Lynx“ oder „Minescape“) nicht nur die Kombination von 2d-Elementen, wie Karten und Schnitten (d. h. von Projektionen der Erkundungsdaten auf zweidimensionale Schnittebenen) zu einer 3D-Darstellung, sondern die Generierung echter dreidimensionaler geologischer Körper, wie z. B. Homogenbereiche, Störungszonen, Falten oder Lithotypenverteilungen).

Die arbeitsaufwändige Erstellung eines komplexen geologischen 3D-Standortmodells mittels „openGEO5“ ist nur dann sinnvoll, wenn abgesichert wird, dass das Modell im weiteren Verlauf der Planung und Projektierung von Erkundungs- und bergmännischen Erschließungsarbeiten Anwendung findet. Die Erstellung von übersichtsmäßigen 3D-Modellen „lediglich zum Anschauen“ bzw. zum groben Illustrieren der geologischen Situation rechtfertigt den an die Modellierung mit diesem Programm geknüpften hohen Aufwand nicht. Die mit „openGEO5“ konstruierten geologischen Modelle können bei Vorlage neuer, ergänzender Erkundungsdaten jederzeit modifiziert bzw. partiell überarbeitet werden.

Die Konstruktion der geologischen Strukturen als 3D-Körper erfolgt in mehreren aufeinander aufbauenden Etappen (Abb. A-1). Zuerst wird für den zu modellierenden Bereich in „openGEO5“ eine Projektdatei angelegt, in die alle vorhandenen geologischen und geophysikalischen Erkundungsdaten eingelesen werden. Soweit erforderlich müssen analoge Daten dafür aufgearbeitet, z. B. digitalisiert werden.

**Monitor 1****Monitor 2**

Auf dem linken Monitor sind die Leitkarte und geologische Profile sichtbar, die auf den Prismenseitenflächen unter Einbeziehung der vorliegenden Erkundungsdaten konstruiert wurden. Rechts sind Beispiele für die räumliche Modellierung geologischer Körper innerhalb einer Salzkuppelstruktur wiedergegeben.

Abb. A1- 1: Schema zum Ablauf einer geologischen 3D-Modellierung mittels „openGEO5“

Die Eingabe der in Kap. 5.2 aufgeführten Daten erfolgt Koordinaten-bezogen, d. h. die geologisch-geophysikalischen Erkundungsergebnisse werden maßstabsgerecht und raumgetreu in das Modell eingefügt (siehe Kap. 5.3). Für die Modellierungsarbeiten stehen die entsprechenden Befunde später z. B. in Form von Profilschnitten, raumlagerichtig angeordneten Reflektorenpositionen und auf den Bohrverlauf projizierten Kontaktflächen unterschiedlicher Lithotypen oder Störungszonen zur Verfügung (siehe z. B. Abb. 5-1).

Anschließend erfolgt die Festlegung eines Konstruktionsgitters, d. h. mittels Triangulation wird die sogenannte Leitkarte aufgebaut. Die Leitkarte (Abb. A-1 links und Abb. 5-4) gibt die frei wählbaren Positionen der zu konstruierenden geologischen Profilschnitte in Form eines Dreiecksnetzes wider, d. h. das Modellgebiet wird in vertikale Dreiecksprismen aufgeteilt. Die Prismenseitenflächen entsprechen den Ebenen, in denen geologische Profilschnitte auf der Basis der zur Verfügung stehenden geologisch-geophysikalischen Informationen konstruiert werden.

Als Eckpunkte der Dreiecke können einerseits bereits niedergebrachte Erkundungsbohrungen verwendet werden, wobei die aus den Bohrungen gewonnenen geologischen und geophysikalischen Informationen direkt für die Konstruktionsarbeiten genutzt werden können. Andererseits können Messpunkte aus geophysikalischen Profilen oder „Kunstbohrungen“ ohne Vorinformation als Eckpunkte platziert werden.

Die Aufteilung des Modellgebietes in Dreiecksprismen bietet eine Reihe von Vorteilen, wie:

- die Aufspaltung des Gesamtmodells in beliebige Teilgebiete, was die Konstruktion im 3D-Raum erleichtert,
- eine deutliche Reduzierung des Datenumfangs der Teilmodelle, was die Geschwindigkeit der Bearbeitung durch den Computer erhöht,
- die Möglichkeit einer lokal begrenzten, stufenweisen Verfeinerung des Modells und
- die zeitgleiche Bearbeitung unterschiedlicher Modellteile durch verschiedene Personen.

Durch dieses „Containerprinzip“ können exakt abgrenzbare Modellteile in verschiedenen Formaten exportiert und anderen Anwendern, z. B. für geomechanische und hydrogeologische Berechnungen zur Verfügung gestellt werden. Um die Kompatibilität der Ausgabedaten zu anderen Datenformaten zu gewährleisten, wurden zahlreiche Schnittstellen von „openGEO5“ zu anderen Programmen entwickelt. Auf der Grundlage neuer Vorgabedaten und veränderter

Konstruktionsüberlegungen können aus einem Basismodell für bestimmte Bereiche mehrere Modellvarianten erarbeitet werden.

In der sich anschließenden Etappe der Profilkonstruktion werden die Erkundungsdaten (z. B. Bohrkernbeschreibungen, Bohrlochgeophysikkurven, Resultate oberflächengeophysikalischer Messungen, Kartierungsergebnisse), die die Grundlage für die 3D-Modellierung bilden, gemeinsam oder selektiv in die Profilschnitte eingeblendet und stehen somit für die Konstruktionsarbeiten zur Verfügung.

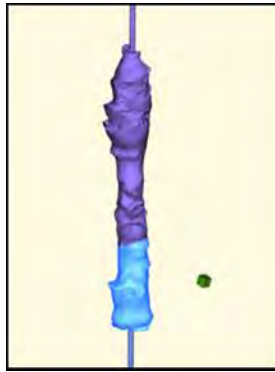
Im Ergebnis der 3D-Modellierung sollen widerspruchslöse, konsistente Körper vorliegen. Dazu ist insbesondere beim Konstruieren mit mehreren Bearbeitern ein Abgleich oder eine Kontrolle der Teilmodelle an den Verknüpfungspunkten bzw. -kanten notwendig. In „openGEO5“ erfolgt diese Kontrolle an den Bohrungen und Kunstbohrungen, die die Prismenecken bilden, da an diesen Kreuzungspunkten die Konstruktionen verschiedener Profile zusammenlaufen. Voraussetzung für diese Kontrollprozedur ist, dass eine bestimmte geologische Grenze die Bohrung nur in einem Tiefenwert schneidet. Ist dieser Tiefenwert durch die Konstruktion in einem Profil festgelegt, so ist er für alle Profilebenen, die auf diese Bohrung zulaufen, bindend. Eine Änderung der Lage bzw. Höhe dieses Punktes z. B. durch Neuinterpretation wird automatisch in allen angrenzenden Profilen übernommen, so dass gebietsübergreifend konsistente 3D-Körper entstehen.

Die 3D-Körper-Erstellung innerhalb der Dreiecksprismen erfolgt zunächst automatisch durch Triangulation entlang der Schichtgrenzen. Im Vergleich zu interpolativen Verfahren gewährleistet die Triangulation eine Verbindung der Originaldaten ohne Glättungsfehler, d. h. mit hoher Detailtreue. Eine manuelle Nachbearbeitung der Triangulationsergebnisse der geologischen Körper ist falls erforderlich, z. B. bei extremer Ausdünnung oder beim Ausbiss geologischer Körper innerhalb eines Dreiecks, leicht und ohne großen Rechenaufwand durchführbar.

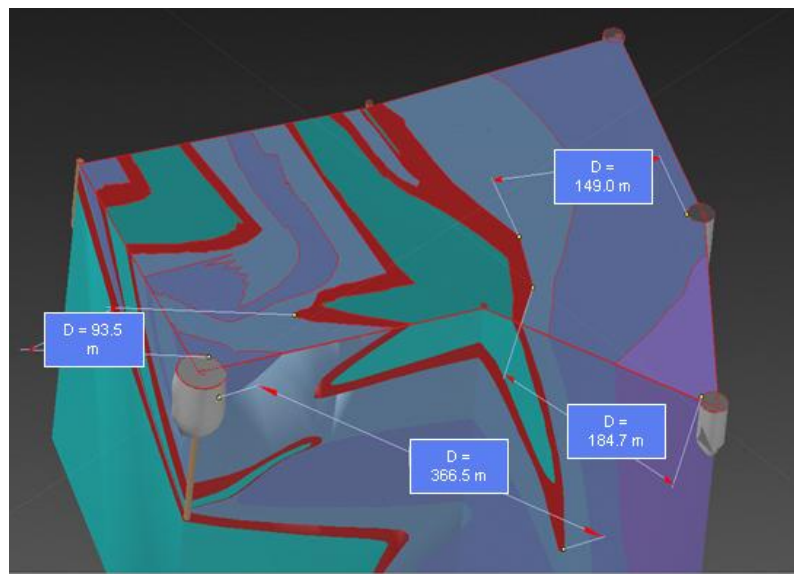
Lediglich im abschließenden Stadium der Konstruktion, d. h. im Prozess der Optimierung der Oberflächen der Vollkörper in allen Konstruktionsdreiecken bzw. -prismen, ist der Einsatz eines Highend-Personalcomputers (mit 128 bis 256 MB-Graphikkarte für CAD-Anwendungen, schnellem Prozessor mit z. B. 300 bis 800 MHz FSBus und einem Arbeitsspeicher ≥ 512 MB) empfehlenswert. Da für die Konstruktionsarbeiten eine ständige 3D-Kontrolle der geologischen Körper erforderlich ist, sollte die Dualscreen-Technik möglichst mit 21-Zoll-Bildschirmen zum Einsatz kommen. Für die Digitalisierung von in das Modell einzufügenden Altunterlagen (z. B. Schnitte, Profile, Karten) sollten ein großformatiger Scanner oder ein entsprechendes Digitalisiertablett zur Verfügung stehen.

Liegen für die Konstruktionsarbeiten mittels „openGEO5“ Echtkoordinaten vor, so ist es möglich, anhand der Modelle reale Volumen- und Abstandsbestimmungen geologischer Körper vorzunehmen (Abb. A-2). Dies ist außerordentlich wichtig für die geologisch-geophysikalische Vorfelderkundung, die detaillierte Planung von weiterführenden Erkundungsarbeiten, wie z. B. von Untertagebohrungen, und die Projektierung bergbaulicher Arbeiten.

a)



b)



- a) Volumenbestimmung von Kavernen: der grüne Würfel hat ein Volumen von 10^3 m^3 , der untere blaue Kavernenteil (z2HS3) umfasst $99\,912 \text{ m}^3$, der obere violette Teil (z2HS2) hat ein Volumen von $230\,978 \text{ m}^3$
- b) Entfernungsbestimmung von Kavernen zu bestimmten geologischen Schichten (in diesem Fall zu den rot hervorgehobenen K_2O -haltigen Salztypen)

Abb. A1- 2: Zwei Beispiele für die Möglichkeiten der Volumen- und Entfernungsbestimmung mittels „openGEO5“

Die Visualisierung und Auswertung der dreidimensionalen Modelle sowie eventuell notwendige Verschneidungen der konstruierten Körper für Ergebnispräsentationen können u. a. unter Verwendung der 3D-Animationssoftware „3dsmax“ realisiert werden. Dabei können einzelne geologische Körper aus allen Raumrichtungen betrachtet und Kamerafahrten durch das 3D-Modell durchgeführt werden. Dies ist möglich, da „openGEO5“ aufgrund des „AutoCAD“-Kerns dwg- und dxf-Dateien ausschreibt, die von „3dsmax“ sowie von vielen anderen Viewer-Programmen eingelesen werden können. Eine Analyse der räumlichen geologischen Strukturen ist innerhalb von „openGEO5“ auch über die Generierung von Schnitten bzw. Serienschnitten, bei beliebiger Schnittlage möglich.

ANLAGE A2

**PROGRAMME FÜR DIE STRÖMUNGS- UND
TRANSPORTMODELLIERUNG**

Inhalt

1	Das Strömungs- und Transportprogramm FEFLOW	A2-3
2	Das Programmpaket EMOS	A2-6
2.1	Das Nahfeldmodell GRAPOS	A2-7
2.2	Das Fernfeldmodell CHETMAD.....	A2-10
2.3	Das Biosphärenmodell EXMAS.....	A2-16
3	Literatur	A2-23
4	Abbildungsverzeichnis	A2-23

1 DAS STRÖMUNGS- UND TRANSPORTPROGRAMM FEFLOW

Das Grundwasserströmungs- und Transportprogramm ist in der Lage zwei- und dreidimensionale Grundwasserströmungen und Schadstofftransport sowohl in porösen als auch in geklüfteten Medien zu berechnen. Neben gesättigten lassen sich auch ungesättigte Probleme bearbeiten. Das Programm unterstützt zudem Modelle mit freier Grundwasseroberfläche. Auch Dichteströme lassen sich modellieren, wobei von der Extended-Boussinesq-Approximation Gebrauch gemacht wird.

Das Programm arbeitet mit der Finiten Elemente Methode nach Galerkin. Als Elementformen lassen sich im Zweidimensionalen Drei- oder Vierecke, im Dreidimensionalen Tetraeder oder Hexaeder auswählen. Diskrete Strukturen wie beispielweise Klüfte können als eindimensionale bzw. zweidimensionale Elemente implementiert werden. Sie lassen sich entlang von Elementgrenzen, auf Modellslices und in vertikaler Richtung anbringen. Für Netzgeneratoren stehen die Techniken „Advancing Front“, „TMesh (Delaunay)“ oder „Triangle (Delaunay)“ zur Verfügung. Bei der Nutzung des „TMesh“- oder „Triangle“-Generators kann zusätzlich in der Nähe von Klüften und Brunnen oder am Modellrand automatisch verfeinert werden. Diese Funktion ist besonders im Bereich von Förder- bzw. Infiltrationsbrunnen, Schadstoffquellen aber auch im Bereich von Flüssen und Kluftstrukturen notwendig, da die in diesen Bereichen auftretende Druck- und Konzentrationsgradienten sehr groß werden können, vgl. Abbildung A.2-1. Zu groß gewählte Elemente können zu einer falschen Approximation der Lösungen führen.

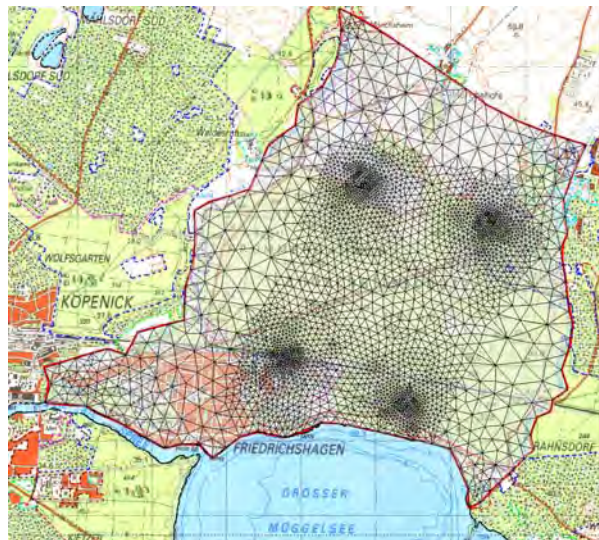


Abb. A2- 1: Netzgenerierung mit flächenthafter Verfeinerung in Feflow

Eine Schnittstelle zum GIS ArcView ermöglicht Vereinfachungen während des Präprozessings. So wird die flächentreue Abbildung des Modellgebietes, der geologischen Schichten, Brunnen, Klüfte etc. sowie die Eingabe von Strömungs-, Wärme- und Transportparametern erleichtert, vgl. Abbildung A.2-2

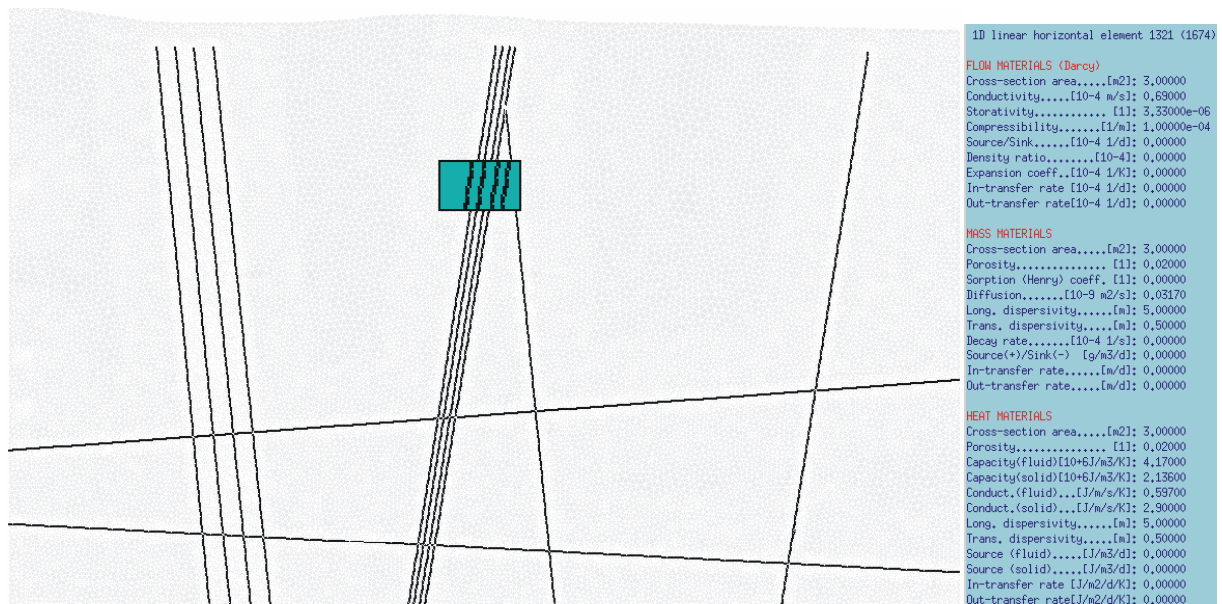


Abb. A2- 2: Ausgabe der Kluftparameter in Feflow

Die Strömungsmodellierung erfolgt auf der Grundlage der hydraulischen Parameter Durchlässigkeitsbeiwert und Speicherkoeffizient sowie der Rand- und Anfangsbedingungen, die Aufschluss über beispielsweise Grundwasserneubildung und hydraulisches Potential geben. Neben der Darcy-Strömung können in Klüften auch die Gleichungen von Manning-Strickler und Hagen-Poiseuille für die Strömung ausgewählt werden.

Der Transport wird durch das Strömungsfeld, Porosität, Sorptionsisothermen, molekulare Diffusion und transversale bzw. longitudinale Dispersion beschrieben. Die Möglichkeit den Transport mehrerer Radionuklide oder Zerfallsreihen mitsamt elementspezifischer Sorption und Löslichkeitsgrenzen zu modellieren, ist bisher noch nicht möglich. Den Transport verändernde Prozesse wie kolloidale Transport bzw. Komplexbindung können ebenfalls noch nicht betrachtet werden.

Im Falle von Dichteströmungen werden Strömungs- und Transportgleichungen für Salz oder Wärme gekoppelt. Für kleine Dichteveränderungen auf Grund von Konzentrations- oder Temperaturänderungen ist die sogenannte Boussinesq-Approximation gültig. Bei ihr werden außer dem Auftriebsterm in der Darcy-Gleichung Dichteänderungen vernachlässigt. Bei großen Dichteänderungen wird die extended Boussinesq-Approximation angewendet, bei der höhere Terme der Dichteänderung berücksichtigt werden. Die Wärmeparameter bilden die Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit von Gestein und Grundwasser.

Bezüglich der Zeitdiskretisierung kann zwischen dem impliziten Euler-Schema (fully implicit backward Euler) und dem halbimpliziten nicht-dissipativen Trapez-Schema (semiimplicit nondissipation trapezoid rule) gewählt werden.

Randbedingungen lassen sich in Abhängigkeit der Zeit festlegen. Somit können beispielsweise zeitabhängige Schadstoffquellen implementiert werden.

FEFLOW bietet ein komfortables Postprozessing. Neben der Möglichkeit sich Fluss- und Massenbilanzen ausgeben zu lassen, gibt es die Möglichkeit zwei- aber auch dreidimensionale Strompfade, sogenannte Pathlines mit bestimmten Zeitmarken zu erzeugen oder sich dreidimensionale Abbildungen mit Grundwassergleichen und Modellgitter ausgeben zu lassen, vgl. Abbildung A-2-3. Eine weitergehende Ergebnispräsentation durch Überlagerung verschiedener Ergebnisbilder bietet auch hier die Schnittstelle zu dem Programm ArcView. Dies ermöglicht einen schnellen Überblick über die wichtigsten Modellinformationen und führt zu einem besseren Verständnis der ablaufenden Prozesse, vgl. Abbildung A-2-4.

Eine Programmierschnittstelle für eigene Erweiterungen sorgt dafür, dass der Nutzer selbst in die Modellierung eingreifen kann. Auch während der Laufzeit des Programms kann so auf nahezu jeden Parameter zugegriffen werden. Die Schnittstelle ermöglicht zudem eine Kopplung mit anderen Programmen wie z.B. solchen zur Parameterkalibrierung, Oberflächenabflussprogrammen, o.ä.

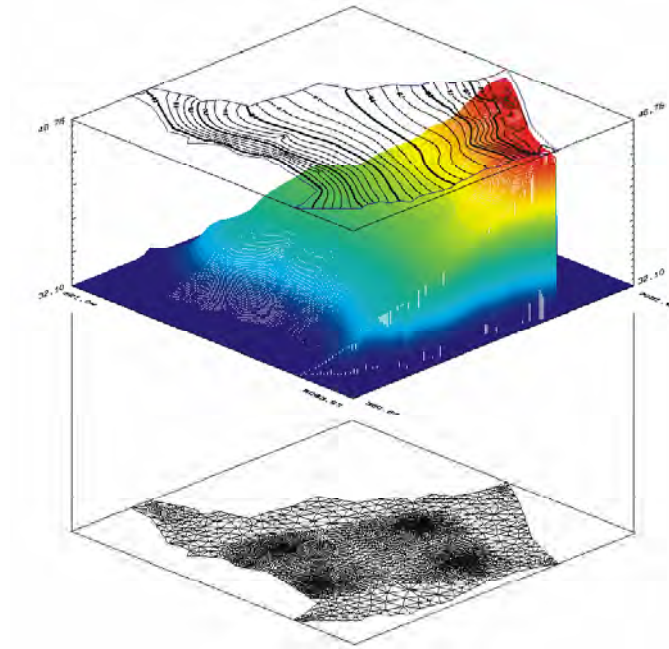


Abb. A2- 3: Dreidimensionales Postprozessing mit FEFLOW: Darstellung von Grundwasserisolinien, –oberfläche und Modellgitter in verschiedenen Ebenen

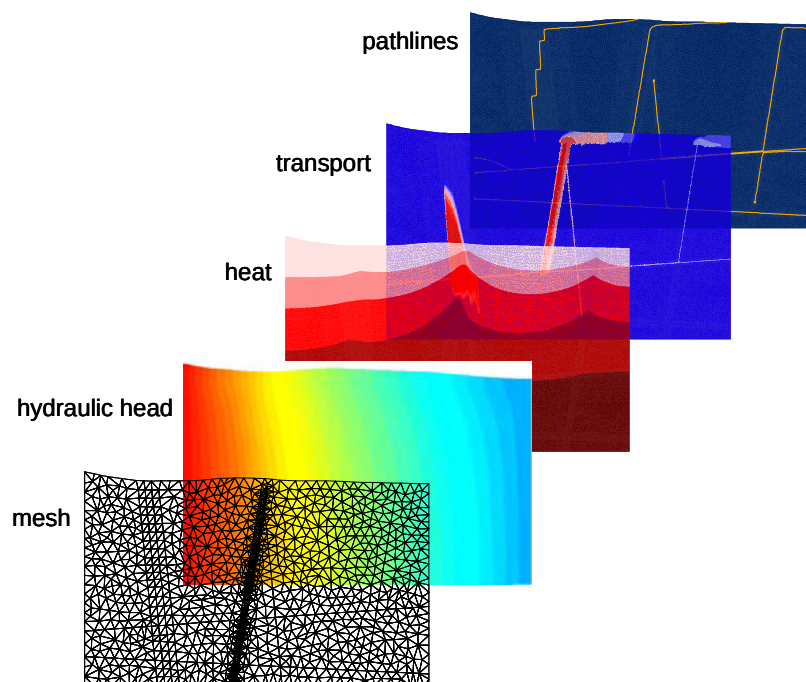


Abb. A2- 4: Zweidimensionales Postprozessing in ArcView mit der Darstellung des Modellgitters, der Grundwasserisolinien, der Wärmeverteilung, der Konzentrationsverteilung und des Transportweges (von vorn nach hinten)

Das Grundwasserströmungs- und Transportprogramm FEFLOW wird von der Firma Wasy GmbH vertrieben. Mit der kommenden Modell-Version sind Erweiterungen im Hinblick auf einen Algebraischen Multigridlöser vorgesehen, der bei sehr kleinen Schrittweiten bzw. unterschiedlich großen Finite Elementen aufgrund von schmalen geologischen Schichten Verwendung findet. Zudem soll die Möglichkeit bestehen chemische Zerfallsreihen zu implementieren, womit auch der Einbau der Radionuklid-Zerfallsketten möglich wird. Geplant ist ebenso eine Ausweitung auf Parallelrechner.

2 DAS PROGRAMMPAKET EMOS

Die tiefergehenden Rechnungen zum Radionuklid-Transport im Endlagersystem und der Strahlenexposition in der Biosphäre wurden mit dem Programmpaket EMOS [Buhmann 1999] durchgeführt. Dabei handelt es sich um ein Rechenprogramm zur Durchführung integrierter Sicherheitsanalysen eines Endlagers. Es besteht aus verschiedenen Rechenmodulen, die in Abhängigkeit der Gebietscharakteristika ausgewählt und hintereinander geschaltet werden, um den Transport der Radionuklide vom Ort ihrer Mobilisierung bis in die Biosphäre zu berechnen, vgl. Abbildung A.2-5.

Im Fall des Gebietes Itatskij wurden drei Rechenmodule für die Berechnung des Radionuklidtransports hintereinandergeschaltet.

Dazu gehört

der Nahbereich, Code: GRAPOS, Linux-Version 2lx_ifc

(Mobilisierung der Radionuklide aus den Behältern und Transport durch den Bentonit bis zum Wirtsgestein)

das geklüftete Granitgestein, Code: CHETMAD, Linux-Version 2lx_ifc

(Transport der Radionuklide innerhalb des Kluftsystems)

die Biosphäre, Code: Linux-EXMAS, Version 2lx_ifc

(Verdünnung in den oberflächennahen porösen Sedimenten und Radionuklidaufnahme durch den Menschen über verschiedene Expositionspfade).

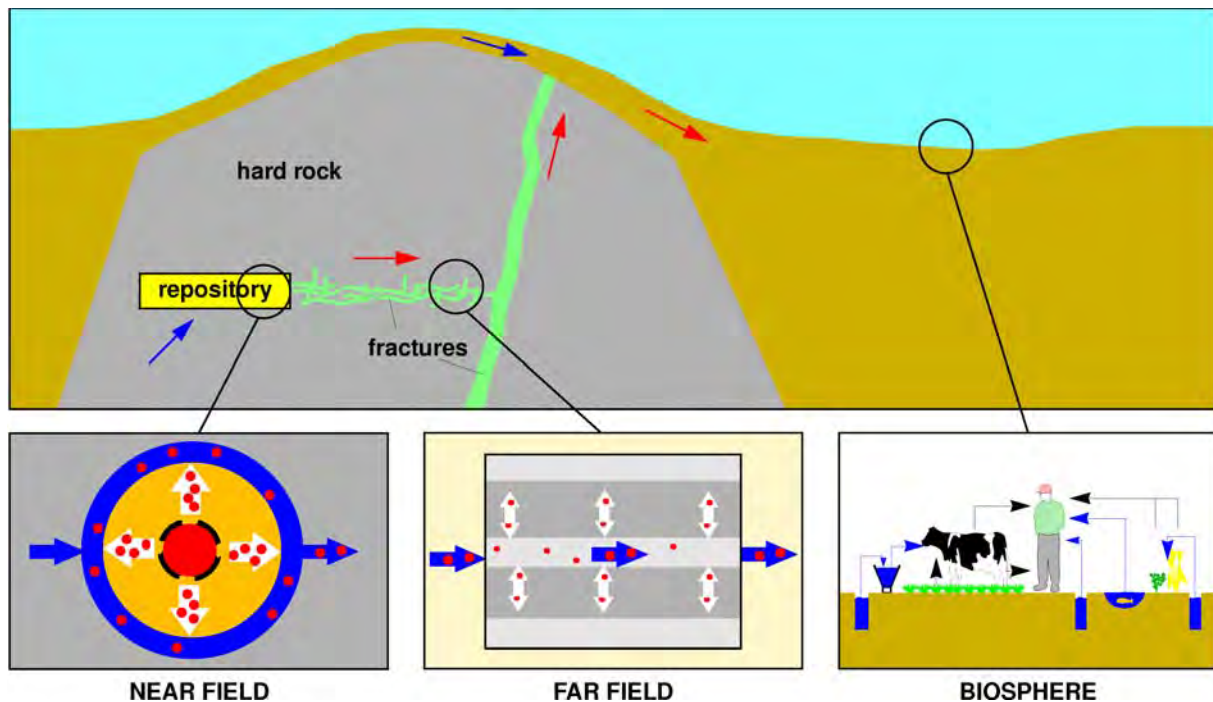


Abb. A2- 5: EMOS: Ein Rechenprogramm für die integrierte Sicherheitsanalyse eines Endlagers: Übersicht über die Prozesse im Nah- und Fernfeld, sowie der Biosphäre

2.1 Das Nahfeldmodell GRAPOS

Das Nahfeldmodell beschreibt die Mobilisierung der Radionuklide und deren Transport durch die technischen Barrieren des Nahfeldes zu den wasserführenden Zonen der Geosphäre. Das Nahfeld ist schematisch in Abbildung A.2-6 dargestellt.

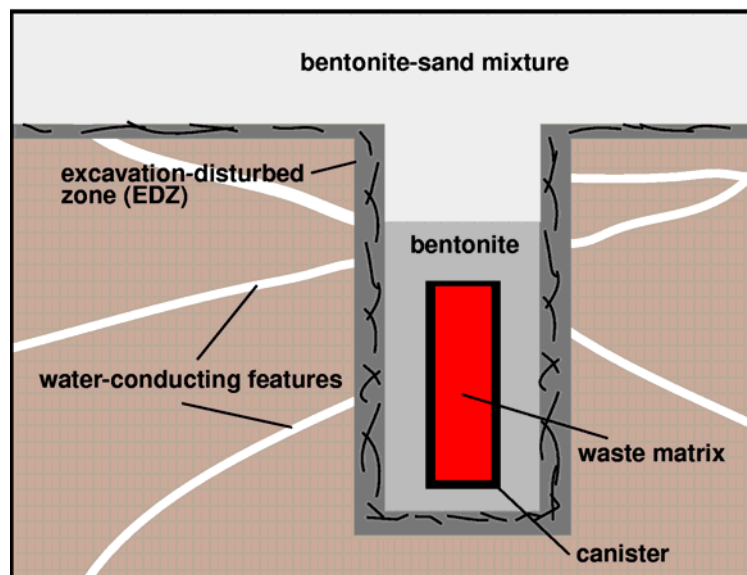


Abb. A2- 6: Schematische Darstellung des Nahfeldes mit Bohrloch, Auflockerungszone (Excavation Disturbed Zone EDZ) und Behälter

In dem konzeptionellen Modell für das Nahfeld wurden die folgenden technischen Barrieren berücksichtigt:

die Abfallmatrix der verfestigten HLW's,
 die Stahlbehälter,
 der hoch kompaktierte Bentonitbuffer.

Nach Behälterausfall und Wassereintritt werden die Radionuklide aus der HLW-Matrix gelöst. Die Prozesse Ausfällung und Sorption am Versatzmaterial führen zur teilweisen Immobilisierung der Radionuklide. Der mobilisierte Radionuklidanteil diffundiert durch den Bentonitbuffer und erreicht die EDZ. Der radioaktive Zerfall und der Aufbau der Tochternuklide innerhalb von Zerfallsketten wird ebenso berücksichtigt, wie die lineare Gleichgewichtssorption am Bentonit und die Löslichkeitsgrenzen.

Die Transportmechanismen im Nahfeld sind in Abbildung A.2-7 schematisch dargestellt.

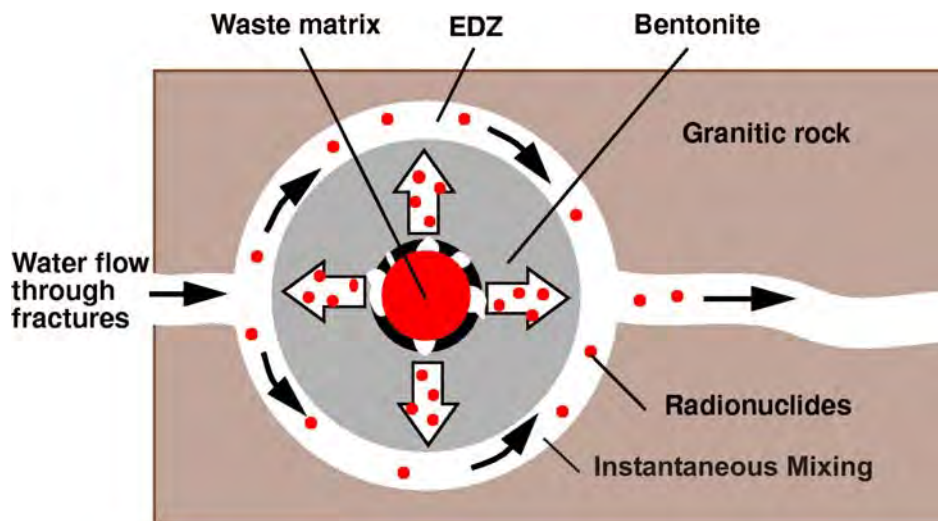


Abb. A2- 7: Schematische Darstellung der Modellierung des Nahfeldes für eine Bohrlochlagung

Mobilisierung der Radionuklide aus der HLW-Matrix

Auf Grund des radioaktiven Zerfalls verändert sich die Aktivität der Radionuklide im Verlauf der Zeit. Die Ausgangsnuklide nehmen mengenmäßig ab und ihre Tochternuklide bauen sich auf.

Für das i -te Radionuklid mit der Zerfallskonstante λ_i ist die Änderung des „hypothetischen“ Inventars A_i [Bq] durch folgende Differentialgleichung gegeben:

$$\frac{\partial}{\partial t} A^i(t) = -\lambda^i \left(A^i(t) - \sum_k A^k(t) \right) \quad (1)$$

Dabei bezeichnet der Index k die Mutter des i -ten Radionuklids. Das "hypothetische Inventar" entspricht demnach dem anfänglichen Inventar, das sich nur durch den radioaktiven Zerfall und den Aufbau von Tochternukliden verändert. Bei der Berechnung der Radionuklidfreisetzung aus der Abfallmatrix wird der potenzielle Barriereeffekt der Behälter vernachlässigt und die Radionuklidfreisetzung in das Lösungsvolumen erfolgt unmittelbar nach dem Versagen des ersten Behälters.

Die Freisetzung $S^i(t)$ [1/a] des i -ten Radionuklids aus dem HLW-Abfall wird durch folgenden Quellterm beschrieben:

$$S^i(t) = n_c(t) \alpha_{e(i)} r A^i(t) \quad (2)$$

Hierbei steht r für die konstante Freisetzungsrate aus der Abfallmatrix und $n_c(t)$ für die Anzahl der ausgefallenen Behälter zur Zeit t .

Löslichkeitsgrenze der Radionuklide innerhalb der Behälter und ihr Übergang in den Bentonit

Es wird davon ausgegangen, dass sich das Resthohlraumvolumen der Behälter nach deren Ausfall mit Wasser auffüllt und die Radionuklide in dieses mobilisiert werden. Im Modell wird ein hypothetische Lösungsvolumen angenommen, in das die Nuklide freigesetzt werden. Die Änderung des Inventars M^i [Bq] in diesem Volumen ist durch folgende Differentialgleichung gegeben:

$$\frac{\partial}{\partial t} M^i(t) = -\lambda^i \left[M^i(t) - \sum_k M^k(t) \right] + S^i(t) - 2\pi r_{in} h \varepsilon_b D_b \frac{\partial}{\partial r} C^i(t) \Big|_{r=r_{in}} \quad (3)$$

Mit

c_i Konzentration der Radionuklide

S_i Freisetzung der Radionuklide

D_b Porendiffusionskonstante

ε_b Porosität Bentonit

r radiale Abstand

r_{in} anfängliche Radius

h axiale Länge eines Abfallbehälters

Die Term auf der rechten Seite der Gleichung repräsentieren den radioaktiven Zerfall und Aufbau der Radionuklide, ihre Freisetzung aus der Abfallmatrix, beziehungsweise die Diffusion in den Bentonit.

Die Randbedingung an der inneren Oberfläche des Bentonits wird durch die Konzentration der Radionuklide im „hypothetischen“ Lösungsvolumen definiert. Falls die Löslichkeitsgrenze in $[\text{mol m}^{-3}]$ und die Konzentration in $[\text{Bq m}^{-3}]$ angegeben wird, ergibt sich die Konzentration des i -ten Radionuklids an der inneren Oberfläche des Bentonits zu:

$$C^i \Big|_{r=r_{in}} = \min \left(\frac{M^i}{V_{dis}}, \frac{M^i}{M_{el}^{e(i)}} L^{e(i)} \right) \quad (4)$$

Mit

$M_{el}^{e(i)}$ Anzahl Mole des Elementes e zu dem Radionuklid i gehört

$L^{e(i)}$ Löslichkeitsgrenze

V_{dis} Resthohlraumvolumen

Diffusion der Radionuklide durch den Bentonit

Es wird davon ausgegangen, dass die Radionuklide nur diffusiv durch den Bentonit hindurch transportiert werden. Für die Modellierung des diffusiven Transportes wird die Geometrie vereinfacht und nur die eindimensionale, radiale Diffusion berücksichtigt. Die Gleichung für den diffusiven Transport [Bq/m³·s] durch den Bentonit lautet dann:

$$R^i \frac{\partial C^i}{\partial t} = D_b \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C^i}{\partial r} \right) \right] - \lambda^i \left[R^i C^i - \sum_k R^k C^k \right] \quad (5)$$

Der Index k bezeichnet die Mütter des i -ten Radionuklids. Die Gleichungen werden mit der Methode der Finiten Differenzen gelöst.

Unter der Annahme linearer Sorption ergibt sich folgender Retardationsfaktor [-]:

$$R^i = 1 + \frac{1 - \varepsilon_b}{\varepsilon_b} \rho_b K_d^{e(i)} \quad (6)$$

Hierbei ist ρ_b die Bentonitdichte in [kg m⁻³], ε_b die Porosität des Bentonits und $K_d^{e(i)}$ der elementspezifische Verteilungskoeffizient für Bentonit in [m³ kg⁻¹]. Es werden keine Löslichkeitsgrenzen für den Transport durch den Bentonit berücksichtigt.

Übergang der Radionuklide in das Wirtsgestein

Die Auflockerungszone (EDZ) stellt den Übergang zwischen Bentonit und Wirtsgestein dar. Es wird davon ausgegangen, dass der advective Transport in der EDZ überwiegt und eine instantane Durchmischung der Radionuklide in ihr stattfindet. Für diesen Fall wird der diffusive Fluss über die Grenzfläche Bentonit-Wirtsgestein derart bestimmt, dass er gleich dem advectiven Massenfluss in der Auflockerungszone ist [mol/a]:

$$2\pi r_{out} h \varepsilon_b D_b \frac{\partial C^i}{\partial r} \Big|_{r=r_{out}} = Q_{EDZ} C^i \quad (7)$$

Der Grundwasserfluss Q_{EDZ} [m³ a⁻¹] durch die Auflockerungszone wird durch den totalen Wasserfluss Q durch das Einlagerungsgebiet durch $Q = F_{nc} \sum_n Q_{EDZ}$ kontrolliert. Wieviel des gesamten Volumenstromes um ein Einlagerungsbohrloch bzw. eine Einlagerungsstrecke und deren EDZ fließt, kann anhand des Parameters F_{nc} festgelegt werden.

