

**Fluidströmung und  
Radionuklidtransport  
in komplexen  
Endlagerbergwerken**

## Fluidströmung und Radionuklidtransport in komplexen Endlagerbergwerken

Synthesebericht Teil 1/2

Zweiphasenfluss in einem  
salinaren Endlager am  
Beispiel des ERAM

Ingo Kock  
Gerd Frieling  
Martin Navarro

Oktober 2016

### **Anmerkung:**

Das diesem Bericht zugrunde liegende FE-Vorhaben wurde mit Mitteln des BMUB unter dem Kennzeichen UM13A03400 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

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

**Deskriptoren**

Zweiphasenfluss, ERAM, TOUGH2, Simulation, Modellrechnungen

## **Kurzfassung**

Im Forschungs- und Entwicklungsvorhaben ZIESEL entwickelt die GRS den Stand von Wissenschaft und Technik zur Durchführung und Bewertung von Langzeitsicherheitsnachweisen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle weiter. Das übergeordnete Ziel des Vorhabens ist es, Zweiphasenflussprozesse in einem komplexen Endlagersystem besser zu verstehen.

Die Berücksichtigung von Zweiphasenflussprozessen bei den Berechnungen für das modellierte Endlagersystem führt zu Prozessen und Effekten, die das Transportverhalten von Fluiden und Radionukliden entscheidend beeinflussen. Dabei umfassen Zweiphasenflussprozesse nicht nur die Kapillardrücke und relativen Permeabilitäten, sondern auch eine grundsätzliche Konkurrenz der Phasen um den Porenraum in Bezug auf Speicherung und Transport sowie die dichtegetriebene, vertikale Separierung der Phasen.

Im Wesentlichen haben sich die Abdichtungen als wichtig für das Systemverhalten erwiesen. Beeinflusst vom Gasdruck steuern diese das Systemverhalten. Andererseits wird das Systemverhalten durch die Modell- (bzw. Gruben-)geometrie unterhalb einer postulierten Zutrittslokation bestimmt.



# Inhaltsverzeichnis

	<b>Kurzfassung</b> .....	<b>I</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Motivation .....	2
1.2	Ziele.....	4
1.3	Vorgehensweise .....	6
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b> .....	<b>15</b>
2.1	ERAM und Stilllegung.....	15
2.2	Szenarien .....	18
2.3	Zweiphasenfluss.....	20
2.4	TOUGH2-GRS.....	22
2.4.1	Codeversion/Qualitätssicherung .....	24
2.5	Rechenfälle.....	24
<b>3</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>27</b>
3.1	Basismodell .....	28
3.1.1	Bezugsfall „trockene Grube“ .....	28
3.1.2	Bezugsfall „mit relevantem Lösungszutritt“.....	53
3.2	Erweitertes Modell .....	87
3.2.1	Bezugsfall „trockene Grube“ .....	87
3.2.2	Bezugsfall „mit relevantem Lösungszutritt“.....	102
3.3	Komplexes Modell .....	122
3.3.1	Bezugsfall „trockene Grube“ .....	122
3.3.2	Bezugsfall „mit relevantem Lösungszutritt“.....	144
<b>4</b>	<b>Schlussfolgerungen und Zusammenfassung</b> .....	<b>171</b>
4.1	Schlussfolgerungen .....	171
4.1.1	Zweiphasenflussprozesse und Modellkomplexität.....	171
4.1.2	Berührungspunkte zur ESK-Stellungnahme /ESK 13/.....	177

4.1.3	Überblick .....	178
4.2	Zusammenfassung .....	179
4.3	Dank .....	180
<b>A</b>	<b>Anhang A.....</b>	<b>195</b>
A.1	Benchmark Volumen und Gasbildung .....	195
A.2	Verwendete Einheiten und Methodik und Folgen der Darstellung von Volumina unter Normalbedingungen.....	196
A.3	Ergänzungsabbildungen Basismodell, Bezugsfall „trockene Grube“ .....	199
A.4	Ergänzungsabbildungen komplexes Modell .....	200
A.5	Nicht beendete Rechenfälle .....	201
<b>B</b>	<b>Anhang B: Probabilistische Analysen .....</b>	<b>203</b>
B.1	Allgemeine Vorgehensweise.....	203
B.2	Untersuchte Systeme .....	205
B.3	Varierte Parameter und betrachtete Gebiete.....	205
B.4	Verteilungsfunktionen und Parameterbandbreiten .....	208
B.5	Ergebnisse zur Variation der Zweiphasenflussparameter .....	210
B.6	Ergebnisse zur Variation der Permeabilitäten .....	232
B.7	Interpretation der Sensitivitätsanalysen .....	255

# 1 Einleitung

Im Juli 2013 begann die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zum Zweiphasenfluss in einem salinaren Endlager (im Folgenden „ZIESEL“ genannt, **Z**weiphasenfluss **I**n **E**inem **S**alinaren **E**nd**L**ager am Beispiel des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) durchzuführen. Zuwendungsgeber für dieses Vorhaben (Förderkennzeichen UM13A03400) ist das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB).

Im Forschungs- und Entwicklungsvorhaben ZIESEL entwickelt die GRS den Stand von Wissenschaft und Technik zur Durchführung und Bewertung von Langzeitsicherheitsnachweisen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle weiter. Schwerpunktthemen des in drei Phasen unterteilten Vorhabens bilden:

- die Simulation relevanter Prozesse in Endlagersystemen, die thermischer, hydraulischer, geochemischer oder geomechanischer Natur sein können,
- die Weiterentwicklung des Instrumentariums zur Durchführung von Sicherheitsanalysen,
- die Qualitätssicherung des Instrumentariums zur Durchführung von Langzeitsicherheitsanalysen sowie
- die Durchführung von Prozess- und Systemanalysen am Beispiel eines bereits existierenden Endlagerstandortes, des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM).

Im vorliegenden Bericht (Teil 1) werden die durchgeführten Systemanalysen beschrieben, anhand derer Zweiphasenflussprozesse in einem komplexen Grubengebäude für einen Zeitraum von 1.000.000 Jahren (im Folgenden auch „Berechnungszeitraum“ genannt) untersucht werden. Diese Analysen umfassen Strömungs-, Mischungs- und Transportvorgänge der Gas- und Flüssigphase sowie der Radionuklide im Endlager. Insgesamt wurden drei unterschiedliche Modellgitter für die Systemanalysen genutzt. Für jedes dieser Modellgitter wurden – basierend auf zwei Systementwicklungen – zahlreiche deterministische Rechenfälle entwickelt, so dass insgesamt ca. 700 Rechenfälle entstanden sind. Die Beschreibung der Modellgitter, der berücksichtigten Prozesse, der erzeugten Rechenfälle und ihre Parametrierung würde den Rahmen eines einzelnen Berichts überschreiten und erfolgte deshalb separat im zweiten Teil des

Berichts in /FRI 16/. Ein kurzer Überblick über das gesamte Vorhaben ist im Abschlussbericht /KOC 16/ zu finden.

Für einige Parameter, die den Zweiphasenfluss sowie die Durchlässigkeit von Schweben, Rollöchern und Gesenken im Grubengebäude betreffen, werden Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen durchgeführt, die im vorliegenden Bericht beschrieben sind.

Die Weiterentwicklung des Instrumentariums sowie dessen Qualitätssicherung und die Analyse einzelner Prozesse werden in weiteren Berichten detailliert beschrieben /HOT 16a/, /HOT 16b/, /NAV 16a/, /NAV 16b/, /SEH 16/.

In den folgenden Unterkapiteln werden zunächst die Motivation sowie die Ziele des Vorhabens beschrieben. In Kapitel 2 erfolgen eine kurze Beschreibung der methodischen Grundlagen (z. B. zum Zweiphasenfluss) sowie eine kurze allgemeine Übersicht über das ERAM. In Kapitel 3 werden die Ergebnisse der Modellrechnungen dargestellt. Diskutiert werden die Ergebnisse in Kap. 4.

## **1.1 Motivation**

Die GRS beschäftigt sich seit Beginn der 1990er Jahre mit der Analyse von Endlagern unter Zweiphasenflussgesichtspunkten; seit ca. 1992 unter Verwendung des Zweiphasenfluss-Berechnungsprogramms (im Folgenden auch „Code“ genannt) TOUGH bzw. TOUGH2. Bereits 1995 wurde im Rahmen des Projekts „European Validation Exercise of Gas Migration Models“ (EVEGAS) /MAN 95/ ein Benchmark durchgeführt. Das Ziel des Projektes war die Qualifizierung (Verifikation, Validierung) von numerischen Modellen zur Simulation von Zwei-Phasen-Strömungen in porösen Medien, die zur Beschreibung des Gastransportes aus einem Endlager eingesetzt werden. Seit dieser Zeit wurde der Code um weitere Prozesse (z. B. porositätsabhängige Permeabilität, Versatzkompaktion, Zerfall, etc.) ergänzt, die für Analysen zum Radionuklidtransport in Endlagern notwendig sind /JAV 95/. Ebenso wurden vereinfachte Endlagersysteme und Teilsysteme eines Endlagers unter Zweiphasenfluss - Gesichtspunkten betrachtet /JAV 96/. Der Code wurde in den folgenden Jahren kontinuierlich weiter genutzt und entwickelt /BEU 08/, /JAV 01/, /JAV 02/, /JAV 04/, /JAV 06a/, /JAV 06b/, /NAV 13a/, /NAV 13b/, /NAV 11/ so dass seit 2013 eine Code-Version existiert, die alle wesentlichen Weiterentwicklungen zusammenfasst /NAV 13b/. Diese Codeversion wird TOUGH2-GRS genannt.

