

## DECKBLATT

**EU 339**

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
9K	352126.39		EGC	RB	0006	01

**Titel der Unterlage:**

Einfluß der bestehenden Tiefbohrungen und des Schachtverschlusses.  
Modellierung der Radionuklidenausbreitung.  
Bd. I: Text, Bd. II: Tabellen und Abbildungen

**Seite:**

I.

**Stand:**

April 1991

**Ersteller:**

Colenco AG

**Textnummer:**

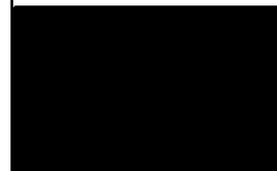
**Stempelfeld:**

PSP-Element TP...:.....

zu Plan-Kapitel: **3.9**

PL

26.04.1991



Freigabe für Behörden

PL

26.04.1991



Freigabe im Projekt

Diese Unterlage unterliegt samt Inhalt dem Schutz des Urheberrechts sowie der Pflicht zur vertraulichen Behandlung auch bei Beförderung und Vernichtung und darf vom Empfänger nur auftragsbezogen genutzt, vervielfältigt und Dritten zugänglich gemacht werden. Eine andere Verwendung und Weitergabe bedarf der ausdrücklichen Zustimmung.

# Revisionsblatt

BfS

EU 339

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
9K	352126.39		EGC	RiB	0006	00

**Titel der Unterlage:**  
 Einfluß der bestehenden Tiefbohrungen und des Schachtverschlusses.  
 Modellierung der Radionuklidausbreitung.  
 Bd.I: Text, Bd. II: Tabellen und Abbildungen

**Seite:**  
 II.

**Stand:**  
 11.04.1990

Rev.	Revisionsst. Datum	verant. Stelle	Gegenzeichn. Name	rev. Seite	Kat. *)	Erläuterung der Revision
01	05.04.91	ET 2.4	[REDACTED]	Bd.I: 46- 50	S	Berichtigung der Aussagen zu U 232 und Pu 238, durch zusätzlichen Text ergibt sich eine Verschiebung im Kap. 3.5 bis S. 50
				Bd.II: 13	S	Berichtigung der Aussagen zu U 232 und Pu 238
				16- 20	S	Berichtigung der Aussagen zu U 232 und Pu 238
				25	S	Berichtigung der Quartärkonzentration für Cs 135
				26	S	Berichtigung der Angaben zu U 236
				28	S	Berichtigung der Angaben zu Ni 59, Rb 87 und Mo 93
				33	S	Berichtigung der Angaben zu Cs 135, U 232 und Pu 238
				34	S	Berichtigung der Angaben zu U 232, Pu 238 und Pb 210

\*) Kategorie R = redaktionelle Korrektur  
 Kategorie V = verdeutlichende Verbesserung  
 Kategorie S = substantielle Änderung  
 Mindestens bei der Kategorie S müssen Erläuterungen angegeben werden.

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

		<u>Seite</u>
1	EINLEITUNG . . . . .	1
1.1	Zielsetzung. . . . .	1
1.2	Konzeptuelles Modell . . . . .	2
1.3	Betrachtete Rechenfälle . . . . .	4
1.4	Aufbau des Berichtes . . . . .	4
2	TRANSPORTWEGE . . . . .	6
2.1	Hydrogeologische Eigenschaften der berücksichtigten Formationen . . . . .	6
2.1.1	Oxford . . . . .	6
2.1.2	Kimmeridge . . . . .	7
2.1.3	Unterkreide und Alb . . . . .	8
2.1.4	Oberkreide . . . . .	9
2.1.5	Quartär . . . . .	10
2.2	Ergebnisse der regionalen hydrogeologischen Modellierung . . . . .	10
2.2.1	Kurzbeschreibung der gewählten Rechenfälle . . . . .	10
2.2.2	Ergebnisse der berücksichtigten Rechenfälle und Annahmen für die Ausbreitungswege . . . . .	12
2.2.2.1	Rechenfall R34 (Referenzfall Tiefbohrungen) . . . . .	12
2.2.2.2	Rechenfall R16 . . . . .	16
2.2.2.3	Rechenfall R29 . . . . .	17
2.2.2.4	Rechenfall R35 (Referenzfall Schachtverschluss) . . . . .	18
2.2.2.5	Rechenfall R38 . . . . .	19
2.2.2.6	Rechenfall R39 . . . . .	20
2.2.3	Berücksichtigung der Querdispersion in unteren Schichten . . . . .	20
2.3	Hydraulische Verhältnisse in der Oberkreide . . . . .	22
2.3.1	Lokales hydrogeologisches Modell . . . . .	22
2.3.2	Querdispersion in der Oberkreide . . . . .	25
2.3.3	Ergebnisse des lokalen hydrogeologischen Modells . . . . .	27
2.3.3.1	Ergebnisse R16 . . . . .	27
2.3.3.2	Ergebnisse R34 . . . . .	28
2.3.3.3	Ergebnisse R35 . . . . .	29
2.3.3.4	Ergebnisse R38 . . . . .	30
2.3.3.5	Ergebnisse R39 . . . . .	30

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S (Fortsetzung)

	<u>Seite</u>
2.4	Verdünnung im Quartär . . . . . 32
2.5	Gesamte Verdünnung entlang den Fließwegen . . . . . 33
3	MODELLIERUNG DES RADIONUKLIDTRANSPORTES . . . . . 35
3.1	Einleitung . . . . . 35
3.2	Kurzbeschreibung des Rechenprogramms RANCHMD . . . . . 35
3.3	Definition der Transportparameter . . . . . 40
3.4	Nuklidfreisetzung aus dem Endlager . . . . . 44
3.5	Sorptionsparameter . . . . . 47
4	MODELLERGEBNISSE ZUM RADIONUKLIDTRANSPORT . . . . . 51
4.1	Ergebnisse im Referenzfall R34 "Tiefbohrungen" . . . . . 51
4.1.1	Nuklidtransport R34 durch Oxford und Kimmeridge . . . . . 51
4.1.2	Nuklidtransport R34 durch Unterkreide und Alb entlang dem Bohrloch . . . . . 53
4.1.3	Nuklidtransport R34 durch die Oberkreide . . . . . 55
4.1.4	Konzentrationen im Quartär im Fall R34 . . . . . 55
4.2	Ergebnisse der Parametervariationen zum Referenzfall "Tiefbohrungen" . . . . . 56
4.2.1	Nuklidtransport R16 durch Oxford und Kimmeridge . . . . . 57
4.2.2	Nuklidtransport R16 durch Unterkreide und Alb entlang dem Bohrloch . . . . . 57
4.2.3	Nuklidtransport R16 durch die Oberkreide . . . . . 59
4.2.4	Konzentrationen im Quartär im Fall R16 . . . . . 60
4.3	Ergebnisse im Referenzfall R35 "Schachtverschluss" . . . . . 61
4.3.1	Nuklidtransport R35 durch Oxford und Kimmeridge . . . . . 61
4.3.2	Nuklidtransport R35 durch Unterkreide und Alb . . . . . 61
4.3.3	Nuklidtransport R35 durch die Oberkreide . . . . . 62
4.3.4	Konzentrationen im Quartär im Fall R35 . . . . . 62

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S (Fortsetzung)

	<u>Seite</u>
4.4	Ergebnisse der Parametervariationen zum Referenzfall "Schachtverschluss" . . . . . 63
4.4.1	Nuklidtransport R38, R39 durch Oxford und Kimmeridge . . . . . 63
4.4.2	Nuklidtransport R38, R39 durch Unterkreide und Alb . 63
4.4.3	Nuklidtransport R38, R39 durch die Oberkreide . . 64
4.4.4	Konzentrationen im Quartär in den Fällen R38 und R39 . . . . . 65
4.5	Zusammenstellung der Konzentrationen im Quartär . 65
5	SCHLUSSFOLGERUNGEN . . . . . 66
5.1	Entwicklung der Nuklidkonzentrationen . . . . . 66
5.1.1	Reduktion der Nuklidkonzentrationen . . . . . 66
5.1.2	Zeitliche Verzögerung der Migration . . . . . 67
5.2	Relevante hydraulische Parameter für die Langzeitsicherheit . . . . . 68
LITERATURVERZEICHNIS . . . . .	70
VERZEICHNIS DER TABELLEN . . . . .	73
VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN . . . . .	76

1

## EINLEITUNG

Der Plan Konrad 9/86 [1] stützt sich auf Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung und zur Radionuklidenausbreitung ab, mit welchen die Wirksamkeit der verschiedenen Barrieren und die Freisetzung von Radionukliden aus dem Endlager in die Biosphäre untersucht wird.

Im Bereich der Grube Konrad existieren mehrere Tiefbohrungen aus früheren Explorationstätigkeiten, die in diesen Rechnungen nicht berücksichtigt wurden. Ebenso wurden die Schächte Konrad 1 und Konrad 2 und die Wirksamkeit des vorgesehenen Verschlusskonzeptes nicht betrachtet.

Die Existenz dieser Bohrungen bzw. der Schächte wirft die Frage auf, welche Bedeutung diese Bohrungen und Schächte für die Langzeitsicherheit des geplanten Endlagers haben:

- Wie gross ist der Wasserfluss entlang der Bohrungen/Schächte?
- Welches sind die Fliesszeiten?
- Wie gross ist der Anteil des Grubenwassers am Gesamtfluss durch die Bohrungen/Schächte?
- Welches sind die Freisetzungsraten entlang der Bohrungen/Schächte und die resultierenden Konzentrationen von Radionukliden in der Biosphäre?

Die drei ersten Fragen werden in den Berichten [2,3] behandelt. Das Ziel des vorliegenden Berichts ist, die potentielle Ausbreitung der Radionuklide vom Endlager bis zur Biosphäre für verschiedene Rechenfälle zu untersuchen und zu diskutieren.

1.1

### Zielsetzung

Die hydrogeologische Modellierung des Gebietes Konrad zeigt, dass die Bewegung der Tiefengrundwässer entlang den Tiefbohrungen oder Grubenschächten durch das Deckgebirge einen möglichen Freisetzungspfad bildet, mit welchem Radionuklide aus dem Endlager in die Biosphäre gelangen können [2,3]. Um den möglichen radioökologischen Einfluss der Tiefbohrungen quantitativ zu ermitteln, werden Modellrechnungen zur Radionuklidmigration vom Endlager zur nächsten, hydraulisch potentiell wirksamen Bohrung, längs dieser Bohrung und durch die Oberkreide (Plänerkalke) ins Quartär durchgeführt. Mit ähn-

lichen Rechnungen wird ebenfalls die mögliche Nuklidfreisetzung entlang den Schächten untersucht.

Hauptziel der Berechnungen ist die Ermittlung der Radionuklidkonzentrationen im oberflächennahen Grundwasser. Der vorliegende Bericht beschreibt die Modellrechnungen und fasst deren Resultate zusammen.

Ausgangspunkte und Grundlagen für die Berechnungen sind die in [15] ermittelten Nuklidfreisetzungsraten aus dem Endlager in die Geosphäre sowie die Ergebnisse der hydrogeologischen Modellierung über den Einfluss der bestehenden Tiefbohrungen und der Schächte Konrad 1 und Konrad 2 auf das regionale Fließsystem [2,3].

Die Nuklidfreisetzungsraten in die Geosphäre werden als Funktion des Wasserflusses durch das Grubengebäude und der Wirksamkeit der technischen Barrieren ermittelt. Da die hydrogeologische Modellierung für die betrachteten Rechenfälle kleinere Werte für den Grubendurchfluss ergibt als im Plan Konrad 9/86, wurden die Freisetzungsraten für die Grubendurchflüsse einiger Rechenfälle neu berechnet.

Für den Transport der im Grundwasser gelösten Radionuklide sind mehrere Prozesse von Bedeutung. Die Retardation der gelösten Stoffe durch Matrixdiffusion und Sorption führt zu einer Verzögerung der Freisetzung gegenüber den Wasserflusszeiten vom Grubengebäude zur Erdoberfläche, wie sie aufgrund von Distanz und Abstandsgeschwindigkeit ermittelt werden. Dispersion, radioaktiver Zerfall während der Migrationszeit und Verdünnung bewirken eine Verminderung der maximalen Aktivitätskonzentrationen.

## 1.2 Konzeptuelles Modell

Die Bewegung von potentiell kontaminiertem Grundwasser unter Berücksichtigung der Tiefbohrungen und der Schächte Konrad 1 und Konrad 2 wurde durch umfangreiche Analysen der Fließstrajektorien untersucht ([2,3]). Die Ergebnisse dieser Analysen zeigen, dass die Fließwege vom Grubengebäude bis zur Oberfläche mehrere Abschnitte aufweisen:

Im Fall "Tiefbohrungen" erstreckt sich der erste Abschnitt vom Grubengebäude bis zu den unversetzten Bereichen der Bohrungen. Die zeitschnellsten Fließstrajektorien mit Startpunkt im Endlagerbereich führen durch die Schichten Oxford und Kimmeridge bis zur Basis

des unversetzten Abschnittes der Bohrung Bleckenstedt 1. In diesen beiden Schichten bewegt sich das Wasser in einem Netz von Klüften, d.h. entlang diskreten Fließpfaden. Die Nuklidmigration entlang diesem Teil des Migrationsweges wird mit dem Computerprogramm RANCHMD [4] berechnet. Grundsätzliche Voraussetzungen für die Anwendbarkeit dieses Programmes unter Verwendung der Option Matrixdiffusion sind, dass Advektion und Dispersion in diskreten wasserleitenden Klüften stattfindet und dass die Radionuklide senkrecht zur Fließrichtung in die Matrix diffundieren können.

Der zweite Abschnitt des Pfades führt entlang der Bohrung Bleckenstedt 1 durch die Deckschichten der Unterkreide (Valendis, Hauterive, Barrême und Apt) und des Alb. Sorption innerhalb der Bohrung und Matrixdiffusion aus der Bohrung in die undurchlässigen Gesteine der Unterkreide und des Alb bewirken wieder eine Verzögerung des Transportes. Für eine Variante des Referenzfalles wird gezeigt, dass bei erhöhter hydraulischer Durchlässigkeit des unversetzten Bohrlochabschnittes die Fließgeschwindigkeit im Bohrloch derart hoch ist, dass das Ausmass der Verzögerung vernachlässigbar ist und ein instantaner Transport durch diesen zweiten Abschnitt angenommen werden kann. Durch Zufluss von Wasser aus den Deckschichten wird die Konzentration in jedem Fall mehr oder weniger stark reduziert.

Im Fall "Schachtverschluss" führt der zu betrachtende Radionuklidausbreitungsweg direkt vom Grubengebäude in den Schacht Konrad 1 und entlang diesem durch die Schichten Oxford, Kimmeridge, Unterkreide und Alb. Sorption innerhalb des Schachtes und Matrixdiffusion aus dem Schacht in die Unterkreide und das Alb bewirken teilweise eine bedeutende Verzögerung. Wie im Fall "Tiefbohrungen" ergibt der Zufluss von Wasser aus den Deckschichten eine Verdünnung der Nuklidkonzentrationen.

In den Plänerkalken wird das entlang der Bohrung oder dem Schacht aufwärts fließende Wasser vom regionalen horizontalen Gradienten beeinflusst. Der Wasserfluss entlang der Bohrung nimmt stark ab, und es bildet sich eine Fahne von kontaminiertem Wasser, welche mit einer ausgeprägten horizontalen Ausdehnung und einer leichten Tendenz nach oben mit dem regionalen Fluss mitgeführt wird. Diese Fahne erreicht schliesslich die obere Grenze der Plänerkalke und exfiltriert ins Quartär. Je nach den Sorptionseigenschaften der Nuklide in der Oberkreide erfolgt auch in diesem Wegabschnitt eine merkliche Verzögerung und, als Folge der Dispersion und der Matrixdiffusion, eine Reduktion der Nuklidkonzentration.

Die Freisetzung der Radionuklide ins Grundwasser des Quartärs erfolgt somit durch einen räumlich ausgedehnten Zustrom von relativ geringen Mengen kontaminierten Wassers aus den Plänerkalken.

Der Abfluss von kontaminiertem Wasser aus dem Bohrloch bzw. Schacht in die Plänerkalke wird mit einem lokalen hydraulischen Modell numerisch simuliert. Die Auswirkung von Sorption und Matrixdiffusion in den Plänerkalken auf den zeitlichen Verlauf der Freisetzung ins Quartär wird wiederum mit dem Rechenprogramm RANCHMD ermittelt. Die Ausdehnung der Nuklidwolke quer zur Ausbreitungsrichtung in den Plänerkalken und die Verdünnung im Quartär wird mit analytischen Methoden berechnet.

Ein Mass für die radioökologische Bewertung des Einflusses der Bohrungen bzw. Schächte ist die Radionuklidkonzentration im Grundwasser des Quartärs.

### 1.3 Betrachtete Rechenfälle

Der Transport der Radionuklide vom Grubengebäude bis zum oberflächennahen Wasser im Quartär wird unter Zugrundelegung verschiedener hydrogeologischer Rechenfälle modelliert [2,3].

Der Rechenfall R34 stellt den Referenzfall "Tiefbohrungen" für die Betrachtung des Einflusses der existierenden Bohrungen dar. Parametervariationen zu diesem Referenzfall sind die Rechenfälle R16 und R29. Als Referenzfall "Schachtverschluss" wird der Rechenfall R35 untersucht. Die Rechenfälle R38 und R39 stellen zwei Varianten zu diesem Referenzfall dar.

Im vorliegenden Bericht werden nur die für die Transportrechnungen relevanten Ergebnisse der hydrogeologischen Modellierung wiederholt.

### 1.4 Aufbau des Berichtes

Der Aufbau des Berichtes entspricht den einzelnen Arbeitsschritten bei der Modellierung der Nuklidausbreitung. Einzelne Abschnitte sind zusätzlich nach den Rechenfällen unterteilt.

Kapitel 2 beschreibt die geologischen und hydrogeologischen Grundlagen der Modellierung. Abschnitt 2.1 enthält eine Beschreibung der geologischen Eigenschaften

ten des Wirtsgesteins und der Schichten im Hangenden und Abschnitt 2.2 die Ergebnisse der hydrogeologischen Modellierung, welche für die Definition der Fließwege verwendet werden.

Da die Finite-Element-Diskretisierung der Plänerkalke im regionalen Modell nicht detailliert genug ist zur Beurteilung der hydraulischen Verhältnisse im Bohrloch bzw. Schacht innerhalb dieser Schicht, wird hier ein generisches lokales Modell verwendet. Die Beschreibung dieses Modells und die Diskussion der Resultate finden sich in Abschnitt 2.3.

Abschnitt 2.4 behandelt die Verdünnung im Quartär und Abschnitt 2.5 fasst die Verdünnung entlang den Fließwegen für die berücksichtigten Rechenfälle zusammen.

Kapitel 3 beschreibt das Konzept der Nuklidausbreitungsmodellierung, insbesondere das Rechenprogramm RANCHMD (Abschnitt 3.2), die der Modellierung zugrunde gelegten kleinräumigen Fließsysteme (Abschnitt 3.3) und die übrigen verwendeten Parameter (Abschnitt 3.3, 3.4 und 3.5).

Die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen sind im Kapitel 4 dargestellt. Dieses Kapitel ist nach Rechenfällen und geologischen Schichten unterteilt.

Die Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse und die Schlussfolgerungen finden sich im Kapitel 5.

## 2 TRANSPORTWEGE

### 2.1 Hydrogeologische Eigenschaften der berücksichtigten Formationen

Als Grundlage für die Beschreibung der betrachteten Transportwege und die Definition der kleinräumigen Fließsysteme werden im folgenden die geologischen und hydraulischen Eigenschaften der durchquerten geologischen Formationen kurz zusammengefasst.

In den Rechenfällen "Tiefbohrungen" führen die zu betrachtenden Fließwege vom Grubengebäude durch das Oxford und Kimmeridge (Kluftwasserleiter) und erreichen die Bohrung Bleckenstedt 1 an der Basis der Unterkreide. In den Rechenfällen "Schachtverschluss" führen die Fließwege vom Grubengebäude direkt in den Schacht Konrad 1 und entlang diesem bis an die Basis der Oberkreide. Nach dem Durchqueren der Unterkreide und des Alb breitet sich das potentiell kontaminierte Wasser im Kluftwasserleiter Oberkreide aus. Für die Modellierung der Nuklidmigration sind also diese Schichten massgebend. Ihre Eigenschaften wurden schon anderswo ausführlich dargestellt [5], [6], [7], [8]. Im folgenden werden nur kurz die wichtigsten Punkte in Erinnerung gerufen.

Oxford, Kimmeridge und Oberkreide werden kleinräumig und für die Nuklidmigration als Kluftwasserleiter betrachtet. Die entsprechenden, bei der Transportmodellierung verwendeten Kluftweite- und Kluftabstandswerte werden deshalb bereits hier aufgeführt.

#### 2.1.1 Oxford

Oxford (Korallenoolith und Hersumer Schichten) besteht aus Tonmergelsteinen, Kalksteinen und oolithischen Erzen. Aufgrund seiner lithologischen Zusammensetzung stellt das Oxford ein Gestein mit sehr geringer primärer Durchlässigkeit dar. Die in der Bohrung K 101 ausgeführten Messungen zeigen Durchlässigkeitsbeiwerte von  $5 \cdot 10^{-9}$  m/s bis  $10^{-11}$  m/s. Daneben wird eine durch wasserführende Klüfte erzeugte höhere, sekundäre Durchlässigkeit festgestellt. In der Bohrung K 101 wurden in einer Kluftzone an der Basis des Unteren Korallenoolith  $k_f$ -Werte in der Größenordnung von mindestens  $10^{-4}$  m/s gemessen [5]. Nach Beobachtungen aus der Grube Konrad dürften die Klüfte im allgemeinen aber kein weitreichendes Netzwerk bilden, was die Gebirgsdurchlässigkeit gegenüber der Durchlässigkeit einzelner Klüfte vermin-

dert. So wurde zum Beispiel am Ort 300 im Nordosten des Grubengebäudes, 4 m vom Stoss entfernt, ein wassergefülltes Kluftsystem mit einem Druck von ca. 70 bar gefunden [5]. In-situ-Messungen zeigen typischerweise  $k_f$ -Werte  $< 10^{-8}$  m/s, sehr selten  $> 10^{-6}$  m/s. Für die regionale Modellierung wurde eine grossräumige hydraulische Durchlässigkeit des Oxford von  $10^{-8}$  m/s, innerhalb der Störzone des Konrad-Grabens und damit in der Umgebung der Bohrung Bleckenstedt 1 eine solche von  $10^{-7}$  m/s angenommen.

Porositätswerte stammen aus Bohrungen und aus Beobachtungen in der Grube Konrad und liegen innerhalb eines breiten Bandes zwischen 0,1 % und 27 % [5],[6]. Für die regionale Modellierung der Wasserbewegung wurde eine nutzbare Porosität von 2 % angenommen.

In der Grube Konrad (1. und 6. Sohle) wird ein Abstand der Grossklüfte ( $> 2$  m Ausbisslänge) von etwa 24 m ermittelt und ein solcher von ca. 4,8 m, wenn alle Klüfte betrachtet werden [8]. Zwischen der 4. und 5. Sohle beträgt der Abstand der Klüfte nur 0,2 m - 0,7 m. Aufgrund dieser Ergebnisse wird in [7] ein mittlerer Kluftabstand von 1,33 m angenommen.

Für die Nuklidmigration werden eine Kluftweite von 1 mm und ein Kluftabstand von 1 m angesetzt. Die resultierende Fliessporosität beträgt also 0,1 %.

Im Abschnitt 3.3 wird gezeigt, dass die Radionuklidenausbreitung bei fester Filtergeschwindigkeit des Grundwassers und bei festem Kluftabstand nicht von der Kluftweite abhängt.

### 2.1.2 Kimmeridge

Im Hangenden des Oxford besteht der Oberjura aus Mergeln, Tonsteinen, Mergelkalken und Kalksteinen des Kimmeridge und Portland (Münder Mergel). Er ist aus sehr heterogenen Gesteinen aufgebaut, aber im allgemeinen mehr tonig als das Oxford [5].

In [5] wird der Kimmeridge vereinfachend als Porenwasserleiter betrachtet. In [6] werden demgegenüber die mergeligen Schichten eher als ein gering durchlässiger Kluftwasserleiter dargestellt.

An Kernproben wurden  $k_f$ -Werte von  $10^{-10}$  m/s bis  $10^{-12}$  m/s gemessen. Als mittlerer grossräumiger  $k_f$ -Wert wurde für die regionale Modellierung ein Wert von  $5 \cdot 10^{-9}$  m/s, innerhalb der Störzone des Konrad-Grabens ein Wert von  $5 \cdot 10^{-8}$  m/s angenommen.

Die im Labor gemessenen Porositäten zeigen Werte von 2 % - 23 % für die Gesamtporosität [5], von 0,8 % - 22,5 % für die effektive Porosität [6]. Die in einem solchen tonigen Grundwasserleiter durchflossene Porosität entspricht aber nicht der gesamten im Labor gemessenen effektiven Porosität sondern nur der Kluftporosität.

Der Abstand zwischen den Klüften beträgt im Mittel etwa 4 m, jener zwischen den Schichtflächen etwa 2 m [8]. In [7] wird ein mittlerer Abstand von 1,33 m angenommen.

Wie im Oxford werden für die Nuklidmigration eine Kluftweite von 1 mm und ein Kluftabstand von 1 m angesetzt. Die resultierende Fließporosität in Kimmeridge beträgt also 0,1 %.

### 2.1.3 Unterkreide und Alb

Im allgemeinen wird für die Festlegung der Schichteinheiten in einem hydrogeologischen Modell keine reine stratigraphische Unterteilung verwendet, sondern eine Unterteilung, die sich auf lithologischen und hydrogeologischen Eigenschaften der Schichten abstützt. Deshalb wird die Unterkreide in "Alb"; "Hilssandstein" und "Unterkreide" (Valangin bis Abt, Abkürzung "kru") unterteilt. Im gleichen Sinne wird aus hydrogeologischen Gründen Wealden für die Modellierung nicht der Unterkreide, sondern dem Oberjura zugeordnet.

In den beiden Formationen Unterkreide und Alb verlaufen die Fließwege entlang der Bohrung Bleckenstedt 1 bzw. dem Schacht Konrad 1. Der Abschnitt des Bohrlochs Bleckenstedt 1 in der Unterkreide und im Alb wird als unversetzt angenommen [2]. Die axiale Transmissivität wird somit durch Gebirgskonvergenz, partiellen Einbruch der Bohrlochwand und Quellvorgänge in den aufgelockerten, ehemals kompakten Tonen bestimmt. Massgebend für die Migration der Radionuklide entlang dem Bohrloch sind somit die Eigenschaften der beiden Formationen.

Der Verschluss der beiden Schächte erfolgt in den Deckschichten der Unterkreide und des Alb durch Einbringen von Ton, wodurch die Hohlräume und (mindestens teilweise) auch die Auflockerungszone um die Schächte abgedichtet werden (andere Verschlussvarianten wurden betreffend hydraulischer Wirksamkeit ebenfalls untersucht [3]). Es kann angenommen werden, dass die Verfüllung der Schächte undurchlässiger ist als die Auflockerungszone, so dass die Fließwege entlang dem Schacht Konrad 1 vorwiegend in dieser verlaufen. Für die Migration der

Radionuklide sind somit ebenfalls die Eigenschaften der beiden Formationen Unterkreide und Alb massgebend.

Die Unterkreide und das Alb bestehen aus Ton- und Tonmergelgesteinen und werden als schlechte Porenwasserleiter betrachtet. Tests in der Bohrung K 101 ergaben  $k_f$ -Werte von weniger als  $10^{-11}$  m/s im Alb und in der Unterkreide. Injektionstests in den Schächten zeigten  $k_f$ -Werte in der Grössenordnung von  $10^{-9}$  m/s in der Unterkreide. Für die regionale hydrogeologische Modellierung wurden  $k_f$ -Werte von  $10^{-11}$  m/s für die Unterkreide (innerhalb der Störzone des Konrad-Grabens  $10^{-10}$  m/s) und  $10^{-12}$  m/s für das Alb verwendet. Für den unversetzten Abschnitt des Bohrlochs Bleckenstedt 1 und für die Auflockerungszone um den Schacht Konrad 1 wurden wesentlich höhere Werte angenommen (siehe [2] und [3]).

Der Streubereich für die Gesamtporosität beträgt 8 % - 30 % in [5], für die effektiven Porositäten (Labormessungen) 7,4 % - 20,8 % in [6]. Für die regionale hydrogeologische Modellierung, also für die Berechnung der Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers, wurde 10 % verwendet.

Für die Modellierung der Nuklidmigration werden die gleichen Werte wie für die hydrogeologische Modellierung der entsprechenden Rechenfälle verwendet. Für die Ermittlung der Abstandsgeschwindigkeit wird ebenfalls eine Fliessporosität von 10 %, für die Berechnung des Sorptionsvermögens (Retentionsfaktor) eine Matrixporosität von 20 % angesetzt. Diese Werte entsprechen den Annahmen im Plan Konrad 9/86 [1].

#### 2.1.4 Oberkreide

In der Umgebung des Bohrlochs Bleckenstedt 1 und des Schachtes Konrad 1 wird die Oberkreide nur aus zwei Formationen, Cenoman und Turon, gebildet. Die Emscher Mergel sind hier nicht vorhanden. Die Oberkreide besteht aus Tonmergel, Kalkmergel und Plänerkalken. Diese Gesteine, als "Plänerkalke" zusammengefasst, werden als schlechtleitender Kluftwasserleiter betrachtet.

Hydraulische Durchlässigkeiten von  $10^{-7}$  m/s -  $10^{-8}$  m/s wurden in Bohrlochtests in der Bohrung Konrad 101 gemessen. Laboruntersuchungen wiesen  $k_f$ -Werte von  $8 \cdot 10^{-8}$  m/s -  $8 \cdot 10^{-12}$  m/s auf [6]. In der hydrogeologischen Modellierung wurde ein  $k_f$ -Wert von  $10^{-7}$  m/s verwendet.

Der Streubereich für die Gesamtporosität beträgt 5 % - 21 % in [5], 8,4 % - 19,1 % für die effektiven Porositäten (Labormessungen) in [6]. In Kluftwasserleitern ist die nutzbare Porosität vorwiegend durch das Kluft-hohlraumvolumen bedingt. Porositäten von 0,5 % - 2,8 % werden in anderen Gebieten in den Plänerkalken angegeben. Für die regionale Modellierung wurde ein Wert von 5 % verwendet.

Für die Plänerkalke wird in [8] ein mittlerer Kluftabstand von 1 m und ein mittlerer Schichtflächenabstand von 1 m angegeben.

Für die Nuklidmigration werden eine Kluftweite von 0,02 mm und ein Kluftabstand von 0,1 m angesetzt. Die resultierende Fließporosität beträgt also 0,02 %.

#### 2.1.5 Quartär

Das Quartär besteht aus Mergeln und Tonen, die sich lateral und vertikal im Wechsel mit Sanden und Kiesen verzahnen. Es wird deshalb als Porenwasserleiter mit niedriger Durchlässigkeit betrachtet. In der regionalen Modellierung wurde ein  $k_f$ -Wert von  $10^{-5}$  m/s angenommen.

Im letzten Teil des Fließweges wird für die Ausbreitung des potentiell kontaminierten Wassers im Quartär eine sofortige und vollständige Vermischung mit dem oberflächennahen Wasser angenommen. Die Verdünnungsrate ist proportional zum Wasserfluss im Quartär, welcher von der Mächtigkeit der gesättigten Zone und dem (horizontalen) hydraulischen Gradienten abhängt (vgl. Abschnitt 2.4).

## 2.2 Ergebnisse der regionalen hydrogeologischen Modellierung

### 2.2.1 Kurzbeschreibung der gewählten Rechenfälle

Im Rahmen der Modellrechnungen mit dem Programm FEM301 für ein alternatives geologisches/hydrogeologisches Modell unter Berücksichtigung der bestehenden Tiefbohrungen und der Grubenschächte wurden die folgenden Rechenfälle untersucht [2],[3]:

Tiefbohrungen:

- geometrische und topologische Verfeinerung der Modellierung (R08, R10, R15, R16)
- Referenzfall "Tiefbohrungen" (R34)

- Variation des  $k_f$ -Wertes im unversetzten Bohrlochabschnitt (R16, R17, R19, R31)
- Einführung einer hochdurchlässigen Kluftzone oberhalb des Grubengebäudes (R29, R32)

Schachtverschluss:

- Verschiedene Verschlussvarianten (R18, R20-R28)
- Referenzfall "Schachtverschluss" (R35)
- Einführung einer hochdurchlässigen Kluftzone oberhalb des Grubengebäudes (R30, R33)
- Variation des  $k_f$ -Wertes in der Tonverfüllung der Schächte in der Unterkreide und im Alb (R38, R39)

In den Rechenfällen "Schachtverschluss" wurden auch die Tiefbohrungen als mögliche Fließwege für die Ausbreitungsrechnung untersucht. Die in den zitierten Rechenfällen verwendeten Parameter (hydraulische Durchlässigkeiten der Bohrungen/Schächte, Querschnitte und Transmissivitäten) sowie die im Modell definierten Durchlässigkeits-Klassen sind in [2,3] zusammengestellt.

Für die Ausbreitungsrechnungen "Schachtverschluss" wird nur die Verschlussvariante 4 berücksichtigt. In dieser Variante besteht die Verfüllung des Schachtes und seiner Auflockerungszone aus:

- Haufwerk im Oxford und Kimmeridge (angenommener  $k_f$ -Wert:  $10^{-4}$  m/s)
- Ton in der Unterkreide und im Alb (angenommener  $k_f$ -Wert:  $10^{-8}$  m/s im Referenzfall)
- Asphalt in der Oberkreide und im Quartär (angenommener  $k_f$ -Wert:  $10^{-4}$  m/s)

Die den Transportrechnungen zugrunde gelegten Rechenfälle unterscheiden sich vor allem in den  $k_f$ -Werten der durch die Unterkreide und das Alb führenden Bohrloch- bzw. Schachtabschnitte:

Rechenfälle "Tiefbohrungen":

- Im Rechenfall R34, Referenzfall "Tiefbohrungen", wird im unversetzten Bohrlochabschnitt ein  $k_f$ -Wert von  $10^{-5}$  m/s angesetzt.
- Der Rechenfall R16 bildet die erste Variante des Falles R34, mit einem  $k_f$ -Wert von  $10^{-3}$  m/s im unversetzten Bohrlochabschnitt.
- Für den Rechenfall R29 wird als zweite Variante ebenso  $10^{-3}$  m/s im unversetzten Bohrlochabschnitt angesetzt. Zusätzlich wird eine ausgedehnte Kluftzone oberhalb des Grubengebäudes angenommen ( $k_f$ -Wert:  $10^{-3}$  m/s).

### Rechenfälle "Schachtverschluss":

- Im Referenzfall "Schachtverschluss" R35 wird im mit Ton verfüllten Schachtabschnitt in der Unterkreide und im Alb ein  $k_f$ -Wert von  $10^{-8}$  m/s angesetzt.
- Die Rechenfälle R38 und R39 stellen zwei Varianten des Rechenfalls R35 dar. Als Parametervariationen wurden für R38 und R39  $k_f$ -Werte von  $10^{-7}$  m/s bzw.  $10^{-6}$  m/s im verfüllten Schachtabschnitt in der Unterkreide und im Alb angenommen.

### 2.2.2 Ergebnisse der berücksichtigten Rechenfälle und Annahmen für die Ausbreitungswege

Im folgenden werden die Ergebnisse der berücksichtigten Rechenfälle diskutiert und Fließwege für die Transportrechnung festgelegt. Die relevanten Parameter dieser Fließwege bis zum Alb sowie die Wasserflüsse durch das Grubengebäude sind in Tabelle 2-1 zusammengefasst.

#### 2.2.2.1 Rechenfall R34 (Referenzfall Tiefbohrungen)

Als Referenzfall für die Untersuchung der radioökologischen Auswirkungen der Tiefbohrungen wird der Rechenfall R34 gewählt, in welchem eine Durchlässigkeit von  $10^{-5}$  m/s im unversetzten Abschnitt des Bohrlochs Bleckenstedt 1 in der Unterkreide und im Alb angesetzt wird.

Fließwege wurden für 387 Startpunkte, welche über das gesamte Grubengebäude verteilt sind, berechnet.

Keine dieser Fließstrajektorien fließt in eine der Tiefbohrungen mit einer Zeit unterhalb 1 Mio. Jahre. Zwei Trajektorien erreichen die Bohrung Sauingen 1 nach einer Fließzeit von mehr als 17,5 Mio. Jahren. Um einen konservativen Radionuklidmigrationsweg an die Biosphäre zu definieren, wird im folgenden eine hypothetische Trajektorie zum Durchstosspunkt der Bohrung Bleckenstedt 1 mit der Basis Unterkreide postuliert.

Diese Bohrung wird gewählt, da sie die einzige in der Nähe des Grubengebäudes ist, die einen relativ hohen Wasserfluss nach oben aufweist. Andere Bohrungen im Endlagergebiet können aus folgenden Gründen ausser acht gelassen werden:

Hüttenberg 1

Die Nähe des Hilssandsteins verursacht in dieser Bohrung einen abwärts gerichteten Fluss in der Unterkreide.

Sauingen 1 und 2,  
Üfingen 2

Diese beiden Bohrungen sind in der Unterkreide versetzt (d.h. wenig durchlässig). Deshalb weisen sie einen äusserst geringen Fluss auf.

Alvesse 1, Üfingen 1

Fliessstrajektorien in diese Bohrungen können nur aus dem Kimmeridge oder aus höheren Schichten stammen. Die Fliesszeiten bis in die Nähe dieser Bohrungen für Trajektorien im Kimmeridge betragen aufgrund von Grobanalysen  $4 \cdot 10^5$  Jahre, nach detaillierteren Analysen sogar über  $7 \cdot 10^5$  Jahre (mit Porositätswerten gemäss [2]).

In der Bohrung Bleckenstedt 1 ist das hydraulische Potential an der Basis Unterkreide höher als im nordöstlichen Teil des Grubengebäudes (d.h. nordöstlich einer ungefähr NW-SE verlaufenden Linie durch den Schacht Konrad 2). Der Wasserfluss im Oxford und Kimmeridge südwestlich dieser Linie ist stark nach unten gerichtet. Deshalb ist es unwahrscheinlich, dass kontaminiertes Wasser in die Bohrung fließen kann.

Trotzdem wird angenommen, dass ein Fliessweg vom Grubengebäude zum unversetzten Abschnitt der Bohrung Bleckenstedt 1 existiert. Für die Definition dieses hypothetischen Fliessweges wird angenommen, dass kontaminiertes Wasser aus dem südlichen Abschnitt des Grubengebäudes zur Bohrung fliesst. Der hypothetische Fliessweg wird postuliert als gerade Verbindung zwischen dem Durchstosspunkt der Bohrung Bleckenstedt 1 mit der Basis Unterkreide und jenem Punkt in der Grube, welcher aufgrund der Potentialdifferenz und dem Abstand allein den schnellsten Weg (kürzeste Fliesszeit) ergibt.

Dies ergibt als Startpunkt die nordwestliche Ecke des südlichen Abschnittes des Grubengebäudes (siehe Abbildung 2-1). Da dieser Fliessweg die Äquipotentialflächen unter einem sehr schrägen Winkel schneidet, stellt er einen hypothetischen (und konservativen) Freisetzungspfad dar.

Die Fliessdistanzen durch Oxford und Kimmeridge werden proportional der Mächtigkeit dieser Schichten festgelegt.

Aufgrund der grossräumig gemittelten hydraulischen Durchlässigkeiten, wie sie für die hydrogeologische

Modellierung verwendet werden, ergibt sich eine Filtergeschwindigkeit entlang dem 900 m langen hypothetischen Fließweg von rund  $2 \cdot 10^{-6}$  m/a. Die Abstandsgeschwindigkeit, berechnet für eine Kluftporosität von 0,1 % (1 mm Klüfte), ist damit  $2 \cdot 10^{-3}$  m/a und die Wasserfließzeit beträgt etwa  $4 \cdot 10^5$  Jahre.

Falls der äusserst unwahrscheinliche und ungünstige Fall vorliegt, dass ausgerechnet entlang dem postulierten hypothetischen Fließweg eine hochdurchlässige und sehr ausgedehnte Kluftzone mit einem  $k_f$ -Wert von  $10^{-4}$  m/s (dem höchsten, in gestörten Zonen von nennenswerter Ausdehnung beobachteten Wert) verläuft, ist die Abstandsgeschwindigkeit in dieser Kluftzone grösser als der oben berechnete Wert. Allerdings ist die Erhöhung der Abstandsgeschwindigkeit in der Kluftzone geringer als das Verhältnis der  $k_f$ -Werte, da der Wasserzufluss und -abfluss aus der postulierten Kluftzone durch das umgebende Gestein begrenzt wird und dadurch der hydraulische Gradient innerhalb der Kluftzone geringer ist als ausserhalb.

Der hydraulische Gradient im Inneren einer isolierten Kluftzone, welche allseits von weniger durchlässigem Gestein umgeben ist, erfüllt dieselbe Gleichung wie der Temperaturgradient im Inneren eines gut wärmeleitenden Mediums, welches allseits von einem isolierenden Medium umgeben ist. Die Lösung für den speziellen Fall eines 3D-Ellipsoids in einem äusseren homogenen Feld kann mit Hilfe von elliptischen Integralen geschlossen ausgedrückt werden und ist in [9], S. 427, gegeben. Falls eine Hauptachse des Ellipsoids senkrecht auf dem äusseren Feld steht und gegen Unendlich strebt, geht das mathematische Problem in den 2D-Grenzfall eines "Zylinders mit elliptischem Querschnitt in einem äusseren Feld" über und die elliptischen Integrale entarten in gewöhnliche, lösbare Integrale. Setzt man die Hauptachsen des elliptischen Querschnitts gleich der halben Längsausdehnung und der halben Weite der Kluftzone, dann ergibt sich der hydraulische Gradient in Richtung der Längsausdehnung im Innern der Kluftzone:

$$I_i = I_a \cdot \left[ 1 + \left( \frac{c}{L + c} \right) \cdot \left( \frac{k_{fi}}{k_{fa}} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (2.1)$$

wobei:

- |       |   |       |
|-------|---|-------|
| $I_i$ | = hydraulischer Gradient im Innern der Kluftzone            | [m/m] |
| $I_a$ | = hydraulischer Gradient ausserhalb und längs der Kluftzone | [m/m] |
| $L$   | = Länge der Kluftzone                                       | [m]   |
| $c$   | = Mächtigkeit der Kluftzone                                 | [m]   |

$k_{fi}$  = hydraulische Durchlässigkeit im Innern der Kluftzone [m/s]  
 $k_{fa}$  = hydraulische Durchlässigkeit ausserhalb der Kluftzone [m/s]

Dabei wird angenommen, dass das umgebende Gestein unendlich ausgedehnt ist und asymptotisch ein homogener hydraulischer Gradient  $I_a$  in Längsrichtung der Kluftzone herrscht.

Mit  $L = 900$  m,  $c = 10$  m,  $k_{fi} = 10^{-4}$  m/s,  $k_{fa} = 5 \cdot 10^{-8}$  m/s ist damit der Gradient im Innern etwa um den Faktor 20 geringer als ausserhalb der Kluftzone. Es folgt, dass die Filtergeschwindigkeit innerhalb der Kluftzone 100mal grösser ist als ausserhalb.

Für die Nuklidmigrationsrechnung werden in dieser Kluftzone eine Kluftweite von 1 mm und ein Kluftabstand von 1 m, also eine Fliessporosität von 0,001 postuliert. Die entsprechende Fliesszeit beträgt damit 4500 Jahre.

Im vorliegenden Fall ist die postulierte Kluftzone nicht vollständig isoliert, da sie auf der einen Seite mit dem Grubengebäude, auf der anderen Seite mit dem Bohrloch in hydraulischem Kontakt steht. Da der Abfluss durch das Bohrloch aber sehr gering ist, was innerhalb der postulierten Kluftzone nur einen verhältnismässig geringen Gradienten verursacht, kann die Kluftzone mindestens auf der Abstromseite trotzdem als isoliert betrachtet werden. Zudem ist das umgebende Gestein Oxford und Kimmeridge nicht unendlich ausgedehnt, sondern wird seinerseits durch die noch undurchlässigeren Schichten Unterkreide und Dogger umgeben. Aus diesen Gründen kann der hydraulische Gradient in der postulierten Kluftzone mit Gleichung (2.1) ermittelt werden, obwohl die Kluftzone nicht vollständig isoliert ist. Die verwendeten Annahmen für deren Dimension und das Ergebnis der Berechnung sind oben angegeben.

Nach Eintritt in den unversetzten Abschnitt der Bohrung in der Unterkreide verläuft der Fliessweg in der Bohrung bis zum Top des Alb (Austritt in die Oberkreide). Die Zuflussrate in die Unterkreide beträgt  $7,0 \cdot 10^{-5}$  l/min, die Abflussrate aus dem Alb  $1,4 \cdot 10^{-3}$  l/min (Tabelle 2-1). Der Wasserfluss durch die Bohrung wird also um den Zufluss aus den Schichten der Unterkreide erhöht. Da dieses Wasser nicht kontaminiert ist, oder erst wesentlich später als das direkt aus dem Kimmeridge ins Bohrloch fliessende Wasser kontaminiert sein kann, bewirkt dieser Zufluss eine Verdünnung des potentiell kontaminierten Wassers im Bohrloch. In diesem Rechenfall beträgt der Verdünnungsfaktor rund 20.

Im Rechenfall R34 beträgt der Wasserfluss durch das Grubengebäude  $625 \text{ m}^3/\text{a}$  (Tabelle 2-1).

#### 2.2.2.2 Rechenfall R16

Als erste Variante zum Referenzfall "Tiefbohrungen" wird der Rechenfall R16 gewählt, in welchem eine erhöhte Durchlässigkeit von  $10^{-3} \text{ m/s}$  im unversetzten Abschnitt des Bohrlochs Bleckenstedt 1 in der Unterkreide und im Alb angesetzt wird.

Die Analyse der Fliesstrajektorien im Rechenfall R16 zeigt, dass 17 der 387 Fließwege eine Tiefbohrung erreichen. Der zeitlich kürzeste Weg ist die Trajektorie mit Startpunkt 24, welche vom Grubengebäude zunächst in nördlicher Richtung nach oben führt, im Kimmeridge in den Einzugsbereich des Bohrlochs Bleckenstedt 1 gerät und dadurch nach Süden, zum Bohrloch, abgelenkt wird. Die Fließzeit vom Grubengebäude zum Bohrloch beträgt 138 000 Jahre, falls die Abstandsgeschwindigkeit mit den Porositäten gemäss Plan Konrad 9/86 berechnet wird (Oxford 2 %, Kimmeridge 10 %).

Bei der für die Nuklidmigration angenommenen Porosität im Oxford und Kimmeridge (0,1 %) beträgt die Fließzeit für die 340 m lange Trajektorie noch 2070 Jahre.