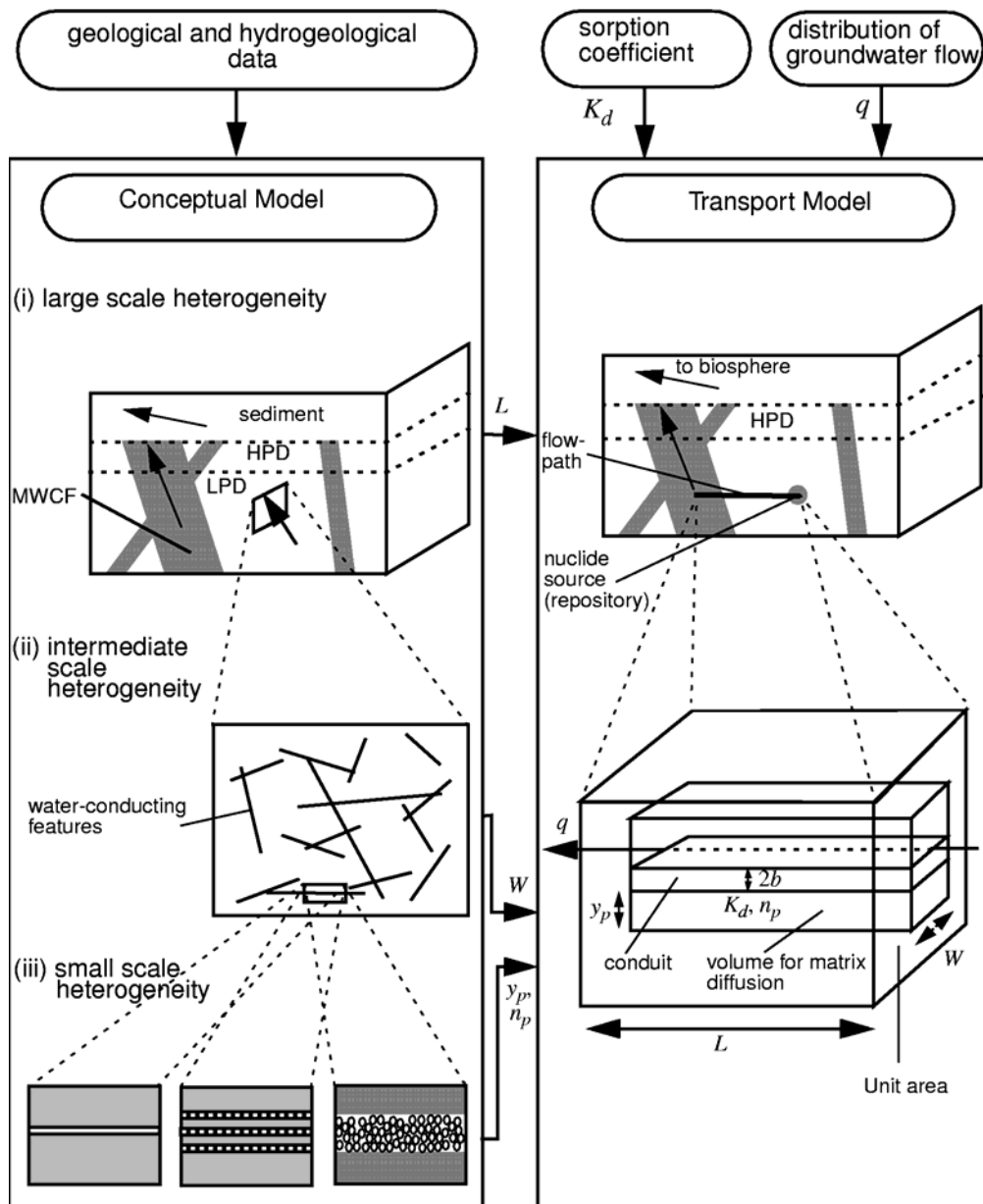
2.2 Das Fernfeldmodell CHETMAD

Aufgrund der räumlich eng begrenzten Streckenlagerung der Fraktionen Schlamm, Seltene Erden und Spaltprodukte werden die einzelnen Radionuklidströme der Nahfelder für die Fernfeldrechnungen zu einem Gesamtstrom zusammengefasst. Dies sorgt neben einer Reduzierung der Rechnungen auch für eine bessere Übersichtlichkeit. Der Transport der Radionuklide von einem Endlager in die Biosphäre kann entlang verschiedener Ausbreitungswege erfolgen. Diese hängen von dem Ort der Freisetzung und dem Strömungsfeld des Grundwassers ab. Für den Transport durch das Fernfeld wird davon ausgegangen, dass er über ein Netzwerk von wasserführenden Klüften mit unterschiedlichen Eigenschaften und deren umgebender angewitterten Gesteinszone unterschiedlicher Mächtigkeit stattfindet. Daher geht lediglich diese Zone in die Berechnung ein. Die Gesteinsmatrix wird vernachlässigt. Im Transportmodell wird dabei nur ein einziger Transportpfad berücksichtigt. Die unterschiedlichen Eigenschaften der Klüfte werden durch Parametervariationen erfasst. Nach dem Transport durch die Klüfte erreichen die Radionuklide einen oberflächennahen Grundwasserleiter. Dieser besteht aus einer sedimentären Deckschicht und/oder einem stark verwitterten ehemaligen Hartgestein. Die darin enthaltene Radionuklidkonzentration ergibt sich

aus den Freisetzungsraten aus den wasserführenden Klüften und der Strömungsgeschwindigkeit dieses Aquifers. Der Rechencode CHETMAD löst die Transportgleichung in Form der mit der Matrixdiffusion gekoppelten Advektions-Dispersionsgleichung, vgl. Gleichung (14) und Gleichung (15) numerisch. Das Programm benutzt dabei die Finite Differenzen Methode und ist auf dem eindimensionalen Transportcode CHET2 aufgebaut. Für die Modellierung des Radionuklidtransports durch die Geosphäre wird angenommen, dass die Nuklidmigration durch folgende physikalische und chemische Prozesse bestimmt wird:

- radioaktiver Zerfall und Aufbau von Tochternukliden,
- Advektion der Radionuklide durch wasserführende Kluftzonen,
- longitudinale Dispersion und molekulare Diffusion innerhalb der wasserführenden Kluftzone,
- Diffusion in die Gesteinsmatrix,
- Rückhaltung der Radionuklide durch die Sorption auf der Kluftoberfläche, an dem Kluftfüllmaterial und in dem der Diffusion zugänglichen Bereich.
- Verdünnung der Radionuklidkonzentrationen im Bereich der sedimentären Deckschichten.

Andere Prozesse wie die transversale Dispersion und chemische Reaktionen wie die Radionuklidausfällung und -lösung sowie der kolloidgetragene Transport können berücksichtigt werden. Sie sind jedoch in dem vorliegenden Modell nicht realisiert. Abbildung A.2-8 zeigt das prinzipielle Schema der Ableitung des Transportmodells aus einem konzeptuellen Modell, basierend auf Felddaten und Grundwassermodellierungen.



(LPD: low permeability domain, MWCF: major water-Conducting faults)

Abb. A2- 8: Ableitung des Transportmodells aus einem konzeptuellen Modell basierend auf Felddaten und Grundwassermodellierungen nach [Smith et al. 1997]

Anfangs- und Randbedingungen

Die Anfangsbedingungen sind gegeben durch

$$C_f^i(t, z) = C_p^i(t, y) = 0 \quad \forall y, z; t \leq t_0 \quad (8)$$

wobei t_0 den Ausfallzeitpunkt des ersten Behälters oder den Zeitpunkt des Endlagerverschlusses angibt.

Der Massenstrom vom Nahfeld in das Fernfeld wird durch den Quellterm $F_{in}^i(t)$ [$Bq \cdot a^{-1}$] beschrieben. Weiterhin wird angenommen, dass der Rand bei $z=0$ für den Massenfluss geschlossen ist, womit ein Rückstrom in den Nahfeldbereich ausgeschlossen wird:

$$\left[v_f C_f^i - D \frac{\partial C_f^i}{\partial z} \right]_{z=0} = 0 \quad (9)$$

Entsprechend der großen Verdünnung in der wasserführenden Kluft und im überlagernden Sediment wird angenommen, dass die Konzentration im Unendlichen gegen Null geht. Diese Randbedingung kann daher wie folgt formuliert werden:

$$C_f^i(t, z) \Big|_{z=\infty} = 0; \quad t > t_0 \quad (10)$$

Mit L wird die Transportweglänge dargestellt.

Der totale Fluss [Bq/a] über den Ausstromrand zum Biosphärenmodell berechnet sich nach:

$$F_{out}^i(t) = \left[v_f C_f^i - D \frac{\partial C_f^i}{\partial z} \right]_{z=L} \quad (11)$$

Weiterhin wird angenommen, dass der Verlauf der Lösungskonzentration über den Rand zwischen der durchströmten Kluftzone und dem verwitterten Gesteinsbereich stetig ist. Dies führt auf folgende Randbedingung:

$$C_f^i(t, z) = C_p^i(t, z, \pm b); \quad \forall z, \forall t \quad (12)$$

Die eingeschränkte Eindringtiefe der Matrixdiffusion in den verwitterten Gesteinsbereich wird durch folgende Randbedingung gewährleistet:

$$\left. \frac{\partial C_p^i}{\partial y} \right|_{|y|=y_p} = 0 \quad (13)$$

Advektion und Dispersion

Der Transport der Radionuklide durch den Granit wird durch eine Gleichung beschrieben, die die Advektions-Dispersions-Gleichung mit einer Matrixdiffusionsgleichung koppelt:

$$\left. \frac{\partial}{\partial t} R_f C_f^i = -v_f \frac{\partial C_f^i}{\partial z} + D \frac{\partial^2 C_f^i}{\partial z^2} + \frac{1}{b} \frac{n_p}{n_f} D_p \frac{\partial C_p^i}{\partial y} \right|_{|y|=b} - \lambda^i (R_f^i C_f^i - \sum_k R_f^k C_f^k) \quad (14)$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial t} R_p C_p^i = D_p \frac{\partial^2 C_p^i}{\partial y^2} \right|_{|y| \leq y_p} - \lambda^i (R_p^i C_p^i - \sum_k R_p^k C_p^k) \quad (15)$$

Dabei bedeutet:

- C_f^i Konzentration des i-ten Radionuklids in der Wasser führenden Zone [Bq m⁻³]
- C_p^i Konzentration des i-ten Radionuklids im stagnierenden Matrixwasser [Bq m⁻³]
- v_f advective Geschwindigkeit der Radionuklide in der Kluft [m a⁻¹]
- D Dispersions-Diffusionskoeffizient [m² a⁻¹]
- $2b$ Kluftöffnungsweite [m]
- y_p Eindringtiefe in den angewitterten Gesteinsbereich [m]
- n_p Matrixporosität [-]
- D_p Matrixdiffusivität [m² a⁻¹]
- k Index für Mütter des i-ten Radionuklids
- R_f Retardationsfaktor in der Kluft [m³/kg]
- R_p Retardationsfaktor in der Matrix [m³/kg]
- n_f Effektive Kluft-Porosität [-]
- λ^i Zerfallskonstante des i-ten Radionuklids [a⁻¹]

Der erste Term der rechten Seite der Gleichung (14) beschreibt den advektiven Fluss durch die betrachtete Kluft. Da der Grundwasserfluss auf die Klüfte beschränkt wird, hängt die Advektionsgeschwindigkeit von dem totalen Wasserfluss durch das betrachtete geklüftete Gebiet sowie dem totalen Volumen der Klüfte in dieser ab. Diese Klüfte sind umsäumt von einer Zone verwitterten Gesteins. Im Transportmodell wird die Geometrie der Klüfte durch folgende Parameter beschrieben:

die Klufthäufigkeit W ,

die Kluftöffnung $2b$,

die effektive Kluftporosität n_f .

Die advective Geschwindigkeit v_f [m/s] innerhalb der Kluft wird mit Hilfe der folgenden Gleichung berechnet:

$$v_f = \frac{q}{2bWn_f} \quad (16)$$

Mit q als Darcy-Geschwindigkeit. Die Klufthäufigkeit W [$\text{m} \cdot \text{m}^{-2}$] ist ein Maß für die mittlere Kluftdichte innerhalb des Wirtsgesteins. Die effektive Porosität n_f ist der Volumenanteil der für die Advektion zur Verfügung steht.

Der zweite Term der Gleichung (14) beschreibt die mechanischen Dispersion und die molekulare Diffusion in der Kluft. Die mechanische Dispersion ist gegeben durch das Produkt aus longitudinaler Dispersionslänge α_L und der advektiven Geschwindigkeit v_f . Die Dispersionslänge hängt im Allgemeinen von der mittleren zurückgelegten Entfernung ab. Das Verhältnis zwischen advektivem und dispersivem Fluss wird durch die Peclet-Zahl Pe [-] charakterisiert:

$$Pe = \frac{v_f L}{\alpha_L v_f} = \frac{L}{\alpha_L} \quad (17)$$

Hierbei ist L [m] die Transportweglänge.

Im Falle einer starken Rückhaltung durch Matrixdiffusion kann die Dispersion einen signifikanten Einfluss auf den Transport der Radionuklide haben. Das bedeutet, dass eine Vergrößerung der longitudinalen Dispersion zu einer Erhöhung der maximalen Radionuklidkonzentration in der Biosphäre führt [Jägelke et al. 2004].

Matrixdiffusion und Sorption

Zwei verschiedene Orte der Radionuklidrückhaltung in der Kluftzone werden in dem Modell berücksichtigt:

- die Matrixdiffusion zusammen mit der linearen Gleichgewichtssorption in der Gesteinsmatrix,
- die lineare Gleichgewichtssorption an der Oberfläche der Kluft bzw. die Sorption innerhalb der verfüllten Kluft.

Für die Matrixdiffusion aus den Gleichungen (14) und (15) wird die Transportrichtung senkrecht zum advektiven Fluss betrachtet. Dabei ist der Matrixdiffusion zunächst die gesamte Gesteinsmatrix zugänglich, jedoch ist die effektive Diffusivität ab einem gewissen Abstand von der advektiv durchströmten Kluftzone signifikant reduziert. Daher wird angenommen, dass der für die Matrixdiffusion zugängliche Bereich räumlich begrenzt ist. Dieser wird im Folgenden als Eindringtiefe y_p bezeichnet. Wie Modellrechnungen zeigen, diffundieren die meisten Radionuklide aufgrund ihrer großen Sorption selbst bei Annahme einer begrenzten Eindringtiefe im Laufe von ein paar Millionen Jahren nicht weit in die Gesteinsmatrix hinein.

Der Retardationsfaktor R_f^i [-] beschreibt die Sorption in der Kluftzone. Sie kann an der Oberfläche der Kluftwand oder am Kluftfüllmaterial erfolgen und wird anhand der folgenden Gleichung beschrieben:

$$R_f^i = 1 + \frac{1 - n_f}{n_f} (1 - n_p) \rho K_d^{e(i)} \quad (18)$$

Die effektive Porosität n_f beschreibt dabei den Volumenanteil derjenigen Kluftzone, der dem advektiven Fluss zugänglich ist. Für die Sorption in der Gesteinsmatrix wird eine lineare Gleichgewichtssorption angenommen, die auf folgenden Retardationsfaktor R_p^i [-] führt:

$$R_p^i = 1 + \frac{1-n_p}{n_p} \rho K_d^{e(i)} \quad (19)$$

mit

ρ Gesteinsdichte [kg m^{-3}]

$K_d^{e(i)}$ Elementspezifischer Sorptionskoeffizient des i -ten Radionuklids für die Matrix [$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$]

Die Gleichung (18) vereinfacht sich im Fall einer offenen Kluft. Der Parameter n_f [-] ist dann definiert durch die Kluftöffnung $2b$ [m] und die Tiefe der Oberflächensorption δ [m]:

$$n_f = \frac{2b}{2b + \delta} \quad (20)$$

Damit ergibt sich der Retardationsfaktor R_f^i [-] für eine offene Kluft zu:

$$R_f^i = 1 + \frac{(1-n_p) \rho K_d^{e(i)}}{2b} \delta \quad (21)$$

Mit $K_d^{e(i)}$ für den elementspezifischer Sorptionskoeffizient des i -ten Radionuklids der Kluft. Häufig wird bei der Betrachtung einer offenen Kluft die Sorption an der Oberfläche der Kluftwand vernachlässigt, so dass es keine Retardation in der Zone advektiver Strömung gibt. Die Gleichung (21) ergibt sich dann zu:

$$R_f^i = 1 \quad (22)$$

2.3 Das Biosphärenmodell EXMAS

Im Folgenden ist die Modellierung der Biosphäre für ein Endlager im Granit dargestellt. In Deutschland ist die Anwendung dieses Biosphärenmodells für Langzeitsicherheitsanalysen per Verwaltungsvorschrift (AVV 1990) rechtsverbindlich vorgegeben. Der Schlüsselindikator für die Langzeitsicherheit ist die potentielle Strahlenexposition, da die deutschen Genehmigungskriterien für Endlager radioaktiver Abfälle den Nachweis verlangen, dass die effektive Strahlenexposition für Erwachsene und Kleinkinder den Wert von $3 \cdot 10^{-4} \text{ Sv a}^{-1}$ nicht überschreitet. Abweichend davon erlauben die russischen Vorschriften (SPORO = Sanitäre Regelungen für radioaktive Abfälle) eine Strahlenbelastung der Bevölkerung von $1 \cdot 10^{-5} \text{ Sv a}^{-1}$.

Expositionspfade

Die Radionuklide aus dem oberflächennahen Aquifer gelangen entlang verschiedener Transportpfade zum Menschen. Es wird angenommen, dass für die verschiedenen Expositionspfade ausschließlich das kontaminierte Wasser des oberflächennahen Aquifers genutzt wird. Die im Biosphärenmodell berücksichtigten Expositionspfade sind in Abbildung A.2-9 zusammengestellt.

Folgende Expositionspfade sind im Modell enthalten:

- Aufnahme von Trinkwasser,

Verzehr von Süßwasserfischen aus kontaminierten Teichen,

Verzehr von Blattgemüse, das mit kontaminiertem Wasser beregnet wurde,

Verzehr von Milch und Fleisch von Vieh, das mit kontaminiertem Wasser getränkt wurde und dessen Futterpflanzen mit kontaminiertem Wasser beregnet wurden,

Externe Strahlenexposition durch Aufenthalt in mit kontaminierten Wasser überschwemmten Gebieten.

Das Modell basiert auf den Lebensgewohnheiten der gegenwärtigen Bevölkerung in Deutschland. Auf lokale Unterschiede z.B. zwischen Nord- und Süddeutschland wird nicht eingegangen. Auch die unterschiedlich hohe terrestrische Hintergrundstrahlung bleibt unberücksichtigt.

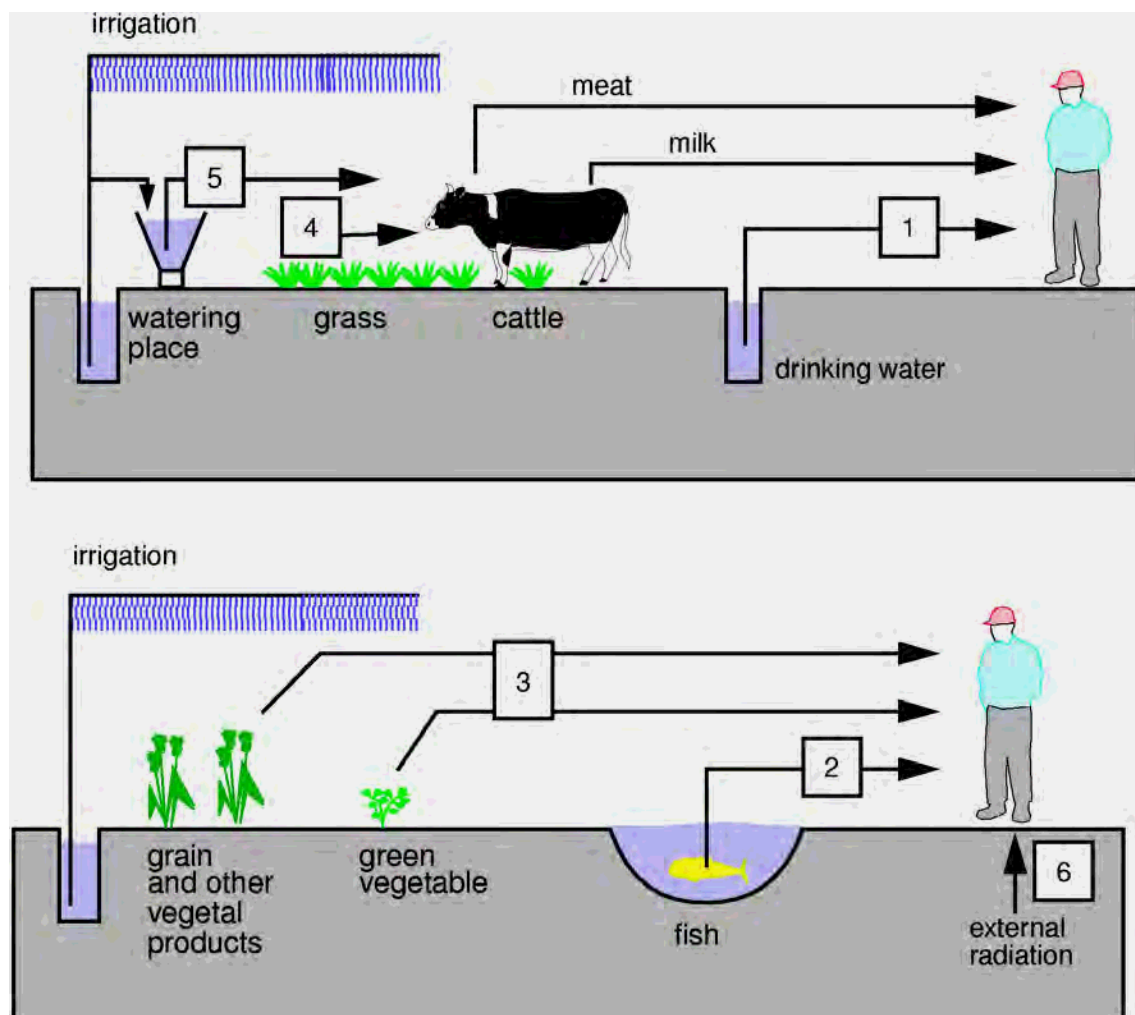


Abb. A2- 9: Expositionspfade in der Biosphäre

Trinkwasser

Es wird angenommen, dass das Trinkwasser direkt aus den oberflächennah verfilterten Brunnen entnommen wird. Verdünnungseffekte oder mögliche Änderungen von Aktivitätskonzentrationen durch eine Behandlungen des Trinkwassers im Wasserwerk können durch einen Verdünnungsfaktor berücksichtigt werden.

Fische aus Teichen

Das kontaminierte Grundwasser wird zur Fischzucht in Teichen benutzt, d.h. die Nuklidkonzentrationen im Teich- und Grundwasser sind gleich. Die Verdünnung durch Niederschlag bleibt unberücksichtigt. Es wird angenommen, dass alle verzehrten Süßwasserfische aus diesen Teichen stammen.

Die Nuklidkonzentration C_i^{fi} [Bq kg⁻¹] in den Fischen ist gegeben durch:

$$C_i^{fi} = C_i^w T_i^{fi} \quad (23)$$

mit der Konzentration im Grundwasser C_i^w [Bq l⁻¹] und dem Transferfaktor T_i^{fi} [l kg⁻¹].

Kontamination von Pflanzen

Die Kontamination der Pflanzen erfolgt einerseits durch ihre Beregnung mit kontaminiertem Wasser, andererseits nehmen sie jedoch auch über die Wurzeln Radionuklide auf. Beide Kontaminationspfade werden in der Modellierung berücksichtigt und sind durch die Indizes f für die Kontamination über das Blattwerk bzw. s für diejenige über die Wurzeln gekennzeichnet. Die Kontamination der Pflanzen durch Brunnenwasser beeinflusst sowohl die vom Menschen aufgenommene Strahlendosis über den Verzehr von Blattgemüse als auch über die von Milch und Fleisch von Vieh, dessen Weidegras bzw. Trockenfutter kontaminiert wurde. Es werden drei verschiedene mit dem Index n gekennzeichnete Pflanzentypen berücksichtigt: Weidegras, Blattgemüse und andere Pflanzen wie Getreide oder Früchte.

Die Pflanzenkontamination $C_i^{n,f}$ [Bq kg⁻¹] durch Aufnahme über die Blätter wird für alle Radionuklide außer C-14, für den ein anderer Aufnahmepfad angenommen wird (s.u.), wie folgt berechnet:

$$C_i^{n,f} = C_i^w \frac{W f_w}{y^n (\lambda_r^f + \lambda_i)} \left(1 - \exp \left(- (\lambda_r^f + \lambda_i) t_g^n \right) \right) \quad (24)$$

mit

n	Index für Pflanzentyp: Weidegras ($n=pp$) Blattgemüse ($n=gp$) andere Pflanzen: Getreide und Früchte ($n=op$)
C_i^w	Kontamination des Beregnungswassers [Bq l ⁻¹]
W	Beregnungsrate [l m ² s ⁻¹]
f_w	Interzeptionsfaktor (Nuklidablagerung auf Blattwerk) [-]
y^n	Ertrag der verschiedenen Pflanzentypen n [kg m ⁻²]
λ_r^f	Auswaschung der Nuklide von der Pflanzenoberfläche [s ⁻¹]
λ_i	Zerfallskonstante der Nuklide [s ⁻¹]
t_g^n	Wachstumszeit der Pflanzentypen [s]

Die aus der Radionuklidaufnahme aus dem Boden über die Wurzeln resultierende Nuklidkonzentration $C_i^{n,s}$ [Bq kg⁻¹] der Pflanze wird durch einen nuklidspezifischen Boden/Pflanzen-Transferfaktor T_i^n [-] beschrieben. Dieser Transferfaktor beschreibt das Verhältnis der Aktivitäten in der Pflanze und im Boden. Die Kontamination des Bodens resultiert aus dem jährlichen Eintrag durch die Beregnung, da der Kapillareffekt des Bodens nicht berücksichtigt wird. Die Aktivität im Boden nimmt auf Grund des radioaktiven Zerfalls und der Auswaschung der Nuklide durch den Niederschlag in tieferen Bodenschichten ab. Ausserhalb der Durchwurzelungszone sind die Nuklide für die Pflanzen nicht mehr erreichbar. Die Schnelligkeit der Radionuklidwaschung hängt von dem Verteilungskoeffizienten des jeweiligen Elements, der Bodenart und der Bewirtschaftungsform ab. Es wird zwischen den beiden Bewirtschaftungsformen Acker- und Weideland unterschieden. Die Bodenarten werden nicht weiter differenziert.

Die Kontamination wird mit Ausnahme des C-14, für den ein anderer Aufnahmepfad angenommen wird (s.u.), folgendermaßen bestimmt:

$$C_i^{n,s} = C_i^w \left(\frac{W T_i^n t_R}{p^m (\lambda_{r,i}^s + \lambda_i)} \left(1 - \exp \left(- (\lambda_{r,i}^s + \lambda_i) t_a \right) \right) \right) \quad (25)$$

Mit

R	Index für Bewirtschaftungsform
n	Ackerland ($n=a$) Weideland ($n=b$)
t_R	Anteil des Jahres, in dem berechnet wird
p^m	Trockenmasse des Wurzelraums m pro Fläche [kg m ⁻²]
$\lambda_{r,i}^s$	Verlustrate der Nuklide i aus dem Wurzelraum [s ⁻¹]
T_i^n	Boden/Pflanzen-Transferfaktor für unterschiedliche Pflanzentypen n und Nuklide i [-]
t_a	Akkumulationszeit der Nuklide in den Böden [s]

Die Akkumulation der Nuklide wird über einen Zeitraum von $1 \cdot 10^5$ Jahren berücksichtigt. Die totale Konzentration C_i^n des Nuklids i in den Pflanzen wird durch die Summe der Pflanzenkontamination durch die Aufnahme über das Blatt- $C_i^{n,f}$ und das Wurzelwerk $C_i^{n,s}$ gegeben

Im Fall von C-14 wird angenommen, dass die gesamte C-14 Aktivität aus dem Beregnungswasser als gasförmiges ¹⁴CO₂ freigesetzt wird. Dieses wird im Anschluss von den Pflanzen während der Photosynthese aufgenommen. Die spezifische Aktivität von Pflanzen C_{C-14}^n [Bq l⁻¹] wird berechnet mit:

$$C_{C-14}^n = \frac{W C_{C-14}^w f_C^n}{V_C} \quad (26)$$

mit

f_C^w	Massenanteil von Kohlenstoff in den Pflanzen [-]

C_{C-14}^w Aktivität von C-14 im Brunnenwasser [Bq l⁻¹]

V_c Assimilationsrate der Pflanzen [kg m⁻² s⁻¹]

Kontamination von tierischen Produkten

Über den Nahrungsweg gelangen die Radionuklide von den kontaminierten Pflanzen, in Form von Weidegras im Sommer und Trockenfutter im Winter zu den Tieren, wodurch auch die tierischen Produkte kontaminiert werden, im Modell durch den Index *ir* gekennzeichnet. Für die Beschreibung der Nuklidanreicherung in Fleisch und Milch werden elementspezifische Transferfaktoren benutzt, die das Gleichgewichtsverhältnis und die tägliche Anreicherung der Radionuklide in Milch und Fleisch angeben. Die Nuklidkonzentrationen in Fleisch $C_i^{me,ir}$ und Milch $C_i^{mi,ir}$ [Bq kg⁻¹] werden durch folgende Gleichung angegeben:

$$C_i^{me,ir} = C_i^{fo} \dot{M}_{fo} T_i^{me} \quad (27)$$

mit

$\dot{M}_{fo}$ tägliche Futteraufnahme durch Vieh [kg d⁻¹]

T_i^{me} Futter/Fleisch-Transferfaktor [d kg⁻¹]

Die Nuklidkonzentration C_i^{fo} [Bq kg⁻¹] im gesamten Viehfutter (Sommer- und Winterfutter) ergibt sich aus:

$$C_i^{fo} = f_p C_i^{pp} + (1 - f_p) C_i^{df} \quad (28)$$

Hierbei gibt der Faktor f_p den Teil des Jahres an, den das Vieh auf der Weide verbringt. Bei C_i^{pp} handelt es sich um die Nuklidkonzentration in frischem Weidegras, bei C_i^{df} um diejenige in Trockenfutter.

Für die Berechnung der Konzentration C_i^{df} [Bq kg⁻¹] im Trockenfutter muss zusätzlich eine Lagerzeit t_c^{df} [s] berücksichtigt werden:

$$C_i^{df} = C_i^{pp} \exp\left(-\lambda_i t_c^{df}\right) \quad (29)$$

Die Radionuklidkonzentration in der Milch ergibt sich zu:

$$C_i^{mi,ir} = C_i^{fo} \dot{M}_{fo} T_i^{mi} \quad (30)$$

,wobei es sich bei T_i^{mi} [d kg⁻¹] um den Futter/Milch-Transferfaktor handelt. Die Konzentration in der Milch, die aus dem Verzehr von Trockenfutter resultiert, wird aufgrund der geringeren Konzentration nicht berücksichtigt.

Viehtränken

Ein weiterer Kontaminationspfad für die tierischen Produkte Milch und Fleisch sind die Viehtränken, gekennzeichnet mit dem Index *wp*. Die Konzentration in Fleisch und Milch basiert auf dem täglichen Konsum von Wasser durch das Vieh L [l d⁻¹]. Es wird angenommen,

dass das Brunnenwasser unverdünnt in die Viehtränken gegeben wird. Daher ergibt sich die Fleisch-Kontamination $C_i^{me,wp}$ [Bq kg⁻¹] zu:

$$C_i^{me,wp} = C_i^w L T_i^{me} \quad (31)$$

und die Milch-Kontamination $C_i^{mi,wp}$ [Bq l⁻¹] zu:

$$C_i^{mi,wp} = C_i^w L T_i^{mi} \quad (32)$$

Externe Strahlenexposition resultierend aus der Überschwemmung von Land mit kontaminiertem Wasser

Es wird angenommen, dass sich eine Referenzperson auf einem Gebiet aufhält, das mit kontaminiertem Wasser überschwemmt ist. Die Radionuklid-Konzentration in dem durchwurzelten Bodenhorizont wird durch den Niederschlag in Abhängigkeit der Bodenart und Bewirtschaftungsform in tiefere Schichten ausgewaschen und damit reduziert. Die jährliche Strahlenexposition durch diese externe Strahlung D_i^{ex} [Sv a⁻¹] wird mit Hilfe der folgenden Gleichung berechnet:

$$D_i^{ex} = K_{e,i} t_d C_i^w g_{s,i} \frac{\ln 2}{\lambda_r^{in} + \lambda_i} \left(1 - \exp\left(-(\lambda_r^{in} + \lambda_i) t_{se}\right) \right) \quad (33)$$

mit

$K_{e,i}$ Transferkonstante für Nuklid i [l m⁻² s⁻¹]

t_d jährliche Aufenthaltszeit von Personen in überschwemmten Gebieten [s a⁻¹]

λ_r^{in} Auswaschrates der Nuklide in überschwemmten Gebieten [s⁻¹]

$g_{s,i}$ Dosisfaktor des Nuklids i für externe Strahlung aus Böden [(Sv s⁻¹)/Bq m⁻²]

t_{se} Sedimentationszeit [s]

Tochter-nuklide

Die Betrachtung der Tochter-nuklide wird bei denjenigen Expositionspfaden berücksichtigt, bei denen die Radionuklid-Akkumulation über lange Zeiträume erfolgt. Dazu gehört die Radionuklid-Aufnahme der Pflanzen über das Wurzelwerk und die Exposition, der der Mensch durch die externe Strahlung in mit kontaminiertem Wasser überschwemmten Gebieten ausgesetzt ist.

Generell wird die Aktivität der Mutter-nuklide in Folge kontinuierlicher Akkumulation in Böden wie folgt berechnet:

$$A_M(t) = \int_0^t \dot{A}_M(t') \exp\left(-(\lambda_m + \lambda_{rm})(t-t')\right) dt' \quad (34)$$

mit

A_M	Aktivität der Mutternuklide pro m ² Land [Bq m ⁻²]
$\dot{A}_M$	Zufuhrtrate der Mutternuklide [Bq m ⁻² s ⁻¹]
λ_m	Zerfallskonstante des Mutternuklids m [s ⁻¹]
λ_{rm}	Auswaschrade des Mutternuklids m durch Niederschlag [s ⁻¹]

Die Aktivität des n -ten Tochternuklids $A_n(t)$ wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$A_n(t) = \lambda_n \int_0^t \dot{A}_{n-1}(t') \exp\left(-(\lambda_n + \lambda_{rn})(t - t')\right) dt' \quad (35)$$

mit

A_n	Aktivität des n -ten Tochternuklids pro m ² Land [Bq m ⁻²]
$\dot{A}_{n-1}$	Aktivität des $(n-1)$ -ten Tochternuklids pro m ² Land [Bq m ⁻²]
λ_n	Zerfallskonstante des Nuklids n [s ⁻¹]
λ_{rn}	Auswaschrade des Nuklids n [s ⁻¹]

Die von den Tochternukliden ausgehende Strahlenexposition wird im Fall der Kontamination der Pflanzen durch die Verwendung der Transfer- und Dosisfaktoren in den Böden, im Fall der überschwemmten Gebieten durch die Transferfaktoren und Verweilkonstanten berücksichtigt. Insgesamt stehen für die Berechnung der Strahlenexposition durch die Nahrungsaufnahme des Menschen sowie der externen Strahlung infolge mit kontaminiertem Wasser überschwemmten Gebieten die Dosisfaktoren von 830 Nukliden zur Verfügung.

Individualdosis

Die Individualdosis eines Menschen D_i [Sv/a] mit dem Radionuklid i wird aus der Summe der Strahlenexposition aller Expositionspfade bestimmt:

$$D_i = \left(U^{dw} C_i^{dw} + U^{fi} C_i^{fi} + U^{gp} C_i^{gp} + U^{op} C_i^{op} + U^{mi} C_i^{mi} + U^{me} C_i^{me} \right) H_i + D^{ex} \quad (36)$$

,wobei H_i den Ingestionsdosisfaktor für Radionuklid i und U^x die Konsumraten für verschiedene Nahrungsmittel beschreibt. Der Index dw steht für Trinkwasser, fi für einen Süßwasserfisch, gp für Blattgemüse, op für andere Pflanzen wie Getreide und Früchte, mi für Milch und me für Fleisch.

3 LITERATUR

- [Buhmann 1999] Buhmann, D.: Das Programmpaket EMOS, Ein Instrumentarium zur Analyse der Langzeitsicherheit von Endlagern, 1999.
- [Smith et al. 1997] Smith, P. A.; Gautschi, A.; Vomvoris, S.; Zuidema, P.; Mazurek, M.: The development of a safety assessment model of the geosphere for a repository sited in the crystalline basement of northern Switzerland. J. Cont. Hydrol., 26, (309- 324), 1997.
- [Jagelke et al. 2004] Jagelke, J., Schöninger, M.: Durchführung von numerischen Simulationen im Mayak-Untersuchungsgebiet. unveröffentlichter Bericht, 2004.

4 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. A2- 1:	Netzgenerierung mit flächenhafter Verfeinerung in Feflow	3
Abb. A2- 2:	Ausgabe der Kluftparameter in Feflow	4
Abb. A2- 3:	Dreidimensionales Postprozessing mit FEFLOW: Darstellung von Grundwasserisolinien, –oberfläche und Modellgitter in verschiedenen Ebenen	5
Abb. A2- 4:	Zweidimensionales Postprozessing in ArcView mit der Darstellung des Modellgitters, der Grundwasserisolinien, der Wärmeverteilung, der Konzentrationsverteilung und des Transportweges (von vorn nach hinten)	5
Abb. A2- 5:	EMOS: Ein Rechenprogramm für die integrierte Sicherheitsanalyse eines Endlagers: Übersicht über die Prozesse im Nah- und Fernfeld, sowie der Biosphäre	7
Abb. A2- 6:	Schematische Darstellung des Nahfeldes mit Bohrloch, Auflockerungszone (Excavation Disturbed Zone EDZ) und Behälter	7
Abb. A2- 7:	Schematische Darstellung der Modellierung des Nahfeldes für eine Bohrlochlagerung	8
Abb. A2- 8:	Ableitung des Transportmodells aus einem konzeptuellen Modell basierend auf Felddaten und Grundwassermodellierungen nach [Smith et al. 1997]	12
Abb. A2- 9:	Expositionspfade in der Biosphäre	17

ANLAGE A3

EMPFEHLUNGEN

**FÜR DIE DURCHFÜHRUNG SEISMISCHER MESSUNGEN
ZUR ERKUNDUNG EINES STANDORTES FÜR EIN
ENDLAGER RADIOAKTIVER ABFÄLLE IN
MAGMATISCHEN GESTEINEN MIT BESONDERER
BETONUNG AUF DIE OBERFLÄCHENSEISMIK**

INHALT

1	Die Seismischen Messmethoden	A3-4
1.1	Refraktionsseismik	A3-4
1.2	Reflexionsseismik	A3-5
1.2.1	Reflexionsseismik - Allgemein	A3-5
1.2.2	Signal/Rauschen-Verhältnis	A3-6
1.2.3	Absorption	A3-7
1.2.4	Stapelung	A3-7
1.2.5	Auflösung	A3-7
1.2.6	Geophonauslage	A3-8
2	2D-Seismik-Feldplanung	A3-9
2.1	Vorbereitungen	A3-9
2.2	Festlegen des Erkundungsziels	A3-9
2.3	Vermessungsarbeiten	A3-10
2.4	Feldparameter	A3-11
2.4.1	Profilabstand, Profillänge	A3-11
2.4.2	Abtastrate	A3-11
2.4.3	Überdeckungsgrad	A3-11
2.4.4	Geophonauslage	A3-11
2.4.4.1	Geophongruppenabstand	A3-11
2.4.4.2	Auslagenlänge	A3-12
2.4.4.3	Geophonpattern	A3-13
2.4.4.4	Geophoneigenschaften	A3-14
2.4.4.5	Ankoppelung und Setzen der Geophone	A3-14
2.4.5	Energiequelle	A3-15
2.4.5.1	Ladungstiefe	A3-15
2.4.5.2	Ladungsmenge	A3-15
2.4.5.3	Schusspattern	A3-15
2.4.5.4	Verdämmung, Verfüllung	A3-16
2.4.5.5	Vibroseis	A3-16
2.5	Statische Korrekturen	A3-17
2.6	Messapparatur	A3-18
2.7	Quality Control	A3-18
2.8	Prozessing	A3-19

3	Internationale Erfahrungen zur Oberflächen-Seismik im Kristallin	A3-20
3.1	Schweden	A3-20
3.2	Kanada.....	A3-23
3.2.1	Snap Lake	A3-23
3.2.2	Quebec.....	A3-24
3.2.3	Halfmile Lake.....	A3-24
3.3	Großbritannien	A3-24
3.4	Schweiz	A3-24
4	Zusammenfassung und Empfehlungen	A3-25
5	Literatur.....	A3-27

1 DIE SEISMISCHEN MESSMETHODEN

Während die meisten anderen geophysikalischen Methoden, wie Magnetik und Gravimetrie, horizontale Änderungen einer Variablen messen, ist die Reflexionsseismik in der Lage vielschichtige, vertikale, strukturelle und stratigraphische Änderungen, ebenso wie ihre räumliche Ausdehnung, hervorzuheben. Die Interpretation seismischer Messungen wird allerdings erheblich erschwert, wenn die geologische Struktur und Stratigraphie kompliziert werden. Steil anstehende Horizonte, Änderungen der Stratigraphie oder einfach nur homogene Gesteine, die keine Reflexionen hervorrufen, können die Aussagefähigkeit seismischer Messungen stark beeinträchtigen. Zusätzlich können nicht geeignete Oberflächenbedingungen, wie mächtige wassergesättigte Verwitterungsschichten oder Karstbildungen, unüberwindliche Probleme für die Ausbreitung seismischer Kompressionswellen im Untergrund darstellen.

Am Standort Jennisejskij werden einige der oben genannten Schwierigkeiten erwartet. Wie aus vorangegangenen geowissenschaftlichen Untersuchungen bekannt ist, sind Magmaintrusionen, Horst- und Grabentektonik, sowie Kluftsysteme und unterschiedliche Sedimentmächtigkeiten auf einem kristallinen Fundament im Untersuchungsgebiet zu erwarten. Steil anstehende Schichten, vertikale Störungen und ausgedehnte Kluftsysteme werden zur Streuung der seismischen Wellen führen. Die oberflächennahen Schichten werden Probleme mit den statischen Korrekturen hervorrufen und das unwegsame Gelände wird die Ausführung der Messungen erschweren. Die typischen seismischen Messparameter der Erdöl-Explorationsindustrie aus annähernd flachen Sedimentbecken können nicht einfach auf dieses Projekt übertragen werden. Außerdem besteht wenig Erfahrung mit seismischen Messungen im Kristallin. Erst in den letzten Jahren hat es erste seismische Projekte im Kristallin gegeben, um Erzvorkommen nachzuweisen oder auch um geeignete Standorte für Endlager zu suchen.

Im Folgenden werden zum besseren allgemeinen Verständnis zunächst kurz die verschiedenen seismischen Verfahren mit ihren wesentlichen Eigenschaften und Parametern beschrieben. Anschließend werden Empfehlungen zur Vorgehensweise bei der Durchführung seismischer Messungen zur Charakterisierung kristalliner Formationen gemacht. Diese Empfehlungen beruhen zum einen auf Erfahrungen bei der Durchführung seismischer Erkundungsarbeiten an den Endlagerstandorten Morsleben und Gorleben, zum anderen auf internationalen Erfahrungen bei der Erkundung kristalliner Formationen mit seismischen Methoden.

1.1 Refraktionsseismik

Obwohl für die seismischen Untersuchungen überwiegend die Reflexionsseismik verwendet wird, gibt es noch einige Gebiete, in denen die Refraktionsmethode nützlich sein kann. Refraktionsseismik erzeugt direkte Informationen über die Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten in den geologischen Schichten, welche die refraktierte Welle oder Kopf-welle passiert. Die Methode ist gut geeignet, um einen kristallinen Sockel unter dicken Sedimenten zu vermessen. Flache Sedimente, wie die Basis der Verwitterungsschicht, in der die Reflexionsseismik üblicherweise schlechte Datenausbeuten bringt, können mit der Refraktionsmethodik gut erkannt werden.

Am Standort Jennisejskij kann die Refraktionsseismik für Probleme in der Verwitterungsschicht benutzt werden. Hier sind Kurzrefraktionsmessungen (Nahlinien) nützlich, um die statischen Korrekturen zu berechnen. Damit können die von lokalen räumlichen Variationen der Verwitterungsschicht verursachten Zeitverschiebungen beseitigt werden, welche die seismische Ankunftszeiten verschmieren und damit die seismischen Daten ruinieren können.

Refraktionsseismik hängt von geologischen Grenzen mit zunehmenden seismischen Geschwindigkeiten ab. Dort, wo die Geschwindigkeitsänderung der geologischen Schichten ne-

gativ ist, wird keine gebrochene Welle erzeugt, außerdem könnte die Kopfwelle dort, wo die Schichten zu dünn sind, von den nachfolgenden Wellen geschluckt werden. Eine laterale, allmähliche Geschwindigkeitsänderung, von stratigraphischen Änderungen verursacht, kann auch zu Komplikationen führen.

Geschwindigkeitsinversionen sind dort zu erwarten, wo ein intrusives Gestein ein Sedimentgestein überlagert. Am Standort Jennissejskij ist diese Konfiguration im oberflächennahen Bereich nicht zu erwarten. Auch laterale Geschwindigkeitsänderungen werden eher abrupt sein und somit die Nahlinienmessungen nicht übermäßig stören. Laterale Geschwindigkeitsänderungen, die in der verwitterten Kristallinkruste vorkommen können, werden normalerweise in einem Geschwindigkeitsbereich oberhalb der Korrekturgeschwindigkeit und tief genug sein, um keine Auswirkung auf die statischen Korrekturen zu haben.