Im Zeitraum 2010 bis 2013 wurde dieser Code (bzw. eine Vorläufer-Version) im Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben“ (VSG) benutzt, um erstmals eine radiologische Konsequenzenanalyse für ein vollständiges Endlagergrubengebäude in einer Salzformation unter Einbeziehung von Zweiphasenflussgesichtspunkten durchzuführen. Dabei wurden wichtige neue Einblicke in die teilweise hohe Komplexität der Vorgänge innerhalb des Endlagerbergwerks möglich /FIS 13/, /KOC 12/.

Ein Ergebnis dieses Vorhabens war auch die Erkenntnis, dass trotz der erzielten Fortschritte noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf bzgl. hydraulischer Berechnungsmethoden unter der Berücksichtigung von Zweiphasenflussprozessen besteht /LAR 13/ (z. B. die Berücksichtigung von Zerfallsketten und von Wasserverbrauch bei der Entstehung von Gasen im Endlager).

Großskalige Modelle, die alle wesentlichen Teile des Endlagerbergwerkes und des einschließenden Gebirges (und damit ein sehr großes Modellgebiet) umfassen, erfordern eine genaue Abwägung, welche Prozesse detailliert werden müssen und welche vereinfacht modelliert werden können. Die hierfür verwendeten Modelle müssen deshalb auf das jeweilige Endlagerkonzept abgestimmt entwickelt werden. Auch ist es erforderlich, langzeitsicherheitsanalytische Codes intensiv und fortlaufend qualitätssichern. Letztlich ist es notwendig – sowohl was Prozessbetrachtungen als auch Auflösung des Modellgitters betrifft – ein komplexes Modell für ein Endlagersystem im Rahmen von Berechnungen zur Langzeitsicherheit zu betrachten. Dieses Ziel soll mit dem Vorhaben ZIESEL verfolgt werden.

Vor dem Hintergrund, dass generische Betrachtungen eines Endlagersystems möglicherweise nur eine eingeschränkte Aussagekraft zeigen (siehe auch /BFS 05/), war für das Vorhaben wesentlich, alle Arbeiten anhand eines existierenden Endlagersystems durchzuführen. Das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) wurde aus verschiedenen Gründen als Beispiel für das Vorhaben ZIESEL ausgewählt. Zum einen existiert aufgrund des laufenden Planfeststellungsverfahrens zur Stilllegung des ERAM bereits eine breite Datengrundlage, die für die numerischen Analysen genutzt werden kann. Diese Datenbasis umfasst zum Beispiel:

- Ein Stilllegungs- und Verschlusskonzept, so dass z. B. Parameter zu Versatzmaterialien und zu Abdichtbauwerken bekannt sind (etwa Materialeigenschaften, Lokation, Verfüllungsgrad).

- Daten zum radiologischen Inventar, so dass die Aktivität für jeden Einlagebereich zur Verfügung steht.
- Daten zur Gasbildung, so dass orts- und zeitabhängige Gasquellen für das Modell zur Verfügung stehen.
- Eine Anzahl von Szenarien, welche in entsprechende Rechenfälle umgesetzt werden können.
- Daten zur Grubengeometrie, welche die Erstellung sowohl von einfachen als auch von komplexen Grubenbaumodellen erlaubt.

Zum anderen existieren für das ERAM bereits Berechnungen zur Langzeitsicherheit, die allerdings Zweiphasenflussprozesse im Grubengebäude größtenteils unberücksichtigt lassen und in denen ein stark vereinfachtes Modell des komplexen Grubengebäudes genutzt wird.

## **1.2 Ziele**

Im Rahmen diesen Vorhabens wird anhand des ERAM die Frage untersucht, ob bzw. in welchem Maße eine Langzeitsicherheitsanalyse unter Berücksichtigung von Zweiphasenflussprozessen und der Verwendung eines komplexen Modells des Grubengebäudes ein grundsätzlich anderes Systemverhalten aufzeigt als in Berechnungen mit einem relativ einfachen Grubengebäudemodell und weitgehender Vernachlässigung von Zweiphasenflussprozessen.

Das übergeordnete Ziel des Vorhabens ist es, Zweiphasenflussprozesse in einem komplexen Endlagersystem besser zu verstehen. Es soll untersucht werden, welche Auswirkungen die Wahl des physikalischen Modells (einphasig – zweiphasig) und die Wahl des Grubengebäudemodells (einfach – komplex) haben. Im Rahmen der Analysen werden verschiedene Prozesse und Effekte in den Fokus genommen, die in einem komplexen Grubengebäude möglicherweise auftreten können. Diese Prozesse und Effekte können zum Beispiel sein:

- Strömungsprozesse von Fluiden im Endlager, die zum Beispiel aus unterschiedlichen Bereichen im Endlager in andere Bereiche strömen können oder – bei Lösungszutritt – in unterschiedliche Bereiche einströmen können.

- Strömungsprozesse von Fluiden innerhalb einzelner Bereiche im Endlager, die bislang nicht in Modellen aufgelöst wurden.
- Mischungsprozesse dieser Fluiden aus unterschiedlichen Bereichen oder Separierungsprozesse der Phasen innerhalb eines Bereichs im Endlager zwischen den Sohlen des Endlagers.
- Radionuklidtransport innerhalb des Endlagers und innerhalb einzelner Bereiche des Endlagers, auch in Bereiche, die potenziell als Senken fungieren könnten.
- Druckentwicklung im Endlager.
- Strömung von Fluiden aus dem Endlager heraus.
- Radionuklidtransport aus dem Endlager heraus.

Im speziellen Fall des ERAM wurden in Bezug auf die Langzeitsicherheitsbetrachtungen auch von der Entsorgungskommission des Bundes (ESK) Fragen formuliert, die möglicherweise in eine ähnliche Richtung zielen /ESK 13/. Die ESK merkt hinsichtlich der vorliegenden Langzeitsicherheitsberechnungen dabei kritisch die

- Modellkomplexität (insbesondere die Abstraktion des gesamten Grubengebäudes auf die dritte Sohle und die Nutzung geometrisch stark vereinfachter Modelle),
- Realitätsnähe der Kompartiment-internen Prozesse (insbesondere die instantane Durchmischung im gesamten Volumen und besonders in den Mischungsbe-  
reichen),
- berücksichtigten Verbindungen zwischen Kompartimenten, sowie die
- kaum berücksichtigte Zweiphasenfluss-Problematik an.

Die ESK zielt im Wesentlichen darauf ab, dass die oben stehenden Punkte bzw. Annahmen im Hinblick auf das Nachweisziel hinsichtlich Ihrer Konservativität nicht ausreichend belegt sind. Der ESK geht es damit weniger um das grundsätzliche Fluidfluss- und Transportverhalten in einem komplexen Endlagersystem als um die Konservativität im konkreten Langzeitsicherheitsnachweis.

