



---

Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH

**ZWISCHENBERICHT ZUR BEGUTACHTUNG  
DES ENDLAGERS FÜR RADIOAKTIVE AB-  
FÄLLE**

**SCHACHTANLAGE KONRAD  
SALZGITTER**

**BEITRÄGE DER GRS ZUM TEIL 3:  
LANGZEITSICHERHEIT (GK-LSG)  
NUKLIDTRANSPORT**

GRS-A-1859 (Dezember 1991)

Auftrags-Nr.: 65 300



Anmerkung:

Dieser Bericht ist von der GRS im Auftrag des TÜV Hannover im Rahmen der Begutachtung Konrad erstellt worden. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

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

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Berechnung der Ausbreitung radioaktiver Stoffe</b>	<b>1</b>
1.1	Freisetzung radioaktiver Stoffe	1
1.1.1	Freisetzungs- und Transportrechnungen des Antragsteller	1
1.1.1.1	Vorgänge im Grubengebäude	1
1.1.1.2	Transportrechnungen für die Geosphäre	3
1.1.2	Freisetzungs- und Transportrechnungen im Gutachter-Modell	5
1.1.2.1	Vorgänge im Grubengebäude	5
1.1.2.2	Transportrechnungen für die Geosphäre	6
<b>2</b>	<b>Unterlagen</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Literatur</b>	<b>12</b>

## **ANHANG**

# **1 Berechnung der Ausbreitung radioaktiver Stoffe**

## **1.1 Freisetzung radioaktiver Stoffe**

### **1.1.1 Freisetzungs- und Transportrechnungen des Antragstellers**

#### **1.1.1.1 Vorgänge im Grubengebäude**

Zur Berechnung der Freisetzungsraten aus dem Endlager geht der Antragsteller von einem Bilanzraum aus, der den Endlagerbereich homogenisiert umfaßt. Die aus diesem Bilanzraum freigesetzten Radionuklide werden für die Transportrechnungen von Radionukliden vom Endlager zur Biosphäre in Quellterme umgesetzt.

Die Freisetzungsraten aus diesem Bilanzraum wurden vom Antragsteller mit Hilfe des Codes EMOS ermittelt /EU 76.1/. Die Bilanzierung erfolgte unter Berücksichtigung

- der Durchströmung des Endlagers,
- des Wasservolumens im Endlager und
- der im Endlager zur Verfügung stehenden Sorbensmasse.

Bei der Ermittlung des Aktivitätsstromes aufgrund der Mobilisierung der Radionuklide wurden die Sorption an Feststoffen, der radioaktive Zerfall und die Ausfällung durch Erreichen der Löslichkeitsgrenzen für chemische Elemente im Bilanzraum berücksichtigt. Ergebnis dieser Berechnungen ist der zeitliche Verlauf der Aktivitätsfreisetzung aus dem Bilanzraum in die Geosphäre.

Zur Festlegung der Quellterme für die Geosphärenrechnung hat der Antragsteller zwei Radionuklidgruppen unterschieden. Für die Spalt- und Aktivierungsprodukte wurde ein zeitlich konstanter Quellterm über eine Zeitspanne von 10 000 Jahren angesetzt. Die Vorgabe der Quellterme für die Aktiniden und deren Zerfallsprodukte erfolgte abschnittsweise in 5 Zeitbereichen in Form mittlerer Freisetzungsraten, die aus den EMOS-Rechnungen ermittelt wurden.

Den Ansatz eines zeitlich konstanten mittleren Quellterms für die Spalt- und Aktivierungsprodukte begründet der Antragsteller mit den Transportrechnungen, die z.B. für Jod keinen Einfluß der Freisetzungzeit auf die Maximalkonzentration in der Biosphäre aufweisen, weil die Freisetzungzeit klein gegenüber der Transportzeit der Radionuklide ist /EU 121.4/.

### Bewertung

Der Gutachter hat das Vorgehen des Antragstellers für die Gruppe der Spalt- und Aktivierungsprodukte exemplarisch für die Nuklide Jod, Selen und Zirkon anhand analytischer Lösungen der Transportgleichung überprüft. Sie bestätigen, daß die Variation der Freisetzungzeit von 500 Jahren bis 10 000 Jahren keinen wesentlichen Einfluß auf die Maximalkonzentration der Radionuklide in der Biosphäre ausübt. Gegen den Ansatz einer mittleren Freisetzungsrates über den Zeitbereich von 10 000 Jahren als Quellterm für die Geosphärenrechnung bestehen somit keine Einwände.

Zur Ermittlung der Freisetzungsrates der Aktiniden hat der Antragsteller das Endlager in einem Bilanzraum modelliert. Die verwendeten Bilanzgleichungen sind in der Unterlage (Kap. 7.2 in /EU 76.1) aufgeführt. Der Gutachter hat zur Überprüfung der Freisetzungsrates die Bilanzgleichungen in ein Rechenprogramm umgesetzt. Die Nachrechnungen mit den Daten des Antragstellers ergaben eine gute Übereinstimmung der Rechenergebnisse mit den zeitlichen Verläufen der Freisetzungsrates, die der Antragsteller mit EMOS ermittelt hatte /EU 341/. Die Bewertung der Bilanzgleichungen ergab, daß diese das Freisetzungverhalten gegenüber einer Beschreibung unter Berücksichtigung des advektiven Transportes und der Gesamtbilanzierung der Aktivitäten in der Flüssigkeit und im Versatz überschätzen.

In einer weiteren Gegenrechnung hat der Gutachter seinen Rechencode MARNIE /GRS 89/, der zur Beschreibung von Nuklidtransportvorgängen in einem laugengefüllten Endlager entwickelt wurde, eingesetzt. MARNIE behandelt neben dem advektiven Transport alle Barriereneffekte eines Endlagers. Das Endlager wurde zur Behandlung durch MARNIE in einem Bilanzraum diskretisiert. Folgende Daten wurden vom Antragsteller übernommen:

- Eine Sorbensmasse von  $3.43 \cdot 10^9$  kg
- die Durchströmungsrate von  $1\,620 \text{ m}^3/\text{a}$ ,

- eine Mobilisierungszeit der Aktiniden von 600 Jahren für zementierte Abfälle, die Zerfallsketten und Halbwertzeiten der Aktiniden,
- die Verteilungskoeffizienten für die Aktiniden.

Die Ergebnisse lagen unterhalb der Werte, die der Antragsteller ermittelte.

Gegen die Vorgehensweise des Antragstellers zur Ermittlung der Freisetzungsraten bestehen keine Einwände.

#### **1.1.1.2 Transportrechnungen für die Geosphäre**

Die Ermittlung der Radionuklidkonzentration im oberflächennahen Grundwasser erfolgt mit Hilfe von Transportrechnungen für die Geosphäre des Modellgebietes.

Der Antragsteller hat aus den Grundwasserrechnungen ( Kap. 3.1 in /EU 341/) mit Hilfe von Trajektorienberechnungen Laufwege von Partikeln (Tracer) identifiziert und als Freisetzungswegen für Radionuklide interpretiert. Das Transportverhalten der Radionuklide entlang dieser isolierten Wege wurde in eindimensionalen Rechnungen mit dem Code SWIFT simuliert. Die in den Trajektorienrechnungen von den Tracern durchlaufenen Schichtenfolgen und Lauflängen in diesen Schichten wurden zu einer eindimensionalen Stromröhre zusammengesetzt und für die Transportrechnungen diskretisiert. Den diskreten Bereichen sind die Materialien der jeweiligen Schichten zugeordnet worden. Der eindimensionalen Berechnung des Nuklidtransportes lag eine in der gesamten Stromröhre konstante Darcy-Geschwindigkeit zugrunde, während entlang der Trajektorien je nach hydrogeologischer Schicht unterschiedliche Darcy-Geschwindigkeiten auftreten. Der Antragsteller hat in seinen Rechnungen eine einheitliche Darcy-Geschwindigkeit in Ansatz gebracht, wobei über eine Korrektur der  $K_D$ -Werte die unterschiedlichen Darcy-Geschwindigkeiten beim Übergang zur nächsten geologischen Einheit berücksichtigt wurden /EU 121.1/. Aus der Durchströmungsrates des Endlagers und der Darcy-Geschwindigkeit in der Stromröhre errechnete sich der zu modellierende Querschnitt der Stromröhre. Der Quellterm (Kap.1.1.1.1) wurde als Randbedingung der Rechnung vorgegeben. Die Transportrechnung berücksichtigte Sorptionsvorgänge am Feststoff nach dem  $K_D$ -Konzept, die longitudinale Dispersion, Diffusion sowie die Porositäten der Materialien und den radioaktiven Zerfall. Die Behandlung der Zerfallsketten erfolgte nur in den Hauptzerfallswegen, die rele-

vante Beiträge zur Strahlenexposition lieferten. Ergebnis der Rechnungen war der zeitliche Verlauf der Radionuklidkonzentration an jedem diskreten Ort des Modelles.