Bei Kurzrefraktionsmessungen sind Korrelationen zwischen Geophonen (Ankunftszeiten), Schusspunkten (reziproke Laufzeiten) und parallelen Laufzeitkurven gute Qualitätskontrollanzeigen. Die Aufzeichnungslänge muss natürlich lang genug sein, damit die erwarteten refraktierten Wellen ankommen können.

1.2 Reflexionsseismik

Reflexionsseismik stellt ein wichtiges Werkzeug für die Erstellung von detaillierten unterirdischen geologischen Karten.

1.2.1 Reflexionsseismik - Allgemein

Reflexionsseismik, und in gewissem Grad Refraktionsseismik, unterscheiden sich von allen anderen geophysikalischen Erkundungsmethoden dadurch, dass sie nicht nur eine Anomalie in einem physikalischen Wert messen, wie dies bei der Gravimetrie, Magnetik oder Geoelektrik der Fall ist, sondern dass sie die Beobachtung vieler aufeinander folgender geologischer Schichten ermöglichen. Datenverarbeitung und richtige Interpretation der Ergebnisse können dann dazu führen, diese Grenzen an ihre korrekten räumlichen Standorte zu positionieren. 3D-Seismik, bei der ein Untergrundgitter aus Datenpunkten erworben wird, erlaubt eine viel genauere räumliche Definition.

Reflexionen treten auf, wenn eine seismische Druckwelle auf eine unterirdische Grenze trifft, wo eine deutliche Änderung in der akustischen Impedanz stattfindet. Dies verursacht das Reflektieren eines Teils der auftreffenden Energie an die Oberfläche. Je größer der akustische Impedanzkontrast, je mehr Energie wird reflektiert und um so weniger Energie ist vorhanden, um in tiefere Horizonte zu gelangen.

Im Allgemeinen sind P-Wellen (Primäre/Druck-Wellen) die Informationsträger für Reflexionsuntersuchungen. In den letzten paar Jahrzehnten sind S-Wellen (Sekundäre/Scher-Wellen), die früher nur für ein Rauschen und ein zu vermeidendes Ärgernis gehalten wurden, für bestimmte Erkundungszwecke genutzt worden. Obwohl die seismische Geschwindigkeit für jeden gegebenen Gesteinstyp durch folgende Elastizitätskonstanten bestimmbar ist:

$$V_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho} \quad \text{für P-Wellen} \quad (1)$$

$$V_s = \sqrt{\mu / \rho} \quad \text{für S-Wellen} \quad (2)$$

λ, μ = Lamé-Konstante (elastische Konstanten), ρ = Dichte

gibt es viele andere Faktoren, die die seismische Geschwindigkeit und somit die Reflektivität beeinflussen können. Hierzu zählen:

- die Gesteinsporosität
- der in-Situ Gebirgsdruck
- die Gesteinstemperatur, die eine direkte Wirkung auf die Elastizität hat
- Textur und Struktur der Gesteine
- das Alter des Gesteins.

Am Standort Jennisejskij sind am Übergang von sedimentärem Gestein zum Kristallin starke Reflexionen zu erwarten. Wenn aber eine verwittrte Kruste des Kristallins diesen Übergang verwischt, dann wird das reflektierte Wellenpaket verlängert und die Auflösung vermindert. Eine starke Reflexion bedeutet auch, dass weniger Energie weiter in die Tiefe vordringen kann. Das bedeutet wiederum, dass nur wenig Nutzenergie vorhanden sein wird, um das Kristallin zu erforschen. Weil die Erzeugung und Registrierung von seismischen Wellen ein sehr komplizierter und von der Interaktion vieler Parameter gesteuerter Prozess sind, können keine Pauschallösungen für den Standort Jennisejskij angeboten werden.

Die Durchschnittsausbreitungsgeschwindigkeiten für die meisten Kristallingesteine werden, nach der Nafe-Drake-Kurve, mit der Dichte des Gesteins größer. Hiernach kann es im Kristallin zu Geschwindigkeitsunterschieden kommen, die durchaus die Impedanzgrenze von $2,5 \times 10^5 \text{ g/cm}^2\text{s}$, die benötigt wird, um eine Reflexion zu erzeugen. Da sich die Geschwindigkeiten und Dichten auch mit dem Mineralgehalt und Grad der Metamorphose ändern, können auch Geschwindigkeitsverminderung, bei gleichzeitiger Vergrößerung der Dichte, bei bestimmten mineralischen Zusammensetzungen auftreten /14/. Diese, Reflexionen hervorrufenden Gebilde sind aber nicht das Ergebnis einer annähernd waagerecht abgelagerten Sedimentfolge mit großer horizontaler Ausdehnung, sondern sind das Produkt von Intrusionen und Metamorphosen und können viele mögliche Formen annehmen. Viele dieser Formen werden mit der Seismik schwer zu erkennen sein. Es wird daher bei der seismischen Erkundung ganz wesentlich auf eine Anpassung der Feldparameter an die Geologie des Untergrundes und die Erkundungsziele ankommen, um einen optimalen Informationsgehalt der Messergebnisse zu erzielen. Die Durchführung eines entsprechenden Testprogramms, wie in den unten stehenden Empfehlungen skizziert, ist daher unter diesen Bedingungen vor Beginn von seismischen Profilmessungen unerlässlich.

1.2.2 Signal/Rauschen-Verhältnis

Das Signal/Rauschen-Verhältnis (auch S/N-Verhältnis genannt) ist von größter Bedeutung, wenn eine Reflexionsuntersuchung geplant wird. Wenn ein Signal durch Hintergrundgeräusche zu sehr gestört wird, dann bleiben seismische Ereignisse verborgen. Willkürliches Rauschen wie Verkehrslärm, Wind oder Feuchtigkeit (Leakage, siehe 3.4.4.4 Geophoneigenschaften) können mit gut gewählten Parametern und üblichen seismischen Arbeitspraxen weitgehend minimiert werden. Den Untergrund kann man aber nicht ändern und er muss so genommen werden, wie er ist. Wenn das seismische Signal am Ziel dermaßen geschwächt wird, dass es nicht vom Rauschen zu unterscheiden ist, dann ist die Messung gescheitert. Am Standort Jennisejskij muss im Vorfeld geklärt werden, welche Aufnahmeparameter benötigt werden, um ein Nutzsignal vom Ziel zu empfangen, und wie der Informationsgehalt dieses Signals maximiert werden kann.

1.2.3 Absorption

Die Absorption eines Signals, das sich beim Durchdringen von Gestein verbreitet und reflektiert wird, ist ein Faktor, der direkt in Vertikalen Seismischen Profilen (VSP) gemessen, oder mittels geologischer Modelle und der Zusammensetzung der Gesteinseigenschaften geschätzt werden kann. Sobald ein Signal auf 110 dB unter seiner Oberflächenamplitude gefallen ist, kann es als verloren betrachtet werden, da ein standardmäßiges 24-Bit-Aufzeichnungssystem einen Dynamikbereich von nur 138 dB hat (23-Bit – Gesamt-Dynamikbereich [138 dB] + 1-Bit Polarität [6 dB] = 24-Bit; davon Nutzsignal 5-Bit oder <30 dB gegenüber einem Rauschen von 18-Bit oder 108 dB) /4/. Eine 24-Bit-Apparatur ist die Mindestanforderung für die seismischen Messarbeiten am Standort Jennisejskij.

Da am Standort Jennisejskij VSP- und andere Bohrloch-Messungen geplant werden, wäre es sinnvoll diese Messungen mit einem seismischen Testprogramm zu kombinieren. Die gewonnenen Daten können zusammen getragen werden, um die seismische Datengewinnung zu optimieren. Wenn die Absorption der oberen Schichten, bis ins Kristallin hinein bekannt ist, dann kann der Energiebedarf der Erregungsquelle errechnet und getestet werden. Danach wäre die benötigte Energiemenge bekannt, um eine Reflexion zu erzeugen. Die Reflexion muss mit geeigneten Aufnahmeparametern zu empfangen sein.

1.2.4 Stapelung

Wenn ein Signal vorhanden ist, kann es durch die Stapelung der Daten deutlich verbessert werden. Angenommen, die Reflexionen kommen von einer horizontalen unterirdischen Ebene, dann werden die geometrischen Mittelpunkte zwischen vielen Sender- und Empfängerstationen (CDP oder CMP) zusammen gerechnet. Wenn statische Korrekturen und Auslagengeometrie (NMO) berücksichtigt werden, dann sollten sich die Signale summieren und das willkürliche Rauschen sollte reduziert werden. Diese Methode hat auch den Vorteil, Multiplen zu unterdrücken - dies sind Wellen, die zwischen geologischen Reflektoren hin und her springen. Ein Minimum von 25-facher Stapelung ist bei oberflächennahen Reflexionsuntersuchungen Standard. Eine höhere Überdeckung wird nur ein Signal verbessern, das wirklich existiert. Höhere Stapelung kann zu einer besseren Qualität der Daten führen, ist aber mit größeren finanziellen und logistischen Investitionen verbunden. Normalerweise wird eine höhere Überdeckung erzielt, in dem mehr Anregungspunkte benutzt werden. Eine Stapelung von über dem 100fachen ist nur für tiefe Untersuchungen empfehlenswert. Selbstverständlich haben nicht alle CDP-Geometrien die gleichen Laufzeiten und eine breite Mischung ist vorteilhaft. Zu viele lange Laufzeiten werden unter größerer Dämpfung und niedrigerem Frequenzgehalt mit folglich geringerer Auflösung leiden.

1.2.5 Auflösung

Auflösung ist ein Merkmal des Untergrundes. Hauptsächlich hängt sie von der Ausbreitungsgeschwindigkeit im Deckgebirge und der am Ziel verfügbaren Frequenz ab. Diese Faktoren bestimmen die Wellenlänge am Ziel mit der Formel:

$$\lambda = v / f \quad (3)$$

λ = Wellenlänge

v = Geschwindigkeit

f = Frequenz

Die Auflösung wird dann für $\lambda/4$ /16/ gehalten. Damit erlaubt ein seismisches Signal mit einer Geschwindigkeit von 5600 ms^{-1} und einer Frequenz von 75 Hz (typische Werte für Granit) eine Auflösung von Objekten ab einer Länge von 19 m, die quer zum Strahlenweg liegen. Testarbeiten mit höheren Frequenzen haben belegt, dass mit den richtigen Methoden eine höhere Frequenzausbeute durchaus möglich ist. Nur steigen hiermit auch die Aufnahmekosten.

Klüfte haben meistens nicht die erforderliche Breite, um gesehen zu werden. Entscheidend sind die längliche Ausdehnung, quer zum Strahlenweg, und eine ausreichende akustische Impedanzdifferenz. Um Klüfte zu verfolgen, müssen sie in mehreren seismischen Spuren zu sehen sein. Dieses ist wiederum vom Spurenabstand abhängig (siehe 3.4.4.1 Geophongruppenabstand).

Kleine Objekte bzw. Kanten von Reflektoren, von einer Größenordnung von einer halben Wellenlänge oder mehr, verursachen Diffraktionen, die durchaus von Nutzen sein können /9/. Diese Diffraktionen werden von normalen Prozessstufen unterdrückt, wenn nicht gesondert auf sie eingegangen wird. Es gibt Migrationsmethoden, die Diffraktionen berücksichtigen. Diese sollten auf jeden Fall am Standort Jennissejskij Anwendung finden.

1.2.6 Geophonauslage

Eine neue Entwicklung in der 2D-Seismik ist der Gebrauch von langen Geophonauslagen. Bis zu den 1990ern sollte die Länge der Geophonauslage die Zieltiefe nicht übersteigen ($x_{\max} \leq z$). Mit Zunahme der Sender – Empfängerentfernung erhöht sich jedoch der Energieanteil, der von den seismischen Reflektoren reflektiert wird, im Vergleich zur Energie, welche die Schichtgrenze durchdringt. Diese zusätzlichen Daten können sich in Problembereichen als sehr nützlich erweisen.

2 2D-SEISMIK-FELDPLANUNG

2.1 Vorbereitungen

Die detaillierte Abbildung der lokalen Geologie ist das primäre Ziel der Untersuchung. Alle Kenntnisse aus vorausgehenden Untersuchungen sollten frühzeitig in der Planungsphase genutzt werden. Die Integration der seismischen Daten in ein geologisches 3-D-Modell sollte als oberstes Gebot gesehen werden.

Zu konkreten Planungsaufgaben gehören im Vorfeld üblicherweise die folgenden Arbeiten:

- das Besorgen des topographischen Kartenmaterials Maßstab 1:10000 oder 1:5000
- das Einarbeiten aller vorhergegangenen geophysikalischen Messarbeiten: Tiefbohrungen, Seismik, Angewandte Geophysik
- das Identifizieren und Festlegen der zu erkundenden Ziele
- das Festlegen der seismischen Profilverläufe und Tiefbohrungslokation (hängt die Lage der Tiefbohrung von der Seismik ab, oder umgekehrt?)
- das Festlegen der topographischen Festpunkte
- das Vermessen der topographischen Festpunkte, Messgenauigkeit ± 1 cm / km. Notfalls Zwischenpunkte setzen
- die Genehmigungen der lokalen Behörden einholen.

Die seismischen Linien müssen mit allen gemessenen und gekernten Bohrlöchern im Erkundungsgebiet verbunden werden. Volle seismische Überdeckung am Bohrloch ist ebenfalls wichtig. Deshalb müssen alle seismischen Linien, die Bohrlöcher kreuzen, weit genug über die Bohrlöcher hinausreichen, um eine maximale Überdeckung am Bohrloch zu erzielen. Wenn die Geologie am Bohrloch ein starkes Einfallen hat, dann sollte dies berücksichtigt werden. Die seismischen Daten und die Bohrlochdaten sollten von der gleichen unterirdischen Position kommen.

Alle bisherigen seismischen Vermessungen in der Region, einschließlich jener mit wenig oder keinem Datenrücklauf, sollten geprüft werden. Es ist wichtig, die gleichen Fehler nicht zweimal zu machen. Testmessungen, die bei früheren seismischen Kampagnen durchgeführt wurden, sind sehr wichtig, da diese dann nicht wiederholt werden müssen. Homogene Zonen im Erkundungsgebiet müssen identifiziert werden, da diese besondere seismische Parameter benötigen können. Bisherige Erfahrungen mit solchen logistischen Problemen wie Flussüberquerungen (wo Hydrophone benötigt werden könnten), steiles Gelände (wo Geophone gebündelt werden sollten, um große Höhenunterschiede in dem Geophonpattern zu vermeiden), Hauptverkehrskreuzungen und saisonale Klimaschwankungen müssen berücksichtigt werden.

Klimabedingungen spielen möglicherweise eine bedeutende Rolle. Winter kann für Oberflächen-Seismik sehr günstig sein – auf dem gefrorenen Boden kann man gut mit schweren Wagen fahren und die Dämpfung der Verwitterungsschicht ist nicht so extrem. Andererseits kann viel Schnee und Eis seismische Messungen unmöglich machen. Am Standort Jennissejskij kann Spät-Herbst mit Nachtfrosten, vor dem Einsetzen starken Schneefalls, eine gute Zeit sein, seismische Messungen durchzuführen.

2.2 Festlegen des Erkundungsziels

Wenn ein bestimmtes Ziel im Vorfeld feststeht, dann kann unter Umständen eine gewünschte Auflösung festgelegt werden. Eine maximale Auflösung ist meistens eine theoretische Zahl, die in der Praxis nicht zu erreichen ist. Die seismischen Parameter werden trotzdem diesem theoretischen Werten angepasst, dann geht auf keinen Fall Information verloren. Im Falle

eines untertägigen Endlagers werden Wegsamkeiten gesucht, die deutlich unter einem Meter breit sein können. Diese Klüfte werden mit 2D-Seismik nur zu finden sein, wenn ihre horizontale Ausdehnung die Größenordnung der Auflösung erreicht. Für eine höhere Auflösung muss in die Messarbeiten mehr Aufwand investiert werden. Die Seismik ist sehr gut geeignet, um geologische Strukturen horizontal und vertikal zu verfolgen. Am Standort Jennissejskij wird ein Untergrundspurabstand von < 10 m bei möglichst hohen Frequenzen angestrebt.

2.3 Vermessungsarbeiten

Die Genauigkeit der Vermessungsarbeiten spielt auch für die endgültige Messgenauigkeit eine Rolle. Die mit der Seismik georteten Schichtgrenzen müssen koordinatentreu in das endgültige 3D-Modell eingearbeitet werden können. Existierende topographische Messpunkte müssen im Voraus identifiziert werden. Diese übergeordneten Punkte sind für die gesamte Erkundung wichtig, weil sie die Basis der Verknüpfung aller Messungen darstellen. Fehlen topographische Punkte, sollten sie im Vorfeld neu gesetzt werden. Diese übergeordneten Vermessungspunkte müssen dann in einer Messschleife verbunden werden. Alle weiteren Vermessungsarbeiten werden dann in diese große übergeordnete Schleife eingehängt. Damit ist die übergeordnete Genauigkeit immer gegeben. Notfalls müssen auch Koordinatentransformationen durchgeführt werden.

Vernünftiges Kartenmaterial im Maßstab 1:5000 oder mindestens 1:10000 ist für die Planung der seismischen Arbeiten notwendig. Die Genauigkeit der Vermessungsringschlüsse in der Horizontalen und Vertikalen muss im Vorfeld definiert werden. Die Lagegenauigkeit kann im Dezimeterbereich liegen, ohne die seismische Genauigkeit bedeutend zu beeinflussen.

Wenn die übergeordnete Messschleife eine Nivellementgenauigkeit von 1 cm / km erreicht, ist eine Projektion mit angepasster Genauigkeit auf die seismischen Messpunkte mit geringem Aufwand durchaus möglich.

Arbeiten in Schweden zeigten, dass Vermessen mit Differential-GPS und einer Total-Station ausreichend Genauigkeit bietet /8/.

Es sollte überlegt werden, ob Permanent-Marker gesetzt werden oder ob die seismischen Messpunkte mit vertretbarem Aufwand zu lokalisieren sind. Folgemessungen oder Tiefbohrungen, die auf den seismischen Daten basieren werden, müssen zukünftig genau positioniert werden.

Bei der Mehrfachüberdeckung müssen die geforderten, auf eine Bezugsebene bezogenen Spurabstände und Schusspunktlagen strikt eingehalten werden. Bei Abweichung von der Soll-Lage werden für jeden Punkt Koordinaten verlangt.

Nach der Fertigstellung der übergeordneten Ringschleife werden die Messprofile in diese Schleife eingehängt. Mindestens nach jedem Profilkilometer soll ein Messpunkt koordinativ bestimmt und vermarktet werden. Hier sollten während der Messarbeiten weitere Messschleifen zur Überprüfung der Integrität der topographischen Messung durchgeführt werden. An den Profillinien werden die Geophonstationen und Schusspunkte mit Holzpflöcken o.ä. markiert und eindeutig mit einer Nummerierung gekennzeichnet. Bei einem Pattern der Geophone oder Schüsse werden die Patternextremitäten markiert. Mittels einer für den Bohr- und Messbetrieb angefertigten Kette können die einzelnen Positionen mit Dezimeter-Genauigkeit bestimmt werden.

Der Vermessungstrupp arbeitet den Bohr- und Messtrupps immer mindestens einen Tag voraus und unterliegt einer strengen Dokumentationspflicht. Die Kommunikation zwischen Vermesser und dem restlichen Feldbetrieb ist für einen reibungslosen Ablauf der Messkampagne äußerst wichtig

2.4 Feldparameter

2.4.1 Profilabstand, Profillänge

Die genaue Kartierung der Geologie benötigt ein dichtes Profilraster im Messgebiet. Zwischen den Messlinien muss interpoliert werden. Der Profilabstand und die damit verbundene Gesamtprofillänge, ist der entscheidende Kostenfaktor. Hier muss ein Kompromiss erarbeitet werden. Die Interpolationsunsicherheit wird gegen die Kosten abgewogen. Ein Profilabstand von mehr als einem Kilometer würde bei der komplizierten Geologie des Untersuchungsgebiets zu viele Unsicherheiten bedeuten, wenn das Erkundungsziel die Kartierung von Klüften und Störungen sein soll.

Die Profile sollten mit maximalem Überdeckungsgrad bis zum Messgebietsrand laufen. In Abhängigkeit von der endgültigen Aufnahmegeometrie wird dann ein Auslauf von ca. 500 m notwendig sein. Bei Messprofilen in Einfallsrichtung muss möglicherweise weiter außerhalb des Messgebiets gemessen werden, oder man könnte eine asymmetrische Aufnahmegeometrie verwenden.

2.4.2 Abtastrate

Eine Abtastrate von 2 ms erlaubt die Aufnahme mit einer Maximum-Frequenz von 124 Hz. Im Allgemeinen wird heute mit einer Abtastrate von 1 ms gearbeitet. Hiermit liegt man bei einer Maximum-Frequenz von 250 Hz auf der sicheren Seite. Dann wäre eine theoretische Maximal-Auflösung von 5 m vorhanden. Da am Standort Jennissejskij eine hohe Auflösung angestrebt wird, sollte mindestens mit einer Abtastrate von 1ms gearbeitet werden, um nicht schon bei den Aufnahmen einen Informationsverlust zu bekommen.

2.4.3 Überdeckungsgrad

Hiermit kann das Signal/Rauschen-Verhältnis deutlich verbessert werden. Erfahrungen aus Schweden /8/ zeigen, dass eine Erhöhung des Überdeckungsgrades mehr bringt, als z.B. die Ladungsmenge zu vergrößern. Ein höherer Überdeckungsgrad bedeutet dann aber eine größere Messapparatur und mehr Geophonstationen im Gelände. Hier muss vielleicht ein Kompromiss getroffen werden. Aber die Überdeckung sollte mindestens 24fach sein. Eine mehr als 60-fache Überdeckung bringt in der Regel keine weiteren Verbesserungen.

Schwedische Erfahrungen /8/ zeigen, dass die Überdeckung den wichtigsten Feldparameter darstellt, davon ausgehend, dass das Signal das Ziel erreicht. Ein hoher Überdeckungsgrad ist nur durch viele Schüsse entlang des seismischen Profils zu erreichen. Die Schlussfolgerung dieser seismischen Testarbeiten war, dass man an jedem Geophonpunkt schießen muss, um das bestmögliche Bild zu bekommen.

2.4.4 Geophonauslage

2.4.4.1 Geophongruppenabstand

Der Geophongruppenabstand δx bestimmt das Auflösungsvermögen der seismischen Ergebnisse. δx sollte bei bestimmten Frequenzen und Durchschnittsgeschwindigkeiten der Wellen sowie bei einer bestimmten Neigung des Untergrundes, einen gewissen Maximalwert nicht überschreiten.

$$\delta x \leq \frac{\bar{v}}{2 * f_{\max} * \sin \theta} \quad (4)$$

δx = Geophongruppenabstand

$f_{\max}$ = höchste zu registrierende Frequenz (von der Abtastrate abhängig)

θ = Neigung des Reflektors

$\bar{v}$ = RMS-Durchschnittsgeschwindigkeit

	Abtastrate 1 ms		Abtastrate 2 ms	
	3000 m/s	4000 m/s	3000 m/s	4000 m/s
	Maximal zulässige Geophongruppenabstände in [m]			
$\theta = 10^\circ$	35	46	69	92
$\theta = 20^\circ$	18	23	35	47
$\theta = 30^\circ$	12	16	24	32
$\theta = 40^\circ$	9	12	19	25

Tabelle 1: Maximal zulässige Geophongruppenabstände

2.4.4.2 Auslagenlänge

Die Länge einer Geophonauslage X hängt, außer von der Anzahl der verfügbaren Registrierkanäle und deren Spurabstand, von der gewählten Aufstellungsgeometrie ab. Man unterscheidet Langaufstellungen und Zentralaufstellungen. Zentralaufstellungen werden allgemein häufiger benutzt, da sie zu einer besseren Störwellenlöschung führen.

Der Abstand $X_{\max}$ zwischen Schuss und dem Ende der Auslage soll allgemein nicht größer sein, als die Tiefe des vorrangig zu untersuchenden Reflexionsbereiches.

$$X_{\max} \leq Z \quad (5)$$

$X_{\max}$ = maximale Schuss-Geophon-Entfernung

Z = Tiefe des Reflektors

Der Anlauf (Abstand zwischen Schuss und schussnächster Geophongruppe, auch Offset genannt) $X_{\min}$ soll allgemein kleiner sein, als die flachsten noch zu erfassenden Reflexionen.

$$X_{\min} < Z_{\min} \quad (6)$$

Ein solcher Anlauf ist aus mehreren Gründen wünschenswert.

1. Vermeidung von Übersteuerung der schussnahen Empfängersignale.
2. Vermeidung von starken Bodenrollen, die ihre größte Intensität in der Nähe des Schusses haben.
3. Der Luftschall von flachen Schüssen oder Vibratoren soll erst nach den wichtigsten Reflexionen am Geophonort eintreffen.

Die Auslage soll aber in jedem Fall lang genug sein, um eine Löschung der störenden multiplen Reflexionen zu gewährleisten. Die Möglichkeit Multiple zu löschen, wächst dabei allgemein mit dem Quadrat der Auslagenlänge.

Bei einer 120-Spuren-Messapparatur und 60-facher Überdeckung würde man einen Geophonabstand von 12,5 m wählen und zwischen jedem Geophonpunkt einen Schuss setzen. Hier wäre die Auslagenlänge bei einem Anlauf von 31,25 m (vier Stationen ausgeschaltet) insgesamt 781 m, die nicht größer als die zu erfassende Zielteufe zwischen 800 und 1000 m ist.

2.4.4.3 Geophonpattern

Die Geophonketten werden allgemein nur bei Refraktions- und Kurzrefraktionsmessungen, bei Nahlinien und bei Noise-Tests punktförmig ausgelegt. Bei Reflexionsmessungen wird dagegen immer ein Geophonpattern ausgelegt, um durch dessen Richtwirkung die vorwiegend horizontal laufenden Störwellen auszulöschen und um die vertikal eintreffenden Nutzwellen zu verstärken. Die Geophonpattern werden in Profilrichtung ausgelegt; die Zahl der Geophone sollte zwischen 12 und 48 liegen und die Abstände linear oder getapert sein. Das Geophonpattern soll zwar lang genug sein, um Störwellen auszulöschen, aber nicht so lang, dass damit auch die hohen Frequenzen der schräg eintreffenden Reflexionen ausgelöscht werden. Selbst bei horizontaler Lagerung des Reflektors treffen die Reflexionen am Ende der Auslage immer unter einem Winkel auf die einzelnen Geophongruppen auf.

Die meisten seismischen Kontraktoren verfügen über Software, die eine Berechnung der optimalen Geophonparameter ermöglicht. Generell soll ein gutes Geophonpattern die hauptsächlichen Störwellen um 95% (-26 dB) oder mehr dämpfen. Im Einzelnen kann der Durchlass wie folgt berechnet werden:

Bei gleichmäßigem Geophonabstand

$$R_{(g)} = \frac{100}{N} * \frac{\sin \frac{N * D}{\lambda} * \pi}{\sin \frac{D}{\lambda} * \pi} \quad (7)$$

$R_{(g)}$ = Geophon-Response (%)

N = Anzahl der Geophone

D = Geophonabstand (m)

λ = Wellenlänge (m)

Es gibt empirische Empfehlungen für das Optimieren linearer Geophonpattern, um die beste Mischung aus Störwellenunterdrückung, sporadischer Noise-Unterdrückung und Nutzsignalaufnahme, unter Berücksichtigung der Scheingeschwindigkeit an den schussfernen Spuren, zu

erreichen. Es gehört aber zur guten seismischen Praxis, Feldversuche vor dem Beginn der Arbeiten durchzuführen.

Anlauf und Auslagenlänge sowie Schuss- und Geophonanordnung werden vor Beginn der Routinemessungen durch einen Noise-Test bestimmt bzw. kontrolliert. In den letzten Jahren ist diese Art der Störwellenreduktion etwas vernachlässigt worden, weil die hohen Überdeckungsgrade der Profile und der große Dynamikbereich der Aufnahmeapparaturen meistens zu ausreichend guten Ergebnissen geführt haben. In sensiblen Bereichen, wie bei der Endlagersuche, sollte aber hier nicht gespart werden. Die Erfahrungen aus Sellafield in Großbritannien /16/ zeigen, dass Kritiker schlechte Arbeitspraxen als Begründung benutzen können, um ganze Projekte zum Kippen zu bringen.

Bei Noise-Tests werden die Geophone gebündelt aufgestellt, um möglichst alle Störwellen aufzunehmen. Alle Apparaturnfilter sollten ebenfalls ausgeschaltet sein.

2.4.4.4 *Geophoneigenschaften*

Die drei wichtigsten elektrischen Eigenschaften der Geophone sind:

- Leakage
- Geophon-Dämpfung
- Empfindlichkeit der Geophongruppe

Die elektrische Qualität einer Anlage wird entscheidend durch die Leakage-Werte bestimmt. Bei feuchten oder schlechten Messkabeln treten starke 50 Hz-Einstreuungen und Übersprechung zwischen Spuren oder Geophonen häufiger auf als sonst. Die Dämpfung sollte nach der Theorie so gewählt werden, dass eine gleichbleibende Amplituden-Frequenz-Response oberhalb der Eigenfrequenz verwirklicht wird, dass die Phasenresponse im Bereich der Nutzfrequenz etwa linear mit der Frequenz verläuft und dass die Empfindlichkeit möglichst hoch wird. Ideale Werte für Geophondämpfung sollen zwischen 65% und 70% liegen.

2.4.4.5 *Ankoppelung und Setzen der Geophone*

Die feste Ankoppelung der Geophone an das gewachsene Erdreich ist von besonderer Wichtigkeit. Geophone müssen aufrecht stehen und die Geophonkabel dürfen nicht so stramm ausgezogen werden, dass sie wie eine Klaviersaite in der Luft schwingen. Wie die Erfahrungen aus Kristallgebieten zeigen, müssen sie in anstehendem Fels in gebohrte Löcher platziert werden. Wenn nur 20 bis 40 cm loses Sediment ansteht, sollte dieses entfernt werden und die Geophone in darunter liegendem Fels gesetzt werden.

Das Geophonpattern soll vom Vermessungstrupp abgesteckt werden. Hierfür eignen sich Holzpflocke oder Drahtfahnen. Im Vorfeld können dann Problembereiche erkannt werden, wo z.B. das volle Geophonpattern nicht ausgelegt werden kann. Geht man von einer maximalen vertikalen Auflösung von 5 m aus, dann sollte das Geophonpattern einen Höhenunterschied von < 1 m aufweisen. Der Vermessungstrupp wird in der Lage sein, dieses festzustellen und entsprechend die Patternlänge zu kürzen. Gekürzte Geophonfiguren müssen immer symmetrisch um das Zentrum der Geophonstation aufgebaut werden. Die Änderungsprotokolle werden an den Messtrupp weiter gereicht. Für den Messtrupp reicht eine markierte Kette, die zwischen den Markierungen gespannt wird, um die genauen Geophonpositionen zu bestimmen.

Es müssen genügend Geophone vorhanden sein, um sie regelmäßig – auch während des Messbetriebes – prüfen zu können.

2.4.5 *Energiequelle*

Die Erregung seismischer Wellen geschieht überwiegend durch Sprengungen. Die hohen Energiedichten, die bei Explosionen frei werden, können durch kein anderes Verfahren erreicht werden. Die Digitaltechnik mit der Möglichkeit energetisch schwache Empfangssignale zu stapeln, hat die Entwicklung sprengstoffloser Verfahren ermöglicht.

Bei den Schüssen müssen Ladungstiefe, Ladungsmenge, Schussfigur und Verdämmung unter Kontrolle gehalten werden.

2.4.5.1 *Ladungstiefe*

Im Allgemeinen soll der Schuss in der ersten konsolidierten Schicht, dicht unterhalb der Basis der Verwitterungsschicht, gesetzt werden. Zu flache Ladungstiefen erkennt man an folgenden Sachverhalten:

- starke Roller und schlechte Ersteinsätze
- die schussnahen Ersteinsätze zeigen, im Gegensatz zu den schussfernen Ersteinsätzen, relativ niedrige Ersteinsatzgeschwindigkeiten
- die Interzeptzeiten sind länger als die gemessenen Aufzeiten.

Zu große Ladungstiefen sind ebenfalls schädlich, da sie folgende Sachverhalte bewirken:

- es entsteht „ghosting“, welches die Reflexionen verzerrt bzw. aufspaltet
- die Reflexionsenergie nimmt bei gleicher Ladung mit zunehmender Übertiefe stark ab, so dass Seismogramme verhungern.

Bei den Testarbeiten zum Vergleich von Schusstiefen sollte man, falls möglich, wie auch bei allen anderen Tests im Feld, immer unregelmäßige Seismogramme mit gleich bleibender Verstärkung aufnehmen und beurteilen.

Wenn flache Bohrtiefen unvermeidbar sind, müssen die auftretenden Oberflächenwellen durch eine Erhöhung der Schussloch-Anzahl und durch eine besonders wirksame Schusskonfiguration kompensiert werden.

2.4.5.2 *Ladungsmenge*

Mit der benutzten Ladungsmenge lassen sich sowohl die Eindringtiefe als auch das Frequenzspektrum des Signals steuern.

Die Ladungen sollen gerade so groß gewählt werden, dass die gewünschte Eindringtiefe erreicht wird und dass sich das Signal deutlich über den Störpegel heraushebt. Eine weitere Ladungserhöhung bewirkt nur, dass die Störenergie überproportional gegenüber der Nutzenergie ansteigt.

Will man Nutzenergien mit höherer Frequenz erzeugen, um eine bessere Auflösung zu bekommen, so muss man eine oder mehrere kleine Ladungen als Schusspattern kombiniert oder auch hintereinander abtun und stapeln, um die für die Eindringtiefe notwendige Energie zu erzielen. Sehr große Eindringtiefen sind jedoch, wegen der mit größerer Eindringtiefe verbundenen stärkeren Absorption höherer Frequenzen im Erdinneren, mit hochfrequenten Signalen nicht zu erwarten, auch nicht durch Stapeln.

2.4.5.3 *Schusspattern*

Mit einem geeigneten Schusspattern kann man, genau wie mit einem Geophonpattern, störende Oberflächenwellen dämpfen bzw. auslöschen. Die Dämpfungswirkung $R_{(s)}$ kann mit der für die Geophondämpfung angegebenen Formel (7) berechnet werden. Hier werden Zahl und Abstand der Geophone durch Zahl und Abstand der Schusslöcher ersetzt.

Für ein lineares Schusspattern in Profilrichtung lässt sich für eine bestimmte Störwellenlänge leicht der günstigste Lochabstand finden, wenn man sich auf die Zahl der Schusslöcher geeinigt hat:

$$\delta L = \frac{\lambda_s}{N} \quad (8)$$

$$L = \frac{N-1}{N} * \lambda_s \quad (9)$$

δL = Lochabstand (m)

$\lambda_{(s)}$ = Störwellenlänge (m)

N = Anzahl der Schusslöcher

L = Länge des Schusspatterns in Profilrichtung

Das Schusspattern wird ebenfalls von dem Vermessungstrupp abgesteckt. Es reicht, den Schusspunkt und die Extremitäten abzustecken (wie bei den Geophonstationen). Der Bohrtrupp kann dann mit einer Kette die eigentlichen Schusspositionen abmessen. Falls das Schusspattern nicht in voller Länge ausgelegt werden kann bzw. falls Geländehöhenunterschiede > 1 m vorhanden sind, soll der Vermessungstrupp dieses festhalten und entsprechend das Schusspattern symmetrisch kürzen.

2.4.5.4 Verdämmung, Verfüllung

Alle Bohrlöcher müssen nach dem Laden und vor dem Abtun der Schüsse verdämmt werden, damit die Schussenergie nicht nach oben verpufft (Ausbläser). Für Bohrlöcher mit 100 mm Durchmesser kommt mittelgrober Kies infrage, während die mit Lanzen, Minijets oder ähnlichem gebohrten Löcher zweckmäßigerweise mit Ton-Granulat verfüllt werden. Letzteres hat den Vorteil, sofort zu verquellen und Schäden durch Ausbläser zu vermeiden.

Bei Testarbeiten in Schweden in so genannten „slim holes“ (auf Deutsch: „schlanke Löcher“)-/8/ wurden Sand und Wasser als Bohrlochverfüllung genommen.

2.4.5.5 Vibroseis

Vibroseis wird dort eingesetzt, wo die Arbeiten mit Sprengstoff Probleme verursachen. Wie zum Beispiel:

- in Siedlungen, wo Gebäudeschäden auftreten können
- in Gebieten, in denen das Arbeiten mit Sprengstoff behördlich untersagt bzw. mit vielen Auflagen behaftet wird
- weil Sprengseismik zu teuer wird.

Erfahrungen aus der Schweiz und Großbritannien zeigen, dass der Einsatz von Vibroseis im komplizierten Kristallin grundsätzlich möglich ist. Hierbei müssen die Feldparameter optimiert werden, da Vibroseis eine Oberflächenquelle ist und die in den Boden gestrahlte Energie eines Vibrators relativ gering ist. Die Energie kann durch die Verlängerung des Sweepsignals und über das Stapeln mehrerer Signale von einer Sendeposition vergrößert wer-

den. Da die Datenmengen sehr groß werden können, wird meistens im Feld die Korrelation und Staplung durchgeführt.

Grundparameter eines Sweeps sind Zeitdauer, Anfangsfrequenz und Frequenzbreite sowie das Sweeppattern, das den gleichen Grundregeln eines Schusspatterns unterliegt. Beim Down-Sweep überlagern die tieffrequenten Störwellenbereiche wesentliche Zeitabschnitte der schwächeren Reflexionen. Das ist ein Grund, warum in der Regel Up-Sweeps bei den Messungen bevorzugt werden. Je länger ein Sweep ist, um so größer sind die Zeitbereiche, in denen Störwellen und Reflexionswellen sich gegenseitig überlagern können. Ist andererseits das Energieverhältnis zwischen Stör- und Nutzenergie günstig, so können längere Sweeps mit entsprechend höherem Energiegehalt zu einer Verbesserung der Reflektionsqualität führen.

Vor der Aufnahme von Vibroseisarbeiten muss gründlich getestet werden, um die optimalen Aufnahme-Parameter festzustellen.

2.5 Statische Korrekturen

Generell muss ein seismisches Profil auf eine horizontale Ebene, genannt Bezugsniveau, bezogen werden. Topographische Schwankungen und Geschwindigkeitsanomalien der Verwitterungsschicht können zu starken Variationen der Ankunftszeiten der seismischen Wellen und zu einem Qualitätsverlust der Daten führen. In der Literatur über Seismik im Kristallin wird immer wieder auf die Wichtigkeit dieser Arbeiten eingegangen.

Die statische Korrektur setzt sich aus folgenden beiden Komponenten zusammen:

- Verzögerungszeit – die sich ergibt, wenn langsamere Schichtgeschwindigkeiten durch die Korrekturgeschwindigkeit (V_c) ersetzt werden, und
- Höhenkorrektur – die der zeitlichen Reduktion der Geländehöhe mit V_c auf Bezugsniveau entspricht.

Geht man von Energiequellen aus, die nicht unterhalb der Verwitterungsschicht liegen, wie flache Schüsse oder Vibroseis, so müssen zusätzliche Messmethoden im Feld eingesetzt werden, um die statischen Korrekturen zu berechnen. Eine Ersteinsatz-Auswertung (First Break Picking) der Produktionsaufnahmen als kostengünstige Kurzrefraktionsmethode ist nur bedingt zu empfehlen. Werden Schuss- und Geophonpattern verwendet, dann werden die Ersteinsätze „verschmiert“. Die Geschwindigkeit oberhalb des ersten Refraktors wird meistens, wegen des Inline-Offsets und zu großen Spurabstandes, nicht erfasst. Aufzeitmessungen sind bestens geeignet, um die Geschwindigkeitsverteilung der Verwitterungsschicht festzustellen; sie sind aber relativ teuer und liefern nur punktförmige Ergebnisse. Kurzrefraktionsmessungen (Nahlinien) entlang seismischer Profile liefern durchgehende Informationen zu Refraktorenverläufen und –geschwindigkeiten. Nur werden sie in komplizierten Fällen wie Refraktorenstörungen, Refraktorenmulden oder Geschwindigkeitsinversionen überfordert. Um brauchbare Messergebnisse zu bekommen, müssen möglicherweise beide Messmethoden verwendet werden.

Ein Verzicht auf die statischen Korrekturen kommt nicht in Frage. Erfahrungen aus Kanada /1/ bei der Erzexploration in vulkanischem Gestein weisen auf die Bedeutung von Kurzrefraktionsmessungen hin, unter anderem weil:

- der hohe Geschwindigkeitsunterschied zwischen der Verwitterungsschicht und dem Kristallin-Fundament große statische Verschiebungen verursacht
- die Erhaltung der erwünschten hohen Frequenzen in den seismischen Daten präzise statische Korrekturen benötigt

- das niedrige Signal/Rauschen-Verhältnis und die Größenordnung der Probleme der statischen Korrekturen den erfolgreichen Einsatz von statistischen Verbesserungen der Korrekturwerte (residual statics) verhindern.

Wenn man die Abtastrate als die Größe betrachtet, die durch Fehler in den beiden Höhenbestimmungen (Schuss und Geophon) nicht gefährdet werden darf (mittlerer Fehler = 1/3 des Grenzfehlers), dann ergibt sich für den mittleren Fehler der einzelnen Höhenbestimmung

$$m_h = \pm \frac{AR * V_c}{3\sqrt{2}} \quad (10)$$

m_h = mittlerer Fehler der Höhenbestimmung

AR = Abtastrate

V_c = Korrekturgeschwindigkeit.

Aus der Praxis können folgende zulässige Toleranzen ermittelt werden:

	V_c (km/s)						
AR (ms)	1,6	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
1	± 0,4 m	± 0,5 m	± 0,6 m	± 0,7 m	± 0,8 m	± 0,9 m	± 1,1 m
2	± 0,8 m	± 1,0 m	± 1,2 m	± 1,4 m	± 1,7 m	± 1,9 m	± 2,1 m
4	± 1,5 m	± 1,9 m	± 2,4 m	± 2,8 m	± 3,3 m	± 3,8 m	± 4,2 m

Tabelle 2: Zulässige Toleranzen bei der Höhenbestimmung

2.6 Messapparatur

Idealerweise soll erst nach der Wahl der Feldparameter eine passende Messapparatur ausgesucht werden.

2.7 Quality Control

Tägliche Testarbeiten sind unabdingbar und Industriestandard. Die Qualität des Messequipments muss laufend nachgewiesen werden und untermauert die Glaubwürdigkeit der Messergebnisse. Bei späteren Hearings zur Eignung eines Standortes darf die Professionalität der Arbeiten nicht durch mangelhafte Arbeitsprozeduren in Frage gestellt werden können /16/. Die durchzuführenden Tests werden meistens vom Instrumentenhersteller vorgeschrieben. Hierfür muss auch Zeit und Personal zur Durchführung und Dokumentation vorgesehen werden.