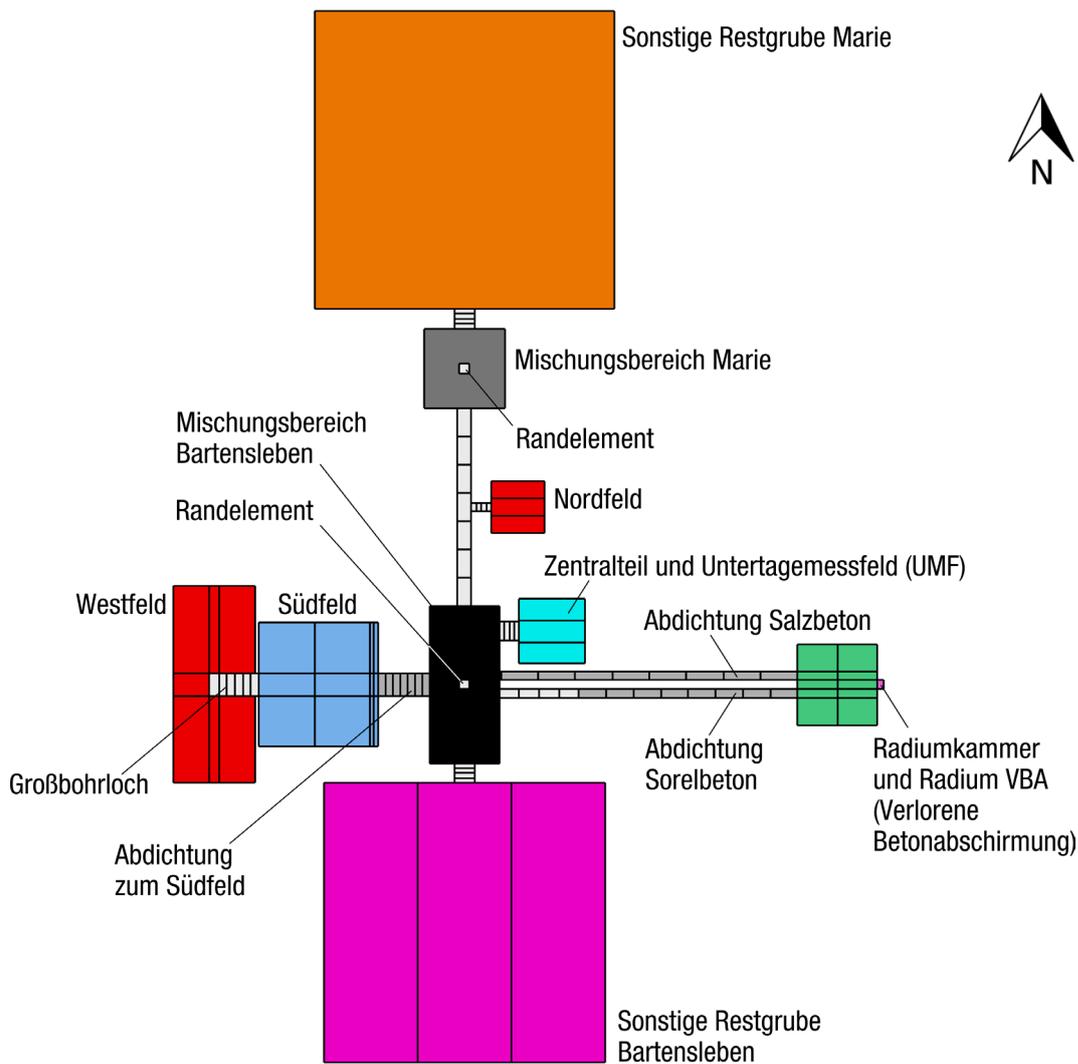
Konservativitätsbetrachtungen als solche sind nicht explizites Ziel dieses Vorhabens. Trotzdem ist auch denkbar, dass Überkonservativitäten, die möglicherweise in vereinfachten Modellen vorhanden sind, reduziert werden können.

Trotz einer möglichst umfassenden Analyse des Systemverhaltens des ERAM ist es nicht das Ziel dieses Vorhabens, eine vollständige Langzeitsicherheitsanalyse durchzuführen, noch ist es das Ziel, eine bestehende Langzeitsicherheitsanalyse zu überprüfen. Gerade dadurch, dass eine breite Datenbasis (wie in Kap. 1.1 erwähnt) vorhanden und verwendbar ist, ist es möglich innerhalb des Vorhabenszeitraums diese Systemanalysen durchzuführen. Diese Analysen beschränken sich ausschließlich auf die Prozesse innerhalb des Endlagers und auf den resultierenden Transport aus dem Endlager heraus. Eine Betrachtung des Transports im Deckgebirge ist nicht das Ziel dieses Vorhabens.

### **1.3 Vorgehensweise**

Um die Ziele des Vorhabens zu erreichen werden die Systemanalysen in drei Schritten durchgeführt, die jeweils einen Meilenstein zum Erreichen der Vorhabensziele darstellen. Wesentliches Merkmal dieser Meilensteine ist, die Analysen bzw. Berechnungen jeweils mit einem Gittermodell steigender Komplexität durchzuführen. Zweiphasenflussprozesse werden in allen Berechnungsmodellen für alle Modellgitter berücksichtigt. Hier wird nur ein kurzer Überblick über die Modellgitter gegeben, eine vollständige und detaillierte Beschreibung befindet sich in /FRI 16/.

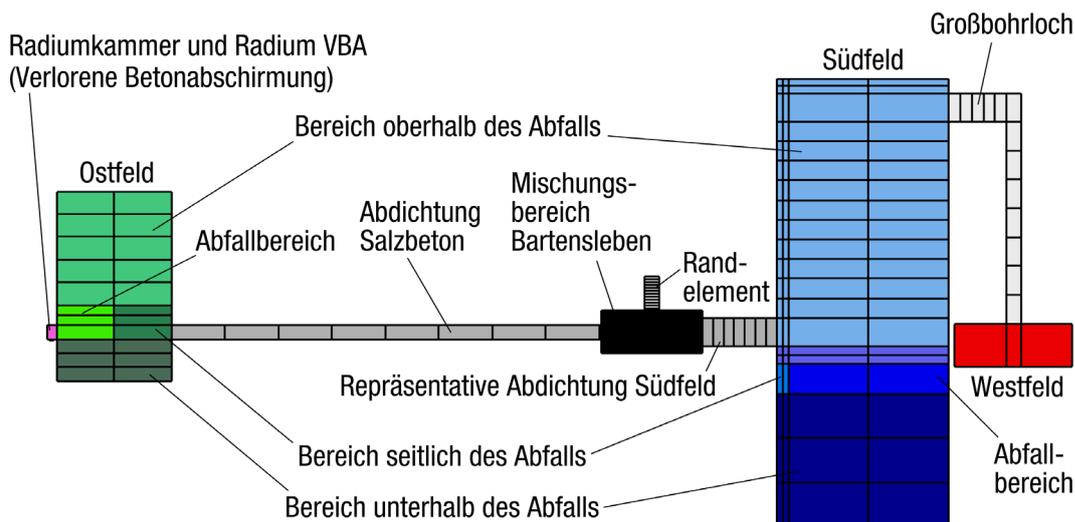
Für den ersten Meilenstein wird ein Modellgitter gewählt, welches geometrisch so weit wie möglich den bisher genutzten Modellen (im Folgenden auch als „Kompartimentmodelle“ bezeichnet) der vorhandenen Langzeitsicherheitsanalyse zum ERAM /BEC 09/, /NIE 09/, /RES 09/ entspricht. Dieses Gittermodell wird im Folgenden als Basismodell bezeichnet und ist in Abb. 1.1 sowie Abb. 1.2 dargestellt. Im Modellgitter für den 1. Meilenstein wird daher das einsöhlige Modellkonzept aus /BEC 09/, /NIE 09/ nachgebildet, in dem die 3. Sohle als Referenzsohle definiert wurde. Große Volumenbereiche („Kompartimente“), die in der Realität auch mehrere Sohlen umfassen können, werden in diesem Gitter durch ein bzw. wenige Gitterelemente modelliert. Das bedeutet vor allem, dass zahlreiche einzelne Grubenbauvolumina zu Grubenbaubereichen zusammengefasst werden. Außerdem umfasst dieses Modell keine teufenabhängige Nachbildung der Struktur der Grubengebäude.



**Abb. 1.1** Modellgitter für das Basismodell, Aufsicht

Farben kennzeichnen unterschiedliche Bereiche und die in TOUGH2 verwendeten unterschiedlichen Materialgebiete

Wichtigste Eigenschaft dieses Gitters ist die Volumentreue des sogenannten „nutzbaren Volumens“ /FRI 16/ gegenüber dem bekannten und prognostiziertem Volumen des realen Grubengebäudes und dem in den vorhandenen Modellrechnungen /BEC 09/, /NIE 09/ verwendeten Volumina. Hervorzuheben sind ebenso die in diesem Modellgitter vorhandenen sog. Mischungsbereiche. Diese Mischungsbereiche verbinden die Volumenbereiche (siehe oben) miteinander. An jedem Mischungsbereich befindet sich außerdem ein Modellrand. Das ursprüngliche Konzept der Mischungsbereiche ist in /BEC 09/, /NIE 09/ dargelegt. Wie für alle anderen Volumenbereiche des verwendeten Modellgitters ist eine detaillierte Beschreibung /FRI 16/ zu entnehmen.



**Abb. 1.2** Gittermodell für das Basismodell, Seitenansicht ohne sonstige Restgruben, Nordfeld, Zentralteil und Mischungsbereich Marie