Zur Ermittlung der Radionuklidkonzentration im quartären Grundwasser für das Oxfordscenario hat der Antragsteller Verdünnungsfaktoren aufgrund der Zumischung von Grundwässern aus tieferen Aquiferen entlang des Transportweges (Faktor 7) sowie aufgrund des Grundwasserangebotes im quartären Grundwasserleiter (Faktor 10) in Ansatz gebracht. Die mit SWIFT ermittelten Konzentrationen im Quartär wurden somit um den Faktor 70 reduziert. Diese Konzentration ist Ausgangsgröße für die radiologischen Rechnungen in der Biosphäre.

### Bewertung

Gegen die Vorgehensweise des Antragstellers bei den numerischen Transportrechnungen mit dem Code SWIFT und gegen die Herausstellung von drei Hauptausbreitungsszenarien im Schichtenmodell bestehen keine Einwände seitens der Gutachter. Die eindimensionalen Transportrechnungen stellen im Vergleich zu mehrdimensionalen Rechnungen eine konservative Behandlung dar, da die transversale advective und dispersive Transportkomponente außer Betracht bleibt. Diese Vorgehensweise führt zu einer Überschätzung der Radionuklidkonzentration am Aufpunkt in der Biosphäre.

Der Code SWIFT wurde in Benchmark-Rechnungen für den eindimensionalen Radionuklidtransport verifiziert. Gegen eine eindimensionale Anwendung auf den Standort Konrad bestehen keine Einwände. Die eindimensionalen Transportrechnungen wurden vom Gutachter mit dem Rechencode SWIFT für die Zerfallsketten  $4n$  und  $4n+2$  für die beiden repräsentativen Szenarien, das Oxford- und das Unterkreideszenarium, nachvollzogen. Die Ergebnisse entsprechen denen des Antragstellers.

Das Transportverhalten der Spaltprodukte im Oxfordscenario ist vom Gutachter exemplarisch für die Radionuklide Jod, Technetium und Selen mit Hilfe analytischer Methoden auf der Basis der Unterlagen /EU 76.1; EU 396/ überprüft worden. Dazu wurde von einer mittleren Darcy-Geschwindigkeit entlang der Trajektorie ausgegangen. Die errechneten Maximalkonzentrationen am Aufpunkt im Quartär entsprechen den vorgelegten Werten. Das gleiche gilt für die Transportzeiten dieser Maxima im oberflächennahen Grundwasserleiter.

Gegen die Verwendung eines Verdünnungsfaktors bei eindimensionalen Transportrechnungen hat der Gutachter keine Einwände. Der Verdünnungsfaktor 70 wird vom geologischen Gutachter als konservativ eingeschätzt /NLfB 91/.

Die Konzentrationszeitverläufe auf der Basis des Antragstellermodells und seiner Daten konnten vom Gutachter verifiziert werden.

## **1.1.2 Freisetzungs- und Transportrechnungen im Gutachter-Modell**

### **1.1.2.1 Vorgänge im Grubengebäude**

Zur Ermittlung der Freisetzungsraten der Spaltprodukte und Aktivierungsprodukte aus dem Grubengebäude in die Geosphäre wurde analog zum Vorgehen des Antragstellers von einer konstanten Freisetzung der Radionuklide über einen Zeitraum von 10 000 a ausgegangen. Den Rechnungen wurden - nach Überprüfung durch den Gutachter /TÜV 90a/- die Angaben des Antragstellers über endgelagerte Aktivitäten /EU 341/ zugrundegelegt und die in /TÜV 90/ aufgeführten relevanten Radionuklide behandelt. Diese so ermittelten Freisetzungsraten gehen als Quellterme der Spalt- und Aktivierungsprodukte in die Transportrechnungen der Geosphäre ein.

Zur Ermittlung der Quellterme der Radionuklidketten hat der Gutachter seinen Rechencode MARNIE, der zur Ermittlung der Transportvorgänge in einem laugengefüllten Endlager entwickelt wurde, eingesetzt. Zu diesem Zweck wurde das Endlager in einem Bilanzraum diskretisiert und die aus den NAMMU-Rechnungen des Basisfalles ("Störzonenmodell") ermittelte Durchströmungsrate für das Endlager von 2 990 m<sup>3</sup> eingesetzt. Das freie Hohlraumvolumen des versetzten Grubengebäudes sowie die im Endlager befindliche Sorbensmasse ist gemäß den Angaben des Antragstellers /EU 76.1/ als Randbedingung vorgegeben worden. Die Rechnungen wurden nach /TÜV 90/ für die Zerfallsketten

- Cm248-Pu244-Pu240-U236-Th232-U232,
- Cm245-Am241-Np237-U233-Th229,
- Cm246-Pu242-Am242-U238-Pu238-U234-Th230-Ra226 und
- Cm247-Am243-Pu239-U235-Pa231

durchgeführt. Die Aktivitätsinventare der Kettenglieder zum Startzeitpunkt der Rechnungen sind der Unterlage /EU 341/ entnommen. Für die Freisetzungsrechnungen wurde konservativ eine Mobilisierungsdauer der Aktiniden von 200 a unterstellt. Der Rechencode MARNIE berücksichtigt neben dem advektiven Transport der Radionuklide durch das Grubengebäude auch deren radioaktiven Zerfall und die Retardation auf ihrem Transportweg. Für die Strecken des Endlagerbergwerkes wurde von einem Versatz des Grubengebäudes ausgegangen. Daher sind zur Ermittlung des Retardationsverhaltens der Aktiniden bei ihrem Transport im Grubengebäude die Verteilungskoeffizienten gemäß der Unterlage /TÜV 90b/ gewählt worden. Die  $K_D$ -Werte des Antragstellers unterscheiden sich z.T. von denen des Gutachters. Für die Aktiniden sind mit Ausnahme des Neptuniums die  $K_d$ -Werte gleich denen des Antragstellers. Ergebnis der Rechnungen sind die Freisetzungsverläufe der oben aufgeführten Aktiniden über die Zeit. Für die Transportrechnungen in der Geosphäre sind aus diesen Verläufen abschnittsweise konstante Quellstärken ermittelt worden (Tab. 1).

#### 1.1.2.2 Transportrechnungen für die Geosphäre

Grundlage der Berechnungen der Transportvorgänge von Radionukliden in der Geosphäre sind Grundwassertransportrechnungen des Basisfalles, die die GRS mit dem Programm NAMMU am gutachtlichen Modell durchgeführt hat /GRS 90, GRS 91/.

Für die Radionuklidtransportrechnungen wurde aus den Trajektorienberechnungen eine repräsentative eindimensionale Stromröhre entwickelt, die zur Berechnung des eindimensionalen Nuklidtransportes im Programm SWIFT Verwendung findet. Größe und Breite der Stromröhre wurde dem Endlager Konrad angeglichen. Quellterme zur Freisetzung der Radionuklide in die Geosphäre wurden den im Kapitel 1.1.2.1 beschriebenen Rechnungen mit dem GRS-Programm MARNIE entnommen. Relevante Radionuklide und Nuklidketten wurden nach Vorgaben des TÜV Hannover berücksichtigt /TÜV 90/.

##### Stromröhrendefinition

Die aus den Rechnungen zum gutachtlichen Modell /GRS 91/ zum Grundwassertransport mit NAMMU auf der Basis der Trajektorienverläufe entwickelte Stromröhre und deren Abmessungen zeigt Bild 1. Laufzeiten und Laufwege wurden im Einklang mit

den in NAMMU berechneten Durchströmungsraten ( $2\,990\text{ m}^3/\text{a}$ ) durch das Endlager und den Darcy-Geschwindigkeiten in den einzelnen durchlaufenden Formationen konservativ dem 1D-Modell SWIFT angepaßt.

Dabei ist ein Stromfaden vom Endlager bis zur Oberfläche extrahiert worden, der die Schichten des Oxford, des Kimmeridge und des Wealden durchläuft. Das in den Trajektorien ausgewiesene laufzeiterhöhende Abtauchen und Wiederauftauchen durch die liegenden Tone wurde aufgrund der Erfahrungen mit Particle-Tracking-Verfahren /GRS 88/ nicht berücksichtigt. Somit stellt die vorliegende Stromröhre einen aus modelltechnischen und physikalischen Erkenntnissen hervorgegangen idealisierten Transportweg dar. Nicht berücksichtigt wurde ebenfalls das Durchlaufen des Endlagers und des Quartärs.