Weiterhin müssen alle Feldparameter dokumentiert und später die seismischen Ergebnisse hinzugefügt werden. Nicht nur die Auswerter der Messdaten, sondern alle Gutachter, die später die Messergebnisse kritisch durchsehen werden, benötigen Informationen über Standards und Anomalien bei der Datenaufnahme.

Es ist notwendig, die Rohdaten im Feldbüro oder Messwagen nach dem Einsatz von einfachen Prozessing-Stufen zu begutachten. Somit können die Daten täglich kontrolliert werden.

Änderungen der Datenqualität können durch Parameteränderungen sofort im Feld vorgenommen werden, um sinnlose Profilkilometer zu verhindern.

Die Arbeitssicherheit spielt in der Explorationsbranche eine zunehmend wichtige Rolle. Im Endlagerbereich muss dieser Punkt eigentlich höchste Priorität bekommen. Die Glaubwürdigkeit eines Unternehmens wird auch an ihrem Umgang mit dem eigenen Personal und Equipment gewertet. Viele seismische Messtrupps haben einen Sicherheitsbeauftragten, der im Trupp arbeitet und direkt dem Auftraggeber gegenüber verantwortlich ist. Ein Sicherheitsbericht, und wenn notwendig eine Sicherheitsstatistik, sollte geführt werden.

2.8 Prozessing

Bei der zu erwartenden komplexen Geologie muss auf die Datenverarbeitung strengstens geachtet werden. Die Reihenfolge der Prozessing-Stufen kann entscheidende Auswirkungen auf das Endergebnis ausüben und muss individuell den Daten angepasst werden. Beispiele aus anderen Messgebieten können zwar als Anregung dienen, aber nur die Qualität der Daten wird im Endeffekt für den Prozessing-Ablauf ausschlaggebend sein. Beispielsweise wurde in Kanada /1/ ein erfolgreiches Reprocessing durchgeführt, nachdem zuerst keine Reflexionen zu erkennen waren. Hier wurden Spiking-Minimum-Phase-Dekonvolution, Amplituden-Wiederherstellung und NMO-Korrekturen zur CDP-Stapelung vor dem Einsatz der „gepickten“ statischen Korrekturen durchgeführt. Erfahrene Mitarbeiter oder Unternehmen sind hier unerlässlich.

3 INTERNATIONALE ERFAHRUNGEN ZUR OBERFLÄCHEN-SEISMIK IM KRISTALLIN

In den letzten Jahren wurden in einigen Ländern (Schweden, Finnland, Kanada, Großbritannien) Erfahrungen mit 2D-Seismik im Kristallin gesammelt. Im Allgemeinen konnten gute Messergebnisse bis zu einer Tiefe von 1000 m erzeugt werden.

3.1 Schweden

Untersuchungen mit Mini-Vibratoren und Pulled-Along-Arrays haben wenig Erfolg gebracht; man hat sich dann für Sprengstoff als Energiequelle entschieden und flache Schüsse im festen Gestein nach folgenden Vorgaben eingesetzt:

- bei einer Verwitterungsschichtmächtigkeit unter 50 cm wurden 15g Sprengstoff in Bohrlöchern von 90 cm Teufe und 12mm Durchmesser ohne Verrohrung gesetzt
- bei einer Verwitterungsschichtmächtigkeit über 50 cm wurden 75g Sprengstoff in Bohrlöchern von 150 cm Teufe und 20mm Durchmesser mit 16 mm Verrohrung gesetzt /8/.

Säubern der Bohrlöcher durch Ausblasen oder Ausspülen war hier ungünstig, weil damit Hohlräume geschaffen wurden, die zu einer Energieverpuffung und zur Erzeugung von Störwellen führten.

Geophone wurden in 8 mm breite und 50 mm tiefe, in Fels gebohrte Löcher gesetzt. Bei geringen losen Sedimentmächtigkeiten bis 40 cm wurden diese mechanisch beseitigt, um die Geophone in festes Gestein zu setzen.

In Schweden wurde ein seismisches Testprogramm an einer bekannten Störung durchgeführt, um die Messparameter genauestens abzustimmen. Diese Vorgehensweise ist sehr empfehlenswert und kann enorme Kosten sparen. Bis zu einer Tiefe von ca. 1,5 km (500 ms Laufzeit) konnten gute Ergebnisse erzielt werden. Falls man tiefer erkunden will, wird mehr Energie benötigt.

Ein High-Cut-Filter von 250 Hz wurde verwendet, um Temporal-Aliasing bei einer Abtastrate von 1 ms zu vermeiden. Spätere Arbeiten mit einer anderen Messapparatur zeigten, dass Frequenzen über 250 Hz noch in den Seismogrammen vorhanden waren. Es ist unklar, ob diese hohen Frequenzen für die Auswertung tieferer Horizonte benutzt werden können, aber der Einsatz einer 0,5 ms Abtastrate wurde vorgeschlagen, um sie möglicherweise zu nutzen. Ein Minimum-Offset von 20 m wird empfohlen und wenn die Dynamik der Apparatur es hergibt, sollte der Low-Cut-Filter weggelassen werden. Die kleine Ladung der Schüsse generiert generell wenig Störwellen und eine Übersteuerung der schussnahen Geophone wird nicht zum Problem. Bei Schichtneigungen von um 45° müssen die Profile bei einer Zielteufe von 1 Kilometer mindestens noch 1 Kilometer über das vorgesehene Ende hinaus, bei voller Überdeckung gemessen werden.

Nachfolgend sind die Aufnahme- und Processingparameter, die in Schweden eingesetzt wurden, aufgelistet.

<i>Parameter</i>	<i>Line 1</i>	<i>Line 2</i>
Anzahl der Kanäle	100	100
Geophonabstand	5 m	10 m
Schussabstand	5 m	10 m
Nominal-Überdeckung	50	50
Auslage	end on / shoot-through	end on / shoot-through
Geophontyp	single 28 Hz	single 28 Hz
Minimum-Offset	20 m	20 m
Abtastrate	1 ms	1 ms
Aufnahmelänge	5 s	5 s
Sprengstofftyp	Nitro-Nobel booster	Nitro-Nobel booster
Ladungsmenge	100 g	100 g
Ladungstiefe	2 m	2 m
Low cut im Feld	Out	Out
High cut im Feld	250 Hz	250 Hz
Anzahl der Schüsse	191	93
Profillänge	1 km	1 km
Aufnahmesystem	SERCEL 348	SERCEL 348

Tabelle 3: Aquisitionsparameter für die Ävrö-Reflexionsmessungen

	Schritt Prozess Kommentar	Domain	Geschwind. Analyse	Stapeln - kontrolle	Bemerkung
1	Lesen Urdata	CSG			
2	Spike and Rauschen editieren	CSG			
3	Ersteinsatz picken	CSG			
4	Geometrisch Auslagen- korrektur	CSG			Mit der Zeit multiplizieren ist norm. ausreichend
5	Attenuation-Korrektur (Opti- on)	CSG		1	Ersteinsätze müssen teilw. korri- giert werden
6	Refraktionsstatische Korrektu- ren	CSG			
7	Oberflächen-konsistente De- konvolution	CSG			Spektralweißausgleich ist auch eine Option, kann aber manchmal übersprungen werden
8	Bandpass-Filter CSG 1 2 (vie- le Tests müssen durchgeführt werden)	CSG	1	2	viele Tests müssen durchgeführt werden
9	Restkorrekturen - Durchgang 1	CMP		3	
10	Spur top mute CMP 4 Erstein- sätze aus den Daten entfernen	CMP		4	Ersteinsätze aus den Daten entfer- nen
11	AGC – Anwenden und sichern CRG	CRG			
12	Geschwindigkeitsfilter	CRG		5	Signale sind in CRGs regelmäßiger
13	AGC entfernen	CRG	2		
14	Restkorrekturen - Durchgang 2	CMP		6	
15	Korrekturen anpassen (optio- nal)	CMP		7	Nur eine ganz kurze Verschiebung benutzen, sonst wird geschummelt
16	AGC oder Spurausgleich	COG			Irgendein Ausgleich muss durch- geführt werden
17	NMO	COG	3		wahre Geschwindigkeiten sollen jetzt eingesetzt werden
18	DMO	COG		8	
19	Stapeln	CMP			alpha angepasst ist normalerweise besser
20	F-X-Decon	CMP			Oder andere Kohärenzfilter
21	Spurenausgleich	Stapeln			
22	Migration	Stapeln			
23	Spurenausgleich	Stapeln			

CSG - Common shot gather CMP - Common midpoint gather

CRG - Common receiver gather COG - Common offset gather /8/

Tabelle 4: Empfohlene Prozessparameter

3.2 Kanada

In Kanada wurden seismische Messungen für die Suche nach Bodenschätzen eingesetzt.

3.2.1 Snap Lake

Einige Profilkilometer 2D-Seismik wurden im Mai 2001 von einer Bergbaufirma gemessen, um einen Erzgang von maximal 3 m Breite und einer Teufe von bis zu 1000 m zu kartieren [7]. Viel Wert wurde auf eine Maximierung des Signal/Rauschen-Verhältnisses während der Acquisitionsphase gesetzt. Hoher Überdeckungsgrad (40 bis 260fach wurde ausprobiert), exzellente Schuss- und Geophon-Ankoppelung und sehr gute statische Korrekturen wurden als die wichtigsten Komponenten einer erfolgreichen Arbeit aufgelistet. Weiterhin wurden mit großen Offsets (>1000 m) brauchbare Reflexionsamplituden mit Teufen größer als 500 m gewonnen.

Vibroiseis wurde als kostengünstigere Alternative ausprobiert; die hiermit gewonnen Ergebnisse waren deutlich schlechter, als die Daten der Sprengseismik.

Die zwei Testprofile wurden im Streichen und Einfallen des Erzganges gelegt. Eine asymmetrische Auslage wurde in Richtung des Einfallens verwendet. Um die Auflösung zu optimieren, wurde eine Abtastrate von 0,5 ms und ein Geophonabstand von teilweise nur 2 m gewählt. Als Energiequelle wurde 0,25 kg Pentalite in flachen Bohrlöchern (1 – 3 m tief) benutzt. Die ersten Processingschritte waren:

- Aufnahmegeometrie,
- Qualitätskontrollen (Spureditierung und Mute) und
- Ersteinsatz-Picking.

Vor dem Stapeln kamen noch

- statische Refraktions-Korrekturen,
- Band-Pass-Filtern (120 – 450 Hz),
- f-k Filter,
- sphärische Divergenz,
- Spektralausgleich,
- NMO,
- Dekonvolution und
- restliche statische Korrekturen dazu.

Nach dem Stapeln wurden noch

- Dekonvolution,
- zeitabhängiges Filtern und
- Finite- Differenz-Zeit-Migration

angewendet.

Der Aufwand hat sich gelohnt, da der Erzkörper mit Sprengseismik bis 425 ms (ca. 1300 m) gut erkennbar war. Schwache Reflexionen konnten bis 520 ms (1659 m) gedeutet werden. Interessant war der Frequenzinhalt der Reflexionen vom Erzkörper, die im Bereich 240 – 350 Hz sehr hoch waren und eine gute Auflösung ermöglichten. Die komplizierte dreidimensionale Struktur des Erzkörpers führte zu Problemen und die Mächtigkeit konnte nicht aufgelöst werden. Hier wurde unter anderem erwähnt, dass ungenaue statische Korrekturen zur Frequenzverminderung der gestapelten Daten führen können und somit die seismische Mächtigkeit des Zieles erhöhen würden.

3.2.2 *Quebec*

In April 1996 wurde im Norden von Quebec eine seismische 3D-Reflexionsmessung über ein großes Erzvorkommen in 900 m Teufe durchgeführt, die aber keine brauchbaren Ergebnisse lieferte. Eine erneute Bearbeitung der Messdaten mit verbesserten statischen Korrekturen und voller Migration vor dem Stapeln, führte zu einer deutlichen Verbesserung der Daten und zu einer Visualisierung der Geologie unterhalb von 500 m.

3.2.3 *Halfmile Lake*

Von 1995 bis 1996 wurden 2D- und 3D-Seismik bei Halfmile Lake in New Brunswick eingesetzt /5/. Hier wurde eine Methodologie, bestehend aus folgenden Schritten, entwickelt:

- Bohrkern gewinnen und ihre Eigenschaften bestimmen
- Bohrlochmessungen
- strukturelle und stratigraphische Modelle auf der Basis der Bohrlochinformationen aufstellen
- 2D-Seismik-Feldtests
- 3D-Seismik-Feldmessung und Auswertung.

Geophonankoppelung und Energiequelle waren die wichtigsten Acquisitions-Parameter. Nach einer Messung im Jahr 1993, bei der keine seismische Information über den Zielhorizont gewonnen werden konnte, wurden nach umfangreichen Testarbeiten gute Ergebnisse erzielt.

3.3 *Großbritannien*

Sellafield

Die Erfahrungen aus Sellafield sind für alle, die Seismik bei der Endlagersuche einsetzen wollen, von Bedeutung /15/, /16/. Hier wurden im Wesentlichen zwei Hauptlehren gezogen. Erstens wird man mit schlecht und „geheim“ durchgeführten Messungen nur Kritikern einen Gefallen tun und zweitens, um vernünftige Messdaten zu gewinnen muss man bereit sein, einiges zu investieren.

Die seismischen 2D-Messungen aus den Jahren 1988, 1990 und 1992 wurden im Gutachterbericht kritisiert. Der Profilabstand von 200 – 300 m war zu groß, um einen Störungsabstand von 20 – 200 m darzustellen. Bei der komplexen Geologie waren möglicherweise viele Reflexionen in den seismischen Profilen, die von nicht lotrechten (direkt unterhalb der Messlinie) Reflektoren stammten und dann vielleicht als Rauschen im Seismogramm auftauchten. Die Aufnahme- und Processing-Parameter wurden nicht veröffentlicht und so verloren die Messungen an Glaubwürdigkeit.

Eine später durchgeführte 3-D-Messung führte dann, zusammen mit den anderen geowissenschaftlichen Daten, zu der Aufgabe des Vorhabens, in Sellafield weiter nach einem Endlager zu suchen.

3.4 *Schweiz*

Bei der Grimsel-Testanlage wurden im August 1995 unterschiedliche hochfrequente Energiequellen getestet /3/. Kleine Sprengstoffmengen (5 – 100g) hatten das beste Signal/Rauschen-Verhältnis und die beste Frequenz-Charakteristik. Eine Frequenz von 1000 Hz konnte maximal über 100m verfolgt werden. Für Zielweiten von 1000 m wurden mindestens 50g Sprengstoff benötigt.

4 ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN

Zur dreidimensionalen Erkundung im Kristallin ist die Reflexionsseismik eine geeignete Messmethodik. Störungen und Klüfte können mit keiner anderen geowissenschaftlichen Messmethodik so präzise erfasst werden, wie mit der Seismik. Um die erwünschte Genauigkeit zu bekommen, muss die gewählte Auflösung passend zur Zielteufe gewählt werden. Für eine genaue Bestimmung sollten Geophonabstände von maximal 10 m, bei mindestens 50facher Überdeckung und eine Abtastrate nicht höher als 1 ms gewählt werden. Noch besser wäre die Durchführung einer 3D-Messung, die eine deutlich höhere Auflösung anbieten würde. Dieser Schritt wird bei einem positiven Verlauf der Erkundung später unerlässlich werden. In der Erdölindustrie sind 3D-Messungen, nach vorläufigen 2D-Messungen zu Erkundungszwecken, inzwischen Industriestandard. Die Erdölindustrie verfolgt ähnliche Ziele wie bei der Charakterisierung von Endlagerstandorten, in der die geologische Struktur und das Fließverhalten im Untergrund untersucht werden /16/.

Bevor die Messarbeiten beginnen, müssen umfangreiche Testarbeiten durchgeführt werden. Am Besten sollten diese Arbeiten an einem bekannten Zielobjekt in Verbindung mit anderen geologischen und geophysikalischen Daten durchgeführt werden.

Vorschlag zum Testprogramm

VSP-Messungen und Bohrlochmessungen:

- Erstellung synthetischer Seismogramme,
- Berechnung der Energiemenge für seismische Messungen,
- Erkennung Zielobjekte für die seismischen Testmessungen,
- Festlegen Bezugsniveau und Korrekturgeschwindigkeit und
- geologische Kenntnisse für seismische Kartierung gewinnen
- Seismik Testprogramm: Energiequelle – (Vibroiseis?), Schussladung, Schussteufe, Schusspattern, Bohrlochverdümmung bei Registrierung mind. 25 Kanäle, Geophone gebündelt, alle Apparaturenfilter ausgeschaltet
- Noise-Test mit der erwünschten Energiequelle – um Oberflächenstörwellen zu identifizieren, bei Registrierung mit mind. 25 Kanäle, Geophone gebündelt, alle Apparaturenfilter ausgeschaltet
- Unterschiedliche Geophone ausprobieren
- 2 Testlinien über die Tiefbohrung hinweg messen, wenn möglich im Streichen und Einfallen des Zielhorizontes (oder in den endgültigen Profilrichtungen). Die Feldparameter einsetzen und den Frequenzinhalt der Reflexionen untersuchen.
- Die Testlinien wiederholen bis brauchbare Messergebnisse zu Stande kommen.
- Statische Korrekturen für die Testlinien berechnen. Hierfür werden u.a. Kurzrefraktionsmessungen (Nahlinien) benötigt. Eine geeignete Methodik für die statischen Korrekturen soll ermittelt werden.
- Vermessung und Koordinatenbestimmung für die Testlinien.
- Vorprozessing im Messtrupp durchführen

Der Auftraggeber sollte die Testarbeiten begleiten und danach ständig im Messtrupp anwesend sein, um die Qualität der Messungen zu kontrollieren.

Daten von Erkundungsbohrungen zeigen, dass die Tiefe der sedimentären Verwitterungsschicht in den Erkundungsgebieten stark zwischen 5 m und 50 m schwankt, und dass die Mächtigkeit der verwitterten kristallinen Kruste über dem intakten kristallinen Sockel zwischen 70 m und 150 m variiert /2/. Die Permeabilität der verwitterten kristallinen Kruste ist oft höher als die verwitterte Sedimentschicht. Der hohe akustische Impedanzunterschied zwi-

schen der verwitterten Sedimentschicht und dem kristallinen Gestein könnte nicht so groß sein, wie man normalerweise erwarten würde. Es könnte eine seismische Grenze am Sockel des verwitterten kristallinen Gesteins vorhanden sein, oder es könnte eine allmähliche Zunahme seismischer Geschwindigkeiten ohne klare Grenz-Reflexion geben. Dies könnte zu Schwierigkeiten bei der Kalkulation der statischen Korrekturen für Anomalien in der Nähe der Oberfläche und bei der Verfolgung des Kristallinsockels führen. Statische Korrekturen sind einer der wichtigsten Faktoren für den Erfolg von Reflexionsseismik im Festgestein /1/, /13/. Ein großer Teil des Arbeitsaufwandes wird in diesen Teil der Untersuchung investiert werden müssen, wenn annehmbare Ergebnisse erworben werden sollen.

Magmaintrusion und regionale Hebungen haben strukturelle Veränderungen und Metamorphosen im präkambrischen Grundgebirge des Erkundungsgebiets verursacht. Das Erkundungsgebiet ist von Horst- und Grabentektonik gekennzeichnet, mit vertikalen Sprunghöhen von bis zu 150 m. Die Mulden sind, wie im Flusstal des Bolshoj Itat, z. T. mit jurassischen Sedimenten gefüllt. Die Verwerfungen des Grundgebirges können in zwei Hauptgruppen unterteilt werden, die „Jennissejsker Gruppe“ mit einem NW-Streichen und die „Angara-Gruppe“ mit einem NE-Streichen. Es ist für seismische Linien vorteilhaft, diese Verwerfungen im rechten Winkel zu kreuzen, und nicht an ihnen entlang oder dicht parallel zu verlaufen. Verwerfungen erzeugen üblicherweise starke Diffraktionen, die es ermöglichen, ihren Standort genau zu bestimmen. Ein NW/SE- und SW/NE-Gitter seismischer Linien würde maximale Verwerfungsauflösung auf einer Profillinie geben, aber die Querprofile würden dann parallel zu oder sogar entlang der Störungen laufen. Hier würden Reflexionen von den Störungen, seitlich vom Messprofil, in die Seismogramme einstreuen. Sie würden dann als Rauschen oder schwer zu lokalisierende Reflektoren die Messungen stören. Diese Linien würden dann wenig oder keine Daten erzeugen und wären eine Verschwendung von Ressourcen. Ein N/S- und W/E-Gitter wäre damit eine sicherere Option. Im Allgemeinen sollten seismische Linien im Einfallen oder entlang des Streichens des Zielhorizonts orientiert sein, um komplizierte horizontale Tiefenpunktmigration zu vermeiden. Diese Faktoren sollten auch berücksichtigt werden.

Generell ist bei der hier vorgegebenen Zielteufe von ca. 800 – 1000 m und den relativ unbekannten seismischen Rahmenbedingungen davon auszugehen, dass eine große Energiemenge eingeplant werden muss. Danach kommen nur Sprengstoffseismik oder Vibroseis in Frage. Vibroseis braucht einen befahrbaren Untergrund - Straßen, Wege, offenes Gelände -, der nicht deutlich von den vorgegebenen Profilen abweicht. Tiefere Schüsse sind aber auch dann nur möglich, wenn das Gelände für Bohrgeräte zugänglich ist. In gebirgigem Gelände wurden einige Erfahrungen mit von Hubschraubern unterstützten Kleinbohrgeräten (Schweiz) oder sogar mit Akku-Handbohrgeräten /8/ gemacht.

Die lokale Topographie beschreibt relativ geringe Höhenunterschiede (280 m - 410 m) mit bewaldeten Wasserscheiden, die in die Landschaft geschnittene Flusstäler trennen. Zugänglichkeit wird der bedeutendere geographische Faktor sein. Ein Oberflächengitter aus seismischen Linien würde die Datenaufnahme mit einer großen Anzahl von seismischen Ringschlüssen - an denen seismische Linien miteinander verbunden werden - und einem Minimum an unbekannten Freiflächen optimieren.

Im Allgemeinen sind bei der Seismik in Kristallin Schwierigkeiten, bedingt unter anderem durch ein schwaches Signal/Rauschen-Verhältnis und einen komplizierten Reflektorenverlauf, zu erwarten. Für ein bestmöglichstes Ergebnis müssen alle Messparameter optimiert werden. Testarbeiten an einem bekannten Zielobjekt, in Verbindung mit Bohrlochmessungen, sind unbedingt zu empfehlen.

5 LITERATUR

1. *Adam, E., Perron, G., Matthews, L., Milkereit, B.* (1998): 3-D seismic data processing for mineral exploration.
2. *Brewitz, W., et al* (2004): Anforderung an die Standorterkundung für HAW-Endlager im Hartgestein (ASTER), Zwischenbericht.
3. *Bühnemann, Holliger* (1997): Comparison of high-frequency sources at the Grimsal test site, central alps
4. *Cordsen, A.* (2004): 3D Seismic Surveys in Complex Sub-surface Areas.
5. *CSEG Recorder.* (November 2002): Base Metal Exploration: Looking deeper and adding value with seismic data.
6. *Fromm, G.* (1984): Ermittlung statischer Grundkorrekturen und Möglichkeiten der statistischen Verbesserung.
7. *Hammer, P., Ramachandran, K., Clowes, R.:* Seismic reflection Imaging of thin, kimberlite dykes and sills: exploration and deposit characterization of the snap lake dyke, Canada.
8. *Juhlin, C., Palm, H., Bergman, B.* (2001): Reflection seismic imaging of the upper crystalline crust for characterization of potential repository sites: Fine tuning the seismic source.
9. *Khaidukov, V., Landa, E, Moser, T.:* Diffraction Imaging by Focusing-Defocusing: an Outlook on Seismic Superresolution
10. *Kreitz, E.* (1981): Schulungsbrief Reflexionsseismik „Quality Control“
11. *Erlinghagen, L.,* (1988): Oberflächennahe und sprengstofflose Wellenquellen in der
12. Landseismik
13. *Meissner, R., Stegna, L.* (1977): Praxis der seismischen Feldmessung und Auswertung
14. *Milkereit, Eaton, Salisbury, Adam & Bohlen:* 3D Seismic Imaging for Mineral Exploration.
15. *Smythe, D.* (1996): 3D Seismic Reflection Trial Survey of the Potential Nuclear Waste Repository Zone, Sellafield
16. *Smythe, D.:* Proof of Evidence. The 3-D Structural Geology of the PRZ (Nirex Archive)

ANLAGE A4

EMPFEHLUNGEN

**FÜR DAS ABTEUFEN EINER BOHRUNG UND DIE DURCH-
FÜHRUNG BOHRLOCHGEOPHYSIKALISCHER UND HYD-
RAULISCHER UNTERSUCHUNGEN ZUR ERKUNDUNG EI-
NES STANDORTES FÜR EIN ENDLAGER RADIOAKTIVER
ABFÄLLE IN MAGMATITEN**

INHALT

1	Bohrung.....	A4-3
1.1	Anforderungen und Voraussetzungen.....	A4-3
1.2	Bohrarbeiten und Spülung	A4-3
1.2.1	Bohrung mit umfangreichen hydraulischen Tests	A4-4
1.2.2	Bohrung ohne hydraulische Tests im unteren Teil	A4-6
1.3	Datenmonitoring	A4-8
2	Bohrlochgeophysikalische Messungen	A4-8
2.1	Aufgabenstellung	A4-8
2.2	Einzusetzende bohrlochgeophysikalische Verfahren.....	A4-8
2.2.1	Bestimmung der Bohrlochgeometrie	A4-8
2.2.2	Erkundung des Gebirgsaufbaues.....	A4-9
2.2.3	Bestimmung petrophysikalischer Parameter.....	A4-9
2.2.2	Untersuchung des Zustandes der Verrohrung und der Spülflüssigkeit.....	A4-10
2.2.3	Zwischenfeldmessung zur Bestimmung der Geschwindigkeitsverteilung seismischer Wellen.....	A4-10
2.3	Randbedingungen.....	A4-10
2.4	Genauigkeit	A4-10
2.5	Ermittlung der natürlichen Gebirgstemperatur	A4-11
3	Hydraulische Tests.....	A4-13
4	Abbildungsverzeichnis.....	A4-15

1 Bohrung

1.1 Anforderungen und Voraussetzungen

Im Rahmen der Erkundung des Teilgebietes Jennissejskij in der Region Krasnojarsk ist zum Zwecke der geowissenschaftlichen Erkundung eine Aufschlussbohrung zu planen, die die folgenden Voraussetzungen erfüllen muss:

- Endteufe bei ca. 800 m,
- Durchgehender Kerngewinn,
- Geophysikalische Bohrlochvermessung bis Endteufe,
- Hydraulische Tests in definierten Teufenbereichen und
- Entnahme von durch den Bohrprozess unbeeinflussten Grundwasserproben aus definierten Teufenbereichen.

Hinsichtlich der geologischen Verhältnisse wird von folgenden Rahmenbedingungen ausgegangen:

- 0 m bis maximal 50 m mächtige Überdeckung mit quartären, in seltenen Fällen jurassischen Lockergesteinen, die einen meist gut durchlässigen Porengrundwasserleiter darstellen.
- Verwitterungsbereich der magmatischen/metamorphen Gesteine und Bereich intensiver exogener Klüftigkeit bis in einen Teufenbereich von maximal 150 m, wobei es sich um einen meist gut durchlässigen Kluftgrundwasserleiter mit geringer Matrixdurchlässigkeit handelt.
- Bis in eine Tiefe von ca. 1000 m reichende Zone schwacher Klüftigkeit, wobei die Grundwasserführung vorwiegend an Zerrüttungs- und Schieferungszonen tektonischer Störungen gebunden ist. Die Matrixdurchlässigkeit ist gering. Es handelt sich um einen schwach geklüfteten Bereich geringer Grundwasserführung und -durchlässigkeit.

1.2 Bohrarbeiten und Spülung

Gerade bei schwierigen Geländebedingungen und größeren Entfernungen zur öffentlichen Wasserversorgung hat sich das Niederbringen von Versorgungsbrunnen zum Ansetzen der Bohrspülung bewährt. Hierzu bietet sich die evtl. vorhandene jüngere Überdeckung bzw. der obere aufgelockerte Bereich des Kristallins an. Das Wasser sollte hinsichtlich seiner Eignung zu Spülzwecken z.B. in Bezug auf Bakterienführung und Sauerstoffgehalt analysiert werden. Die Erhöhung der Viskosität wird durch Beimischung eines Zusatzes (z.B. CMC erklären der Abkürzung) zur Spülung erreicht.

Es hat sich als hilfreich erwiesen, die Bohrspülung beim Ansetzen mit einem Tracer zu versetzen. Dies hat den Vorteil, dass bei der Probenahme von Grundwässern erkannt werden kann, ob eine Vermischung mit Bohrspülung vorliegt und somit vor Entnahme der Grundwasserproben weiter gepumpt werden muss. Als Tracer kann z.B. Uranin verwendet werden, das im Laufe der Zeit selbständig zerfällt.

Da die Bestimmung des Sauerstoffgehalts im Grundwasser für die Auswahl eines HAW-Endlagerstandortes von großer Bedeutung ist, sollte die Spülung sauerstofffrei gehalten werden, um ein Einbringen von Sauerstoff über die Spülung in das Grundwasser zu vermeiden. Die Sauerstofffreiheit kann durch das Einleiten von Stickstoff in die Spülungstanks erreicht werden.

Als nicht standfest werden die Bereiche der evtl. vorhandenen quartären Überdeckung sowie des oberen, durch Verwitterung und Klüftung geprägten Bereiches des Kristallins angesehen, so dass es sich empfiehlt, diese Gebirgsabschnitte zu verrohren.

Der Enddurchmesser der Bohrung (Kapitel 1.2.1) berücksichtigt, dass für das hydraulische Testing und die Grundwasserprobenahme Equipment durch das Gestänge in das Bohrloch eingebracht werden muss.

1.2.1 Bohrung mit umfangreichen hydraulischen Tests

Zunächst wird ein 20“-Hilfsstandrohr gesetzt und anschließend die quartäre Überdeckung bis zum Erreichen des Kristallins mit einem Kerndurchmesser von 102 mm (4“) gekernt, wobei der Außendurchmesser der Krone 146 mm ($5\frac{3}{4}$ “) beträgt. Als Bohrverfahren kommt das Seilkernbohren mit Doppelkernrohr (SK6L) mit Kernmarschlängen von 3 m zum Einsatz. Mit Hilfe dieses Verfahrens kann beim Ziehen der Kerne auf den Ausbau des Gestänges verzichtet werden. Das Verfahren ist vor allem bei großen Teufen und hohen Lohnkosten rentabel.

Im unverrohrten Bohrloch werden nach Erreichen des Kristallins geophysikalische Bohrlochmessungen und hydraulische Tests durchgeführt. Anschließend wird das Bohrloch mit Hilfe eines Rollenmeißels auf 15“ aufgeweitet und ein Standrohr ($11\frac{3}{4}$ “) gesetzt und einzementiert. Zur Gewährleistung eines ausreichenden Auftriebs beim Weiterbohren wird eine $6\frac{5}{8}$ “- oder 7“-Hilfsrohrtour eingebaut.

Der obere, aufgelockerte Bereich des Kristallins (bis ca. 150 m Teufe) wird anschließend im SK6L-Verfahren mit 3 m-Kernmarschlängen gekernt, bohrlochgeophysikalisch vermessen und hydraulisch getestet.

Nach dem Ziehen der Hilfsrohrtour wird der obere Bereich des Kristallins mit $8\frac{1}{2}$ “ oder $7\frac{7}{8}$ “ aufgebohrt und anschließend mit einer 7“- oder $6\frac{5}{8}$ “-Hilfsrohrtour verbohrt. Die Abdichtung erfolgt über eine Fußzementation. Um später den Ausbau zumindest des größten Teils der Rohrtour zu ermöglichen, erfolgt die Verschraubung zwischen dem untersten und dem darüber folgenden Rohr mit Hilfe eines Linksgewindes.

Im standfesten Bereich des Kristallins wird mit einem Kerndurchmesser von 85 mm (Kronendurchmesser 132 mm) mit Doppelkernrohr („PQ-Kernen“ erklären!) bis zur Endteufe gekernt. Der Bohrlochabschnitt wird bohrlochgeophysikalisch vermessen und hydraulisch getestet. Ein Verrohrungsschema nach Erreichen der Endteufe zeigt Abbildung A4-1.

Die Bohrung wird, je nach Vorgaben entweder offengehalten, eventuell mit Einbauten (z.B. Seismometer) bestückt, und mit einem übertägigen Abschlussbauwerk gesichert oder nach Ziehen der 7“- oder $6\frac{5}{8}$ “-Hilfsrohrtour verfüllt.

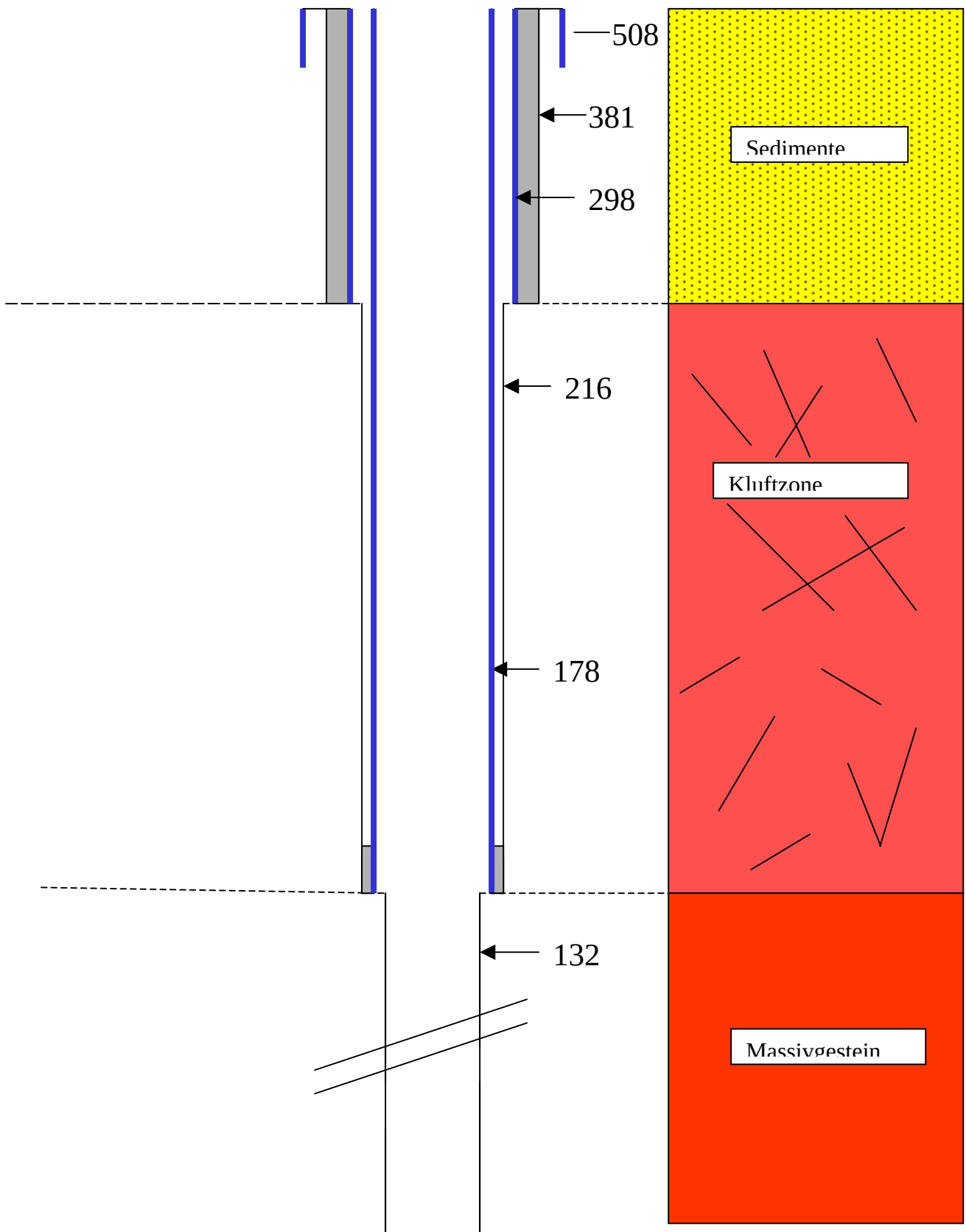


Abb. A4- 1: Angaben zur Verrohrung und zu den Ausbau- bzw. Bohrdurchmessern einer Bohrung, die aufgrund ihrer Dimensionen umfangreiche hydraulische Tests und Grundwasserprobenahmen aus definierten Abschnitten auch in größeren Teufen ermöglicht.

1.2.2 Bohrung ohne hydraulische Tests im unteren Teil

Sind im unteren Abschnitt der Bohrung hinsichtlich der hydraulischen Untersuchungen keine Packertests und keine Entnahmen von Grundwässern vorgesehen, so kann die Bohrung wesentlich schlanker abgeteuft werden.

Nach Setzen eines ausreichend dimensionierten Standrohres wird die Überdeckung bis zum Erreichen des Kristallins mit einem Kerndurchmesser von 102 mm (4“) gekernt, wobei der Außendurchmesser der Krone 146 mm (5³/₄“) beträgt. Als Bohrverfahren kommt das Seilkernbohren mit Doppelkernrohr (SK6L) mit Kernmarschlängen von 3 m zum Einsatz.

Anschließend werden im oberen Bohrlochabschnitt geophysikalische Bohrlochmessungen und ggf. hydraulische Tests durchgeführt. Danach wird das Bohrloch mittels eines 7⁷/₈“-Rollenmeißels (200 mm) aufgeweitet und anschließend mit einer 6⁵/₈“-Rohrtour (168 mm), die einzementiert wird, gesichert.

Im oberen Bereich des Kristallins wird das Kernen mit einer 5³/₄“-Krone bis zum Erreichen des standsicheren Gebirges fortgesetzt und der durchteufte Bereich geophysikalisch vermessen und evtl. hydraulisch getestet.

Das Bohrloch wird mit einer im Bereich des Kristallins einzementierten 4¹/₂“-Verrohrung (114 mm) versehen. In diese wird im Übergangsbereich zwischen Überdeckung und Kristallin ein Linksverbinder eingefügt. Hierdurch wird nach Lösen des Verbinders und Ausbau der Rohrtour ein Durchmesser im oberen Teil des Bohrloches geschaffen, der den Einbau einer leistungsfähigen Pumpe und somit indirekte Zuflussmessungen im folgenden Bohrlochabschnitt ermöglicht.

Der standfeste Bereich des Kristallins wird bis zur Endteufe mit einer 3“-Krone (76 mm), die die Gewinnung von 2“-Kernen ermöglicht, durchteuft.

Ein Verrohrungsschema nach Erreichen der Endteufe zeigt Abbildung A4-2.

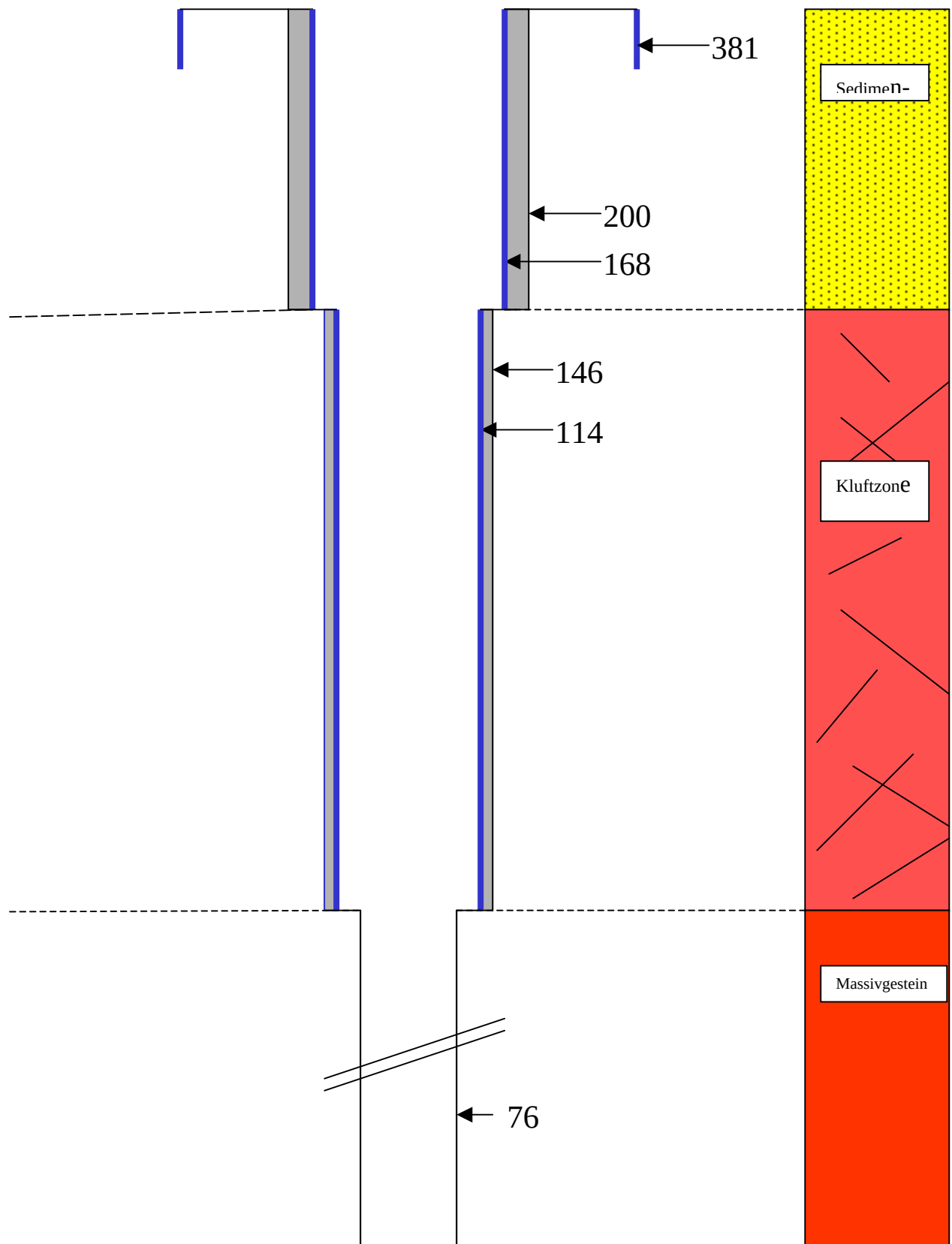


Abb. A4- 2: Schema einer Bohrung ohne hydraulische Tests im tieferen Bohrlochabschnitt

1.3 Datenmonitoring

Es hat sich als sehr hilfreich erwiesen, die Bohrdaten kontinuierlich mittels automatischem Schreiber aufzuzeichnen, da dies dazu beitragen kann, geologische Interpretationen zu erleichtern. Ferner kann häufig bei evtl. Havarien die Ursache hierfür erkannt werden, was bisweilen aus vertraglichen Gesichtspunkten von Interesse ist. Ferner wird die Optimierung der Bohrparameter zur Erreichung des Projektzieles erleichtert.