Basierend auf dem Potentialunterschied zwischen der Obergrenze des Grubengebäudes und der unteren Grenze des unversetzten Bohrlochabschnitts in der Unterkreide wurde zusätzlich ein (hypothetischer) direkter, vertikaler Weg definiert. Die Geschwindigkeitsverteilung längs dieses Wegs ergibt sich aus dem für den Rechenfall R16 berechneten vertikalen Potentialprofil. Die totale Fließzeit beträgt 29 000 Jahre (Porosität gemäss Plan Konrad 9/86). Für die Migrationsmodellierung beträgt die Fließzeit 470 Jahre bei einer Fließporosität von 0,1 %.

Um diesen theoretisch berechneten kurzen Weg zu bestätigen, wurde versucht, eine "reelle" Trajektorie zu finden, welche möglichst entlang dem hypothetischen Weg verläuft. So wurde um den Startpunkt des hypothetischen Wegs an der Obergrenze des Grubengebäudes eine grosse Zahl von zusätzlichen Startpunkten vorgegeben. Durch diese Verfeinerung der Wahl der Startpunkte wurden innerhalb einiger 10 m Fliesstrajektorien gefunden, welche ähnlich dem hypothetischen Weg bis zur unteren Grenze des unversetzten Bohrlochabschnittes verlaufen. Ihre Fließzeiten sind gegenüber der hypothetischen Trajektorie nur unwesentlich länger. So kann der oben beschriebene hypothetische Weg als eine reelle, leicht konservative Fliesstrajektorie für den Rechenfall R16

betrachtet werden. Diese wird im folgenden den Nuklidmigrationsrechnungen zugrunde gelegt.

Der Verlauf des Wegs durch Oxford und Kimmeridge ist in Abbildung 2-2 dargestellt und in Tabelle 2-1 charakterisiert. Nach Erreichen der Bohrung fließt das potentiell kontaminierte Wasser entlang dem unversetzten Abschnitt der Bohrung Bleckenstedt 1 durch die Unterkreide und das Alb und schliesslich durch die Oberkreide ins Quartär.

Im hydrogeologischen Rechenfall R16 beträgt der Wasserfluss durch das Grubengebäude  $735 \text{ m}^3/\text{a}$ . Durch die Bohrung Bleckenstedt 1 fließt an der Basis Unterkreide  $0,07 \text{ l/min}$ . Durch Zufluss aus der Unterkreide erhöht sich dieser Fluss bis zur Obergrenze des Alb auf  $0,09 \text{ l/min}$ , was einem Verdünnungsfaktor von 1,3 entspricht.

#### 2.2.2.3 Rechenfall R29

Der Rechenfall R29 stellt die zweite Variante zum Referenzfall "Tiefbohrungen" dar, in welcher im Bohrloch in der Unterkreide und im Alb die gleiche Durchlässigkeit wie im R16 angesetzt wird. Der  $k_f$ -Wert in der Grube wird zu  $10^{-3} \text{ m/s}$  angesetzt. Zusätzlich wird eine ausgedehnte Kluftzone oberhalb der Grube mit einem  $k_f$ -Wert von  $10^{-3} \text{ m/s}$  angenommen. Im Fall R29 fließen 8 der 387 Fliesstrajektorien aus dem Grubengebäude in die Bohrung Üfingen 1. Sie weisen eine Fliesszeit von mehr als 11 Mio. Jahren auf und werden deshalb nicht als potentielle Freisetzungspfade berücksichtigt [2].

Gemäss der hydrogeologischen Modellierung gibt es keinen aufwärts gerichteten Gradienten in der ausgedehnten Kluftzone über dem Endlager. Deshalb ist es unwahrscheinlich, dass kontaminiertes Wasser aus der Grube in die Bohrung Bleckenstedt 1 fließt.

Für die Berechnung der Nuklidausbreitung wird deshalb wieder ein hypothetischer Fliessweg definiert. Als Kriterium wird wie für den Rechenfall R34 jener Punkt im Grubengebäude gewählt, der aufgrund von Potentialunterschied und Abstand längs einer geraden Verbindung zum Bohrloch Bleckenstedt 1 an der Basis der Unterkreide den zeitlich kürzesten hypothetischen Weg ergibt. Damit ergibt sich der gleiche Startpunkt wie im Rechenfall R34 (siehe Abbildung 2-1). Die Charakteristiken dieses Fliessweges sind in Tabelle 2-1 zusammengestellt.

Der Wasserfluss durch die Grube beträgt  $470 \text{ m}^3/\text{a}$ . Der Zufluss ins Bohrloch Bleckenstedt 1 in der Unterkreide und der Abfluss aus dem Alb sind gleich wie im Rechen-

fall R16. Die Wasserfliesszeit für die Migrationsrechnung im Fall R29 ist mit insgesamt 320 Jahren ähnlich zu jener des hypothetischen Fliessweges des Rechenfalls R16 (470 a). Aufgrund der Ähnlichkeit zum Fall R16 wird für R29 auf eine eigene Modellierung des Nuklidtransportes verzichtet. Die Ergebnisse der Rechnungen für R16 werden also auch als für R29 gültig betrachtet.

#### 2.2.2.4 Rechenfall R35 (Referenzfall Schachtverschluss)

Der Rechenfall R35 stellt den Basisfall für die Untersuchung des Schachtverschlusses dar, in welchem ein  $k_f$ -Wert von  $10^{-8}$  m/s für die Durchlässigkeit der Schächte und ihrer Auflockerungszonen in der Unterkreide, im Hilssandstein (Schacht K2) und im Alb angesetzt wird [3]. Der  $k_f$ -Wert der unversetzten Bohrlochabschnitte in der Unterkreide und im Alb ist  $10^{-5}$  m/s.

In diesem Rechenfall, wie in den meisten anderen in [3] untersuchten Rechenfällen, kommt nur der Schacht Konrad 1 als potentieller Freisetzungspfad durch die Deckschichten in Frage. Für die Nuklidmigration wird deshalb im folgenden nur der Schacht Konrad 1 betrachtet.

Im Fall R35 führt keine der 387 Fliesstrajektorien mit Startpunkt im Grubengebäude direkt in den Schacht Konrad 1. Gemäss Potentialverteilung existiert aber im Schacht ein aufwärts gerichteter Fluss vom Grubengebäude bis zur Oberkreide. Durch den Fusspunkt des Schachtes fliessen etwa 10 % des gesamten Grubendurchflusses von  $640 \text{ m}^3/\text{a}$  ab. Dieser Fluss nimmt nach oben bis zur Unterkreide ab, indem im Oxford und Kimmeridge Wasser seitlich abfliesst. An der unteren Grenze der Unterkreide beträgt der Fluss im Schacht noch 0,04 % des Grubendurchflusses (Tabelle 2-1). Der starke Abfluss von Wässern aus dem Schacht in die Schichten Oxford und Kimmeridge verhindert das Eintreten von Trajektorien aus diesen Schichten in den Schacht.

Innerhalb des Grubengebäudes beträgt der horizontale, Süd-Nord gerichtete Gradient aufgrund der Modellrechnungen  $5 \cdot 10^{-6}$  m/m. Der Abfluss entlang K1 entspricht damit einer Stromröhre innerhalb des Grubengebäudes von rund  $4000 \text{ m}^2$  Querschnittfläche, welche bei einem halbkreisförmigen Querschnitt einen Radius von ca. 50 m besitzt. Die Attraktorwirkung des Schachtes beträgt damit einige 10 m. Dies erklärt zum Teil das Fehlen von direkten Fliesswegen aus dem Grubengebäude in den Schacht. Ein weiterer Grund dürfte numerisch bedingt und auf die relativ ausgedehnten Elemente des Grubengebäudes im FE-Netz zurückzuführen sein.

Aufgrund der Potentialverteilung im Schacht oberhalb des Grubengebäudes wird ein Fluss von potentiell kontaminiertem Wasser aus dem Endlager nach oben durch den Schacht Konrad 1 angenommen.

Im untersten Abschnitt der Unterkreide nimmt der Vertikalfluss im Schacht weiterhin ab. Aus den mittleren und oberen Schichten der Unterkreide und aus dem Alb fließt Wasser dem Schacht zu, so dass der Wasserfluss an der oberen Grenze des Alb sowohl aus dem Endlager als auch aus diesen beiden Schichten stammt. Als Folge des vorwiegend horizontalen Flusses im Oxford und Kimmeridge ist eine vertikale Migration von Radionukliden entlang anderen Fließwegen in die Unterkreide wenig wahrscheinlich, so dass das aus der Unterkreide zufließende Wasser, wie im Fall R34, als nicht kontaminiert betrachtet werden kann. Entlang dem Schacht von der Basis Unterkreide bis zum Top Alb erfolgt somit eine Verdünnung. Der entsprechende Verdünnungsfaktor (Verhältnis der Flussrate an der Basis Oberkreide zum Minimalfluss im Schacht) beträgt rund 16 (siehe Tabelle 2-1).

Die Wasserflusszeit entlang dem Schacht durch Oxford und Kimmeridge ist relativ kurz (320 a) im Vergleich mit derjenigen durch die Unterkreide und das Alb (15000 a). In den unteren Schichten vermag die Matrixdiffusion die Transportzeit der Radionuklide im Vergleich zur Freisetzungsdauer nur unwesentlich zu verzögern. Es wird also angenommen, dass das kontaminierte Wasser aus dem Grubengebäude praktisch ohne Zeitverzug und unverdünnt über den Schacht die Basis der Unterkreide erreicht. Somit wird die Strecke durch Oxford und Kimmeridge in der Nuklidmigrationsrechnung nicht berücksichtigt.

Es muss bemerkt werden, dass die Bohrung Bleckenstedt 1 einen ähnlichen Abfluss durch die Unterkreide und das Alb wie im Rechenfall R34 aufweist. Diese Bohrung kommt aber als Austrittspfad nicht in Frage, da am Fusspunkt des unversetzten Abschnittes dieser Bohrung das Potential höher ist als auf der Deckfläche der Grube.

#### 2.2.2.5 Rechenfall R38

Der Rechenfall R38 stellt die Variante 1 zum Referenzfall "Schachtverschluss" R35 dar. Für den Schacht wird in der Unterkreide und im Alb ein  $k_f$ -Wert von  $10^{-7}$  m/s angesetzt (statt  $10^{-8}$  m/s im Fall R35). Der resultierende Fluss im Schacht wächst ungefähr proportional der Erhöhung des  $k_f$ -Wertes und ist am Top des Alb rund 10-mal höher ( $4,8 \cdot 10^{-2}$  l/min gegenüber  $6,5 \cdot 10^{-3}$  l/min bei R35, vgl. Tabelle 2-1).

Für die Nuklidmigration wird der Fliessweg gleich wie im Fall R35 gewählt. Er führt im Schacht vom Top des Grubengebäudes bis zur Basis der Oberkreide. Die Fliesszeit durch Oxford und Kimmeridge (190 a) ist im Vergleich mit derjenigen durch Unterkreide und Alb (680 a) nicht mehr vernachlässigbar. Deshalb wird im Gegensatz zum Fall R35 die Transportrechnung auch im Oxford und Kimmeridge durchgeführt.

Wie im Fall R35 erfolgt auch hier eine Verdünnung im Schacht entlang dem Fliesspfad von der Unterkreide bis zur Oberkreide. Der Wasserfluss an der Basis der Unterkreide steigt aber überproportional mit der Durchlässigkeit an, so dass der Verdünnungsfaktor gegenüber R35 abnimmt und nur ca. 1,7 beträgt (Tabelle 2-1).

Als Fluss durch die Grube ergeben sich im Fall R38  $660 \text{ m}^3/\text{a}$ .

#### 2.2.2.6 Rechenfall R39

Im Rechenfall R39, Variante 2 zum Referenzfall "Schachtverschluss", wird im Schacht in der Unterkreide und im Alb ein  $k_f$ -Wert von  $10^{-6} \text{ m/s}$  angenommen. Mit  $0,4 \text{ l/min}$  ist der resultierende Fluss in die Oberkreide rund 2 Grössenordnungen höher als im Referenzfall R35.

Für die Nuklidmigration wird wie im Rechenfall R38 ein Weg vom Grubengebäude bis zum Hangenden des Alb gewählt, mit Transportrechnungen entlang des ganzen Pfades, da die Fliesszeiten in Oxford-Kimmeridge (40 a) zu denjenigen in Unterkreide-Alb (65 a) ähnlich sind.

In der Unterkreide und im Alb erhöht sich der Fluss durch den Schacht nur unwesentlich. Im Vergleich mit dem minimalen Fluss, der in diesem Fall im Kimmeridge stattfindet, ergibt der Abfluss in die Oberkreide nur einen Verdünnungsfaktor von rund 1,1 (d.h. fast keine Verdünnung).

Im Rechenfall R39 beträgt der Durchfluss durch die Grube  $850 \text{ m}^3/\text{a}$ .

#### 2.2.3 Berücksichtigung der Querdispersion in unteren Schichten

Während des Transportes durch das Kluftsystem dehnt sich eine Nuklidwolke als Folge der Dispersion aus. Der entsprechende Parameter, die Dispersionskonstante (Dimension  $\text{m}^2/\text{s}$ ), wird üblicherweise als Produkt der Abstandsgeschwindigkeit und der sogenannten Dispersionslänge (Dimension m) dargestellt. Der Quotient zwischen

dem Transportweg und der Dispersionslänge wird als Peclet-Zahl (Pe) bezeichnet.

Die Frage der Dispersion wird ausführlicher in den Abschnitten 2.3.2 und 3.3 behandelt. Mit dem Rechenprogramm RANCHMD wird die Nuklidausbreitung als eindimensionaler Prozess entlang einer Trajektorie simuliert, wobei die hydraulische Längsdispersion und die Diffusion aus der durchströmten Struktur ins Porenwasser der Matrix berücksichtigt werden. Die Wirkung der hydraulischen Querdispersion wird als zusätzlicher, analytisch zu berechnender Faktor den RANCHMD-Resultaten überlagert. Wie unten und in Abschnitt 2.3.2 dargelegt wird, hat die Querdispersion in vielen Fällen eine vernachlässigbare Wirkung. Die Verbreiterung einer kontaminierten Fahne durch Querdispersion kann wie folgt berechnet werden:

$$\sigma_T = \sqrt{2 \cdot L \cdot a_T} \quad (2.2)$$

wobei

$\sigma_T$  = halbe (horizontale) Verbreiterung der Nuklidwolke durch Querdispersion [m]  
L = Transportdistanz [m]  
 $a_T$  = transversale Dispersionslänge, mit  $a_T = L/Pe$  [m]

Für die transversale Peclet-Zahl wird ein Wert von 1000 angenommen (siehe Abschnitt 3.3).

Falls die Querdispersion im Vergleich zur Breite der kontaminierten Fahne gross ist, bewirkt sie eine Verdünnung mit unkontaminiertem Wasser und eine Verminderung der Konzentration.

Für die längste Strecke durch das Oxford und den Kimmeridge (R34) beträgt die Transportdistanz  $L = 900$  m, die Dispersionslänge quer zur Fliessrichtung also etwa  $a_T = 0,90$  m. Die halbe horizontale Querausdehnung einer Nuklidwolke, welche im Grubengebäude durch eine Punktquelle freigesetzt wird, misst damit bei der Bohrung Bleckenstedt 1 nur etwa

$$\sigma_T = \sqrt{2 \cdot L \cdot a_T} = 40 \text{ m}$$

Diese Ausdehnung ist gering im Vergleich zur Grösse des Endlagerbereichs, für welchen man eine Entwässerung in die Bohrung annehmen muss. Daraus muss geschlossen werden, dass das Wasser aus dem Grubengebäude, welches zur Bohrung fliesst, nicht wesentlich durch Beimischung von nicht kontaminiertem Wasser, welches nicht aus dem Endlager kommt, verdünnt wird, und dass der gesamte Durchfluss durch das Bohrloch aus dem Grubengebäude stammt.

Die Modellierung der Nuklidausbreitung unter Vernachlässigung der Querdispersion für den ersten Abschnitt des Fließweges ist deshalb gerechtfertigt.

Für den zweiten Abschnitt des Fließweges, den Transport entlang dem Bohrloch oder dem Schacht, ist die eindimensionale Modellierung angepasst, da der advective Transport nur im Bohrloch bzw. im Schacht stattfindet.

## 2.3           Hydraulische Verhältnisse in der Oberkreide

### 2.3.1       Lokales hydrogeologisches Modell

Nach Verlauf durch die Bohrung Bleckenstedt 1 oder durch den Schacht Konrad 1 bis zum Top des Alb breitet sich das potentiell kontaminierte Wasser in den Plänerkalken der Oberkreide aus.

Für die Rechenfälle "Tiefbohrungen" soll die Frage untersucht werden, ob das längs der Bohrung aus dem Alb in die Oberkreide strömende Wasser weiter der Bohrung durch die Oberkreide folgt oder ob es aus der Bohrung in die Oberkreide austritt und gemäss dem dort herrschenden subhorizontalen Gradienten wegfließt. Die gleiche Frage stellt sich für die Rechenfälle "Schachtverschluss". Sie kann mit dem bestehenden regionalen hydrogeologischen Modell, mit welchem die Rechenfälle modelliert wurden, nicht beantwortet werden, da dazu die Diskretisierung der Oberkreide nicht fein genug ist. Aus diesem Grunde wurde ein generisches lokales Modell entwickelt, welches die Form eines Quaders aufweist, in dessen Mitte die Bohrung verläuft, und welches nur die Schichten Plänerkalke und Quartär mit einer konstanten Mächtigkeit enthält.

Die hydraulischen Parameter sind dem regionalen Modell entnommen. In den berücksichtigten Rechenfällen beträgt der horizontale hydraulische Gradient in den Plänerkalken und im Quartär am Ort der Bohrung Bleckenstedt 1 rund 0,3 %. Entsprechend diesem als konstant und horizontal angenommenen hydraulischen Gradienten werden die Potentiale an der oberen sowie an den stromaufwärts und stromabwärts liegenden vertikalen Modellgrenzen festgelegt. Die übrigen Grenzflächen werden als undurchlässig angenommen, mit Ausnahme der Durchstossfläche des Bohrlochs mit dem Boden des Modells, durch welche der Zufluss aus der Bohrung erfolgt. Aus Symmetriegründen braucht mit dem Elementnetz nur das halbe Modellgebiet nachgebildet werden. Es umfasst 1240 Elemente in 14

horizontalen Schichten. Sein Aufbau und seine Abmessungen sind in Abbildung 2-3, die dafür verwendeten Parameter in Tabelle 2-2 dargestellt.

In den Rechenfällen "Schachtverschluss" wurde dasselbe generische Modell verwendet, jedoch mit den dem Schacht entsprechenden Parametern. So sind die zu R35, R38 und R39 gehörenden Parameter - Durchmesser und Durchlässigkeit des Schachtes mit seiner Auflockerungszone, Abfluss in die Oberkreide - ebenso in Tabelle 2-2 dargestellt.

Die Abbildung 2-4 erklärt das Prinzip der Berechnung der Ausbreitung in der Oberkreide und der Verdünnung im Quartär. Für ein besseres Verständnis sind die Hauptschritte mit Buchstaben bezeichnet. Die generische lokale Modellierung zeigt, dass zum Beispiel im Fall R16 der Wasserfluss längs der Bohrung rasch abnimmt: innerhalb der ersten 40 m (A) tritt über 90 % des Wassers aus der Bohrung aus, annähernd 30 % in den untersten 5 Metern.

Für die generische, lokale Modellierung wird in den Plänerkalken ein horizontaler hydraulischer Gradient angenommen, weshalb eine Berechnung von Fließwegen in diesem Modell keine aussagekräftigen Resultate liefern würde. Die mit dem regionalen Modell berechneten Fließwege zeigen in der Oberkreide typischerweise eine Steigung von  $15^\circ$  oder weniger, wobei allerdings kein Fließweg die Oberkreide in der Umgebung der Bohrung Bleckenstedt 1 oder des Schachtes Konrad 1 durchquert. Für die Modellierung des Radionuklidtransports wird ein konservativ hoher Wert von  $30^\circ$  angenommen (B). Bei der in der Bohrung Bleckenstedt 1 gemessenen Mächtigkeit der Plänerkalke von 262 m ergibt sich für das in den untersten 40 m aus der Bohrung austretende Wasser ein Fließweg durch die Oberkreide von etwa 500 m Länge (C).

In einem nächsten Schritt wird die Ausbreitung des aus dem Bohrloch austretenden, potentiell kontaminierten Wassers bis an die Obergrenze der Oberkreide und die resultierende Freisetzung ins Quartär berechnet. Zunächst wird angenommen, dass alles Wasser gleichförmig, mit der angesetzten Steigung von  $30^\circ$  und ohne vertikale oder horizontale Durchmischung die Oberkreide durchquert. Mit diesen Annahmen kann die horizontale Ausbreitung der Nuklidfahne (D) analog berechnet werden wie der Einflussbereich eines Brunnens in einem gespannten Grundwasserleiter mit einem äusseren hydraulischen Gradienten (vgl. Abbildung 2-5). Die Gleichung

für den Einflussbereich (Groundwater divide [10]) eines Brunnens bei  $(x=0, y=0)$  lautet

$$- y_x / x = \tan (2 \cdot \pi \cdot k_f \cdot b \cdot I \cdot y_x / Q) \quad (2.3)$$

wobei:

Q	=	Abflussmenge	[m <sup>3</sup> /s]
b	=	Mächtigkeit des Grundwasserleiters	[m]
I	=	äusserer hydraulischer Gradient	[m/m]
x, y	=	horizontale Koordinaten (s. Abbildung 2-5)	[m]
y <sub>x</sub>	=	halbe Breite des Einflussbereichs an der Stelle x	[m]

In grosser Entfernung vom Brunnen ( $x \rightarrow \infty$ ) geht Gleichung (2.3) in die bekannte Gleichung für die asymptotische Einflussbreite

$$y_\infty = \pm Q / (2 \cdot k_f \cdot b \cdot I) \quad (2.4)$$

über.

Diese Gleichungen beschreiben lediglich die hydraulische Ausdehnung der Fahne in der Oberkreide. Zur vollständigen Charakterisierung des Ausbreitungsvorganges ist zusätzlich die (horizontale) Querdispersion mit zu berücksichtigen. Diese wird im folgenden Abschnitt 2.3.2 diskutiert.

Die horizontale Ausbreitung des über ein bestimmtes Bohrlochintervall austretenden Wassers ist abhängig vom Verhältnis des Wasserflusses zum äusseren Fluss in der Oberkreide und der Länge des entsprechenden Bohrlochintervalls. Dieser spezifische Abfluss aus der Bohrung ist zum Beispiel für R16 in Tabelle 2-3 aufgeführt. Er nimmt von der Basis der Oberkreide nach oben rasch ab. Entsprechend rasch nimmt auch die für jedes Bohrlochintervall berechnete horizontale Ausdehnung der Abwasserfahne ab. Werden diese übereinanderliegenden Abwasserfahnen mit der angenommenen Steigung von 30° an die Obergrenze der Plänerkalke verfolgt, so erhält man das Gebiet an der Basis Quartär, über welches (unter Vernachlässigung von Dispersionseffekten) das Wasser aus der Bohrung Bleckenstedt 1 oder dem Schacht ins Quartär austritt (E). Die Form dieser Austrittsfläche für R16 ist in Abbildung 2-6 dargestellt. Sie hängt von der vertikalen Verteilung des Wasserflusses längs des Bohrlochs in der Oberkreide ab. Die Ausdehnung der Austrittsfläche quer zur Fliessrichtung (Breite) ist umgekehrt proportional zum Produkt von  $k_f$ -Wert und äusserem Gradienten in der Oberkreide. Die halbe Breite beträgt im Fall R16 160 m in etwa 430 m horizontalem Abstand und 25 m in et-

wa 360 m horizontalem Abstand vom Bohrloch. Die halben Breiten an der Basis Quartär sind für jedes Bohrlochintervall ebenfalls in Tabelle 2-3 aufgeführt.

Die Fläche des Gebietes, durch das jene 90 % des Bohrlochwassers ins Quartär freigesetzt werden, welche in den ersten 40 m in die Oberkreide austreten, beträgt etwa  $7500 \text{ m}^2$  für den Fall R16. Unter Vernachlässigung von Dispersionseffekten ergibt sich daraus eine spezifische Freisetzungsrate vom Wasser aus der Bohrung ins Quartär von  $5,7 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  oder, bezogen auf den nicht verdünnten Zufluss ins Bohrloch an der Basis Unterkreide von  $0,07 \text{ l}/\text{min}$ ,  $4,4 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ .

### 2.3.2 Querdispersion in der Oberkreide

Nach der Freisetzung an der Basis der Oberkreide fließt das potentiell kontaminierte Wasser entlang eines schrägen Weges (Länge L) bis zum Quartär. Die Berücksichtigung der Querdispersion wird vom Vergleich der halben Breite der hydraulischen Fahne ( $y_x$  in der Gleichung (2.3)) mit der Verbreiterung durch die horizontale Querdispersion  $\sigma_T$  (nach Gleichung 2.2) abhängig gemacht.

Drei Fälle werden unterschieden:

a)  $\sigma_T \ll y_x$

In diesem Fall wird der Effekt der Querdispersion vernachlässigt. Es gibt also keine Reduktion der Nuklidkonzentrationen durch Querdispersion.

b)  $\sigma_T \gg y_x$

Die beim Austritt aus der Bohrung bzw. dem Schacht schmale Abwasserfahne weist an der Obergrenze der Plänerkalke ein horizontales Konzentrationsprofil in Form einer Gauss'schen Kurve auf. Insbesondere wird die maximale Konzentration der Nuklidfahne durch die Querdispersion vermindert. Aufgrund der Eigenschaften der Gauss'schen Kurve entspricht sie der Konzentration einer Fahne der Breite  $L_T$  mit gleichförmiger Konzentration, falls  $L_T$  wie folgt berechnet wird:

$$L_T = \sigma_T \cdot \sqrt{2\pi} \quad (2.5)$$

Dieser durch die Querdispersion erhöhten Fahnenbreite entspricht eine Verdünnung der Nuklidkonzentration durch Beimischung von nicht kontaminiertem Wasser. Der über

diesen Fahnenquerschnitt aus der Oberkreide in das Quartär austretende Wasserfluss beträgt:

$$Q = L_T \cdot h \cdot k_f \cdot I \quad (2.6)$$

wobei

Q	= Abflussrate aus der Oberkreide	[m <sup>3</sup> /s]
L <sub>T</sub>	= Breite der Dispersionsfahne	[m]
k <sub>f</sub>	= Durchlässigkeit in der Oberkreide	[m/s]
I	= Gradient in der Oberkreide	[m/m]
h	= Mächtigkeit der Zone in der die höchsten Nuklidkonzentrationen liegen	[m]

Das Verhältnis der Flussrate am Top der Plänerkalke mit jener am Austritt aus dem Bohrloch bzw. dem Schacht an der Basis Oberkreide ergibt den Verdünnungsfaktor in der Oberkreide.

$$c) \quad \sigma_T \approx y_X$$

In diesem Fall ist  $\sigma_T$  von derselben Größenordnung wie  $y_X$ . Zur Berechnung der mittleren Konzentration wird folgende Fahnenbreite verwendet:

$$L_T = \sigma' \cdot \sqrt{2\pi} \quad (2.7)$$

mit

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_T^2 + y_X^2} \quad (2.8)$$

Die Abflussrate aus der Oberkreide wird wiederum mit der Gleichung (2.6) berechnet und ergibt im Verhältnis zum Zufluss aus dem Bohrloch bzw. dem Schacht den Verdünnungsfaktor.

In den behandelten Modellfällen wird die vertikale Querdispersion nicht betrachtet, was eine pessimistische Annahme darstellt. Die Dispersionslänge der vertikalen Dispersion ist typischerweise um 1 bis 2 Größenordnungen kleiner als jene der horizontalen Querdispersion, wobei sie im vorliegenden Fall, wo ein horizontal geschichtetes Medium schräg durchflossen wird, eher im Bereich der oberen Grenze dieser Bandbreite oder noch etwas höher liegt. Bei einer 10-fach kleineren Dispersionslänge der vertikalen Dispersion gegenüber der horizontalen Querdispersion beträgt die vertikale Verbreiterung der Fahne ( $\sigma$ -Wert) an der Obergrenze der Plänerkalke nur etwa 7 m und ist damit klein gegenüber der Fahnenmächtigkeit. Dies bedeutet, dass die vertikale Dispersion keinen nennenswerten Einfluss besitzt. Selbst bei einer merklichen vertikalen Verbreiterung der Nuklidfahne wird nur die Konzentration an der Obergrenze

der Plänerkalken, nicht jedoch jene im Quartär verändert (vgl. Abschnitt 2.4).

### 2.3.3 Ergebnisse des lokalen hydrogeologischen Modells

Die Ergebnisse der generischen, lokalen Modellierungen der hydraulischen Verhältnisse in der Umgebung der Bohrung Bleckenstedt 1 oder des Schachtes Konrad 1 in der Oberkreide sind in den Tabellen 2-3 bis 2-6 zusammengefasst. Aufgeführt sind die Wasserflussraten aus der Bohrung bzw. dem Schacht in die Oberkreide als Funktion der Höhe über der Basis Oberkreide sowie der kumulierte Abfluss und der spezifische Abfluss pro Meter Bohrloch- bzw. Schachtlänge. Die Tabelle 2-7 fasst die Verdünnungsfaktoren für die Nuklidkonzentrationen in der Oberkreide und im Quartär zusammen.

Obwohl der Rechenfall R34 den Referenzfall darstellt, wird im folgenden zuerst der Fall R16 diskutiert, da hier die Querdispersion in der Oberkreide vernachlässigt werden kann.

#### 2.3.3.1 Ergebnisse R16

Die Mächtigkeit der Plänerkalke beträgt in der Nähe der Bohrung Bleckenstedt 1 ungefähr 250 m. Bei einer Steigung der Trajektorie von  $30^\circ$  entspricht diese Mächtigkeit einer Weglänge in der Oberkreide von rund 500 m. Die Abstandsgeschwindigkeit beträgt bei einem hydraulischen Gradienten von 0,3 ‰, einem  $k_f$ -Wert von  $10^{-7}$  m/s und einer Porosität von 0,02 ‰ (angenommene Kluftporosität für die Ausbreitungsrechnungen, vgl. Abschnitt 3.3) 47 m/a, entsprechend einer Fließzeit von 11 Jahren.

Die Tabelle 2-3 enthält die berechnete Verteilung der Abflussrate aus dem Bohrloch als Funktion der Höhe über die Basis Oberkreide. Der Wasserfluss nimmt rasch mit der Höhe ab: innerhalb der ersten 40 m tritt über 90 ‰ des potentiell kontaminierten Wassers aus der Bohrung aus.

Die horizontale Ausdehnung der Fahne aus dem untersten Bohrlochintervall beträgt an der Obergrenze der Oberkreide 314 m. Der Weg durch die Plänerkalke weist eine Länge von 500 m und damit eine laterale Dispersionslänge  $a_T$  von 0,5 m auf. Die Reichweite der Querdispersion beträgt damit etwa 22 m. Diese Ausdehnung ist gering im Vergleich zur Halbbreite der Nuklidfahne (rund 160 m), so dass die Querdispersion vernachlässigt werden kann (Fall a, Abschnitt 2.3.2). Im Fall R16 bewirkt die Quer-

dispersion keine Verdünnung in der Oberkreide, der Verdünnungsfaktor ist 1.

Für den Nuklidtransport durch die Oberkreide können folgende Schlüsse gezogen werden:

- (i) Das Wasser, welches in den untersten 40 m des Bohrlochabschnittes in der Oberkreide aus dem Bohrloch austritt und welches mehr als 90 % des Bohrlochdurchflusses ausmacht, tritt über eine ungefähr trapezförmige Fläche ins Grundwasser des Quartärs aus (Abbildung 2-6). Das Trapez weist halbe Breiten von rund 25 m bzw. 160 m quer zur Fliessrichtung und eine Ausdehnung in Fliessrichtung von etwa 70 m auf. Da die Breiten grösser sind als die Wirkdistanz der Querdispersion und die Mächtigkeit des potentiell kontaminierten Wasserstromes wesentlich grösser ist als die vertikale Querdispersion (s. Abschnitt 2.3.2), wird die Konzentration in der Nuklidfahne nicht durch Beimischung von nicht kontaminiertem Wasser über den seitlichen Rand der Fahne verdünnt. Die eindimensionale Modellierung, welche die Querdispersion vernachlässigt, ist deshalb hier gerechtfertigt.
- (ii) Die restlichen knapp 10 % des potentiell kontaminierten Wassers, welches nicht in den untersten 40 m der Oberkreide aus dem Bohrloch austritt, verlässt dieses vorwiegend über die nächsten 50 m und zu einem kleinen Teil in geringerer Teufe. Dieses Wasser wird in der Oberkreide durch transversale Dispersion rasch verdünnt, so dass es in den folgenden Betrachtungen nicht mehr berücksichtigt werden muss.

Da der Fluss in den Plänerkalken mit einer 30°-Steigung gegen Süd-Ost gerichtet ist, tritt das potentiell kontaminierte Wasser in einer Entfernung von 360 m bis 430 m südöstlich von der Bohrung ins Quartär aus. Die Form dieser Austrittsfläche ist in Abbildung 2-6 dargestellt.

#### 2.3.3.2 Ergebnisse R34

Die hydraulischen Bedingungen in der Oberkreide in der Umgebung der Bohrung Bleckenstedt 1 sind dieselben wie im Fall R16.

Der Abfluss aus dem Bohrloch in die Oberkreide erfolgt wie im Fall R16 (Tabelle 2-4), d.h. nach 40 m sind rund 90 % des Wassers aus dem Alb in die Oberkreide exfiltriert. Die Flussrate aus dem Alb beträgt jedoch nur  $1,4 \cdot 10^{-3}$  l/min gegenüber 0,09 l/min im Fall R16. Dem

spezifischen Fluss aus dem untersten Bohrlochintervall entspricht eine maximale Breite der hydraulischen Fahne an der Basis Quartär von 5,4 m (314 m im Fall R16, vgl. Tabelle 2-3).

Im Gegensatz zu R16 hat im Fall R34 die Dispersion quer zur Fliessrichtung in der Oberkreide einen wesentlichen Einfluss auf die Nuklidkonzentration im Grundwasser: Die dispersive Verbreiterung beträgt 22 m und die halbe Breite der Fahne ohne Querdispersion misst 2,7 m. Die Breite der Fahne mit Querdispersion beträgt also gemäss Gleichung (2.5) 55 m. Die Verdünnung in der Oberkreide kann mit der dem Fahnenquerschnitt entsprechenden Flussrate in der Oberkreide berechnet werden (Gleichung (2.6)). Für eine Mächtigkeit von 40 m beträgt diese Flussrate  $6,6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , was, verglichen mit dem Abfluss aus dem Bohrloch von rund  $2,32 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ , einem Verdünnungsfaktor von rund 28 entspricht (Tabelle 2-7).

#### 2.3.3.3 Ergebnisse R35

Am Ort des Schachtes Konrad 1 beträgt die Mächtigkeit der Oberkreide rund 225 m, was einer Migrationsstrecke durch die Plänerkalke von 450 m entspricht und mit den in den Rechenfällen "Tiefbohrungen" verwendeten Parametern eine Fließzeit von rund 10 Jahren ergibt.

Die Verteilung der Abflussraten aus dem Schacht ist in Tabelle 2-5 zusammengefasst. Wegen des grösseren Durchmessers des Schachtes und des relativ geringen Wasserflusses erfolgt der Abfluss in die Oberkreide auf einer noch kürzeren Vertikalstrecke als in den Rechenfällen R16 und R34: bereits 10 Meter oberhalb der Basis der Oberkreide ist 95 % des Wassers in die Plänerkalke exfiltriert. Im nächsten Intervall (10 m - 20 m) erfolgt ein Zustrom von Wasser aus der Oberkreide in den Schacht: der Schacht wird durchströmt, der kumulierte Abfluss aus dem Schacht übersteigt den Zufluss aus dem Alb. Innerhalb der ersten 10 Meter ist der spezifische Abfluss annähernd konstant. Entsprechend beträgt die Breite der Austrittsfläche an der Basis Quartär in einer horizontalen Entfernung von 390 m bei Vernachlässigung der horizontalen Querdispersion ungefähr 34 m. Die Querdispersion ist mit rund 20 m am Rand der Fahne von der gleichen Grössenordnung wie die halbe Breite der Fahne. Somit kann die Querdispersion nicht vernachlässigt werden. Die Breite der Fahne mit Querdispersion (66 m) ergibt sich aus den Gleichungen (2.7) und (2.8), und der entsprechende Fluss in der Oberkreide, mit einer Mächtigkeit von 10 m berechnet, beträgt nach Gleichung (2.6)  $1,98 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ . Als Verdünnungsfaktor in der Oberkreide resultiert 1,8 (Tabelle 2-7).

Die Form der Austrittszone an der Basis des Quartärs ist annähernd ein Rechteck mit einer Breite von 66 m und einer Länge von rund 17 m, welches in einer Entfernung von rund 370 m bis 390 m südöstlich vom Schacht Konrad 1 liegt.

#### 2.3.3.4 Ergebnisse R38

Die Ausbreitung des potentiell kontaminierten Wassers erfolgt ähnlich wie im Fall R35. Die Höhe über der Basis Oberkreide, bis zu welcher der Zufluss aus dem Alb den Schacht verlässt, ist aber grösser als im Rechenfall R35. Die Flussrate aus dem Alb von  $7,82 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  ist rund 8mal grösser als im Fall R35, was der erhöhten Durchlässigkeit im Schacht entspricht. Das Wasser aus dem Alb tritt innerhalb 72 m über der Basis Oberkreide aus dem Schacht aus. Der entsprechende spezifische Fluss aus dem Schacht (d.h. pro Meter Schacht) beträgt rund  $1,1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$  und ist praktisch gleich wie im Fall R35 (vgl. Tabelle 2-6).

Die halbe Breite  $y_x$  der hydraulischen Fahne an der Obergrenze der Oberkreide beträgt rund 18 m und ist von gleicher Grössenordnung wie die horizontale Querdispersion ( $\sigma_T = 20 \text{ m}$ ). Die Breite der Fahne wird wieder mit der Gleichung (2.7) berechnet. Die Form der Austrittszone an der Basis Quartär ist annähernd ein Rechteck mit einer Breite von ca. 66 m und einer Länge von rund 130 m, welches in einem Abstand von 260 m bis 390 m südöstlich vom Schacht Konrad 1 entfernt liegt. Der entsprechende Fluss in der Oberkreide, mit einer Mächtigkeit von 72 m berechnet, beträgt  $1,43 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ , und der Verdünnungsfaktor in der Oberkreide rund 1,8 (Tabelle 2-7).

#### 2.3.3.5 Ergebnisse R39

Im Rechenfall R39 ist der Schachtzufluss aus dem Alb rund 70mal höher als im Referenzfall R35. Dies bewirkt einen stark nach oben gerichteten Fluss in der Oberkreide, so dass rund 50 % des Wassers aus dem Alb das Quartär direkt durch den Schacht erreicht. Zu diesem sehr ungünstigen Fall müssen aber folgende Vorbehalte angebracht werden:

- Die regionale Modellierung zeigt beim Schacht in der Oberkreide und im Quartär einen abwärts gerichteten Fluss, da sich der Schacht an der Flanke einer leichten Erhöhung befindet. Obwohl die Diskretisierung im regionalen Modell zu grob ist, um die lokalen Strömungen zu simulieren, zeigt dies doch, dass lokale Fliesssysteme der direkten Freisetzung entgegen wirken können.

- Der Wasserfluss, der das Quartär direkt erreicht, ist von den Modellannahmen abhängig. Die Genauigkeiten der für die Oberkreide angenommenen Parameter spielen dabei naturgemäss eine wichtige Rolle. Mit einem  $k_f$ -Wert der Oberkreide von  $10^{-6}$  m/s würde zum Beispiel das Wasser den Schacht wie im Fall R38 verlassen.
- Die hydraulische Durchlässigkeit der Schachtverfüllung und der Auflockerungszone in der Oberkreide ist nur in diesem Fall und nur für die Nuklidausbreitung ein wichtiger Parameter, in den übrigen Fällen hat sie keinen Einfluss. Aus diesem Grunde wurde für die hydraulische Modellierung in [3] und im vorliegenden Bericht sowohl für die Auflockerungszone als auch für die Asphaltverfüllung in der Oberkreide und im Quartär ein pessimistisch hoher Wert von  $10^{-4}$  m/s angesetzt, womit auch eine eventuelle Alterung des Asphaltes berücksichtigt ist. Im folgenden wird gezeigt, dass massgebende Nuklide bereits nach einigen Jahrhunderten den mit Asphalt verfüllten Abschnitt des Schachtes erreichen können. Die angenommene Durchlässigkeit ist also überaus konservativ.

Es werden deshalb die folgenden 2 Varianten von R39 untersucht:

- In der Variante 39/1 wird angenommen, dass das potentiell kontaminierte Wasser aus dem Alb in einen mit undurchlässigen Asphalt verfüllten Schachtabschnitt in der Oberkreide fliesst. Diese Variante entspricht damit nicht der für die anderen Fälle und in [3] getroffenen Annahme bezüglich  $k_f$ -Wert der Schachtverfüllung in der Oberkreide. Für die Verfüllung und die Auflockerungszone wird ein  $k_f$ -Wert von  $10^{-7}$  m/s, ähnlich wie in den Plänerkalken, postuliert. Das längs des Schachtes aus dem Alb austretende Wasser tritt damit halbkugelförmig in die Oberkreide aus, so dass die Nuklidfahne asymptotisch einen halbkreisförmigen Querschnitt mit einem Radius von 120 m besitzt. Von dieser "Punktquelle" im Schacht an der Basis der Oberkreide bis zum Quartär verläuft das potentiell kontaminierte Wasser entlang demselben 450 m langen Fliessweg wie in den Rechenfällen R35 und R38. Die entsprechende Fliesszeit beträgt rund 10 Jahre.

Am Top der Oberkreide besitzt die hydraulisch ausge dehnte Fahne eine Breite von rund 240 m, die Freisetzung erfolgt im Abstand von 180 m bis 390 m vom Schacht. Die Verbreiterung durch die horizontale Querdispersion ist gering im Vergleich mit dieser Breite, so dass die Querdispersion in der Oberkreide vernachlässigt werden kann. Der potentiell kontami-

nierte Fluss aus dem Schacht wird in den Plänerkalken also nicht verdünnt.

- Die Variante 39/2 entspricht der pessimistischen Annahme bezüglich  $k_f$ -Wert der Schachtverfüllung in der Oberkreide, wie sie für die anderen Rechenfälle und in [3] getroffen wurden. Sie simuliert die direkte Verbindung durch den Schacht zwischen der Basis Oberkreide und dem Quartär. Der Transport längs des Schachtes durch die Oberkreide wird als instantan angenommen (aufgrund der für die Plänerkalke angenommenen Kluftporosität von 0,02 % beträgt die Fließzeit für den 225 m langen Weg gemäss der lokalen Modellierung rund 0,04 Jahre). Entlang dieser Strecke exfiltriert etwa 50 % des Flusses in die Oberkreide. Es erfolgt jedoch wie im Fall R39/1 keine Vermischung mit unkontaminiertem Wasser aus den Plänerkalken.

#### 2.4 Verdünnung im Quartär

Die Verdünnung im Quartär wird unter der Annahme berechnet, dass eine instantane, vollständige Vermischung des aus der Oberkreide austretenden Wassers mit dem oberflächennahen Grundwasser stattfindet. Dabei ersetzt das potentiell kontaminierte Wasser aus der Oberkreide das im Quartär fliessende Wasser, ohne Beeinflussung der Fließbedingungen im Quartär (Schritt F, Abbildung 2-4). In der Ermittlung der Verdünnung sind die Breite der kontaminierten Fahne an der Grenze Oberkreide-Quartär und die Mächtigkeit der gesättigten Zone im Quartär von Bedeutung. Die Breite der Fahne wurde für die betrachteten Fälle berechnet. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 2-7 zusammengestellt.

Die Mächtigkeit der gesättigten Zone ist vom Ort abhängig, an dem das potentiell kontaminierte Wasser aus der Oberkreide freigesetzt wird. Sie wird aufgrund der aus [1] verfügbaren Informationen angenommen. In der Nähe der Bohrung oder des Schachtes ist die Strömung im Quartär gegen Südost gerichtet. Die entfernteste Stelle, an der das Wasser nach Durchströmen der Oberkreide mit 30° Neigung in das Quartär austritt, liegt 430 m südöstlich des Bohrlochs Bleckenstedt 1 bzw. 390 m südöstlich des Schachtes Konrad 1. Aufgrund der Karten, die die Grundwasserhöhengleichen und die Quartärmächtigkeiten darstellen (Abbildung 7-9 und 7-10 in [1]), kann die Mächtigkeit des gesättigten Quartär in den Rechenfällen "Tiefbohrungen" auf 8 m und in den Fällen "Schachtverschluss" auf 1 m geschätzt werden.

Der Wasserfluss im Quartär beträgt:

$$Q = L_Q \cdot h \cdot k_f \cdot I \quad (2.9)$$

wobei

Q	=	Wasserfluss im Quartär	[m <sup>3</sup> /s]
L <sub>Q</sub>	=	maximale Breite der Austrittsfläche	[m]
h	=	Mächtigkeit der gesättigten Zone im Quartär	[m]
I	=	hydraulischer Gradient im Quartär	[m/m]
k <sub>f</sub>	=	Durchlässigkeit des Quartärs	[m/s]

Der Gradient im Quartär in der Nähe der Bohrung Bleckenstedt 1 und des Schachtes Konrad 1 wird basierend auf den in [1] dargestellten Grundwasserhöhen gleichen auf 0,003 geschätzt.

Die Flussraten sowie die entsprechenden Verdünnungsfaktoren im Quartär sind in Tabelle 2-7 zusammengefasst.

In den Fällen "Schachtverschluss" ist die Verdünnung im Quartär geringer, da die Mächtigkeit der gesättigten Zone in der Umgebung des Schachtes Konrad 1 nur 1 m beträgt. Im Referenzfall R35 ergibt sich deshalb lediglich ein Verdünnungsfaktor 10 gegenüber 20 im Referenzfall "Tiefbohrungen".

Der Rechenfall R39/2 stellt einen Sonderfall dar. Aus der Auflockerungszone des Schachtes erfolgt ein Fluss ins Quartär von rund 0,2 l/min. Dies entspricht mit den angenommenen Parametern dem Quartärabfluss auf einer Breite von rund 100 m. In diesem Fall werden die Fließbedingungen im Quartär durch den Zufluss aus dem Schacht verändert, es gibt keine Verdünnung und das Wasser aus der Auflockerungszone des Schachtes fließt wie aus einer Quelle ins Quartär.