Ergebnisse der 1D-Transportrechnungen sind somit die Radionuklidkonzentrationen am Übergang zum Quartär. Eine Verdünnung entlang des Laufweges durch zutretende Grundwässer aus dem Liegenden wurde nicht berücksichtigt. Es wurde mit konstanten Kd-Werten entlang des Strömungsweges gerechnet. Diese Vorgehensweise ist gegenüber den Rechnungen des Antragstellers konservativ, der eine Zunahme des Kd-Wertes mit zunehmender Verdünnung und damit eine zunehmende Retardation der Radionuklide in Ansatz gebracht hat.

Aus den Trajektorienberechnungen wurde die reine Laufzeit und der Laufweg für das Durchlaufen der obengenannten Formationen entnommen und eine mittlere Abstandsgeschwindigkeit berechnet. Mit dieser Geschwindigkeit und einer unter Berücksichtigung der verschiedenen Porositäten der Formationen berechneten laufweggewichteten Gesamtporosität ist eine durchschnittliche Darcy-Geschwindigkeit für den Gesamtlaufweg berechnet worden. Diese bestimmt mit der aus den NAMMU-Rechnungen ermittelten Durchströmungsrate des Endlagers von  $2\,990\text{ m}^3/\text{a}$  die Querschnittsfläche (Durchsatzfläche) der Stromröhre.

#### Eingangsdaten für die Transportrechnung

Für die Stromröhre wurde die Gesamtlauflänge der Parikel von  $30\,076\text{ m}$  in 292 äquivalente Blöcke mit einer Länge von  $103\text{ Metern}$  und einer Breite von  $6\,485\text{ m}$  und einer Höhe von  $150\text{ m}$  diskretisiert. Die ersten 135 Blöcke (Lauflänge =  $13\,905\text{ m}$ ) charakterisieren das Oxford, die nächsten 10 das Kimmeridge (Lauflänge =  $1\,030\text{ m}$ ) und

schließlich die restlichen 147 den Ausbreitungsweg im Wealden (Lauflänge = 15 141 m) (Bild 1).

Aus der Grundwasserrechnung mit dem Programm NAMMU läßt sich eine Wasserdurchflußmenge durch das Endlager von 2995 m<sup>3</sup>/a bilanzieren. Als Randbedingung für die Nuklidtransportrechnung wurde im ersten Block ein Durchfluß von 2 995 m<sup>3</sup>/a angesetzt. Für den letzten Block wurde eine Druckrandbedingung vorgegeben.

Für die Radionuklid-Transport-Rechnung wurden für die einzelnen Formationen Umrechnungsfaktoren für den Modell-Kd-Wert ermittelt, der sich aus der absoluten und der effektiven Gebirgsporosität der Formationen berechnet. Die Stammdaten der Gebirgsporositäten sind der Unterlage des geologischen Gutachters /NLfB 90/ entnommen. Der Umrechnungsfaktor bestimmt mit den aus der NLfB-Unterlage /NLfB 90/ entnommenen nuklidspezifischen KD-Werten die nuklidspezifischen Modell-KD-Werte (Tab. 2,3 u. 5). Weitere Eingangsdaten sind neben den Nukliden, die Zerfallszeiten und bei Zerfallsketten die Angabe der Mutter/Tochternuklide (Tab. 3 u. 5). Für die Quellstärke wurde für Einzelnuklide eine Freisetzung des Gesamtinventars über 10 000 Jahre angenommen (Tab. 3). Für die Zerfallsketten ist die Freisetzung zu bestimmten Zeitpunkten berechnet und als Quellstärke (Kap. 1.1.2.1) für das vorgegebene Zeitintervall angegeben worden (Tab. 1).

Die Tabelle 1, 2, 3 und 5 zeigen die in den Transportrechnungen benutzten Modellparameter, ihren Ursprung und das Berechnungsverfahren.

#### Ergebnisse der eindimensionalen Radionuklidtransportrechnungen

Für die eindimensionalen Transportrechnungen kam die SWIFT-Version zur Anwendung, die der Antragsteller in das Verfahren eingebracht hat und die von der GRS zu den Nachrechnungen der Antragsunterlagen benutzt wurde /GRS-88/.

Im ersten Teil der Rechnungen wurde der Transport der vom TÜV Hannover /TÜV 90/ angeführten relevanten Einzelnuklide J 129, C 14, Ni 59, Tc 99, Sn 126, Cs 135, Zr 93, Se 79, Cl 36 und Ca 41 berechnet. Im zweiten Teil ist der Transport der im Kapitel 1.1.2.1 beschriebenen Zerfallsreihen modelliert worden.

### Einzelnuclide:

Als Ergebnisse der Transportrechnungen werden im letzten Block des Wealden (Block 292- Übergang zum Quartär) zu verschiedenen Zeitpunkten in Jahren die Konzentrationen der einzelnen Nuklide angegeben. In Tabelle 4 werden die Zeitpunkte und die Nuklidkonzentrationen bis zum Auftreten ihres Maximums am Übergang zum Quartär dargestellt. Konzentrationen kleiner als  $10^{-8}$  Bq/l wurden nicht aufgelistet.

Bq/l<sup>3</sup>

Konzentrationsverdünnungen durch zutretende Grundwässer wurden konservativ auf dem Transportweg nicht berücksichtigt. Ebenso sind in den Ergebnissen die Verdünnungen im Quartär nicht berücksichtigt worden.

Bild 2 zeigt den zeitlichen Verlauf der Nuklidkonzentration am Übergang zum Quartär.

Nuklide, die stark retardiert werden und damit im maximalen Betrachtungszeitraum von 10 000 000 Jahren keine Auswirkung im letzten Block zeigten, werden für die Modellmitte im Block 150 dargestellt (Bild 3).

### Ergebnisinterpretation:

Wie die Tabelle 4 und das Bild 2 zeigen besitzt J129 sowohl die höchste Nuklidkonzentration am Aufpunkt Block 292 als auch aufgrund der fehlenden Retardation die kürzeste Transportzeit. Das Maximum wird mit ca. 1,7 Bq/l bei einer Transportzeit von 460 000 Jahre erreicht. Gleich große Transportzeiten jedoch kleinere Konzentrationen zeigen die Nuklide Cl 36 und Ca 41. In der Größenordnung ähnliche Konzentrationen wie Ca 41 und Cl 36 - jedoch zeitverschoben - erreichen die Nuklide Ni 59 und Tc 99. Aufgrund ihrer geringen Konzentration wurden das kurzlebige Radionuklid C 14 bzw. die retardierten Nuklide Zr 93 und Cs 135 nicht dargestellt. Für das letztgenannte Nuklid wird die starke Retardation in einer Momentaufnahme der Nuklidkonzentration zum Zeitpunkt 300 000 a im Bild 4 deutlich. Zu diesem Zeitpunkt hat die Nuklidfront des Cs 135 erst 1/3 des Gesamttransportweges zurückgelegt.

### Nuklidketten:

Für die Transportrechnungen der Zerfallsketten wurden wie bereits beschrieben über definierte Zeitintervalle von 10 000, 100 000, 300 000 und ca. 1 000 000 Jahren die Quellterme berechnet und in das Modell eingebracht (Tab. 1). Für Zeiträume größer 1 Mio Jahren ist der jeweilige Quellterm des letzten Zeitintervalls angesetzt worden. Gleichzeitig wurden die Mutter- und Tochternuklide für die einzelnen Zerfallsreihen

definiert, wobei Tochternuklide mit einer Halbwertszeit von weniger als 100 Jahren keine Berücksichtigung fanden bzw. ihre Freisetzungsraten den folgenden Tochternukliden zuaddiert wurden. Als Ergebnis der Rechnung zeigen die Bilder 5 - 7 und die Tabelle 6 die zeitlichen Verläufe der Radionuklidkonzentration am Aufpunkt, den Übergang ins Quartär. Dargestellt wurden jene Radionuklide, die aufgrund ihrer Konzentrationshöhe eine radiologische Relevanz besitzen können. Nicht dargestellt wurden Nuklide, deren Radionuklidtransportfronten den Aufpunkt nach einer Transportzeit von mehr als 10 000 000 Jahren erreichen.

Ergebnisinterpretation:

Wie aus den Bildern 5 bis 7 und der Tabelle 6 zu entnehmen ist, erreichen die Tochternuklide U 236, U 238, U 234 und Ra 226 nach mehreren Millionen Jahren ihr Konzentrationsmaximum von ca. 0,3 Bq/l im Aufpunkt zum Quartär.

Die Konzentration der Nuklide U 235 und Th 230 liegen bei gleicher Transportzeit um eine Größenordnung niedriger. Th 232 liegt um weitere 6 Größenordnungen niedriger, Pa 231 um drei Größenordnungen. Alle anderen Mutter- und Tochternuklide sind radiologisch nicht relevant und liegen am Aufpunkt unterhalb einer Konzentrationsschwelle von  $10^{-8}$  Bq/l bzw. ihr Maximum tritt nach 10 000 000 Jahren auf.