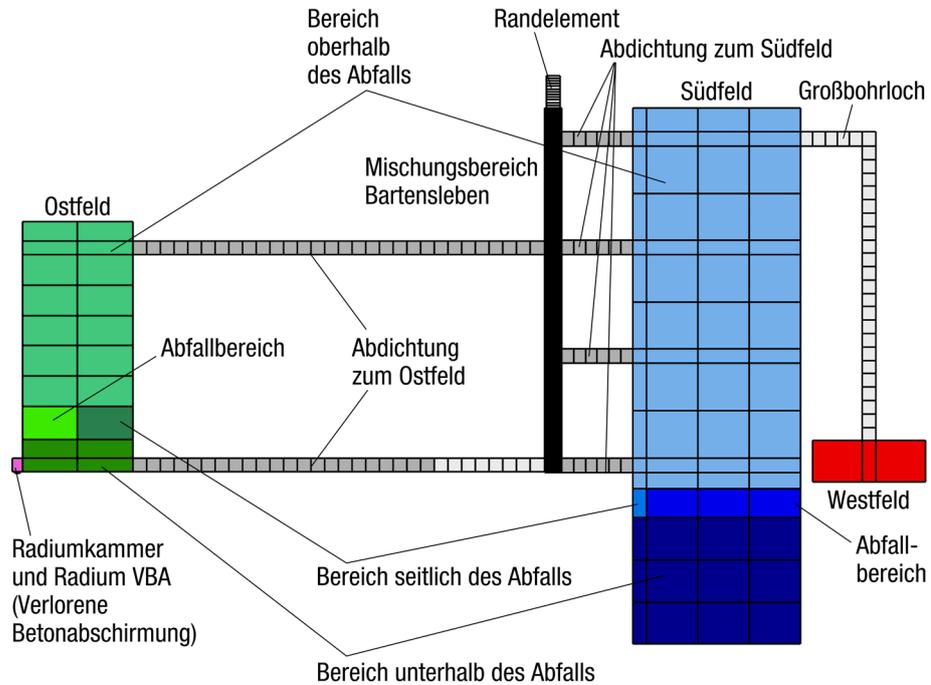
Für den zweiten Meilenstein wird das Modellgitter erweitert und die Tiefe der unterschiedlichen Bereiche des realen Grubengebäudes in das Modellgitter einbezogen. Dies betrifft sowohl die Gesamtgeometrie als auch die Diskretisierung. In diesem Modellgitter sind die vier Hauptsohlen des Grubengebäudes, realistische Firsthöhen und Tiefen der jeweiligen Modellbereiche (Kompartimente) berücksichtigt. So werden jetzt beispielsweise zwischen dem Einlagerungsbereich Südfeld und dem Mischungsbereich Bartensleben für die Sohlen 1 bis 4 jeweils Abdichtungen im Modellgitter berücksichtigt, wohingegen im Basismodell nur eine Abdichtung modelliert wurde. Um diese Ansätze zu unterscheiden wird im Folgenden die Bezeichnung dieser Abdichtung aus /BEC 09/ übernommen und die modellierte Abdichtung im Basismodell „repräsentative“ Abdichtung genannt.

Die Tiefen der einzelnen Sohlen für die Grube Marie und die Grube Bartensleben stimmen nicht überein. Deshalb wird sich im Modell auf die Tiefen und Sohlen der Grube Bartensleben bezogen. Für die Grube Marie bedeutet das, dass im Modell die höchste Sohle die Bezeichnung „Sohle 1b“ erhält und die tieferen Sohlen im Modellgitter den Sohlen (und den Bezeichnungen) der Grube Bartensleben (Sohlen 1 bis 4) angepasst sind.

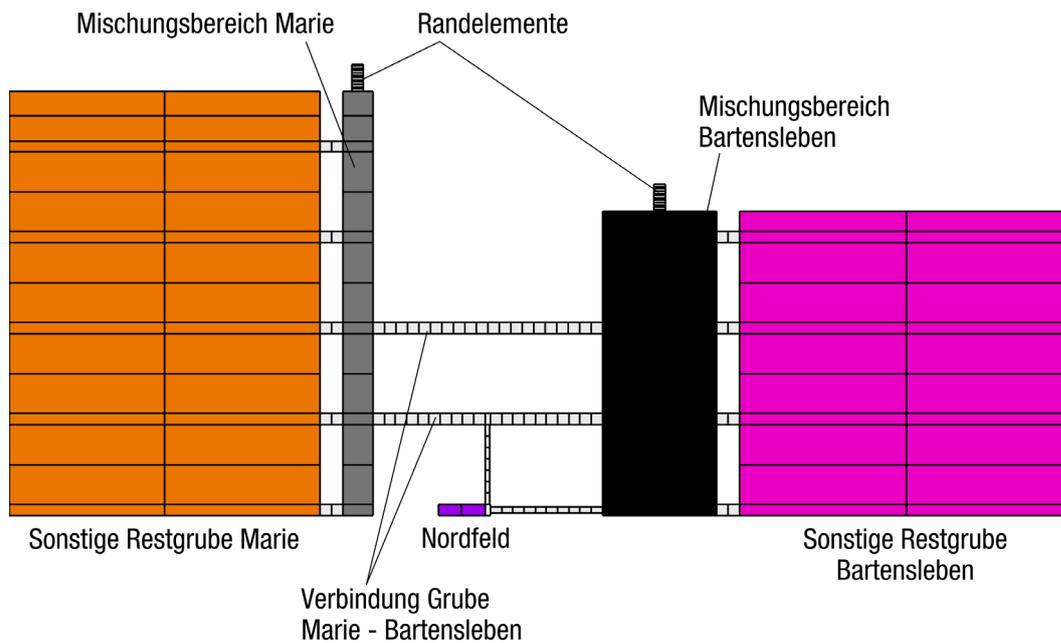
Wichtigste Eigenschaften dieses Gitters sind die Volumentreue des so genannten „nutzbaren Volumens“ und der Längentreue hinsichtlich der Tiefen, immer bezogen auf das bekannte Grubengebäude und dessen prognostizierte Entwicklung aus



re die Grubenteile, in welchen Abfälle eingelagert wurden, ausnahmslos einzeln im Modellgitter berücksichtigt worden. Für die Grube Marie wurde der Detaillierungsgrad zwar auch erhöht, allerdings nicht in demselben Maße wie für die Grube Bartensleben da in diesem Grubenteil keine Abfälle eingelagert wurden.