## 2.5 Gesamte Verdünnung entlang den Fließwegen

Die Reduktion der Nuklidkonzentration entlang der Fließwege erfolgt durch die Prozesse:

- Transport (Matrixdiffusion, Sorption, radioaktiver Zerfall, Längsdispersion). Diese Effekte werden mit dem Programm RANCHMD berücksichtigt.
- Zufluss von zusätzlichem, unkontaminiertem Wasser, als Ergebnis einer Infiltration ins Bohrloch Bleckenstedt 1 bzw. in den Schacht Konrad 1 oder Vermischung mit unkontaminiertem Wasser am lateralen Rand des

Fliesswegs durch Querdispersion. Diese beiden Effekte werden hier als Verdünnung bezeichnet.

Die Tabelle 2-8 fasst die Verdünnung vom Grubengebäude bis zur Biosphäre und die gesamte Verdünnung in den berücksichtigten Rechenfällen zusammen. Hierbei ergeben sich erhebliche Unterschiede:

Im Fall R34 bewirkt die Verdünnung eine Reduktion der Nuklidkonzentrationen von mehr als 4 Grössenordnungen. Im Gegensatz dazu erfolgt im Fall R39 praktisch keine Verdünnung.

### 3 MODELLIERUNG DES RADIONUKLIDTRANSPORTES

#### 3.1 Einleitung

Bei der Modellierung des Radionuklidtransportes entlang den Abschnitten und Teilabschnitten der Fließwege:

- Oxford
- Kimmeridge
- Bohrloch Bleckenstedt 1 oder Schacht Konrad 1
- Oberkreide (Plänerkalke)

werden Advektion, Dispersion, Matrixdiffusion und Sorption in der Matrix und im Bohrloch bzw. Schacht berücksichtigt. Die numerische Simulation erfolgt mit dem Computerprogramm RANCHMD (siehe Abschnitt 3.2), welches die Nuklidausbreitung für konstante Fließweg- und Sorptionskonstanten sowie für Dispersion in Fließrichtung berechnet. Die Aktivitätsfreisetzung aus dem Endlager bildet den Quellterm für das Transportmodell. Ergebnisse der Modellrechnungen sind der zeitliche Verlauf des Aktivitätsflusses oder der Aktivitätskonzentration am Ende eines Fließwegabschnittes.

Den abschnittsweise unterschiedlichen Fließwegparametern wird durch sukzessive Anwendung des Programms RANCHMD Rechnung getragen, wobei die Resultate der Transportberechnung des ersten Abschnittes die Eingangsdaten für die Berechnung des zweiten Abschnittes bilden usw. Verdünnung innerhalb eines Abschnittes, hervorgerufen durch Querdispersion oder Zufluss von nicht kontaminiertem Wasser auf den Wegabschnitten im Bohrloch oder Schacht, wird am jeweiligen Endpunkt berücksichtigt, wobei das Verhältnis des abfließenden Aktivitätsflusses und des entsprechenden Wasserflusses die resultierende Austrittskonzentration ergibt.

Die Tabelle 3-1 enthält eine Zusammenstellung der in den einzelnen Wegabschnitten am Nuklidtransport beteiligten Prozesse, und in Tabelle 3-2 sind die in den einzelnen Rechenfällen angewandten Methoden abschnittsweise aufgeführt.

#### 3.2 Kurzbeschreibung des Rechenprogramms RANCHMD

Die mathematische Beschreibung des Radionuklidtransportes in einem zerklüfteten Medium beruht auf einer makroskopischen Massenbilanz.

In den Kluftsystemen im Gestein findet ein advektiver und dispersiver Transport statt. Zusätzlich erfolgt eine Diffusion von Nukliden aus diesem System in die Mikrorisse und -poren der Gesteinsmatrix. Da der Transport im wasserführenden System, verglichen zur Diffusion in der Matrix, schnell ist, genügt es, die Matrixdiffusion senkrecht zur Spaltebene zu betrachten.

Das Rechenprogramm RANCHMD simuliert den Nuklidtransport entlang einer vorgegebenen Trajektorie wobei der Transport in den wasserführenden Zonen als eindimensionaler Prozess betrachtet wird. Querdispersion im Kluftsystem wird durch das Programm RANCHMD nicht berücksichtigt und deshalb im vorliegenden Bericht als eine Verdünnung am Ende des Fließwegabschnittes behandelt (siehe Abschnitte 2.3.2, 2.3.3 und 3.3).

Die Massenbilanz wird unter Annahme konstanter Transportparameter formuliert. Für die Modellierung des Nuklidtransports entlang Fließwegen mit räumlich veränderlichen Parametern werden diese in Segmente unterteilt und das Rechenprogramm für jedes Segment gesondert angewendet. Die Erhaltung des Nuklidflusses liefert die Grenzbedingung zwischen den Segmenten.

Die Massenbilanz entspricht folgendem Differentialgleichungssystem:

$$R_f \cdot \frac{\delta C_f}{\delta t} = D_f \cdot \frac{\delta^2 C_f}{\delta x^2} - v \cdot \frac{\delta C_f}{\delta x} + \frac{1}{b} \cdot \epsilon_m \cdot D_m \cdot \frac{\delta C_m}{\delta z} \Big|_{z=b} - \lambda \cdot R_f \cdot C_f + (\lambda \cdot R_f \cdot C_f)^* \quad (3.1)$$

$$R_m \cdot \frac{\delta C_m}{\delta t} = D_m \cdot \frac{\delta^2 C_m}{\delta z^2} - \lambda \cdot R_m \cdot C_m + (\lambda \cdot R_m \cdot C_m)^* \quad (3.2)$$

wobei

$C_f$  = Nuklidkonzentration im Kluftwasser [Bq/m<sup>3</sup>]

$C_m$  = Nuklidkonzentration im Porenwasser [Bq/m<sup>3</sup>]

$R_f$	= Retentionsfaktor in der Kluft (Sorptions an der Kluftoberfläche und/ oder Kluftfüllung)	[-]
$R_m$	= Retentionsfaktor in der Gesteinsmatrix	[-]
$v$	= Abstandsgeschwindigkeit des Wasserflusses im Kluftsystem	[m/s]
$a_1$	= Dispersionslänge (longitudinal)	[m]
$D_f$	= longitudinale hydrodynamische Dispersion im Kluftsystem ( $D_f = a_1 \cdot v$ )	[m <sup>2</sup> /s]
$\epsilon_m$	= effektive Porosität der Gesteinsmatrix	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
$D_m$	= Diffusionskonstante in der Gesteinsmatrix ( $\epsilon_m D_m$ = effektive Diffusivität)	[m <sup>2</sup> /s]
$k$	= Zerfallskonstante des Nuklides	[s <sup>-1</sup> ]
$b$	= halbe Kluftweite für unverfüllte Klüfte bzw. Produkt von halber Kluftweite und Porosität der Kluftfüllung für verfüllte Klüfte	[m]
$x$	= Koordinate entlang der hydraulischen Trajektorie	[m]
$z$	= Koordinate senkrecht zur Spaltebene	[m]
*	= Werte für Mutternuklid	

Der Term auf der linken Seite von Gleichung (3.1) entspricht der zeitlichen Änderung der gesamten Nuklidkonzentration in der Kluft (sorbiert und nicht sorbiert). Der erste Term der rechten Seite beschreibt die hydrodynamische Dispersion in Fließrichtung. Der Dispersionsparameter  $D_f$  wird üblicherweise als Produkt der Abstandsgeschwindigkeit  $v$  und der sogenannten Dispersionslänge  $a_1$  dargestellt. Der zweite Term beschreibt die Advektion der Nuklide entlang des Fließweges. Der dritte Term beschreibt den Austausch von Radionukliden zwischen Kluft und Gesteinsmatrix durch Diffusion. Er garantiert die Flusserhaltung an der Grenze Kluft/Matrix.

Die linke Seite der Gleichung (3.2) entspricht der zeitlichen Änderung der gesamten Nuklidkonzentration in der Gesteinsmatrix. Aufgrund der um Größenordnungen geringeren Permeabilität in der Gesteinsmatrix kann die Advektion in x-Richtung vernachlässigt werden. Der

erste Term der rechten Seite beschreibt die Diffusion in die Gesteinsmatrix.

Die letzten beiden Terme der Gleichungen (3.1) und (3.2) schliesslich beschreiben den radioaktiven Zerfall und den Konzentrationsaufbau durch Zerfall des Mutter-nuklids.

Das Gleichungssystem (3.1) und (3.2) entspricht einer ebenen Kluftgeometrie (System von ebenen, parallelen Klüften). Als Option ist RANCHMD auch in der Lage, den Nuklidtransport längs Strukturen mit zylinderförmiger Geometrie (z.B. längs eines Bohrlochs) zu simulieren. In diesem Fall wird der letzte Term der Gleichung (3.1) mit  $2/r_0$  statt  $1/b$  multipliziert ( $r_0$  ist der Radius des offenen Bohrlochs bzw. das Produkt aus Bohrlochradius und effektiver Porosität der Bohrlochverfüllung). Dieser Faktor stellt das Verhältnis Oberfläche zu Querschnitt des Fließweges dar. Die Gleichung (3.2) lautet in zylindrischen Koordinaten:

$$R_m \cdot \frac{\delta C_m}{\delta t} = D_m \cdot \frac{1}{r} \frac{\delta}{\delta r} \left( r \cdot \frac{\delta C_m}{\delta r} \right) - \lambda \cdot R_m \cdot C_m + (\lambda \cdot R_m \cdot C_m)^* \quad (3.3)$$

Die Randbedingungen für die Integration der Gleichungen (3.1) und (3.2) oder (3.3) werden durch das zu beschreibende physikalische Problem bestimmt. Am Anfang des Fließweges ( $x=0$ ) werden die zeitabhängigen Aktivitätsfreisetzungsraten vorgegeben. Als zweite Bedingung wird angenommen, dass der Konzentrationsgradient am Ende eines jeden Fließwegabschnittes gleich null ist.

An der Grenze Kluft/Matrix ist die Konzentration stetig (3. Randbedingung). Die vierte Randbedingung reflektiert die räumliche Begrenzung der Diffusion in die Matrix. Der Konzentrationsgradient ist an dieser Grenze gleich null.

Damit lauten die Randbedingungen:

$$\begin{aligned} F(x=0, t) &= - D_f \cdot \frac{\delta C_f}{\delta x} + v \cdot C_f & t > 0 \\ \frac{\delta C_f}{\delta x} \Big|_{x=L} &= 0 \\ C_f(x, t) &= C_m(x, z=b, t) \\ \frac{\delta C_m}{\delta z} \Big|_{z=l} &= 0 & (3.4) \end{aligned}$$

wobei

F	=	Nuklidfreisetzungsrates	[Bq/s]
L	=	Länge des Fließpfades	[m]
l	=	Tiefe der Matrix	[m]

Bei unlimitierter Matrixdiffusion ist die Tiefe der Matrix unter der Annahme paralleler, planarer Klüfte aus Symmetriegründen gleich dem halben Kluftabstand. Für die Matrixdiffusion aus dem Bohrloch oder dem Schacht ist die Tiefe der Matrix im Prinzip unendlich gross. Für die numerische Modellierung muss trotzdem eine Grenze festgesetzt werden. Die Wahl dieser Grenze wird in Abschnitt 4.4.2 diskutiert.

Als Anfangsbedingungen wird die Nuklidkonzentration im ganzen Modellgebiet null gesetzt.

Das Rechenprogramm RANCHMD löst die Gleichungen (3.1) und (3.2) oder (3.3) mit den Randbedingungen (3.4). Der ortsabhängige Teil wird mit der sogenannte "Methode der Linien" und einer Taylor-Entwicklung hoher Ordnung, die Zeitabhängigkeit mit der Gear-Methode gelöst. Eine ausführliche Programmbeschreibung findet sich in [4].

Das Programm wurde intensiv getestet und es wurden umfangreiche Untersuchungen über den Einfluss der Diskretisierung angestellt. Dazu dienten sowohl Vergleiche mit analytischen Lösungen als auch mit Lösungen anderer Rechenprogramme. Der Vergleich von Resultaten von RANCHMD mit denjenigen anderer Programme hat im Rahmen des internationalen Projektes INTRACOIN stattgefunden [11].

### 3.3 Definition der Transportparameter

In allen Rechenfällen verläuft der postulierte Migrationsweg teilweise durch Kluftgesteine. In den Fällen "Tiefbohrungen" werden die drei Gesteinstypen Oxford, Kimmeridge und Oberkreide unterschieden. Der Fliessweg verläuft zwischen Kimmeridge und Oberkreide entlang der Bohrung Bleckenstedt 1 durch die Unterkreide und das Alb. In den Fällen "Schachtverschluss" führt der Fliessweg entlang dem Schacht Konrad 1 durch Oxford, Kimmeridge, Unterkreide und Alb und tritt schliesslich in die Oberkreide über. Die Fliesswege verlaufen entlang der Bohrung Bleckenstedt 1 und dem Schacht Konrad 1 durch ein poröses Medium.

Die hydraulischen Kennwerte der angenommenen Fliesswege sind für die berücksichtigten Rechenfälle in den Tabellen 3-3 und 3-4 zusammengefasst. Diese für die Nuklidmigrationsrechnungen notwendigen Kennwerte wurden zum Teil schon in Abschnitt 2.2 diskutiert und werden im folgenden kurz rekapituliert.

Die Annahmen für die kleinräumigen Fliesssysteme im Oxford und Kimmeridge werden aufgrund der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Eigenschaften dieser Schichten festgelegt.

Im Oxford und Kimmeridge beträgt der Kluftabstand 1 m (siehe 2.2.1 und 2.2.2), die Kluftweite 1 mm. Im Sinne einer Parametervariation wird zusätzlich die Auswirkung einer Kluftweite von 0,1 mm untersucht. Theoretische Überlegungen zeigen, dass bei gleichbleibendem Wasserfluss längs der Klüfte (gleichbleibende Filtergeschwindigkeit im Gestein) die Kluftweite keinen Einfluss auf die Transportgeschwindigkeit der Radionuklide und auf die Resultate der Berechnungen hat. Wird die Gleichung (3.1) mit den Faktor  $v_D/v$  multipliziert, wobei  $v_D$  die Filtergeschwindigkeit bezeichnet, und werden die Zerfallsterme vernachlässigt, so gilt:

$$\frac{v_D}{v} \cdot R_f \cdot \frac{\delta C_f}{\delta t} = v_D \cdot a_1 \cdot \frac{\delta^2 C_f}{\delta x^2} - v_D \cdot \frac{\delta C_f}{\delta x} + \frac{v_D \cdot \epsilon_m \cdot D_m}{v \cdot b} \cdot \frac{\delta C_m}{\delta z} \Bigg|_{z=b} \quad (3.5)$$

Damit hängt die rechte Seite nur von der Filtergeschwindigkeit und vom Produkt  $v \cdot b$  ab. Die linke Seite beschreibt den Einfluss der Speicherkapazität der Kluft für Radionuklide. Der Retentionsfaktor  $R_f$  ist umgekehrt

proportional zur Kluftweite, falls Oberflächensorption an der Kluftoberfläche dominant ist. Ausser für breite Klüfte mit sorbierender Kluftfüllung (so dass die Speicherkapazität der Kluft vergleichbar ist mit jener der betroffenen umgebenden Matrix) ist die Speicherkapazität der Kluft ohne Einfluss oder ebenfalls vom Produkt  $v \cdot b$  abhängig. Damit hängt der Nuklidtransport nur von  $v \cdot b$ , d.h. bei fester Filtergeschwindigkeit nicht von der Kluftweite ab.

Bei begrenzter Matrixdiffusion und langer Freisetzungsdauer ist die Unabhängigkeit von  $b$  auch mit der folgenden Überlegung ersichtlich: Unter den genannten Voraussetzungen erreicht die Matrix bezüglich Nuklidkonzentration die Sättigung ( $C_m = C_f$ ) und die Matrixdiffusion bewirkt eine Retention, welche durch einen effektiven Retentionsfaktor  $R_{eff}$  beschrieben werden kann:

$$\begin{aligned} R_{eff} &= \frac{\text{totale Menge Nuklide}}{\text{Menge mobiler Nuklide}} \\ &= \frac{\epsilon_m \cdot R_m \cdot l \cdot C_m}{b \cdot C_f} = \frac{\epsilon_m \cdot R_m \cdot l}{b} \end{aligned} \quad (3.6)$$

In der Gleichung (3.6) wurde wiederum die Speicherkapazität der Kluft vernachlässigt.

Es gilt

$$\frac{v_D}{v} = \frac{b}{l}$$

so dass

$$\frac{v}{R_{eff}} = \frac{v_D}{\epsilon_m \cdot R_m} \quad (3.7)$$

Das heisst, die effektive Transportgeschwindigkeit der Radionuklide ist unabhängig von der Kluftweite.

Diese Ergebnisse wurden durch Kontrollrechnungen bestätigt. Die Modellrechnungen werden deshalb nur für Kluftweiten von 1 mm im Oxford und Kimmeridge durchgeführt.

Die Modellierung der Nuklidausbreitung in der Oberkreide wurde schon in Abschnitt 2.3 diskutiert. In dieser Formation wird für die Strecke zwischen der Bohrung und dem Quartär die horizontale Geschwindigkeit des lokalen Modelles verwendet.

In den Plänerkalken werden ein mittlerer Kluftabstand von 0,1 m und eine mittlere Kluftweite von 0,02 mm angenommen.

Aufgrund des Streubereichs der nutzbaren Porosität für Oxford, Kimmeridge und Oberkreide (0,1 % - 22,5 %) wird eine Matrixporosität von 10 % für die drei Formationen angesetzt. Für die Schichten Unterkreide und Alb mit einem Streubereich von 8 % - 30 % wird eine Matrixporosität von 20 % angenommen.

Wie in [1] wird für die Berechnung des Retentionsfaktors der Nuklide in allen Schichten eine mittlere Gesteinsdichte von  $2600 \text{ kg/m}^3$  verwendet.

Während des Transportes durch das Kluftsystem dehnt sich eine Nuklidwolke als Folge der Dispersion aus. Der entsprechende Parameter, die Dispersionskonstante (Dimension  $\text{m}^2/\text{s}$ ), wird üblicherweise als Produkt der Abstandsgeschwindigkeit und der sogenannten Dispersionslänge (Dimension m) dargestellt. Der Quotient des Transportweges und der Dispersionslänge wird mit Peclet-Zahl bezeichnet.

Die Peclet-Zahl für die Dispersion in Richtung des Wasserflusses (Längsdispersion) wird aufgrund von Felddaten aus der Literatur auf 10 geschätzt [12,13] und stimmt damit mit dem in [1] verwendeten Wert überein.

Die Längsdispersion ist wesentlich grösser als die Dispersion quer zur Fliessrichtung. Aufgrund von Feldbeobachtungen, welche allerdings vorwiegend in oberflächennahen Lockergesteinsschichten erfolgten, wird für das Verhältnis der Dispersionslänge in Stromrichtung zu jener quer dazu der Wert 100:1 angenommen. Als Peclet-Zahl für die (horizontale) Querdispersion wird also 1 000 eingesetzt. Für die Peclet-Zahl der vertikalen Querdispersion wird ein Wert von 10 000 angenommen (vgl. Abschnitt 2.3.2).

Für die Berechnung der Längsdispersion im Schacht oder Bohrloch wird eine Peclet-Zahl von 20 verwendet.

Die Diffusion von Radionukliden aus den Klüften, dem Bohrloch oder dem Schacht in die Gesteinsmatrix wird durch zwei Parameter quantifiziert: die Diffusionskonstante in der Matrix und die maximale Diffusionstiefe (Matrixtiefe).

Die Diffusion durch ein poröses, wassergesättigtes Medium wird durch die "effektive Diffusivität"  $D_e$  be-

schrieben. Dieser Parameter ist der Proportionalitätsfaktor im 1. Fick'schen Gesetz

$$J = D_e \cdot dC/dx \quad (3.8)$$

wobei

J = Nuklidstrom pro Materialquerschnitt	[Bq/(m <sup>2</sup> ·s)]
C = Nuklidkonzentration im Porenwasser	[Bq/m <sup>3</sup> ]
x = Abstand	[m]

Die effektive Diffusivität ist gegenüber der Diffusionskonstante im Wasser,  $D_w$ , um die Porosität  $\epsilon_m$  und einen Faktor G, welcher die Geometrie der Poren beschreibt, reduziert.

$$\begin{aligned} D_e &= \epsilon_m \cdot D_w / G \\ &= \epsilon_m \cdot D_m \end{aligned} \quad (3.9)$$

Typische Werte für die Diffusionskonstante  $D_m$  sind  $8 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  für Granit mit einer Porosität von 0,25 % und  $2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s} - 5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  für Bentonit mit einer Porosität von 41 % [14]. Für die sogenannte Porendiffusivität wird für alle Gesteinstypen der Wert

$$D_m = 2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$$

angenommen.

Aufgrund des Kluftabstandes im Oxford und Kimmeridge von 1 m und von 0,1 m in der Oberkreide beträgt die Diffusionstiefe aus Symmetriegründen 0,5 bzw. 0,05 m.

Es wird angenommen, dass die Bohrung Bleckenstedt 1 in der Unterkreide und im Alb durch Nachfall aus diesen Schichten gefüllt ist. Der Schacht Konrad 1 ist gemäss Verschlussvariante 4 bis zur Obergrenze Alb mit Ton verfüllt [3], wobei angenommen wird, dass die Tonverfüllung selbst eher undurchlässiger ist als die durch den Schachtverschluss ebenfalls abgedichtete Auflockerungszone. In beiden Fällen erfolgt also der advective Transport in einem porösen, tonigen Medium und vorzugsweise durch das Gestein der Unterkreide und des Alb. Für die Fliessporosität wird ein Wert von 0,1, für die Matrixporosität ein Wert von 0,2 angenommen.

### 3.4 Nuklidfreisetzung aus dem Endlager

Für den Plan Konrad 9/86 wurde die Mobilisierung der eingelagerten Abfälle unter Berücksichtigung der Lebensdauer der Verfestigungsmatrix und der anderen technischen Barrieren, der Sorption an der Oberfläche der Materialien im Grubengebäude und der begrenzten Löslichkeit der Nuklide im Grundwasser berechnet. Eine Beschreibung des Modells ist in [18] gegeben. Die Ergebnisse dieser Modellrechnungen sind die zeitabhängigen, nuklidspezifischen Aktivitätsflüsse aus dem Endlager in die Geosphäre.

Ein wichtiger Parameter des Modells ist der Wasserfluss durch den Endlagerbereich, welcher die Freisetzungsratesowie den Verlauf der Freisetzung der Nuklide bestimmt. Die Freisetzungsrates hängt für löslichkeitslimitierte Freisetzung streng, für nicht löslichkeitslimitierte Freisetzung ungefähr proportional vom Wasserfluss ab.

In [1] sind die Ergebnisse von drei Szenarien gegeben. In den Szenarien Ib und Ic beträgt der Wasserfluss durch den Endlagerbereich  $1620 \text{ m}^3/\text{a}$  ( $3 \text{ l/min}$ ), im Szenarium Ia  $3200 \text{ m}^3/\text{a}$ . Die Szenarien Ib und Ic unterscheiden sich voneinander nur durch den Migrationsweg des kontaminierten Wassers. Für die in der vorliegenden Studie betrachteten Rechenfälle ist die mit FEM301 berechnete Wasserdurchflussrate kleiner als in den obigen Szenarien. Ausserdem erfuhr das Anfangsinventar gegenüber dem Plan 9/86 gewisse Änderungen. So wurde das Inventar des Nuklids I-129 um ungefähr einen Faktor 5 erhöht und die zweite chemische Form dieses Nuklid, das schwerlösliche Silberjodid (IA-129), wird nicht mehr als separates Nuklid behandelt. Das Inventar des U-238 wurde um den Faktor 3 reduziert und auch die anderen Uran-Isotope mit leichten Korrekturen versehen.

In der Folge wurde ein neues Freisetzungsszenarium mit einer Wasserdurchflussrate von  $735 \text{ m}^3/\text{a}$  gemäss den Ergebnissen der FEM301-Modellierung gerechnet [15].

Im Referenzfall "Tiefbohrungen" (Fall R34) beträgt der Wasserfluss durch das Endlagergebäude  $625 \text{ m}^3/\text{a}$  ( $1,2 \text{ l/min}$ ) [2]. Die Varianten R16 und R29 ergeben einen Wasserdurchfluss von  $735 \text{ m}^3/\text{a}$  bzw.  $468 \text{ m}^3/\text{a}$ . Vereinfachend werden den im folgenden beschriebenen Modellrechnungen R34 und R16 die Aktivitätsfreisetzungsrates für den Wasserdurchfluss von  $735 \text{ m}^3/\text{a}$  zugrunde gelegt. Damit wird vereinfachend die Abhängigkeit der Aktivitätsfreisetzung aus dem Endlager vom Wasserdurchfluss vernachlässigt. Da in den betrachteten Rechenfällen nur ein Teil des Grubendurchflusses entlang der Bohrung fliesst, wird als Quellterm für die

Modellrechnungen der Anteil der gesamten Aktivitätsfreisetzungsrates verwendet, welcher dem Verhältnis des Wasserflusses entlang dem Bohrloch (durch die Unterkreide) und des fallspezifischen Grubendurchflusses entspricht. Wegen der oben aufgeführten Abhängigkeit vom Endlagerdurchfluss wird die Freisetzungsrates im Fall R34 überschätzt, die Freisetzungsdauer entsprechend unterschätzt. Die Konzentrationen der Uranisotope und von Cl-36 im Endlager ist für die Festlegung der Sorptionskonstanten ( $K_d$ -Werte) massgebend (Abschnitt 3.5). Sie werden als Quotient der Freisetzungsrates und des tatsächlichen Wasserflusses gemäss hydraulischer Modellrechnung (d.h. für R34:  $625 \text{ m}^3/\text{a}$ ) ermittelt, so dass auch die Aktivitätskonzentration im Endlager überschätzt wird. Der Fehler, der durch die Vereinfachung entsteht, ist für die Endlagerwerte klein (ca. 15 %) und pessimistisch. Abgesehen vom geringen Einfluss auf die Bestimmung der  $K_d$ -Werte ist für R34 die Auswirkung dieser Näherung für die Randbedingung der Nuklidausbreitungsrechnung vernachlässigbar, da die Dauer der Freisetzung aus dem Endlager kurz ist im Vergleich zur Transportzeit durch die Geosphäre und damit nur das gesamte freigesetzte Inventar, nicht aber der Zeitverlauf der Freisetzung wesentlich ist.

Die verwendeten Freisetzungsrates stellen über das Endlager kumulierte Werte, die daraus berechneten Nuklidkonzentrationen mittlere Werte dar. Falls, wie die Resultate der hydraulischen Fließwegberechnung für R16 andeuten (Abschnitt 2.2.2.2 und [2]), der ins Bohrloch entwässernde Endlagerbereich relativ beschränkt ist, hängt die Nuklidfreisetzung entlang dem Bohrloch von lokalen Nuklidkonzentrationen ab, sofern die Querdispersion in den Schichten Oxford und Kimmeridge nicht berücksichtigt wird. Letztere hat eine ausgleichende Wirkung über den Bereich von rund 100 m ( $= \sqrt{2\pi} \cdot 40 \text{ m}$ , Gl. (2.5) und Abschnitt 2.2.3).

Im Referenzfall "Schachtverschluss" (Fall R35) beträgt der Wasserfluss  $640 \text{ m}^3/\text{a}$  und für die Varianten R38 und R39  $660 \text{ m}^3/\text{a}$  bzw.  $850 \text{ m}^3/\text{a}$ . Für die Ausbreitungsrechnungen wird auch in diesen Fällen das  $735 \text{ m}^3/\text{a}$ -Szenarium zugrunde gelegt und wie im Fall R34 vorgegangen.

Freisetzungsrates liegen für insgesamt 69 Nuklide vor. Diese Nuklide sind in einer Gruppe von Spalt- und Aktivierungsprodukten und in den vier Zerfallsketten zusammengefasst. Viele dieser Nuklide haben entweder eine sehr kurze Halbwertszeit oder ein vernachlässigbares Anfangsinventar und werden deshalb nicht weiter berücksichtigt. In der Sicherheitsanalyse [18] wurden 49 Nuklide (einschliesslich der beiden Formen von Jod) behandelt.

Erste Transportrechnungen für die postulierten Fließwege zeigen, dass der maximale Aktivitätsfluss eines nichtsorberenden Nuklids im Quartär frühestens 5000 Jahre nach der maximalen Freisetzung aus dem Grubengebäude auftritt (Ausnahme Rechenfall R39/2). Während dieser Zeit zerfallen Nuklide mit einer Halbwertszeit von weniger als 100 Jahren, welche nicht Glied einer Kette sind, auf unbedeutende Aktivitäten. Dies trifft auf 6 der 49 Nuklide zu, sie werden in den folgenden Modellrechnungen ebenfalls vernachlässigt. Aus dem gleichen Grund braucht auch U-232 nicht betrachtet zu werden, das eine Halbwertszeit von 72 Jahren hat, einem Seitenast der 4N-Kette angehört und keine langlebigen Mutternuklide besitzt. Tabelle 3-5 zeigt die 41 verbleibenden Nuklide mit ihren Halbwertszeiten und dem Anfangsinventar.

Zudem lassen sich die Zerfallsketten wie folgt vereinfachen: Die kurzlebigen Nuklide am "oberen" Ende der Nuklidketten (d.h. das Mutternuklid und eventuell Tochternuklide der ersten Generationen) tragen wegen ihres schnellen Zerfalls nur zur Konzentration des ersten langlebigen Nuklids der entsprechenden Kette bei. Eine Freisetzung dieser Nuklide in die Biosphäre findet nicht statt, so dass eine explizite Berücksichtigung in der Migrationsrechnung nicht notwendig ist. Zu diesen nicht zu berücksichtigenden Nukliden zählt auch Pu-238. Es gehört einem Seitenast der 4N+2-Kette an, entsteht durch Zerfall des ebenfalls kurzlebigen Am-242m und zerfällt seinerseits direkt in U-234. Ebenfalls nicht explizit berücksichtigt werden die beiden langlebigen Nuklide Pu-244 und Cm-247, deren Anfangsinventare in mol kleiner sind als das  $10^{-5}$ -fache der Anfangsinventare der entsprechenden ersten berücksichtigten Nuklide. Die nicht berücksichtigten Nuklide sind in Tabelle 3-5 mit einem Stern (\*) gekennzeichnet. Ihr Beitrag zur Konzentration des ersten berücksichtigten Nuklids ist durch das Verhältnis der Anfangsinventare in mol begrenzt. Diese Verhältnisse liegen durchwegs im Bereich von  $10^{-4}$  oder darunter. Für die Nuklidfreisetzung aus dem Endlager wurden alle aufgeführten Nuklide berücksichtigt, also auch die mit \* gekennzeichneten. Die Beiträge zu den Nuklidkonzentrationen der ersten berücksichtigten Nuklide, die aus dem Zerfall der Vorläufernuklide innerhalb des Endlagers entstehen, sind somit in den Modellrechnungen enthalten, nicht aber jene aus dem Zerfall ausserhalb des Endlagers.

Die kurzlebigen Nuklide in der Mitte und am "unteren" Ende der Zerfallsketten existieren nach relativ kurzer Zeit nur als Zerfallsprodukte. Sie sind dann im säkularen Gleichgewicht mit ihrem Mutternuklid, d.h. ihre Gesamtaktivitätskonzentrationen in der Geosphäre (sor-

biert und nicht sorbiert) sind gleich. Diese Nuklide brauchen in den Migrationsrechnungen ebenfalls nicht explizit berücksichtigt zu werden. In Tabelle 3-5 sind sie mit \*\* bezeichnet. Ihre Freisetzungsraten in die Biosphäre wird unter Berücksichtigung der Sorptionskoeffizienten aus der Freisetzungsraten des Mutternuklids bestimmt und nur am Ende des Migrationsweges berechnet.

Nach diesen Überlegungen lässt sich die Anzahl der zu betrachtenden Nuklide auf 27 reduzieren, wovon 14 der Gruppe der Spalt- und Aktivierungsprodukte und 13 den Aktiniden angehören.

### 3.5 Sorptionsparameter

Die Nuklidfreisetzung aus dem Endlager bildet den Quellterm für den Nuklidtransport durch die Geosphäre. Unter der Annahme, dass sich der freigesetzte Aktivitätsfluss gleichmässig mit dem gesamten Grubenwasserdurchfluss mischt, ergeben sich die Nuklidkonzentrationen im Porenwasser an der Grenze zwischen Endlager und Geosphäre. Die maximalen Nuklidkonzentrationen im Grubenwasser (d.h. maximale Freisetzungsraten durch Grubenabfluss) für eine Durchflussrate von  $735 \text{ m}^3/\text{a}$  sind in Tabelle 3-6 dargestellt.

Die Sorption der Radionuklide in der Matrix und im unversetzten Teil des Bohrlochs wird als lineare oder abschnittsweise lineare Gleichgewichtssorption modelliert. Der  $K_d$ -Wert jener Nuklide, welche eine nicht-lineare Sorption aufweisen, wächst mit abnehmender Konzentration des Elementes (Summe der Konzentrationen der radioaktiven und stabilen Isotope) und/oder der Konzentration des Komplexbildners EDTA. Von den betrachteten Elementen weisen Ni, Zr, Pd, Sn, Pu, U, Th, Ac und Pb ein nichtlineares Sorptionsverhalten auf, wobei der  $K_d$ -Wert von Uran nur von der Nuklidkonzentration und jener der anderen Elemente unter den herrschenden Bedingungen in genügender Näherung nur von der EDTA-Konzentration abhängt [16]. Für jedes dieser Nuklide gibt [16] vier  $K_d$ -Werte an: Einen für einen Maximalwert der Elementkonzentration im Grubengebäude (Bezugskonzentration) ohne EDTA und bei einem angenommenen Maximalwert der EDTA Konzentration, sowie je einen für die gleichzeitige Senkung der Element- und EDTA-Konzentration um einen Faktor 10 bzw. 100. Diese Werte entsprechen auch den in [18] verwendeten  $K_d$ -Werten.

Für Uran ist die maximale Nuklidkonzentration im Grubenwasser geringer als 1% der in den  $K_d$ -Tabellen von

[16] aufgeführten Bezugskonzentration, so dass für alle Abschnitte des Fließweges der jeweils grösste angegebene  $K_d$ -Wert verwendet werden kann.

Um für die anderen Nuklide mit nichtlinearer Sorption die gültigen  $K_d$ -Werte für die verschiedenen Streckenabschnitte zu ermitteln, wird für jeden Rechenfall die EDTA-Konzentration entlang dem Fließweg berechnet. Dazu wird angenommen, dass EDTA im Endlager gleich wie die nichtsorbierenden Nuklide Chlor oder Jod mobilisiert wird und während der Ausbreitung durch die Geosphäre nicht sorbiert. Diese Annahmen sind konservativ, da sie eine erhöhte EDTA-Konzentration im Porenwasser und damit kleinere  $K_d$ -Werte der Nuklide zur Folge haben.

Ausgehend von der maximalen EDTA-Konzentration im Endlager von  $10^{-3}$  mol/l kann die Freisetzungsrates von EDTA aus dem Endlager durch Multiplikation der entsprechenden Rate von Cl-36 mit einer geeigneten Konstanten bestimmt werden. Die Ausbreitung von EDTA durch die Geosphäre berechnet sich analog wie für Chlor, ausser dass EDTA als stabile, nicht zerfallende Spezies betrachtet wird.

Die  $K_d$ -Werte der oben aufgeführten Nuklide werden für jeden Abschnitt des Fließweges entsprechend den maximalen EDTA-Konzentrationen festgelegt, welche unabhängig vom Zeitpunkt innerhalb der Abschnitte erreicht werden. Aufgrund der in [16] aufgeführten  $K_d$ -Werte bedeutet dies, dass

- bei einer maximalen EDTA-Konzentration oberhalb  $10^{-4}$  mol/l eine Verdünnung im Bereich 1-10 vorliegt und der entsprechende ungünstigste  $K_d$ -Wert zur Anwendung kommt
- bei einer maximalen EDTA-Konzentration zwischen  $10^{-5}$  mol/l und  $10^{-4}$  mol/l eine Verdünnung im Bereich 10-100 vorliegt und der entsprechende mittlere  $K_d$ -Wert verwendet wird
- bei einer maximalen EDTA-Konzentration unterhalb  $10^{-5}$  mol/l eine Verdünnung grösser als 100 vorliegt und der günstigste  $K_d$ -Wert verwendet werden kann

Tabelle 3-7 zeigt die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung für EDTA. Für jeden Rechenfall werden die maximalen EDTA-Konzentrationen an den Grenzen zwischen den verschiedenen geologischen Einheiten angegeben.

Falls die EDTA-Konzentration nur innerhalb eines geringen Teils von weniger als 10% des Streckenabschnittes derart hoch ist, dass ein ungünstiger  $K_d$ -Wert massgebend ist und entlang dem grössten Teil des Abschnittes ein höherer  $K_d$ -Wert gilt, so wird für die Modellierung der höhere Wert verwendet. Die betreffenden Fälle sind in Tabelle 3-7 mit einem Stern (\*) gekennzeichnet und lassen sich wie folgt begründen:

- Im Rechenfall R34 sinkt die EDTA-Konzentration rasch ab, so dass im Oxford eine Verdünnung im Intervall 10 - 100 und im Kimmeridge, Unterkreide und Oberkreide eine solche über 100 massgebend ist.
- Im Fall R16 weist ungefähr ein Drittel des Oxford eine EDTA-Konzentration von mehr als  $10^{-4}$  mol/l auf, so dass hier die niedrigsten  $K_d$ -Werte gelten. Die Verdünnung steigt bis am Ende des Freisetzungspfades nicht über 100.
- Im Rechenfall R35 sinkt die EDTA-Konzentration innerhalb der ersten 50 m (d.h. etwa 8%) des Fließweges entlang dem Schacht Konrad 1 durch die Unterkreide unter  $10^{-4}$  mol/l ab. Entlang der nächsten 150 m verringert sich die Konzentration auf  $10^{-5}$  mol/l. Im Fall R35 gelten somit in der Unterkreide die der Verdünnung 10 - 100 entsprechenden  $K_d$ -Werte.
- Im Rechenfall R38 sinkt die EDTA-Konzentration erst in der Oberkreide nach knapp über 10% des Wegabschnittes unter  $10^{-4}$  mol/l. Damit gilt für diese Schicht konservativerweise eine Verdünnung von weniger als ein Faktor 10.

Im Rechenfall R39 steigt die Verdünnung bis am Ende des Freisetzungspfades nicht über 10.

Für die Strecken entlang der Bohrung Bleckenstedt 1 und dem Schacht Konrad 1 in der Unterkreide und im Alb werden die  $K_d$ -Werte für die Unterkreide gemäss [16] verwendet.

Die in [16] aufgeführten  $K_d$ -Werte für die Plänerkalke gelten für die dort herrschenden chemischen Verhältnisse (schwach- bis nichtsaline Wässer). Nach dem hier verwendeten konzeptuellen Modell für die Ausbreitung von Radionukliden entlang der Tiefbohrung Bleckenstedt 1 und dem Schacht Konrad 1 erfolgt die Freisetzung der Radionuklide in die Oberkreide jedoch mit einer geringen Menge stark saliner Tiefengrundwässer, welche in der Oberkreide ein salines Milieu schaffen. Die Verdün-

nung der Tiefengrundwässer durch Formationswässer der Plänerkalke erreicht zwar im Fall R34 in der Ausbreitungsfahne einen Faktor 28, in den übrigen Fällen ist sie jedoch deutlich geringer. Die  $K_d$ -Werte sind unter dem Einfluss von salinen Wässern im allgemeinen kleiner als in nichtsaliner Umgebung. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, werden in der Oberkreide konservativerweise die  $K_d$ -Werte verwendet, welche für ein petrographisch ähnliches Gestein mit salinen Wässern ermittelt worden sind: Zur Anwendung kommen die  $K_d$ -Werte des Kimmeridge. Gestützt wird diese Vorgehensweise durch die Ergebnisse von Sorptionsuntersuchungen an Proben des Unteren / Mittleren Cenomans, die für einige Radionuklide mit Formationswasser aus dem Korallenoolith durchgeführt wurden. Die Messwerte zeigten eine sehr gute Übereinstimmung mit den für das Kimmeridge erhaltenen Werten [17].

Die in den Modellrechnungen verwendeten  $K_d$ -Werte sind in den Tabellen 3-8 bis 3-12 zusammengestellt.

Die explizite Berücksichtigung von kurzlebigen Tochternukliden in der Mitte oder am Ende von Zerfallsketten würde eine aufwendige numerische Berechnung erfordern (kurze Zeitschritte bei der Integration). Da jedoch kurzlebige Tochternuklide bereits nach kurzer Zeit mit dem jeweiligen Mutternuklid im säkularen Gleichgewicht sind, kann auf die explizite numerische Berechnung der Tochternuklide verzichtet werden. Im säkularen Gleichgewicht sind die Gesamtaktivitätskonzentrationen (sorbiert und nicht sorbiert) von Mutter- und Tochternuklid gleich. Die Konzentration im Porenwasser und damit auch die Freisetzungsrate des Tochternuklids aus einer geologischen Schicht, z.B. aus den Plänerkalken ins Quartär, hängt damit vom Unterschied der  $K_d$ -Werte ab. Es gilt

$$Q = Q^* \cdot R^* / R \quad (3.10)$$

wobei

$$R = 1 + (1-\varepsilon) \cdot \tau_s \cdot K_d / \varepsilon \quad (3.11)$$

$Q$	= Freisetzungsrate	[Bq/s]
$R$	= Retentionsfaktor	[-]
$\varepsilon$	= Porosität	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
$\tau_s$	= Gesteinsdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]
$K_d$	= Verteilungskoeffizient	[m <sup>3</sup> /kg]
*	= Werte für Mutternuklid	

Falls der  $K_d$ -Wert des Tochternuklids kleiner ist als jener der Mutter, ist die Freisetzungsrate der Tochter grösser und umgekehrt.

#### 4 MODELLERGEBNISSE ZUM RADIONUKLIDTRANSPORT

##### 4.1 Ergebnisse im Referenzfall R34 "Tiefbohrungen"

Die wichtigsten Resultate der Transportrechnungen für den Referenzfall R34 mit dem Programm RANCHMD sind in den Tabellen 4-1 und 4-2 dargestellt. Die einzelnen Ergebnisse für Teilstrecken des Migrationsweges werden in den entsprechenden Unterabschnitten diskutiert.

Tabelle 4-1 zeigt die maximalen Nuklidkonzentrationen an verschiedenen ausgewählten Punkten entlang dem hypothetischen Fliessweg: Beim Abfluss aus dem Endlager, an der Grenze zwischen Oxford und Kimmeridge, am Zufluss zur Bohrung Bleckenstedt 1 an der Basis der Unterkreide, beim Abfluss aus der Bohrung an der Basis der Oberkreide, in der Oberkreide an der Grenze zum Quartär sowie im Quartär. In Tabelle 4-2 sind die Zeitpunkte des Auftretens dieser Konzentrationsmaxima zusammengestellt.

Der zeitliche Verlauf der Konzentrationen an der Obergrenze der verschiedenen Einheiten ist für I-129 und U-238 in den Abbildungen 4-1 und 4-2 dargestellt. Die Abbildungen 4-3 und 4-4 zeigen die Konzentrationen der Spalt- und Aktivierungsprodukte bzw. der Aktiniden im Quartär.

Im folgenden sollen die besonderen Aspekte des Transportes in den einzelnen Teilstrecken des Migrationsweges näher diskutiert werden.

##### 4.1.1 Nuklidtransport R34 durch Oxford und Kimmeridge

Nach dem Transport durch das Kluftsystem des Oxford und Kimmeridge ist die Konzentration des langlebigen, nichtsorbiierenden Nuklids I-129 gegenüber dem Wert im Grubengebäude um den Faktor 340 vermindert. Wie in Kapitel 3-2 dargelegt, ist diese Verdünnung kein Effekt der Beimischung von unkontaminiertem Wasser durch Querdispersion, sondern eine Folge der Längsdispersion. Die Freisetzung des Inventars aus dem Endlager dauert etwa 4 000 Jahre (Freisetzungsfluss noch 1 % des Maximums), so dass sich das Inventar auf den Grubendurchfluss von 4 000 Jahren verteilt. Die Freisetzung ins Bohrloch nach Migration durch Oxford und Kimmeridge dauert rund 1 Mio. Jahre (siehe Abbildung 4-1). Die Verdünnung erfolgt also einerseits durch Wasser, welches entlang dem gleichen Fliessweg, aber schneller fließt und das Grubengebäude durchströmt, nachdem

alles Jod freigesetzt wurde, und andererseits durch langsam fliessendes Wasser, welches die Grube vor dem Beginn der Freisetzung durchströmt hatte. Dies ist der anschauliche Hintergrund der Längsdispersion.

Die maximale Konzentration an der Basis der Unterkreide (Zufluss Bohrung Bleckenstedt 1) tritt erst nach rund  $4 \cdot 10^5$  Jahren auf, die effektive Geschwindigkeit des Nuklids ist also etwa 100mal langsamer als die Abstandsgeschwindigkeit des Wassers. Dies bedeutet vollständige Sättigung der Matrix, so dass die Verzögerung gleich dem Verhältnis aus Matrix- und Kluftporosität, also gleich 100 ist.

Die Halbwertszeit von  $\text{Cl-36}$  ist vergleichbar mit der Transportzeit, so dass die Reduktion der Konzentration dieses Nuklids um etwa einen Faktor 2 grösser ist als bei  $\text{I-129}$ . Für  $\text{Ca-41}$  übersteigt die Transportzeit die Halbwertszeit um rund einen Faktor 3, und die Reduktion wird noch grösser. Verbunden mit dieser Reduktion durch den radioaktiven Zerfall ist die Verschiebung der Konzentrationsmaxima zu früheren Zeiten (siehe Tab. 4-2).

Die übrigen Spalt- und Aktivierungsprodukte werden durch Sorption stärker zurückgehalten, wodurch ihre Konzentration durch Zerfall und/oder Dispersion stärker reduziert wird, als für die langlebigen nichtsorbierten Nuklide.

Alle Aktiniden sorbieren mehr oder weniger stark, so dass ihr Transport zum Bohrloch wesentlich verzögert wird.

Die stark sorbierenden Pu-Isotope zerfallen während des Transportes bis auf unbedeutende Konzentrationen. Die Konzentration der Aktiniden im Bohrlochzufluss wird damit durch das Verhalten der langlebigen Uran-Isotope bestimmt.

Bei starker Sorption und relativ kurzer Dauer einer erhöhten Nuklidkonzentration in der Kluft kann die Tiefe, in welche Nuklide diffundieren können, geringer sein als die verfügbare Diffusionstiefe. In diesen Fällen nimmt die Verzögerung des Transportes durch Matrixdiffusion nicht mehr gemäss Gleichung (3.6) linear mit dem Retentionsfaktor zu (sondern ungefähr mit  $\sqrt{R_m}$ ).