## 2 Unterlagen

- /EU 76.1/ Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig  
Langzeitsicherheitsanalyse des Endlagers Konrad: Radionuklid-  
ausbreitung in der Nachbetriebsphase  
TA 2242.03, 9K/21285/-/-/-/-/ED/-/Rev. 0
- /EU 121.1/ Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig  
Erläuterung zur Anwendung von Retardationsfaktoren zur Beschreibung  
von 1-dimensionalen Ausbreitungsrechnungen bei veränderlichen Darcy-  
Geschwindigkeiten  
9K/21285/-/-/-/D/ED/-/Rev. 0, 13.4.1989
- /EU 121.4/ Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig  
Erläuterung der Variationsrechnungen zur Freisetzungsdauer von J 129  
TA 2242.03, 9K/21284/D/ED, 13.4.1989
- /EU 341/ Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig  
Radionuklidfreisetzung aus dem Grubengebäude, Schichtenmodell Kon-  
rad  
Plan 3/89, ET-IB-20, Januar 1990  
9K/21284/-/-/-/-/EGB/Rev. 0
- /EU 396/ Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig  
Radionuklidfreisetzung im Deckgebirge für das Schichtenmodell Konrad  
Plan 3/89, ET-IB-41, Februar 1991  
9K/EGG/RB/005/00

### **3 Literatur**

- /GRS 88/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH  
Stand der Arbeiten der GRS zur Begutachtung der Langzeitsicherheit des  
Endlagers Konrad  
GRS-A-1499, November 1988
- /GRS 89/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit(GRS) mbH  
Beschreibung von Nuklidtransportvorgängen in einem Endlagerbergwerk  
- Rechencode MARNIE -  
GRS-A-1612, Juli 1989
- /GRS 90/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH  
Zwischenbericht zur Begutachtung des Endlagers für radioaktive Abfälle,  
Schachtanlage Konrad, Salzgitter  
Beiträge der GRS zum Teil 3: Langzeitsicherheit (GK-LSG)  
GRS-A-1730, November 1990
- /GRS 91/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH  
Langzeitsicherheitsanalysen für das Endlager Konrad  
Grundwassermodellrechnungen mit dem Programm NAMMU zum gutacht-  
lichen Modell Konrad  
GRS-A-Bericht, Dezember 1991
- /NLfB 90/ Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung  
Transportdaten für Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit  
Archivnummer 107478, 05.10.1990
- /NLfB 91/ Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung  
Der Nordrand des Modellgebietes Konrad und Abschätzung der Verdün-  
nung im Quartär bei Calberlah  
Archivnummer 108 091, 25.1.1991

- /TÜV 90/ Technischer Überwachungsverein Hannover  
Endlager Konrad Langzeitsicherheit: Bestimmung relevanter Radionuklide  
für verschiedene Betrachtungszeiträume  
Aktenvermerk, 6.2.1990
- /TÜV 90a/ Technischer Überwachungsverein Hannover  
Endlager Konrad Langzeitsicherheit: Vergleich der Fortschreibung der  
Vorgaben zur Radionuklidfreisetzung aus dem Grubengebäude  
Aktenvermerk, 17.12.1990
- /TÜV 90b/ Technischer Überwachungsverein Hannover  
Grube Konrad: Vorgaben für die Transportrechnungen zu Langzeit-  
sicherheit  
Stand: 14.11.1990  
Aktenvermerk: 10.1.1990

# **ANHANG**

Bilder und Tabellen

1-Dim RADIONUKLIDTRANSPORTMODELL  
 nach Trajektorienberechnungen des Basisfalles  
 "STÖRZONENMODELL"  
 Trajektorie X4Y7Z8 SE-Endlager