Dokumentiert werden:

- Andruck
- Drehmoment
- Drehzahl
- Bohrfortschritt
- Spülungsdruck
- Spülungsmenge
- Leitfähigkeit der Spülung
- Sauerstoffgehalt der Spülung
- Tracergehalt der Spülung

Die Daten sollten in Diagrammen mit einheitlichem Teufenmaßstab ausdrückbar sein.

2 Bohrlochgeophysikalische Messungen

2.1 Aufgabenstellung

Mit Hilfe der bohrlochgeophysikalischen Messungen sollen Daten zu folgenden Parametern gewonnen werden:

- Bohrlochgeometrie: Durchmesser, Neigung, Azimut
- Gebirgsaufbau: Schichtenfolge, Schichtmächtigkeiten, Einfallen und Streichen, Klüftigkeit, Wasserführung
- Petrophysikalische Parameter der anstehenden Gesteine: mechanisch-elastische Eigenschaften, Radioaktivität, elektrische und magnetische Eigenschaften,
- Zustand der Verrohrung und Spülflüssigkeit: Zementation, Muffenzustand, Temperatur und Salinität der Spülung, Zuflüsse
- Zwischenfelderkundung zwischen Erdoberfläche und Untergrund: Ausbreitungsgeschwindigkeit seismischer Wellen.

Zur Lösung dieser komplexen Aufgabenstellung müssen verschiedene Messsysteme mit unterschiedlichen Wirkmechanismen und Eindringtiefen eingesetzt werden.

2.2 Einzusetzende bohrlochgeophysikalische Verfahren

2.2.1 Bestimmung der Bohrlochgeometrie

Die Neigung und der Azimut der Bohrung kann schon während des Bohrens mit Hilfe des PWL-Systems (engl.: production well logging) bestimmt werden. Dieses Messsystem befindet sich zusammen mit dem Bohrwerkzeug in der Bohrung und erfordert zwecks Messung keine Stillstandszeiten des Bohrvorganges. Liegt dieses Messsystem nicht vor, so können die benötigten Daten auch mit der separaten Bohrlochabweichungsmesssonde (DEV) gewonnen werden.

Der Durchmesser der Bohrung wird mit einer Kalibersonde (CAL) ermittelt. Die Messergebnisse dienen als Korrekturgröße für andere Messverfahren, zum Erkennen von Bohrlochausbrüchen infolge des Erbohrens gestörter Profilbereiche oder von Auswaschungen und zum Erkennen von Hohlräumen.

2.2.2 Erkundung des Gebirgsaufbaues

Zur Abgrenzung unterschiedlicher Gesteine werden bevorzugt Sonden zur Messung des elektrischen und /oder des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstandes eingesetzt. In erster Linie kommen dazu die Einpunktanordnung (single point resistance-log) und die Mehrpunktanordnungen (Große und kleine Normale (GN und KN) sowie eine fokussierende Anordnung (Laterolog (FEL)) oder eine Induktionssonde (INL) in Frage.

Das Einfallen und Streichen von bestimmten Gesteinsbereichen oder -zonen kann mit Hilfe einer Dipmetersonde (DIP) bestimmt werden. Diese Sonde beinhaltet neben 3 bis 4 elektrischen Mikrologelektrodenanordnungen Sensoren zur Bestimmung geometrischer Größen (Pendel und Kompass).

Lokale Inhomogenitäten wie Kluftzonen oder Auswaschungen können mit der Kalibersonde (CAL), dem Akustiklog (SL, SONIC, AL) oder dem Akustischen Bohrlochfernsehen (BHTV, ABF) nachgewiesen werden. Während das SONIC die Laufzeit gebrochener Ultraschallwellen in der Bohrlochwand misst, tastet das ABF die Bohrlochwand von der Mittelachse der Bohrung aus ebenfalls mit Ultraschallwellen ab.

Linsenförmige Einlagerungen mit kleineren Dimensionen sind mit Mikrolaterologsonden (MLL) erkennbar.

2.2.3 Bestimmung petrophysikalischer Parameter

Die wichtigsten petrophysikalischen Parameter der Gesteinsmatrix sind die Dichte, die natürliche Radioaktivität, der spezifische elektrische Widerstand, die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schallwellen, die Temperatur und die magnetische Suszeptibilität. Beeinflusst werden diese Gesteinseigenschaften u. a. durch die vorhandene Porosität bzw. Klüftigkeit und das Füllungsmedium darin. Um diese Kennziffern zu bestimmen, werden verschiedene Messsonden benötigt.

Die Dichte wird im Allgemeinen über eine Gamma-Gamma-Messung (D, GG) bestimmt. Dieses Verfahren beruht auf der Messung der Impulsrate der Gammastreustrahlung nach dem Beschuss des Gebirges mit einer künstlichen Gammaquelle.

Die natürliche Radioaktivität setzt sich zusammen aus der α -, β - und γ -Strahlung. Die ersten beiden Strahlungsarten haben eine so geringe Reichweite, dass sie mit den in einer Bohrung zur Verfügung stehenden Messmitteln nicht nachgewiesen werden können. Aus diesem Grund wird in den Bohrungen nur die γ -Strahlung mit einem Gammalog (GR) registriert.

Zur Messung der magnetischen Suszeptibilität steht eine induktiv arbeitende Sonde (SUSZ) zur Verfügung. Dieser Wert wird neben der elektrischen Dielektrizitätskonstanten u.a. bei der Auswertung von Radarmessdaten benötigt.

Die Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schallwellen ist für die Berechnung elastomechanischer Kennziffern wie des dynamischen Elastizitätsmoduls notwendig. Als Messmittel wird ebenfalls die Akustiklogsonde (AL (SONIC)) verwendet.

Die wahren spezifischen elektrischen Widerstände des Gebirges hinter dem Filterkuchen werden mit den bereits oben erwähnten Laterologsonden (FEL) bestimmt. Um das unverfälschte Gebirge zu erreichen, ist in diesem Fall ein entsprechend großes Elektroden-spacing zu wählen. In trockenen Bohrungen kann dieses Messziel auch durch den Einsatz von induktiven Sonden (IND, IEL) erreicht werden. Als Ergebnis einer Messung mit der letzteren Sonde

wird die elektrische Leitfähigkeit angezeigt. Die Dielektrizitätskonstante, die für die Auswertung von Radardaten benötigt wird, kann mit Hilfe der dielektrischen Wellenmessung (DIEL) bestimmt werden.

Eine Messung der Temperatur des Gebirges erfolgt über die Spülungstemperatur mit der Temperaturlogsonde (TEMP). Daraus kann auch die geothermische Tiefenstufe des Gebirges abgeleitet werden.

Die Porosität des Gebirges kann mit Neutron- Neutron- (NN) oder mit einer Neutron- Gamma- Messung (POR, NG) bestimmt werden. Aussagen über die Wasserführung erhält man mit den elektrischen Normal- (ESN) oder Gradientenmessungen (ESOK bzw. ESUK) oder unter Zuhilfenahme von Neutron-Neutron- bzw. Neutron-Gamma-Messungen.

2.2.2 Untersuchung des Zustandes der Verrohrung und der Spülflüssigkeit

Eine der wichtigsten Untersuchungen in einer reinen Erkundungsbohrung ist die Feststellung von Leckagen in der Verrohrung bzw. von Zutrittsstellen von Mineralwässern. In der Praxis werden dazu die Zuflussmesssonde (FLOW) und das Salinitätslog (SAL) benutzt. Die Messung der Temperatur der Spülung ist bereits oben erwähnt worden. Sie kann ebenfalls Hinweise auf Zuflussstellen von Mineralwässern aus dem Gebirge geben.

2.2.3 Zwischenfeldmessung zur Bestimmung der Geschwindigkeitsverteilung seismischer Wellen

Zur Auswertung der übertägig durchzuführenden seismischen Profilmessungen wird die genaue Kenntnis der Wellengeschwindigkeit im Untergrund benötigt. Durch eine genaue Laufzeitmessung zwischen einem Schusspunkt an der Erdoberfläche und einem Empfangspunkt in der Bohrung ist aufgrund der Kenntnis des Laufweges die Berechnung der Wellengeschwindigkeit möglich. Dieses Verfahren ist unter der Bezeichnung vertikales seismisches Profilieren (VSP) bekannt.

2.3 Randbedingungen

Der Einsatz dieser geophysikalischen und geodätischen Bohrlochmessverfahren hängt von folgenden Bedingungen ab:

- Durchmesser der Bohrung (Einsatzoptimum 60 bis 300 mm, Spezialsonden für 2“ Bohrungen)
- Spülungsart in der Bohrung
- Verrohrungsart (die meisten elektrischen Verfahren sind nur in unverrohrten Bohrungen anwendbar)
- Tiefe (Mindesttiefe 15 – 20 m).

Die meisten Verfahren sind in unverrohrten Bohrungen und in Bohrungen, die mit einer normalen Schwerespülung gefüllt sind, durchführbar. Speziell für trockene Bohrungen sind die induktiven Verfahren entwickelt worden. Weitere Einflussfaktoren auf die Auswahl der Verfahren bzw. Messsonden sind das Verhältnis des wahren spezifischen elektrischen Widerstandes des Gebirges zum spezifischen elektrischen Widerstand der Spülflüssigkeit, die Dicke des Filterkuchens und die Mächtigkeit der Infiltrationsschicht.

2.4 Genauigkeit

Die Standardverfahren verfügen, mit Ausnahme des Televierers (2 bis 3 cm) über ein Auflösungsvermögens von 0,3 bis 0,5 m (Untergrenze unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit). Ansprechende Ergebnisse werden schon bei einer Fahrgeschwindigkeit von 3 bis 10 m/min erhalten. Die Messungen sollten, mit Ausnahme der Temperaturmessungen, grundsätzlich unmittelbar nach Abschluss der Bohrarbeiten durchgeführt werden.

2.5 Ermittlung der natürlichen Gebirgstemperatur

Die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle innerhalb der geologischen Barriere „Granit“ basiert anerkannter Maßen auf dem Einsatz einer zusätzlichen geotechnischen Barriere aus quellfähigem Ton (Bentonit) zur langfristigen Rückhaltung von Radionukliden. Um das Isolationspotenzial des Bentonits nicht zu beeinträchtigen, sollte der Bentonit, nach bisherigem Kenntnisstand, einer thermischen Belastung von maximal 100 °C ausgesetzt werden. Unter diesen Bedingungen wird eine Schrumpfung des Materials, die Bildung von Rissen sowie die Ausbildung einer Gasphase durch Verdampfung weitgehend verhindert. Je nach Tiefenlage und regionalen Temperaturverhältnissen ergeben sich unterschiedliche zulässige Temperaturerhöhungen (siehe Abb. A4-3), die im Rahmen der Endlagerauslegung berücksichtigt werden müssen.

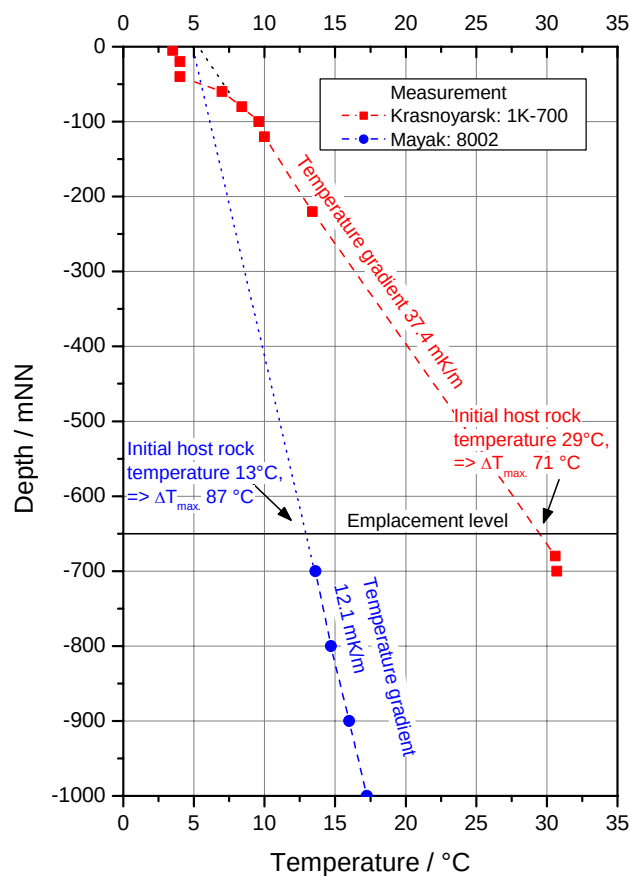


Abb. A4- 3: Beispiel für zulässige Temperaturerhöhungen als Funktion von Tiefenlage und Temperaturgradient

In Abbildung A4-3 ist beispielhaft an den Temperaturmessungen in den Bohrungen 1K-700 und 8002 gezeigt, dass je nach regionalem Temperaturgradient und Tiefenlage eines Endlagers deutlich unterschiedliche Temperaturerhöhungen zugelassen werden können, die sich signifikant auf Auslegungsgrößen wie Kühlzeit der Behälter oder ihre Abstände zueinander auswirken können.

Zur Ermittlung der natürlichen Gebirgstemperatur sollte in mindestens einer, besser jedoch in mehreren Erkundungsbohrungen, die mindestens bis zur geplanten Einlagerungstiefe reichen,

kontinuierliche Temperaturmessungen durchgeführt werden. Dies kann im wesentlichen auf zwei Arten erfolgen (Abb. A4-4):

- Log-Messung
- Permanentmessung

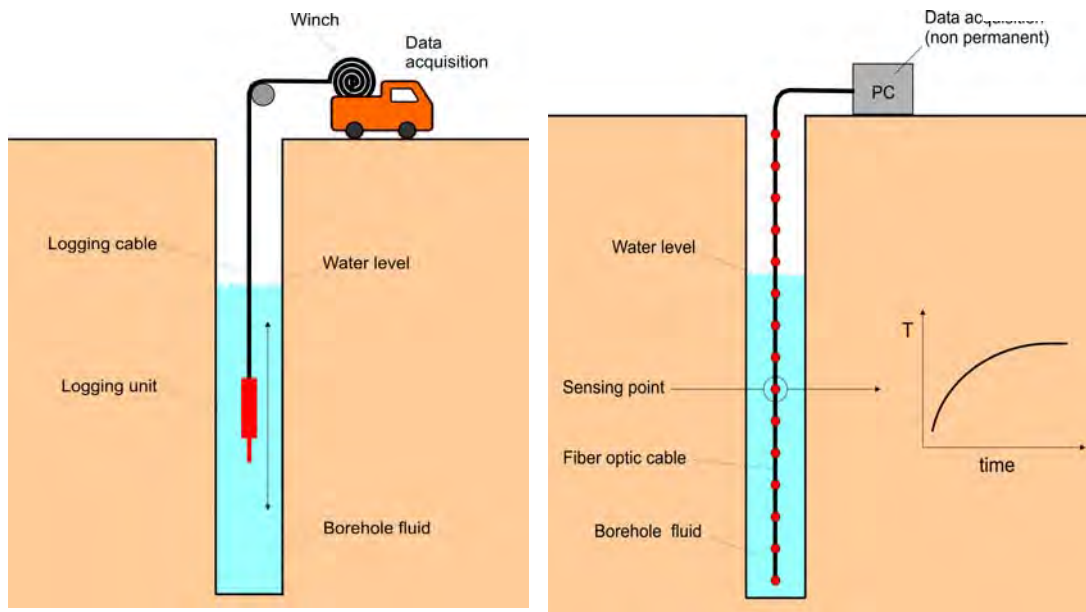


Abb. A4- 4: Schema von Temperaturmessungen in einer Bohrung

a) Log-Messung b) Permanentmessung

Bei einer Permanentmessung wird beispielsweise ein faseroptisches Temperaturmesskabel in die Bohrung gehängt, das über lange Zeit darin verbleibt. Längs dieses Kabels wird dann in definierten Abständen von z. B. 2 Metern die Temperatur kontinuierlich gemessen (Abb. A4-4b). Der Vorteil der Permanentmessung besteht darin, dass der Aufwand erheblich geringer ist und dass man quasi unendlich viele Temperaturlogs bekommt, wobei an jedem Messpunkt der Wiederangleich der Temperatur kontinuierlich aufgezeichnet wird. Darüber hinaus findet keine Verwirbelung der Bohrlochflüssigkeit durch Befahrung mit einer Sonde statt. Die kontinuierliche Aufzeichnung des Wiederangleichs erlaubt, bei Kenntnis der thermischen Parameter der Spülung, auch eine Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit des Gesteins im Tiefenbereich der einzelnen Messpunkte, so dass man ein Wärmeleitfähigkeits-Tiefen-Profil daraus ableiten kann. Eine Probe der Spülflüssigkeit sollte im Labor hinsichtlich Wärmeleitfähigkeit, spezifischer Wärmekapazität und Dichte untersucht werden.

Der Vorteil einer Log-Messung (Abb. A4-4a) liegt in der Tatsache, dass man bei geeigneter Fahrgeschwindigkeit eine bessere Ortsauflösung erzielt. Beispielsweise lassen sich so alle 10 cm Messwerte mit hoher Temporauf Auflösung erhalten. Bei der Anwendung von Temperaturlog-Messungen sollte mit einer hochauflösenden Temperatursonde gefahren werden, die in der Lage ist, im gesamten zu erwartenden Messbereich eine geeignete Auflösung zu erreichen. Bei einer neuen Bohrung müssen Temperaturlogs zu verschiedenen Standzeiten der Bohrung gefahren werden. Durch den Spülvorgang während des Bohrens ist das Temperaturfeld signifikant gestört. Durch Messungen zu verschiedenen Standzeiten kann der Wiederangleich der Temperatur beobachtet und durch geeignete Verfahren auf die natürliche Gebirgstemperatur extrapoliert werden (Abb. A4-5). Eine Extrapolation ist allein schon aus zeitlichen Gründen sinnvoll, da der Wiederangleich, insbesondere bei tiefen Bohrungen, durchaus mehrere Jahre dauern kann.

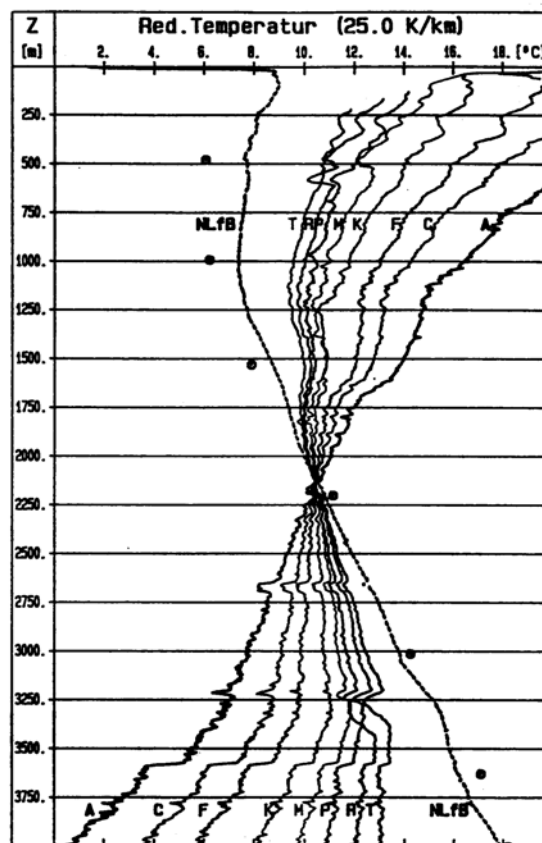


Abb. A4- 5: Temperatur-Logs zu verschiedenen Standzeiten einer Bohrung nach Beendigung des Bohrvorgangs in reduzierter Darstellung

3 Hydraulische Tests

Mit den hydraulischen Tests sollen Informationen über die Eigenschaften des Gebirges (Druck, Temperatur, Permeabilität, Zufluss- und ggf. Injektionsverhalten) sowie Grundwasserproben aus definierten Teufen gewonnen werden. Diese Informationen sind bereits während des Abteufens der Bohrung, d. h., im offenen Bohrloch, zu erlangen. Bei den vorgegebenen Teufen der zu untersuchenden Bohrungsabschnitte, praktisch vom Deckgebirge bis zur geplanten Endteufe, und der möglichen Vielzahl der zu untersuchenden Bereiche sollte das hydrogeologische Testen mittels pneumatisch/hydraulisch setzbaren Packern zum Einsatz kommen. Das herkömmliche Gestängetestverfahren ist hier auf Grund der teilweise geringen Teufe der zu untersuchenden Bereiche und der damit verbundenen zu geringen axialen Belastung der Testgarnitur zum Setzen des Packens nicht geeignet.

Die Durchmesser der Testgarnitur liegen zwischen 4 ¼ “ bis 4 ½“, so dass das Bohrloch einen Minstdurchmesser von 5 ½“ haben sollte. Die Testgarnitur selbst kann mittels Bohrgestänge oder Teststrang (Tubing), je nach Auftragnehmer, eingebaut werden. Für das Setzen der pneumatischen/hydraulischen Packer werden dann beim Einbau der Testgarnitur die entsprechenden Leitungen am Strang befestigt und mit eingebaut. Die Packer sollten immer als Straddle-Anordnung eingebaut werden, wobei der Abstand der Packer in der Regel von der Mächtigkeit des zu untersuchenden Bohrungsabschnittes abhängig ist. Die Beschaffenheit des Bohrloches (Kaliberhaltigkeit, Auskesselungen) sind ebenfalls Kriterien für die Festlegung

der Packeranordnung, aber von untergeordneter Bedeutung, da mit den zum Einsatz kommenden Packern dieses weitestgehend ausgeglichen werden kann. Grundlage für diese Festlegungen sind immer die Bohrlochmessungen vor dem Einbau der Testgarnitur.

Ein weiteres Kriterium für die Packeranordnung ist die Anzahl der zu untersuchenden Bereiche in einem Bohrlochabschnitt. Werden in einem Bohrlochabschnitt mehrere Bereiche lokalisiert, können diese bei Auswahl einer geeigneten Packeranordnung ggf. alle bzw. mehrere in einem Testgang hintereinander untersucht werden, d. h. ohne Aus- und Einbau für jeden Bereich. Dabei sollte in der Regel immer mit dem tiefsten zu untersuchenden Bereich des Bohrlochabschnittes begonnen werden. Der Packerabstand bzw. das Straddle-Intervall kann zwischen ca. 4 m bis ca. 60 m betragen.

Die Testdurchführung ist entsprechend den zu erwartenden Zutritten aus dem zu untersuchenden Teufenbereich auszuwählen. Bei zu erwartenden geringen Zutritten sollte die Testgarnitur mit geschlossenem Ventil und ggf. mit einer dann einzubringenden Wasservorlage, die auf die zuzulassenden Differenzdrücke abzustimmen ist, eingebaut werden. Bei zu erwartenden größeren Zutritten sollten über Förderung des Mediums mindestens drei konstante Regime gefahren werden. Dieses kann erreicht werden über den Einsatz einer Tiefenpumpe im Teststrang bzw. durch Liften. Weiterhin ist es möglich, in den Teststrang (Tubingstrang) bereits den Stator einer Pumpe zu integrieren und durch den Einbau eines weiteren Tubingstranges, welcher dann als Rotor fungiert, die Pumpe zu komplettieren. Durch das Drehen des zusätzlich eingebauten Tubingstranges wird dann das Medium gefördert. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass der Steigraum des Tubingstranges jederzeit mittels Wireline-Technik zur Probenahme befahren werden kann.

Die Entnahme von Zuflussproben kann am Bohrlochkopf bei Austritt der Wässer, durch Probenahme mittels Wireline bzw. durch eine in die Testgarnitur eingebaute Tiefenprobenkammer erfolgen, wobei beim Einsatz der Tiefenprobenkammer nur eine Probe eines zu untersuchenden Bereiches gewonnen werden kann. Sollen, wie o. g. mehrere Bereiche bei einem Testeinsatz untersucht werden, ist dieses über die Tiefenprobenkammer nicht möglich. Die Tiefenprobenkammer sollte auch nur bei Bereichen mit sehr geringen Zutritten eingesetzt werden.

Die Drücke werden mittels Tiefenmanometer bzw. Messwertgeber aufgenommen und dokumentiert bzw. übertragen. Der Einsatz von Tiefenmanometern hat den Nachteil, dass eine Auswertung erst nach Ausbau der Testgarnitur erfolgen kann. Diese sollten also immer nur, wenn notwendig, als Referenzmanometer eingesetzt werden. Bevorzugt werden sollten die Messwertgeber mit einer Übertragung nach übertage, so dass eine sofortige Darstellung und Auswertung erfolgen kann. Somit sind auch mögliche Umläufigkeiten des Packers sofort feststellbar. Außerdem können die Förder- bzw. Pumpregime entsprechend den Gegebenheiten angepasst werden.

Wir schlagen vor, eine Testgarnitur mit pneumatisch/hydraulischen Packern in Straddle-Anordnung einzusetzen. Weiterhin sollte eine Übertragung der Messwerte (Druck, Temperatur) nach übertage erfolgen. Ebenfalls ist eine in den Tubingstrang zu integrierende Pumpe zu berücksichtigen. Recherchen ergaben, dass dieses System von Baker Oil Tools auch bei Bohrungen der NAGRA in magmatischen Gesteinen eingesetzt wurde.

4 **Abbildungsverzeichnis**

Abb. A4- 1:	Angaben zur Verrohrung und zu den Ausbau- bzw. Bohrdurchmessern einer Bohrung, die aufgrund ihrer Dimensionen umfangreiche hydraulische Tests und Grundwasserprobenahmen aus definierten Abschnitten auch in größeren Teufen ermöglicht.	5
Abb. A4- 2:	Schema einer Bohrung ohne hydraulische Tests im tieferen Bohrlochabschnitt	7
Abb. A4- 3:	Beispiel für zulässige Temperaturerhöhungen als Funktion von Tiefenlage und Temperaturgradient	11
Abb. A4- 4:	Schema von Temperaturmessungen in einer Bohrung	12
Abb. A4- 5:	Temperatur-Logs zu verschiedenen Standzeiten einer Bohrung nach Beendigung des Bohrvorgangs in reduzierter Darstellung.....	13

Teil B
Endlagerung in Porphyrit

INHALT:

1	EINLEITUNG	B-3
2	INVENTAR	B-6
2.1	Abfallmengengerüst	B-6
2.3	Abfallbehälter.....	B-7
2.4	Abfallmatrix	B-7
2.5	Aktivität und Radionuklidgehalt.....	B-7
2.6	Wärmeleistung	B-9
2.7	Inventarübersicht.....	B-10
3	STANDORTBESCHREIBUNG	B-11
3.1	Regionalgeologische Lage des Gebietes.....	B-11
3.2	Lithologische Zusammensetzung der Endlager-Wirtsgesteine.....	B-15
3.3	Auftreten von Bruchstörungen und Klüften im Untersuchungsgebiet.....	B-16
3.4	Neotektonische Bewegungen und seismische Aktivitäten im Gebiet Majak	B-20
3.5	Hydrogeologie des Untersuchungsgebietes	B-22
3.6	Physiko-mechanische und wärmephysikalische Eigenschaften der Endlager- Wirtsgesteine.....	B-24
4	ENDLAGERKONZEPT	B-27
4.1	Stark wärmeentwickelnde Abfälle	B-27
4.2	Schwach wärmeentwickelnde Abfälle	B-27
4.3	Thermische Auslegungsberechnungen.....	B-27
4.3.1	Konzeptuelles Modell	B-27
4.3.1.1	Umgebungsbedingungen.....	B-28
4.3.1.2	Behälter und dessen Wärmefreisetzung	B-28
4.3.1.3	Thermische Materialparameter	B-29
4.3.1.4	Modellgeometrie	B-31
4.3.2	Berechnungsergebnisse	B-31
5	STRÖMUNGS- UND TRANSPORTMODELLIERUNGEN FÜR DEN STANDORT MAJAK	B-33
5.1	Das Untersuchungsgebiet.....	B-33
5.2	Das hydrogeologische Strukturmodell.....	B-34
5.3	Stationäre Strömungsmodellierung ohne Berücksichtigung des natürlichen Wärmefeldes	B-36
5.4	Transportmodellierung ohne Berücksichtigung des natürlichen Wärmefeldes	B-37
4.5	Transportmodellierung unter Berücksichtigung des natürlichen Wärmefeldes	B-38
5.5	Diskussion und Ausblick	B-41
6	LITERATUR.....	B-42
7	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	B-45
8	TABELLENVERZEICHNIS	B-47

1 EINLEITUNG

Entsprechend der in der Einleitung zum Abschlußbericht erwähnten Abstimmung der Projektpartner wurde als Referenzfall für die Erarbeitung eines detaillierten Programms der weiteren Standortuntersuchungen für ein geologisches Endlager in einer Porphyritformation auf der Grundlage des in Teil A Kap. 1.2 beschriebenen methodischen Ansatzes der Standort der Produktionsvereinigung Majak ausgewählt. Für die Endlagerung in dieser Formation sind die hochradioaktiven Abfälle der Produktionsvereinigung Majak vorgesehen.

Die Produktionsvereinigung Majak befindet sich im Gebiet Tscheljabinsk in der Nähe der Stadt Osersk im Südrural (Abb. 1-1).

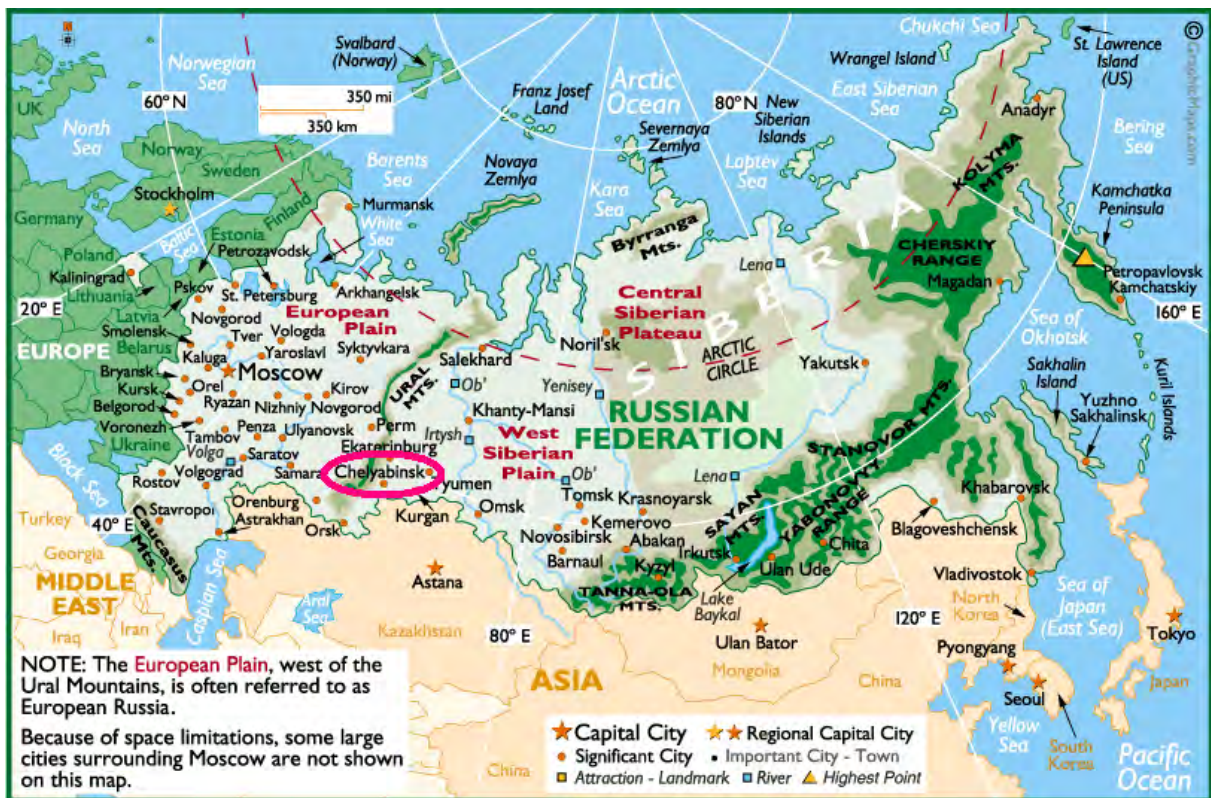


Abb. 1-1: Standort der Produktionsvereinigung Majak

Die Errichtung von Majak als Produktionsstätte für Waffenplutonium begann im November 1945. Der erste Reaktor wurde 1948 in Betrieb genommen. Insgesamt wurde an diesem Standort sechs Reaktoren für die Plutoniumproduktion errichtet, von denen fünf Graphit-moderierte und der sechste ursprünglich ein Leichtwasser-moderierter Reaktor war. Darüber hinaus gibt es am Standort einen Leichtwasserreaktor für die zivile Isotopenproduktion.



Abb. 1-2: Majak - Radiochemische Produktionsanlagen für die Plutoniumgewinnung

Die Reaktoren für die Plutoniumproduktion sind stillgelegt. Die erste radiochemische Produktionsanlage wurde 1948 in Betrieb genommen und bis 1961 betrieben. Die zweite radiochemische Anlage RT-1 wurde 1956 als Anlage für die Produktion von Waffenplutonium in Betrieb genommen.



Abb. 1-3: Majak RT-1 Zwischenlager für ausgediente Brennelemente

1976 wurde RT-1 zu einer Anlage für die Wiederaufbereitung von ausgedientem Kernbrennstoff verschiedener Reaktortypen (Schnelle Brüter BN-30, BN-600, Reaktoren der Atom-U-Boote und Atomeisbrecher, Leistungsreaktoren WWER-440) umgebaut. Diese Anlage ist auch gegenwärtig in Betrieb.

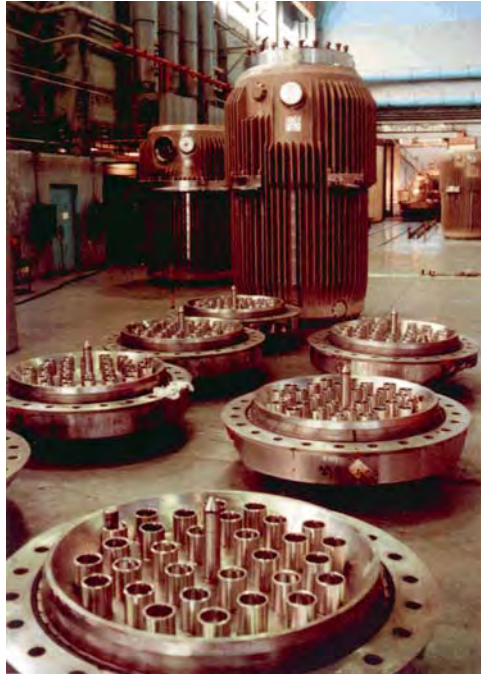


Abb. 1-4: Majak RT-1 Transportcontainer für ausgediente Brennelemente

Eine erste Anlage für die Verglasung hochradioaktiver Abfälle aus der radiochemischen Produktion wurde 1987 in Betrieb genommen, die dreizehn Monate betrieben wurde. 1991 wurde eine neue Verglasungsanlage in Betrieb genommen.



Abb. 1-5: Majak - Zwischenlager für verglaste HLW

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass am Standort gegenwärtig zwei Anlagen für die MOX-Kernbrennstoffproduktion in Betrieb sind.

2 INVENTAR

2.1 Abfallmengengerüst

Die radioaktiven Abfälle der Produktionsvereinigung Majak, die für die Endlagerung in einer tiefen Porphyritformation am Standort Majak vorgesehen sind, resultieren aus den o. g. Produktionsprozessen:

- Hochradioaktive Abfälle aus der Waffenplutoniumproduktion
- Hochradioaktive flüssige Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von ausgedientem Kernbrennstoff in der Anlage RT-1.

Nach [RADLEG, 1997] sind in Majak ca. 53 000 m³ verglaste hochaktive Abfälle aus der früheren Plutoniumproduktion mit einer Gesamtaktivität von ca. $1,06 \times 10^{19}$ Bq aus Plutoniumproduktion in einem Zwischenlager und ca. 30.700 m³ flüssige hochaktive Abfälle aus der Wiederaufbereitung von ausgedientem Kernbrennstoff in der Anlage RT-1 mit einer Gesamtaktivität von ca. $1,42 \times 10^{19}$ Bq in Tanks gelagert.

Die bereits verglasten hochradioaktiven Abfälle sind in einer Matrix aus Bor-Phosphatglas eingeschlossen und sind in Austenitstahlbehälter konditioniert. Es ist vorgesehen, die gegenwärtig zwischengelagerten flüssigen hochaktiven Abfälle gleichfalls in eine Matrix aus Bor-Phosphatglas einzuschließen. Daneben werden andere Matrixmaterialien auf ihre Eignung für den Einschluss der hochradioaktiven flüssigen Abfälle untersucht (Basalt, Porphyrite mit Zusätzen von Gabbro-Diabasen und Chromiten) [Minaev et al., 2001].

Nach den Angaben des VNIPI PT sollen die verglasten Abfälle gleichfalls in Austenitstahlbehälter konditioniert werden.

Da die Technologie der Verarbeitung der flüssigen radioaktiven Abfälle (Fraktionierung) sowie das Konditionierungsverfahren noch nicht feststehen, sind Angaben zum Volumen und zur Menge der endzulagernden Abfälle mit großen Unsicherheiten behaftet. Deshalb wurden als Grundlage für die Untersuchungen die im weiteren aufgeführten Angaben angenommen. Die Unsicherheiten dieser Angaben beeinflussen jedoch nicht wesentlich die grundsätzlichen Ergebnisse der Untersuchungen

Das Gesamtvolumen der verglasten hochradioaktiven Abfälle aus der radiochemischen Produktion wird mit 6400 m³ mit einem Gesamtgewicht von 19200 t und die Gesamtanzahl der endzulagernden Gebinde mit 32200 Stück angegeben. Die Aktivität dieser Abfälle wird im wesentlichen von dem Gehalt an ⁹⁰Sr und ¹³⁷Cs bestimmt. Die Wärmeentwicklung der verfestigten Abfälle soll nach 30 Jahren Zwischenlagerung ca. 0,2 W/l betragen.

Die Technologie zur Wiederaufarbeitung in der Anlage RT-1 sieht die Herauslösung von zwei Fraktionen aus den flüssigen Abfällen der Wiederaufarbeitung vor, die sich in der Restwärmeentwicklung und der potenziellen radiologischen Gefahr unterscheiden. Es ist vorgesehen, diese Fraktionen gleichfalls in eine Bor-Phosphat-Glas Matrix in Austenitstahlbehälter zu konditionieren.

Die Mengen der endzulagernden verfestigten Abfälle werden von VNIPI PT wie folgt angegeben (Tab. 2-1):

Fraktion	Gesamtvolumen m ³	Gesamtmasse t	Gebinde gesamt	Gebinde pro Jahr
Cs-Sr	2600	7800	97500	3900
Seltene Erden und Spaltprodukte	3900	11700	19500	780

Tabelle 2-1: Majak – Anfall endzulagernder Abfälle aus der Anlage RT-1

2.3 Abfallbehälter

Entsprechend den von VNIPI PT erhaltenen Informationen sollen sich die verglasten hochaktiven Abfälle aus der radiochemischen Produktion in Behältern aus Kohlenstoffstahl befinden, die für die Endlagerung in Austenitstahlbehälter verpackt werden sollen. Der äußere Austenitstahlbehälter hat einen Durchmesser von 600 mm und eine Höhe von 1000 mm.

Die verglaste Fraktion Cs-Sr soll in einem Austenitstahlbehälter mit einem Außendurchmesser von 450 mm und einer Höhe von 1000 mm endgelagert werden.

Die Fraktion Seltene Erden-Spaltprodukte soll in Austenitstahlbehältern mit einem Außendurchmesser von 600 mm und einer Höhe von 1000 mm endgelagert werden.

Angaben oder Skizzen zur Konstruktion der jeweiligen Behälter lagen nicht vor.

Die Korrosionsrate der Austenitstahlbehälter wird wie folgt angegeben:

- Bei 150 °C und in Wasserdampfatosphäre – 2×10^{-3} mm/a
- Bei 75 °C im Kontakt mit Bentonit – 1×10^{-3} mm/a

2.4 Abfallmatrix

Für die Konditionierung der fraktionierten hochradioaktiven Abfälle werden mehrere Varianten untersucht. Die Hauptvariante ist die Verglasung nach dem in Majak verfügbaren Verfahren mittels Bor-Phosphat-Glas. Die Dichte des Phosphatglases beträgt 2,36 g/cm³ und die Wärmeleitfähigkeit 2 – 2,5 W/m²K. Die Auslaugungsgeschwindigkeit der Phosphatgläser wird zwischen 1×10^{-7} bis 3×10^{-6} g/cm²·d angegeben. Die zulässige Höchsttemperatur der Matrix wird mit 400 °C angegeben.

Nach [Minaev et al., 2001] werden Matrizen auf der Basis von basaltartigen und Chromit-Niobat Materialien untersucht. Die durchgeführten Untersuchungen derartiger Matrizen haben gezeigt, dass hochaktive Abfälle mit bis zu 20 Gew.% Plutonium eingeschlossen werden können. Die Auslaugungsrate dieser Matrizen soll im Bereich von 10^{-7} bis 10^{-8} g/cm²·d liegen.

2.5 Aktivität und Radionuklidgehalt

Die verfügbaren Daten zum Radionuklidgehalt der einzelnen Abfallströme und zur Aktivität sind im weiteren gegeben.

Die Radionuklidzusammensetzung und die mittlere Aktivität der Gebinde mit den bereits verglasten HLW aus der früheren radiochemischen Produktion sind in der Tabelle 2-2 gegeben.

Mittlere Aktivität, Ci/l	>30
Radionuklidgehalt, %	
$^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$	37,5
^{137}Cs	37,5
^{134}Cs	11
^{147}Pm	11
$^{144}\text{Ce} + ^{144}\text{Pr}$	1,5
$^{106}\text{Ru} + ^{106}\text{Rh}$	1,5

Tabelle 2-2: Majak – Aktivität und Radionuklidgehalt der verglasten HLW

Für die Gebinde mit den Fraktionen Cs-Sr sowie Seltene Erden/Spaltprodukte liegen die in der Tabelle 2-3 aufgeführten Daten zur mittleren Aktivität und der Radionuklidzusammensetzung vor.

Mittlere Aktivität, Ci/l	> 1000	
Radionuklidgehalt, %		
	Fraktion Cs-Sr	Fraktion Seltene Erden + Spaltprodukte
⁹⁰ Sr	35	2x10 ⁻²
¹³⁷ Cs	57	3,5x10 ⁻²
¹⁰⁶ Ru	6	-
¹²⁵ Sb	0,6	-
¹³⁴ Cs	1,6	-
¹⁴⁴ Ce	7x10 ⁻³	76
¹⁵⁴ Eu	-	20
²⁴¹ Am	2x10 ⁻⁴	1
²⁴⁴ Cm	6x10 ⁻⁴	3
²³⁷ Np	-	2x10 ⁻³
ΣU, g/t	≤0,6	≤62
ΣPu, g/t	≤0,3	≤31

Tabelle 2-3: Majak – Aktivität und Radionuklidgehalt der Gebinde mit fraktionierten HLW

Für den Gehalt von langlebigen Radionukliden in den Gebinden mit den Fraktionen Cs-Sr sowie Seltene Erden/Spaltprodukte und deren Aktivität liegen keine Angaben vor.