Die Konzentration des Uran-Isotops  $\text{U-238}$  erreicht ihr Maximum erst nach 22 Mio. Jahren. Nach dieser Zeit sind alle kurzlebigen Tochternuklide im säkularen Gleichgewicht mit ihren Mutternukliden. Der Zeitpunkt des Maximums bedeutet, dass sich das Uran mit einer Ge-

schwindigkeit bewegt, welche 5000mal kleiner ist als die Abstandsgeschwindigkeit des Kluftwassers. Dieser Faktor ist etwas kleiner als der effektive Retentionsfaktor  $R_{eff}$  nach Gleichung (3.6) (Retentionsfaktor des Gesteins  $R_m = 71$  im Oxford, 62 im Kimmeridge und  $R_{eff} = 100 \cdot R_m$ ). Dies bedeutet, dass die Matrix nicht vollständig gesättigt wird.

Die Freisetzung von U-238 aus dem Endlager dauert  $1,5 \cdot 10^5$  Jahre. Nach Migration durch Oxford und Kimmeridge ist der Aktivitätspeak auf 70 Mio. Jahre verbreitert. Die zeitliche Ausdehnung der Freisetzung um den Faktor 470 führt zu einer Verminderung der maximalen Konzentration um einen Faktor 570. Dieser Effekt der Längsdispersion ist in Abbildung 4-2 ersichtlich.

Die Transportzeit von Np-237 beträgt etwa 50 Mio. Jahre, was etwa 25 Halbwertzeiten entspricht, wodurch die gesamte Neptunium-Kette bis auf eine unbedeutende Aktivitätsmenge zerfällt.

#### 4.1.2 Nuklidtransport R34 durch Unterkreide und Alb entlang dem Bohrloch

Die Matrixdiffusion in radialer Richtung aus dem Bohrloch verzögert die Freisetzung aller Nuklide und reduziert deren maximale Konzentration. Wegen der zylindrischen Geometrie besitzt die Matrix eine relativ kleine Kontaktfläche zum Bohrloch und eine grosse Aufnahmekapazität. Die Konzentration in der Matrix steigt deshalb nicht stark an und der Konzentrationsgradient und damit auch der diffusive Fluss in die Matrix bleibt relativ gross.

Mit dem Abklingen der Konzentration diffundieren die in die Matrix eingedrungenen Nuklide sehr langsam in das im Bohrloch fliessende Wasser zurück. Die zylindrische Geometrie des Diffusionsweges in der Matrix bewirkt eine Beschränkung dieses Prozesses, so dass nach einer bestimmten Zeit annähernd ein Gleichgewichtszustand erreicht wird.

Die Wirkung der Matrixdiffusion aus dem Bohrloch ist aus Abbildung 4-1 am Beispiel des nicht sorbierenden Jods ersichtlich: Die Wasserfliesszeit im Bohrloch durch die Unterkreide und das Alb beträgt rund 10 Jahre, während das Konzentrationsmaximum des I-129 diese Strecke in 50000 Jahren durchwandert (siehe Tabelle 4-2). Die durch Matrixdiffusion zurückgehaltene Aktivität wird nach dem Absinken der Konzentration im Bohrloch über einen langen Zeitraum wieder abgegeben. Gleichermaßen zeigt sich dieser Effekt am Isotop U-238,

welches in der Bohrlochverfüllung sorbiert wird (siehe Abbildung 4-2).

Die Matrixdiffusion reduziert die maximale Konzentration um einen Faktor von etwa 60 für I-129 und 80 für U-238. Der Unterschied zwischen Wasserzu- und -abfluss aus der Bohrung bewirkt einen Verdünnungsfaktor 20 zusätzlich zum Effekt der Matrixdiffusion.

Im Prinzip wird die Matrixdiffusion aus dem Bohrloch als unbegrenzt angenommen. Für die numerische Modellierung muss aus naheliegenden Gründen trotzdem eine Grenze festgesetzt werden. Die Wahl der Modellgrenze hat so zu erfolgen, dass sie einerseits gross genug ist, um das Resultat der Modellierung, insbesondere den Maximalwert am Ende des Transportweges nicht zu beeinflussen, andererseits aber aus numerischen Gründen möglichst beschränkt bleibt. Die Wahl eines eher zu geringen Radius ist pessimistisch, da damit möglicherweise die Matrixdiffusion beschränkt und somit ihre Auswirkung unterschätzt wird.

Die Matrixtiefe könnte auch aus physikalischen Gründen begrenzt sein, z.B. durch Inhomogenitäten im umgebenden Gestein. Die Folge wäre eine weniger ausgeprägte Verzögerung bzw. Verminderung des Aktivitätsflusses.

Als Begrenzung der "theoretisch unbegrenzten" Matrix wurde rechnerisch ein Radius von 100 m gewählt. Im Sinne einer Parametervariation wurde der Transport im Bohrloch zusätzlich mit einem äusseren Radius von 40 m modelliert. Die Ergebnisse dieser Rechnungen sind in den Tabellen 4-3 und 4-4 dargestellt und unterscheiden sich von den Ergebnissen des Referenzfalles nur in den letzten beiden Abschnitten des Fließweges.

Bei limitierter Matrixdiffusion ist die maximale Konzentration von I-129 und U-238 etwa 2,5mal höher als im "unbegrenzten" Fall, jedoch ist der Zeitpunkt der Maxima um etwa einen Faktor 10 verzögert. Auf einen ersten relativ schnellen Durchbruch der Konzentrationsfront durch das Bohrloch, folgt eine, durch die Matrix verursachte, zeitlich ausgedehnte Abnahme der Konzentration im Abfluss.

Andere Nuklide, mit Ausnahme derjenigen, deren Aktivität bereits durch ihren Zerfall stark reduziert ist, weisen ähnliche Verhältnisse auf.

#### 4.1.3 Nuklidtransport R34 durch die Oberkreide

Der letzte Abschnitt des Transportweges führt durch die Oberkreide. Der Nuklidtransport in diesem Abschnitt wird ebenfalls mit RANCHMD modelliert, wobei als Quellterm der Nuklidfluss aus der Bohrung verwendet wird.

Wegen des relativ geringen Abflusses aus der Bohrung hat die Querdispersion in der Oberkreide einen bedeutenden Effekt auf die Breite der Austrittsfläche an der Basis Quartär (siehe Abschnitt 2.3.3.2). Die Fahne des abfliessenden Wassers weist eine asymptotische Breite von nur rund 5 m auf (ohne Querdispersion), während die Reichweite der Querdispersion rund 22 m beträgt. Daraus folgt, dass das abfliessende Wasser mit unkontaminiertem Wasser aus den Plänerkalken verdünnt wird. Dieser Verdünnungsfaktor ist etwa gleich 28.

Bei einer Kluftporosität von  $2 \cdot 10^{-4}$  beträgt die Abstandsgeschwindigkeit 47 m/a und die Fliesszeit durch die Oberkreide rund 11 Jahre. Während der relativ langen Freisetzungsdauer von Nukliden in die Oberkreide (vgl. Konzentrationsverlauf  $j_0$  in Abb. 4-1) wird die Matrix, deren Tiefe bei einem Kluftabstand von 0,1 m nur 5 cm beträgt, in guter Näherung für alle Nuklide gesättigt.

Unter diesen Umständen entspricht die durch Matrixdiffusion verursachte Retention für nichtsorbiere Nuklide dem Verhältnis von Matrixporosität zur durchflossenen Kluftporosität, d.h. 500 : 1, was einer Transportzeit von 5000 Jahren entspricht. Für sorbierende Nuklide verlängert sich die Transportzeit um den aus dem  $K_d$ -Wert und der Matrixporosität berechneten Retentionsfaktor zusätzlich (vgl. Gleichung 3.6).

Da die zeitliche Verlängerung der Freisetzung bei einer Peclet-Zahl von 10 in der Grössenordnung der Transportzeit liegt, bewirkt der Transport durch die Oberkreide keine wesentliche Reduktion der Nuklidkonzentration, falls die Transportzeit kurz ist gegenüber der Freisetzungsdauer in die Oberkreide und gegenüber der Halbwertszeit des Nuklids. Die Verdünnung in der Oberkreide durch Querdispersion ist in Abbildung 4-1 für I-129 und in Abbildung 4-2 für U-238 ersichtlich.

#### 4.1.4 Konzentrationen im Quartär im Fall R34

Nach dem Transport durch die Oberkreide tritt das aus dem Bohrloch Bleckenstedt 1 abgeflossene potentiell kontaminierte Wasser an der Basis des Quartärs aus. Aufgrund der angenommenen Steigung der Fliesstrajek-

torien in den Plänerkalken sowie der ost-südöstlichen Fliessrichtung in der Oberkreide (Ergebnis des Referenzfalls R34) befindet sich das Freisetzungsgebiet etwa 400 m ost-südöstlich des Bohrlochs. Seine Breite beträgt etwa 55 m.

Aufgrund der Verteilung der Quartärmächtigkeit in der Umgebung der Bohrung Bleckenstedt 1 beträgt die Gesamtmächtigkeit des Quartärs an der Austrittsfläche etwa 10 m und die gesättigte Mächtigkeit gemäss den Grundwasserhöhengleichungen etwa 8 m [1]. Der Nuklidfluss im Quartär wird dadurch in einem Wasserfluss von  $1,32 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  verdünnt, welcher etwa 20mal grösser ist als derjenige der kontaminierten Fahne der Oberkreide.

Die zeitlichen Verläufe der Aktivitätskonzentrationen im Quartär verlaufen wegen der instantanen Verdünnung proportional zu den Konzentrationen an der Obergrenze der Oberkreide. Sie sind in den Abbildungen 4-3 und 4-4 dargestellt.

Die höchsten Aktivitätskonzentrationen weisen Cl-36, Ca-41, und I-129 nach etwa 400 000 Jahren, Tc-99 nach etwa 4 Mio. Jahren und die Aktinidenketten nach rund 30 Mio. Jahren auf. Unter den vier Zerfallsreihen dominiert die U-238-Kette mit einer gegenüber den anderen Ketten um rund eine Grössenordnung höheren Aktivitätskonzentration des massgebenden Nuklids.

Das sehr langlebige Th-232 erscheint zuerst als Tochter nuklid des U-236. Nach etwa 100 Mio. Jahren steigt die Konzentration des Thoriums wieder an, wenn das aus dem Endlager freigesetzte Thorium das Ende des Migrationsweges erreicht.

#### 4.2 Ergebnisse der Parametervariationen zum Referenzfall "Tiefbohrungen"

Da sich die Fliesswege der beiden hydraulischen Parametervariationen R16 und R29 lediglich im Bereich des Oxford und Kimmeridge unterscheiden, werden im folgenden nur die Ergebnisse des Falles R16 ausführlich diskutiert.

Die Hauptresultate der Transportrechnungen sind in den Tabellen 4-5 und 4-6 zusammengefasst. Die Abbildungen 4-5 und 4-6 zeigen den zeitlichen Verlauf der Nuklidkonzentrationen im Quartär.

#### 4.2.1 Nuklidtransport R16 durch Oxford und Kimmeridge

Im Vergleich zum Referenzfall ist im Fall R16 die Wasserfliesszeit durch das Oxford und Kimmeridge und damit auch die Zeit bis zum Erreichen der maximalen Konzentrationen am Eintritt zum Bohrloch etwa 10mal kürzer.

Die Spalt- und Aktivierungsprodukte können in zwei Gruppen eingeteilt werden. Die nichtsorbierten Nuklide I-129, Cl-36 und Ca-41 erreichen alle nach der gleichen Transportzeit von rund 42 000 Jahren die Bohrung Bleckenstedt 1. Im Vergleich zur Wasserfliesszeit bedeutet dies eine Verzögerung durch Matrixdiffusion um einen Faktor 90. Bei instantaner Sättigung der Matrix wäre die Verzögerung wie im Referenzfall 100, was bedeutet, dass dieser Zustand nicht entlang der ganzen Strecke erreicht wird.

Die Konzentration des langlebigen Nuklids I-129 ist gegenüber dem Wert im Grubengebäude um den Faktor 31 verringert.

Die Halbwertszeit von Cl-36 ist ebenfalls viel länger als die Transportzeit, so dass die Reduktion der Konzentration dieses Nuklids etwa gleich ist wie für I-129. Für Ca-41 übersteigt die Transportzeit die Halbwertszeit etwa um einen Faktor 2, so dass hier die Reduktion etwas grösser ist.

Die Transportzeiten für die Uran-Isotope betragen 2,7 Mio. Jahre (Tabelle 4-6). Die Zeiten sind wiederum kürzer als die Halbwertszeiten der Uran-Isotope (mit Ausnahme von U-233 und U-234), weshalb ihre Konzentrationen nicht durch radioaktiven Zerfall, sondern nur durch Dispersion reduziert sind.

Die Reduktion der Konzentration von U-238 im Zufluss zum Bohrloch gegenüber dem Wert im Grubengebäude beträgt 56. Die Längsdispersion ist also etwa 10mal weniger effektiv als in Rechenfall R34, was ungefähr dem Verhältnis der Fliesszeiten entspricht.

#### 4.2.2 Nuklidtransport R16 durch Unterkreide und Alb entlang dem Bohrloch

Nach dem Transport durch die Schichten Oxford und Kimmeridge fliessen die Radionuklide mit dem aufsteigenden Wasser relativ rasch durch den unversetzten Teil des Bohrlochs Bleckenstedt 1 zur Oberkreide. Gemäss den Migrationsrechnungen für die Schichten Oxford und Kimmeridge dauert der Zustrom von potentiell kontaminier-

tem Wasser in die Bohrung rund 50000 Jahre für nicht-sorbierende Nuklide und 4 Mio. Jahre für die relativ stark sorbierenden Aktiniden.

Im Fall R16 beträgt der Zufluss in die Bohrung an der Basis der Unterkreide 0,07 l/min, während an der Obergrenze des Alb 0,09 l/min abfließt. Das zuströmende Wasser stammt aus den wenig durchlässigen Schichten der Unterkreide und ist - wenn überhaupt - nicht zur selben Zeit kontaminiert wie das Wasser im Bohrloch, so dass eine Verdünnung um den Faktor 1,3 resultiert.

Durch Diffusion aus dem Bohrloch in das umgebende Gestein wird der Nuklidtransport entlang dem Bohrloch verzögert. Um zu untersuchen, ob dieser Prozess trotz der relativ hohen Geschwindigkeit des Wassers im Bohrloch ( $1,4 \cdot 10^4$  m/a) einen merklichen Einfluss hat, wurden mit RANCHMD einige Testrechnungen durchgeführt. Hierzu wird folgendes System betrachtet:

Zur Zeit 0 steigt die Konzentration im Zufluss an der Basis der Unterkreide für je ein langlebiges nicht-sorbierendes und ein sorbierendes ( $K_d = 1,0 \text{ m}^3/\text{kg}$ ) Nuklid von 0 auf 1 und sei anschliessend konstant. Berechnet wird die Zeitdauer, bis die Konzentration an der Basis der Oberkreide annähernd den Wert im Zufluss erreicht.

Der gewählte  $K_d$ -Wert des sorbierenden Nuklids entspricht bei einer Porosität von 0,1 einem Retentionsfaktor von 23 000 und ist typisch für stark sorbierende Nuklide in der Unterkreide (vgl. Tabelle 3-8).

Für ein nicht sorbierendes Nuklid steigt die Konzentration an der Basis der Oberkreide sehr rasch an. Nach nur einem Jahr erreicht die Konzentration 99,8 % des Wertes im zufließenden Wasser.

Für das sorbierende Nuklid erreicht die Konzentration nach 1500 Jahren den Wert von 90 %, falls das Bohrloch eine sorbierende Verfüllung aufweist, und den Wert von 98 % nach 200 Jahren, falls im Bohrloch keine Sorption erfolgt.

Dieses Resultat kann von der Grössenordnung her mit einer einfachen Überlegung illustriert werden: Eine Verzögerung des Transportes erfolgt, solange die Matrix einen wesentlichen Anteil des von unten dem Bohrloch zugeführten Nuklidflusses durch Diffusion aufnehmen kann. Diese Bedingung begrenzt den radialen Gradienten der Nuklidkonzentration in der Matrix nach unten und damit die Tiefe der Matrix, innerhalb welcher die Nuklidkonzentration erhöht ist, nach oben. Ein Anteil von 10 % diffusivem Fluss in die Matrix über die ge-

samte Bohrlochoberfläche bezogen auf den Zufluss an der Basis Unterkreide, ergibt aufgrund der Bilanzgleichung

$$10 \% \cdot C \cdot 37 \text{ m}^3/\text{a} = 2\pi \cdot 0,1 \text{ m} \cdot 400 \text{ m} \cdot \varepsilon_m \cdot D_m \cdot \Delta C / \Delta r$$

eine Matrixtiefe  $\Delta r$  von 0,04 m (C ist die Nuklidkonzentration im Zufluss). Für das sorbierende Nuklid ist diese Matrixtiefe gemäss

$$\Delta r = \sqrt{2 \cdot D_m / R_m \cdot t}$$

nach 3000 Jahren gesättigt so dass die Matrix nur mehr weniger als 10 % des in die Bohrung zuströmenden Nuklidflusses aufnehmen kann.

Da die Durchbruchzeiten der Nuklidfront entlang dem Bohrloch sowohl für nichtsorbierende als auch für sorbierende Nuklide im Vergleich zur Dauer der Nuklidfreisetzung aus dem Kimmeridge ins Bohrloch kurz sind, erfolgt während des Transports durch das Bohrloch weder eine merkliche Verzögerung noch eine Reduktion des Konzentrationsverlaufs durch Sorption und Matrixdiffusion. Deshalb wird angenommen, dass das kontaminierte Wasser aus dem Kimmeridge ohne Zeitverzug und nur durch den Zustrom von unkontaminiertem Wasser verdünnt die Basis der Oberkreide erreicht, so dass sich ausführliche Transportrechnungen in diesem Abschnitt erübrigen.

#### 4.2.3 Nuklidtransport R16 durch die Oberkreide

Der Quellterm für den Transport durch die Oberkreide entspricht dem Nuklidfluss aus dem Kimmeridge in die Bohrung, wobei die Konzentration um den Faktor 1,3 verdünnt ist.

Die Ergebnisse für diesen letzten Abschnitt zeigen, dass die Oberkreide für Ni-59, Zr-93 und Np-237 eine wirksame Barriere darstellt (Tabelle 4-5). Für diese Nuklide ist die Transportzeit wesentlich länger als deren Halbwertszeit, so dass der radioaktive Zerfall einen Einfluss hat. Eine geringere Reduktion der Konzentration durch radioaktiven Zerfall erfolgt auch für die Nuklide Se-79, Sn-126 und Cs-135. Wie erwartet, ist die maximale Konzentration der übrigen Nuklide gegenüber dem Wert an der Basis Unterkreide nur um den Verdünnungsfaktor 1,3 reduziert.

Die Konzentrationen der Nuklide der Zerfallsketten werden im allgemeinen durch die langlebigen Uran-Isotope, deren Konzentration in der Oberkreide nicht abnimmt, und durch die Verhältnisse der  $K_d$ -Werte (säkulares

Gleichgewicht) bestimmt. Als Folge der kürzeren Fließzeit und Abwesenheit der Matrixdiffusion aus dem Bohrloch ergeben sich an der Obergrenze der Oberkreide gegenüber dem Referenzfall R34 veränderte Zeitverläufe der Nuklidkonzentrationen (Abbildung 4-5 und 4-6).

Aufgrund der relativ kurzen Halbwertszeit wird U-233 vorwiegend als Tochternuklid des langlebigeren Np-237 freigesetzt. Da aber Neptunium wesentlich stärker sorbiert und eine Transportzeit aufweist, welche länger ist als seine Halbwertszeit, weisen Np-237 und U-233 nicht das übliche Mutter- und Tochterverhältnis in der Freisetzung auf: das mobilere U-233 wird freigesetzt, lange bevor Np-237 erscheint.

Ein etwas ungewöhnliches Verhalten zeigt die langlebige Tochter Th-232, deren Konzentration mit jener des Mutternuklids U-236 ansteigt, aber anschliessend nicht gleichzeitig wieder abfällt. Da Thorium stark sorbiert, erscheint es im ersten Teil der dargestellten Zeitdauer nur als Tochternuklid, wobei die einzelnen Nuklide umso später beim Bohrloch eintreffen je entfernter vom Bohrloch sie durch Zerfall des Mutternuklids entstanden sind. Erst nach 30 Mio. Jahren steigt die Konzentration des Thoriums wieder an, wenn das aus dem Endlager freigesetzte Thorium das Ende des Migrationsweges erreicht.

#### 4.2.4 Konzentrationen im Quartär im Fall R16

Nach dem Transport durch die Oberkreide tritt das aus dem Bohrloch Bleckenstedt 1 abgeflossene potentiell kontaminierte Wasser an der Basis des Quartär aus. Das Freisetzungsbereich findet sich etwa 400 m ost-südöstlich des Bohrlochs. Seine Breite beträgt etwa 50 m in 360 m Abstand und 314 m in 430 m Abstand vom Bohrloch. Wie im Referenzfall beträgt die gesättigte Mächtigkeit des Quartär 8 m. Der Nuklidfluss wird dadurch mit einem Wasserfluss von  $2400 \text{ m}^3/\text{a}$ , d.h. um den Faktor 50 verdünnt.

Die ermittelten Konzentrationen liegen im allgemeinen um etwa 5 bis 6 Grössenordnungen über den für den Referenzfall berechneten Werten (Tabelle 4-5).

Die höchsten Aktivitätskonzentrationen weisen Cl-36, Ca-41 und I-129 nach etwa 50 000 Jahren, Tc-99 nach einer halben Million Jahre und die durch Uran gesteuerten Aktinidenketten nach 3 Millionen Jahren auf (Tabelle 4-6, Abbildungen 4-5 und 4-6). Unter den vier Zerfallsreihen dominiert die U-238-Kette.

#### 4.3 Ergebnisse im Referenzfall R35 "Schachtverschluss"

Die berechneten maximalen Aktivitätskonzentrationen und die dazugehörigen Zeitpunkte sind in den Tabellen 4-7 und 4-8 gegeben. Der zeitliche Verlauf der Konzentrationen im Quartär ist in den Abbildungen 4-7 und 4-8 dargestellt.

##### 4.3.1 Nuklidtransport R35 durch Oxford und Kimmeridge

Die Wasserflusszeit entlang dem Schacht durch das Oxford und das Kimmeridge ist relativ kurz und auch die Matrixdiffusion vermag die Transportzeit im Vergleich zur Freisetzungsdauer nur unwesentlich zu verzögern. Es wird angenommen, dass das kontaminierte Wasser aus dem Grubengebäude ohne Zeitverzug und unverdünnt entlang dem Schacht die Basis der Unterkreide erreicht.

##### 4.3.2 Nuklidtransport R35 durch Unterkreide und Alb

Die Matrixdiffusion radial aus dem Schacht verzögert die Freisetzung der Nuklide und reduziert deren maximale Konzentration.

Für die in der Unterkreide nichtsorbierenden Nuklide (z.B. I-129) ist die Konzentration im Schachtabfluss etwa um den Faktor  $3 \cdot 10^4$  geringer als im Grubenwasser und erreicht ein Maximum nach  $5 \cdot 10^4$  Jahren. Die maximale Konzentration von U-238 am Top des Alb liegt um den Faktor  $1,6 \cdot 10^5$  unter der Konzentration im Grubenwasser und wird erst nach 10 Mio. Jahren erreicht.

In diesen Konzentrationsverminderungen ist die Verdünnung um den Faktor 16 durch den Zustrom von nicht kontaminiertem Wasser in den Schacht bereits enthalten.

Der Vergleich der Konzentrationswerte an der Basis der Oberkreide mit den entsprechenden Resultaten des Referenzfalls R34 (Referenzfall "Tiefbohrungen") zeigt, dass die Reduktion der Aktivitätskonzentrationen im Fall R35 geringer ist, und dass das Auftreten der Konzentrationsmaxima zeitlich früher erfolgt. Die Verdünnung durch zufließendes Wasser aus der Unterkreide und dem Alb ist in beiden Fällen etwa gleich, jedoch ist im Fall R35 die Wirkung der Matrixdiffusion aus dem Schacht wegen dem ungünstigeren Oberflächen zu Volumen Verhältnis weniger ausgeprägt.

#### 4.3.3 Nuklidtransport R35 durch die Oberkreide

Die Freisetzung der Nuklide an der Basis der Oberkreide erfolgt über einen so langen Zeitraum, dass die Matrix der Oberkreide relativ rasch gesättigt wird. Der Transport durch die Oberkreide bewirkt wie im Fall R34 im allgemeinen keine wesentliche Reduktion der Konzentration zusätzliche zur allgemeinen Verdünnung durch transversale Dispersion (Faktor 1,8).

Die Abbildungen 4-7 und 4-8 zeigen den zeitlichen Verlauf der freigesetzten Aktivitätskonzentrationen im Quartär. Die Reihenfolge des Auftretens der Nuklide ist ähnlich wie im Referenzfall "Tiefbohrungen" (Abbildungen 4-3, 4-4).

Wie im Rechenfall R34 wird das sehr langlebige Th-232 zuerst als Zerfallsprodukt des weniger sorbierenden U-236 freigesetzt. Erst nach 20 Mio. Jahren steigt die Konzentration des Thoriums wieder an, wenn das aus dem Endlager freigesetzte Thorium das Ende des Migrationsweges erreicht.

#### 4.3.4 Konzentrationen im Quartär im Fall R35

Die hydrodynamische Modellierung der Verhältnisse innerhalb und in der Nähe des Schachtes an der Basis der Oberkreide zeigt, dass aufgrund des grossräumigen horizontalen Gradienten in der Oberkreide das gesamte aus dem Schacht nach oben strömende Wasser innerhalb der untersten 10 m in diese Schicht abfließt (Abschnitt 2.3.3.3). Die Austrittsfläche des kontaminierten Wassers ins Quartär befindet sich damit etwa 400 m östlich des Schachtes Konrad 1 und weist eine durch laterale Dispersion und Ausbreitung des abströmenden Wassers verursachte maximale Breite von 66 m auf. Im Austrittsgebiet beträgt die Mächtigkeit des Quartärs rund 8 m, wovon jedoch nur etwa 1 m gesättigt ist und in der Verdünnungsrechnung im Quartär berücksichtigt wird. Der Wasserfluss durch diesen Querschnitt beträgt  $1,98 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  und ergibt einen Verdünnungsfaktor von 10 gegenüber der kontaminierten Fahne in der Oberkreide.

Die Konzentrationen im Quartär liegen etwa 3 Grössenordnungen über den Werten des Referenzfalles "Tiefbohrungen" und die Zeiten bis zum Auftreten der Maximalwerte sind etwa zehnmal kürzer. Die höchste Konzentration erreicht Tc-99.

#### 4.4 Ergebnisse der Parametervariationen zum Referenzfall "Schachtverschluss"

In den beiden untersuchten Varianten zum "Schachtverschluss" R38 und R39 ergeben sich in allen Abschnitten des Fließweges erheblich schnellere Fließgeschwindigkeiten. Dadurch gewinnt der Schachtabschnitt im Bereich des Oxford und Kimmeridge im Vergleich zu den anderen Abschnitten an Bedeutung, so dass auch für diesen Teil des Migrationsweges die Transportrechnungen durchgeführt werden.

Die Ergebnisse der Transportrechnungen sind in den Tabellen 4-9 bis 4-12 zusammengefasst und die Abbildungen 4-9 bis 4-14 zeigen den zeitlichen Verlauf der Aktivitätskonzentrationen im Quartär.

##### 4.4.1 Nuklidtransport R38, R39 durch Oxford und Kimmeridge

In der Variante R38 verzögert die Matrixdiffusion aus dem Schacht in das Oxford und Kimmeridge die Zeit der maximalen Freisetzung um einen Faktor 2 für die nicht-sorbierenden Nuklide. Die Höhe der Maxima wird dadurch aber nur leicht reduziert.

Im Fall R39 beträgt der Verzögerungsfaktor noch 1,5 und die maximalen Konzentrationen sind gegenüber dem Abfluss vom Endlager mit Ausnahme der schnell zerfallenden Nuklide wie C-14, Nb-94 und den Pu-Isotopen kaum reduziert.

Im beiden Fällen sind die Nuklidfließzeiten kurz im Vergleich zur Freisetzungsdauer, so dass die Längsdispersion keine wesentliche Reduktion der maximalen Konzentrationen bewirken kann.

##### 4.4.2 Nuklidtransport R38, R39 durch Unterkreide und Alb

Im Fall R38 durchquert das Wasser im Schacht die Unterkreide und das Alb in 680 Jahren, d.h. rund 20mal schneller als im Referenzfall R35. Die maximale Konzentration des I-129 wird um den Faktor 5 reduziert und zeitlich mit einem effektiven Retentionsfaktor von 1,7 verzögert. Die Faktoren für U-238 sind 13 bzw. 290.

Der Vergleich zum Referenzfall zeigt, dass aufgrund der hohen Fließgeschwindigkeit die Verdünnung durch longitudinale Dispersion und die Retention durch Matrixdiffusion viel geringer ausfällt.

Im Fall R39 strömt das Wasser noch schneller durch den Schacht und es gibt fast keine Verdünnung durch Infiltration (Tabelle 2-8). Die maximalen Konzentrationen sind um einen Faktor 1,4 für I-129 und 1,6 für U-238 reduziert und die effektiven Retentionsfaktoren sind ähnlich wie im Fall R38.

#### 4.4.3 Nuklidtransport R38, R39 durch die Oberkreide

Die Wasserfliessgeschwindigkeit in der Oberkreide ist gegenüber dem Referenzfall unverändert. Weil die Freisetzungsdauer an der Basis der Oberkreide relativ kurz ist, hat hier die Längsdispersion einen bedeutenden Effekt auf die Nuklidkonzentrationen.

Im Fall R38 bringt die Querdispersion der kontaminierten Fahne eine zusätzliche geringe Verdünnung.

Die Ergebnisse des lokalen Modells (Abschnitt 2.3.3.5) zeigen, dass im Fall R39 ein Teil des kontaminierten Wassers aus dem Alb innerhalb des Schachtes bis an die Grenze des Quartärs fließen könnte (Variante R39/2). Da die Wassergeschwindigkeit im Schacht hoch ist, bewirkt der Transport durch die Oberkreide keine wesentliche weitere Verzögerung und wird deshalb nicht modelliert. In der Variante 39/2 sind die Nuklidkonzentrationen an der Obergrenze der Oberkreide gleich wie an deren Basis. Die Abbildungen 4-11 und 4-12 zeigen den zeitlichen Konzentrationsverlauf im Quartär für die Variante 39/1 (Transport durch die Oberkreide wie in den vorhergehenden Fällen) und die Abbildungen 4-13 und 4-14 jenen für die Variante 39/2.

Ein Vergleich der Abbildungen 4-13 und 4-14 mit den Abbildungen 4-11 und 4-12 zeigt den Effekt des Transports durch das Kluftsystem der Oberkreide. Insbesondere der Zerfall des C-14 und Cs-135 sind klar zu bemerken. Auch die Nuklide Mo-93 und Zr-93 zerfallen während des Transports durch die Oberkreide und erscheinen nicht in Abbildung 4-11.

Auffällig in Abbildung 4-14 ist, dass Ra-226 zwei Konzentrationsmaxima aufweist. Das erste Maximum ist das Abbild der aus dem ursprünglichen Inventar im Endlager freigesetzten Nuklide, während das zweite Maximum aus dem Zerfallsprodukt der stärker sorbierenden Zerfallskette U-238/U-234/Th-230 gebildet wird.

#### 4.4.4 Konzentrationen im Quartär in den Fällen R38 und R39

Im Fall R38 weist die Austrittsfläche an der Basis Quartär eine maximale Breite von 66 m auf. Für eine Mächtigkeit der gesättigten Zone von 1 m ergibt dieser Querschnitt eine Verdünnung von 1,4 (Tabelle 2-7).

Da im Fall R39 der Fliessweg in der Oberkreide entweder im Kluftsystem der Oberkreide oder entlang dem Schacht verläuft, ist der Wasserfluss durch den massgebenden Querschnitt im Quartär vergleichbar oder geringer als in der kontaminierten Fahne bzw. im Schacht. Eine Verdünnung im Quartär findet deshalb in diesen Fällen nicht statt.

#### 4.5 Zusammenstellung der Konzentrationen im Quartär

In den Tabellen 4-13 und 4-14 sind die Aktivitätskonzentrationen der Nuklide im Quartär für die untersuchten Modellfälle zusammengestellt.

Hierbei wurden die Konzentrationen von kurzlebigen Tochternukliden unter Verwendung von Gleichung (3.10) und den  $K_d$ -Werten in der Oberkreide berechnet. Dies entspricht der Annahme, dass im Quartär ein Gleichgewichtszustand dieser Nuklide mit ihren Mutternukliden nicht erreicht wird.

## 5 SCHLUSSFOLGERUNGEN

### 5.1 Entwicklung der Nuklidkonzentrationen

Die räumliche und zeitliche Entwicklung der Nuklidkonzentrationen vom Endlager bis ins Quartär wird wie folgt charakterisiert:

- Reduktion der maximalen Aktivitätskonzentrationen durch Matrixdiffusion (mit oder ohne Sorption), Längsdispersion, Querdispersion, radioaktiven Zerfall (für einige Nuklide) und Verdünnung mit unkontaminiertem Wasser
- Zeitliche Verzögerung des Transportes gegenüber dem Grundwasserfluss durch Sorption und Matrixdiffusion

Diese Effekte werden für die beiden wichtigsten langlebigen Nuklide, I-129 und U-238, im folgenden zusammenfassend diskutiert.

#### 5.1.1 Reduktion der Nuklidkonzentrationen

Die räumliche Entwicklung der maximalen Konzentrationen der langlebigen Nuklide I-129 und U-238 an Hauptpunkten der Fliesswege in den behandelten Rechenfällen "Tiefbohrungen" und "Schachtverschluss" ist in den Abbildungen 5-1 und 5-2 zusammengestellt.

Im Referenzfall "Tiefbohrungen" R34 findet eine gleichmässige Reduktion der Konzentrationen beider Nuklide I-129 und U-238 entlang des gesamten Migrationsweges statt. Wie Abbildung 5-1 zeigt, beträgt diese Verminderung der maximalen Aktivitätskonzentrationen zwischen dem Grubenwasser und dem Grundwasser des Quartärs mehr als 8 Grössenordnungen.

Die Reduktionen sind geringer im Rechenfall R16, in welchem im unversetzten Abschnitt der Bohrung eine 100fach erhöhte Durchlässigkeit angenommen wird. Der Konzentrationsabbau entlang der Bohrung erfolgt wegen der erhöhten Fliessgeschwindigkeit im betroffenen Bereich der Unterkreide und des Alb nur durch Verdünnung und ist sehr gering.

In den Rechenfällen zum "Schachtverschluss" illustriert Abbildung 5-2 den dominierenden Einfluss des  $k_f$ -Wertes in der Unterkreide und im Alb. Im Referenzfall R35 finden 4 - 5 Grössenordnungen des Konzentrationsabbaus in

dieser Zone und eine weitere Grössenordnung in der Oberkreide und im Quartär statt.

In den zunehmend pessimistischen Parametervariationen R38, R39/1 und R39/2 wird die Schachttransmissivität und damit der Wasserfluss entlang dem Schacht erhöht. In den Fällen R38 und R39/1 gewinnt die Oberkreide an Bedeutung, da hier wegen der im Vergleich zur Transportzeit kurzen Freisetzungsdauer aus dem Alb die Längsdispersion wirksam wird.

Wegen der höheren Flussrate des potentiell kontaminierten Wassers aus der Oberkreide erfolgt in den Fällen R38 und R39/1 (fast) keine Verdünnung im Quartär. In der Variante R39/2 ist die Fliesszeit in den Plänerkalken entlang der Auflockerungszone des Schachtes extrem kurz, so dass eine Konzentrationsverminderung in der Oberkreide nicht möglich ist.

In den Rechenfällen "Tiefbohrungen" liegen die Konzentrationen von I-129 und U-238 im Grundwasser des Quartär bei  $4 \cdot 10^{-3} \text{ Bq/m}^3$  bzw.  $2 \cdot 10^{-4} \text{ Bq/m}^3$  im Referenzfall R34 und bei  $440 \text{ Bq/m}^3$  bzw.  $18 \text{ Bq/m}^3$  im Fall R16 (Tabelle 4-13). In den Rechenfällen "Schachtverschluss" sind diese Konzentrationen ebenfalls gering im Referenzfall R35 ( $< 2 \text{ Bq/m}^3$ ), aber viel höher in den Rechenfällen R38 und R39/1 (I-129:  $2 \cdot 10^4 \text{ Bq/m}^3$  -  $10^5 \text{ Bq/m}^3$ , U-238:  $880 \text{ Bq/m}^3$  -  $6000 \text{ Bq/m}^3$ ). Im Fall R39/2 sind die Konzentrationen im Quartär kaum niedriger als am Austritt aus dem Endlager.

#### 5.1.2 Zeitliche Verzögerung der Migration

Die Tabelle 5-1 fasst die Fliesszeiten entlang der berücksichtigten Fliesspfade zusammen. Die Tabellen 5-2 und 5-3 zeigen für I-129 und U-238 die Zeiten der maximalen Aktivitätskonzentrationen an Hauptpunkten der Fliesswege in allen Rechenfällen.

Der Inhalt der Tabellen 5-1 bis 5-3 ist in den Abbildungen 5-3 (Fälle "Tiefbohrungen") und 5-4 (Fälle "Schachtverschluss") graphisch wiedergegeben. Hieraus ist ersichtlich, entlang welchen Wegabschnitten die Verzögerung durch Sorption und/oder Matrixdiffusion vorherrscht: in den Fällen "Tiefbohrungen" sind es die im Oxford und Kimmeridge gelegenen Abschnitte. In den Fällen "Schachtverschluss" (Abbildung 5-4) ist der dominante Einfluss des Wegabschnittes Unterkreide - Alb zu erkennen.

## 5.2 Relevante hydraulische Parameter für die Langzeitsicherheit

Die Ergebnisse der Modellierung der Nuklidausbreitung zeigen, dass die höchsten freigesetzten Aktivitätskonzentrationen mit den kleinen Transportzeiten in den Varianten des Referenzfalls "Schachtverschluss" in Verbindung stehen. Aus dieser Sicht bildet also die Schachtverfüllung einen kritischen Punkt für die Langzeitsicherheit des Endlagers.

Die undurchlässigen Formationen der Unterkreide und des Alb ( $k_f = 10^{-10}$  m/s -  $10^{-12}$  m/s) wirken als regionale Wasserstauer. Mit dem Schacht Konrad 1, der stromabwärts von der Grube liegt und diese Formationen durchquert, wird eine Entwässerung aus der Grube durch den Schacht ermöglicht. Wie die hydrogeologischen Modellrechnungen zum Schachtverschluss zeigen [3], ist der Abfluss durch den Schacht in etwa proportional zum  $k_f$ -Wert der Tonverfüllung und der Auflockerungszone im Bereich der Unterkreide und des Alb. Die Ausbreitungsrechnungen zeigen, dass diese Abhängigkeit für die Konzentration der in das Quartär freigesetzten Nuklide noch viel ausgeprägter ist.

Die Barrierenwirkung des Schachtverschlusses ist extrem gering, wenn ein  $k_f$ -Wert von  $10^{-6}$  m/s im Schacht durch die Unterkreide und das Alb angesetzt wird. In diesem Fall ist die Qualität der Verfüllung in der Oberkreide massgebend. Verglichen mit den Auswirkungen eines "schlechten" Schachtverschlusses in diesem Abschnitt ist die I-129-Nuklidkonzentration allerdings höchstens eine Grössenordnung geringer, falls die Schachtdurchlässigkeit und die Durchlässigkeit der Oberkreide gleich sind.

Bei einem ungünstigen Schachtverschluss in Unterkreide, Alb und Oberkreide (Variante 39/2) fliesst das potentiell kontaminierte Wasser direkt durch den Schacht bis zum Quartär, wobei die Reduktion der Konzentration vom Endlager bis zum Quartär geringer ist als eine Grössenordnung. Mit einem günstigeren Schachtverschluss in der Oberkreide (R39/1) beträgt die Konzentrationsabnahme des I-129 vom Grubengebäude bis zum Quartär ebenfalls kaum mehr als eine Grössenordnung.

In den Rechenfällen "Schachtverschluss", für welche durchwegs eine hydraulische Durchlässigkeit der unveretzten Bohrlochabschnitte in den Deckschichten von  $10^{-5}$  m/s angenommen wird, führen keine Trajektorien von der Grube zur Bohrung Bleckenstedt 1. Wenn kein Fluss durch den Schacht Konrad 1 angenommen wird, stellt diese Bohrung den kürzesten potentiellen Pfad zu den ober-

flächennahen Formationen dar. Damit können die Rechenfälle "Tiefbohrungen" R34, R16 und R29 als zusätzliche Varianten zu den Fällen "Schachtverschluss" betrachtet werden.

In den Rechenfällen "Tiefbohrungen" fließt das potentiell kontaminierte Wasser aus der Grube durch das Oxford und den Kimmeridge bis zum unversetzten Abschnitt der Bohrung Bleckenstedt 1. Der aufwärts gerichtete Fluss im Bohrloch ist abhängig von der im Bohrloch angesetzten Durchlässigkeit. Im Referenzfall R34, wo ein  $k_f$ -Wert von  $10^{-5}$  m/s angenommen wird, ergibt die hydraulische Modellierung keinen Fließweg vom Endlager zum Bohrloch, so dass die Nuklidausbreitung für einen hypothetischen Freisetzungspfad modelliert wurde. Die für I-129 und U-238 berechneten Aktivitätskonzentrationen im Quartär liegen unterhalb von  $5 \cdot 10^{-3}$  Bq/m<sup>3</sup>. Für eine angenommene Durchlässigkeit von  $10^{-3}$  m/s im unversetzten Abschnitt des Bohrlochs (Rechenfall R16) erhöhen sich die Aktivitätskonzentrationen dieser beiden Nuklide auf 440 Bq/m<sup>3</sup> (I-129) und 18 Bq/m<sup>3</sup> (U-238).

Im Fall R29, in welchem das Bohrloch dieselbe Durchlässigkeit aufweist wie im Fall R16 und wo zusätzlich eine ausgedehnte, durchlässige Kluftzone im Hangenden des Grubengebäudes angenommen wird, ergeben sich ähnliche Ausbreitungsbedingungen wie im Fall R16. Die Ergebnisse der Nuklidausbreitungsrechnungen für R16 gelten damit näherungsweise auch für R29.

LITERATURVERZEICHNIS

- 1 PTB  
Plan, Endlager für radioaktive Abfälle, Schachtanlage Konrad, Salzgitter.  
Stand September 1986
- 2 COLENCO  
Schachtanlage Konrad, Salzgitter  
Modellrechnungen mit dem Programm FEM301 für ein alternatives geologisches/hydrogeologisches Modell.  
Auswirkungen der bestehenden Tiefbohrungen  
17. August 1989
- 3 COLENCO  
Schachtanlage Konrad, Salzgitter  
Modellrechnungen mit dem Programm FEM301 für ein alternatives geologisches/hydrogeologisches Modell.  
Rechnungen zum Schachtverschluss  
17. August 1989
- 4 Haderman J., Rösel F.  
Radionuclide Chain Transport in Inhomogeneous Crystalline Rocks:  
Limited Matrix Diffusion and Effective Surface Sorption  
NAGRA NTB 85-40 February 1985
- 5 BGR  
Hydrogeologie im Gebiet der Grube Konrad;  
Grundlagen der Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit.  
Archiv-Nr. 99 131,  
Tagebuch-Nr. 10 718/86, 32 S., 27 Anlagen,  
April 1986
- 6 BGR  
Hydraulische Kennwerte im Gebiet der Grube Konrad.  
Archiv-Nr. 103 690,  
Tagebuch-Nr. 11 722/88, 20 S., 7 Tabellen,  
August 1988.
- 7 BGR  
Modellbetrachtungen zur Gültigkeit des Darcy-Gesetzes in den Kluftwasserleitern der Grube Konrad.  
Archiv-Nr. 103 967,  
Tagebuch-Nr. 12 387/88, 9 S.,  
Oktober 1988.