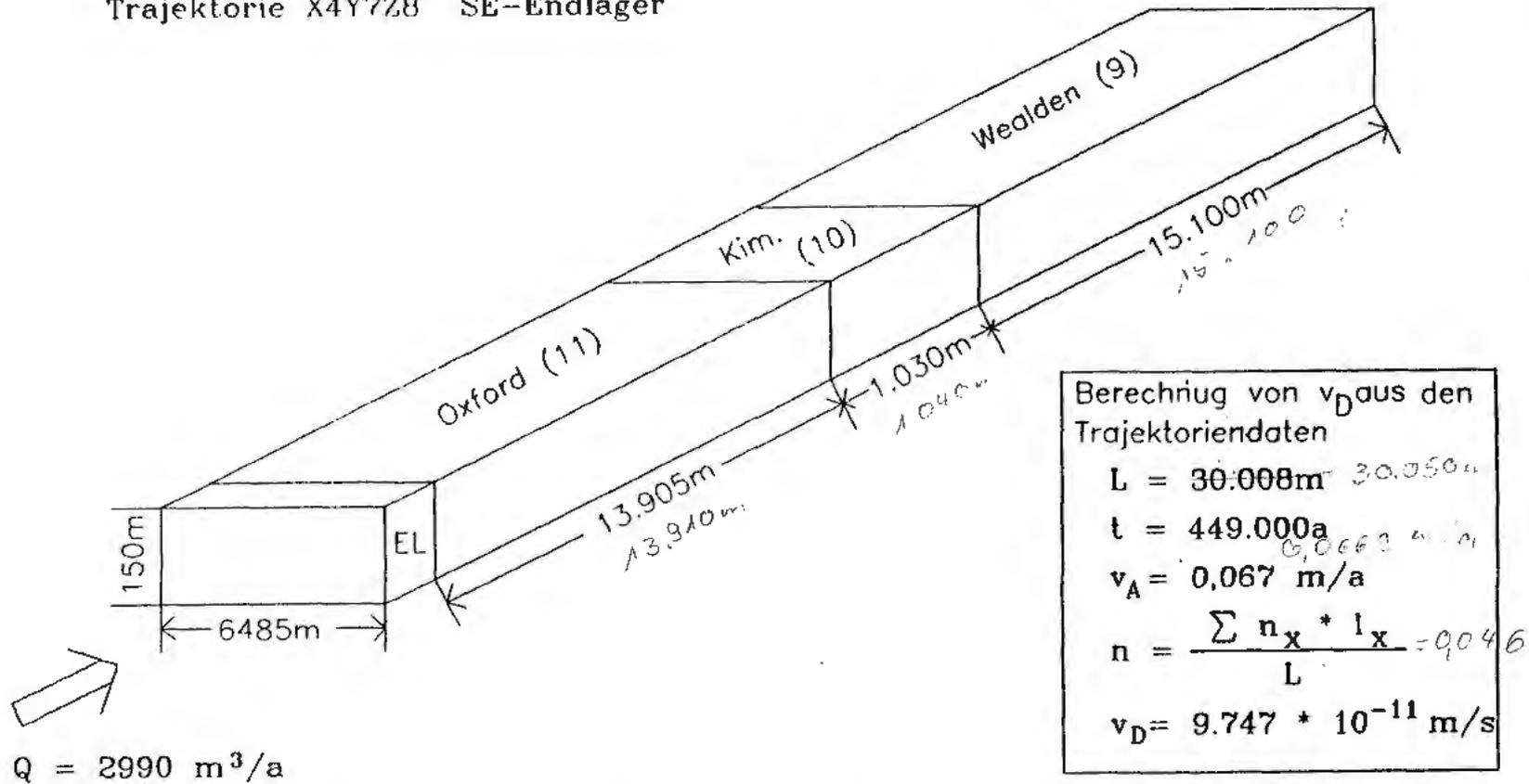
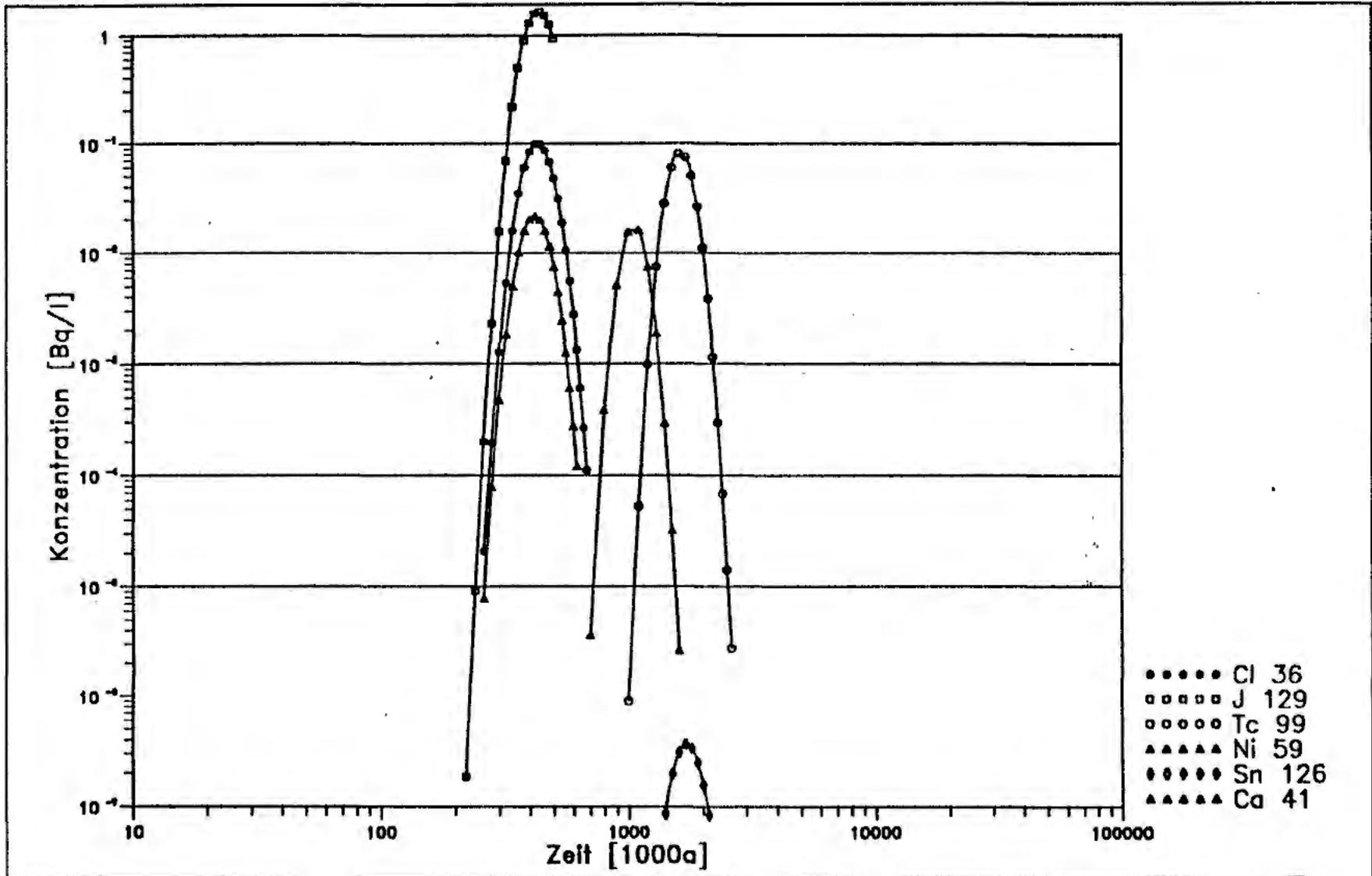
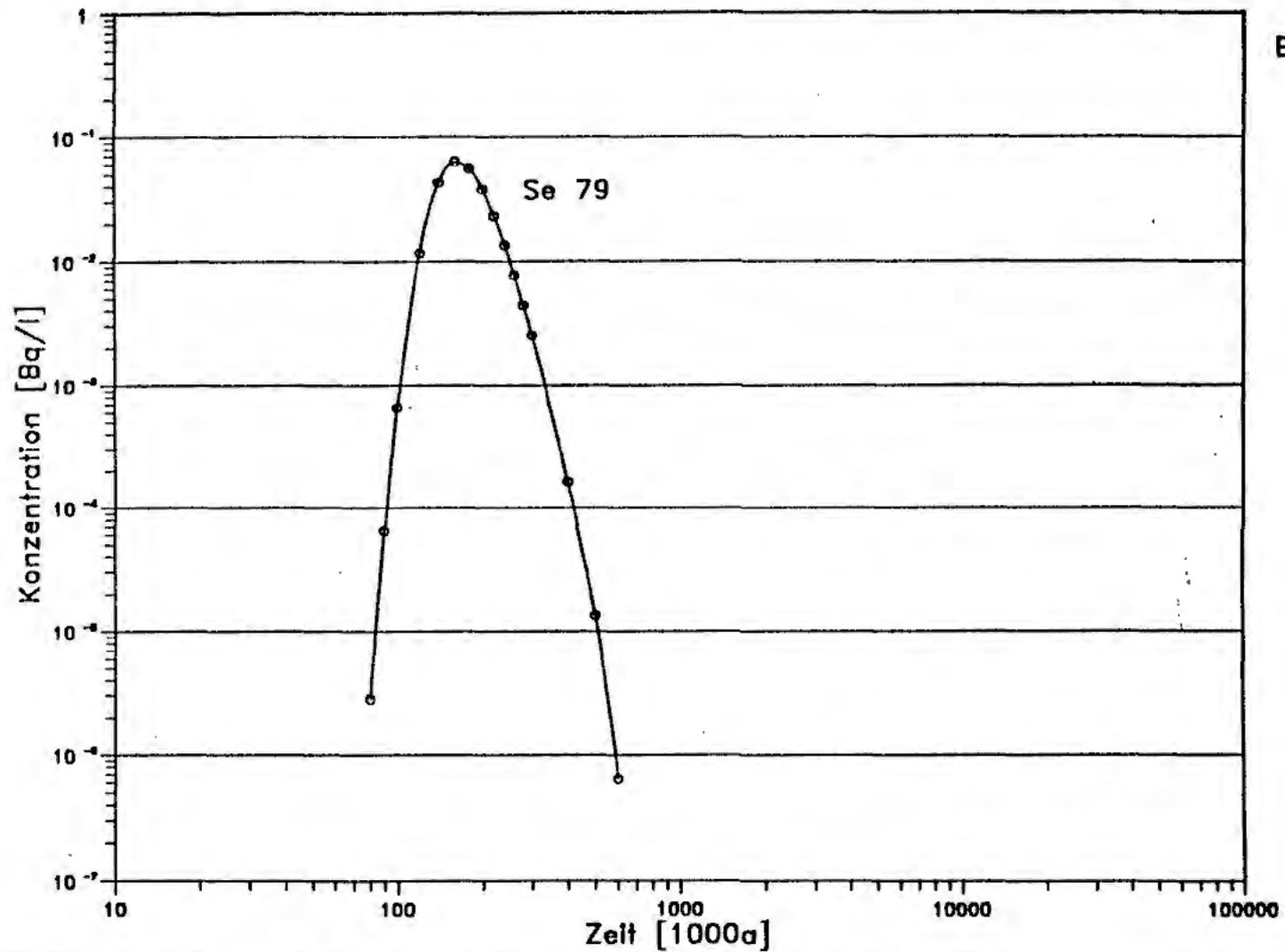


Bild 1: Eindimensionales Radionuklidtransportmodell nach Trajektorienrechnung des Basisfalles "Störzonenmodell" (Trajektorie X4Y7Z8, SE-Endlager)



**Bild 2:** Zeitlicher Verlauf der Radionuklidkonzentration in Bq/l am Übergang zum Quartär  
(Block 292 im SWIFT-1D-Modell)