Eine Vorstellung über die Konzentration und Aktivität dieser Radionuklide in den Abfallgebinden liefern die verfügbaren Daten zum bestrahlten Kernbrennstoff der Reaktoren WWER-440, die in der Tabelle 2-4 zusammengestellt sind.

Radionuklid	Konzentration G/tU	Spezifische Aktivität Bq/tU
²³⁵ U	1,27 E4	1,06 E9
²³⁶ U	4,28 E3	1,04 E10
²³⁸ U	9,42 E5	1,18 E10
²³⁸ Pu*	7,41E1	4,75 E13
²³⁹ Pu	5,49 E3	1,25 E13
²⁴⁰ Pu	1,98 E3	1,70 E12
²⁴¹ Pu	7,97 E2	2,91 E15
²⁴¹ Am*	5,17 E2	6,62 E13
²⁴² Pu	3,70 E2	5,44 E10
^{242m} Am*	2,51 E-1	9,14 E10
²⁴² Am*	3,00 E-6	9,07 E10
²⁴² Cm*	6,12 E-4	7,59 E10
²⁴³ Am	6,93 E1	5,18 E11
²⁴³ Cm*	1,25 E-1	2,41 E11
²⁴⁴ Pu	1,24 E-2	8,21 E3
²⁴⁴ Cm*	1,48 E1	4,48 E13
²⁴⁵ Cm	9,68 E-1	6,21 E9
²⁴⁶ Cm	1,06 E-1	1,29 E9
²⁴⁷ Cm	1,23 E-3	4,27 E3
²⁴⁸ Cm	1,72 E-5	2,27 E3

* 10 Jahre Abklingzeit

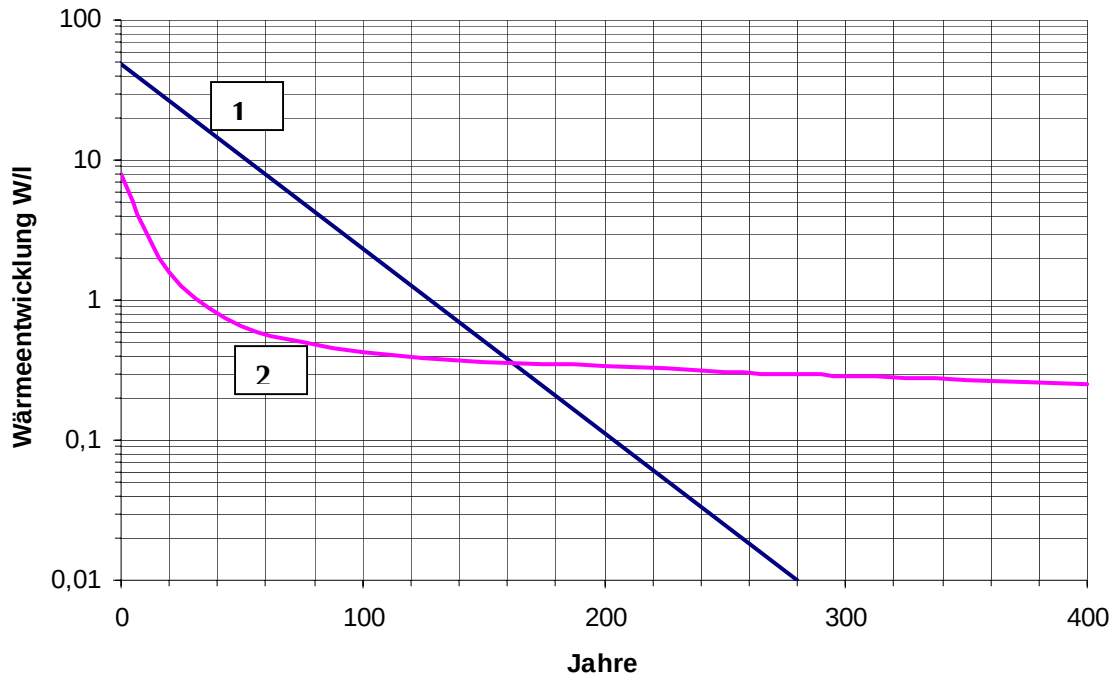
Tabelle 2-4: Konzentration und Aktivität von Aktinoiden im bestrahlten Kernbrennstoff WWER-440

2.6 Wärmeleistung

Die Wärmeleistung der Gebinde mit den verglasten HLW wird im wesentlichen durch den Gehalt an ¹³⁷Cs und ⁹⁰Sr bestimmt. Nach 30 Jahren Zwischenlagerung der Gebinde beträgt die spezifische Wärmeleistung nicht mehr als 0,2W/l.

Die berechnete Wärmeleistung der verfestigten Fraktion Cs-Sr beträgt nach 50 Jahren 10 W/l und der Fraktion Seltene Erden/ Spaltprodukte 0,6 W/l.

Auf der Abbildung 2-6 ist die Entwicklung der mittleren Wärmeerzeugung der Gebinde mit den beiden Fraktionen dargestellt.



1. Verfestigte Fraktion Sr-Cs u. Rafinat des VI. Zyklus
2. Verfestigte Fraktionen Seltene Erden/Spaltprodukte

Abb. 2-1: Zeitliche Entwicklung der Wärmeleistung der verglasten HLW-Fractionen

2.7 Inventarübersicht

Eine zusammenfassende Übersicht über das für die Endlagerung vorgesehene Inventar ist in der Tabelle 2-5 gegeben.

Bezeichnung	Maßeinheit	Verfestigte HLW	Fraktionen nach BE-Wiederaufbereitung	
			Cs+Sr	SE+SP*
1. Berechnete Volumina der verfestigten Abfälle	t m³	19200 6400	7800 2600	11700 3900
2. Spezifische Wärmeentwicklung:				
- nach 30 Jahren Lagerung der Schlämme	W/l	0,2	-	-
- nach 50 Jahren Lagerung der BE	W/l	-	10,0	0,6
3. Daten der Abfallcontainer:				
- Durchmesser	mm	600	450	600
- Höhe	mm	1000	1000	1000
- Abfallvolumen pro Container	l	200	80	200
- Abfallmasse pro Container	kg	600	264	760
4. Gesamtanzahl der Abfallcontainer	Stck.	32000	97500	19500
5. Jährliche Anlieferung der Gebinde	Stck.	1280	3900	780
6. Wärmeentwicklung der Abfälle in den Containern	W/lfd.m	40	800	120
7. Spezifische Aktivität der Abfälle	Ci/l	>30	>1000	>30

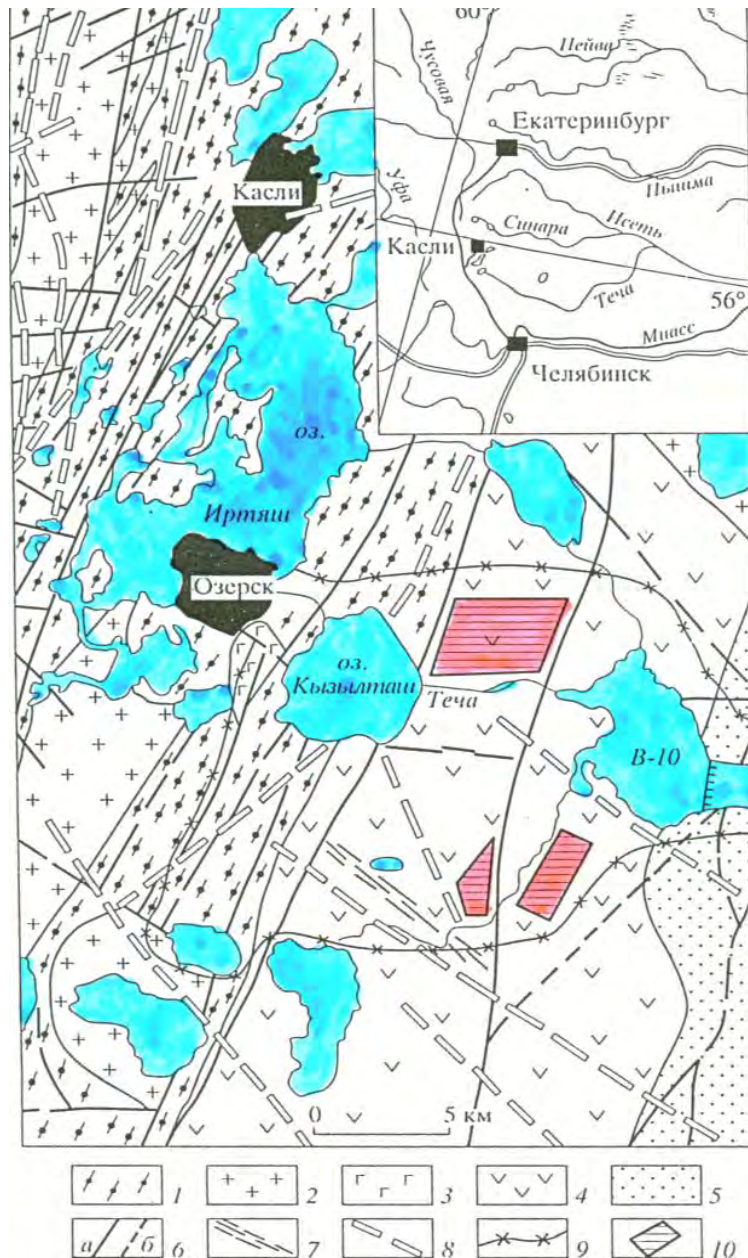
*SE+SP – Fraktionen Seltene Erden und Spaltprodukte

Tabelle 2-5: Majak – Übersicht über das endzulagernde Inventar

3 STANDORTBESCHREIBUNG

3.1 Regionalgeologische Lage des Gebietes

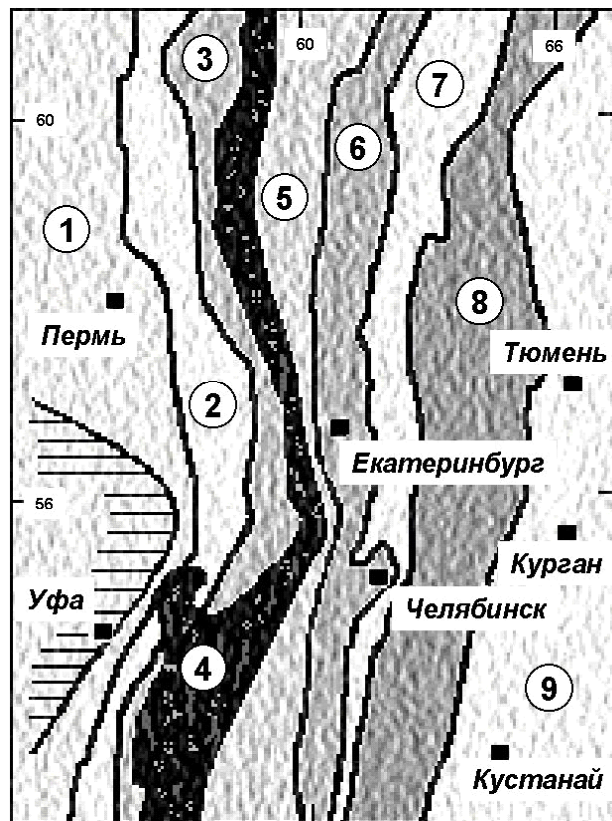
Das Territorium der Produktionsvereinigung Majak und des von russischer Seite innerhalb der Sanitären Schutzzone (SSZ) dieses Betriebes geplanten HAW-Endlagers liegt am Osthang des mittleren bis südlichen Urals, im Tscheljabinsker Gebiet (Abb. 3-1).



Symbole: 1 – Gneis-Amphibolit-Komplex ($Pr_3 - Pz_1$), 2 – Granite-Granodiorite (Pz_1), 3 – Gabbro (Pz_1), 4 – vulkanogen-sedimentärer Komplex ($S_1 - D_1$), 5 – vulkanogen-sedimentärer Komplex (C_{1-2}), 6 – Störungszonen (a - festgestellt, б - angenommen), 7 – Schieferungszonen, 8 – rezent aktive Störungen, 9 – Grenze der sanitären Schutzzone, 10 – Gebiete für weitere detaillierte Untersuchungen

Abb. 3-1: Lage der vom IGEM für Detailuntersuchungen empfohlenen potenziellen Endlagerstandorte im Umfeld der Produktionsvereinigung Majak (aus: [Laverov et al. 2000])

Dieser Teil des Urals, d. h. des Verschweißungsgebietes der alten, präkambrisch gebildeten Europäischen und Asiatischen Plattformen, ist der Übergangsbereich zwischen dem Faltungsgürtel des Urals und der Westsibirischen Platte. Im regionalgeologischen Sinn wird das Majak-Territorium der Ostural-Erhebung zugeordnet (Abb. 3-2). Nach [Kononenko et al. 1990] werden westlich der Produktionsvereinigung Majak das Zentrale Hebungsgebiet des Urals und die Tagilsker–Magnitogorsker Senke unterschieden, während sich östlich die Ostural-Senke, die Hinterural-Erhebung und die Tjumen-Kustanaj-Senke an das Majak-Territorium anschließen (Abb. 3-2).



Ausgehaltene Strukturzonen: 1 – Ostteil der Osteuropäischen Plattform, mit extra hervorgehobener Kontur des Ufimscher Vorsprungs, 2 – Vorural-Randsenke, 3 – Faltungszone des Westurals, 4 – Zentrale Ural-Erhebung, 5 – Tagiler-Magnitogorsker Senke, 6 – Ostural-Erhebung, 7 – Ostural-Senke, 8 – Hinterural-Erhebung, 9 – Tjumen-Kustanajsker Senke

Abb. 3-2: Tektonisches Schema des Urals und der östlichen Randgebiete der Osteuropäischen Plattform (Kononenko et al. 1990, aus: Velichkin et al. 2003)

Die Ostural-Erhebung stellt eine langgezogene, submeridional streichende Faltungsstruktur dar, die sich aus mehreren großen Antiklinalen, getrennt durch Synklinallzonen, zusammensetzt.

Die Region um den potenziellen Endlagerstandort gliedert sich in folgende Zonen:

- *Ostural-Erhebung*
 - Sysertscho-Ilmenogorsker Megaantiklinorium
 - Kysyltaschsker Synklinorium und
 - Argajaschsker Sattelstruktur
- *Ostural-Senke bzw. -Depression*
 - Kamensker Synklinorium
 - Tetscha-Brodsker Synklinale.

Die Produktionsvereinigung Majak liegt innerhalb des Kysyltaschsker Synklinoriums.

Das Sysertsko-Ilmenogorsker Megaantiklinorium wird im Umfeld des geplanten Endlagers durch das Vischnevogorsko-Ilmenogorsker Antiklinorium vertreten, das an den westlichen Rand der Sanitären Schutzzone Majaks angrenzt. Gebildet wird es hauptsächlich aus Gneisen, Magmatiten, Glimmerschiefern und kristallinen Schiefern, wahrscheinlich oberproterozoischen Alters.

Das Kysyltaschsker Synklinorium setzt sich innerhalb der SSZ aus alt- und mittelpaläozoischen Gesteinen zusammen. Im Altpaläozoikum treten Marmor, Gneise und kristalline Schiefer auf, während das Mittelpaläozoikum aus vulkanogen-sedimentären Gesteinen des S_2 - D_1 besteht, wie Tuffe und Laven von Andesit-Basalt-Porphyrten.

Der östliche Flügel des Kysyltaschsker Synklinoriums grenzt an die große Argajaschsker Sattelstruktur, die sich submeridial etwa zwischen dem Scheitel der Gorgensker Synklinale und der Argajaschsker Überschiebung hinzieht. Sie wird aus proterozoischen Gesteinen zusammengesetzt: Marmore, kristalline Schiefer und Gneise, die schmale submeridionale Falten mit einem steilen Einfallen der Schenkel bilden, verkompliziert durch eine Serie von großen tektonischen Störungen mit der selben Streichrichtung. Sie können z. T. bis in eine Tiefe von mindestens 3,5 km verfolgt werden.

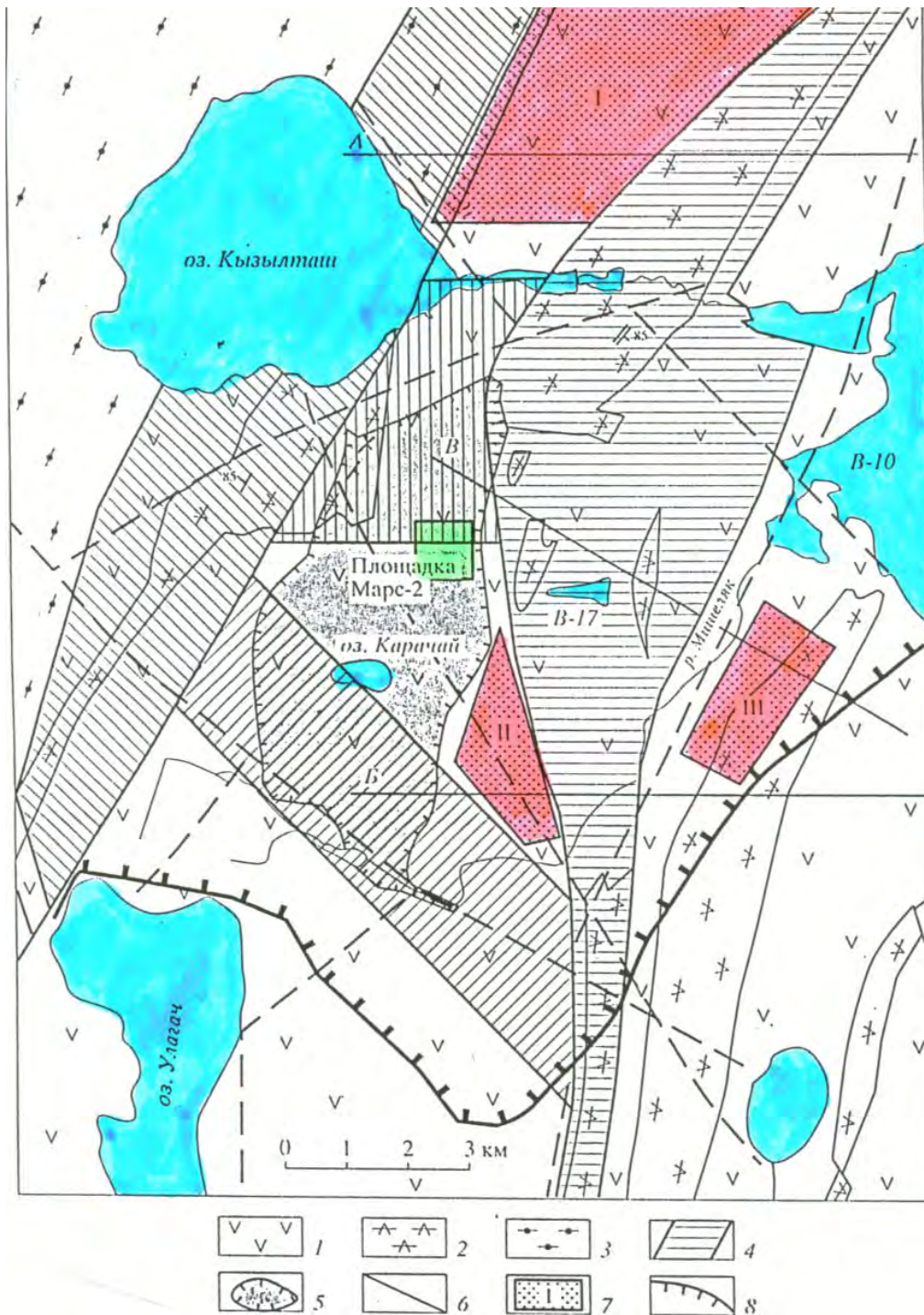
Durch die Argajaschsker Störung, die ihrem Charakter nach einer Über- bzw. Aufschiebung entspricht, wurden die Silur-Devon-Gesteine auf die terrigen-karbonatischen Ablagerungen des frühen Karbons überschoben. Die letzteren bilden die Sobolevsker Synklinale, die hier die äußerste westliche Struktur des Kamensker Synklinoriums der Ostural-Senke darstellt.

Aus diesen Beschreibungen wird deutlich, dass das Gebiet um die Produktionsvereinigung Majak durch einen komplizierten geologischen, mosaikartigen Blockaufbau (Abb. 3-3) charakterisiert ist. Innerhalb dieser Blockstruktur gehört das Majak-Territorium zum Isetsker Block. Die Bildung der verschiedenen Blöcke ist auf mächtige, im späten Neogen bis Quartär aktivierte tektonische Störungszonen zurückzuführen [Sigov & Schub 1972].

Zur Bewertung des Eignungsgrades des Majak-Umfeldes für ein HAW-Endlager erfolgten Ende der 80er Jahre durch VNIPI PT intensive geologische Erkundungsarbeiten. Im Rahmen dieser Arbeiten wurden auf dem Gebiet „Mars-2“ (Abb. 3-3) auf einer Fläche von 0,25 km² mehrere, bis zu 1200 m tiefe Erkundungsbohrungen niedergebracht, in denen umfangreiche hydrogeologische Untersuchungen realisiert wurden.

Detaillierte Informationen zur strukturell-tektonischen Entwicklung der Südural-Region liegen im Ergebnis von IGEM-Arbeiten vor, die bis Mitte der 90er Jahre erfolgten [Velichkin et al. 1993, 1994]) und unlängst insbesondere bezüglich der vorherrschenden Spannungsregime und Deformationsereignisse ergänzt wurden [Velichkin et al. 2003]. Im Ergebnis der IGEM-Untersuchungen wurden innerhalb der Sanitären Schutzzone (SSZ) zwei Gebiete mit Flächen von 1,5 bzw. 3 km² für weitergehende Untersuchungen empfohlen (Abb. 3-3).

Ausgehend vom insgesamt relativ hohen tektonischen Gestörtheitsgrad der als Wirtsgesteine vorgesehenen Andesit-Basalte wird eine Endlagerung der HAW in Bohrungen vorgeschlagen, d. h. der Bau eines Endlager-Bergwerkes mit Schächten und Einlagerungsstrecken für die hoch radioaktiven Abfälle abgelehnt.



Symbole und Signaturen: 1 – oberer Teil des vulkanogen-sedimentären Komplexes, 2 – unterer Teil des vulkanogen-sedimentären Komplexes, 3 – Gneis-Amphibolit-Komplex, 4 – Blöcke mit intensiver tektonischer Störung, 5 – Kontur des kontaminierten Grundwasserbereiches im Umfeld des Sees Karashaj, 6 – rezent aktive Störungszonen, 7 – perspektivische Gebiete I bis III, 8 – Kontur der Sanitären Schutzzone

Abb. 3-3: Blockstruktur und regionale Störungszonen im Umfeld der Produktionsvereinigung Majak, Südural (aus: [Laverov et al. 2000])

3.2 Lithologische Zusammensetzung der Endlager-Wirtsgesteine

Das geologische Umfeld der Produktionsvereinigung Majak ist durch das Auftreten der relativ flach einfallenden Argajaschsker Überschiebung und das dadurch bedingte Vorhandensein von mindestens zwei lithologisch-strukturellen Etagen, die durch die Überschiebung abgetrennt sind, charakterisiert (Abb. 3-7). Die untere, ältere Strukturetage westlich der Überschiebung (Irtjaschsker Block) entspricht dem wahrscheinlich proterozoischen Fundament der Westsibirischen Platte. Die in allochthoner Lagerung östlich der Argajaschsker Überschiebung vorkommenden Metavulkanite sind silurisch-devonischen Alters. Wie aus den Abbildungen 3-1 und 3-3 hervorgeht, dominieren im Umfeld der Produktionsvereinigung Majak hochmetamorphe Gneise, Amphibolite und kristalline Schiefer des späten Proterozoikums bis frühen Paläozoikums, vulkanogen-sedimentäre silurisch-devonische Komplexe sowie karbonatisch-terrigen Ablagerungen des Karbons. Westlich der Argajaschsker Überschiebung, die sich entlang der Seen Akakul, Tatysch, Kysyl-Tasch, Berdenisch, Bol und Kasli verfolgen lässt, überwiegen die PR₃-Pz₁-Gesteine, während im Zentralteil der Sanitären Schutzzone Geosynkinalablagerungen silurisch-devonischen Alters auftreten. Weiter östlich schließen sich meso- und känozoische Plattform-Sedimente an.

Die geplanten Endlager-Wirtsgesteine sind grünschieferfaziell überprägte Vulkanite basischer Zusammensetzung mit einer Gesamtmächtigkeit von ca. 2 km. Die Metavulkanite werden in eine vulkanogen-sedimentäre untere Schichtenfolge und in eine überwiegend vulkanogene obere Folge untergliedert. Im obersten Teil der unteren Folge treten verkieselte bzw. kohlig-SiO₂-reiche Schiefer auf, die zusammen mit Tuffiten und Tuffen einen etwa 200 m mächtigen Leithorizont bilden, mit dessen Hilfe die geologische Struktur (Faltenbau und Auftreten von Verwerfungen) im Gebiet rekonstruiert werden kann. Bei den Metavulkaniten handelt es sich um andesitisch-basaltische Porphyrite und ihre Tuffe bzw. Tufflaven, die insgesamt eine relativ homogene mineralogische und chemische Zusammensetzung aufweisen. Angaben zum mittleren Chemismus der Gesteine sind in Tabelle 3-1 zusammengetragen.

	1	2	3	4
SiO ₂	50,17	48,51	49,11	54,86
TiO ₂	0,85	0,78	0,75	0,54
Al ₂ O ₃	17,11	13,77	14,15	14,9
Fe ₂ O ₃	5,65	4,54	4,25	2,71
FeO	4,44	6,95	5,28	5,10
MnO	0,17	0,23	0,18	0,22
MgO	6,25	9,62	8,65	7,18
CaO	7,53	9,59	7,34	4,40
Na ₂ O	2,60	2,38	2,65	4,06
K ₂ O	0,35	0,55	0,85	1,90
H ₂ O ⁻	0,45	0,20	0,41	0,41
H ₂ O ⁺	4,26	3,30	2,95	3,32
CO ₂	0,29	0,47	2,49	0,05
Anzahl Proben	33	30	17	10

Erklärungen: 1, 2, 3 – oberer Horizont der Vulkanite; 1 – „Mars-2“, Bohrungen 8001 und 8002; 2 – Gebiet des Flusses Misheljak; 3 – Gebiet des Wasserbeckens Nr. 10; 4 – unterer Horizont der Vulkanite, Gebiet des Sees Kysyltasch

Tabelle 3-1: Durchschnittliche chemische Zusammensetzung der silurisch-devonischen Metavulkanite aus dem Territorium der Produktionsvereinigung Majak (Angaben in Gew.%; (aus: [Laverov et al. 2003])

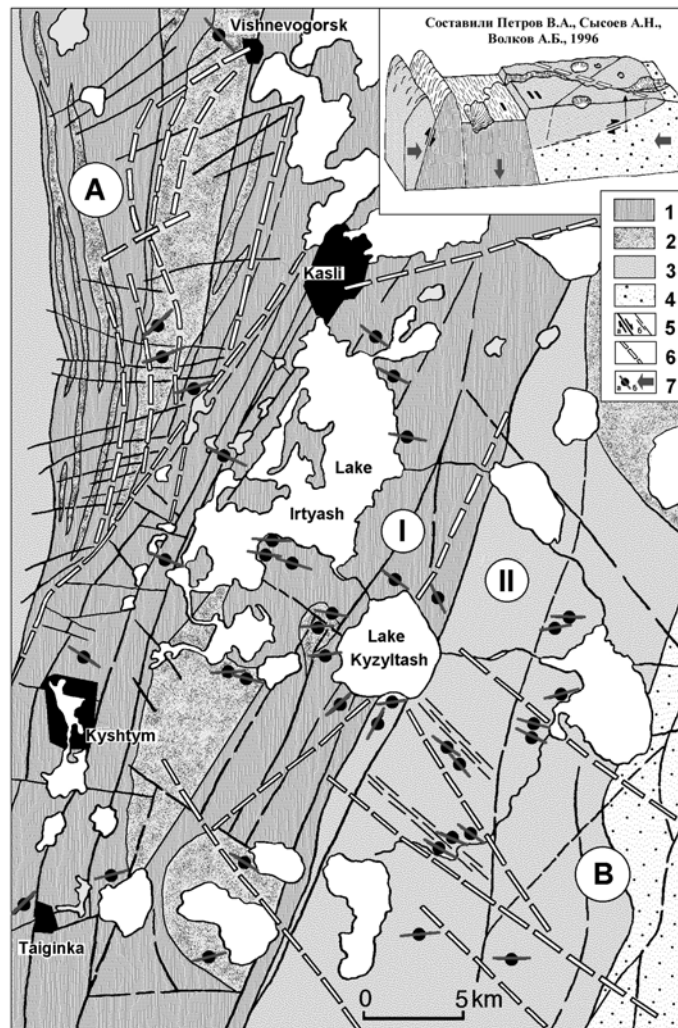
Durch dynamometamorphe Prozesse wurden die Gesteine zum größten Teil geschiefert und geringtemperiert hydrothermal-metasomatisch umgewandelt. Anstelle der primären gesteinsbildenden Minerale (Ca-Na-Feldspäte, Pyroxene, Hornblende) treten bevorzugt Epidot, Chlorit, Prehnit, Hydroglimmer, Karbonate, Fe- und Mn-Hydroxide sowie Tonminerale auf. Ein Großteil dieser Minerale verfügt über gute Sorptionseigenschaften für Radionuklide. Aufgrund der an die Bildung der Sekundärminerale gebundenen Volumenzunahme kommt es im Ergebnis der Alterationsprozesse zur zumindest partiellen Verheilung von Klüften [Laverov et al. 2000] (siehe auch Teil A, Kap. 2.6.5).

3.3 Auftreten von Bruchstörungen und Klüften im Untersuchungsgebiet

Die geologische Entwicklung, insbesondere die Deformationsgeschichte des Untersuchungsgebietes wird durch dessen Position zwischen zwei sich räumlich annähernden Massiven früher Konsolidierung bestimmt: die archaisch-proterozoische Osteuropäische Plattform im Westen und das kaledonische Kasachstan-Tjan-Shan-Massiv im Südosten.

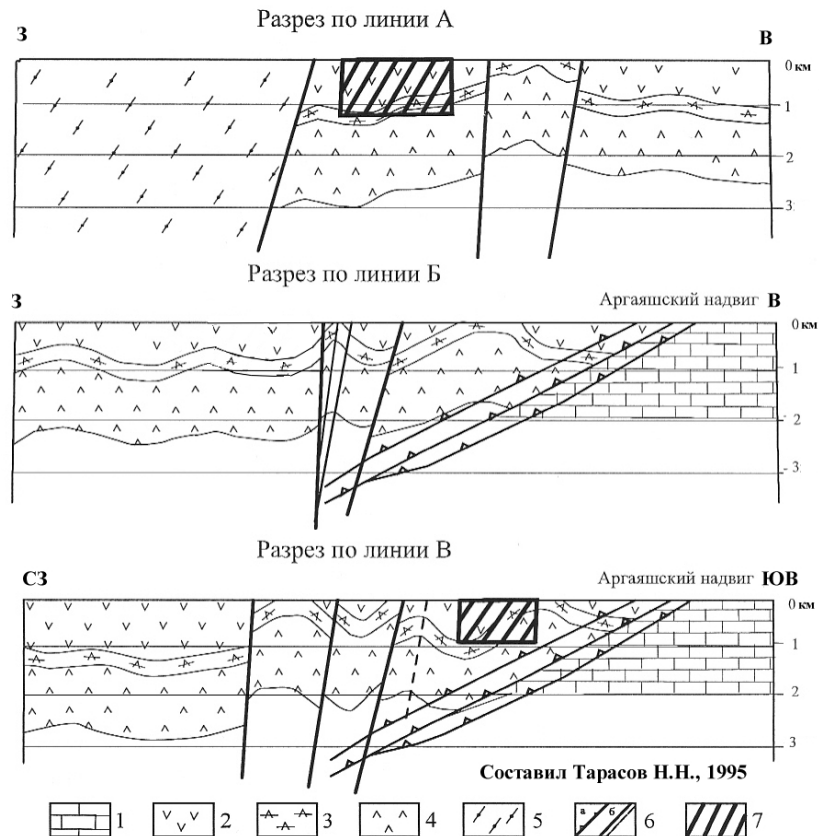
Aufgrund dieser regionalgeologischen Position ist das Untersuchungsgebiet durch einen relativ hohen, aber ungleichmäßigen tektonischen Gestörtheitsgrad gekennzeichnet und weist eine große Anzahl von langgezogenen (viele km) tektonischen Bruchstrukturen und sie begleitenden Schieferungszonen unterschiedlicher Orientierung und Mächtigkeit auf. Hinsichtlich der Streichrichtungen lassen sich neben den überwiegend beobachteten submeridionalen Störungszonen (mit „Ural-Streichen“) nordöstlich und nordwestlich sowie sub-E-W-streichende Störungssysteme aushalten. Viele der Störungszonen weisen ein subvertikales Einfallen und eine Mächtigkeit bis zu mehreren hundert Meter auf.

Eine im regionalen Plan besonders auffällige Störungszone stellt die Argajaschsker Überschiebung dar (Abb. 3-1 und 3-4). Dabei handelt es sich um eine submeridional orientierte Störung mit einem Einfallen von 15 bis 30 ° und einer Mächtigkeit von 1,5 bis 2,5 km, an der die silurisch-devonischen vulkanogen-sedimentären Gesteine über die terrigen-karbonatischen Gesteine des frühen Karbons geschoben wurden (Abb. 3-5).



Symbole und Signaturen: A – Gebiet der heutigen Heraushebung des Urals, B – Subplattform-Gebiet, I – Irtjaschsker struktureller Block, II – Argajaschsker struktureller Block, 1 – Gneis-Amphibolit-Komplex (PR_3 - PZ_1), 2 – Granite-Granodiorite und Gabbro (PZ_1), 3 – vulkanogen-sedimentärer Komplex (Metavulkanite, S_1 - D_1), 4 – karbonatisch-terrigen Komplex (C_{1-2}), 5 – Störungszonen und Richtungen der relativen Verschiebungen entlang von ihnen (a) und lineare Schieferungszonen (b), 6 – reliefbildende Störungszonen (Lineamente), 7 – Orientierung der Kompressionsachse, rekonstruiert für den Abschnitt der spätesten känozoischen Verschiebungen (a: nach Resultaten von tektonophysikalischen Geländemessungen, b: Richtungen der Verschiebung von Geomassen in tektonophysikalischen Modellen)

Abb. 3-4: Schema zur geologischen Struktur und zum tektonischen Störungsgrad sowie zum Spannungszustand im Gebiet der Produktionsvereinigung Majak (aus: Velichkin et al. 2003)



Символы: 1 - карбонатно-terrigenen комплекс (C_{1-2}), 2 bis 4 - вулканоген-седиментарый комплекс (Метавулканыты, S_1-D_1) (2 – обрер Фолге, 3 – веркварзте и C_{org} -халтыге, веркварзте Шiefer, 4 – унтерер Фолге), 5 - Гнейс-Амфиболит-Комплекс (PR_3-PZ_1), 6 – Версхйебунгсфлехе дер Аргаяшскер Уберишйебунг (а) и андерер Стурунгсзонен (б), 7 – Ляге дер емпфолженер Гебйете ин ден Шнйиттен

Abb. 3-5: Геологические Schnittы zur Illustration der Rolle der Argajaschsker Уберишйебунг им Унтерсунгсгебйет (Ляге дер Schnittы: сйе Аbb. 3-3)

Нинсйхтлйх ирер минералогисхен Аубильунг и Генесе лассен сйх нях [Velichkin et al. 2003] фолгнде Тйпен вон Стурунгсзонен аусгйедерн:

- Тйефрихенде Стурунгсзонен ин Форм вон Веркварзунгсзонен и Системен вон нях беиенандер лйегенден Кварзгянгхен,
- Шieferунгсзонен, ды меист аус Албит, Серцит, Шлорит, Епидот и Актинолит зусамменгесetzt сйн,
- Мылонитисерунгс- и Брециензонен,
- Кварз-Карбонат- и Карбонат-Тримерхен сыйе
- нйхт минерализierte Клыфте.

Вяхрент ды тйефрихенден Веркварзунгсберейхе и ды Шieferунгсзонен ас Стурунгсзонен ерстер Ордунг меист ды Grenzen звышхен ден тектонисхен Блоскен маркйерн, treten ды Мылонитисерунгс- и Брециензонен сыйе ды мй Кварз, Епидот, Шлорит и/oder Карбонатын gefullten Клыфтсистеме innerhalb дер Блоскен аф. Дер уберишйегенде Тей дер тектонисхен Стурунгсзонен ентспрыхт Шieferунгсзонен и Мылонитисерунгс- bzw. Зеррuttунгсзонен. Ейен Ейндрухк вон дер рямлйхен Ориентйрунг, Хяufigкейт, Клыфтoffнунгсвейте и Генесе дер им Унтерсунгсгебйет афтретенден Клыфте вермйтелт Tabelle 3-2.

Gesteinstyp und deren Standort	System	Lagerungselemente der Kluftsysteme	Dichte α , cm	Öffnung m , mm	Genese
Laven, Tuffflaven, Tuffe, Standort Mars-2, P.45 (n=196)	I	300 Wink. 75-85	15	0,1	C
	II	355-0 Wink.60-65	40	0,4	C
	III	315 Wink. 45-55	100	0,1	C
	IV	350 Wink.25-30	20	2,0	O
Laven, Tuffflaven, Tuffe, Standort Mars-2, P.46 (n=213)	I	320 Wink.80-85	5	3,0	C
	II	300 Wink.45-50	30	0,1	C
	III	65 Wink.35-40	100	1,0	C
	IV	30 Wink.30-35	30	5,0	O
	V	275 Wink.70-75	50	1,0	C
Tuffe, Tuffflaven im Bereich des Fl. Mishelyak, Trasse der A-scheileitung, P.36 (n=210)	I	290 Wink.80-85	15	0,1	C
	II	300 Wink.75-80	10	0,1	C
	III	80 Wink 60	20	0,1	C
	IV	340 Wink 60-65	30	0,1	C
	V	20 Wink 40	30	0,3	?
Tuffe, Tuffflaven im Bereich des Fl. Mishelyak, Trasse der A-scheileitung, P.37 (n=209)	I	290 Wink 75-80	5	0,1	C
	II	30 Wink 65-70	15	0,1	C
	III	70 Wink 70	15	0,2	?
	IV	85-90 Wink.2..?	40	1,5	C
	V	330 Wink 35-40	40	5,0	O
Andesit-Basalt-Porphyrte, Novogornensker Tagebau P. 26-35 (n=577)	I	300 Wink 60-65	15	0,1	C
	II	290 Wink 75-80	30	0,2	C
	III	310 Wink 70-80	40	0,2	C
	IV	40 Wink 80-85	10	0,3	C
	V	340 Wink 25-35	60	0,5	O
	VI	0-10 Wink 15-25	150	20	O
Tuffe, Tuffsandsteine westl. Ufer von W-10 P. k2a (n=215)	I	280 Wink 70-80	3	0,1	C
	II	300 Wink 70-75	10	0,1	C
	III	345 Wink 45-50	30	0,1	C
	IV	315 Wink 65-70	25	0,1	C
	V	50 Wink 60-65	30	0,3	?

Erklärung: C – Gleit- bzw. Abscherungsklüfte («скол») O – Zugklüfte («отрыв»), ? – Klüfte mit einer unklaren Genese

Tabelle 3-2: Angaben zur Kluftorientierung und -ausbildung in den vulkanogen-sedimentären Gesteinen im Umfeld der Produktionsvereinigung Majak

Die im Untersuchungsgebiet auftretenden tektonischen Störungszonen und Klüfte sind auf unterschiedlich alte Deformationsprozesse zurückzuführen. [Laverov et al. 2003] unterscheiden drei Hauptetappen der Deformation im Untersuchungsgebiet. In der hercynischen Etappe kam es im Ergebnis einer Transpression und Grünschiefermetamorphose zur Bildung von Falten und Schieferungszonen sowie zur Anlage regionaler Überschiebungen. Bei Überschreitung des Festigkeitsgrenzwertes für Kompression bildeten sich Mylonitzonen und unterschiedliche Kluftsysteme heraus. Im Verlaufe der anschließenden mesozoischen Deformationsetappe waren die Achsen der Hauptnormalen der Spannungen subhorizontal orientiert, was zu Blockverschiebungen und zur Bildung von Breccienzonen sowie von mineralisierten Klüften führte. Die anschließende känozoische Etappe ist durch ein regionales sub-E-W-gerichtetes Kompressionsregime charakterisiert [Velichkin et al. 2003]. Einen guten Überblick zum Auftreten von Störungszonen und zum Deformationsgrad bzw. zur Orientierung der Kompressionsachsen liefert Abb. 3-5.

Lokal, vor allem in der Nähe von mächtigen regionalen Störungszonen, sind die Gesteine sehr stark geklüftet, intensiv geschiefert und z. T. zerstückelt. In einigen, im Gebiet „Mars-2“ niedergebrachten Bohrungen wurden in den Kernen unterhalb 120 m Tiefe, bis zu 20 Störungszonen mit Mächtigkeiten zwischen 0,2 und 8,9 m festgestellt. Ab einer Tiefe von ca. 400 m weisen die alterierten Gesteinsbereiche in der Regel Öffnungsweiten im mm-, selten im cm-

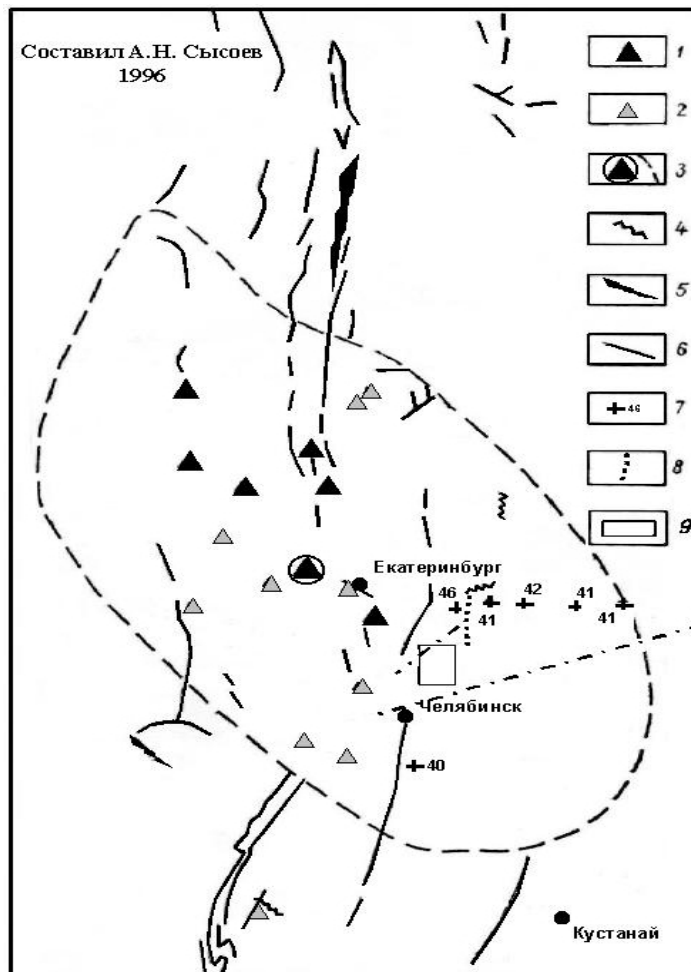
Bereich auf (siehe Kap. 2.5). Umfangreichere Untersuchungsergebnisse zur Morphologie, zum Internaufbau und zur räumlichen Lage sowie zu den räumlich-zeitlichen Beziehungen zwischen unterschiedlichen Kluftsystemen legten für das Untersuchungsgebiet Aduschkina et al. (1997), Petrov (2001) und Velichkin et al. (2003) vor.