- 8 BGR  
Abschätzung der mittleren Abstände von Trennflächen für Kluftwasserleiter im Gebiet der Schachtanlage Konrad.  
Archiv-Nr. 103 968,  
Tagebuch-Nr. 12549/88,  
Oktober 1988.
- 9 Carslaw, H.S., Jaeger, J.C.  
Conduction of Heat in Solids, second edition,  
Oxford University Press, 1959
- 10 Ven Te Chow (Ed.)  
Handbook of Applied Hydrology  
McGraw-Hill. 1964
- 11 Swedish Nuclear Power Inspectorate  
INTRACOIN - International Nuclide Transport Code  
Intercomparison Study.  
Final Report Levels 2 and 3  
SKI Stockholm 1987
- 12 Lever, D.A., Novakowski, K.S., Evans, G.V.,  
Raven, K.G.  
Hydrodynamic Dispersion in a single Fracture:  
Final Report on CRNL Experiment,  
Commission of the European Communities,  
1988, EUR 11454 EN
- 13 Gelhar, L.W., Mantoglou, A., Welty, C.,  
Rehfeldt, K.R.  
A Review of Field Scale Physical Solute Transport  
Processes in Saturated and Unsaturated Porous  
Media  
Research Project 2485-5, EPRI EA-4190, EPRI,  
Palo Alto, California, 1985
- 14 SKBF/KBS  
Final Storage of Spent Nuclear Fuel  
KBS-3 Vol III Barriers  
SKBF Stockholm 1983
- 15 BfS  
Radionuklidfreisetzung aus dem Grubengebäude für  
eine Durchströmungsrate von 735 m<sup>3</sup>/a.  
Bericht in Vorbereitung
- 16 PTB  
Ableitung von Sorptionsdaten aus experimentellen  
Untersuchungen  
PTB-SE-IB-7, November 1986

- 17 PTB  
Ableitung von Sorptionsdaten für Modellrechnungen  
der COLENCO AG  
Schreiben der PTB vom 4.10.1989
  
- 18 GSF  
Langzeitsicherheitsanalyse des Endlagers KONRAD:  
Radionuklidausbreitung in der Nachbetriebsphase.  
TA Nr 2242.03 November 1986

VERZEICHNIS DER TABELLEN

- 2-1:       Hydraulische Kennwerte der in den berücksichtigten Rechenfällen angenommenen Fließwege, Parameter und Ergebnisse der regionalen Modellierung
- 2-2:       Parameter des kleinräumigen generischen Modells
- 2-3:       Lokale Modellierung Rechenfall R16: Flussrate aus der Bohrung Bleckenstedt 1 in die Oberkreide, Breite der Austrittsfläche an der Basis Quartär
- 2-4:       Lokale Modellierung Rechenfall R34: Flussrate aus der Bohrung Bleckenstedt 1 in die Oberkreide, Breite der Austrittsfläche mit horizontaler Querdispersion an der Basis Quartär
- 2-5:       Lokale Modellierung Rechenfall R35: Flussrate aus dem Schacht Konrad 1 in die Oberkreide, Breite der Austrittsfläche mit horizontaler Querdispersion an der Basis Quartär
- 2-6:       Lokale Modellierung Rechenfall R38: Flussrate aus dem Schacht Konrad 1 in die Oberkreide, Breite der Austrittsfläche mit horizontaler Querdispersion an der Basis Quartär
- 2-7:       Wasserflüsse und Verdünnungsfaktoren in der Oberkreide und im Quartär
- 2-8:       Verdünnungsfaktoren entlang den Fließpfaden und gesamter Verdünnungsfaktor in jedem Rechenfall
- 3-1:       An der Nuklidmigration beteiligte Prozesse vom Grubengebäude bis zum Quartär
- 3-2:       Angewandte Modellierungsmethoden (Modellierung der Nuklidmigration mit dem Programm RANCHMD, Reduktion der Aktivitätskonzentrationen durch Querdispersion oder Verdünnung)
- 3-3:       Hydraulische Kennwerte der angenommenen Fließwege für die berücksichtigten Rechenfälle
- 3-4:       Parameter der Transportrechnungen für die angenommenen Fließwege

VERZEICHNIS DER TABELLEN (Fortsetzung)

- 3-5: Berücksichtigte Radionuklide,  
Halbwertszeiten und Anfangsinventar
- 3-6: Maximale Konzentration der berücksichtigten  
Radionuklide im Grubendurchfluss von  $735 \text{ m}^3/\text{a}$
- 3-7: Maximale EDTA-Konzentration [mol/l] an den  
Schichtgrenzen
- 3-8: Rechenfall R34  
Verteilungskoeffizienten der berücksichtigten Nuklide
- 3-9: Rechenfall R16  
Verteilungskoeffizienten der berücksichtigten Nuklide
- 3-10: Rechenfall R35  
Verteilungskoeffizienten der berücksichtigten Nuklide
- 3-11: Rechenfall R38  
Verteilungskoeffizienten der berücksichtigten Nuklide
- 3-12: Rechenfall R39  
Verteilungskoeffizienten der berücksichtigten Nuklide
- 4-1: Maximale Aktivitätskonzentrationen [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ] an aus-  
gewählten Punkten im Rechenfall R34 (Referenzfall  
Tiefbohrungen) mit unlimitierter Matrixdiffusion  
um die Bohrung Bleckenstedt 1
- 4-2: Zeitpunkte [a] der maximalen Aktivitätskonzentra-  
tionen an ausgewählten Punkten im Rechenfall R34  
(Referenzfall Tiefbohrungen) mit unlimitierter  
Matrixdiffusion um die Bohrung Bleckenstedt 1
- 4-3: Maximale Aktivitätskonzentrationen [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ] an  
ausgewählten Punkten im Rechenfall R34 (Referenz-  
fall Tiefbohrungen) mit limitierter Matrix-  
diffusion um die Bohrung Bleckenstedt 1
- 4-4: Zeitpunkte [a] der maximalen Aktivitätskonzentra-  
tionen an ausgewählten Punkten im Rechenfall R34  
(Referenzfall Tiefbohrungen) mit limitierter  
Matrixdiffusion um die Bohrung Bleckenstedt 1
- 4-5: Maximale Aktivitätskonzentrationen [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ] an aus-  
gewählten Punkten im Rechenfall R16

VERZEICHNIS DER TABELLEN (Fortsetzung)

- 4-6: Zeitpunkte [a] der maximalen Aktivitätskonzentrationen an ausgewählten Punkten im Rechenfall R16
- 4-7: Maximale Aktivitätskonzentrationen [Bq/m<sup>3</sup>] an ausgewählten Punkten im Rechenfall R35 (Referenzfall Schachtverschluss)
- 4-8: Zeitpunkte [a] der maximalen Aktivitätskonzentrationen an ausgewählten Punkten im Rechenfall R35 (Referenzfall Schachtverschluss)
- 4-9: Maximale Aktivitätskonzentrationen [Bq/m<sup>3</sup>] an ausgewählten Punkten im Rechenfall R38
- 4-10: Zeitpunkte [a] der maximalen Aktivitätskonzentrationen an ausgewählten Punkten im Rechenfall R38
- 4-11: Maximale Aktivitätskonzentrationen [Bq/m<sup>3</sup>] an ausgewählten Punkten im Rechenfall R39/1
- 4-12: Zeitpunkte [a] der maximalen Aktivitätskonzentrationen an ausgewählten Punkten im Rechenfall R39/1
- 4-13: Maximale Aktivitätskonzentrationen [Bq/m<sup>3</sup>] im Quartär in den Rechenfällen "Tiefbohrungen"
- 4-14: Maximale Aktivitätskonzentrationen [Bq/m<sup>3</sup>] im Quartär in den Rechenfällen "Schachtverschluss"
- 5-1: Fließzeiten [a] entlang Abschnitten der Fließwege
- 5-2: Kumulierte Transportzeiten [a] bis zu den Hauptpunkten der berücksichtigten Fließwege für das Radionuklid I-129
- 5-3: Kumulierte Transportzeiten [a] bis zu den Hauptpunkten der berücksichtigten Fließwege für das Radionuklid U-238

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

- 2-1: Rechenfall R34 (Referenzfall "Tiefbohrungen")  
Startpunkt und Verlauf des hypothetischen Fliessweges  
zum Bohrloch Bleckenstedt 1
- 2-2: Verlauf der Fliesswege vom Grubengebäude zum  
unversetzten Abschnitt der Bohrung Bleckenstedt 1  
(R16) und im Schacht Konrad 1 durch Oxford,  
Kimmeridge und Unterkreide (R35, R38 und R39)
- 2-3: Lokales Modell Oberkreide am Beispiel des Rechen-  
falls R16
- 2-4: Ausbreitung des potentiell kontaminierten Wassers  
in der Oberkreide (schematisch)
- 2-5: Einflussbereich eines Brunnens in einem Grund-  
wasserleiter mit geneigtem Grundwasserspiegel
- 2-6: Rechenfall R16  
Austrittsfläche der kontaminierten Fahne an der Basis  
Quartär (halbe Fläche)
- 4-1: Rechenfall R34  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration von I-129 an  
den Hauptpunkten des Fliessweges
- 4-2: Rechenfall R34  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration von U-238 an  
den Hauptpunkten des Fliessweges
- 4-3: Rechenfall R34  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Spalt- und  
Aktivierungsprodukte im Quartär
- 4-4: Rechenfall R34  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Aktiniden  
im Quartär
- 4-5: Rechenfall R16  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Spalt- und  
Aktivierungsprodukte im Quartär
- 4-6: Rechenfall R16  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Aktiniden  
im Quartär

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN (Fortsetzung)

- 4-7: Rechenfall R35  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Spalt- und Aktivierungsprodukte im Quartär
- 4-8: Rechenfall R35  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Aktiniden im Quartär
- 4-9: Rechenfall R38  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Spalt- und Aktivierungsprodukte im Quartär
- 4-10: Rechenfall R38  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Aktiniden im Quartär
- 4-11: Rechenfall R39/1  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Spalt- und Aktivierungsprodukte im Quartär
- 4-12: Rechenfall R39/1  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Aktiniden im Quartär
- 4-13: Rechenfall R39/2  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Spalt- und Aktivierungsprodukte im Quartär
- 4-14: Rechenfall R39/2  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Aktiniden im Quartär
- 5-1: Rechenfälle "Tiefbohrungen"  
Entwicklung der I-129 und U-238 Nuklidkonzentrationen an den Hauptpunkten der Fliesswege
- 5-2: Rechenfälle "Schachtverschluss"  
Entwicklung der I-129 und U-238 Nuklidkonzentrationen an den Hauptpunkten der Fliesswege
- 5-3: Rechenfälle "Tiefbohrungen"  
Kumulierte Transportzeiten von I-129 und U-238 entlang den Fliesswegen
- 5-4: Rechenfälle "Schachtverschluss"  
Kumulierte Transportzeiten von I-129 und U-238 entlang den Fliesswegen

## VERZEICHNIS DER TABELLEN

- 2-1:       Hydraulische Kennwerte der in den berücksichtigten Rechenfällen angenommenen Fliesswege, Parameter und Ergebnisse der regionalen Modellierung
- 2-2:       Parameter des kleinräumigen generischen Modells
- 2-3:       Lokale Modellierung Rechenfall R16: Flussrate aus der Bohrung Bleckenstedt 1 in die Oberkreide, Breite der Austrittsfläche an der Basis Quartär
- 2-4:       Lokale Modellierung Rechenfall R34: Flussrate aus der Bohrung Bleckenstedt 1 in die Oberkreide, Breite der Austrittsfläche mit horizontaler Querdispersion an der Basis Quartär
- 2-5:       Lokale Modellierung Rechenfall R35: Flussrate aus dem Schacht Konrad 1 in die Oberkreide, Breite der Austrittsfläche mit horizontaler Querdispersion an der Basis Quartär
- 2-6:       Lokale Modellierung Rechenfall R38: Flussrate aus dem Schacht Konrad 1 in die Oberkreide, Breite der Austrittsfläche mit horizontaler Querdispersion an der Basis Quartär
- 2-7:       Wasserflüsse und Verdünnungsfaktoren in der Oberkreide und im Quartär
- 2-8:       Verdünnungsfaktoren entlang den Fliesspfaden und gesamter Verdünnungsfaktor in jedem Rechenfall
- 3-1:       An der Nuklidmigration beteiligte Prozesse vom Grubengebäude bis zum Quartär
- 3-2:       Angewandte Modellierungsmethoden (Modellierung der Nuklidmigration mit dem Programm RANCHMD, Reduktion der Aktivitätskonzentrationen durch Querdispersion oder Verdünnung)
- 3-3:       Hydraulische Kennwerte der angenommenen Fliesswege für die berücksichtigten Rechenfälle
- 3-4:       Parameter der Transportrechnungen für die angenommenen Fliesswege

VERZEICHNIS DER TABELLEN (Fortsetzung)

- 3-5: Berücksichtigte Radionuklide,  
Halbwertszeiten und Anfangsinventar
- 3-6: Maximale Konzentration der berücksichtigten  
Radionuklide im Grubendurchfluss von  $735 \text{ m}^3/\text{a}$
- 3-7: Maximale EDTA-Konzentration [mol/l] an den  
Schichtgrenzen
- 3-8: Rechenfall R34  
Verteilungskoeffizienten der berücksichtigten Nuklide
- 3-9: Rechenfall R16  
Verteilungskoeffizienten der berücksichtigten Nuklide
- 3-10: Rechenfall R35  
Verteilungskoeffizienten der berücksichtigten Nuklide
- 3-11: Rechenfall R38  
Verteilungskoeffizienten der berücksichtigten Nuklide
- 3-12: Rechenfall R39  
Verteilungskoeffizienten der berücksichtigten Nuklide
- 4-1: Maximale Aktivitätskonzentrationen [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ] an aus-  
gewählten Punkten im Rechenfall R34 (Referenzfall  
Tiefbohrungen) mit unlimitierter Matrixdiffusion  
um die Bohrung Bleckenstedt 1
- 4-2: Zeitpunkte [a] der maximalen Aktivitätskonzentra-  
tionen an ausgewählten Punkten im Rechenfall R34  
(Referenzfall Tiefbohrungen) mit unlimitierter  
Matrixdiffusion um die Bohrung Bleckenstedt 1
- 4-3: Maximale Aktivitätskonzentrationen [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ] an  
ausgewählten Punkten im Rechenfall R34 (Referenz-  
fall Tiefbohrungen) mit limitierter Matrix-  
diffusion um die Bohrung Bleckenstedt 1
- 4-4: Zeitpunkte [a] der maximalen Aktivitätskonzentra-  
tionen an ausgewählten Punkten im Rechenfall R34  
(Referenzfall Tiefbohrungen) mit limitierter  
Matrixdiffusion um die Bohrung Bleckenstedt 1
- 4-5: Maximale Aktivitätskonzentrationen [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ] an aus-  
gewählten Punkten im Rechenfall R16

VERZEICHNIS DER TABELLEN (Fortsetzung)

- 4-6: Zeitpunkte [a] der maximalen Aktivitätskonzentrationen an ausgewählten Punkten im Rechenfall R16
- 4-7: Maximale Aktivitätskonzentrationen [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ] an ausgewählten Punkten im Rechenfall R35 (Referenzfall Schachtverschluss)
- 4-8: Zeitpunkte [a] der maximalen Aktivitätskonzentrationen an ausgewählten Punkten im Rechenfall R35 (Referenzfall Schachtverschluss)
- 4-9: Maximale Aktivitätskonzentrationen [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ] an ausgewählten Punkten im Rechenfall R38
- 4-10: Zeitpunkte [a] der maximalen Aktivitätskonzentrationen an ausgewählten Punkten im Rechenfall R38
- 4-11: Maximale Aktivitätskonzentrationen [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ] an ausgewählten Punkten im Rechenfall R39/1
- 4-12: Zeitpunkte [a] der maximalen Aktivitätskonzentrationen an ausgewählten Punkten im Rechenfall R39/1
- 4-13: Maximale Aktivitätskonzentrationen [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ] im Quartär in den Rechenfällen "Tiefbohrungen"
- 4-14: Maximale Aktivitätskonzentrationen [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ] im Quartär in den Rechenfällen "Schachtverschluss"
- 5-1: Fliesszeiten [a] entlang Abschnitten der Fliesswege
- 5-2: Kumulierte Transportzeiten [a] bis zu den Hauptpunkten der berücksichtigten Fliesswege für das Radionuklid I-129
- 5-3: Kumulierte Transportzeiten [a] bis zu den Hauptpunkten der berücksichtigten Fliesswege für das Radionuklid U-238

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

- 2-1: Rechenfall R34 (Referenzfall "Tiefbohrungen")  
Startpunkt und Verlauf des hypothetischen Fließweges  
zum Bohrloch Bleckenstedt 1
- 2-2: Verlauf der Fließwege vom Grubengebäude zum  
unversetzten Abschnitt der Bohrung Bleckenstedt 1  
(R16) und im Schacht Konrad 1 durch Oxford,  
Kimmeridge und Unterkreide (R35, R38 und R39)
- 2-3: Lokales Modell Oberkreide am Beispiel des Rechen-  
falls R16
- 2-4: Ausbreitung des potentiell kontaminierten Wassers  
in der Oberkreide (schematisch)
- 2-5: Einflussbereich eines Brunnens in einem Grund-  
wasserleiter mit geneigtem Grundwasserspiegel
- 2-6: Rechenfall R16  
Austrittsfläche der kontaminierten Fahne an der Basis  
Quartär (halbe Fläche)
- 4-1: Rechenfall R34  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration von I-129 an  
den Hauptpunkten des Fließweges
- 4-2: Rechenfall R34  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration von U-238 an  
den Hauptpunkten des Fließweges
- 4-3: Rechenfall R34  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Spalt- und  
Aktivierungsprodukte im Quartär
- 4-4: Rechenfall R34  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Aktiniden  
im Quartär
- 4-5: Rechenfall R16  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Spalt- und  
Aktivierungsprodukte im Quartär
- 4-6: Rechenfall R16  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Aktiniden  
im Quartär

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN (Fortsetzung)

- 4-7: Rechenfall R35  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Spalt- und Aktivierungsprodukte im Quartär
- 4-8: Rechenfall R35  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Aktiniden im Quartär
- 4-9: Rechenfall R38  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Spalt- und Aktivierungsprodukte im Quartär
- 4-10: Rechenfall R38  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Aktiniden im Quartär
- 4-11: Rechenfall R39/1  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Spalt- und Aktivierungsprodukte im Quartär
- 4-12: Rechenfall R39/1  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Aktiniden im Quartär
- 4-13: Rechenfall R39/2  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Spalt- und Aktivierungsprodukte im Quartär
- 4-14: Rechenfall R39/2  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Aktiniden im Quartär
- 5-1: Rechenfälle "Tiefbohrungen"  
Entwicklung der I-129 und U-238 Nuklidkonzentrationen an den Hauptpunkten der Fließwege
- 5-2: Rechenfälle "Schachtverschluss"  
Entwicklung der I-129 und U-238 Nuklidkonzentrationen an den Hauptpunkten der Fließwege
- 5-3: Rechenfälle "Tiefbohrungen"  
Kumulierte Transportzeiten von I-129 und U-238 entlang den Fließwegen
- 5-4: Rechenfälle "Schachtverschluss"  
Kumulierte Transportzeiten von I-129 und U-238 entlang den Fließwegen

	R34	R16	R29	R35	R38	R39
Wasserfluss durch das Grubengebäude [m <sup>3</sup> /a]	625	735	470	640	660	850
Wasserfluss im Bohrloch Bleckenstedt 1 bzw. im Schacht Konrad 1 [l/min]						
Fluss Basis Unterkreide	7,0E-5	7,0E-2	7,0E-2	5,3E-4	3,0E-2	4,0E-1
Abfluss Basis Oberkreide	1,4E-3	9,0E-2	9,0E-2	6,5E-3	4,8E-2	4,2E-1
Minimaler Fluss im Schacht				4,0E-4	2,9E-2	3,7E-1
Länge des Fließweges [m]						
Oxford	(120)	44	(120)			
Kimmeridge	(780)	200	(780)			
ox und jo Klufftzone	900		900			
Schacht durch ox und jo				350	350	350
Bohrung od. Schacht durch kru und Alb	400	400	400	610	610	610
Durchlässigkeit entlang dem Fließweg [m/s]						
Oxford	(1,0E-7)	1,0E-7	(1,0E-7)			
Kimmeridge	(5,0E-8)	5,0E-8	(5,0E-8)			
ox und jo Klufftzone	1,0E-4					
Schacht durch ox und jo				1,0E-4	1,0E-4	1,0E-4
Bohrung od. Schacht durch kru und Alb	1,0E-5	1,0E-3	1,0E-3	1,0E-8	1,0E-7	1,0E-6
Mittlere Abstandsgeschwindigkeit [m/a]						
Oxford *		0,2				
Kimmeridge *		0,8				
ox und jo Klufftzone *	0,2		2,8			
Schacht durch ox und jo **				1,1	1,9	8,7
Bohrung od. Schacht durch kru und Alb **	40	1,4E+4	1,4E+4	0,04	0,9	9,4
Fließzeit durch ox und jo [a]	4500	470	320	320	190	40

\* mit einer Porosität von 0,001 berechnet

\*\* mit einer Porosität von 0,1 berechnet

Tabelle 2-1: Hydraulische Kennwerte der in den berücksichtigten Rechenfällen angenommenen Fließwege, Parameter und Ergebnisse der regionalen Modellierung

	Durchlässigkeit [m/s]	Porosität [-]	Mächtigkeit [m]
Quartär	1,0 E-5	0,25	30
Oberkreide	1,0 E-7	0,05	200
			Durchmesser [m]
Bohrung Bleckenstedt 1	1,0 E-3	0,10	0,2
Schacht Konrad 1 (mit Auflockerungs- zone )	1,0 E-4	0,10	17,0
Horizontaler Gradient in der Oberkreide und im Quartär: 0,003 m/m			
Flüsse an der Basis Oberkreide [l/min]:			
	R34	R16	R29
aus der Bg. Bleckenstedt 1	1,4E-3	9,0E-2	9,0E-2
	R35	R38	R39
aus dem Schacht Konrad 1	6,5E-3	4,8E-2	4,2E-1

Tabelle 2-2: Parameter des kleinräumigen generischen Modells

Bohrlochintervall über Basis Oberkreide	Flussrate aus Intervall	Kumulierte Flussrate über Basis Oberkreide	Spezifischer Fluss pro Meter Bohrung	Halbe Breite der hydraul. Fahne Basis Quartär	Breite der Fahne Basis Quartär
[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[%]	[m <sup>3</sup> /(s·m)]	[m]	[m]
195-200	9.160E-10	99,83	1.832E-10		Querdispersion wird vernachlässigt
185-195	3.300E-10	99,77	3.300E-11		
170-185	4.700E-10	99,75	3.133E-11		
140-170	5.960E-10	99,72	1.987E-11		
90-140	3.754E-09	99,68	7.508E-11		
40-90	1.128E-07	99,42	2.256E-09	3,7	7,4 <sup>1)</sup>
20-40	2.932E-07	91,88	1.466E-08	24	48
10-20	3.594E-07	72,26	3.594E-08	57	114
5-10	2.910E-07	48,22	5.820E-08	91	182
1-5	3.236E-07	28,75	8.090E-08	123	246
0-1	1.062E-07	7,10	1.062E-07	157	314
Abfluss aus dem Alb	1.500E-06				

1) Unter Berücksichtigung der Querdispersion würde dieser Wert auf rund 50 m erhöht.

Tabelle 2-3: Lokale Modellierung Rechenfall R16: Flussrate aus der Bohrung Bleckenstedt 1 in die Oberkreide, Breite der Austrittsfläche an der Basis Quartär

Bohrlochintervall über Basis Oberkreide	Flussrate aus Intervall	Kumulierte Flussrate über Basis Oberkreide	Spezifischer Fluss pro Meter Bohrung	Halbe Breite der hydraul. Fahne Basis Quartär	Breite der Fahne mit Querdispers. Basis Quartär
[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[%]	[m <sup>3</sup> /(s·m)]	[m]	[m]
195-200	3.044E-11	≈100	6.088E-12		
185-195	1.193E-10	≈100	1.193E-11		
170-185	9.146E-11	≈100	6.097E-12		
140-170	2.708E-11	99,95	9.027E-13		
90-140	5.540E-11	99,83	1.108E-12	0,002	35,87
40-90	1.710E-09	99,59	3.420E-11	0,057	47,08
20-40	4.590E-09	92,22	2.294E-10	0,382	51,57
10-20	5.624E-09	72,44	5.624E-10	0,937	53,81
5-10	4.538E-09	48,20	9.076E-10	1,513	54,93
1-5	5.004E-09	28,64	1.251E-09	2,085	55,83
0-1	1.640E-09	7,07	1.640E-09	2,733	56,05
Abfluss aus dem Alb	2.324E-08				

Tabelle 2-4: Lokale Modellierung Rechenfall R34: Flussrate aus der Bohrung Bleckenstedt 1 in die Oberkreide, Breite der Austrittsfläche mit horizontaler Querdispersion an der Basis Quartär

Schachtintervall über Basis Oberkreide	Flussrate aus Intervall	Kumulierte Flussrate über Basis Oberkreide	Spezifischer Fluss pro Meter Schacht	Halbe Breite der hydraul. Fahne Basis Quartär	Breite der Fahne mit Querdispers. Basis Quartär
[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[%]	[m <sup>3</sup> /(s·m)]	[m]	[m]
10-20	1.036E-07	190,63 <sup>1)</sup>	1.036E-08	17,3	64,8
5-10	5.186E-08	95,40	1.037E-08	17,3	65,7
1-5	4.154E-08	47,74	1.039E-08	17,3	66,4
0-1	1.040E-08	9,56	1.040E-08	17,3	66,5
Abfluss aus dem Alb	1.088E-07				

I  
5  
I

1) Erklärung siehe Abschnitt 2.3.3.3

Tabelle 2-5: Lokale Modellierung Rechenfall R35: Flussrate aus dem Schacht Konrad 1 in die Oberkreide, Breite der Austrittsfläche mit horizontaler Querdispersion an der Basis Quartär

Schachtintervall über Basis Oberkreide	Flussrate aus Intervall	Kumulierte Flussrate über Basis Oberkreide	Spezifischer Fluss pro Meter Schacht	Halbe Breite der hydraul. Fahne Basis Quartär	Breite der Fahne mit Querdispers. Basis Quartär
[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[%]	[m <sup>3</sup> /(s·m)]	[m]	[m]
40-90	5,352E-07	124,64 <sup>1)</sup>	1,070E-08	17,5	60,4
20-40	2,180E-07	56,17	1,090E-08	17,9	64,2
10-20	1,099E-07	28,28	1,099E-08	18,0	66,0
5-10	5,532E-08	14,22	1,106E-08	18,2	67,2
1-5	4,454E-08	7,14	1,114E-08	18,3	68,0
0-1	1,126E-08	1,44	1,126E-08	18,5	68,5
Abfluss aus dem Alb	7,816E-07				

1) Erklärung siehe Abschnitt 2.3.3.3

Tabelle 2-6: Lokale Modellierung Rechenfall R38: Flussrate aus dem Schacht Konrad 1 in die Oberkreide, Breite der Austrittsfläche mit horizontaler Querdispersion an der Basis Quartär

(Aufgrund von Rundungseffekten beträgt die Zustromrate aus dem Alb im lokalen Modell  $7,816 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  und ist damit um 2 % geringer als der mit dem regionalen Modell berechnete und in Tabelle 2-1 aufgeführte Wert)

		R16	R34	R35	R38	R39/1
<b>OBERKREIDE</b>						
Abfluss aus dem Bohrloch/Schacht	[m <sup>3</sup> /s]	1,50E-6	2,32E-8	1,09E-7	7,82E-7	7,00E-6
Breite der Fahne mit Dispersion	[m]	*	55	66	66	*
Mächtigkeit der Fahne	[m]	*	40	10	72	*
Filtergeschwindigkeit	[m/s]	*	3,0E-10	3,0E-10	3,0E-10	*
Flussrate am Top der Oberkreide	[m <sup>3</sup> /s]	1,50E-6	6,60E-7	1,98E-7	1,43E-6	7,00E-6
Verdünnungsfaktor		1,0	28	1,8	1,8	1,0
<b>QUARTÄR</b>						
Breite der Fahne	[m]	314	55	66	66	240
Mächtigkeit der gesättigten Zone	[m]	8	8	1	1	1
Filtergeschwindigkeit	[m/s]	3,00E-8	3,00E-8	3,00E-8	3,00E-8	3,00E-8
Flussrate	[m <sup>3</sup> /s]	7,54E-5	1,32E-5	1,98E-6	1,98E-6	7,20E-6
Verdünnungsfaktor		50	20	10	1,4	1,0

\* keine horizontale Querdispersion

Tabelle 2-7: Wasserflüsse und Verdünnungsfaktoren in der Oberkreide und im Quartär

Fliesspfade	R34	R16	R35	R38	R39 1/2
Oxford und Kimmeridge (Querdisp.)	1	1	1	1	1
Bohrung Bleckenstedt 1 durch kru und Alb (Infiltration)	20	1,3	-	-	-
Schacht Konrad 1 durch kru und Alb (Infiltration)	-	-	16	1,7	1,1
Oberkreide (Querdispersion)	28	1	1,8	1,8	1,0
Quartär (Beimischung)	20	50	10	1,4	1
Gesamter Verdünnungsfaktor	11200	65	288	4,3	1,1

Tabelle 2-8: Verdünnungsfaktoren entlang den Fliesspfaden und gesamter Verdünnungsfaktor in jedem Rechenfall

	Hydraulische Bedingungen	Reduktion der Konzentrationen	Zusätzliche Verdünnung
Endlager	Fluss Ergebnis der regionalen Modellierung	Nuklidkonzentrationen aus dem Anfangsinventar	-----
Oxford	Potentialverteilung und Geschwindigkeit aus der regionalen Modellierung	Matrixdiffusion, Längsdispersion und Zerfall als Ergebnis des Programms RANCHMD	-----
Kimmeridge	Potentialverteilung und Geschwindigkeit aus der regionalen Modellierung	Matrixdiffusion, Längsdispersion und Zerfall als Ergebnis des Programms RANCHMD	-----
Bohrung Bleck.1 oder Schacht Konrad 1	Potentialverteilung und Geschwindigkeit aus der regionalen Modellierung	Matrixdiffusion, Längsdispersion und Zerfall als Ergebnis des Programms RANCHMD	Infiltration von unkontaminiertem Wasser
Oberkreide	Verteilung des Flusses aus dem Bohrloch/Schacht aus der generischen Modellierung	Matrixdiffusion, Längsdispersion und Zerfall als Ergebnis des Programms RANCHMD	Berücksichtigung der horizontalen Querdispersion
Quartär	Entfernung und Form der Austrittsfläche an der Basis gemäss gener. Modellierung in kro und Neigung der Fliesstrajektorien in kro	Sofortige und völlige Vermischung. Mächtigkeit des gesättigten Quartärs aus Felddaten	-----

Tabelle 3-1: An der Nuklidmigration beteiligte Prozesse vom Grubengebäude bis zum Quartär

Formation	Reduktion der Konzentrationen durch	R34	R16	R35	R38	R39/1 R39/2
Oxford	RANCHMD	JA	JA	NICHT BERECHNET	JA	JA
	Querdispersion	NEIN	NEIN	NICHT BERECHNET	NEIN	NEIN
Kimmeridge	RANCHMD	JA	JA	NICHT BERECHNET	JA	JA
	Querdispersion	NEIN	NEIN	NICHT BERECHNET	NEIN	NEIN
Bohrung / Schacht Unterkreide / Alb	RANCHMD	JA	NEIN	JA	JA	JA
	Infiltration	JA	JA	JA	JA	JA
Oberkreide	RANCHMD	JA	JA	JA	JA	JA / NEIN
	Querdispersion	JA	NEIN	JA	JA	NEIN
Quartär	Beimischung	JA	JA	JA	JA	NEIN

Tabelle 3-2: Angewandte Modellierungsmethoden (Modellierung der Nuklidmigration mit dem Programm RANCHMD, Reduktion der Aktivitätskonzentrationen durch Querdispersion oder Verdünnung)

	R34	R16	R29 (nicht modelliert)	R35	R38	R39 1/2
<b>Länge des Fließwegs [m]</b>						
Oxford	120	44	120			
Kimmeridge	780	200	780			
Schacht durch ox und jo Bohrung Bl. 1 oder Schacht				350 *	350	350
Konrad 1 durch kru und Alb	400	400 *	400	610	610	610
Oberkreide	500	500	500	450	450	450/225*
<b>Dispersionslänge entlang dem Fließweg [m]</b>						
Oxford	12	4,4				
Kimmeridge	78	20				
Bohrung Bl. 1 oder Schacht						
Konrad 1 durch kru und Alb	20	--	--	31	31	31
Oberkreide	50	50	--	45	45	45/23
<b>Mittlere Abstandsgeschwindigkeit [m/a]</b>						
Oxford	0,2	0,2	2,8			
Kimmeridge	0,2	0,8	2,8			
Schacht durch ox und jo Bohrung Bl. 1 oder Schacht				1,1 *	1,9	8,7
Konrad 1 durch kru und Alb	40	14000 *	14000	0,04	0,9	9,4
Oberkreide	47	47	--	47	47	47/5600

\* nicht berechnet

Tabelle 3-3: Hydraulische Kennwerte der angenommenen Fließwege für die berücksichtigten Rechenfälle

	Oxford	Kimmeridge	Unterkreide	Oberkreide
Kluftweite [mm]	1	1	--	0,02
Kluftabstand [m]	1	1	--	0,1
Diffusionstiefe [m]	0,5	0,5	100 *	0,05
Fliessporosität [-]	0,001	0,001	0,1	0,0002
Matrixporosität [-]	0,1	0,1	0,2	0,1
Effektive Diffusivität [m <sup>2</sup> /s]	2·10 <sup>-11</sup>	2·10 <sup>-11</sup>	4·10 <sup>-11</sup>	2·10 <sup>-11</sup>

\* 40 m im Fall "limitierte Matrixdiffusion"

Tabelle 3-4: Parameter der Transportrechnungen für die angenommenen Fließwege  
(gültig für alle Rechenfälle)

Nuklid	Halbwertszeit [a]	Anfangsinventar [Bq]
<b>Spalt- und Aktivierungsprodukte</b>		
C-14	5.7E+03	4.00E+14
Cl-36	3.0E+05	1.10E+11
Ca-41	8.1E+04	1.50E+11
Ni-59	8.0E+04	4.50E+14
Se-79	6.5E+04	1.20E+11
Rb-87	4.7E+10	7.00E+04
Mo-93	3.5E+03	4.40E+07
Zr-93	1.5E+06	1.00E+12
Nb-94	2.0E+04	4.50E+09
Tc-99	2.1E+05	2.60E+13
Pd-107	6.5E+06	1.30E+07
Sn-126	1.0E+05	3.60E+11
I-129	1.6E+07	7.00E+11
Cs-135	2.3E+06	3.80E+11
<b>Aktiniden</b>		
Cm-248 *	3.4E+05	4.80E+05
Pu-244 *	8.3E+07	2.50E+01
Cm-244 *	1.8E+01	2.20E+15
Pu-240	6.5E+03	2.10E+15
U-236	2.3E+07	1.00E+12
Th-232	1.4E+10	5.00E+11
Cm-245 *	8.5E+03	7.00E+10
Pu-241 *	1.4E+01	2.00E+17
Am-241 *	4.3E+02	1.20E+15
Np-237	2.1E+06	1.80E+11
U-233	1.6E+05	4.60E+07
Th-229	7.3E+03	9.20E+02
Cm-246 *	4.7E+03	2.60E+10
Pu-242 *	3.9E+05	4.40E+12
Am-242m*	1.5E+02	1.70E+08
U-238	4.5E+09	1.90E+12
Pu-238 *	8.8E+01	1.30E+16
U-234	2.4E+05	9.10E+11
Th-230	7.7E+04	6.10E+10
Ra-226	1.6E+03	4.00E+12
Pb-210 **	2.2E+01	8.30E+10
Cm-247 *	1.6E+07	1.10E+05
Am-243 *	7.4E+03	9.60E+08
Pu-239	2.4E+04	2.00E+15
U-235	7.0E+08	2.00E+11
Pa-231	3.3E+04	1.70E+10
Ac-227 **	2.2E+01	1.70E+10

\* Nur für die Freisetzung aus dem Endlager, nicht aber in der Ausbreitungsrechnung berücksichtigt (siehe Erklärung Abschnitt 3.4)

\*\* Aktiniden im säkularen Gleichgewicht mit ihrem Mutternuklid

Tabelle 3-5: Berücksichtigte Radionuklide, Halbwertszeiten und Anfangsinventar

Nuklid	Konzentration	
	[Bq/m <sup>3</sup> ]	[mol/l]
Spalt- und Aktivierungsprodukte		
C-14	5.21E+07	2.25E-08
Cl-36	1.46E+05	3.33E-09
Ca-41	2.02E+05	1.24E-09
Ni-59	1.18E+08	7.11E-07
Se-79	1.08E+05	5.30E-10
Rb-87	1.68E-02	5.96E-11
Zr-93	1.47E+03	1.70E-10
Nb-94	1.35E+00	2.07E-15
Mo-93	2.99E+01	7.90E-15
Tc-99	1.24E+07	1.99E-07
Pd-107	8.73E+00	4.30E-12
Sn-126	1.27E+05	9.57E-10
I-129	9.34E+05	1.11E-06
Cs-135	3.63E+03	6.30E-10
Aktiniden		
Pu-240	1.13E+06	5.58E-10
U-236	3.96E+04	7.02E-08
Th-232	9.74E+01	1.03E-07
Np-237	6.80E+03	1.10E-09
U-233	6.38E+03	7.64E-11
Th-229	3.43E+01	1.90E-14
U-238	6.68E+04	2.26E-05
U-234	1.97E+05	3.64E-09
Th-230	2.05E+02	1.19E-12
Ra-226	6.22E+05	7.52E-11
Pu-239	1.14E+06	2.08E-09
U-235	7.08E+03	3.76E-07
Pa-231	2.49E+01	6.16E-14

Tabelle 3-6: Maximale Konzentration der berücksichtigten Radionuklide im Grubendurchfluss von 735 m<sup>3</sup>/a

Rechenfall	Grube	Oxford	Kimmeridge	Unterkreide	Oberkreide
R34	$C_{\max}$ [mol/l]	1.0E-3	2.13E-5	2.85E-6	< 1.00E-6
	Verdünnung	1	10 - 100	> 100 *	> 100
R16	$C_{\max}$ [mol/l]	1.0E-3	5.64E-5	3.23E-5	2.51E-5
	Verdünnung	1	1 - 10	10 - 100	10 - 100
R35	$C_{\max}$ [mol/l]	1.0E-3	1.00E-3	1.00E-3	3.91E-8
	Verdünnung	1	1	10 - 100 *	> 100
R38	$C_{\max}$ [mol/l]	1.0E-3	9.40E-4	7.14E-4	1.44E-4
	Verdünnung	1	1 - 10	1 - 10	1 - 10 *
R39	$C_{\max}$ [mol/l]	1.0E-3	9.72E-4	8.91E-4	6.75E-4
	Verdünnung	1	1 - 10	1 - 10	1 - 10

\* : Erläuterung siehe Text (Abschnitt 3.5)

Tabelle 3-7: Maximale EDTA-Konzentration [mol/l] an den Schichtgrenzen

Nuklid	Verteilungskoeffizient [m <sup>3</sup> /kg]			
	Oxford	Kimmeridge	Unterkreide	Oberkreide
<b>Spalt- und Aktivierungsprodukte</b>				
C- 14	0,0002	0,009	0,02	0,009
Cl- 36	0,0	0,0	0,0	0,0
Ca- 41	0,0	0,0	0,0	0,0
Ni- 59	0,002	0,003	0,02	0,003
Se- 79	0,0001	0,0001	0,0005	0,0001
Rb- 87	0,001	0,001	0,001	0,001
Mo- 93	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Zr- 93	0,07	1,0	1,0	1,0
Nb- 94	1,0	1,0	1,0	1,0
Tc- 99	0,0007	0,0003	0,0005	0,0003
Pd-107	0,0002	0,001	0,001	0,001
Sn-126	0,0006	0,01	0,01	0,01
I-129	0,0	0,0	0,0	0,0
Cs-135	0,03	0,02	0,05	0,02
<b>Aktiniden</b>				
Pu-240	1,0	1,0	1,0	1,0
U-236	0,003	0,0026	0,02	0,0026
Th-232	0,07	0,75	1,0	0,75
Np-237	0,03	0,03	0,06	0,03
U-233	0,003	0,0026	0,02	0,0026
Th-229	0,07	0,75	1,0	0,75
U-238	0,003	0,0026	0,02	0,0026
U-234	0,003	0,0026	0,02	0,0026
Th-230	0,07	0,75	1,0	0,75
Ra-226	0,0016	0,004	0,003	0,004
Pb-210				0,04
Pu-239	1,0	1,0	1,0	1,0
U-235	0,003	0,0026	0,02	0,0026
Pa-231	1,0	1,0	1,0	1,0
Ac-227				0,06

**Bemerkung:** Die Daten der Unterkreide werden für die Migrationsrechnungen entlang der Bohrung Bleckenstedt 1 verwendet.

**Tabelle 3-8:** Rechenfall R34  
Verteilungskoeffizienten der berücksichtigten Nuklide

Nuklid	Verteilungskoeffizient [m <sup>3</sup> /kg]		
	Oxford	Kimmeridge	Oberkreide
<b>Spalt- und Aktivierungsprodukte</b>			
C- 14	0,0002	0,009	0,009
Cl- 36	0,0	0,0	0,0
Ca- 41	0,0	0,0	0,0
Ni- 59	0,0007	0,0018	0,0018
Se- 79	0,0001	0,0001	0,0001
Rb- 87	0,001	0,001	0,001
Mo- 93	0,0002	0,0002	0,0002
Zr- 93	0,07	0,05	0,05
Nb- 94	1,0	1,0	1,0
Tc- 99	0,0007	0,0003	0,0003
Pd-107	0,0002	0,0002	0,0002
Sn-126	0,0006	0,0006	0,0006
I-129	0,0	0,0	0,0
Cs-135	0,03	0,02	0,02
<b>Aktiniden</b>			
Pu-240	0,5	1,0	1,0
U-236	0,003	0,0026	0,0026
Th-232	0,07	0,05	0,05
Np-237	0,03	0,03	0,03
U-233	0,003	0,0026	0,0026
Th-229	0,07	0,05	0,05
U-238	0,003	0,0026	0,0026
U-234	0,003	0,0026	0,0026
Th-230	0,07	0,05	0,05
Ra-226	0,0016	0,004	0,004
Pb-210			0,006
Pu-239	0,5	1,0	1,0
U-235	0,003	0,0026	0,0026
Pa-231	1,0	1,0	1,0
Ac-227			0,05

Tabelle 3-9: Rechenfall R16  
Verteilungskoeffizienten der berücksichtigten  
Nuklide

Nuklid	Verteilungskoeffizient [m <sup>3</sup> /kg]	
	Unterkreide	Oberkreide
<b>Spalt- und Aktivierungsprodukte</b>		
C- 14	0,02	0,009
Cl- 36	0,0	0,0
Ca- 41	0,0	0,0
Ni- 59	0,006	0,003
Se- 79	0,0005	0,0001
Rb- 87	0,001	0,001
Mo- 93	0,0002	0,0002
Zr- 93	0,08	1,0
Nb- 94	1,0	1,0
Tc- 99	0,0005	0,0003
Pd-107	0,0002	0,001
Sn-126	0,0006	0,01
I-129	0,0	0,0
Cs-135	0,05	0,02
<b>Aktiniden</b>		
Pu-240	1,0	1,0
U-236	0,02	0,0026
Th-232	0,08	0,75
Np-237	0,06	0,03
U-233	0,02	0,0026
Th-229	0,08	0,75
U-238	0,02	0,0026
U-234	0,02	0,0026
Th-230	0,08	0,75
Ra-226	0,003	0,004
Pb-210		0,04
Pu-239	1,0	1,0
U-235	0,02	0,0026
Pa-231	1,0	1,0
Ac-227		0,06

Bemerkung: Die Daten der Unterkreide werden für die Migrationsrechnungen entlang dem Schacht Konrad 1 verwendet.

Tabelle 3-10: Rechenfall R35  
Verteilungskoeffizienten der berücksichtigten Nuklide

Nuklid	Verteilungskoeffizient [m <sup>3</sup> /kg]			
	Oxford	Kimmeridge	Unterkreide	Oberkreide
<b>Spalt- und Aktivierungsprodukte</b>				
C- 14	0,0002	0,009	0,02	0,009
Cl- 36	0,0	0,0	0,0	0,0
Ca- 41	0,0	0,0	0,0	0,0
Ni- 59	0,0007	0,0006	0,001	0,0006
Se- 79	0,0001	0,0001	0,0005	0,0001
Rb- 87	0,001	0,001	0,001	0,001
Mo- 93	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Zr- 93	0,07	0,05	0,08	0,05
Nb- 94	1,0	1,0	1,0	1,0
Tc- 99	0,0007	0,0003	0,0005	0,0003
Pd-107	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Sn-126	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006
I-129	0,0	0,0	0,0	0,0
Cs-135	0,03	0,02	0,05	0,02
<b>Aktiniden</b>				
Pu-240	0,5	1,0	0,5	1,0
U-236	0,003	0,0026	0,02	0,0026
Th-232	0,07	0,05	0,08	0,05
Np-237	0,03	0,03	0,06	0,03
U-233	0,003	0,0026	0,02	0,0026
Th-229	0,07	0,05	0,08	0,05
U-238	0,003	0,0026	0,02	0,0026
U-234	0,003	0,0026	0,02	0,0026
Th-230	0,07	0,05	0,08	0,05
Ra-226	0,0016	0,004	0,003	0,004
Pb-210				0,0006
Pu-239	0,5	1,0	0,5	1,0
U-235	0,003	0,0026	0,02	0,0026
Pa-231	1,0	1,0	1,0	1,0
Ac-227				0,02

**Bemerkung:** Die Daten der Unterkreide werden für die Migrationsrechnungen entlang dem Schacht Konrad 1 verwendet.

**Tabelle 3-11: Rechenfall R38**  
Verteilungskoeffizienten der berücksichtigten Nuklide

Nuklid	Verteilungskoeffizient [m <sup>3</sup> /kg]			
	Oxford	Kimmeridge	Unterkreide	Oberkreide
<b>Spalt- und Aktivierungsprodukte</b>				
C- 14	0,0002	0,009	0,02	0,009
Cl- 36	0,0	0,0	0,0	0,0
Ca- 41	0,0	0,0	0,0	0,0
Ni- 59	0,0007	0,0006	0,001	0,0006
Se- 79	0,0001	0,0001	0,0005	0,0001
Rb- 87	0,001	0,001	0,001	0,001
Mo- 93	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Zr- 93	0,07	0,05	0,08	0,05
Nb- 94	1,0	1,0	1,0	1,0
Tc- 99	0,0007	0,0003	0,0005	0,0003
Pd-107	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Sn-126	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006
I-129	0,0	0,0	0,0	0,0
Cs-135	0,03	0,02	0,05	0,02
<b>Aktiniden</b>				
Pu-240	0,5	1,0	0,5	1,0
U-236	0,003	0,0026	0,02	0,0026
Th-232	0,07	0,05	0,08	0,05
Np-237	0,03	0,03	0,06	0,03
U-233	0,003	0,0026	0,02	0,0026
Th-229	0,07	0,05	0,08	0,05
U-238	0,003	0,0026	0,02	0,0026
U-234	0,003	0,0026	0,02	0,0026
Th-230	0,07	0,05	0,08	0,05
Ra-226	0,0016	0,004	0,003	0,004
Pb-210				0,0006
Pu-239	0,5	1,0	0,5	1,0
U-235	0,003	0,0026	0,02	0,0026
Pa-231	1,0	1,0	1,0	1,0
Ac-227				0,02

Bemerkung: Die Daten der Unterkreide werden für die Migrationsrechnungen entlang dem Schacht Konrad 1 verwendet.