**Bild 3:** Zeitlicher Verlauf der Radionuklidkonzentration Se 79 in der Modellmitte  
(Block 150 in Bq/l)

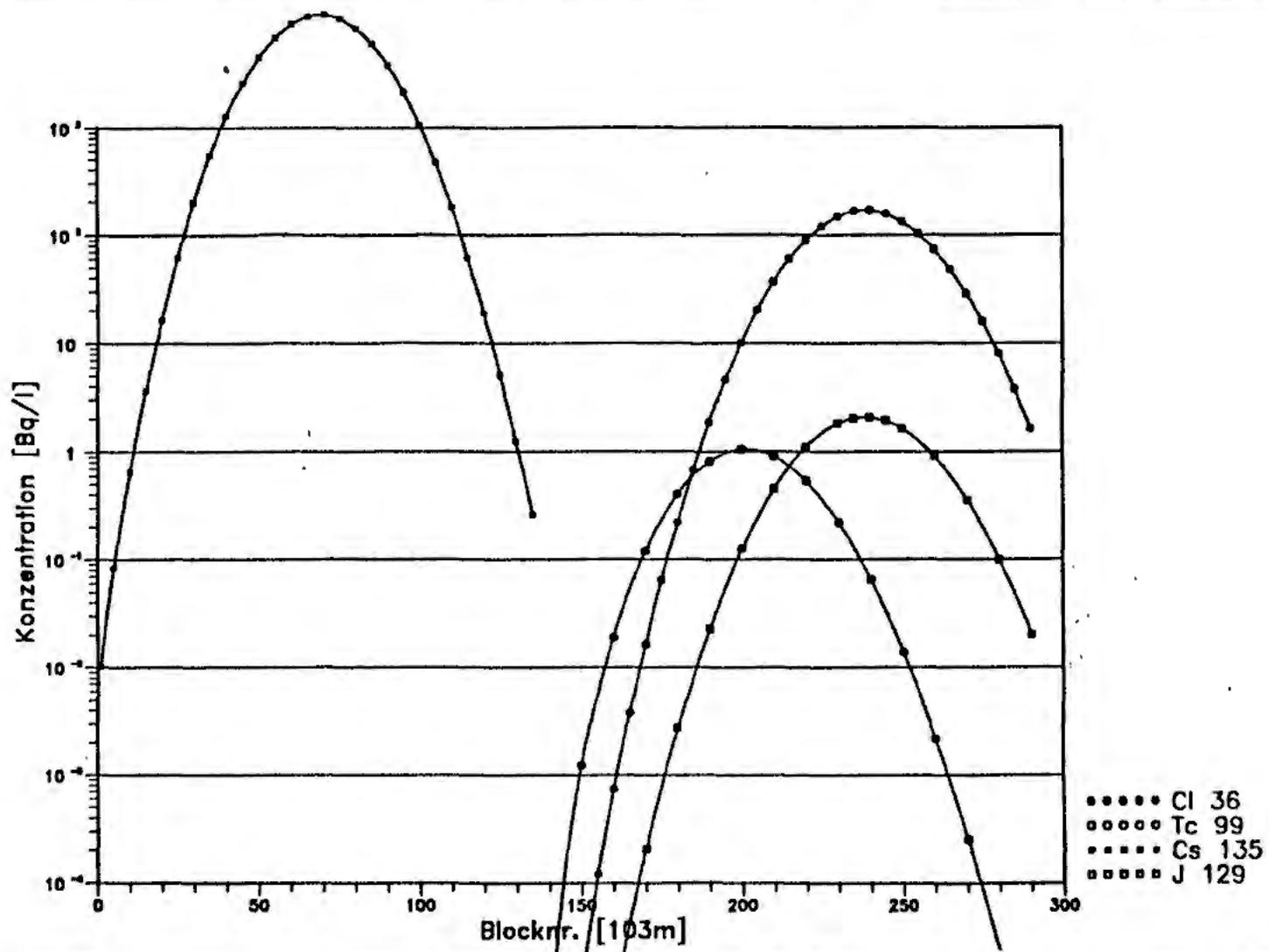
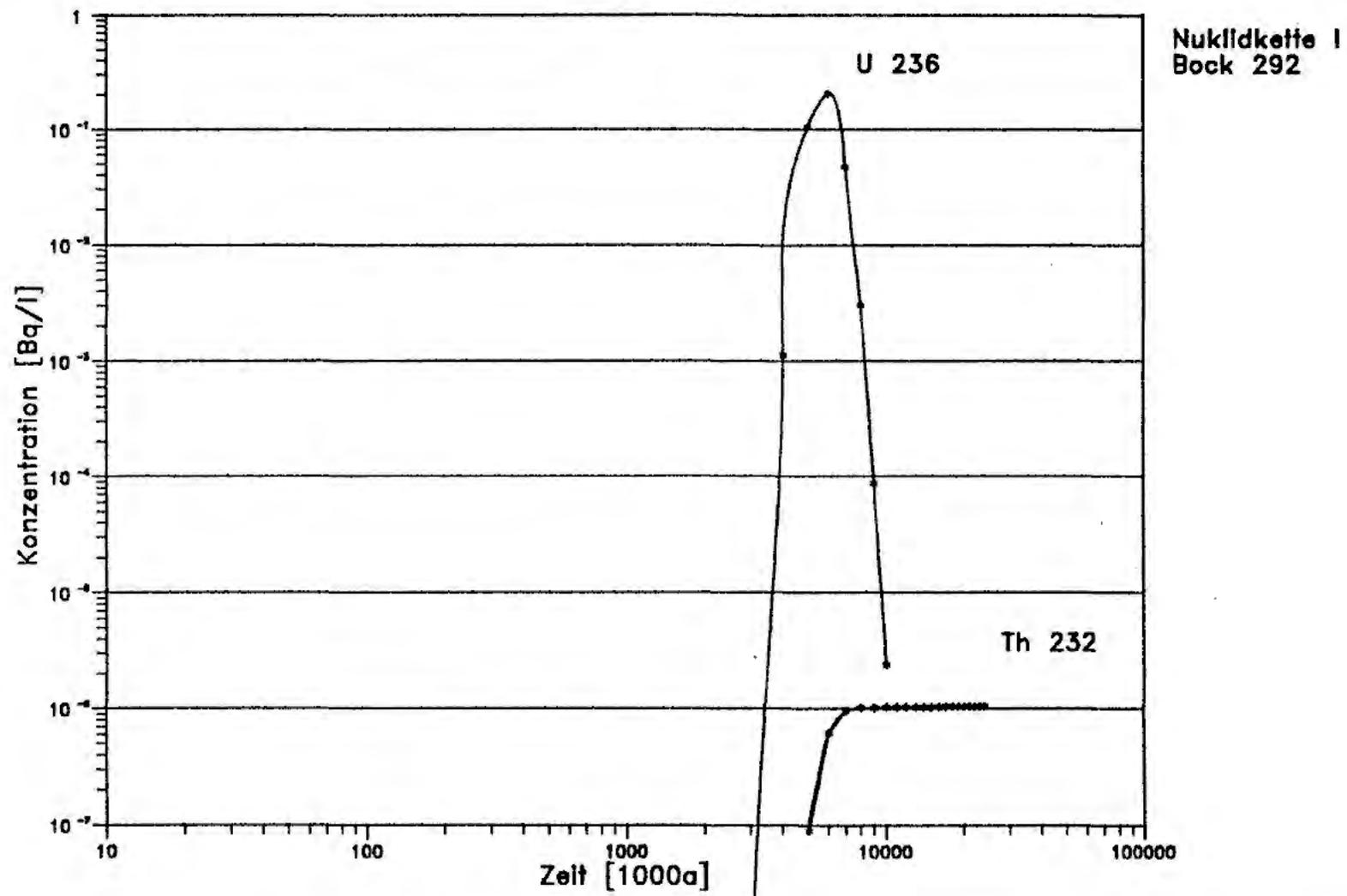
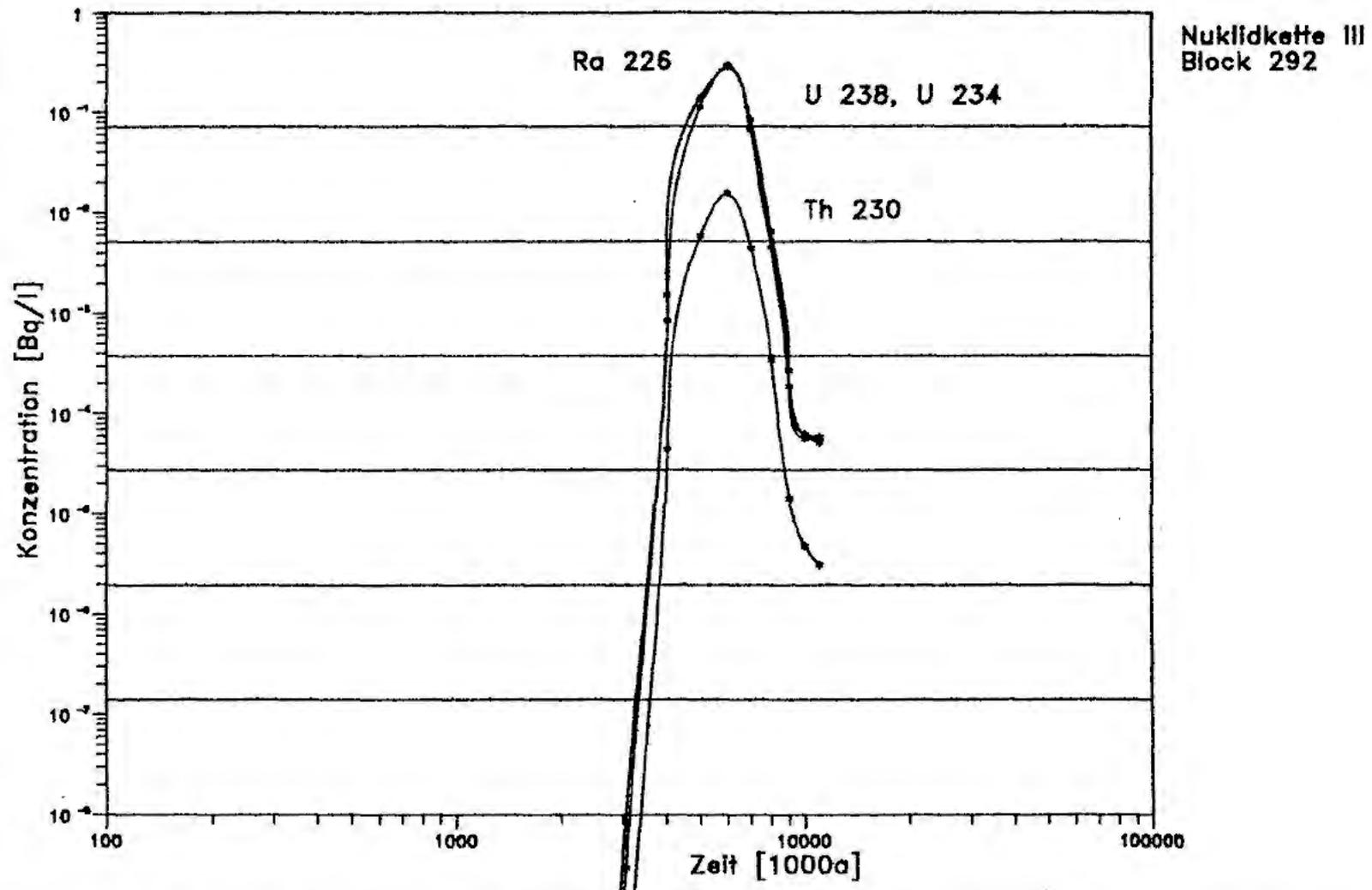