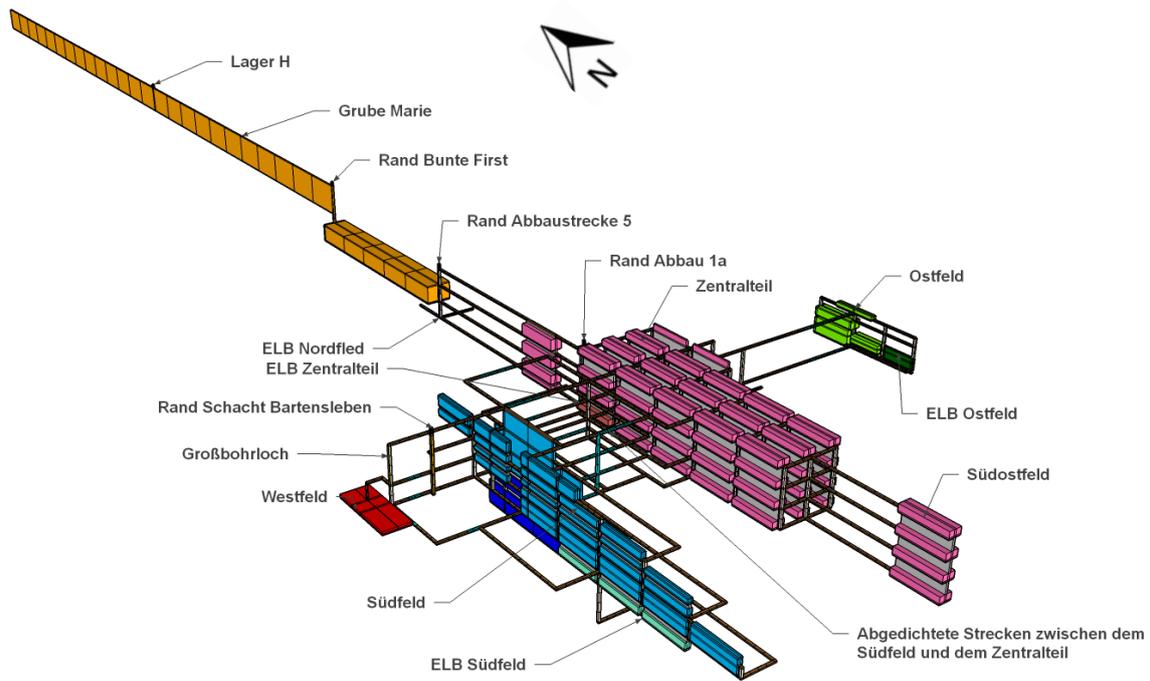


**Abb. 1.4** Modellgitter für das erweiterte Modell, Seitenansicht Ost - West



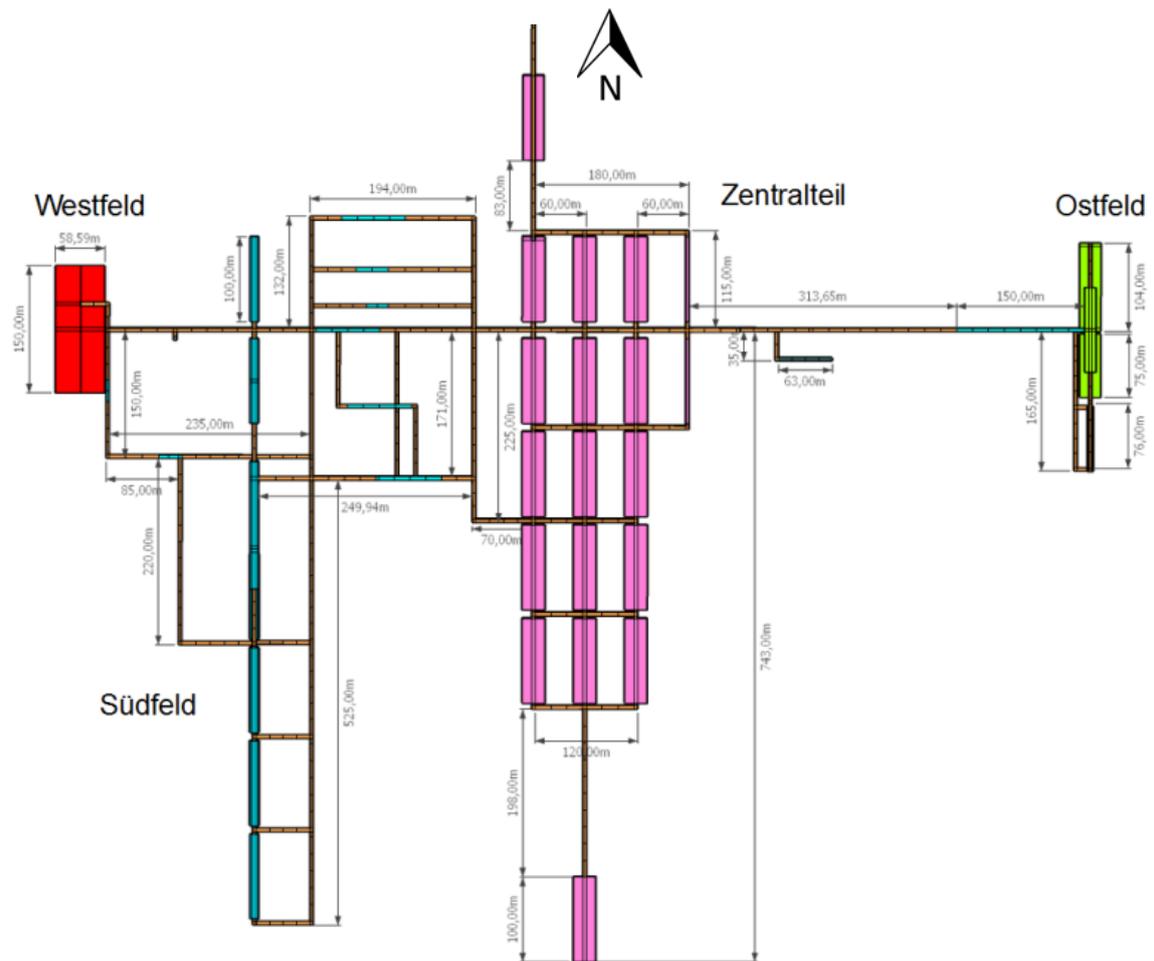
**Abb. 1.5** Modellgitter für das erweiterte Modell, Seitenansicht Nord - Süd

Die Erhöhung des Detaillierungsgrads hat auch Folgen für die Abdichtbauwerke. Alle Abdichtungen werden nun einzeln im Modell berücksichtigt. Die Konsequenz ist aber auch, dass in diesem Modellgitter die Mischungsbereiche fehlen, da sie in der Realität als solche nicht vorhanden sind. Die in der Realität sehr komplexe Struktur der Grube im Zentralteil bzw. Südostfeld konnte im orthogonalen Modellgitter nicht im Detail umgesetzt werden. Das bedeutet, dass alle Kammern, Strecken, Rolllöcher und Gesenke nur orthogonal zueinander positioniert werden und nicht jeder einzelner Abbau bzw. jede einzelne Kammer ihre Entsprechung im Modellgitter hat. Im Prinzip bleibt jedoch die Struktur des Zentralteils und des Südostfelds erhalten, so dass sowohl lateral als auch vertikal zahlreiche Kammern und Abbaue vorhanden sind. Dieses Modellgitter wird als „komplexes Modell“ bezeichnet. Verschiedene Ansichten des Modellgitters sind in den Abb. 1.6 und Abb. 1.7 gezeigt.



**Abb. 1.6** Perspektivansicht des komplexen Modellgitters

Es werden für das komplexe Modellgitter Randelemente genutzt, die in dieser Abbildung folgende bezeichnungen haben (in Klammern steht jeweils die im Ergebnisteil, Kap. 3, genutzte Abkürzung): „Lager H“ (RAMM), „Rand Bunte First“ (RABF), „Rand Abbaustrecke 5“ (RAAB), „Rand Abbau 1a“ (RAMB) und „Rand Schacht Bartensleben“ (RASH).



**Abb. 1.7** Aufsicht auf die Grube Bartensleben in Nord-Süd Richtung. Der ELB Nordfeld sowie die Grube Marie sind ausgeblendet



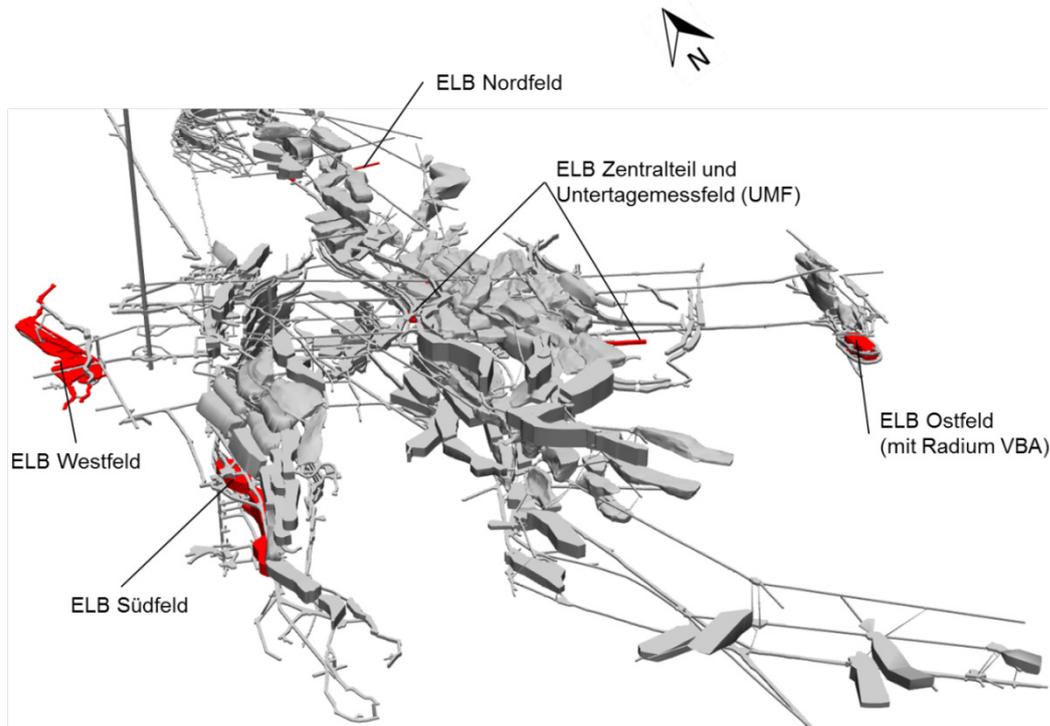
## 2 Grundlagen

Die folgenden Unterkapitel umreißen einige Grundlagen, die zum Verständnis und zur Einordnung der Ergebnisse wichtig sind. Grundlagen zum Zweiphasenfluss werden erläutert, jedoch ohne im Detail auf die Komplexität der Prozesse einzugehen. Für das Rechenprogramm TOUGH2-GRS wird beschrieben, welche grundlegenden endlagerrelevanten physikalischen Prozesse berücksichtigt werden. Außerdem werden kurz wichtige Eckdaten des Fallbeispiels – des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) – dargelegt.

### 2.1 ERAM und Stilllegung

Wie bereits oben erwähnt, können die im Vorhaben geplanten Arbeiten nur unzureichend anhand eines generischen Endlagerstandorts oder Endlagerkonzeptes durchgeführt werden. Deshalb werden in diesem Vorhaben alle Analysen am Beispiel des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) durchgeführt. Das ERAM ist ein ehemaliges Salzgewinnungsbergwerk und liegt als solches in einer geologischen Salzstruktur. Auf die Geologie wird hier nicht weiter eingegangen, da wie in Kap.1.3 erwähnt in den Berechnungen das Deckgebirge nicht betrachtet wird. Die geologischen Gegebenheiten der Salzstruktur spielen für die Berechnungen nur insofern eine Rolle, als dass das innerhalb des Bergwerks aufgeschlossene Gestein Auswirkungen auf zahlreiche Planungen (z. B. der Abdichtbauwerke) oder für die Umlösung hat. In den Fällen, in welchen dies relevant ist, wird darauf explizit Bezug genommen. Wichtig ist, dass – wenn nicht explizit anders erwähnt – alle Annahmen und Angaben zum ERAM und zur Stilllegung auf den Planungen beruhen, die zu Beginn dieses Vorhabens veröffentlicht waren und in /BEC 09/, /NIE 09/, /RES 09/, /ZER 09/ und den darin enthaltenen Referenzen beschrieben sind.