Tabelle 3-12: Rechenfall R39  
Verteilungskoeffizienten der berücksichtigten Nuklide

Nuklid	Abfluss Endlager	Grenze Oxford / Kimmeridge	Grenze Kimmeridge / Bohrloch	Grenze Bohrloch / Oberkreide	Grenze Oberkreide / Quartär	Quartär
<b>Spalt- und Aktivierungsprodukte</b>						
C-14	6.13E+07	9.75E-01	0.00E+00			
Cl-36	1.71E+05	2.93E+03	2.19E+02	1.61E-01	5.66E-03	2.83E-04
Ca-41	2.38E+05	3.08E+03	4.66E+01	2.88E-02	9.78E-04	4.89E-05
Ni-59	1.35E+08	1.32E+01	1.51E-18	0.00E+00		
Se-79	1.27E+05	2.51E+02	3.07E-02	1.12E-05	2.00E-07	1.00E-08
Rb-87	1.98E-02	8.50E-05	1.30E-05	1.22E-08	4.37E-10	2.19E-11
Mo-93	3.53E+01	1.74E-09	0.00E+00			
Zr-93	1.72E+03	5.40E-06	0.00E+00			
Nb-94	1.54E+00	0.00E+00				
Tc-99	1.46E+07	5.06E+03	3.88E+00	2.05E-03	1.34E-07	6.70E-09
Pd-107	1.02E+01	6.59E-02	1.13E-03	9.58E-07	3.37E-08	1.68E-09
Sn-126	1.48E+05	1.88E+01	0.00E+00			
I-129	1.07E+06	2.10E+04	3.11E+03	2.51E+00	8.97E-02	4.49E-03
Cs-135	4.26E+03	2.67E-02	1.15E-10	3.03E-14	4.68E-16	2.34E-17
<b>Aktiniden</b>						
Pu-240	1.34E+06	0.00E+00				
U-236	4.36E+04	6.08E+02	5.85E+01	3.25E-02	1.15E-03	5.75E-05
Th-232	1.11E+02	9.09E+00	2.14E-04	5.67E-07	1.79E-08	8.95E-10
Np-237	8.02E+03	6.73E-02	7.59E-13	0.00E+00		
U-233	7.56E+03	1.66E+00	3.85E-11	0.00E+00		
Th-229	4.00E+01	7.23E-02	1.36E-13	0.00E+00		
U-238	7.88E+04	8.10E+02	1.39E+02	8.47E-02	3.02E-03	1.51E-04
U-234	2.32E+05	8.11E+02	1.39E+02	8.47E-02	3.02E-03	1.51E-04
Th-230	2.42E+02	3.51E+01	4.91E-01	1.70E-03	1.07E-05	5.35E-07
Ra-226	7.10E+05	1.50E+03	9.13E+01	5.50E-01	1.97E-03	9.85E-05
Pu-239	1.35E+06	0.00E+00				
U-235	8.33E+03	1.29E+02	1.90E+01	1.16E-02	4.12E-04	2.06E-05
Pa-231	2.92E+01	3.43E-01	5.07E-02	2.33E-04	1.09E-06	5.45E-08

Tabelle 4-1: Maximale Aktivitätskonzentrationen [Bq/m<sup>3</sup>] an ausgewählten Punkten im Rechenfall R34 (Referenzfall Tiefbohrungen) mit unlimitierter Matrixdiffusion um die Bohrung Bleckenstedt 1

Nuklid	Abfluss Endlager	Grenze Oxford / Kimmeridge	Grenze Kimmeridge / Bohrloch	Grenze Bohrloch / Oberkreide	Grenze Oberkreide / Quartär	Quartär
<b>Spalt- und Aktivierungsprodukte</b>						
C-14	5.79E+01	7.50E+04				
Cl-36	1.55E+01	4.75E+04	3.25E+05	3.75E+05	3.75E+05	3.75E+05
Ca-41	1.55E+01	4.50E+04	2.75E+05	3.00E+05	3.00E+05	3.00E+05
Ni-59	5.79E+01	7.75E+05	4.25E+06			
Se-79	5.79E+01	1.25E+05	6.00E+05	6.25E+05	7.00E+05	7.00E+05
Rb-87	2.30E+00	1.25E+06	8.75E+06	1.00E+07	1.00E+07	1.00E+07
Mo-93	5.79E+01	5.50E+04				
Zr-93	5.79E+01	2.00E+07				
Nb-94	5.79E+01					
Tc-99	5.79E+01	5.75E+05	2.00E+06	2.00E+06	3.75E+06	3.75E+06
Pd-107	5.79E+01	2.75E+05	6.75E+06	7.50E+06	7.75E+06	7.75E+06
Sn-126	5.79E+01	4.25E+05				
I-129	3.63E+01	4.75E+04	3.75E+05	4.25E+05	4.25E+05	4.25E+05
Cs-135	3.63E+01	1.50E+07	5.00E+07	5.25E+07	5.25E+07	5.25E+07
<b>Aktiniden</b>						
Pu-240	6.46E+02					
U-236	6.84E+03	3.25E+06	2.25E+07	2.50E+07	2.50E+07	2.50E+07
Th-232	5.79E+01	8.00E+07	>1.00E+09	6.00E+07	2.00E+08	2.00E+08
Np-237	3.90E+03	1.50E+07	5.50E+07			
U-233	7.85E+04	1.00E+07	4.75E+07			
Th-229	1.13E+05	1.00E+07	4.75E+07			
U-238	6.46E+02	3.25E+06	2.25E+07	2.75E+07	2.75E+07	2.75E+07
U-234	6.46E+02	3.25E+06	2.25E+07	2.75E+07	2.75E+07	2.75E+07
Th-230	5.45E+04	3.50E+06	2.25E+07	2.75E+07	2.75E+07	2.75E+07
Ra-226	1.55E+01	3.50E+06	2.25E+07	2.75E+07	2.75E+07	2.75E+07
Pu-239	6.46E+02					
U-235	6.46E+02	3.25E+06	2.25E+07	2.75E+07	2.75E+07	2.75E+07
Pa-231	4.15E+04	3.50E+06	2.25E+07	2.75E+07	2.75E+07	2.75E+07

Tabelle 4-2: Zeitpunkte [a] der maximalen Aktivitätskonzentrationen an ausgewählten Punkten im Rechenfall R34 (Referenzfall Tiefbohrungen) mit unlimitierter Matrixdiffusion um die Bohrung Bleckenstedt 1

Nuklid	Abfluss Endlager	Grenze Oxford / Kimmeridge	Grenze Kimmeridge / Bohrloch	Grenze Bohrloch / Oberkreide	Grenze Oberkreide / Quartär	Quartär
<b>Spalt- und Aktivierungsprodukte</b>						
C-14	6.13E+07	9.75E-01	0.00E+00			
Cl-36	1.71E+05	2.93E+03	2.19E+02	1.83E-01	6.43E-03	3.22E-04
Ca-41	2.38E+05	3.08E+03	4.66E+01	3.03E-02	1.02E-03	5.10E-05
Ni-59	1.35E+08	1.32E+01	1.51E-18	0.00E+00		
Se-79	1.27E+05	2.51E+02	3.07E-02	1.12E-05	2.01E-07	1.00E-08
Rb-87	1.98E-02	8.50E-05	1.30E-05	6.28E-08	2.24E-09	1.12E-10
Mo-93	3.53E+01	1.74E-09	0.00E+00			
Zr-93	1.72E+03	5.40E-06	0.00E+00			
Nb-94	1.54E+00	0.00E+00				
Tc-99	1.46E+07	5.06E+03	3.88E+00	2.10E-03	1.37E-07	6.85E-09
Pd-107	1.02E+01	6.59E-02	1.13E-03	1.46E-06	5.15E-08	2.58E-09
Sn-126	1.48E+05	1.88E+01	0.00E+00			
I-129	1.07E+06	2.10E+04	3.11E+03	6.31E+00	2.25E-01	1.13E-02
Cs-135	4.26E+03	2.67E-02	1.15E-10	3.03E-14	4.68E-16	2.34E-17
<b>Aktiniden</b>						
Pu-240	1.34E+06	0.00E+00				
U-236	4.36E+04	6.08E+02	5.85E+01	3.93E-02	1.38E-03	6.90E-05
Th-232	1.11E+02	9.09E+00	2.14E-04	7.16E-07	2.50E-08	1.25E-09
Np-237	8.02E+03	6.73E-02	7.59E-13	1.57E-16	0.00E+00	
U-233	7.56E+03	1.66E+00	3.85E-11	4.05E-15	0.00E+00	
Th-229	4.00E+01	7.23E-02	1.36E-13	8.14E-17	0.00E+00	
U-238	7.88E+04	8.10E+02	1.39E+02	1.97E-01	7.03E-03	3.52E-04
U-234	2.32E+05	8.11E+02	1.39E+02	1.97E-01	7.03E-03	3.52E-04
Th-230	2.42E+02	3.51E+01	4.91E-01	3.96E-03	2.47E-05	1.23E-06
Ra-226	7.10E+05	1.50E+03	9.13E+01	1.28E+00	4.59E-03	2.30E-04
Pu-239	1.35E+06	0.00E+00				
U-235	8.33E+03	1.29E+02	1.90E+01	2.16E-02	7.71E-04	3.86E-05
Pa-231	2.92E+01	3.43E-01	5.07E-02	4.34E-04	2.04E-06	1.02E-07

Tabelle 4-3: Maximale Aktivitätskonzentrationen [Bq/m<sup>3</sup>] an ausgewählten Punkten im Rechenfall R34 (Referenzfall Tiefbohrungen) mit limitierter Matrixdiffusion um die Bohrung Bleckenstedt 1

Nuklid	Abfluss Endlager	Grenze Oxford / Kimmeridge	Grenze Kimmeridge / Bohrloch	Grenze Bohrloch / Oberkreide	Grenze Oberkreide / Quartär	Quartär
<b>Spalt- und Aktivierungsprodukte</b>						
C-14	5.79E+01	7.50E+04				
Cl-36	1.55E+01	4.75E+04	3.25E+05	4.00E+05	4.00E+05	4.00E+05
Ca-41	1.55E+01	4.50E+04	2.75E+05	3.00E+05	3.00E+05	3.00E+05
Ni-59	5.79E+01	7.75E+05	4.25E+06			
Se-79	5.79E+01	1.25E+05	6.00E+05	6.25E+05	7.00E+05	7.00E+05
Rb-87	2.30E+00	1.25E+06	8.75E+06	4.75E+07	4.75E+07	4.75E+07
Mo-93	5.79E+01	5.50E+04				
Zr-93	5.79E+01	2.00E+07				
Nb-94	5.79E+01					
Tc-99	5.79E+01	5.75E+05	2.00E+06	2.00E+06	3.75E+06	3.75E+06
Pd-107	5.79E+01	2.75E+05	6.75E+06	1.00E+07	1.00E+07	1.00E+07
Sn-126	5.79E+01	4.25E+05				
I-129	3.63E+01	4.75E+04	3.75E+05	3.25E+06	3.25E+06	3.25E+06
Cs-135	3.63E+01	1.50E+07	5.00E+07	5.25E+07	5.25E+07	5.25E+07
<b>Aktiniden</b>						
Pu-240	6.46E+02					
U-236	6.84E+03	3.25E+06	2.25E+07	2.50E+07	2.50E+07	2.50E+07
Th-232	5.79E+01	8.00E+07	>1.00E+09	1.25E+08	2.50E+08	2.00E+08
Np-237	3.90E+03	1.50E+07	5.50E+07	5.50E+07		
U-233	7.85E+04	1.00E+07	4.75E+07	5.25E+07		
Th-229	1.13E+05	1.00E+07	4.75E+07	5.25E+07		
U-238	6.46E+02	3.25E+06	2.25E+07	3.25E+08	3.25E+08	3.25E+08
U-234	6.46E+02	3.25E+06	2.25E+07	3.25E+08	3.25E+08	3.25E+08
Th-230	5.45E+04	3.50E+06	2.25E+07	3.25E+08	3.25E+08	3.25E+08
Ra-226	1.55E+01	3.50E+06	2.25E+07	3.25E+08	3.25E+08	3.25E+08
Pu-239	6.46E+02					
U-235	6.46E+02	3.25E+06	2.25E+07	2.50E+08	2.50E+08	2.50E+08
Pa-231	4.15E+04	3.50E+06	2.25E+07	2.50E+08	2.50E+08	2.50E+08

Tabelle 4-4: Zeitpunkte [a] der maximalen Aktivitätskonzentrationen an ausgewählten Punkten im Rechenfall R34 (Referenzfall Tiefbohrungen) mit limitierter Matrixdiffusion um die Bohrung Bleckenstedt 1

Nuklid	Abfluss Endlager	Grenze Oxford / Kimmeridge	Grenze Kimmeridge / Bohrloch	Grenze Oberkreide / Quartär	Quartär
<b>Spalt- und Aktivierungsprodukte</b>					
C-14	5.21E+07	1.78E+03	0.00E+00		
Cl-36	1.46E+05	7.17E+03	4.09E+03	3.07E+03	6.14E+01
Ca-41	2.02E+05	8.98E+03	4.38E+03	3.19E+03	6.38E+01
Ni-59	1.18E+08	2.03E+05	2.57E+02	3.35E+01	6.70E-01
Se-79	1.08E+05	1.40E+02	3.78E+02	2.22E+02	4.44E+00
Rb-87	1.68E-02	2.02E-04	1.22E-04	8.30E-05	1.66E-06
Mo-93	2.99E+01	2.05E-05	5.93E-11	0.00E+00	
Zr-93	1.47E+03	1.37E-02	6.75E-06	3.02E-07	6.04E-09
Nb-94	1.35E+00	0.00E+00			
Tc-99	1.24E+07	4.33E+04	1.87E+04	1.25E+04	2.51E+02
Pd-107	8.73E+00	1.56E-01	9.07E-02	6.86E-02	1.37E-03
Sn-126	1.27E+05	3.47E+02	2.49E+01	1.11E+01	2.22E-01
I-129	9.34E+05	4.81E+04	2.90E+04	2.21E+04	4.42E+02
Cs-135	3.63E+03	1.82E+00	7.93E-02	2.89E-02	5.77E-04
<b>Aktiniden</b>					
Pu-240	1.13E+06	0.00E+00			
U-236	3.96E+04	1.49E+03	9.14E+02	6.86E+02	1.37E+01
Th-232	9.74E+01	2.07E+01	1.48E+01	1.14E+01	2.28E-01
Np-237	6.80E+03	5.61E+00	5.70E-02	1.34E-02	2.68E-04
U-233	6.38E+03	1.11E+02	1.88E+00	4.68E-01	9.36E-03
Th-229	3.43E+01	4.82E+00	9.93E-02	2.47E-02	4.94E-04
U-238	6.68E+04	1.87E+03	1.20E+03	9.09E+02	1.82E+01
U-234	1.97E+05	1.97E+03	1.20E+03	9.09E+02	1.82E+01
Th-230	2.05E+02	8.34E+00	6.23E+01	4.80E+01	9.60E-01
Ra-226	6.22E+05	3.56E+03	7.71E+02	5.94E+02	1.19E+01
Pu-239	1.14E+06	0.00E+00			
U-235	7.08E+03	2.61E+02	1.67E+02	1.27E+02	2.54E+00
Pa-231	2.49E+01	7.88E-01	4.41E-01	3.35E-01	6.70E-03

Tabelle 4-5: Maximale Aktivitätskonzentrationen [Bq/m<sup>3</sup>] an ausgewählten Punkten im Rechenfall R16

Nuklid	Abfluss Endlager	Grenze Oxford / Kimmeridge	Grenze Kimmeridge / Bohrloch	Grenze Oberkreide / Quartär	Quartär
<b>Spalt- und Aktivierungsprodukte</b>					
C-14	5.79E+01	4.50E+04			
Cl-36	1.55E+01	1.75E+04	4.25E+04	4.75E+04	4.75E+04
Ca-41	1.55E+01	1.75E+04	4.00E+04	4.75E+04	4.75E+04
Ni-59	5.79E+01	2.25E+05	7.00E+05	8.75E+05	8.75E+05
Se-79	5.79E+01	5.25E+05	1.25E+05	1.50E+05	1.50E+05
Rb-87	2.30E+00	4.25E+05	1.00E+06	1.25E+06	1.25E+06
Mo-93	5.79E+01	3.50E+04	7.25E+04		
Zr-93	5.79E+01	1.25E+07	2.25E+07	2.75E+07	2.75E+07
Nb-94	5.79E+01				
Tc-99	5.79E+01	2.50E+05	4.50E+05	4.75E+05	4.75E+05
Pd-107	5.79E+01	9.75E+04	2.25E+05	2.75E+05	2.75E+05
Sn-126	5.79E+01	2.00E+05	4.75E+05	5.50E+05	5.50E+05
I-129	3.63E+01	1.75E+04	4.25E+04	4.75E+04	4.75E+04
Cs-135	3.63E+01	8.00E+06	1.50E+07	1.75E+07	1.75E+07
<b>Aktiniden</b>					
Pu-240	6.46E+02				
U-236	6.84E+03	1.25E+06	2.75E+06	3.25E+06	3.25E+06
Th-232	5.79E+01	3.25E+07	6.00E+07	6.75E+07	6.75E+07
Np-237	3.90E+03	8.00E+06	1.75E+07	2.00E+07	2.00E+07
U-233	7.85E+04	5.25E+06	1.25E+07	1.50E+07	1.50E+07
Th-229	1.13E+05	5.25E+06	1.25E+07	1.50E+07	1.50E+07
U-238	6.46E+02	1.25E+06	2.75E+06	3.00E+06	3.00E+06
U-234	6.46E+02	1.25E+06	2.75E+06	3.00E+06	3.00E+06
Th-230	5.45E+04	1.25E+06	2.75E+06	3.00E+06	3.00E+06
Ra-226	1.55E+01	1.25E+06	2.75E+06	3.00E+06	3.00E+06
Pu-239	6.46E+02				
U-235	6.46E+02	1.25E+06	2.75E+06	3.00E+06	3.00E+06
Pa-231	4.15E+04	1.25E+06	2.75E+06	3.00E+06	3.00E+06

Tabelle 4-6: Zeitpunkte [a] der maximalen Aktivitätskonzentrationen an ausgewählten Punkten im Rechenfall R16

Nuklid	Abfluss Endlager	Grenze Schacht / Oberkreide	Grenze Oberkreide / Quartär	Quartär
<b>Spalt- und Aktivierungsprodukte</b>				
C-14	5.98E+07	1.22E-20		
Cl-36	1.67E+05	4.95E+00	2.71E+00	2.71E-01
Ca-41	2.32E+05	5.29E+00	2.81E+00	2.81E-01
Ni-59	1.32E+08	9.11E-02	4.11E-03	4.11E-04
Se-79	1.24E+05	1.33E-01	6.16E-02	6.16E-03
Rb-87	1.93E-02	3.15E-07	1.74E-07	1.74E-08
Mo-93	3.45E+01	7.77E-08	6.97E-10	6.97E-11
Zr-93	1.68E+03	4.73E-05	2.27E-13	2.27E-14
Nb-94	1.50E+00	0.00E+00		
Tc-99	1.42E+07	9.79E+01	4.74E+01	4.74E+00
Pd-107	9.99E+00	2.07E-04	1.04E-04	1.04E-05
Sn-126	1.45E+05	4.89E-01	7.47E-04	7.47E-05
I-129	1.05E+06	3.56E+01	1.97E+01	1.97E+00
Cs-135	4.16E+03	7.48E-04	2.10E-04	2.10E-05
<b>Aktiniden</b>				
Pu-240	1.31E+06	0.00E+00		
U-236	4.26E+04	2.89E-01	1.59E-01	1.59E-02
Th-232	1.08E+02	3.01E-02	1.24E-02	1.24E-03
Np-237	7.83E+03	1.14E-03	2.14E-04	2.14E-05
U-233	7.38E+03	4.33E-03	7.57E-04	7.57E-05
Th-229	3.90E+01	1.09E-03	2.66E-06	2.66E-07
U-238	7.69E+04	4.62E-01	2.56E-01	2.56E-02
U-234	2.26E+05	4.62E-01	2.56E-01	2.56E-02
Th-230	2.37E+02	1.16E-01	8.99E-04	8.99E-05
Ra-226	6.94E+05	3.00E+00	1.67E-01	1.67E-02
Pu-239	1.32E+06	0.00E+00		
U-235	8.13E+03	6.40E-02	3.55E-02	3.55E-03
Pa-231	2.85E+01	1.29E-03	9.38E-05	9.38E-06

Tabelle 4-7: Maximale Aktivitätskonzentrationen [Bq/m<sup>3</sup>] an ausgewählten Punkten im Rechenfall R35 (Referenzfall Schachtverschluss)

Nuklid	Abfluss Endlager	Grenze Schacht / Oberkreide	Grenze Oberkreide / Quartär	Quartär
<b>Spalt- und Aktivierungsprodukte</b>				
C-14	5.79E+01	4.00E+05		
Cl-36	1.55E+01	4.50E+04	5.00E+04	5.00E+04
Ca-41	1.55E+01	4.00E+04	4.50E+04	4.50E+04
Ni-59	5.79E+01	5.75E+05	8.25E+05	8.25E+05
Se-79	5.79E+01	1.50E+05	1.50E+05	1.50E+05
Rb-87	2.30E+00	5.50E+05	6.75E+05	6.75E+05
Mo-93	5.79E+01	2.75E+04	4.50E+04	4.50E+04
Zr-93	5.79E+01	9.50E+06	3.25E+07	3.25E+07
Nb-94	5.79E+01			
Tc-99	5.79E+01	2.00E+05	2.50E+05	2.50E+05
Pd-107	5.79E+01	1.50E+05	3.00E+05	3.00E+05
Sn-126	5.79E+01	1.75E+05	7.50E+05	7.50E+05
I-129	3.63E+01	5.00E+04	5.50E+04	5.50E+04
Cs-135	3.63E+01	8.50E+06	1.00E+07	1.00E+07
<b>Aktiniden</b>				
Pu-240	6.46E+02			
U-236	6.84E+03	8.50E+06	9.00E+06	9.00E+06
Th-232	5.79E+01	4.50E+08	1.50E+08	1.50E+08
Np-237	3.90E+03	9.25E+06	1.25E+07	1.25E+07
U-233	7.85E+04	8.75E+06	9.00E+06	9.00E+06
Th-229	1.13E+05	8.75E+06	9.00E+06	9.00E+06
U-238	6.46E+02	1.00E+07	1.00E+07	1.00E+07
U-234	6.46E+02	1.00E+07	1.00E+07	1.00E+07
Th-230	5.45E+04	1.00E+07	1.00E+07	1.00E+07
Ra-226	1.55E+01	1.00E+07	1.00E+07	1.00E+07
Pu-239	6.46E+02			
U-235	6.46E+02	1.00E+07	1.00E+07	1.00E+07
Pa-231	4.15E+04	1.00E+07	1.00E+07	1.00E+07

Tabelle 4-8: Zeitpunkte [a] der maximalen Aktivitätskonzentrationen an ausgewählten Punkten im Rechenfall R35 (Referenzfall Schachtverschluss)

Nuklid	Abfluss Endlager	Grenze Oxford / Kimmeridge	Grenze Kimmeridge / Unterkreide	Grenze Alb / Oberkreide	Grenze Oberkreide / Quartär	Quartär
<b>Spalt- und Aktivierungsprodukte</b>						
C-14	5.80E+07	5.42E+07	1.91E+07	8.30E+00	8.77E-14	6.26E-14
Cl-36	1.61E+05	1.51E+05	1.15E+05	2.32E+04	5.68E+03	4.06E+03
Ca-41	2.25E+05	2.12E+05	1.61E+05	3.21E+04	7.60E+03	5.43E+03
Ni-59	1.29E+08	1.16E+08	8.28E+07	1.87E+07	8.84E+05	6.31E+05
Se-79	1.21E+05	1.12E+05	8.09E+04	7.34E+03	1.41E+03	1.01E+03
Rb-87	1.87E-02	1.67E-02	1.14E-02	1.80E-03	9.79E-04	6.99E-04
Mo-93	3.34E+01	3.03E+01	1.98E+01	1.82E+00	1.37E-10	9.79E-11
Zr-93	1.63E+03	1.48E+03	1.11E+03	1.26E+02	1.14E-04	8.14E-05
Nb-94	1.46E+00	9.38E-01	6.94E-02	0.00E+00		
Tc-99	1.38E+07	1.22E+07	8.89E+06	1.30E+06	5.72E+04	4.09E+04
Pd-107	9.69E+00	8.94E+00	6.36E+00	1.11E+00	1.45E-01	1.04E-01
Sn-126	1.41E+05	1.27E+05	8.72E+04	1.35E+04	9.26E+02	6.61E+02
I-129	1.02E+06	9.72E+05	7.44E+05	1.50E+05	3.72E+04	2.66E+04
Cs-135	4.04E+03	3.57E+03	2.54E+03	2.22E+02	1.77E+01	1.26E+01
<b>Aktiniden</b>						
Pu-240	1.26E+06	8.20E+05	3.91E+04	0.00E+00		
U-236	4.14E+04	4.31E+04	3.67E+04	3.24E+03	1.01E+03	7.21E+02
Th-232	1.05E+02	1.04E+02	1.00E+02	4.38E+01	1.90E+01	1.36E+01
Np-237	7.60E+03	7.01E+03	5.13E+03	5.58E+02	3.09E+01	2.21E+01
U-233	7.17E+03	7.14E+03	6.95E+03	1.51E+03	3.83E+02	2.74E+02
Th-229	3.79E+01	8.41E+01	3.12E+01	3.81E+02	2.02E+01	1.44E+01
U-238	7.45E+04	6.91E+04	5.26E+04	3.94E+03	1.23E+03	8.79E+02
U-234	2.20E+05	2.04E+05	1.54E+05	8.30E+03	1.78E+03	1.27E+03
Th-230	2.30E+02	3.21E+02	9.67E+02	1.57E+03	9.40E+01	6.71E+01
Ra-226	6.73E+05	4.47E+05	1.20E+04	4.06E+04	1.16E+03	8.29E+02
Pu-239	1.28E+06	8.30E+05	2.55E+04	4.37E-12		
U-235	7.89E+03	7.38E+03	5.38E+03	5.13E+02	1.67E+02	1.19E+02
Pa-231	2.76E+01	2.48E+01	1.50E+01	9.13E+00	4.41E-01	3.15E-01

Tabelle 4-9: Maximale Aktivitätskonzentrationen [Bq/m<sup>3</sup>] an ausgewählten Punkten im Rechenfall R38

Nuklid	Abfluss Endlager	Grenze Oxford / Kimmeridge	Grenze Kimmeridge / Unterkreide	Grenze Alb / Oberkreide	Grenze Oberkreide / Quartär	Quartär
<b>Spalt- und Aktivierungsprodukte</b>						
C-14	5.79E+01	1.50E+02	2.25E+03	6.50E+04	2.00E+05	2.00E+05
Cl-36	1.55E+01	5.50E+01	3.50E+02	1.50E+03	7.00E+03	7.00E+03
Ca-41	1.55E+01	5.25E+01	3.25E+02	1.50E+03	6.75E+03	6.75E+03
Ni-59	5.79E+01	2.25E+02	1.00E+03	1.25E+04	8.00E+04	8.00E+04
Se-79	5.79E+01	9.75E+01	4.50E+02	6.25E+03	2.25E+04	2.25E+04
Rb-87	2.30E+00	2.50E+02	1.25E+03	1.50E+04	1.75E+04	1.75E+04
Mo-93	5.79E+01	1.00E+02	5.00E+02	3.50E+03	7.75E+04	7.75E+04
Zr-93	5.79E+01	2.25E+04	9.25E+04	9.50E+05	2.25E+07	2.25E+07
Nb-94	5.79E+01	1.00E+02	2.00E+04			
Tc-99	5.79E+01	1.75E+02	7.25E+02	7.25E+03	2.25E+05	2.25E+05
Pd-107	5.79E+01	1.00E+02	5.50E+02	4.00E+03	3.25E+04	3.25E+04
Sn-126	5.79E+01	2.00E+02	9.50E+02	8.75E+03	7.50E+04	7.50E+04
I-129	3.63E+01	6.25E+01	3.50E+02	1.50E+03	7.00E+03	7.00E+03
Cs-135	3.63E+01	6.25E+03	2.75E+04	5.00E+05	2.50E+06	2.50E+06
<b>Aktiniden</b>						
Pu-240	6.46E+02	6.75E+02	2.00E+03			
U-236	6.84E+03	8.00E+03	1.25E+04	2.00E+05	5.25E+05	5.25E+05
Th-232	5.79E+01	6.00E+06	6.00E+06	6.50E+07	1.00E+07	1.00E+07
Np-237	3.90E+03	1.00E+04	5.00E+04	6.50E+05	3.50E+06	3.50E+06
U-233	7.85E+04	8.00E+04	8.75E+04	4.25E+05	2.25E+06	2.25E+06
Th-229	1.13E+05	1.00E+05	1.00E+05	4.25E+05	2.25E+06	2.25E+06
U-238	6.46E+02	1.50E+03	6.00E+03	2.00E+05	5.25E+05	5.25E+05
U-234	6.46E+02	1.50E+03	5.75E+03	2.00E+05	5.00E+05	5.00E+05
Th-230	5.45E+04	4.25E+04	3.75E+04	2.75E+05	5.00E+05	5.00E+05
Ra-226	1.55E+01	1.75E+04	3.75E+04	2.75E+05	5.00E+05	5.00E+05
Pu-239	6.46E+02	1.75E+03	4.00E+04	7.50E+05		
U-235	6.46E+02	2.00E+03	9.50E+03	2.00E+05	5.25E+05	5.25E+05
Pa-231	4.15E+04	4.50E+04	4.50E+04	2.50E+05	5.25E+05	5.25E+05

Tabelle 4-10: Zeitpunkte [a] der maximalen Aktivitätskonzentrationen an ausgewählten Punkten im Rechenfall R38

Nuklid	Abfluss Endlager	Grenze Oxford / Kimmeridge	Grenze Kimmeridge / Unterkreide	Grenze Alb / Oberkreide	Grenze Oberkreide / Quartär	Quartär
<b>Spalt- und Aktivierungsprodukte</b>						
C-14	4.50E+07	4.37E+07	3.12E+07	1.90E+06	2.05E-08	2.05E-08
Cl-36	1.25E+05	1.22E+05	1.12E+05	8.15E+04	1.93E+04	1.93E+04
Ca-41	1.75E+05	1.70E+05	1.56E+05	1.14E+05	2.61E+04	2.61E+04
Ni-59	9.98E+07	9.50E+07	8.55E+07	5.76E+07	3.40E+06	3.40E+06
Se-79	9.36E+04	9.06E+04	8.21E+04	5.03E+04	5.97E+03	5.97E+03
Rb-87	1.45E-02	1.37E-02	1.21E-02	8.44E-03	7.14E-03	7.14E-03
Mo-93	2.59E+01	2.49E+01	2.19E+01	1.45E+01	8.82E-10	8.82E-10
Zr-93	1.27E+03	1.20E+03	1.10E+03	7.67E+02	5.24E-04	5.24E-04
Nb-94	1.13E+00	9.61E-01	4.87E-01	1.07E-07	0.00E+00	
Tc-99	1.07E+07	1.01E+07	9.15E+06	6.27E+06	1.74E+05	1.74E+05
Pd-107	7.52E+00	7.28E+00	6.54E+00	4.64E+00	4.57E-01	4.57E-01
Sn-126	1.09E+05	1.04E+05	9.23E+04	6.39E+04	3.15E+03	3.15E+03
I-129	7.90E+05	7.76E+05	7.19E+05	5.27E+05	1.26E+05	1.26E+05
Cs-135	3.13E+03	2.94E+03	2.65E+03	1.65E+03	7.65E+01	7.65E+01
<b>Aktiniden</b>						
Pu-240	9.82E+05	8.36E+05	4.25E+05	9.92E-04	0.00E+00	
U-236	3.21E+04	3.40E+04	3.28E+04	2.22E+04	4.76E+03	4.76E+03
Th-232	8.14E+01	8.13E+01	8.06E+01	6.88E+01	5.84E+01	5.84E+01
Np-237	5.90E+03	5.69E+03	5.16E+03	3.47E+03	1.37E+02	1.37E+02
U-233	5.57E+03	5.55E+03	5.53E+03	4.80E+03	1.59E+03	1.59E+03
Th-229	2.94E+01	4.32E+01	9.98E+01	1.17E+03	8.40E+01	8.40E+01
U-238	5.79E+04	5.58E+04	5.13E+04	2.95E+04	5.78E+03	5.78E+03
U-234	1.70E+05	1.65E+05	1.52E+05	8.35E+04	1.05E+04	1.05E+04
Th-230	1.78E+02	2.04E+02	3.27E+02	5.94E+03	5.55E+02	5.55E+02
Ra-226	5.22E+05	4.72E+05	3.39E+05	9.89E+04	6.86E+03	6.86E+03
Pu-239	9.91E+05	8.44E+05	3.00E+05	5.34E+01	0.00E+00	
U-235	6.13E+03	5.93E+03	5.38E+03	3.37E+03	7.95E+02	7.95E+02
Pa-231	2.15E+01	2.06E+01	1.73E+01	3.74E+01	2.10E+00	2.10E+00

Tabelle 4-11: Maximale Aktivitätskonzentrationen [Bq/m<sup>3</sup>] an ausgewählten Punkten im Rechenfall R39/1

Nuklid	Abfluss Endlager	Grenze Oxford / Kimmeridge	Grenze Kimmeridge / Unterkreide	Grenze Alb / Oberkreide	Grenze Oberkreide / Quartär	Quartär
<b>Spalt- und Aktivierungsprodukte</b>						
C-14	5.79E+01	6.75E+01	6.50E+02	1.50E+04	1.50E+05	1.50E+05
Cl-36	1.55E+01	3.00E+01	9.00E+01	2.25E+02	5.25E+03	5.25E+03
Ca-41	1.55E+01	2.50E+01	9.00E+01	2.25E+02	5.25E+03	5.25E+03
Ni-59	5.79E+01	1.25E+02	3.50E+02	1.75E+03	6.25E+04	6.25E+04
Se-79	5.79E+01	7.25E+01	1.50E+02	8.00E+02	1.50E+04	1.50E+04
Rb-87	2.30E+00	1.25E+02	4.25E+02	1.75E+03	5.25E+03	5.25E+03
Mo-93	5.79E+01	6.75E+01	1.50E+02	5.00E+02	7.25E+04	7.25E+04
Zr-93	5.79E+01	1.00E+04	3.25E+04	1.50E+05	2.00E+07	2.00E+07
Nb-94	5.79E+01	8.00E+01	1.50E+02	2.75E+05		
Tc-99	5.79E+01	1.00E+02	2.25E+02	9.50E+02	2.00E+05	2.00E+05
Pd-107	5.79E+01	6.25E+01	1.75E+02	5.25E+02	2.50E+04	2.50E+04
Sn-126	5.79E+01	1.25E+02	3.00E+02	1.25E+03	6.25E+04	6.25E+04
I-129	3.63E+01	4.00E+01	9.50E+01	2.25E+02	5.25E+03	5.25E+03
Cs-135	3.63E+01	3.00E+03	8.75E+03	6.75E+04	2.00E+06	2.00E+06
<b>Aktiniden</b>						
Pu-240	6.46E+02	6.50E+02	6.75E+02	1.00E+05		
U-236	6.84E+03	7.75E+03	8.50E+03	3.00E+04	3.25E+05	3.25E+05
Th-232	5.79E+01	6.00E+06	6.00E+06	6.00E+06	9.50E+06	9.50E+06
Np-237	3.90E+03	6.50E+03	1.75E+04	9.50E+04	1.75E+07	1.75E+07
U-233	7.85E+04	8.00E+04	8.00E+04	1.00E+05	8.50E+05	8.50E+05
Th-229	1.13E+05	1.00E+05	1.00E+05	1.25E+05	8.50E+05	8.50E+05
U-238	6.46E+02	9.75E+02	2.25E+03	2.50E+04	3.25E+05	3.25E+05
U-234	6.46E+02	9.75E+02	2.00E+03	2.50E+04	3.00E+05	3.00E+05
Th-230	5.45E+04	5.50E+04	4.00E+04	5.50E+04	3.00E+05	3.00E+05
Ra-226	1.55E+01	6.75E+01	3.00E+02	5.50E+04	3.00E+05	3.00E+05
Pu-239	6.46E+02	6.75E+02	1.00E+04	2.50E+05		
U-235	6.46E+02	1.25E+03	3.25E+03	2.75E+04	3.25E+05	3.25E+05
Pa-231	4.15E+04	4.25E+04	4.75E+04	7.25E+04	3.25E+05	3.25E+05

Tabelle 4-12: Zeitpunkte [a] der maximalen Aktivitätskonzentrationen an ausgewählten Punkten im Rechenfall R39/1

Nuklid	R34	R34 mit limitierter Matrixdiffusion	R16
<b>Spalt- und Aktivierungsprodukte</b>			
C-14	0.0	0.0	0.0
Cl-36	2.83E-04	3.22E-04	6.14E+01
Ca-41	4.89E-05	5.10E-05	6.38E+01
Ni-59	0.0	0.0	6.70E-01
Se-79	1.00E-08	1.00E-08	4.44E+00
Rb-87	2.19E-11	1.12E-10	1.66E-06
Mo-93	0.0	0.0	0.0
Zr-93	0.0	0.0	6.04E-09
Nb-94	0.0	0.0	0.0
Tc-99	6.70E-09	6.85E-09	2.51E+02
Pd-107	1.68E-09	2.58E-09	1.37E-03
Sn-126	0.0	0.0	2.22E-01
I-129	4.49E-03	1.13E-02	4.42E+02
Cs-135	2.34E-17	2.34E-17	5.77E-04
<b>Aktiniden</b>			
Pu-240	0.0	0.0	0.0
U-236	5.75E-05	6.90E-05	1.37E+01
Th-232	8.95E-10	1.25E-09	2.28E-01
Np-237	0.0	0.0	2.68E-04
U-233	0.0	0.0	9.36E-03
Th-229	0.0	0.0	4.94E-04
U-238	1.51E-04	3.52E-04	1.82E+01
U-234	1.51E-04	3.52E-04	1.82E+01
Th-230	5.35E-07	1.23E-06	9.60E-01
Ra-226	9.85E-05	2.30E-04	1.19E+01
Pb-210	9.94E-06	2.32E-05	7.98E+00
Pu-239	0.0	0.0	0.0
U-235	2.06E-05	3.86E-05	2.54E+00
Pa-231	5.45E-08	1.02E-07	6.70E-03
Ac-227	9.04E-07	1.69E-06	1.34E-01

Tabelle 4-13: Maximale Aktivitätskonzentrationen [Bq/m<sup>3</sup>] im Quartär in den Rechenfällen "Tiefbohrungen"

Nuklid	R35	R38	R39/1	R39/2
Spalt- und Aktivierungsprodukte				
C-14	0.0	6.26E-14	2.05E-08	1.90E+06
Cl-36	2.71E-01	4.06E+03	1.93E+04	8.15E+04
Ca-41	2.81E-01	5.43E+03	2.61E+04	1.14E+05
Ni-59	4.11E-04	6.31E+05	3.40E+06	5.76E+07
Se-79	6.16E-03	1.01E+03	5.97E+03	5.03E+04
Rb-87	1.74E-08	6.99E-04	7.14E-03	8.44E-03
Mo-93	6.97E-11	9.79E-11	8.82E-10	1.45E+01
Zr-93	2.27E-14	8.14E-05	5.24E-04	7.67E+02
Nb-94	0.0	0.0	0.0	1.07E-07
Tc-99	4.74E+00	4.09E+04	1.74E+05	6.27E+06
Pd-107	1.04E-05	1.04E-01	4.57E-01	4.64E+00
Sn-126	7.47E-05	6.61E+02	3.15E+03	6.39E+04
I-129	1.97E+00	2.66E+04	1.26E+05	5.27E+05
Cs-135	2.10E-05	1.26E+01	7.65E+01	1.65E+03
Aktiniden				
Pu-240	0.0	0.0	0.0	9.92E-04
U-236	1.59E-02	7.21E+02	4.76E+03	2.22E+04
Th-232	1.24E-03	1.36E+01	5.84E+01	6.88E+01
Np-237	2.14E-05	2.21E+01	1.37E+02	3.47E+03
U-233	7.57E-05	2.74E+02	1.59E+03	4.80E+03
Th-229	2.66E-07	1.44E+01	8.40E+01	1.17E+03
U-238	2.56E-02	8.79E+02	5.78E+03	2.95E+04
U-234	2.56E-02	1.27E+03	1.05E+04	8.35E+04
Th-230	8.99E-05	6.71E+01	5.55E+02	5.94E+03
Ra-226	1.67E-02	8.29E+02	6.86E+03	9.89E+04
Pb-210	1.69E-03	5.23E+03	4.33E+04	6.24E+05
Pu-239	0.0	0.0	0.0	5.34E+01
U-235	3.55E-03	1.19E+02	7.95E+02	3.37E+03
Pa-231	9.38E-06	3.15E-01	2.10E+00	3.74E+01
Ac-227	1.56E-04	1.57E+01	1.05E+02	1.43E+03

Tabelle 4-14: Maximale Aktivitätskonzentrationen [Bq/m<sup>3</sup>] im Quartär in den Rechenfällen "Schachtverschluss"

<b>Fliesswege</b>	<b>R34</b>	<b>R16</b>	<b>R29</b>	<b>R35</b>	<b>R38</b>	<b>R39</b>
Grube -> Bohrung Bl. 1	4500	470	320	-	-	-
Schacht K.1 durch ox und jo	-	-	-	320	190	40
Bohrung Bl.1 durch kru und Alb	10	0,03	0,03	-	-	-
Schacht K.1 durch kru und Alb	-	-	-	15000	680	65
Basis kro -> Quartär	11	11	11	10	10	10/0,04*

\* Variante 1 / Variante 2

Tabelle 5-1: Fliesszeiten [a] entlang Abschnitten der Fliesswege

Zeit des Maximums	R34	R16	R35	R38	R39
.. an der Grenze Grube/ox	3,63 E1				
.. an der Grenze jo/kru (Bohrung Bleckenstedt 1)	3,75 E5	4,25 E4	-	-	-
.. an der Grenze jo/kru (Schacht Konrad 1)	-	-	-	3,50 E2	9,50 E1
.. an der Grenze Alb/kro (Bohrung Bleckenstedt 1)	4,25 E5	4,25 E4	-	-	-
.. an der Grenze Alb/kro (Schacht Konrad 1)	-	-	5,00 E4	1,50 E3	2,25 E2
.. im Quartär	4,25 E5	4,75 E4	5,50 E4	7,00 E3	5,25 E3* /2,25 E2

\* Variante 1 / Variante 2

Tabelle 5-2: Kumulierte Transportzeiten [a] bis zu den Hauptpunkten der berücksichtigten Fließwege für das Radionuklid I-129

Zeit des Maximums	R34	R16	R35	R38	R39
.. an der Grenze Grube/ox	6,46 E2				
.. an der Grenze jo/kru (Bohrung Bleckenstedt 1)	2,25 E7	2,75 E6	-	-	-
.. an der Grenze jo/kru (Schacht Konrad 1)	-	-	-	6,00 E3	2,25 E3
.. an der Grenze Alb/kro (Bohrung Bleckenstedt 1)	2,75 E7	2,75 E6	-	-	-
.. an der Grenze Alb/kro (Schacht Konrad 1)	-	-	1,00 E7	2,00 E5	2,50 E4
.. im Quartär	2,75 E7	3,00 E6	1,00 E7	5,25 E5	3,25 E5* /2,50 E4

\* Variante 1 / Variante 2

Tabelle 5-3: Kumulierte Transportzeiten [a] bis zu den Hauptpunkten der berücksichtigten Fließwege für das Radionuklid U-238

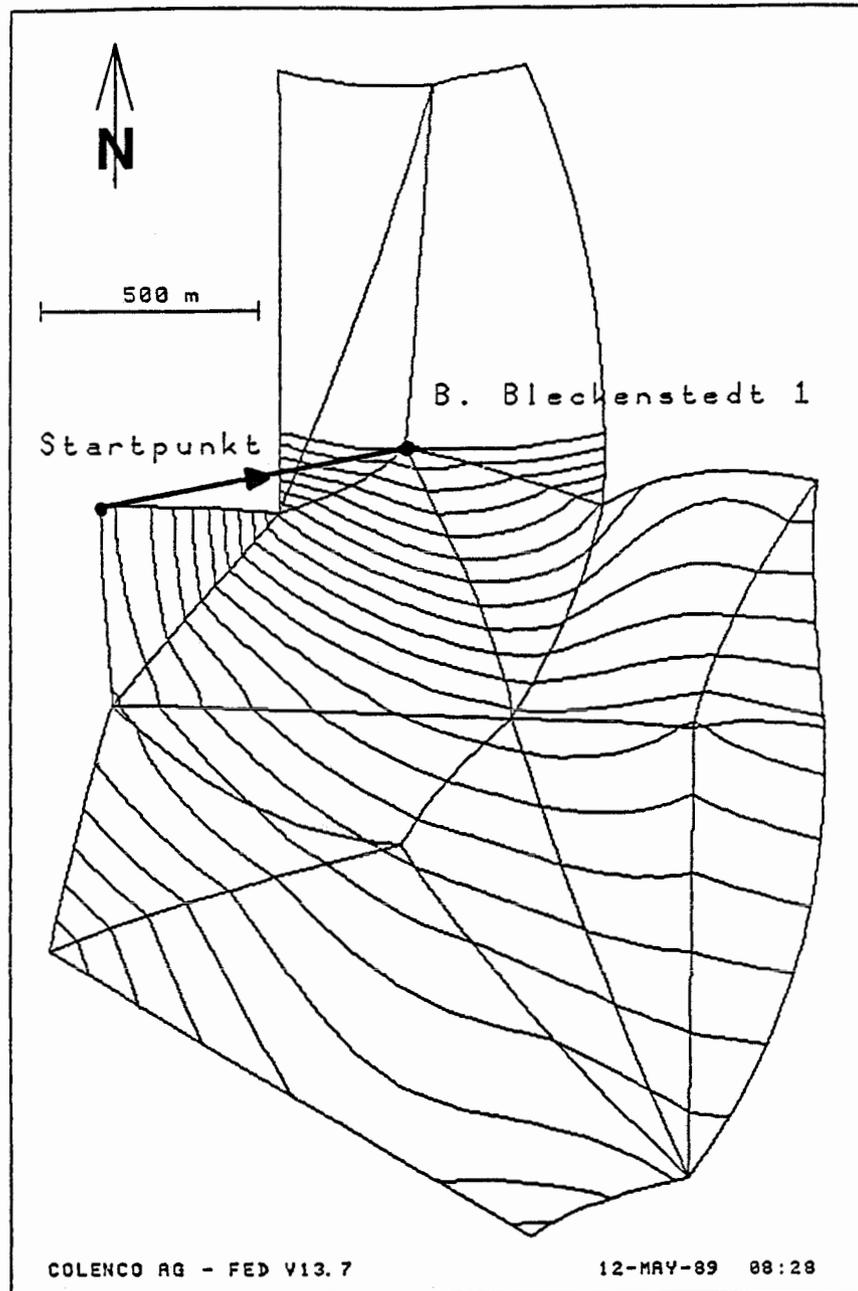


Abbildung 2-1: Rechenfall R34 (Referenzfall "Tiefbohrungen")  
Startpunkt und Verlauf des hypothetischen  
Fließweges zum Bohrloch Bleckenstedt 1

Dargestellt ist zudem das hydraulische Potentialfeld in der Grube südlich der Bohrung Bleckenstedt 1, Aequipotentialdifferenz: 0,2 mm