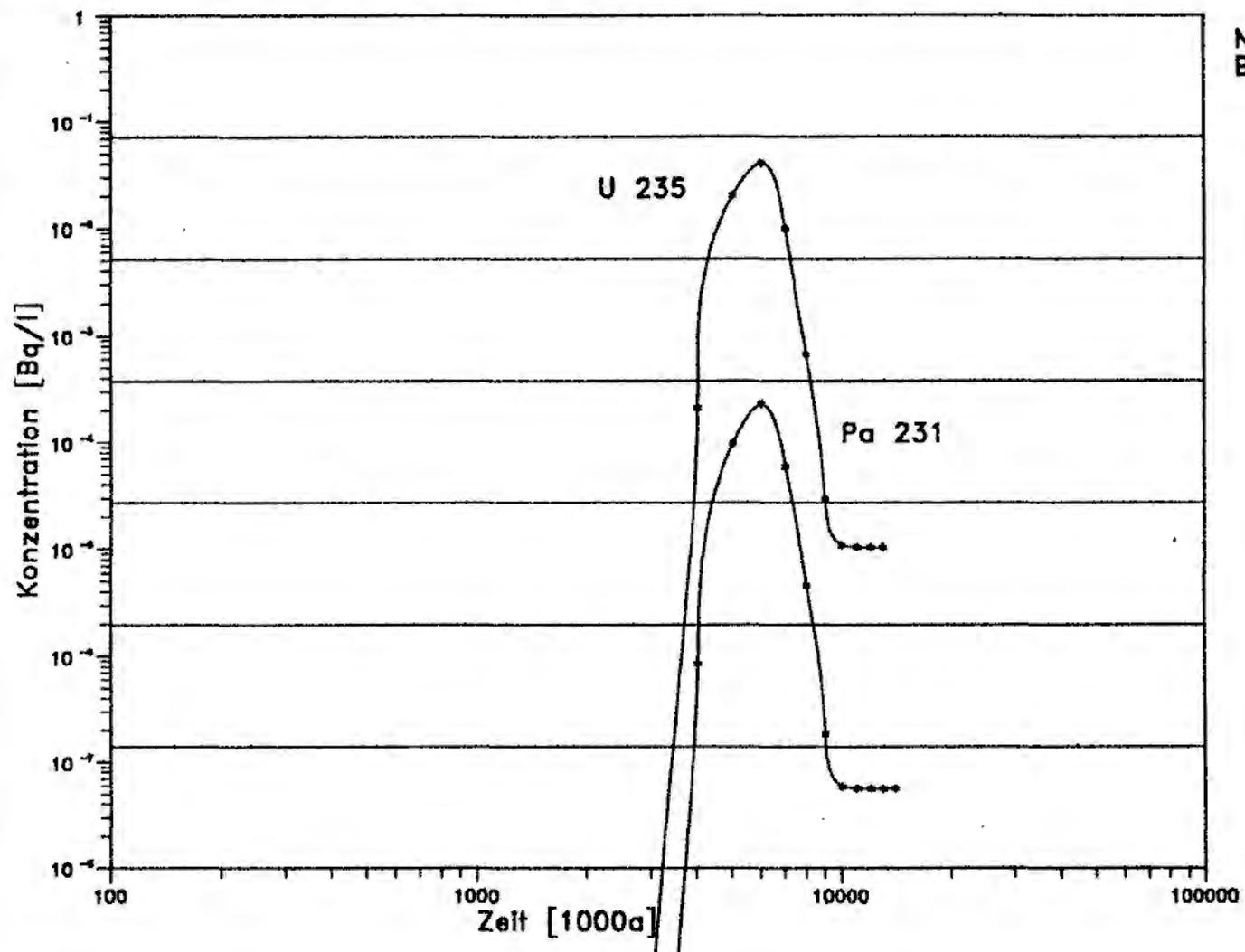
Bild 4: Ortsabhängige Radionuklidkonzentrationen zum Zeitpunkt 300 000 Jahren nach Freisetzungsbeginn



**Bild 5:** Zeitlicher Verlauf der Radionuklidkonzentration der Nuklidkette I in Bq/l am Übergang zum Quartär (Block 292)



**Bild 6:** Zeitlicher Verlauf der Radionuklidkonzentration der Nuklidkette III in Bq/l am Übergang zum Quartär (Block 292)



Nuklidkette IV  
Block 292

Bild 7: Zeitlicher Verlauf der Radionuklidkonzentration der Nuklidkette IV in Bq/l am Übergang zum Quartär (Block 292)

Tab. 1: Quellstärke der Radionuklidketten auf der Basis der MARNIE-Rechnungen in kg Nuklid/s

Zeitintervall in Jahren	Cm 248	Pu 244	Pu 240	U 236	Th 232		
0 - 10 000	0.575-19	0.424-20	0.278-11	0.470-09	0.218-08	Kette I	
10 000 - 100 000	0.506-19	0.949-20	0.1638-12	0.132-09	0.218-08		
100 000 - 300 000	0.345-19	0.202-19	0.500-17	0.122-11	0.218-08		
300 000 - 962 400	0.114-19	0.294-19	0.273-20	0.435-16	0.218.08		
	Cm 245	Np 237	U 233	Th 229			
0 - 10 000	0.135-15	0.760-11	0.880-13	0.4075-16		Kette II	
10 000 - 100 000	0.119-16	0.625-11	0.329-12	0.544-15			
100 000 - 300 000	0.538-20	0.295-11	0.191-12	0.368-15			
300 000 - 962 400	0.273-20	0.395-12	0.256-13	0.494-16			
	Cm 246	Pu 242	U 238	U 234	Th 230	Ra 226	
0 - 10 000	0.217-16	0.551-12	0.135-06	0.219-10	0.161-13	0.108-12	Kette III
10 000 - 100 000	0.733-18	0.490-12	0.263-07	0,412-11	0.396-13	0.646-13	
100 000 - 300 000	0.273-20	0.344-12	0.217-09	0,288-13	0.127-13	0.211-13	
300 000 - 962 400	0.273-20	0.119-17	0.324-12	0.278-16	0.445-15	0.744-15	
	Cm 247	Am 243	Pu 239	U 235	Pa 231		
0 - 10 000	0.572-18	0.152-17	0.136-10	0.236-08	0.170-15	Kette IV	
10 000 - 100 000	0.554-18	0.108-18	0.411-11	0.633-09	0.271-15		
100 000 - 300 000	0.497-18	0.273-20	0.1396-12	0.177-10	0.433-16		
300 000 - 962 400	0.351-18	0.273-20	0.103-15	0.122-13	0.210-18		

Tab. 2: Eingabedaten für das SWIFT-1D-Modell nach Unterlagen des NLfB

Porositäten und Umrechnungsfaktor für den Modell- $K_D$ -Wert			
Geologische Schicht (Transportweg)	$n_{eff}^*$	$n_{abs}^*$	$(n_{abs}-1)/n_{abs}$
			$(n_{eff}-1)/n_{eff}$
Oxford (11)	0.01	0.15	0.05724
Kimmeridge (10)	0.01	0.10	0.09091
Wealden (9)	0.08	0.20	0.3478

Tab. 3: Eingabedaten für das SWIFT-1D-Modell "Einzelnuklide", nach Unterlagen des TÜV \*\* und NLfB \*\*\*