Das Grubengebäude des ERAM als ehemaliges Salzbergwerk ist im Vergleich zu dem im Vorhaben VSG betrachteten Grubengebäude /BOL 12/, /BOL 11/ komplexer. Die Grube besteht aus zahlreichen Abbauen, die auf mehreren Sohlen (bis zu sieben) liegen. Die Gesamtgrube besteht aus zwei wesentlichen Teilen mit eigenem Schacht, der Grube „Bartensleben“ und der Grube „Marie“. Einen Eindruck von der Komplexität gibt Abb. 2.1, in der nur der Teil der Grube „Bartensleben“ gezeigt ist. Die Grube „Marie“ schließt im Norden an.



**Abb. 2.1** Kammerstruktur des ERAM (Grube Bartensleben). Einlagerungsbereiche (ELB) sind in rot gekennzeichnet (3D Darstellung aus /DBE 14/)

Nachdem der Salzabbau beendet wurde sind ab 1971 radioaktive Abfälle eingelagert worden. Die Einlagerung fand mit Unterbrechungen bis 1998 statt. Für die hier durchgeführten Betrachtungen sind die Lokationen der Einlagerung interessant. Die radioaktiven Abfälle sind ausschließlich in Abbauen oder Strecken der 4. Sohle eingelagert. Diese Einlagerungsbereiche befinden sich an unterschiedlichen Lokationen auf dieser Sohle. Diese Einlagerungsbereiche (ELB) sind ebenfalls in Abb. 2.1 gekennzeichnet. Im Folgenden soll unterschieden werden zwischen den Einlagerungsbereichen (ELB) und den Lokationen in der Grube. So ist zum Beispiel mit „Ostfeld“ der gesamte Grubenteil gemeint, mit „ELB Ostfeld“ kann – je nach Modell – auch nur der tatsächliche Abbau gemeint sein in welchem Abfälle lagern: Durch die unterschiedliche Struktur der Modelle sind die Bezeichnungen im Basismodell und erweitertem Modell teilweise synonym verwendbar, während im komplexen Modell Lokationen in der Grube und tatsächliche Einlagerungsgrubenbaue klar voneinander zu unterscheiden sind.

Insgesamt lagert im ERAM ein radioaktives Inventar von ca.  $6 \cdot 10^{14}$  Bq (Stand 30.06.2005) /RES 09/. Angaben zum detaillierten und lokationsbezogenen Radionuklidinventar, welches in die vorliegenden Berechnungen eingegangen ist, sind in /FRI 16/ zu finden.

Für das ERAM wurde im Jahre 1997 ein Antrag auf Stilllegung gestellt. Im Zuge der Stilllegungsplanung wurde ein Stilllegungskonzept erstellt, welches auf dem Bau von Abdichtbauwerken und einer weitgehenden Vollverfüllung basiert /BEC 09/.

Der Bau von zahlreichen Abdichtbauwerken soll dazu führen, dass einzelne Einlagerungsbereiche/Grubenteile hydraulisch voneinander getrennt sind. Diese Bereiche (siehe auch Abb. 2.1) sind:

- Ostfeld (ELB Ostfeld sowie Radium-VBA (Verlorene-Beton-Abschirmung)),
- Südfeld (ELB Südfeld) und
- Westfeld (ELB Westfeld).

Die geplante weitgehende Vollverfüllung (Versatz von Grubenbauen mit Salzbeton) soll das Hohlraumvolumen reduzieren und das Gebirge stützen /BEC 09/. Durch die stützende Wirkung sollen vorhandene Auflockerungszonen verheilen, keine neuen Auflockerungszonen gebildet werden und die Konvergenzraten reduziert werden, so dass die Wahrscheinlichkeit für den Zutritt von Wässern verringert wird /BEC 09/.

Im Rahmen der Vollverfüllung werden auch Strecken mit Salzbeton verfüllt. Die Verfüllung hat dabei aber nicht notwendigerweise die Qualität von Abdichtbauwerken. Die sonstigen ELB (Nordfeld, Zentralteil und UMF) werden im Folgenden auch als „nicht abgedichtete Bereiche“ bezeichnet und sind hydraulisch nicht durch Abdichtungen voneinander getrennt. In der Grube liegen sie zwischen den hydraulisch abgedichteten Grubenteilen bzw. ELB (im Folgenden auch als „abgedichtete Bereiche“ bezeichnet). Charakteristisch ist, dass das Westfeld keine direkte Verbindung zu den nicht abgedichteten Bereichen hat, sondern ausschließlich Verbindungen zum Südfeld vorhanden sind. Wichtig zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang, dass die Stilllegungsplanung den Bau von Abdichtbauwerken zwischen Westfeld und Südfeld auf der 3. und 4. Sohle vorsieht, aber vom Westfeld zur 1. Sohle ein sog. Großbohrloch geplant ist, welches die Ableitung von Gasen aus dem Westfeld ermöglichen soll /BEC 09/. Dadurch soll ein potenziell hoher Druck im Westfeld vermieden werden, in dem ca. 60 % des gesamten potenziellen Gasbildungsinventars liegen. Aus den vorgenannten Gründen wird vorwiegend im Falle des Basis- und erweiterten Modells und analog zu /BEC 09/, /NIE 09/ die Bezeichnung ELB West-/Südfeld für die modelltechnische Kombination aus ELB Südfeld und ELB Westfeld verwendet.

## 2.2 Szenarien

Die vorliegenden Simulationen basieren auf zwei wesentlichen Szenariengruppen, die in der vorhandenen Langzeitsicherheitsanalyse für das ERAM betrachtet wurden. Dies sind die Systementwicklung „trockene Grube“ und die Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“ /FRI 16/, /RES 09/. Im Gegensatz zu den Simulationen in /BEC 09/, /NIE 09/ wird in den vorliegenden Berechnungen das Deckgebirge nicht betrachtet. Die Auswirkungen der unterschiedlichen Systementwicklungen sind in /BEC 09/, /NIE 09/, /RES 09/ detaillierter beschrieben. Die Berechnungen in /BEC 09/, /NIE 09/ basieren auf diesen Systementwicklungen.

Für die Systementwicklung der „trockenen Grube“ wird davon ausgegangen, dass im Nachweiszeitraum *„höchstens eine vernachlässigbar geringe Lösungsmenge“* Zutritt /RES 09/. Dies hat Konsequenzen für zahlreiche weitere Annahmen, beispielsweise für das Gesamtvolumen der Grubenbaue. Für dieses kann ohne Lösungszutritt keine Umlösung und damit keine Erhöhung des Volumens stattfinden, so dass sich das Gesamtvolumen der Grubenbaue von der Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“ unterscheidet. Einige wichtige Prozesse und Randbedingungen für die Systementwicklung „trockene Grube“ sind:

- Das advektive<sup>1</sup> Entweichen von Gas aus der Grube ist ab 3 MPa möglich (da am Modellrand ein hydrostatischer Druck von 3 MPa überwunden werden muss). Dieser Druck wird im Folgenden auch als „kritischer Druck“ bezeichnet.
- Das diffusive<sup>1</sup> Entweichen von Fluiden aus der Grube ist immer möglich.
- Der Mischungsbereich der Grube Bartensleben als Schnittstelle zum Hutgestein und Deckgebirge ist Austrittslokation (Modellrand) für Fluide.

---

<sup>1</sup> Durch die Definition des Modellrandes ist ein diffusiver Transport immer möglich: Da für die „trockene Grube“ keine Wegsamkeiten in die Grube existieren, müsste nach /BEC 09/ zur Freisetzung der Gase aus der Grube der Gebirgsdruck am Grubenhöchsten überwunden werden, so dass Risse entstehen könnten. Nach /BEC 09/ wird jedoch davon ausgegangen, dass es *„bereits geringfügige Wegsamkeiten zum Deckgebirge gibt“*. Deshalb wird vom *„geringeren hydrostatischen Druck“* (3 MPa) ausgegangen, der überschritten werden muss, *„damit die Gasfreisetzung beginnt“*. In der Konsequenz wird in den vorliegenden Berechnungen davon ausgegangen, dass diese Wegsamkeiten für den diffusiven Fluss auch ohne einen ausreichend hohen Druck zur Verfügung stehen.

- Aufgrund der in den Abfällen vorhandenen Flüssigkeit entstehen instantan nach Verschluss im Endlager Gase, die zur Druckentwicklung beitragen und gasförmige Radionuklide transportieren.
- Es wird angenommen, dass das zur Gasbildung notwendige Wasser in ausreichender Menge vorhanden ist, somit gibt es keine limitierte Gasbildung.
- Es findet keine Volumenvergrößerung durch Umlösung statt, da keine Lösung zutritt.
- Die Grubengebäude unterliegen der Konvergenz, so dass der eingebrachte Versatz kompaktiert werden kann und sich die Porosität (und ggf. die Permeabilität) des Versatzmaterials verringern kann.
- In der mit Salzbeton versetzten Radiumkammer wird die Sorption von Radium berücksichtigt.
- Für alle anderen Radionuklide wird keine Sorption berücksichtigt.