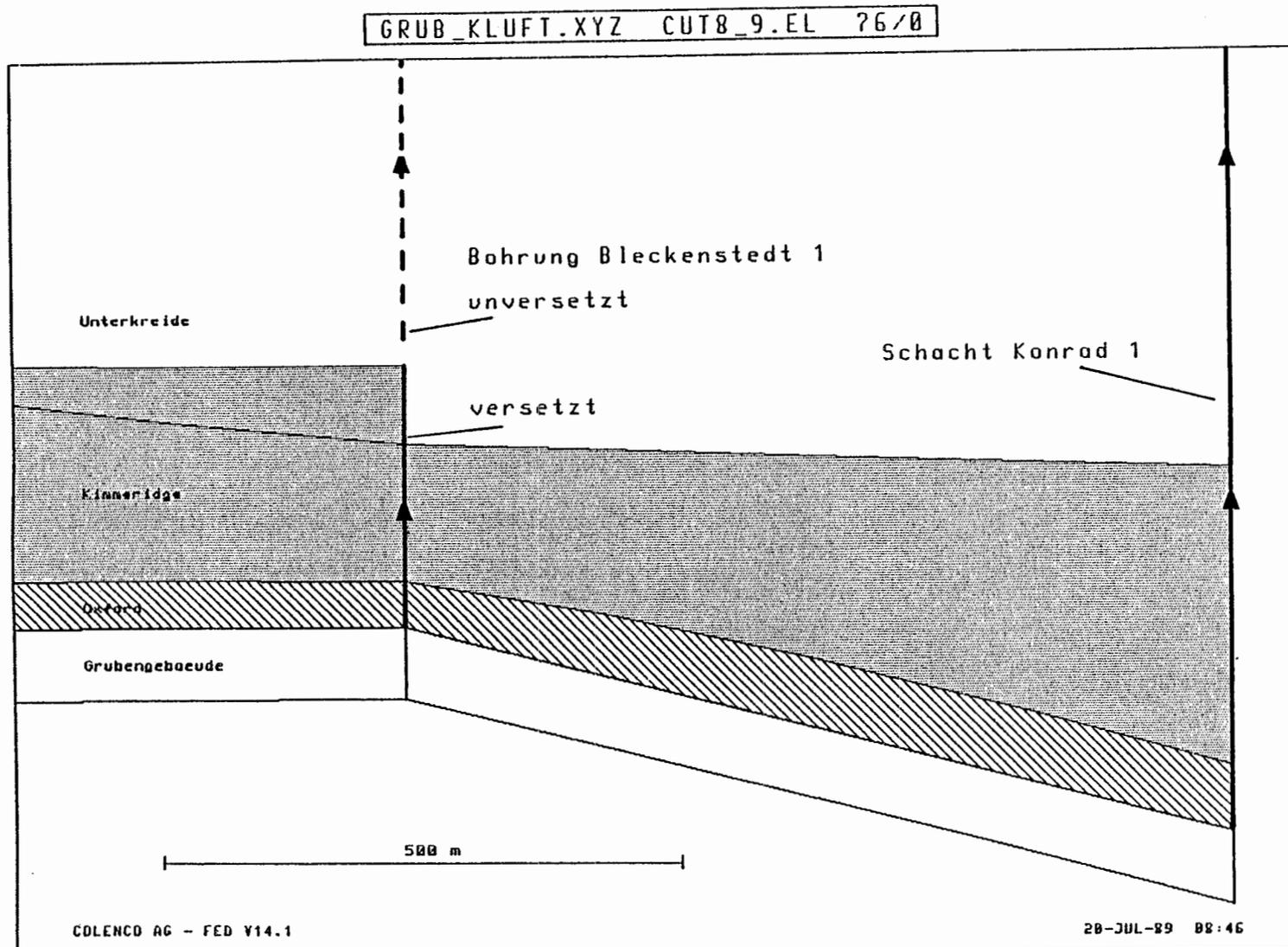


Abbildung 2-2: Verlauf der Fließwege vom Grubengebäude zum unversetzten Abschnitt der Bohrung Bleckenstedt 1 (R16) und im Schacht Konrad 1 durch Oxford, Kimmeridge und Unterkreide (R35, R38 und R39)

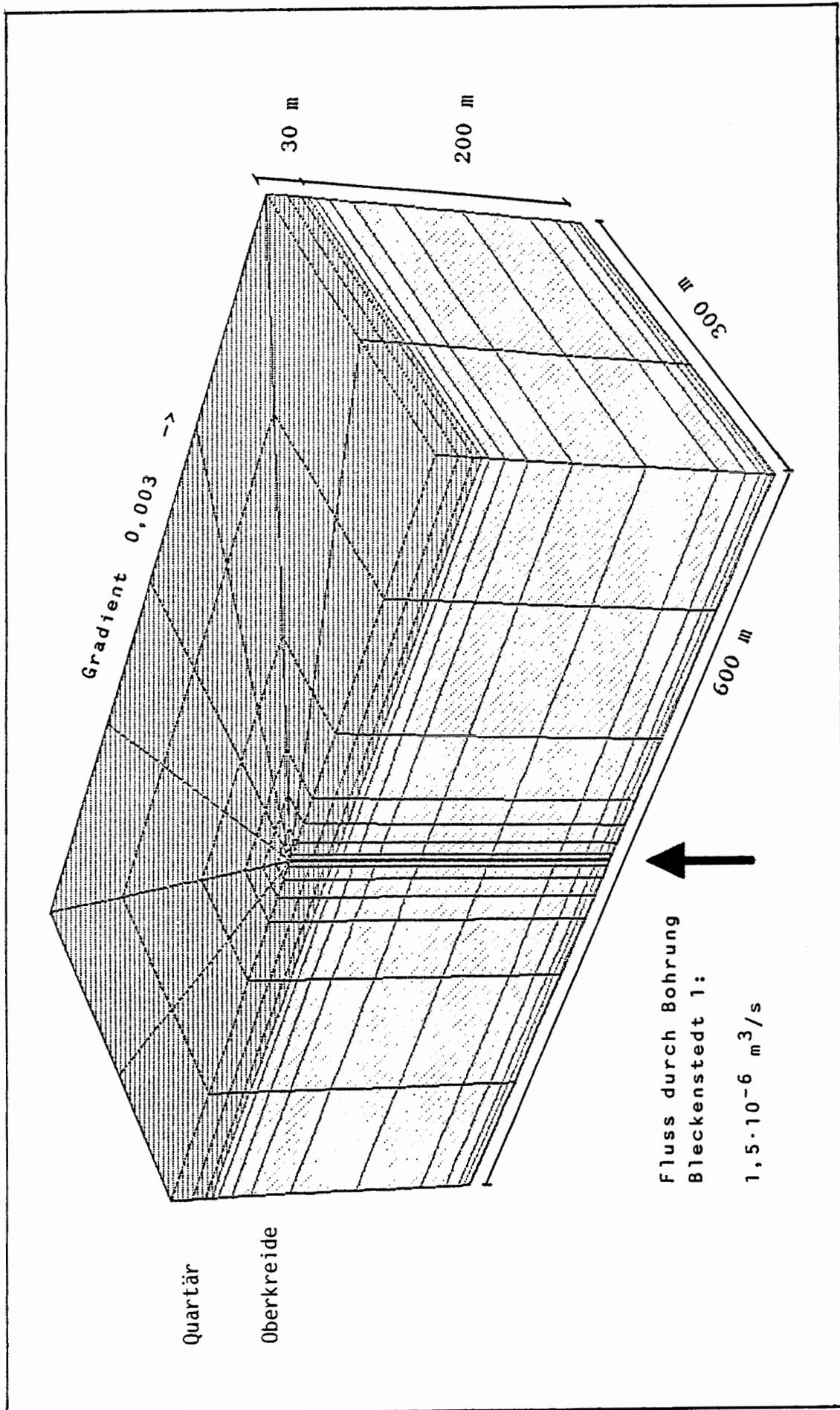


Abbildung 2-3: Lokales Modell Oberkreide am Beispiel des Rechenfalls R16

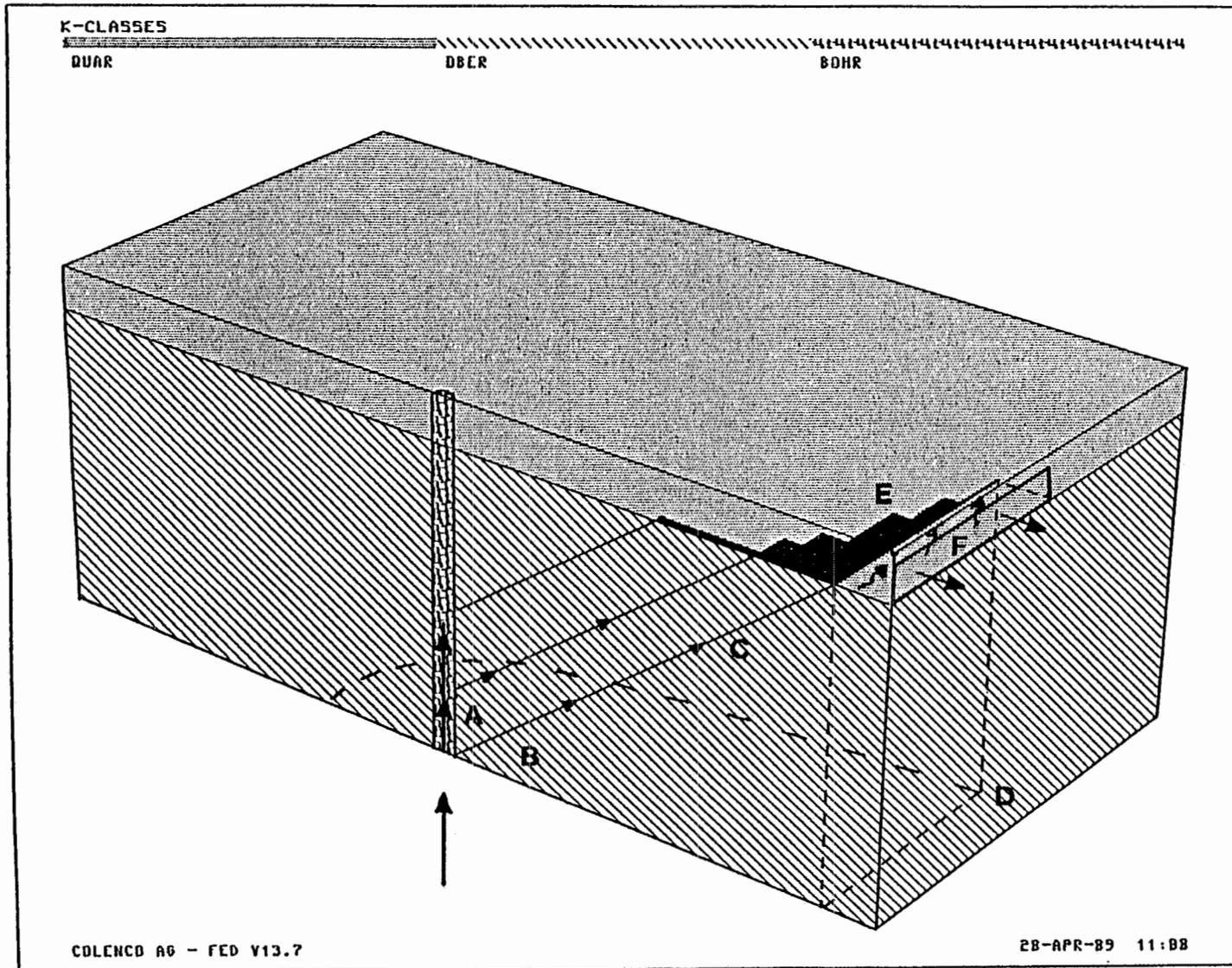


Abbildung 2-4: Ausbreitung des potentiell kontaminierten Wassers in der Oberkreide (schematisch)

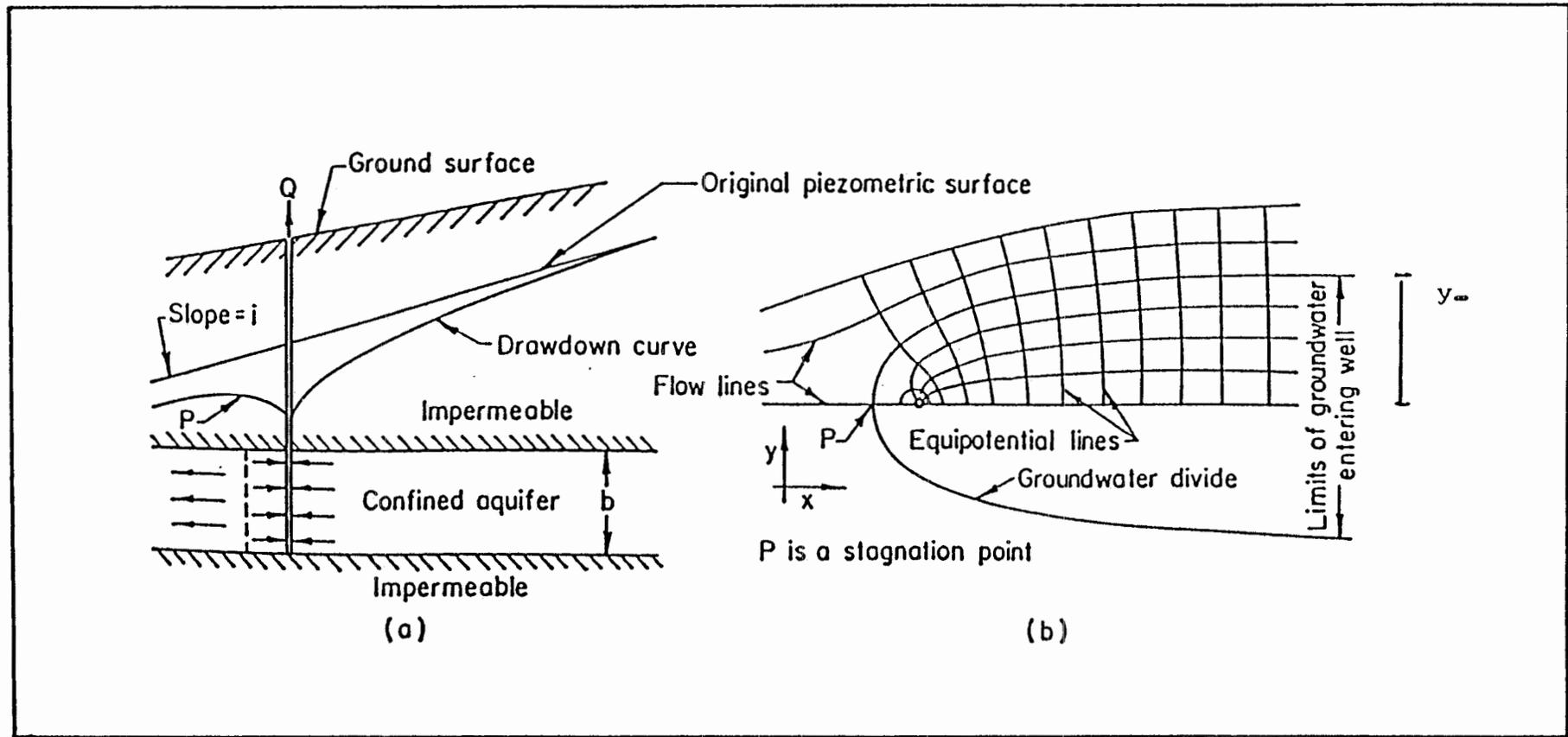


Abbildung 2-5: Einflussbereich eines Brunnens in einem Grundwasserleiter mit geneigtem Grundwasserspiegel nach [10]

(a) vertikaler Schnitt      (b) horizontaler Schnitt

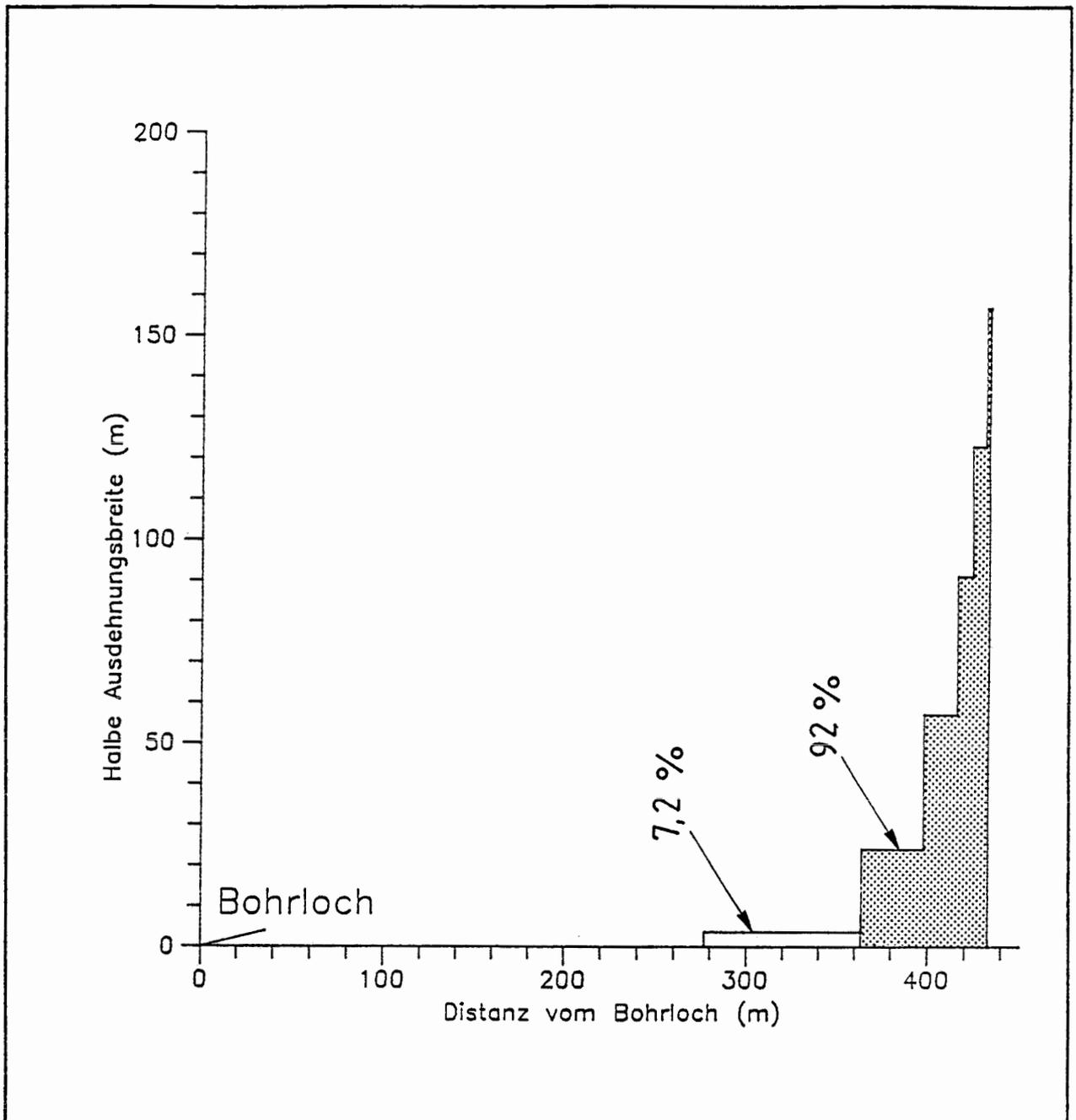


Abbildung 2-6: Rechenfall R16  
Austrittsfläche der kontaminierten Fahne an der  
Basis Quartär (halbe Fläche)

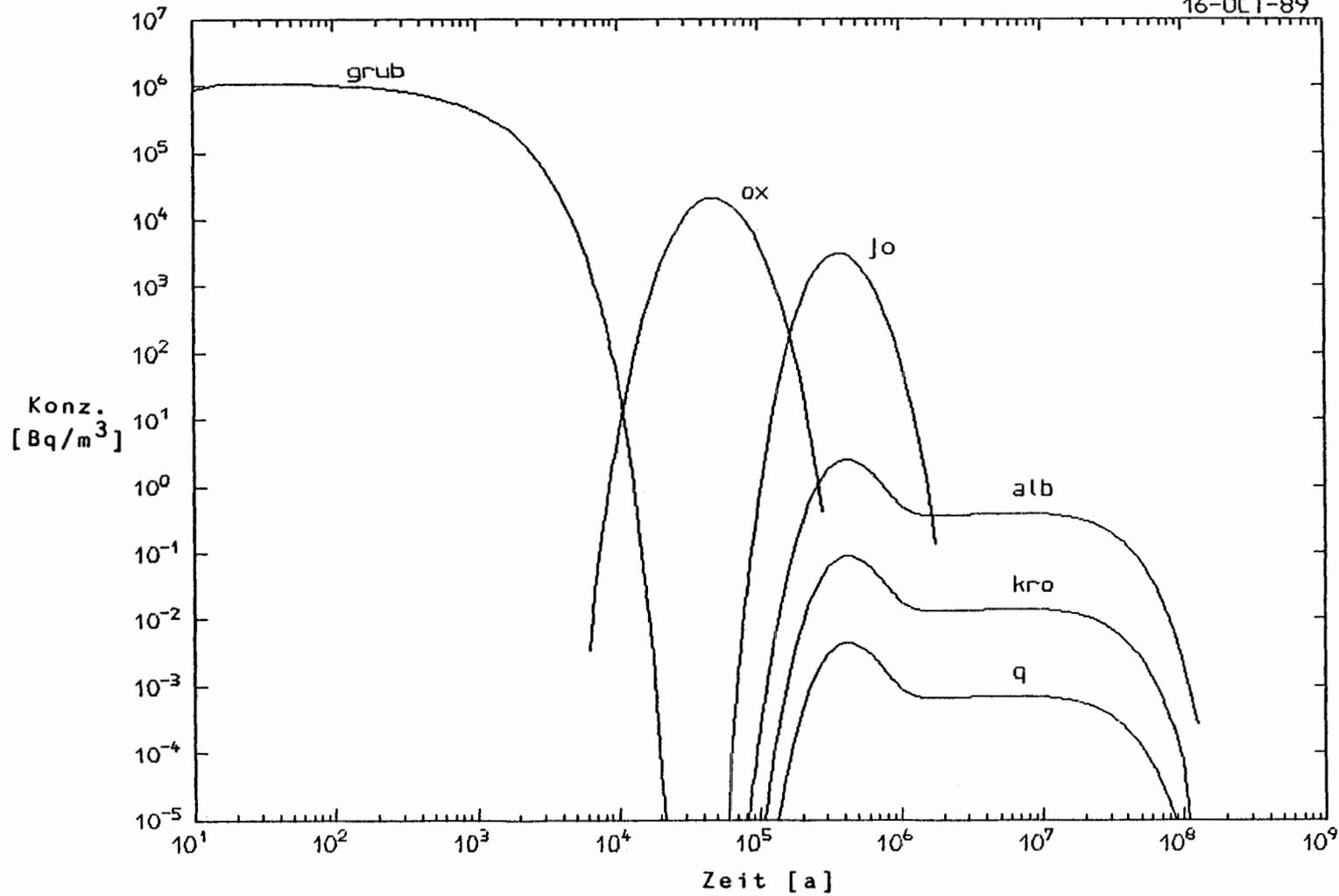


Abbildung 4-1: Rechenfall R34  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration von I-129 an den Hauptpunkten  
des Fließweges

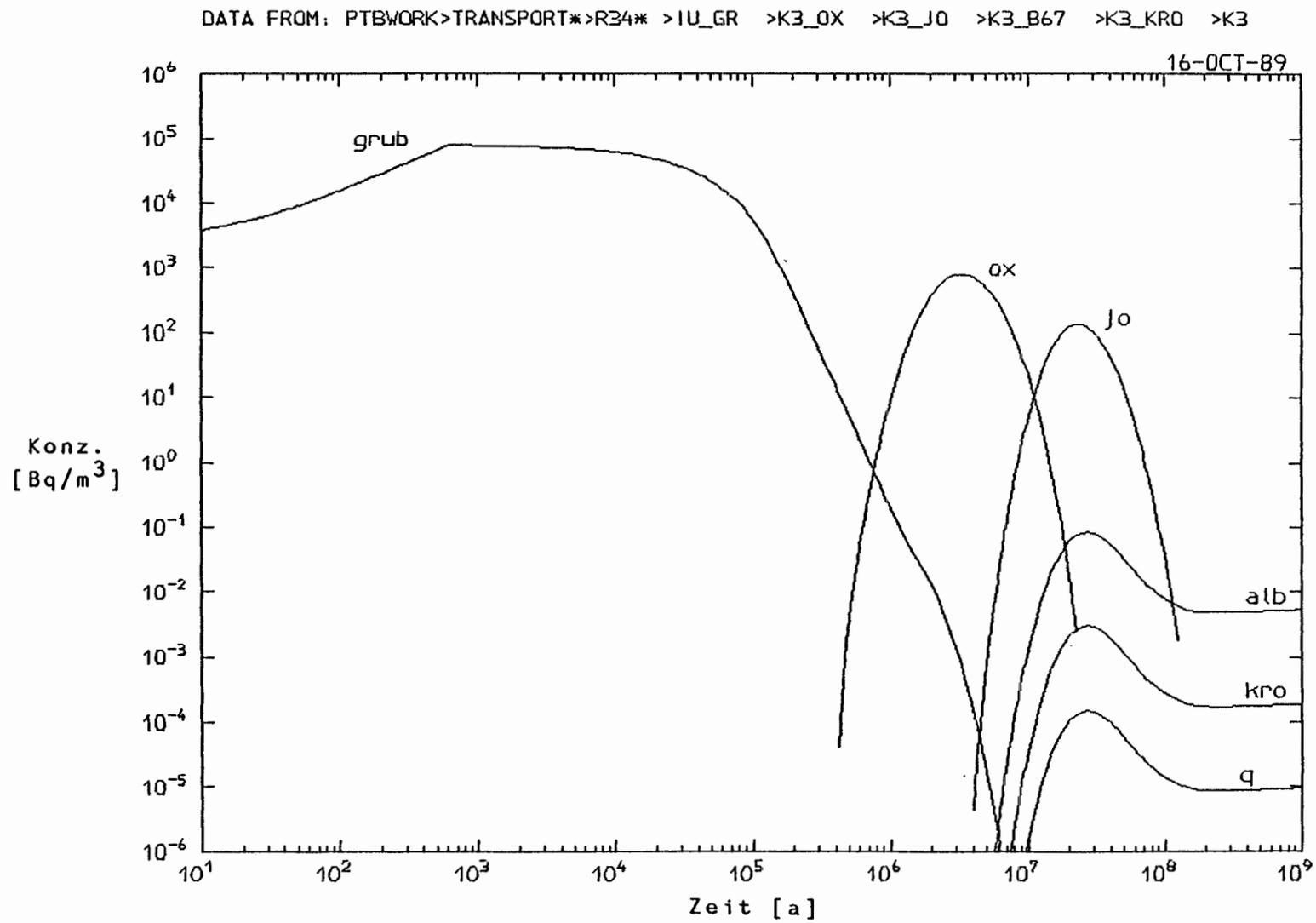


Abbildung 4-2: Rechenfall R34  
 Zeitliche Entwicklung der Konzentration von U-238 an den Hauptpunkten  
 des Fließweges

DATA FROM: PTBWORK>TRANSPORT\*>R34\* >FPA\_0 >FPB\_0 >FPC\_0

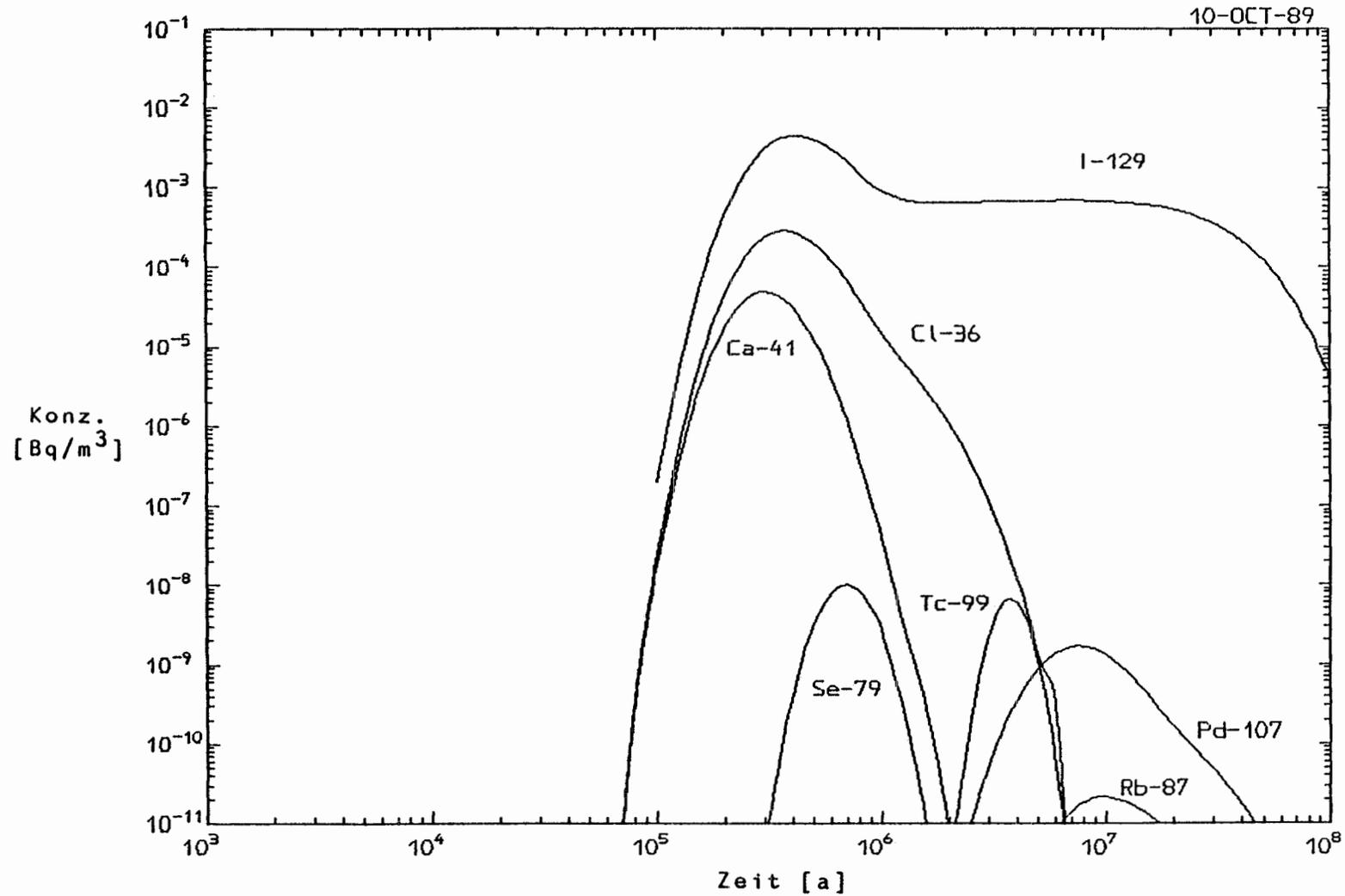


Abbildung 4-3: Rechenfall R34  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Spalt- und Aktivierungs-  
produkte im Quartär

DATA FROM: PTBWORK>TRANSPORT\*>R34\* >K1\_0 >K3\_0 >K4\_0

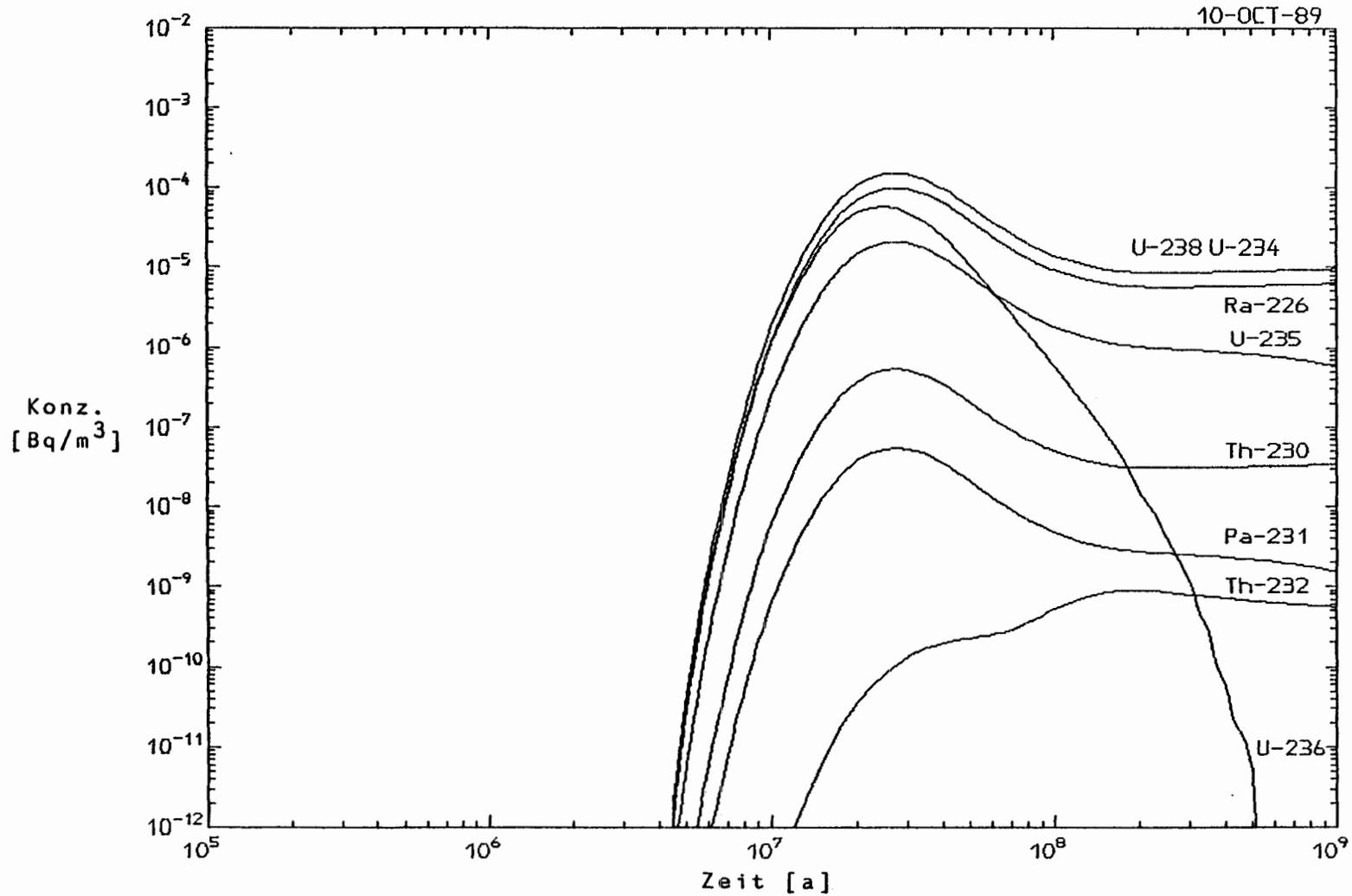


Abbildung 4-4: Rechenfall R34  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Aktiniden im Quartär

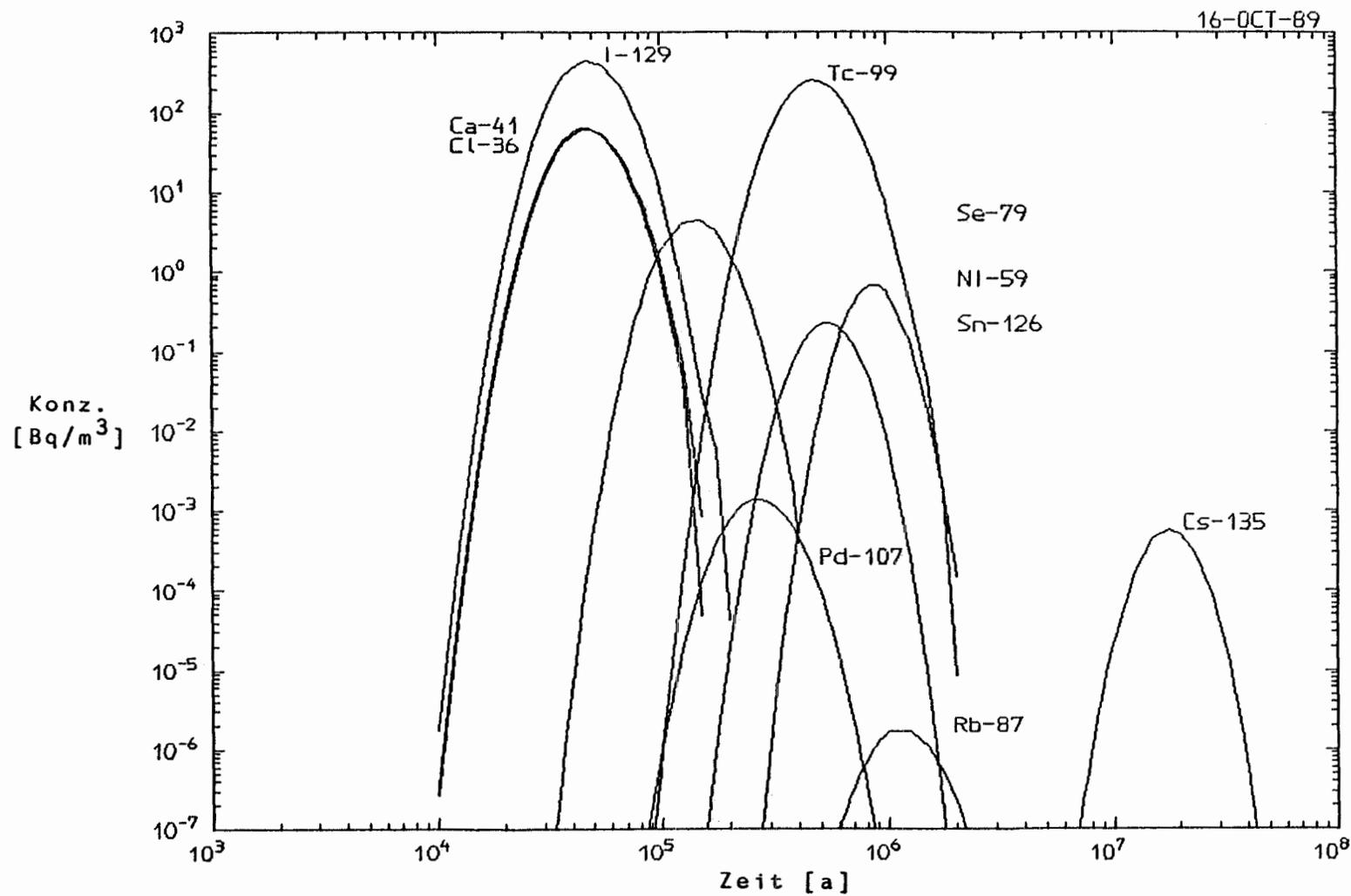


Abbildung 4-5: Rechenfall R16  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der  
Spalt- und Aktivierungsprodukte im Quartär

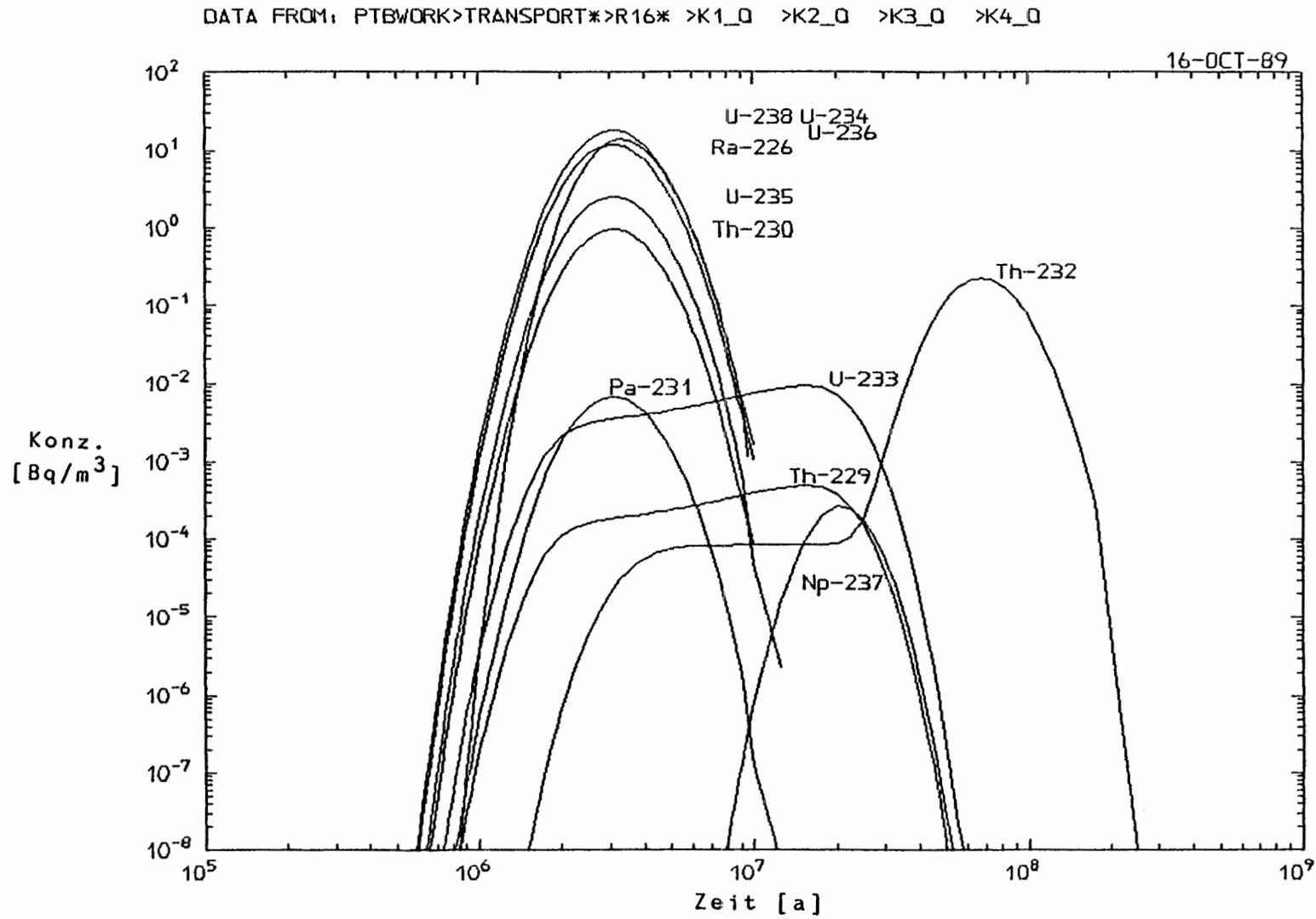


Abbildung 4-6: Rechenfall R16  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der  
Aktiniden im Quartär

DATA FROM: PTBWORK>TRANSPORT\*>R35\* >FPA\_0 >FPB\_0 >FPC\_0

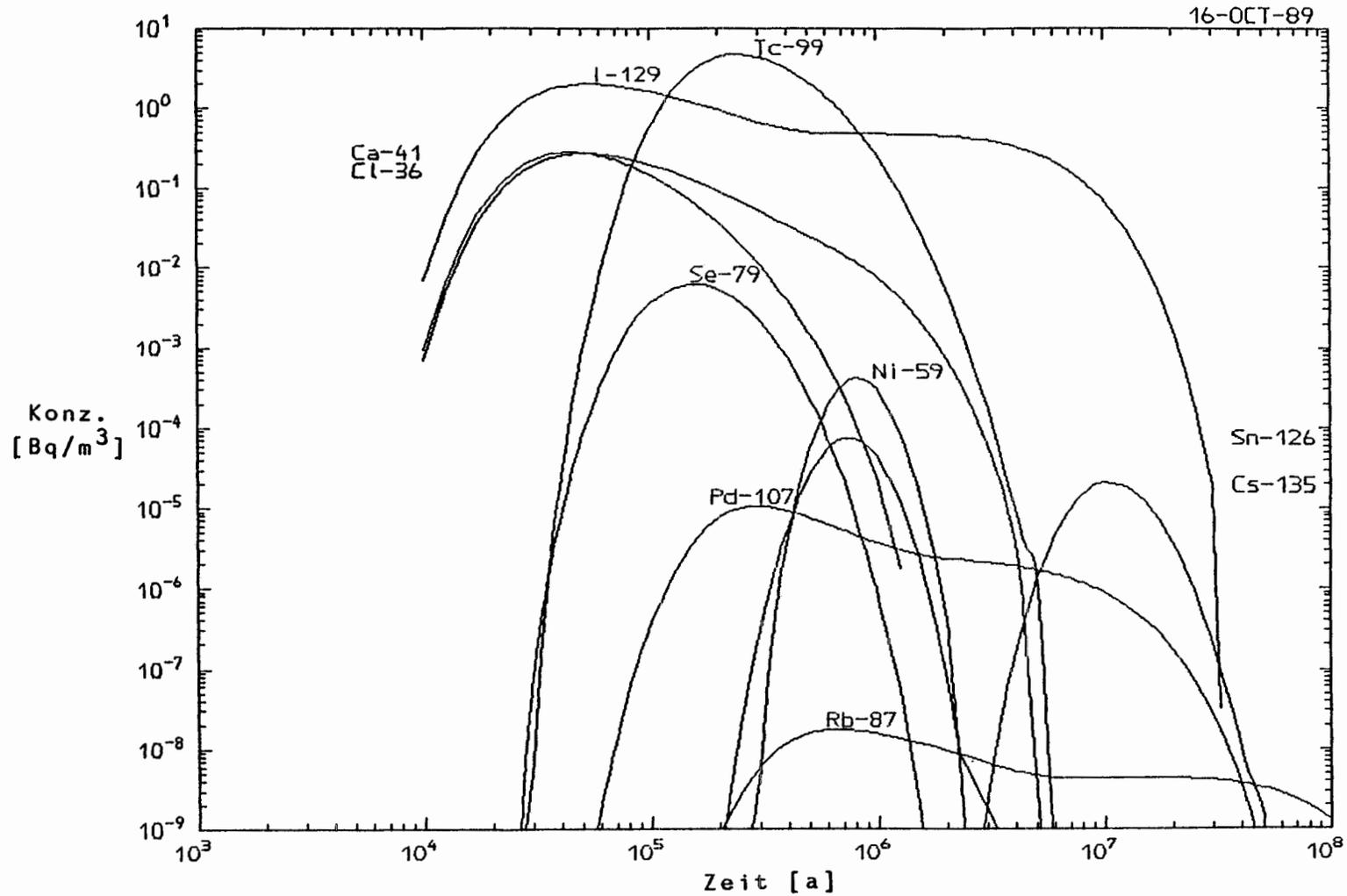


Abbildung 4-7: Rechenfall R35  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der  
Spalt- und Aktivierungsprodukte im Quartär