NUKLIDSPEZIFISCHE VORGEBENE KENNWERTE								
Nuklid	HWZ [a] **	Quellstärke [Bq/s] ** für 10 000 a	$K_D$ [ml/g] *** Schichteinheit			$K_D'$ [ml/g] Schichteinheit		
			11	10	9	11	10	9
J 129	1.57E+07	2.220E+00	0	0	0			
C 14	5.73E+03	1.268E+03	5	6	0.9	0.2862	0.5455	0.31302
Ni 59	7.50E+04	1.411E+03	1	1	0	0.05724	0.09091	0
Tc 99	2.13E+05	8.244E+01	0.7	0.3	0.2	0.04006	0.02727	0.06956
Sn 126	1.00E+05	1.129E+00	0	0	0	0.005724	0.009091	0.13912
Cs 135	2.30E+06	1.189E+00	30	30	10	1.7172	2.7273	3.478
Zr 93	1.53E+06	3.171E+00	80	80	20	4.5792	7.2728	6.958
Se 79	6.50E+04	3.805E-01	0.1	0.1	0.4	0.0057	0.0091	0.13912
Cl 36	3.01E+05	3.456E-01	0	0	0			
Ca 41	1.03E+05	4.820E-01	0	0	0			

Tab. 4: Zeitlicher Verlauf der Radionuklidkonzentrationen in Bq/l am Übergang zum Quartär (Block 292 im SWIFT-1D-Modell)

ZEITPUNKT IN JAHREN	RADIONUKLIDKONZENTRATIONEN in Bq/l					
	Cl 36	Ca 41	Ni 59	Tc 99	Sn 126	J 129
220 000						1.840E-007
240 000						9.070E-006
260 000	2.083E-005	7.780E-006				1.997E-004
280 000	1.940E-004	7.865E-005				2.300E-003
300 000	1.260E-003	4.696E-004				1.565E-002
320 000	5.331E-003	1.820E-003				6.922E-002
340 000	1.581E-002	4.949E-003				2.146E-001
360 000	3.487E-002	1.000E-002				4.951E-001
380 000	6.002E-002	1.576E-002				8.913E-001
400 000	8.376E-002	2.015E-002				1.301E+000
420 000	9.780E-002	2.154E-002				1.589E+000
440 000	9.800E-002	1.976E-002				1.666E+000
460 000	8.607E-002	1.588E-002				1.530E+000
480 000	6.742E-002	1.139E-002				1.254E+000
500 000	4.779E-002	7.391E-003				9.300E-001
520 000	3.104E-002	4.394E-003				
540 000	1.867E-002	2.418E-003				
560 000	1.048E-002	1.243E-003				
580 000	5.542E-003	6.014E-004				
600 000	2.775E-003	2.756E-004				
620 000	1.324E-003	1.203E-004				

Tab. 4: Zeitlicher Verlauf der Radionuklidkonzentrationen in Bq/l am Übergang zum Quartär (Block 292 im SWIFT-1D-Modell) (Fortsetzung)

ZEITPUNKT IN JAHREN	RADIONUKLIDKONZENTRATIONEN in Bq/l					
	Cl 36	Ca 41	Ni 59	Tc 99	Sn 126	J 129
640 000	6.050E-004					
660 000	2.654E-004					
680 000	1.124E-004					
700 000			3.598E-006			
800 000			3.825E-004			
900 000			5.093E-003			
1 000 000			1.550E-002	9.037E-007		
1 100 000			1.606E-002	5.273E-005		
1 200 000			7.453E-003	9.808E-004		
1 300 000			1.878E-003	7.479E-003		
1 400 000			2.954E-004	2.815E-002	8.654E-008	
1 500 000			3.220E-005	6.009E-002	1.956E-007	
1 600 000			2.627E-006	8.097E-002	3.089E-007	
1 700 000				7.481E-002	3.628E-007	
1 800 000				5.058E-002	3.330E-007	
1 900 000				2.635E-002	2.484E-007	
2 000 000				1.103E-002	1.554E-007	
2 100 000				3.836E-003	8.365E-008	
2 200 000				1.140E-003		
2 300 000				2.960E-004		
2 400 000				6.844E-005		

Tab. 5: Eingabedaten für das SWIFT-1D-Modell, "Nuklidketten" nach Unterlagen ~~(des TÜV \*\* und~~ NLFB \*

NUKLIDSPEZIFISCHE VORGEGEBENE KENNWERTE							
Nuklid	HWZ [a]	$K_D$ [ml/g] * Schichteneinheiten			$K_D'$ [ml/g] Schichteneinheiten		
		11	10	9	11	10	9
Cm 244	1.76E+01	1 000	1 000	200	57.2	90.91	69.6
Cm 245	8.50E+03						
Cm 246	4.73E+03						
Cm 247	1.56E+07						
Cm 248	3.40E+05						
Pu 238	8.60E+01	1 000	1 000	200	57.2	90.91	69.6
Pu 239	2.41E+04						
Pu 240	6.58E+03						
Pu 241	1.32E+01						
Pu 242	3.76E+05						
Pu 244	8.26E+07						
U 232	7.20E+01	1.8	1.8	1	0.103	0.163	0.347
U 233	1.59E+05						
U 234	2.45E+05						
U 235	7.04E+08						
U 236	2.34E+07						
U 238	4.47E+09						
U 239	2.00E+00						

Tab. 5: Eingabedaten für das SWIFT-1D-Modell, "Nuklidketten" nach Unterlagen des ~~FÜV\*\*~~ und ~~NLF~~<sup>\*</sup> (Fortsetzung)

NUKLIDSPEZIFISCHE VORGEGEBENE KENNWERTE							
Nuklid	HWZ [a]	$K_D$ [ml/g] *			$K_D'$ [ml/g]		
		Schichteneinheiten			Schichteneinheiten		
		11	10	9	11	10	9
Th 229	7.34E+003	80	80	20	4.58	7.27	6.96
Th 230	7.54E+04						
Th 232	1.41E+10						
Am 241	4.58E+02	1 000	1 000	200	57.2	90.91	69.6
Am 242	0.40E+00						
Am 243	7.37E+03						
Np 237	2.14E+06	50	20	3	2.86	4.55	1.043
Ra 226	1.60E+03	1.8	4	1	0.103	0.164	0.347
Pb 210	2.40E+01	0	0	0	0	0	0
Pa 231	3.28E+04	1 000	1 000	200	57.2	90.91	69.6
Ac 227	2.16E+01	30	30	3	1.72	2.73	1.043

Tab. 6: Zeitlicher Verlauf der Radionuklidkonzentrationen in Bq/l am Übergang zum Quartär (Block 292 im SWIFT 1D-Modell)

Transportzeiten in Jahren	Kette I		Kette II		Kette III				Kette IV		
	U 236	Th 232	Np 237	U 233	Th 229	U 238	U 234	Th 230	Ra 226	U 235	Pa 231
2.048.000	2,210E-21			4,394E-26	1,714E-27	3,134E-21	3,149E-21	3,049E-21	5,775E-22	3,872E-22	7,009E-25
3.048.000	6,402E-09	9,589E-16		4,776E-15	2,266E-16	8,720E-09	8,726E-09	1,573E-10	2,996E-09	1,147E-09	3,351E-12
4.048.000	1,125E-03	3,852E-10		3,289E-11	1,717E-12	1,514E-03	1,515E-03	4,404E-05	8,392E-04	2,079E-04	8,342E-07
5.048.000	1,034E-01	8,998E-08		2,614E-10	1,417E-11	1,401E-01	1,402E-01	5,837E-05	1,112E-01	1,982E-02	9,656E-05
6.048.000	2,029E-01	6,174E-07		3,319E-10	1,808E-11	2,799E-01	2,801E-01	1,522E-02	2,901E-01	4,047E-02	2,259E-04
7.048.000	4,691E-02	9,625E-07		3,655E-10	1,991E-11	6,622E-02	6,625E-02	4,383E-03	8,352E-02	9,720E-03	5,896E-05
8.048.000	3,023E-03	1,013E-06	< E-26	3,937E-10	2,146E-11	4,426E-03	4,426E-03	3,373E-04	6,427E-03	6,585E-04	4,558E-06
9.048.000	8,744E-05	1,017E-06		4,176E-10	2,277E-11	1,864E-03	1,864E-04	1,399E-05	2,366E-04	2,952E-05	1,841E-07
10.048.000	2,369E-06	1,019E-06		4,380E-10	2,387E-11	6,004E-05	5,544E-05	4,711E-06	6,171E-05	1,065E-05	5,865E-08
11.048.000	9,411E-07	1,021E-06		4,551E-10	2,481E-11	5,038E-05	5,786E-05	3,037E-06	5,786E-05	1,032E-05	5,641E-08
12.048.000	9,245E-07	1,022E-06		4,694E-10	2,560E-11					1,032E-05	5,639E-08
13.048.000	9,245E-07	1,024E-06		4,819E-10	2,627E-11						
14.048.000	9,245E-07	1,026E-06		4,923E-10	2,683E-11						