Für die Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“ wird davon ausgegangen, dass im Nachweiszeitraum Lösungen „in erheblicher Menge“ /RES 09/ zutreten. Dies hat beispielsweise die Konsequenz, dass vorhandene Abdichtbauwerke in der Grube durch korrosive Lösungszusammensetzung ihre Funktionsfähigkeit verlieren können. Einige wichtige Prozesse und Randbedingungen für die Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“ sind:

- Der Mischungsbereich der Grube Bartensleben als Schnittstelle zum Hutgestein und Deckgebirge ist Zutritts- und Austrittslokation (Modellrand) für Fluide.
- Zutritt von Lösung in die Grube direkt nach Verschluss des Endlagers.
- Das advective Entweichen von Fluiden aus der Grube ist ab 4,9 MPa möglich (da am Modellrand ein hydrostatischer Druck von 4,9 MPa überwunden werden muss).
- Das diffusive Entweichen von Fluiden aus der Grube ist immer möglich.
- Aufgrund der in den Abfällen vorhandenen Flüssigkeit entstehen instantan nach Verschluss des Endlagers Gase, die zur Druckentwicklung beitragen und gasförmige Radionuklide transportieren können.

- Es wird angenommen, dass das zur Gasbildung notwendige Wasser für bestimmte Bereiche zunächst nicht in ausreichender Menge vorhanden ist. Die Gasbildung ist somit limitiert. Erst nach Zutritt von Lösung kann bei Kontakt zu den Abfällen weiteres Gas entstehen.
- Es findet eine Volumenvergrößerung der Grubenbaue durch Umlösung statt. Das durch die Umlösung entstandene zusätzliche nutzbare Volumen ist zu Simulationsbeginn lösungsgesättigt.
- Die Grubengebäude unterliegen der Konvergenz, so dass der eingebrachte Versatz kompaktiert werden kann und sich die Porosität (und ggf. die Permeabilität) des Versatzmaterials verringern kann.
- Die Abdichtbauwerke können durch korrosive Lösung ihre Funktionsfähigkeit einbüßen, so dass sich ihre Permeabilität erhöht.
- die Rückhaltung von  $^{14}\text{C}$  in den Einlagerungsbauen durch Ausfällung als Carbonat ist im initial vorgegebenen Inventar berücksichtigt. Das bedeutet, dass das vorgegebene  $^{14}\text{C}$ -Inventar für das Szenario „trockene Grube“ etwas höher ist (siehe /FRI 16/ für genaue Daten).
- In der mit Salzbeton versetzten Radiumkammer wird die Sorption von Radium berücksichtigt.
- Für alle anderen Radionuklide wird keine Sorption berücksichtigt.

### **2.3 Zweiphasenfluss**

Wenn ein Medium nicht nur von einer, sondern von mehreren Phasen durchströmt wird, ist es erforderlich zahlreiche Prozesse zu berücksichtigen, die diese Strömung beeinflussen können. Die allgemeine Beschreibung solcher Mehrphasenfluss-Prozesse im porösen Medium soll hier beschränkt sein auf einen kurzen Abriss des physikalischen Modells, welches dem hier genutzten Rechenprogramm TOUGH2 und damit auch allen Ergebnissen zugrunde liegt. Die Basis des physikalischen Modells bildet die Erweiterung des Ansatzes von Darcy /DAR 56/ auf zweiphasige Strömung /HEL 97/, /PRU 99/ einer flüssigen (liq.) und gasförmigen (gas.) Phase. Detailliertere Beschreibungen lassen sich in /HEL 97/ oder /KRÖ 09/ finden. Im Rahmen des Vorhabens ZIESEL wird außerdem in /FRI 16/ auf einige relevante Einzeleffekte eingegangen und die Parametrierung detailliert beschrieben.

Die Erweiterung des Darcy-Gesetzes auf zweiphasigen Fluss macht es erforderlich, neben der phasenabhängigen Viskosität auch die Permeabilität für jede Phase separat zu betrachten und das Konzept der relativen Permeabilität kurz zu beschreiben.

### **Relative Permeabilität**

Die effektive Permeabilität  $k_\beta$  eines Materials einer Phase  $\beta$  ( $\beta = (liq., gas.)$ ) lässt sich bei Anwesenheit mehrerer Phasen als Produkt aus der intrinsischen (oft auch als absolute bezeichneten) Permeabilität  $k$  des Materials und der relativen Permeabilität  $k_{r,\beta}$  der Phase  $\beta$  beschreiben:

$$k_\beta = k * k_{r,\beta} \quad (2.1)$$

Für die Berechnung der relativen Permeabilität  $k_{r,\beta}$  gibt es mehrere Ansätze. In der Regel hängt die relative Permeabilität  $k_{r,\beta}$  von den Phasensättigungen (siehe unten) ab. Bei den vorliegenden Berechnungen wird in der Regel der Ansatz nach Corey /COR 54/ verwendet, es gibt jedoch auch Ausnahmen. Details und Parametrierung zur Implementierung der relativen Permeabilität sind in /FRI 16/ beschrieben.

### **Phasensättigung**

Die Anwesenheit einer Phase  $\beta$  ( $\beta = (liq., gas.)$ ) wird in der Regel durch die Phasensättigung  $S_\beta$  beschrieben, welche anhand des Verhältnisses von Phasenvolumen zu Porenvolumen berechnet wird /KRÖ 09/. Für beide Phasen kann eine residuale Sättigung  $S_{r,\beta}$  definiert werden, unterhalb derer keine Bewegung dieser Phase mehr möglich ist /KRÖ 09/. Umgekehrt bedeutet dies, dass erst dann, wenn die tatsächliche Phasensättigung die residuale Phasensättigung überschreitet, eine Bewegung dieser Phase möglich ist.

Es existieren Prozesse, die auch ohne Zustrom oder Abstrom einer Phase deren Sättigung im Porenraum reduzieren oder erhöhen können. Die tatsächliche Phasensättigung kann durch Prozesse wie Kondensation, Evaporation etc. zum Beispiel kleiner als die residuale Phasensättigung sein. Durch Kompaktion des Materials (z. B. Versatzmaterial) und die daraus resultierende Reduktion des Porenraums kann die Flüssigkeitssättigung erhöht werden, da das Phasenvolumen konstant bleibt, das Porenvolumen jedoch abnimmt. Durch eine Verringerung des Drucks (beispielsweise des lithostatischen Umgebungsdrucks durch Deckgebirgserosion) kann die Gassättigung

des Porenraums erhöht werden, da gelöstes Gas aus der flüssigen Phase austritt (Henry-Gesetz).

### **Kapillardruck**

Im Prinzip lässt sich mit den oben genannten Konzepten bereits der Fluss von zwei Phasen in einem porösen Medium berechnen. Da bei der Anwesenheit von flüssiger und gasförmiger Phase jedoch Kapillarkräfte existieren können, ist es notwendig auch dafür ein physikalisches Modell zu berücksichtigen.

An der Grenzfläche Flüssigkeit/Gas entstehen aufgrund der Oberflächenspannung Kräfte, die eine gekrümmte Grenzfläche zur Folge haben. An dieser Grenzfläche bilden sich für die beiden Phasen ( $p_{\text{gas}}, p_{\text{liq}}$ ) unterschiedliche Drücke. Die Differenz dieser Drücke ( $p_{\text{gas}} - p_{\text{liq}}$ ) wird Kapillardruck  $P_c$  genannt. Dieser hängt unter anderem reziprok vom Porenraum oder der Kluftweite ab /HEL 97/. Dadurch, dass zum Beispiel bei Erhöhung der Gassättigung der zur Verfügung stehende Porenraum für die Flüssigkeit relativ abnimmt, nimmt der Kapillardruck zu. So wird deutlich, dass der Kapillardruck auch eine Funktion der Sättigung ist /HEL 97/.

Wie auch für die relative Permeabilität gibt es zahlreiche Ansätze, die Beziehung zwischen Kapillardruck und Sättigung zu beschreiben. In der vorliegenden Arbeit wird der Van-Genuchten-Ansatz /GEN 80/ gewählt. Auch hierfür sind Details zur Parametrierung und Implementierung in /FRI 16/ beschrieben.

## **2.4 TOUGH2-GRS**

Der numerische Code TOUGH2 (**T**ransport of **U**nsaturated **G**roundwater and **H**eat) ist ein am Lawrence Berkeley Laboratory in den USA entwickeltes Programm zur Simulation des mehrdimensionalen gekoppelten Fluid-, Nuklid- und Wärmetransports in porösen und klüftigen Materialien /PRU 99/.

Der Code simuliert die Strömung mehrerer Phasen anhand eines verallgemeinerten Darcy'schen Gesetzes. Dabei werden auch Lösungs- und Ausfällungseffekte, Diffusion, Dispersion und thermische Effekte für mehrphasige Systeme mit variabler Dichte berücksichtigt. Durch die sogenannten EOS-Module (EOS: **E**quation-**o**f-**S**tate) werden

die zur Verfügung stehenden Phasen, Komponenten und die thermodynamischen Gleichgewichtsprozesse definiert.

Die Modellrechnungen für das Vorhaben ZIESEL werden mit dem Code TOUGH2-GRS durchgeführt. Diese Codeversion ist eine durch die GRS erweiterte Version des EOS7-Moduls. Eine detaillierte Beschreibung des (Original-) Codes und der Eingabeparameter findet sich im TOUGH2 Handbuch /PRU 99/ und für den von der GRS erweiterten Code in den Berichten zu TOUGH2-GRS /NAV 13b/, /NAV 16a/.