3.4 Neotektonische Bewegungen und seismische Aktivitäten im Gebiet Majak

Die Südurals-Region ist seit dem Mesozoikum durch eine intensive lateritische Verwitterung und mindestens seit dem Ende des Oligozäns bzw. seit Beginn des Miozäns durch eine deutliche Tendenz zur Heraushebung und Peneplainbildung gekennzeichnet [Velichkin et al. 2003]. Ausgehend von der Rekonstruktion der Lage der Einebnungsflächen des Oligozäns und Miozäns schätzten [Kotschkin et al. 1997] die Denudationsgeschwindigkeit in der Region auf etwa 0,8 bis 1 m pro 1 Mio. Jahre, mit Maximalwerten von bis zu 3,5 m pro 1 Mio. Jahre im Miozän.

Durch das Vorhandensein zahlreicher neotektonisch aktiver Störungszonen wurden im Ergebnis von regelmäßig wiederholten Nivellierungsmessungen und eines detaillierten Geomonitorings der Relaxationsprozesse [Aduschkina et al. 1997] vertikale Verschiebungen einzelner tektonischer Blöcke gegeneinander von bis zu 7 mm/a gemessen. Im Beobachtungszeitraum von 1906 bis 1980 ergab sich für den mittleren und südlichen Ural eine mittlere Heraushebung von 3,5 mm/a, bei Schwankungen zwischen –4,3 und +10,6 mm/a [Velichkin et al. 2003].

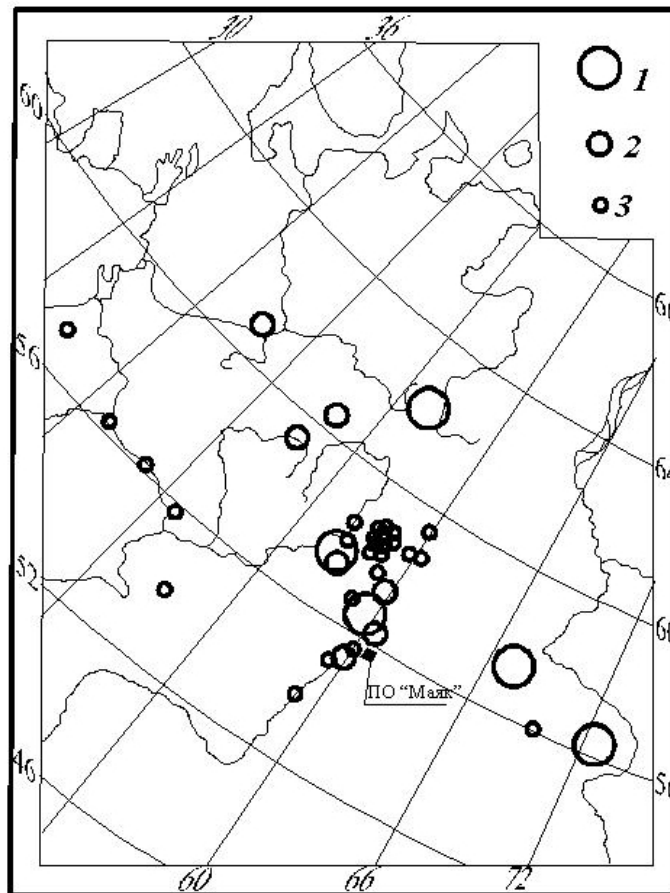
Der mittlere und der südliche Ural zeichnen sich durch eine erhöhte seismische Aktivität aus. Die seismischen Bewegungen sind vorwiegend an mächtige Störungszonen mit NW-SE-Orientierung gebunden (Abb. 3-6) und konzentrieren sich an der nördlichen Umrandung des Ufimsker Vorsprungs. Im weiteren Umfeld des Untersuchungsgebietes wurden mehrere Erdbeben mit Magnituden von 3 bis 4 festgestellt, deren Epizentren im Gebiet der Städte Kyshtym und Miass lagen (Abb. 3-7) [Novejschij Katalog 1977], [Kononenko et al. 1990].



Symbole: 1, 2 – Epizentren von Erdbeben, die in den letzten 100 Jahren registriert wurden (1 – Intensität von 5 bis 6, 2 – Intensität von 3 bis 4), 3 – Epizentrum des Erdbebens von Schigir-Schischimsk und ungefähre Grenze der Verbreitung von Wellen mit einer Intensität von 3 bis 4, 4 – rezente Störungszonen der Erdoberfläche, 5 – Störungszonen, entlang derer rezente Bewegungen registriert werden, 6 – sonstige rezente Störungszonen, 7 – Tiefen bis zur Moho-Oberfläche (nach seismischen Daten bei v gleich 6,2 bis 8,2 km/s), 8 – Sprünge im Relief der Moho-Oberfläche, 9 – Territorium der Produktionsvereinigung Majak

Abb. 3-6: Schema zur Seismizität der Mittel- bis Südural-Region (nach Angaben aus: Novjschij Katalog 1977, mit Ergänzungen, aus: Velichkin et al. 2003)

Die nach [Velichkin et al. 2003] seit dem Holozän im Untersuchungsgebiet feststellbare sub-E-W-gerichtete Kompression führt in Tiefen bis 300 m von der Oberfläche zur Entstehung von tektonischen Spannungen in der Größenordnung von 20 bis 40 MPa. Derartige Spannungsbeträge werden von diesen Autoren auch für die nächsten 10 000 Jahre vorausgesagt. Dieser sub-E-W-gerichtete Stress führt dazu, dass die NW- und NE- gerichteten Störungszonen durch seitliche Verschiebungen charakterisiert sind. Submeridional orientierte Störungszonen nehmen den Charakter von Auf- oder Abschiebungen an, während sub-E-W-gerichtete Störungen aufreißen und sich durch hohe hydraulische Durchlässigkeiten auszeichnen. Als Beleg für diese Auffassung dient die Ausbreitung der Kontaminationsfahne im Untergrund des Karashaj-Sees in sub-E-W-Richtung.



1 – Intensität 5,1 bis 6,0; 2 – Intensität 4,1 bis 5,0; 3 – Intensität bis 4,0

Abb. 3-7: Seismische Aktivitäten im Umfeld des Gebietes der Produktionsvereinigung Majak, im Vergleich zum europäischen Teil Russlands, zum Ural und zu Westsibirien (nach Angaben aus: Novejschij Katalog 1977, aus: Velichkin et al. 2003)

3.5 Hydrogeologie des Untersuchungsgebietes

Das geplante Endlagergebiet weist ein schwach gegliedertes, nach E geneigtes Relief und ein gemäßigtes Kontinentalklima auf. Die absoluten Höhenlagen schwanken im Untersuchungsgebiet zwischen 215 und 285 m, die Höhendifferenzen zwischen den tiefsten Punkten der Flusstäler und den benachbarten Wasserscheiden betragen maximal 30 bis 40 m. Das Majak-Gebiet ist durch flach geneigte Berghänge, breite Flusstäler und eine Vielzahl von Seen gekennzeichnet. Die langjährige durchschnittliche Lufttemperatur liegt bei +2,3 °C, bei Schwankungen der monatlichen Durchschnittstemperaturen zwischen +18,6 und –21,4 °C. Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge beträgt 396 mm, wobei die meisten Niederschläge im Sommer fallen – bis zu 84 % der Jahresmenge. Abb. 3.8 zeigt das Klimadiagramm von Tschaljabinsk.

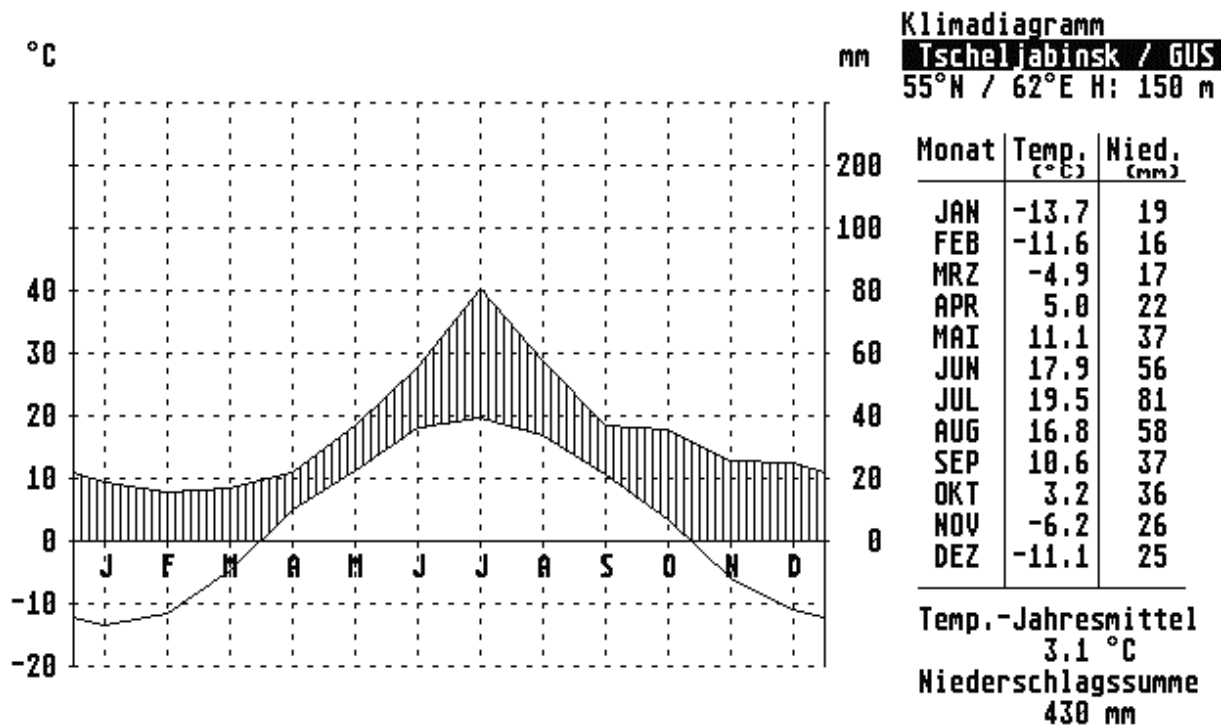


Abb. 3-8: Klimadiagramm Tscheljabinsk

Der lokale Vorfluter ist der stark mäandrierende Fluss Misheljak (Abb. 3-3). Die von der Mächtigkeit der Verwitterungszone und der Niederschlagsmenge abhängige Grundwasserneubildung beläuft sich auf etwa 10 bis 25 % der Jahresniederschlagsmenge und beträgt zwischen 11 und 55 mm/a bzw. $1,4 \cdot 10^{-4}$ bis $4 \cdot 10^{-5}$ m/d.

Der Wasserspiegel des ungespannten Grundwassers liegt im Untersuchungsgebiet in einer Tiefe zwischen 0,1 und 20 m u.GOK, durchschnittlich bei 5 bis 7 m u.GOK. Die Grundwasserführung der unverwitterten Vulkanite wird vor allem durch die Zonen erhöhter Klüftigkeit kontrolliert.

Ausgehend von den vorwiegend im Gebiet „Mars-2“ abgeteufte Erkundungsbohrungen und den in den Bohrungen realisierten hydrogeologischen Untersuchungen lässt sich der geologische Untergrund im Gebiet Majak in mehrere Zonen untergliedern, z. B. [Mironenko & Rumynin 1999]. Die oberflächlich anstehenden, meist nur wenige m bis 10-20 m mächtigen Deluvial- und Alluvial-Sedimente weisen Wasserdurchlässigkeiten meist < 1 m/d auf. Nur selten werden in sandig ausgebildeten alluvialen Ablagerungen k_f -Werte bis 10 m/d beobachtet. Unterhalb dieser Quartärsedimente wird ein Bereich intensiver Verwitterung der Vulkanite mit starker exogener Klüftigkeit ausgegliedert („Schicht- und Kluftwässer“). Die Mächtigkeit dieser Zone erreicht bis zu 50-80 m. Die Grundwasserfließrichtung zeichnet das Oberflächenrelief nach. Der von [Mironenko & Rumynin 1999] angegebene durchschnittliche k_f -Wert liegt in dieser Zone bei 0,4 m/d.

In noch größerer Tiefe schließt sich der Bereich der „Kluft- und Gangwässer“ an, dessen Grundwasserführung ausschließlich durch das Auftreten von Klüften und Störungszonen bestimmt wird. Die Grundwässer sind gespannt, die Durchlässigkeitsbeiwerte der Klüfte schwanken im Teufenbereich unterhalb 400 m zwischen $1,4 \cdot 10^{-2}$ und $6,7 \cdot 10^{-3}$ m/d. Die Gesteinsmatrix weist in dieser Tiefe einen durchschnittlichen k_f -Wert von $4 \cdot 10^{-4}$ m/d auf. Ab 400 m Tiefe sind die Grundwässer reduzierend und schwach basisch, was sich negativ auf das Migrationsverhalten der Radionuklide auswirkt. Velichkin et al. (2003) geben für unverwitterte Andesit-Basalte Filtrationsgeschwindigkeiten von $\leq 5 \cdot 10^{-5}$ m/a an.

3.6 Physiko-mechanische und wärmephysikalische Eigenschaften der Endlager-Wirtsgesteine

Aus den Kernen der am Standort „Mars-2“ niedergebrachten Erkundungsbohrungen sowie in einigen Blöcken der SSZ wurden repräsentative Proben der wichtigsten Typen der vulkanogen-sedimentären Schichtenfolgen entnommen und laborativ untersucht. Dabei wurden folgende Kennwerte ermittelt:

- Dichte,
- effektive Porosität,
- Wasserdurchlässigkeit,
- Widerstand gegen einachsigen Druck,
- Geschwindigkeit der Longitudinal- und Transversal-Ultraschallwellen sowie deren Anisotropie in trockenen und wassergesättigten Gesteinsproben,
- Elastizitätswerte der Gesteine,
- Jung-Modul,
- Modul der Verschiebung und
- Poisson-Koeffizient.

Darüber hinaus wurde die Wärmeausdehnung und Auflockerung der Gesteine im Temperaturbereich von 25 bis 400 °C bei atmosphärischem Druck sowie in Druckbehältern mit einem Wasserdruck von bis zu 1 kbar analysiert.

Insgesamt wurden keine wesentlichen Variationen der petrophysikalischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der primären Struktur und vom Stoffbestand der Gesteine festgestellt. Unter Berücksichtigung der petrographischen Zusammensetzung gehören die vulkanischen Gesteine entsprechend VNIPI PT zum „viskos-festen strukturellen Medium-Typ“. Die Porphyrite sowie deren Lavabreccien, Tufflaven und feinkörnige Tuffe zeichnen sich durch eine geringe Anisotropie der petrophysikalischen Eigenschaften aus und weisen relativ hohe Elastizitätsparameter sowie geringe effektive Porositäten und Durchlässigkeiten auf (Tabelle 3-3).

Gesteine	Dichte, g/cm ³	Effektive Porosität, %	Geschwindigkeit der Ultraschall-Wellen, km/s		Jung- Modul E, Mbar	Poisson- Koeffizient m
			V _p	V _s		
Andesit-Basalte, Porphyrite, feinkörnige Tuffe	2,99	0,19	4,71	3,32	0,87	0,19
	2,98	0,18	6,38	3,74	0,86	0,20
Lavabreccien von Porphyriten, Tufflaven	2,95	0,20	5,18	3,36	0,90	0,22
	2,94	0,24	6,23	3,72	0,94	0,21

Tabelle 3-3: Mittelwerte der physikomechanischen Parameter für die vulkanogen-sedimentären Gesteine im Umfeld der Produktionsvereinigung Majak

Lediglich Proben aus tektonisch gestörten bzw. hydrothermal-metasomatisch überprägten Vulkaniten, d. h. aus Mylonit- oder Breccienzonen oder aus ihrer unmittelbaren Nähe, zeichnen sich durch größere Abweichungen von den angegebenen Mittelwerten aus. Die höchsten Veränderungen der aufgeführten Gesteinsparameter sind für jene Zonen und Intervalle von Bruchstörungen typisch, in denen sekundäre, niedrigtemperierte Chlorit -und Karbonat-Mineralisationen auftreten.

Die Festigkeitsgrenzwerte der Vulkanite mit andesitisch-basaltischer Zusammensetzung bei einachsiger Druckbeanspruchung, Dehnung und Verschiebung sind in Tabelle 3-4 ausgewiesen.

σ_{Druck} , MPa		σ_{Dehnung} , MPa		$\sigma_{\text{Verschiebung}}$, MPa		Belastungsgeschwindigkeit, MPa/h
min/max	mittl.	min/max	mittl.	min/max	mittl.	
78/485	256,5	9,3/28,4	18,5	32,5/98,5	66,7	1,5-2,0
50/90	76,3					0,1-0,16

Tabelle 3-4: Festigkeitsgrenzwerte der Andesit-Basalte aus dem Majak-Umfeld

Die Gesteine lassen sich hinsichtlich ihres Widerstandes gegen einachsigen Druck in drei Gruppen unterteilen (Tabelle 3-5).

Kennwerte	Maßeinheit	Besonders feste Vulkanite	Feste Vulkanite	Mittelfeste Vulkanite
Widerstand gegen:				
- einachsigen Druck	MPa	242	178,8	137,2
- Dehnung	-«-	19,2	18,3	15,1
- Verschiebung	-«-	76,4	k. A.	34,5
Jung-Modul	-«-	86800	98564	83440
Poisson-Koeffizient		0,21	0,20	0,21
Räumliches Gewicht	g/cm ³	2,90	2,90	2,79
Dichte	g/cm ³	3,04	3,04	3,09
Porosität:				
- allgemeine	%	4,68	4,68	2,92
- aktive/effektive	%	0,095	0,058	k. A.

Tabelle 3-5: Zusammenstellung der wichtigsten physikomechanischen Kennwerte der Vulkanite aus dem Untergrund des Gebietes Majak, geordnet nach Festigkeitsgruppen der Gesteine (k. A. – keine Angaben)

Im Ergebnis von umfangreichen Laboruntersuchungen wurden für die silurisch-devonischen Vulkanite effektive Porositäten zwischen 0,07 und 0,69 % (Mittelwert: 0,26 %) sowie Durchlässigkeiten $< 1 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ bestimmt [Laverov et al. 2003]. Die höchsten effektiven Porositäten und Durchlässigkeiten wurden an Proben aus Schieferungszonen bzw. metasomatisch überprägten Andesit-Basalten gemessen. Detailliertere Angaben zur Veränderung der physikalischen bzw. physikomechanischen Gesteinsparameter im Bohrprofil einer 1200 m tiefen Bohrung im Gebiet „Mars-2“ sind bei [Laverov et al. 2000] enthalten. Diese Autoren fixierten bei Temperaturen bis 200 °C und erhöhten Drücken $\pm$ konstante effektive Porositäten der Vulkanitproben aus dem Majak-Umfeld.

Die wärmephysikalischen Eigenschaften der Vulkanite hängen nach den bisher vorliegenden Untersuchungsbefunden nicht von deren lithologischer Zusammensetzung oder von den physikomechanischen Eigenschaften der Andesit-Basalte ab. Die silurisch-devonischen Gesteine des Majak-Umfeldes weisen folgende mittlere Kennwerte auf:

- Wärmeleitfähigkeit: 2,66 W/mK,
- spezifische Wärmekapazität: 733 J/kgK,
- Temperaturleitfähigkeit: $1,16 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ und
- Koeffizient der linearen Wärmeausdehnung: $0,78 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

Die experimentellen Untersuchungen der Wärmeauswirkung auf die Wasserdurchlässigkeit der Gesteine ergaben sowohl unter atmosphärischem Druck als auch in Autoklaven in Anwesenheit von Wasser eine sprunghafte Zunahme der Durchlässigkeiten längs und quer zur Schieferung der Vulkanite bei Wärmezufuhr. Die Ergebnisse der Untersuchung von zwei geschieferten Tuff-Proben der Andesit-Basalt-Porphyrite sind in Tabelle 3-6 zusammengestellt.

Gesteine	Erwärmungs-Medium	Richtung	Temperatur °C	Durchlässigkeit K, mD
Geschieferter Tuff der Andesit-Basalt-Porphyrite mit einem Quarzgängchen	Ausgangsgestein Atm. Erwärmung $P_{H_2O}=1 \text{ kbar}$	Parallel zur Schieferung	300	$3,2 \cdot 10^{-5}$
			400	$2,3 \cdot 10^{-5}$
			150	$9,8 \cdot 10^{-5}$
			300	$3,5 \cdot 10^{-5}$
	Ausgangsgestein Atm. Erwärmung $P_{H_2O}=1 \text{ kbar}$	Senkrecht zur Schieferung	400	$2,7 \cdot 10^{-5}$
			300	$5,0 \cdot 10^{-5}$
			300	$1,1 \cdot 10^{-5}$
			400	$2,9 \cdot 10^{-5}$
Geschieferter Tuff der Andesit-Basalt-Porphyrite	Ausgangsgestein Atm. Erwärmung $P_{H_2O}=1 \text{ kbar}$	Senkrecht zur Schieferung	150	$2,2 \cdot 10^{-5}$
			300	$5,6 \cdot 10^{-5}$
			300	$1,1 \cdot 10^{-5}$
			400	$1,2 \cdot 10^{-5}$

Tabelle 3-6: Temperatur-induzierte Veränderung der Wasserdurchlässigkeit von geschieferten Tuffen aus dem Umfeld der Produktionsvereinigung Majak

4 ENDLAGERKONZEPT

Um das Ziel des Projektes zu erreichen, ist es auch hier erforderlich, für ein erstes generisches Endlagermodell ein technisches Endlagerkonzept, bestehend aus Einlagerungskonzept und Barrierenkonzept für die Endlagerung im Wirtsgestein Porphyry zu erstellen. Auch im Rahmen dieses Vorhabens wird für wärmeerzeugende Cs+Sr Abfälle im ersten Ansatz nur die Bohrlochlagerung untersucht. Für die schwach wärmeentwickelnden Abfälle ist auch hier eine Einlagerung in Strecken vorgesehen.

4.1 Stark wärmeentwickelnde Abfälle

Wie schon im Kapitel 2.2 ausgeführt, bestehen die stark wärmeentwickelnden Abfälle aus der Cs+Sr-Fraktion der flüssigen Wiederaufarbeitungsabfälle verfestigt in einer Bor-Phosphat-Glas Matrix.

Für die Endlagerung der Abfälle ist die Errichtung eines Endlagers ausgeführt als Tiefenlager im Wirtsgestein Porphyry vorgesehen. Das Planungskonzept entspricht dem für das Endlager in Krasnojarsk entwickeltem Konzept der Bohrlochlagerung (s. Teil A Kap. 3.1.2), da die Abmessungen der Gebinde gleich sind und die Wärmeentwicklung auch dem Niveau der Wärmeentwicklung der Gebinde in Krasnojarsk entspricht. Der Hauptunterschied zu Krasnojarsk ist durch die wesentlich höhere Anzahl der endzulagernden Gebinde bedingt. Während in Krasnojarsk ca. 4 300 Gebinde in Bohrlöchern endzulagern sind, werden das von Majak ca. 97 000 Gebinde sein. Dadurch wird ein wesentlich größeres Einlagerungsfeld für diese HLW benötigt.

4.2 Schwach wärmeentwickelnde Abfälle

Die schwach wärmeentwickelnden Abfälle (HLW aus der früheren Plutoniumgewinnung, Fraktion Seltene Erden und Spaltprodukte aus der Wiederaufbereitung von ausgedienten Brennelementen) sollen wie im Endlager Krasnojarsk in Strecken endgelagert werden. Die Streckenkonfiguration und das Barrierenkonzept wurden wie in Krasnojarsk gewählt. Auch in diesem Fall besteht der Hauptunterschied in der weitaus höheren Gebindeanzahl (Krasnojarsk – 5 640 Gebinde, Majak – 51 700 Gebinde), was ein wesentlich größeres Streckenfeld für die Endlagerung erfordert. Die Feldgröße wäre im weiteren noch zu bestimmen.

4.3 Thermische Auslegungsberechnungen

Eine maßgebliche Einwirkung auf das Barriersystem, insbesondere auf den isolierenden Bentonit, ist die durch die wärmeerzeugenden Abfälle induzierte Temperaturerhöhung. Um schädigende Wirkungen auf die Bentonitabdichtung zu vermeiden, wurde als Randbedingungen für die Auslegung formuliert, dass die Temperatur im Bentonit an keiner Stelle 100°C übersteigen darf, so dass keine Dampfphase entstehen kann und Schrumpfung bzw. Rissbildung vermieden wird. Die Auslegungsberechnungen wurden für den potentiellen Standort Majak unter den dortigen standortspezifischen Bedingungen durchgeführt.

4.3.1 Konzeptuelles Modell

Die nachfolgenden Auslegungsberechnungen beziehen sich auf die Endlagerung der wärmeerzeugenden Cs/Sr Abfallfraktion der Produktionsvereinigung Majak und beinhalten Simulationen der Temperaturentstehung innerhalb der Barriere (Bentonit) und des örtlichen Wirtsgesteins. Das konzeptuelle Modell setzt sich zusammen aus

- Informationen über die Umgebungsbedingungen am Untersuchungsort,
- den Daten über die Wärmeleistung der einzulagernden Abfallbehälter,
- den thermophysikalischen Stoffgesetzen und Parametern des Wirtsgesteins

- den thermophysikalischen Stoffgesetzen und Parametern der technischen Barriere sowie
- den Annahmen zur Modellgeometrie.

4.3.1.1 Umgebungsbedingungen

Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde für den Standort Majak die gleiche Einlagerungsteufe zu Grunde gelegt wie für die Berechnungen zum Nishnekansker Granitmassiv. Anhand der vorliegenden Temperaturmesswerte aus der Bohrung 8002, [VNIPI PT 2002] ist in der angenommenen Einlagerungsteufe eine Temperatur von 13°C anzutreffen bei einem regionalen Temperaturgradienten von 12,1 mK m⁻¹ (Abb. 4-1). Das bedeutet, dass an diesem Standort eine maximale Temperaturerhöhung von 87°C zugelassen werden darf ohne dass die Auslegungstemperatur von 100°C überschritten wird.

Die Temperaturmessungen zeigen signifikante Unterschiede hinsichtlich der regionalen Temperaturverhältnisse der beiden potenziellen Standorte (Abb. 4-1). Der Standort in Majak zeichnet sich demnach durch eine negative thermische Anomalie aus, die grundsätzlich die Einlagerung stark wärmeentwickelnder Abfälle begünstigt.

4.3.1.2 Behälter und dessen Wärmefreisetzung

Wesentliches Element und Grundlage für die thermischen Auslegungsberechnungen ist die Wärmeleistung eines solchen Behälters. Diese ist in Abbildung 4-2 bezogen auf das Volumen als Funktion der Zeit dargestellt. Zum Vergleich wurden neben den Wärmeleistungen der Cs/Sr Abfallfraktionen auch die volumenspezifischen Wärmeleistungen anderer zur Endlagerung vorgesehener Behälter mit eingezeichnet. Dabei handelt es sich um den Endlagerbehälter mit 3 Brennelementen (BSK-3), die HAW-Kokille und den für die Einlagerung im Nishnekansker Granitmassiv vorgesehenen Behälter.

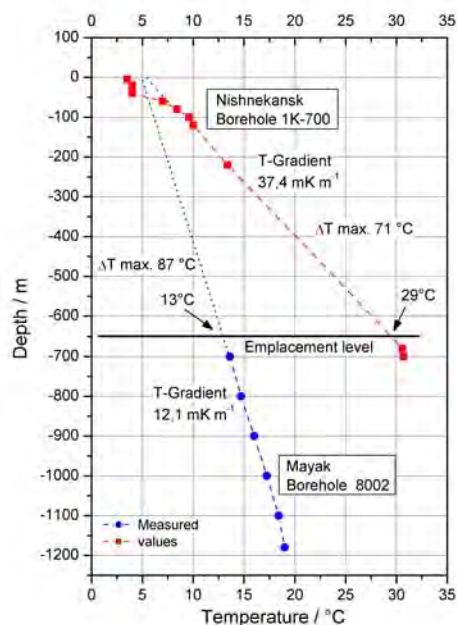


Abb. 4-1: Angenommene Einlagerungsteufe und lokale Temperaturverhältnisse gemäß entsprechender, als repräsentativ angenommener, Messungen in der Bohrung 1K-700 [VNIPI PT 2002]

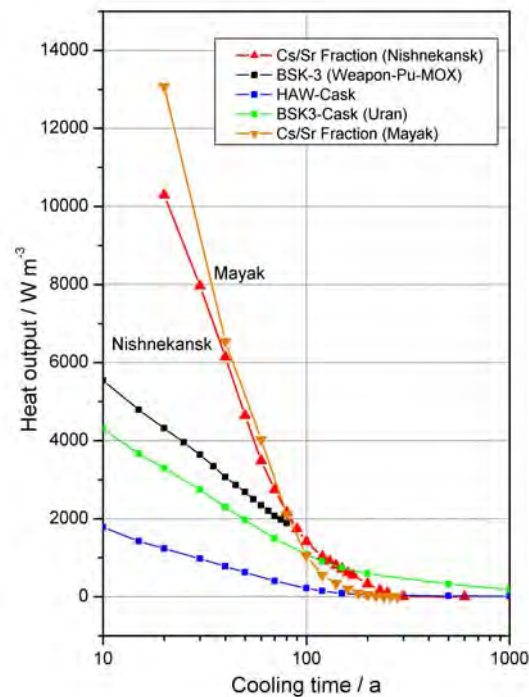


Abb. 4-2: Volumenspezifische Wärmeleistung der Cs/Sr Abfallfraktionen als Funktion der Zeit im Vergleich zu anderen zur Endlagerung vorgesehener Abfallbehälter.

Die für eine Einlagerung am Standort Majak vorgesehenen Cs/Sr Abfallfraktionen haben, vergleichbar mit denen zur Einlagerung im Nishnekansker Granitmassiv, in der Anfangszeit eine sehr hohe Wärmeleistung, zeigen aber im Vergleich zu den anderen einen erheblich steileren Wärmeleistungsabfall. Nach etwa 300 Jahren ist das Leistungsniveau auf etwa 10 W m^{-3} abgesunken und damit für die Auslegung thermisch nicht mehr relevant.

Bei der zur Einlagerung vorgesehenen Cs/Sr Fraktion handelt es sich zwar um eine starke Wärmequelle, jedoch mit einem vergleichsweise kurzen thermisch relevanten Zeitbereich.

4.3.1.3 Thermische Materialparameter

Wesentliche Größen für die Abfuhr der von dem Endlagerbehälter produzierte Wärme sind die Wärmeleitfähigkeit sowie die spezifische Wärmekapazität der den Behälter umgebenden Materialien, also der technischen Barriere und dem Wirtsgestein. Für letzteres liegen standortspezifisch Messdaten vor [Lawerov & Petrov 2002]. Abbildung 4-3 zeigt die Wärmeleitfähigkeiten und spezifischen Wärmekapazitäten der am Standort angetroffenen Gesteinsarten als Funktion der Temperatur. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt erwartungsgemäß mit der Temperatur ab während die spezifische Wärmekapazität ansteigt.

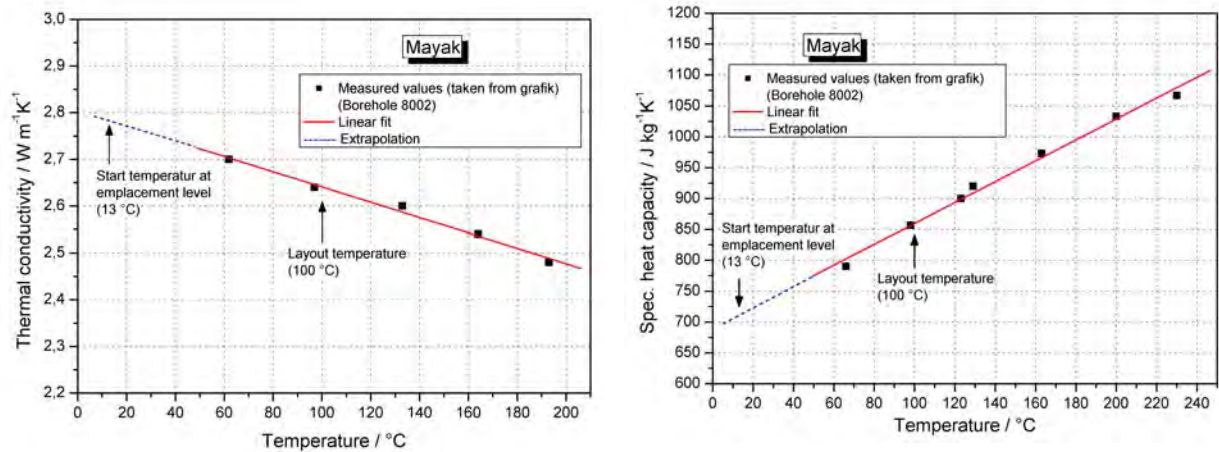


Abb. 4-3: Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität der am Standort Majak ange-troffenen Gesteinsarten als Funktion der Temperatur.

Die Messdaten für den Standort Majak wurden mittels Funktionen der Gestalt

$$\lambda = a + bT \quad \text{für die Wärmeleitfähigkeit und} \quad (4.1)$$

$$c_p = a + bT \quad \text{für die spez. Wärmekapazität} \quad (4.2)$$

mathematisch beschrieben und als Stoffgesetze in den Computercode implementiert.

Die Wärmeleitfähigkeit von Bentonit wird mit Hilfe von Gleichung (4.3) berechnet. Hierbei handelt es sich um einen empirischen Zusammenhang, der aus einer Reihe von Laborversuchen ermittelt wurde [Kahr & Müller-Von Moos 1982], [Knutsson 1983], [Börgesson 1988], [Börgesson et al. 1994].

$$\lambda = -a_1 + a_2 \rho + a_3 w \rho^3 + a_4 \sqrt{T} + a_5 P \quad (4.3)$$

mit:

- ρ = Dichte / kg m⁻³
- w = Wassergehalt / -
- T = Temperatur / °C
- P = Druck / MPa
- a_i = Empirische Konstanten / -

Die Werte für die Wärmeleitfähigkeit bewegen sich im Bereich von 0,7-1,3 W m⁻¹K⁻¹ und liegen damit etwa um den Faktor 3 niedriger als die des Wirtsgesteins.

Die spezifische Wärmekapazität wird ebenfalls anhand eines empirischen Zusammenhangs gemäß Gleichung (4.4) berechnet [Kahr & Müller-Von Moos 1982], [Knutsson 1983], [Börgesson 1988], [Börgesson et al. 1994], wobei ein Einbauwassergehalt von 10% angenommen wurde.

$$c_p = (c_B + c_w w_B) / (1 + w_B) \quad (4.4)$$

mit:

c_B	=	Spezifische Wärmekapazität von Bentonit
c_w	=	Spezifische Wärmekapazität von Wasser
w_B	=	Wassergehalt im Bentonit

4.3.1.4 Modellgeometrie

Wie bereits in Teil A Kap. 3.1.4.5 dargelegt, wurde der Modellierung eine hexagonale Anordnung der Einlagerungsbohrlöchern zugrunde gelegt. Die Modellierung erfolgte wie für Krasnojarsk mit dem Programmsystem FLAC3D [Itasca 2000].

4.3.2 Berechnungsergebnisse

Basierend auf den Ergebnissen der Auslegungsberechnungen für das Nishnekansker Granitmassiv (vgl. Teil A, Kap. 3.1.4.6) wurden zunächst Berechnungen angestellt unter der Annahme einer Einlagerung von zwei Behältern pro Bohrloch. Damit sollte geprüft werden, ob bei der leicht unterschiedlichen Wärmeleistung der Behälter und den veränderten thermischen Gesteinsparametern die Auslegungstemperatur von 100°C nicht überschritten wird. Der Einbau eines thermischen Isolators wurde in gleicher Weise vorausgesetzt wie bei den Berechnungen zum Nishnekansker Granitmassiv (vgl. Teil A Kap. 3.1.4). Abbildung 4-4 zeigt den Temperaturaufbau an der Grenze zwischen Isolator und Bentonit. Das Temperaturmaximum wird nach etwa 6 Jahren erreicht und verbleibt deutlich unterhalb von 100°C.

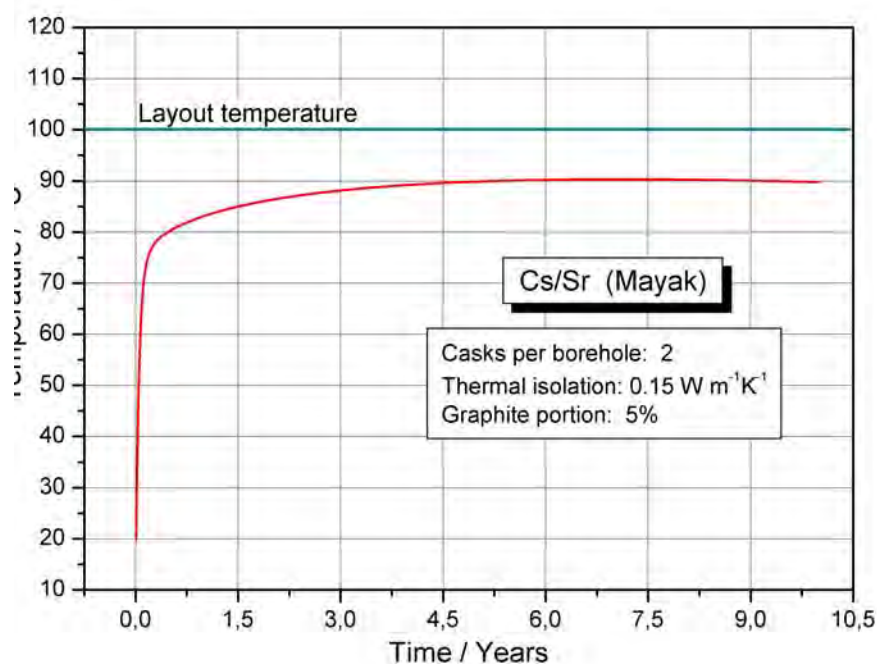


Abb. 4-4: Zeitlicher Temperaturaufbau an der Grenze zwischen Isolator und Bentonit

Die Grenztemperatur wird also unter den gegenüber dem Nishnekansker Granitmassiv veränderten Bedingungen am Standort Majak mit der 2-Behälter-Variante nicht überschritten.

Nach den Berechnungen zur Wärmeentwicklung an einem einzelnen Bohrloch, bei denen die Auslegungstemperatur unter den oben genannten Bedingungen nicht überschritten wird, wurden Berechnungen durchgeführt, um zu ermitteln, in welchen Mindestabständen weitere Bohrungen mit gleichen Wärmequellen bzw. Einbaukonfigurationen niedergebracht werden können ohne dass die Überlagerung der Wärmeausbreitung zu einer Erhöhung der maximalen Temperatur im Bentonit führt.

Der Mindestabstand zweier Bohrungen ergab sich aus den in Analogie zu den in Teil A durchgeführten Berechnungen zu 15 Meter. Tabelle 4-1 zeigt die relevanten Ergebnisse im Überblick.

	Standort Majak
Behälterzahl pro Bohrloch	2
Zwischenlagerzeit der Behälter	50 Jahre
Max. Temperatur Behälteroberfläche	390 °C
Minimaler Bohrlochabstand	15 m
Erforderliche flächenmäßige Ausdehnung	8,3 Mio. m ²

Tabelle 4-1: Ergebnisse der thermischen Auslegung für den Standort Majak.

5 STRÖMUNGS- UND TRANSPORTMODELLIERUNGEN FÜR DEN STANDORT MAJAK

Mit dem Programm FEFLOW wurden erste orientierende Rechnungen zur Grundwasserströmung und zum Schadstofftransport durchgeführt [Jagelke et al. 2004]. Das erstellte zweidimensionale Grundwasserströmungsmodell wurde dabei schrittweise um den Schadstofftransport ohne und später unter Berücksichtigung des natürlichen Wärme-gradienten im Gestein erweitert. Mit diesen Realisationen soll gezeigt werden, dass auf der Grundlage der derzeit zur Verfügung stehenden Standortdaten realistische Simulationsergebnisse erzielt werden können. Die durch die Einleitung flüssigen radioaktiven Abfalls aus der Wiederaufbereitung in den See Karachai verursachte großräumige Verunreinigung des Aquifers fand bisher noch keine Berücksichtigung. Eine Modellierung dieser Schadstofffahne, welche eine höhere Dichte aufweist als das Grundwasser ist modelltechnisch jedoch möglich und zudem von großem Interesse, da durch das großangelegte und regelmäßig beprobte Messstellennetz in diesem Gebiet eine Modellkalibrierung und spätere Validierung möglich wird.

5.1 Das Untersuchungsgebiet

In Abbildung 5-1 ist die Umgebung der Produktionsvereinigung Majak in einem Umkreis von 15 bis 20 km dargestellt. Das hier anstehende Gestein ist zum größten Teil vulkanogenen Ursprungs und wird von zahllosen Klüften zergliedert, vgl. Kapitel 2.