DATA FROM: PTBWORK>TRANSPORT\*>R35\* >K1\_0 >K2\_0 >K3\_0 >K4\_0

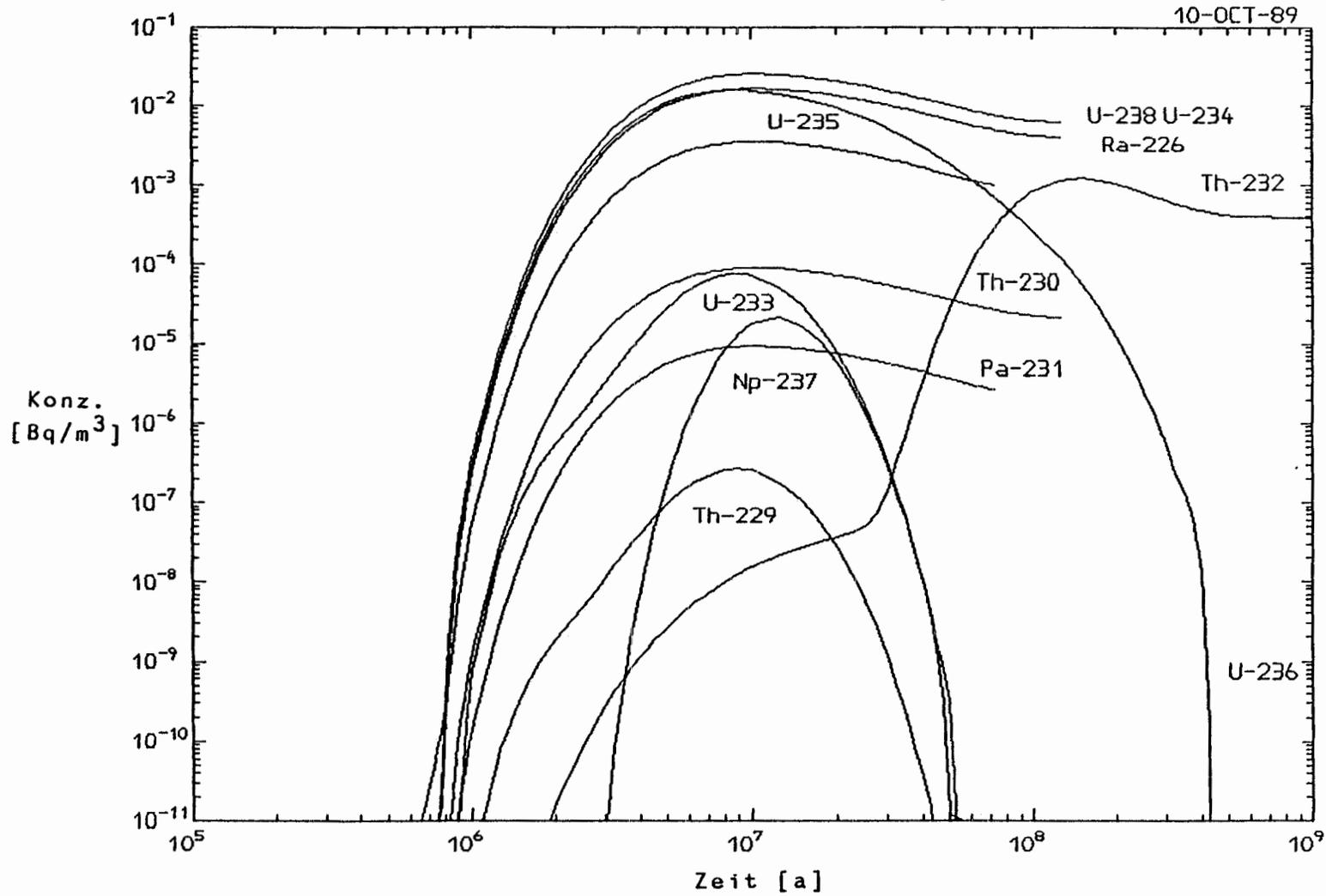


Abbildung 4-8: Rechenfall R35  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Aktiniden im Quartär

DATA FROM: PTBWORK>TRANSPORT\*>R38\* >FPA\_0 >FPB\_0 >FPC\_0

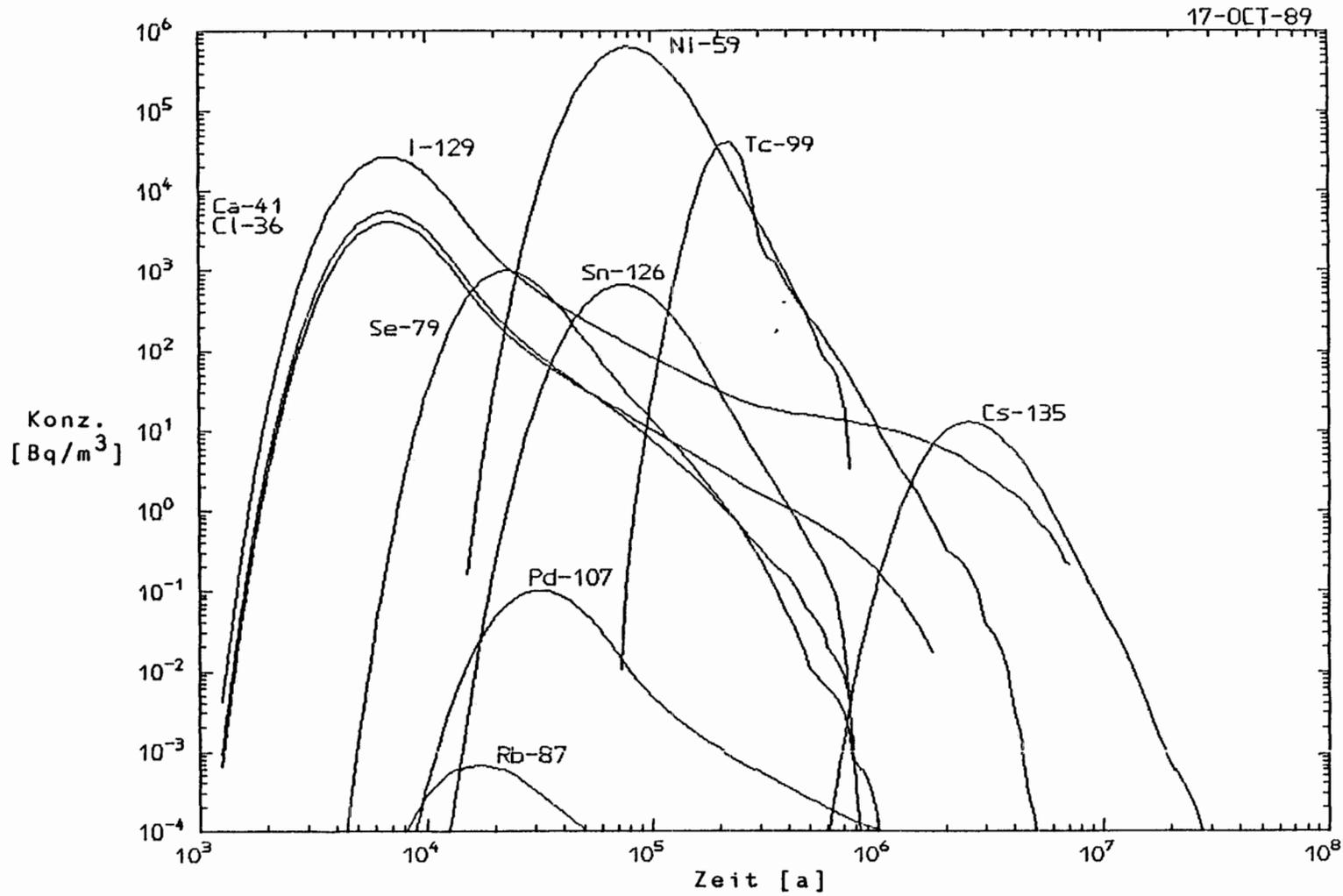


Abbildung 4-9: Rechenfall R38  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Spalt- und Aktivierungs-  
produkte im Quartär

DATA FROM: PTBWORK>TRANSPORT\*>R38\* >K1\_0 >K2\_0 >K3\_0 >K4\_0

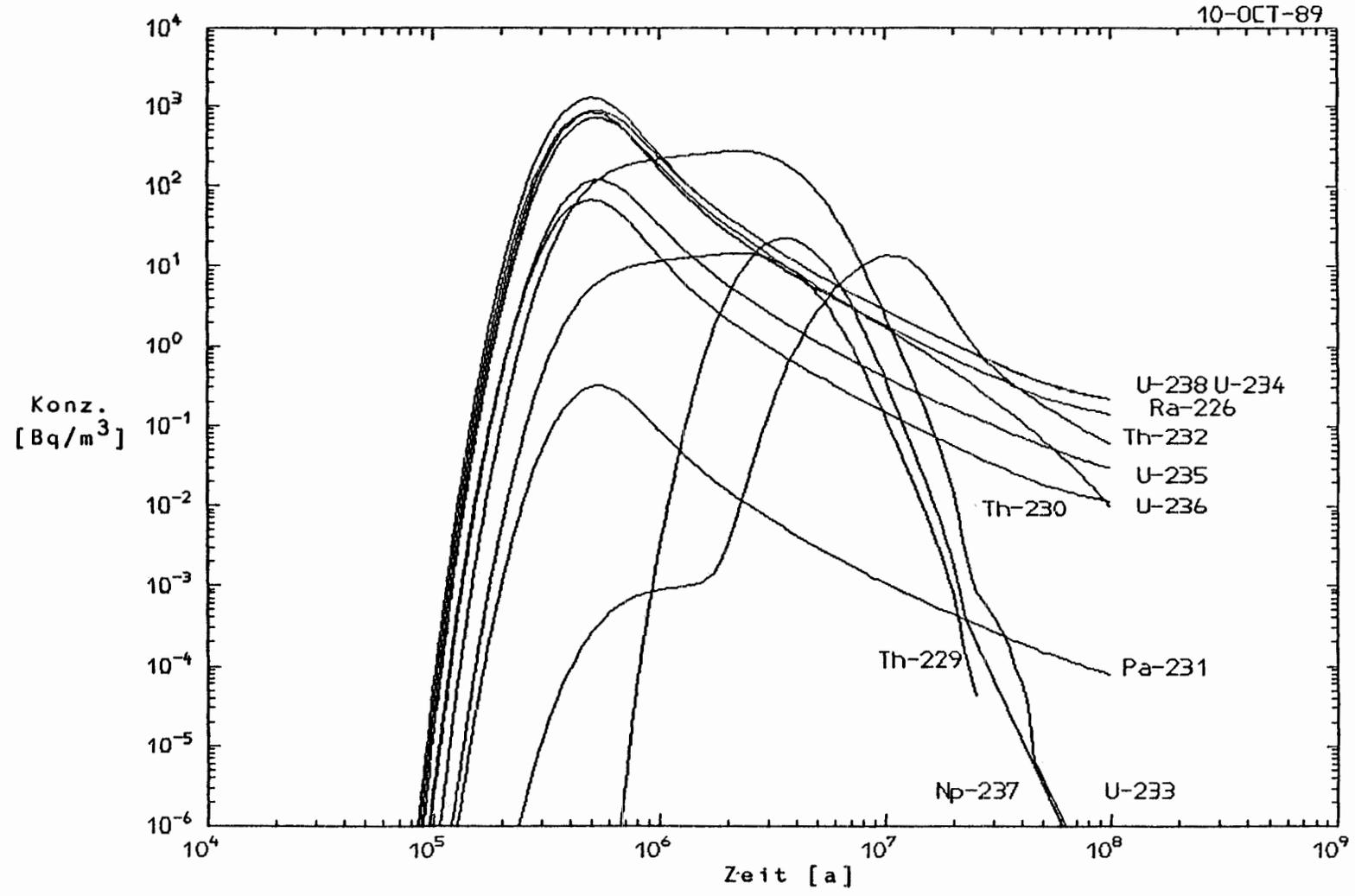


Abbildung 4-10: Rechenfall R38  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Aktiniden im Quartär

DATA FROM: PTBWORK>TRANSPORT\*>R39\* >FPA\_01 >FPB\_Q1 >FPC\_01

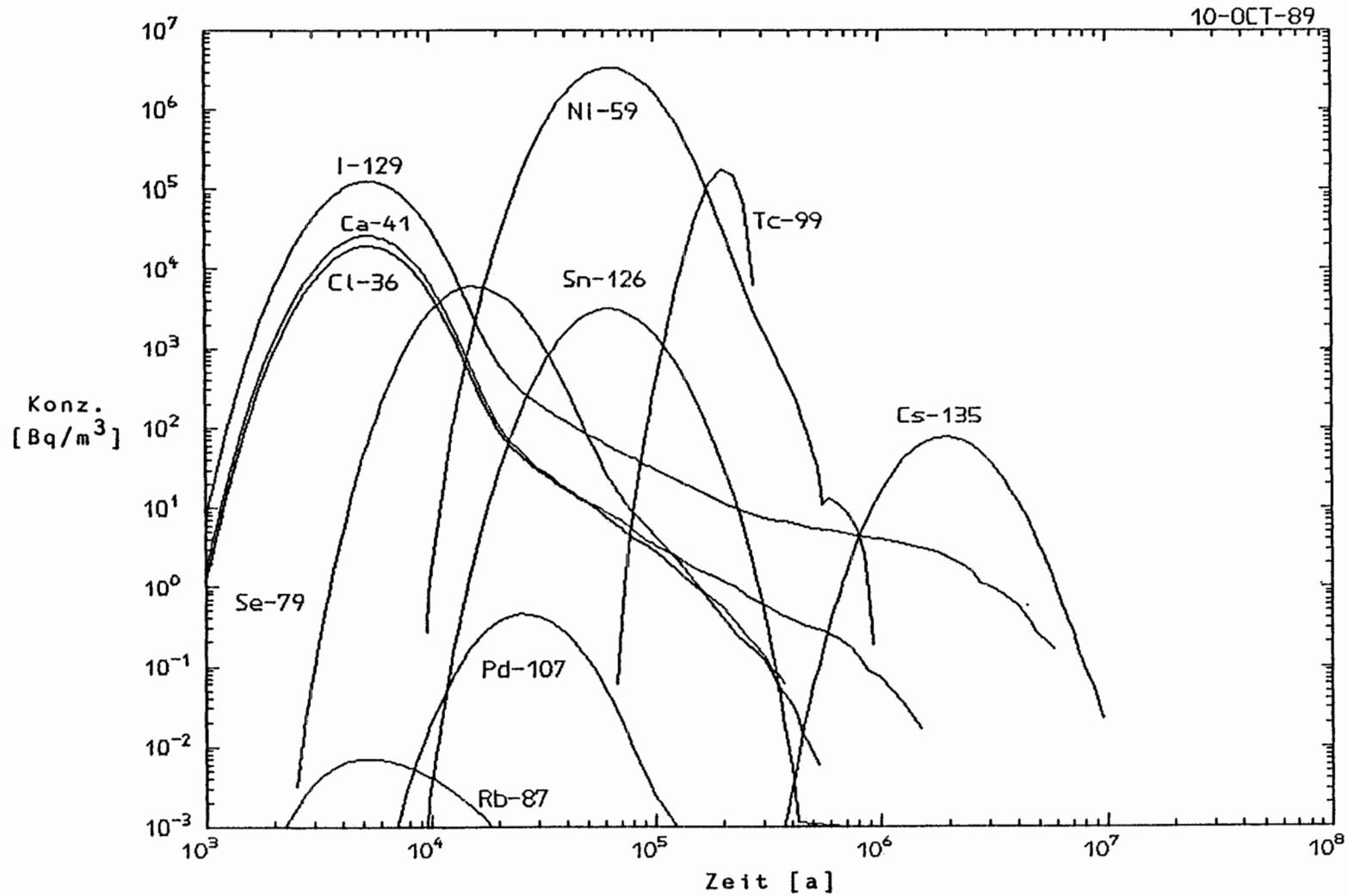


Abbildung 4-11: Rechenfall R39/1  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Spalt- und Aktivierungs-  
produkte im Quartär

DATA FROM: PTBWORK>TRANSPORT\*>R39\* >K1\_Q1 >K2\_Q1 >K3\_Q1 >K4\_Q1

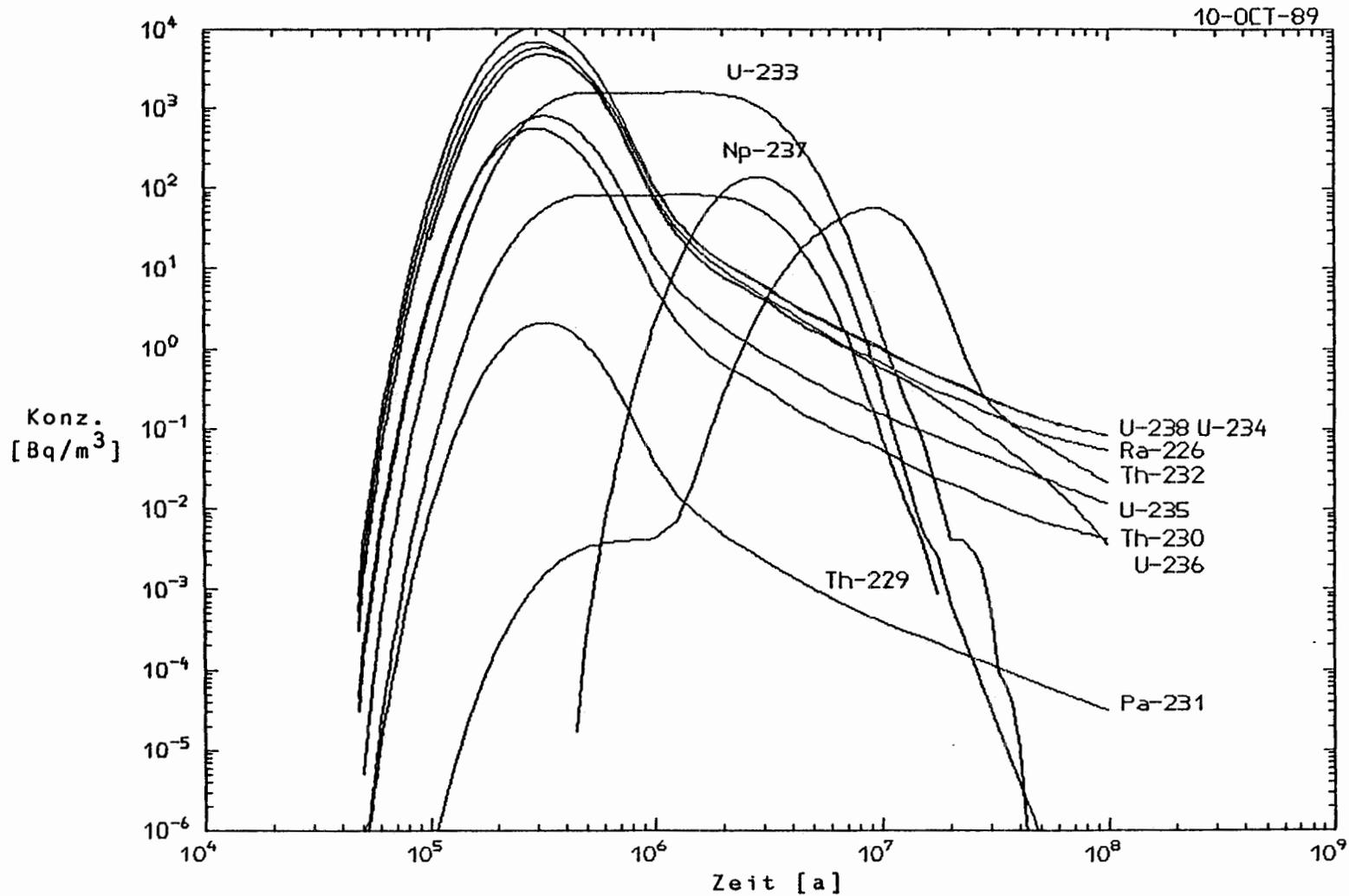


Abbildung 4-12: Rechenfall R39/1  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Aktiniden im Quartär

DATA FROM: PTBWORK>TRANSPORT\*>R39\* >FPA\_Q2 >FPB\_Q2 >FPC\_Q2

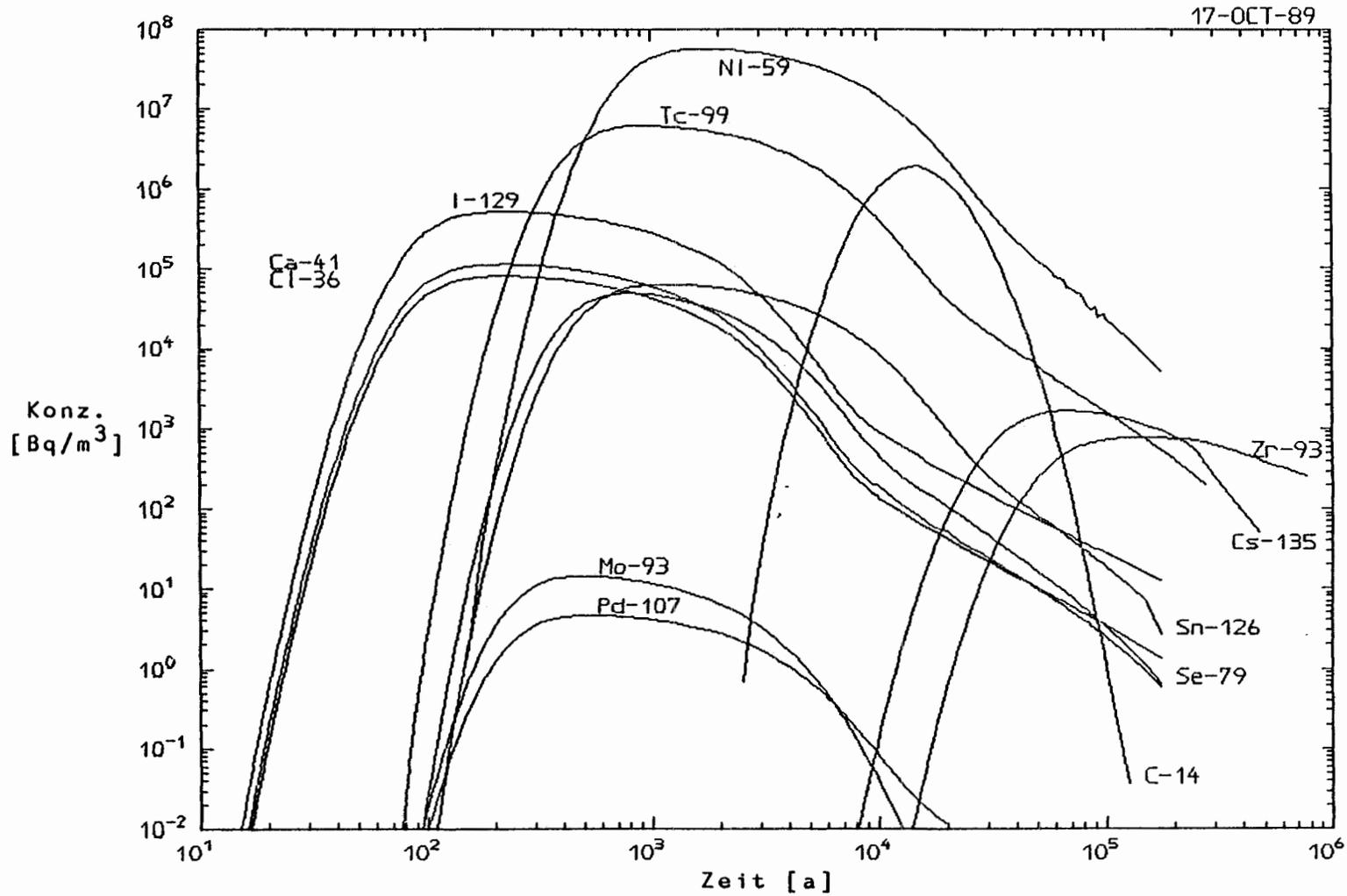


Abbildung 4-13: Rechenfall R39/2  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Spalt- und Aktivierungs-  
produkte im Quartär

DATA FROM: PTBWORK>TRANSPORT\*>R39\* >K1\_Q2 >K2\_Q2 >K3\_Q2 >K4\_Q2

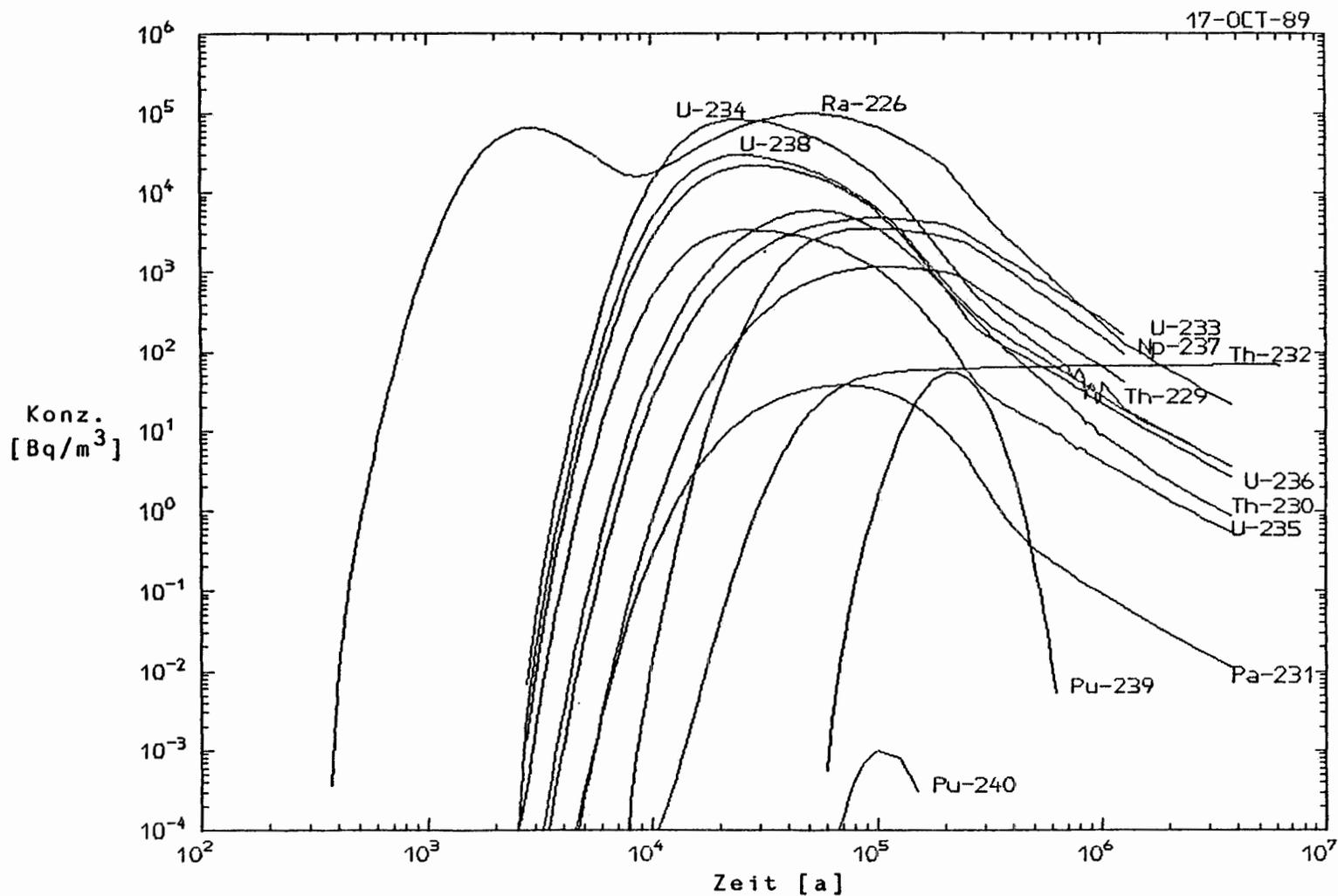


Abbildung 4-14: Rechenfall R39/2  
Zeitliche Entwicklung der Konzentration der Aktiniden im Quartär

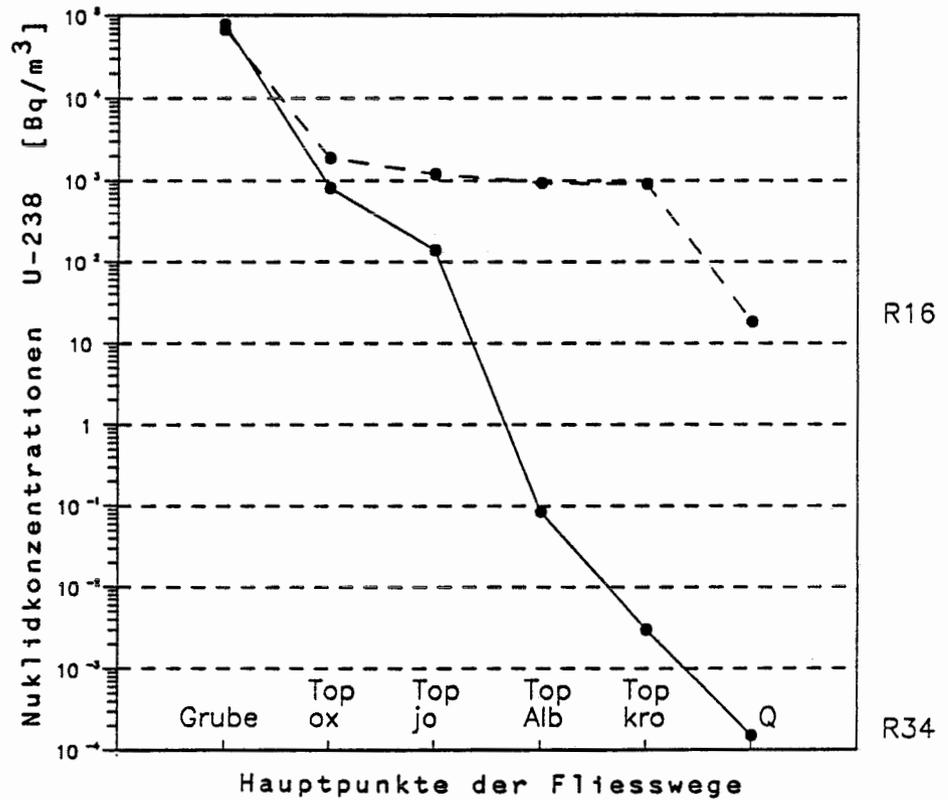
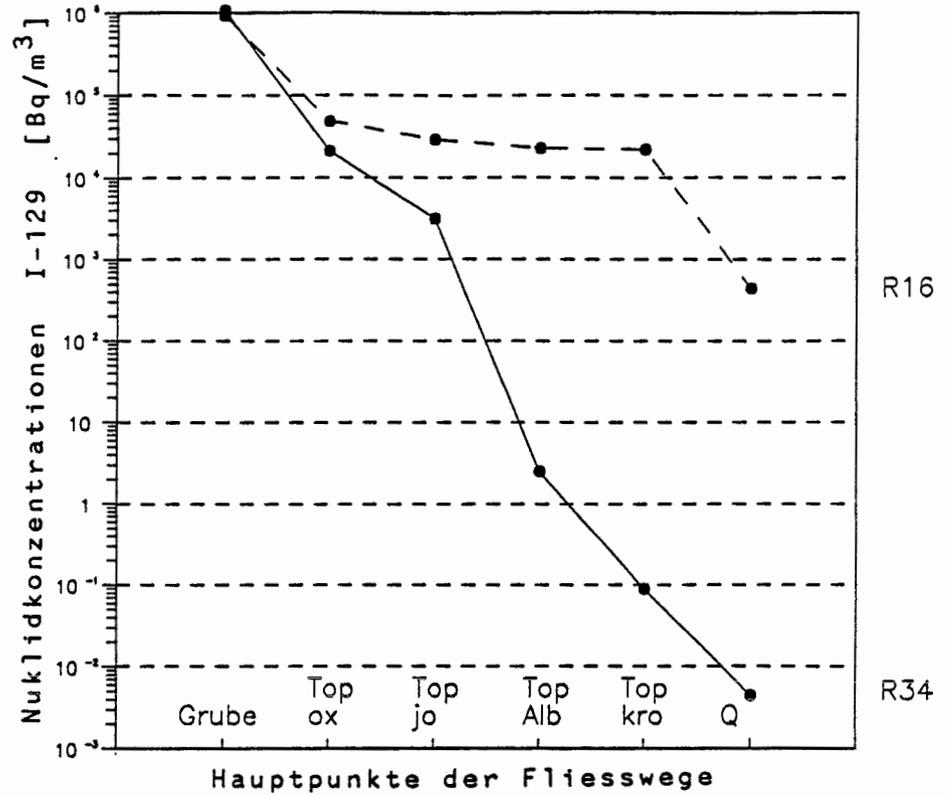


Abbildung 5-1: Rechenfälle "Tiefbohrungen"  
Entwicklung der I-129 und U-238 Nuklidkonzentrationen an den Hauptpunkten der Fließwege (R34 mit unlimitierter Matrixdiffusion)

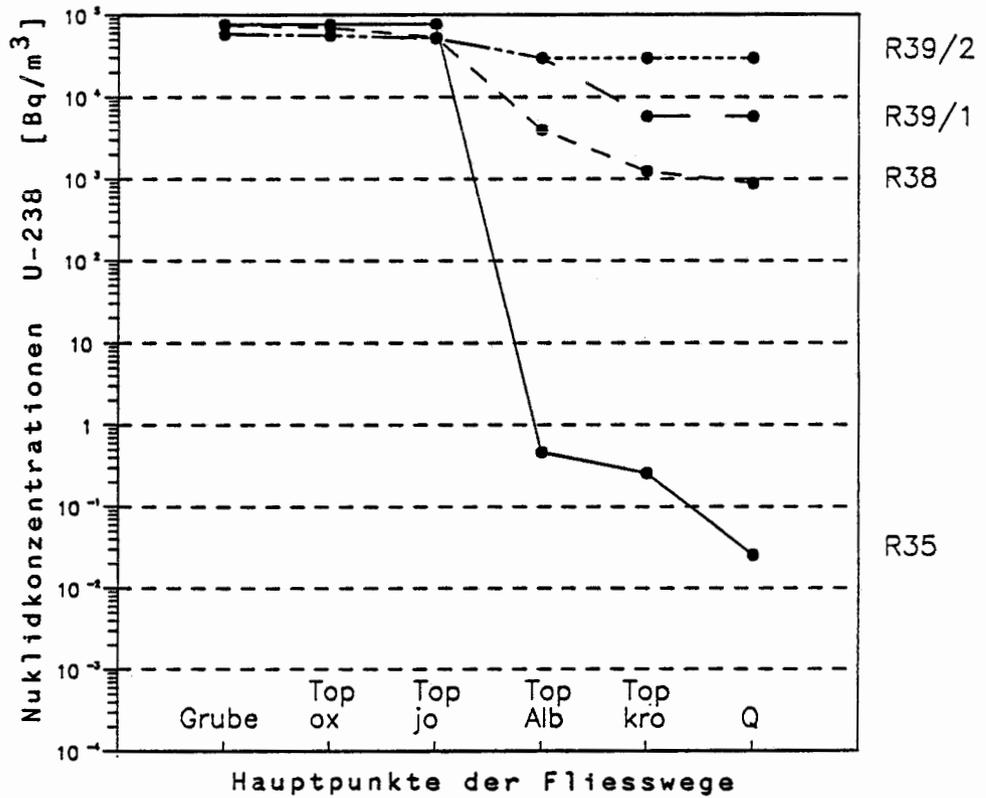
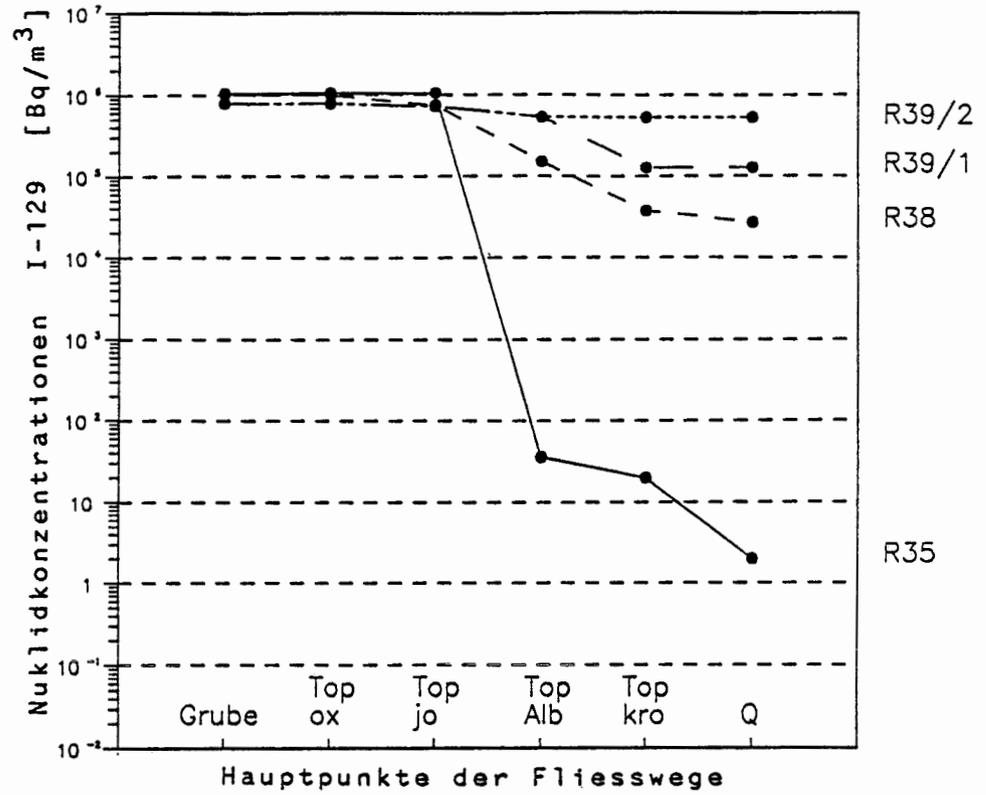


Abbildung 5-2: Rechenfälle "Schachtverschluss"  
Entwicklung der I-129 und U-238 Nuklidkonzentrationen an den Hauptpunkten der Fließwege

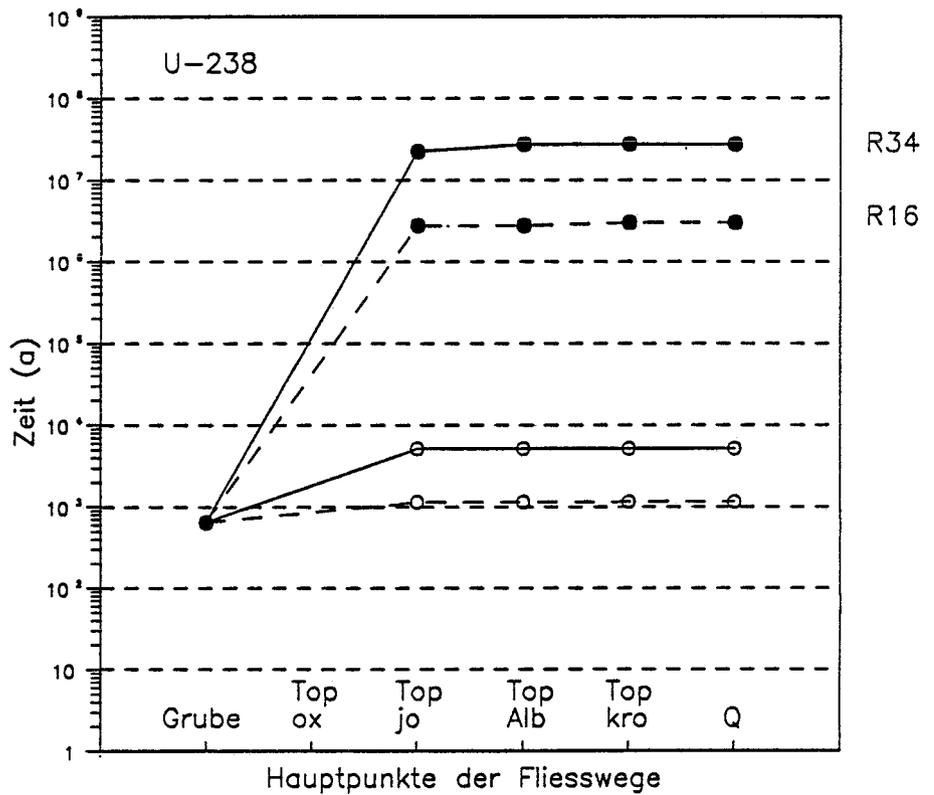
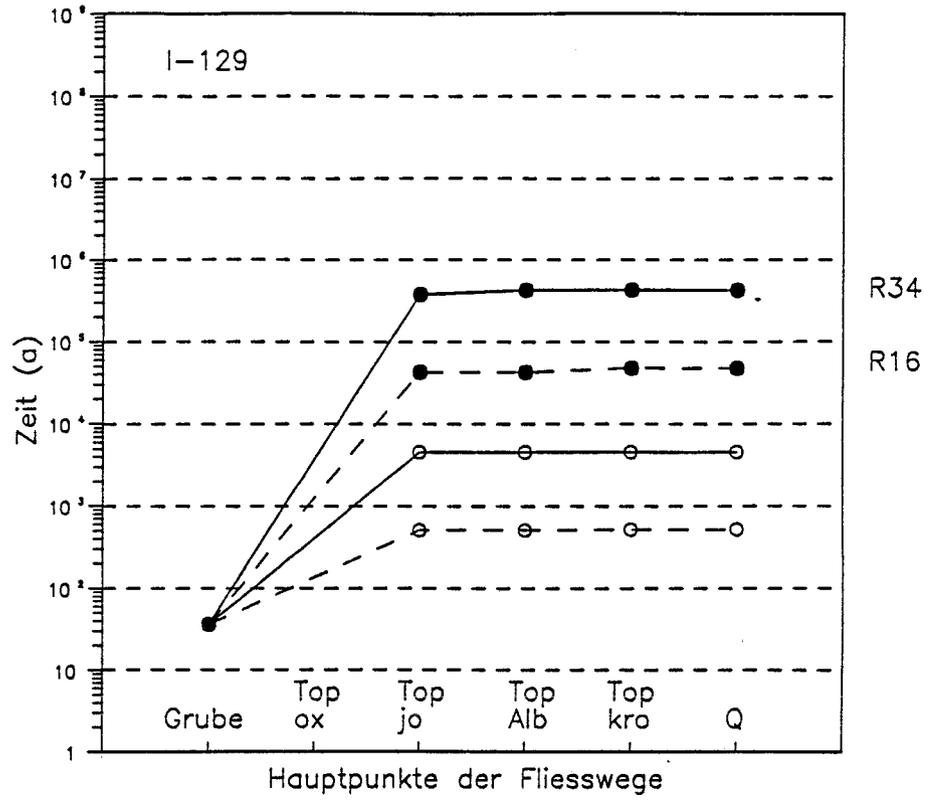


Abbildung 5-3: Rechenfälle "Tiefbohrungen"  
Kumulierte Transportzeiten von I-129 und U-238 entlang den Fließwegen  
offene Kreise: kumulierte Fließzeiten des Grundwassers  
(R34 mit unlimitierter Matrixdiffusion)

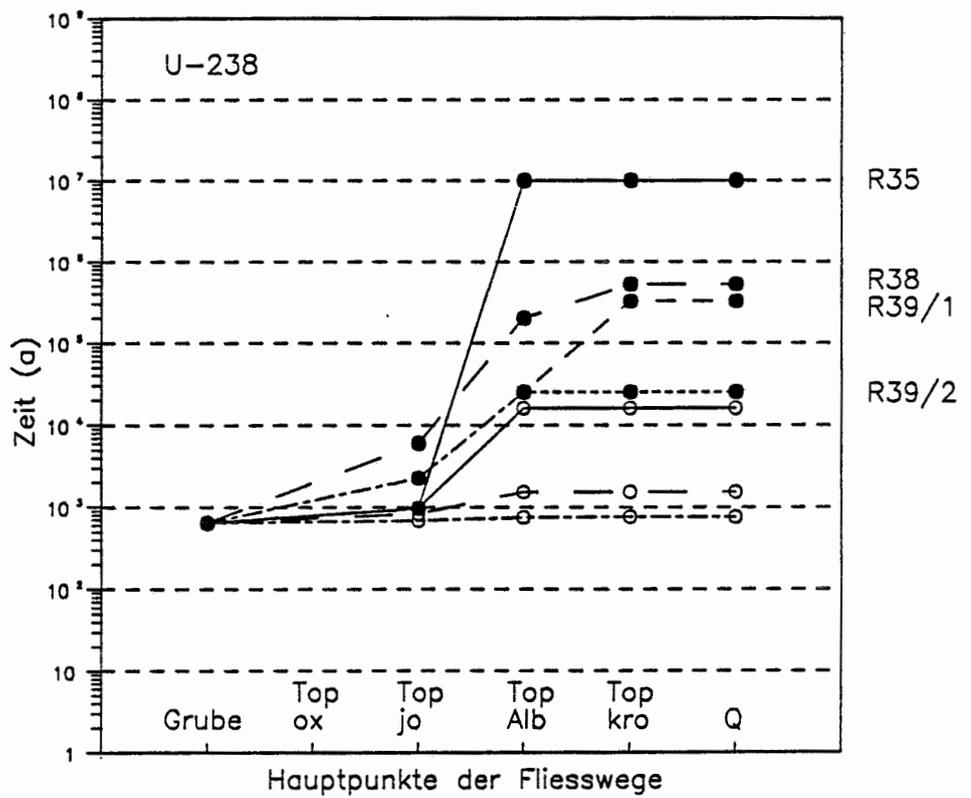
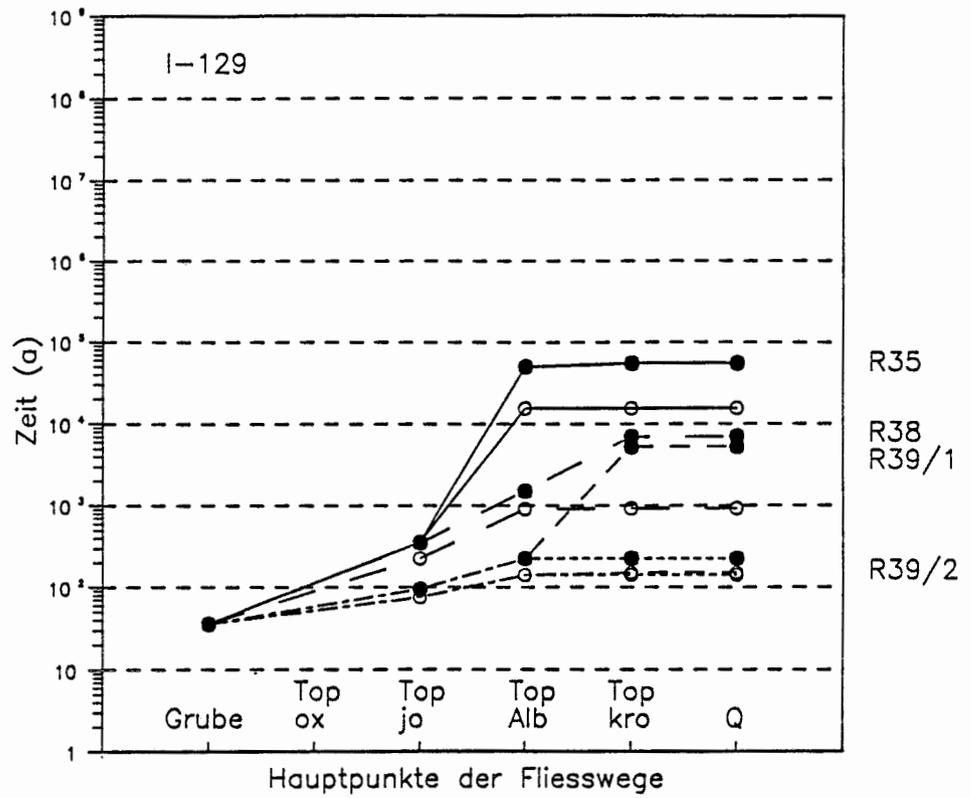


Abbildung 5-4: Rechenfälle "Schachtverschluss"  
Kumulierte Transportzeiten von I-129 und U-238 entlang den Fließwegen  
offene Kreise: kumulierte Fließzeiten des Grundwassers