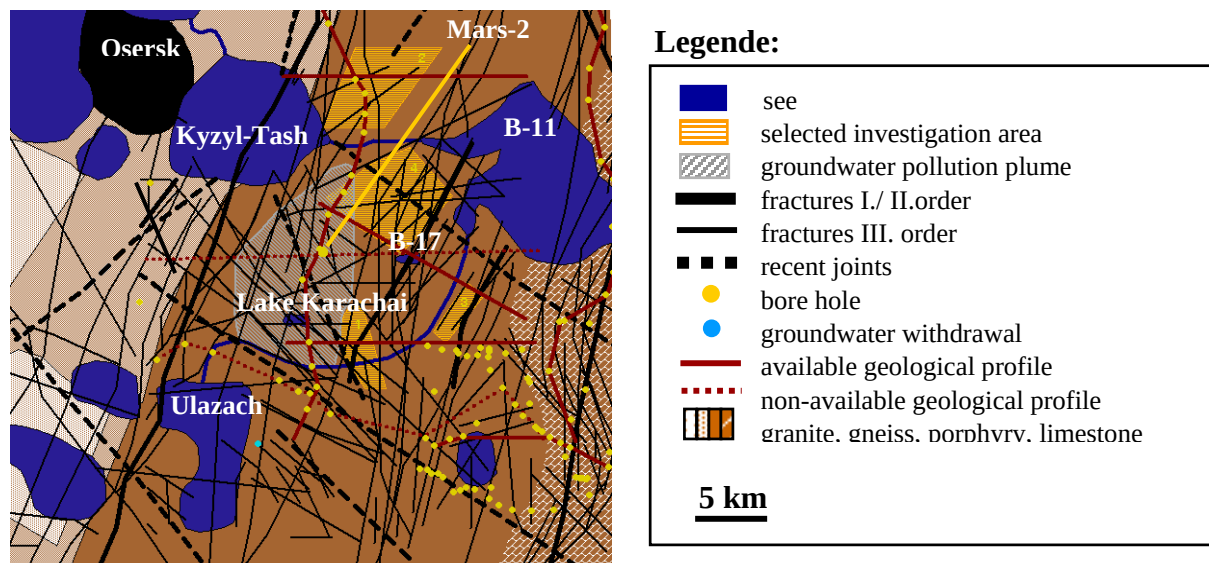


Abb. 5-1: Das Untersuchungsgebiet Majak

In Abbildung 5-2 ist eine zweidimensionale etwa 800 m breite und 1 000 m tiefe Prinzipskizze dargestellt, welche die hydrogeologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet wiedergibt. Der Untergrund teilt sich demnach in vier Teilbereiche auf. Diese unterscheiden sich in ihren hydraulischen Eigenschaften. Die Deckschicht besteht zunächst aus tonig-lehmigen bzw. kiesig-schotterigen Sedimenten und daran anschließend aus stark verwitterten Porphyr. Zusammen können diese beiden Schichten bis in eine Tiefe von etwa 100 m reichen. Die beiden unteren Schichten bestehen aus weitgehend intaktem unverwittertem Porphyr und unterscheiden sich in ihrer Gesteinsdurchlässigkeit. Das Ausgangsgestein wurde bis in 1km Tiefe durch Bohrkern nachgewiesen und wird von Klüften stark zergliedert. Die dargestellten hydrogeologischen Verhältnisse bilden die Grundlage für das im Folgenden beschriebene Modell. Die Rechnungen wurden mit dem Programm FEFLOW durchgeführt.

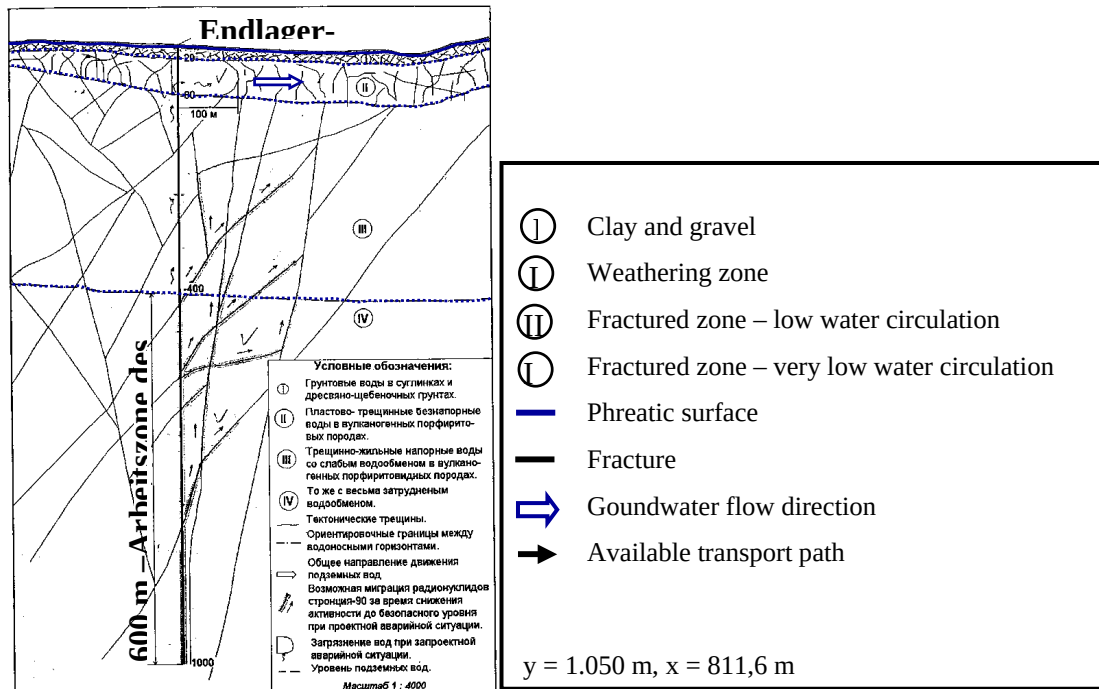


Abb. 5-2: Schema eines geologischen Profils [VNIPIPT 2002]

5.2 Das hydrogeologische Strukturmodell

Das geologische Strukturmodell basiert auf dem in Abbildung 5-2 dargestellten Profilschnitt. Es enthält die vier hydrogeologischen Teilbereiche und eine Auswahl von fünf steil einfallende Klüften mit Einfallswinkeln zwischen 50° und 90°. Modelliert werden somit poröse sowie geklüftete Medien.

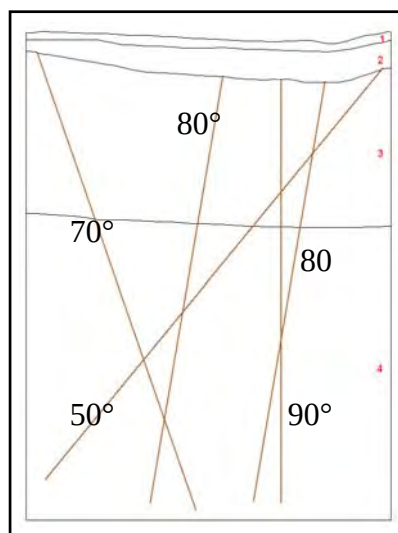


Abb. 5-3: Untergliederung des Modellgebietes in vier Zonen unterschiedlicher hydraulischer Eigenschaften und Kluftauswahl

Den einzelnen Schichten wurden Bereiche von Durchlässigkeitsbeiwerten zugewiesen, die sich an den aus russischen Feldmessungen im Gebiet Krasnojarsk gewonnenen Werten [VNIPIPT 2002] orientieren (vgl. Tabelle 5-1 und Abbildung 5-4). Aufgrund der Tatsache, dass der Porphyr im Gebiet Majak eine dichtere Gesteinsmatrix aufweist als der Granit im Nizhne-

kansker Massiv von Krasnojarsk, wird für diesen jeweils der untere Wert des Durchlässigkeitsspektrums verwendet. Die für die Modellierung verwendeten Werte sind farblich hervorgehoben.

Zone	Beschreibung	Tiefe [m]	K _f -Wert [m/d]	K _f -Wert [m/s]
1	tonig- kiesiges Sediment	bis 100m	$10^{-1} - 1,8$	$1,16 \cdot 10^{-6} - 2,08 \cdot 10^{-5}$
2	Porphy (verwittert)		$5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-1}$	$5,79 \cdot 10^{-8} - 5,79 \cdot 10^{-6}$
3	Porphy	nachgewiesen	$10^{-5} - 3 \cdot 10^{-2}$	$1,16 \cdot 10^{-10} - 3,47 \cdot 10^{-7}$
4	(massiv)	bis 1000m	$10^{-9} - 3 \cdot 10^{-7}$	$1,16 \cdot 10^{-14} - 3,47 \cdot 10^{-12}$

Tabelle 5-1: Gebirgsdurchlässigkeiten mit Angaben zu den im Modell verwendeten Werten

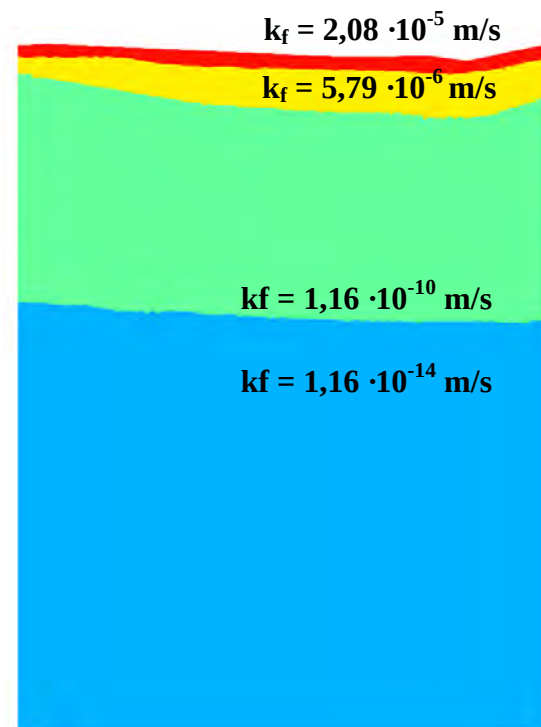


Abb. 5-4: Teufenspezifische Differenzierung der Gesteinsdurchlässigkeit

Laut russischen Angaben beträgt die Kluftweite in diesem Gebiet zwischen 0,1 und 5 mm [VNIPIPT 2002]. In der Modellierung werden die Klüfte mit einer Öffnungsweite von 5mm belegt. Der Wert für die Kluftdurchlässigkeit wurde mit $7,5 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ den russischen Daten entnommen [VNIPIPT 200203]. In Tabelle 5-2 sind die verwendeten Kluftparameter aufgeführt.

K _f -Wert [m d ⁻¹]	K _f -Wert [m s ⁻¹]	Kluftweite [mm]
$7,5 \cdot 10^{-6}$	$8,7 \cdot 10^{-11}$	5

Tabelle 5-2: Parameter zur Modellierung der Klüfte

5.3 Stationäre Strömungsmodellierung ohne Berücksichtigung des natürlichen Wärmefeldes

Der modellierte Vertikalschnitt umfasst eine Fläche von ungefähr $0,85 \text{ km}^2$ und wurde mit einem Finiten-Elemente-Netz vermascht, das aus rund 90.000 Elementen und ca. 45.000 Knoten besteht. Im Bereich des Kluftnetzwerks und den Schichtgrenzen wurde eine Verfeinerung des Gitternetzes vorgenommen, um eine numerische Stabilität im Bereich hoher Konzentrationsgradienten zu gewährleisten. Als hydraulische Randbedingungen wurden randliche Potentialhöhen von 1 048,8 m auf der linken Seite bzw. 1 048,4 m auf der rechten Seite angenommen, wodurch ein äußerst geringes hydraulisches Potential von $4,9 \cdot 10^{-4}$ und damit ein Grundwasserfluss impliziert wird. Über den oberen Modellrand wird eine kontinuierliche Grundwasserneubildung von $1,13 \cdot 10^{-4} \text{ m/d}$ angenommen, während der untere Modellrand impermeabel ist. Die Grundwasserneubildung entspricht damit 10% der mittleren Niederschlagsmenge. Abbildung 5-5 zeigt sowohl die teufenabhängige Spezifizierung der Gesteinsdurchlässigkeiten (links) als auch die gewählten hydraulischen Randbedingungen (rechts). Die Ergebnisse lassen einen deutlichen Unterschied zwischen dem Strömungsverhalten im porösen oberflächennahen Grundwasserleiter gegenüber dem geklüfteten tieferen Festgesteinsgrundwasserleiter erkennen (s. Abbildung 5-6). Die Klüfte sind durch die in ihnen stattfindende Strömung deutlich erkennbar. Die Berechnungen zeigen, dass die Klüfte in der 3. und 4. Teufen-Zone in starkem Maße zur Gebirgsdurchlässigkeit beitragen.

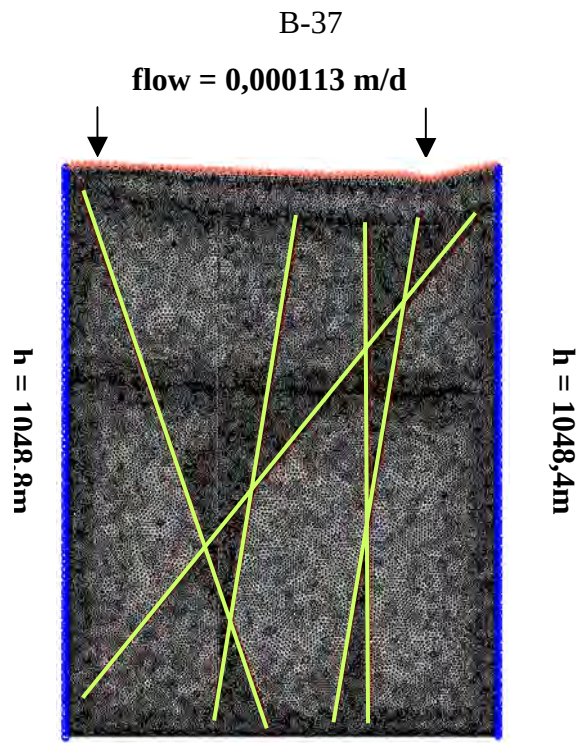


Abb. 5-5: oberer Modellrand (rot): konstante Grundwasserneubildung
seitliche Modellränder (blau): Grundwasserstandsangabe

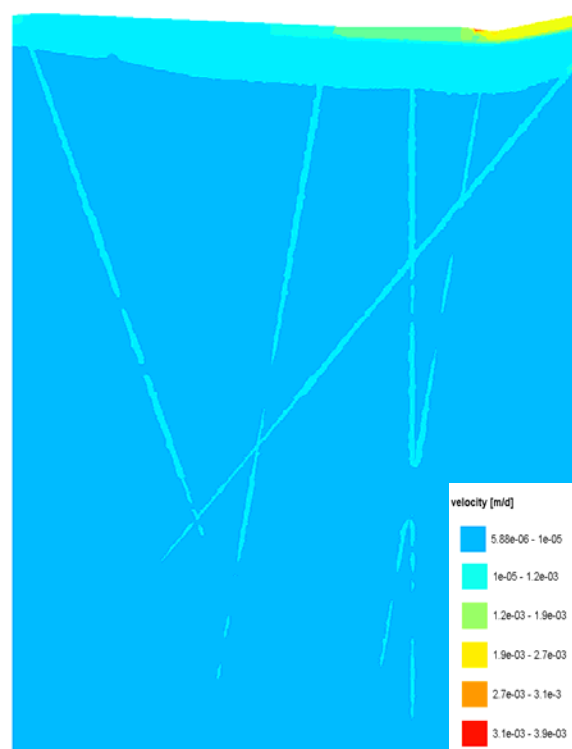


Abb. 5-6: Die Ergebnisse zum stationären Strömungsverhalten ohne Berücksichtigung des Wärmetransportes

5.4 Transportmodellierung ohne Berücksichtigung des natürlichen Wärmefeldes

Das in Kapitel 5.3 beschriebene Strömungsmodell wurde in einem weiteren Schritt zu einem Transportmodell erweitert. Dafür wurde in dem Kluftsystem eine konstante Schadstoffquelle angenommen und der Transport des Tracers durch den Gesteinskörper verfolgt. Der Schad-

stoff unterliegt weder Zerfall noch Sorption und erfährt somit keine Retardation. Wie erwartet findet die Schadstoffausbreitung aufgrund der großen Differenzen zwischen Matrix- und Kluftdurchlässigkeit nahezu ausschließlich im Kluftsystem statt (Abbildung 5-7). Die Effekte der Matrixdiffusion und Dispersion sind vernachlässigbar. Bereits nach weniger als 40 Jahren findet ein erheblicher Schadstoffaustrag an die Oberfläche bzw. die Deckschicht statt. Die Verschneidung mit Klüften absteigender Grundwasserfließrichtung führt aufgrund der Überlagerung von Schadstoffkonzentrationen aus verschiedenen Klufrichtungen zunächst zu einer schwankenden Schadstoffkonzentration innerhalb des Kluftsystems. Dieses Phänomen wurde bereits in [CGER 1996] beschrieben und wird in Durchbruchkurven sichtbar (vgl. Abbildung 5-7).

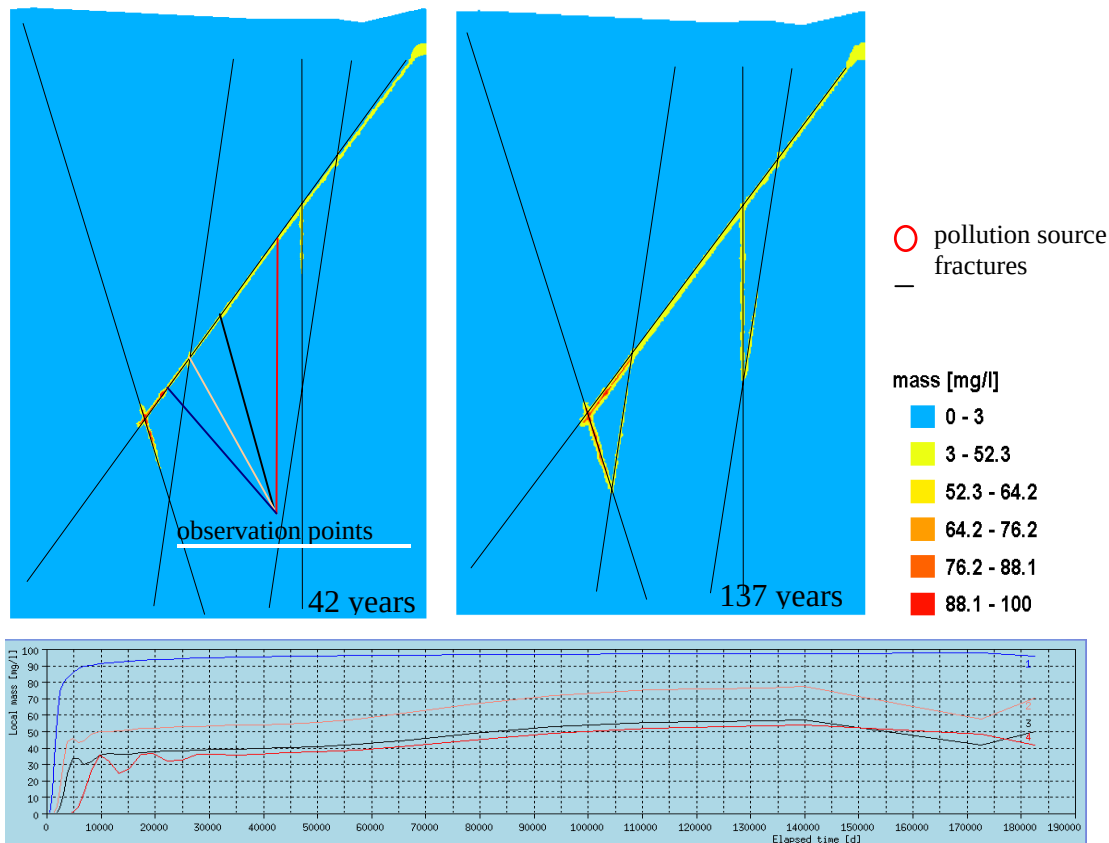


Abb. 5-7: oben: Räumliches Stoffausbreitungsverhalten im Gesteinskörper
unten: Durchbruchskurven verschiedener Beobachtungspunkte

4.5 Transportmodellierung unter Berücksichtigung des natürlichen Wärmefeldes

In einem weiteren Schritt wurde das bestehende und in Kapitel 5.3 beschriebene Strömungsmodell um den Einfluss des natürlichen Wärmefeldes erweitert. Dazu wurde am oberen Modellrand eine Temperatur von konstanten 2°C angegeben (s. Tabelle 5.3). Unter der Annahme eines Wärmegradienten von $0,03 \text{ m}^{-1}$ wurde der untere Modellrand mit einer Temperatur von 33,5°C belegt. Die eingegebenen Randbedingungen sowie das sich daraufhin ausbildende Wärmefeld sind in der Abbildung 5- dargestellt. Über die in das Modell eingegebenen thermischen Parameter informiert die Tabelle 4-3. Für das Porphyrgestein konnte dabei auf russische Angaben zurückgegriffen werden [VNIPIPT 2002]. Abbildung 4-8 zeigt die sich ausbildenden Isothemen.

	Wasser (20°C)	Gestein
spez. Wärmekapazität	4,17 J / (cm ³ · K)*	733 J / (kg · K)°
Wärmeleitfähigkeit	59,7 W / (cm · K)*	2,66 W / (m · K)°

* [Diersch 2004]

° [VNIPIPT 2002]

Tabelle 5-3: Parameter zur Wärmeausbreitung

Nach [Bear et al. 1993] ist die longitudinale Dispersion für Stoff- und Wärmetransport größenmäßig vergleichbar. Die sowohl im Wasser als auch im Gestein stattfindende Wärmediffusion aufgrund unterschiedlicher Dichten führt zu einer intensiven thermischen Durchmischung, so dass die Wärmedispersion bei natürlichen Strömungsverhältnissen im Untergrund im Vergleich zu den advektiven und diffusiven Wärmetransportprozessen in der Regel nur eine untergeordnete Rolle spielt. Folglich wird die Dispersion der Wärme analog zum Stofftransport durch eine longitudinale Dispersionslänge von 5 m und einer transversale Dispersionslänge von 0,5 m berücksichtigt.

Die sich ausbildende Grundwasserströmung ist eine nicht-lineare Überlagerung der Potentialströmung mit der aufgrund des Wärmefeldes entstehenden vertikal nach oben gerichteten Strömung.

2°C

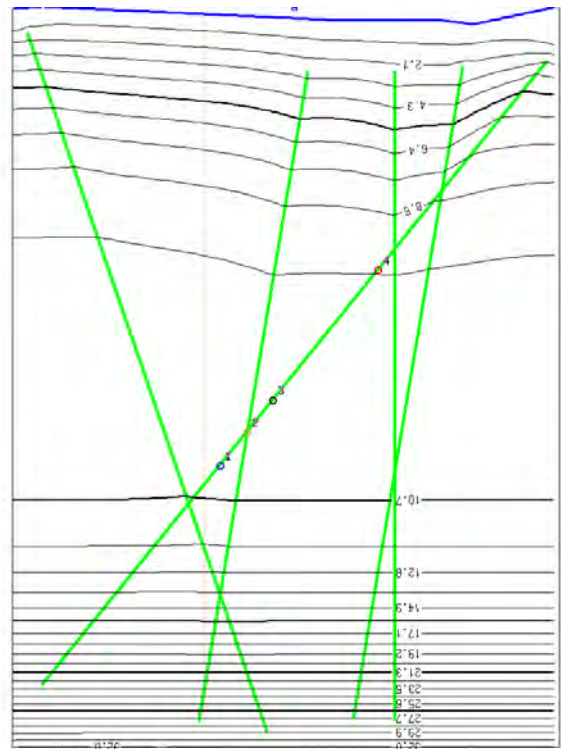
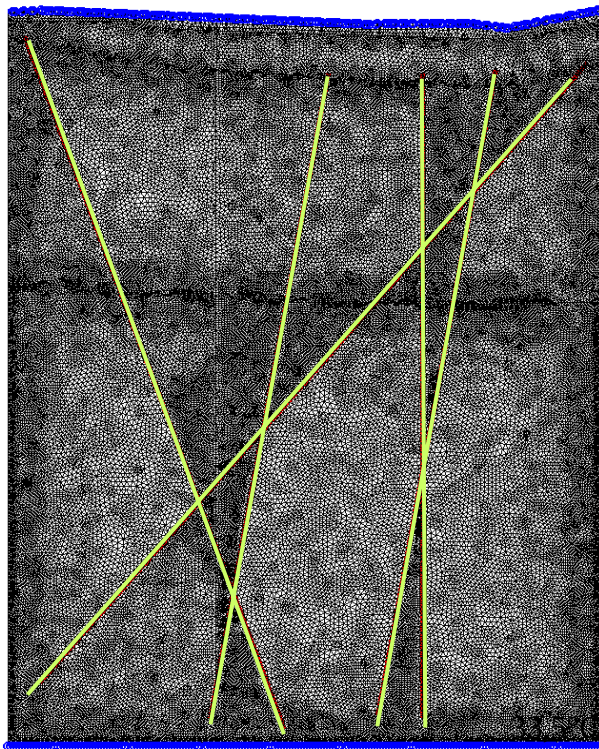


Abb. 5-8: links: Wärme-Randbedingungen
rechts: Ausbildung der Isothermen

Der Schadstoffeintrag wurde an zwei unterschiedlichen Orten zum einen der Gesteinsmatrix und zum anderen innerhalb des Kluftsystems untersucht. Es zeigt sich, dass der Schadstoff auch in diesem Modell nahezu ausschließlich innerhalb des Kluftsystem transportiert wird, jedoch einen anderen Transportweg einschlägt als in der Transportmodellierung ohne das natürliche Wärmefeld, vgl. Abbildung 5-9 und Abbildung 5-10. Dies lässt sich durch den auf-

grund der stärkeren Kluftneigung betragsmäßig größeren Wärmegradienten und damit schnelleren Strömungsgeschwindigkeit in dieser erklären. Nur sehr geringe Diffusionsvorgänge führen zu einem Stofftransport in die angrenzende Gesteinsmatrix.

Liegt die Stoffquelle jedoch in der Gesteinsmatrix, so findet aufgrund der geringen Matrixdurchlässigkeit lediglich ein sehr langsamer diffusiver Transport in die Gesteinsmatrix statt. Die gleichmäßige radiale Diffusion des Schadstoffs in die Gesteinsmatrix wird von der Grundwasserströmungsrichtung in dieser leicht überprägt. Aufgrund der geringen Gebirgsdurchlässigkeit in der Gesteinsmatrix bleibt die Schadstoffausbreitung in ihrer Ausdehnung auch nach etwa 500 Jahren auf 100 bis 120 m beschränkt, vgl. Abbildung 5-10.

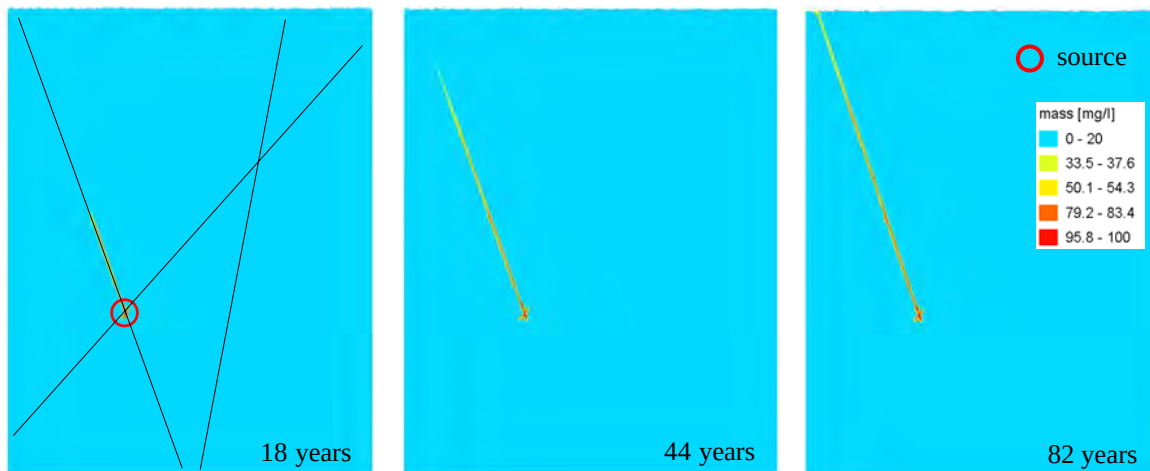


Abb. 5-9: Schadstoffausbreitung innerhalb des Kluftsystems unter Einfluss des natürlichen Wärmefeldes

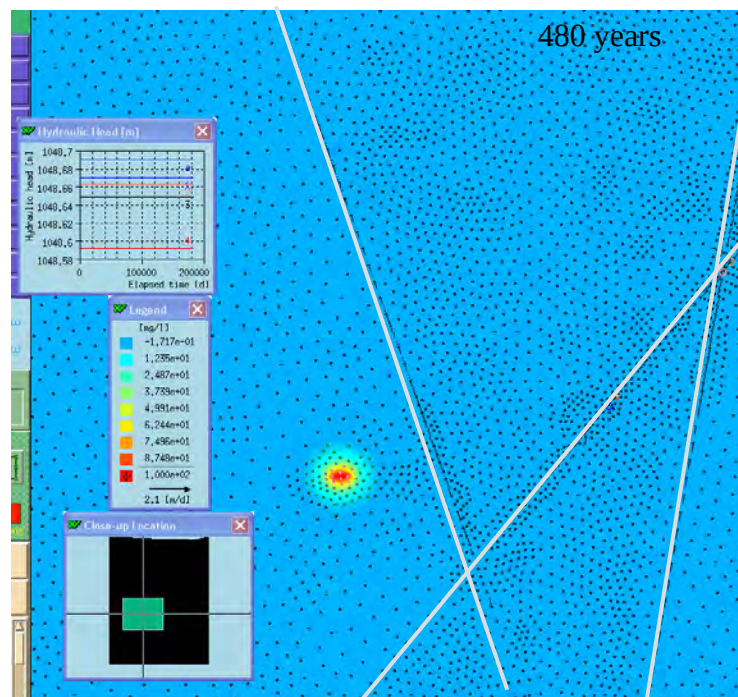


Abb. 5-10: Schadstoffausbreitung innerhalb der Gesteinsmatrix unter dem Einfluss des natürlichen Wärmefeldes

5.5 Diskussion und Ausblick

Die durchgeführten Simulationen zum Schadstofftransport mit und ohne Berücksichtigung des thermisch induzierten Dichteeffektes im Untersuchungsgebiet Majak befinden sich noch in ihrer Anfangsphase. Es hat sich jedoch bereits gezeigt, dass das verwendete Programm FEFLOW in der Lage ist, die vorhandenen feldgeologischen Informationen in einem schlüssigen 1-2 (3D)- Strukturmodell nachzubilden und nachvollziehbare Modellergebnisse zu erzielen. Die dokumentierten Realisationen basieren auf einem 2-d Profilmodell, in dem das Kluftsystem als 1-d Elemente integriert sind. Schrittweise sollte aus diesem ein 3-d Modellansatz entwickelt werden, um das wasserführende Kluftsystem auch räumlich erfassen zu können. Zudem werden dadurch die Voraussetzungen geschaffen, den See Karachai mit dem dortigen Einstrom der gegenüber dem Grundwasser dichteren Schadstofffahne in die Modellierung mit einzubeziehen. Das großangelegten und regelmäßig beprobte Messstellennetz bietet zudem die Möglichkeit eine Modellkalibrierung und spätere Validierung vorzunehmen.

Der direkte Vergleich der Schadstoffausbreitung im Kluftsystem und in der Gesteinsmatrix unter dem Einfluss des natürlichen Wärmegradienten verdeutlicht die Bedeutung einer Verifikation der hydrogeologischen Informationen bezüglich feldgeologischer Erhebungen der räumlichen Orientierung und der Parametrisierung des vorhandenen Kluftsystems. Es wird daher die Entwicklung eines Kluftnetzes mit kluftstatistischen Analysen vorgeschlagen.

6 LITERATUR

- Aduschkin, V. V. et al. 1997: Aduschkin, V. V. Loktev, D. N. & Spivak, A. A.: Diagnose von Gesteinsmassiven des Territoriums der PO „Majak“ auf der Grundlage der Resultate des Monitorings von Relaxationsprozessen (russ.). Voprosy radiacionnoj besopasnosti (1997)1, 18-30
- Bear et al. 1993: Bear, J., C.-F. Tsang & de Marsily, G.: Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock.- Academic Press, San Diego, 1993
- Börgesson 1988: Börgesson, L., Modelling of buffer material behaviour, some examples of material models and performance calculations, SKB Technical Report, Lund, 1988 Sweden.
- Börgesson 1994: Börgesson, L., Fredrikson, A., Johannesson, L.-E Heat conductivity of buffer materials, SKB Technical Report, Lund 1994, Sweden.
- CGER 1996: (Commission of Geosciences, Environment and resources): CGER (Commission of Geosciences, Environment and resources) Rock Fractures and Fluid Flow: Contemporary Understanding and Applications.- National Academy Press, Washington, D.C., 1996.
- Diersch 2004: Diersch, H.-J.: FEFLOW 5.1 Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System, User's Manual, 2004
- Filbert 1998: Filbert, W., Engelmann, H. J. DBE, Aktualisierung des Konzepts „Endlager GORleben“, Abschlussbericht, 1998, Peine.
- Itasca 2000: Itasca Consulting Group, Inc. 2000: FLAC3D, User's Guide.
- Kahr et al. 1982: G. Müller-Von Moos, M. 1982: Wärmeleitfähigkeit von Bentonit MX80 und von Montigel nach der Heizdrahtmethode, Institut für Grundbau und Bodenmechanik ETH Zürich, Nagra Technischer Bericht 82-06, Baden.
- Knutsson 1983: Knutsson, S. On the thermal conductivity and thermal diffusivity of highly compacted bentonite, SKBF/KBS Technical Report, 1983.
- Konenko et al. 1990: Kononenko, I. K., Chalevin, N. K., Bljumin, M. A. & Jashchenko, V. R.: Rezente Geodynamik des Urals (russ.). Sverdlovsk, Ural-Abteilung AdW SSSR (1990), 94 S.
- Kotschkin et al. 1997: Kotschkin, B. T., Patyk-Kara, N. G. & Spasskaja, I. I.: Langfristige Prognose der Denudation bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle (am Beispiel des Südurals) (russ.). Geologija rudnych mestorozhdenij 39(1997), 193-205
- Laverov et al. 2001: Laverov, N. P., Velitschkin, V. I., Omeljanenko, B. I., Petrov, V. A. & Tarasov, N. N.: Neue Herangehensweisen an die unterirdische Endlagerung hochaktiver Abfälle in Russland (russ.). Geoekologija (2000)1, 3-12

- Laverov et al. 2002: Laverov, N.P., Petrov, W.A. 2002: Petrophysikalische Eigenschaften der Granitoide des Nishnekansk Massivs - zur Frage der Standortwahl für die Endlagerung hochaktiver Abfälle und abgebrannter Brennelemente, *Geologie, Ingenieurgeologie, Hydrogeologie, Geokryologie*, Nr. 4, S. 293-310.
- Laverov et al. 2003: Laverov, N. P., Petrov, V. A., Velitschkin, V. I., Poluektov, V. V., Scharikov, A. V., Nasimov, R. M., Djaur, N. I., Rovnyj, S. I., Droschko, E. G. & Ivanov, I. A.: Petrophysikalische und mineralogisch-chemische Aspekte der Standortauswahl für die HAW-Isolierung in den Metavulkaniten der PO "Majak", Süduralsk (russ.). *Geokologija* (2003)1, 5-22
- Minaev et al. 2001: Minaev et al., Proceedings, WM'01 Conference Tucson, February 25-March 1, 2001
- Novejschij Katalog 1977: Der neueste Katalog von starken Erdbeben auf dem Territorium der UdSSR seit uralten Zeiten bis 1975 (russ.). Moskau, Nauka (1977), 535 S.
- Petrov 2001: Petrov, V. A.: Untersuchungen der petrophysikalischen Eigenschaften und des Spannungs-Deformations-Zustandes der Gesteine im Gebiet der PO "Majak" und des GChK in Verbindung mit der Auswahl von Polygonen für die Isolation von HAW (russ.). *Geologija rudnych mestorozhdenij* 43(2001)6, 478-494
- RADLEG, 1997: RADLEG project 245, <http://www.kiae.ru/radleg/ch7e.htm>
- Sagmeister 1999: Sagmeister, B. 1999: Mauersteine, wärmedämmend mit haufwerksporigem Leichtbeton, Sonderdruck aus BFT 7/99, Bauverlag GmbH, Walluf.
- Sheppard et al. 2001: Sheppard, R. G., Mathes, D. M., Bray, D. J. 2001: Properties and characteristics of graphite - thermal conductivity - 5th printing, Poco Graphite, Inc., Decatur, Texas, USA.
- Velichkin et al. 1993 : Velichkin, V. I. et al.: Einschätzung der Barriereigenschaften des geologischen Milieus des Gebietes der Produktionsvereinigung "Majak" auf der Grundlage geologischer, hydrogeologischer und petrologischer Untersuchungen (russ.). Moskau, IGM (1993)
- Velichkin et al. 1994 : Velichkin, V. I. et al.: Einschätzung der Barriereigenschaften des geologischen Milieus des Gebietes der Produktionsvereinigung "Majak" auf der Grundlage geologischer, hydrogeologischer und petrologischer Untersuchungen (russ.). Moskau, IGM (1994)
- Velichkin et al. 2003 : Velichkin, V. I., Petrov, V. A., Kotschkin, B. T. & Malkovskij, V. I.: Langfristige Prognose der Veränderung der Parameter des HAW-Einlagerungsmilieus im Gebiet der Produktionsvereinigung „Majak“ unter dem Einfluss geologischer Faktoren auf der Grundlage von Paläorekonstruktionen und einer mathematischen Modellierung (russ.). *Wiss. Bericht*, Moskau, IGM (2003), 96 S.

VNIPI PT 2002:

VNIPI PT, Standortspezifische Daten für den Bereich des
Nishnekansker Granitmassivs und den Standort Majak,
schriftliche Mitteilung 2002

7 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1-1:	Standort der Produktionsvereinigung Majak.....	B-3
Abb. 1-2:	Majak - Radiochemische Produktionsanlagen für die Plutoniumgewinnung ...	B-4
Abb. 1-3:	Majak RT-1 Zwischenlager für ausgediente Brennelemente	B-4
Abb. 1-4:	Majak RT-1 Transportcontainer für ausgediente Brennelemente	B-5
Abb. 1-5:	Majak - Zwischenlager für verglaste HLW.....	B-5
Abb. 2-1:	Zeitliche Entwicklung der Wärmeleistung der verglasten HLW-Fraktionen	B-10
Abb. 3-1:	Lage der vom IGM für Detailuntersuchungen empfohlenen potenziellen Endlagerstandorte im Umfeld der Produktionsvereinigung Majak (aus: [Laverov et al. 2000]).....	B-11
Abb. 3-2:	Tektonisches Schema des Urals und der östlichen Randgebiete der Osteuropäischen Plattform (Kononenko et al. 1990, aus: Velichkin et al. 2003).....	B-12
Abb. 3-3:	Blockstruktur und regionale Störungszonen im Umfeld der Produktionsvereinigung Majak, Südural (aus: [Laverov et al. 2000]).....	B-14
Abb. 3-4:	Schema zur geologischen Struktur und zum tektonischen Störungsgrad sowie zum Spannungszustand im Gebiet der Produktionsvereinigung Majak (aus: Velichkin et al. 2003)	B-17
Abb. 3-5:	Geologische Schnitte zur Illustration der Rolle der Argajaschsker Überschiebung im Untersuchungsgebiet (Lage der Schnitte: siehe Abb. 3-3).....	B-18
Abb. 3-6:	Schema zur Seismizität der Mittel- bis Südural-Region (nach Angaben aus: Novejschij Katalog 1977, mit Ergänzungen, aus: Velichkin et al. 2003).....	B-21
Abb. 3-7:	Seismische Aktivitäten im Umfeld des Gebietes der Produktionsvereinigung Majak, im Vergleich zum europäischen Teil Russlands, zum Ural und zu Westsibirien (nach Angaben aus: Novejschij Katalog 1977, aus: Velichkin et al. 2003).....	B-22
Abb. 3-8:	Kliamdiagramm Tscheljabinsk.....	B-23
Abb. 4-1:	Angenommene Einlagerungsteufe und lokale Temperaturverhältnisse gemäß entsprechender, als repräsentativ angenommener, Messungen in der Bohrung 1K-700 [VNIPI PT 2002].....	B-28
Abb. 4-2:	Volumenspezifische Wärmeleistung der Cs/Sr Abfallfraktionen als Funktion der Zeit im Vergleich zu anderen zur Endlagerung vorgesehener Abfallbehälter.....	B-29
Abb. 4-3:	Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität der am Standort Majak angetroffenen Gesteinsarten als Funktion der Temperatur.	B-30
Abb. 4-4:	Zeitlicher Temperaturentwurf an der Grenze zwischen Isolator und Bentonit	B-31
Abb. 5-1:	Das Untersuchungsgebiet Majak.....	B-33

Abb. 5-2:	Schema eines geologischen Profils [Laverov et al. 2003].....	B-34
Abb. 5-3:	Untergliederung des Modellgebietes in vier Zonen unterschiedlicher hydraulischer Eigenschaften und Kluftauswahl	B-34
Abb. 5-4:	Teufenspezifische Differenzierung der Gesteinsdurchlässigkeit	B-35
Abb. 5-5:	oberer Modellrand (rot): konstante Grundwasserneubildung seitliche Modellränder (blau): Grundwasserstandsangabe	B-37
Abb. 5-6:	Die Ergebnisse zum stationären Strömungsverhalten ohne Berücksichtigung des Wärmetransportes	B-37
Abb. 5-7:	oben: Räumliches Stoffausbreitungsverhalten im Gesteinskörper unten: Durchbruchskurven verschiedener Beobachtungspunkte	B-38
Abb. 5-8:	links: Wärme-Randbedingungen rechts: Ausbildung der Isothermen	B-39
Abb. 5-9:	Schadstoffausbreitung innerhalb des Kluftsystems unter Einfluss des natürlichen Wärmefeldes.....	B-40
Abb. 5-10:	Schadstoffausbreitung innerhalb der Gesteinsmatrix unter dem Einfluss des natürlichen Wärmefeldes.....	B-40

8 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2-1: Majak – Anfall endzulagernder Abfälle aus der Anlage RT-1.....	B-7
Tabelle 2-2: Majak – Aktivität und Radionuklidgehalt der verglasten HLW	B-8
Tabelle 2-3: Majak – Aktivität und Radionuklidgehalt der Gebinde mit fraktionierten HLW	B-8
Tabelle 2-4: Konzentration und Aktivität von Aktinoiden im bestrahlten Kernbrennstoff WWER-440	B-9
Tabelle 2-5: Majak – Übersicht über das endzulagernde Inventar.....	B-10
Tabelle 3-1: Durchschnittliche chemische Zusammensetzung der silurisch-devonischen Metavulkanite aus dem Territorium der Produktionsvereinigung Majak (Angaben in Gew.%; (aus: [Laverov et al. 2003])	B-15
Tabelle 3-2: Angaben zur Kluftorientierung und -ausbildung in den vulkanogen-sedimen- tären Gesteinen im Umfeld der Produktionsvereinigung Majak.....	B-19
Tabelle 3-3: Mittelwerte der physikomechanischen Parameter für die vulkanogen- sedimen-tären Gesteine im Umfeld der Produktionsvereinigung Majak	B-24
Tabelle 3-4: Festigkeitsgrenzwerte der Andesit-Basalte aus dem Majak-Umfeld	B-25
Tabelle 3-5: Zusammenstellung der wichtigsten physikomechanischen Kennwerte der Vulkanite aus dem Untergrund des Gebietes Majak, geordnet nach Festigkeitsgruppen der Gesteine (k. A. – keine Angaben).....	B-25
Tabelle 3-6: Temperatur-induzierte Veränderung der Wasserdurchlässigkeit von geschieften Tuffen aus dem Umfeld der Produktionsvereinigung Majak.....	B-26
Tabelle 4-1: Ergebnisse der thermischen Auslegung für den Standort Majak.	B-32
Tabelle 5-1: Gebirgsdurchlässigkeiten mit Angaben zu den im Modell verwendeten Werten	B-35
Tabelle 5-2: Parameter zur Modellierung der Klüfte.....	B-35
Tabelle 5-3: Parameter zur Wärmeausbreitung	B-39