### **Beschreibung des physikalischen Modells**

In TOUGH2 wird der advective Transport verschiedener Phasen (i. d. R. Flüssigkeits- und Gasphase) berechnet. Die Phasen bestehen aus Komponenten, die entweder vom advectiven Phasenstrom mitgetragen werden oder aber innerhalb einer Phase diffundieren. Komponenten können auch durch Prozesse wie Kondensation, Evaporation, Lösung oder Entgasung von der einen in die andere Phase wechseln. In TOUGH2 wird die Flüssigphase standardmäßig als reines Wasser simuliert. Im ZIESEL Vorhaben wird von einer nahezu gesättigten Lösung ausgegangen. Näheres dazu ist in /FRI 16/ beschrieben.

Welche Phasen und Komponenten vorliegen und gemäß welchen thermodynamischen Prozessen sich die Komponenten auf die Phasen verteilen, hängt vom verwendeten EOS-Modul ab. In den vorliegenden Berechnungen wird das von der GRS erweiterte EOS7-Modul verwendet. Zusätzlich werden folgende, von der GRS entwickelte weitere Einzelmodule eingesetzt:

- COMP: Kompaktionsmodul (im Wesentlichen Porositätsabnahme)
- CORRO: Gasbildungs- bzw. „Stoffkorrosions“-modul (Gasentstehung mit Berücksichtigung des Wasserverbrauchs),
- CORFL: Modul zur Abdichtungskorrosion (Abnahme der Permeabilität von Abdichtungen aufgrund von Lösungsdurchfluss, z. B. um die chemische Korrosion von Abdichtungen zu simulieren),
- DEGRA: Degradationsmodul (zeitabhängige Abnahme der Permeabilität, z. B. um den Funktionsausfall einer Abdichtung zu einem bestimmten Zeitpunkt zu berücksichtigen),
- RANGE: Begrenzung von Primärvariablen (siehe /NAV 16a/) und

- Radionuklid: Zusätzlich zum weiterhin möglichen einfachen Zerfall (Mutternuklid → Tochternuklid) erfolgt die Berücksichtigung von Radionuklidketten<sup>2</sup> (vgl. EOS7R-Modul des Original-TOUGH2).

Die Einzelmodule selbst sind in /NAV 13b/, /NAV 16a/ beschrieben, die Parametrierung in /FRI 16/.

#### 2.4.1 Codeversion/Qualitätssicherung

Für das Vorhaben ZIESEL wurden und werden die Neu- und Weiterentwicklungen für TOUGH2-GRS einer intensiven, ständigen und teilweise auch automatisierten Qualitätssicherung und -kontrolle unterzogen. Was genau dies bedeutet und welche Maßnahmen zur Qualitätssicherung durchgeführt werden ist in /HOT 16b/ dargelegt. Dort wird auch der prinzipielle Testprozess beschrieben, den das Programm nach einer Änderung zu durchlaufen hat. Nach erfolgreichem Durchlaufen eines Testprozesses kann eine eigenständige QS-gesicherte Version entstehen, ein sog. „tag“. Alle vorliegenden Ergebnisse wurden mit folgendem tag erzielt: 01g\_2016\_05\_24\_QA\_tag.

#### 2.5 Rechenfälle

Bei der Erstellung der Rechenfälle wird ebenfalls auf die vorhandenen Systementwicklungen aus /BEC 09/, /NIE 09/, /RES 09/ zurückgegriffen. Ebenso werden vorhandene Daten und Parameter aus /BEC 09/, /NIE 09/ möglichst übernommen, um sich auf die Berechnungen fokussieren zu können und keine eigenen Recherchen durchführen zu müssen. Lediglich durch die Benutzung eines anderen Rechenprogramms (TOUGH2, Kurzbeschreibung siehe Kap. 2.4) werden weitere Annahmen, Vereinfachungen oder zusätzliche Parameter erforderlich. Die Erstellung der Rechenfälle auf Basis vorhandener und notwendiger zusätzlicher Parameter ist detailliert in /FRI 16/ dargestellt.

---

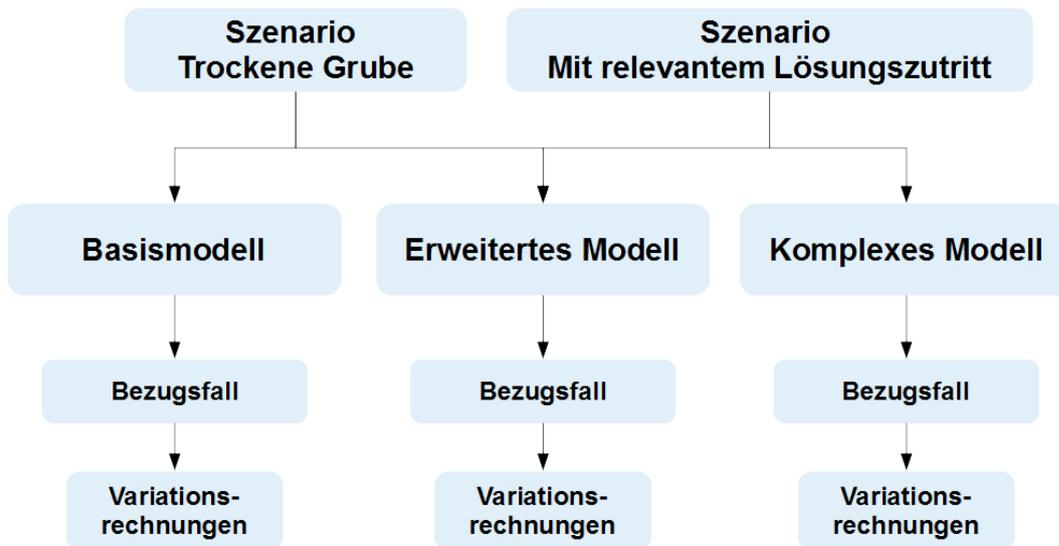
<sup>2</sup> Für die Actiniden existiert im von der GRS entwickelten Radionuklidmodul die Möglichkeit sämtliche Radionuklide einer Zerfallsreihe zu betrachten (unter der Annahme, dass das Radionuklid in genau ein Tochternuklid zerfällt). In der Praxis hat sich gezeigt, dass die maximale Zeitschrittweite für eine Berechnung kleiner als die kleinste Halbwertszeit sein sollte, um möglichst genaue Ergebnisse zu erzielen. Aus diesem Grund werden in den hier vorliegenden Berechnungen Radionuklide mit einer Halbwertszeit kleiner als 500 a nicht betrachtet (die max. Zeitschrittweite in den Berechnungen beträgt 100 a). Näheres ist in /FRI 16/ dargelegt.

Es existieren zwei Rechenfälle in /BEC 09/, anhand derer eine Art Benchmark durchgeführt werden kann. So ist es möglich anhand der Druckentwicklung zu überprüfen, ob das Volumen der Grubenbaue, der Prozess der Gasbildung und der Konvergenz äquivalent zu /BEC 09/ im TOUGH2-Modell realisiert ist. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Anhang A.1 dargestellt.

Für jede Systementwicklung und jedes Modellgitter wird ein sogenannter Bezugsfall erstellt. In diesem entsprechen die Parameterwerte, die Initial- und die Randbedingungen Daten, die durch Berechnung oder durch Expertenschätzung als Referenzwerte gelten. In Abb. 2.2 ist schematisch die Erstellung von Rechenfällen auf Basis der Systementwicklungen dargestellt. Insgesamt entstehen also 6 Bezugsfälle. Außerdem werden für jeden Bezugsfall zahlreiche Parametervariationen betrachtet. Dabei führt die Variation eines Parameters zu einem neuen deterministischen Rechenfall. Es werden niemals mehrere Parametervariationen in einem Rechenfall behandelt. Die Variation eines Parameters kann Auswirkungen auf mehrere Bereiche oder Komponenten im Endlagersystem haben. Die Variation des Parameters „initiale Flüssigkeitssättigung der Abdichtungen“ hat zum Beispiel Auswirkungen auf alle Abdichtungen im Modellgitter.

Für jeden Bezugsfall wird das Systemverhalten in Kap. 3 beschrieben. Die große Menge der vorhandenen Daten macht es unmöglich, alle vorhandenen Ergebnisse darzustellen. Die Analyse des wesentlichen Systemverhaltens und die damit einhergehende Erlangung von Systemverständnis wird deshalb anhand von ausgewählten Resultaten, die die prägenden Abläufe und das Zusammenwirken der Prozesse im Endlager darstellen, vorgenommen. Der Vergleich der Ergebnisse der Rechenfälle unter der Verwendung der unterschiedlichen Modellgitter und die zahlreichen Parametervariationen (es existieren ca. 700 Rechenfälle aus deterministischen Parametervariationen) erfordert zudem die Festlegung auf einzelne vergleichbare Phänomene oder Prozesse.

Die Parametervariationen wurden zur besseren Unterscheidbarkeit verschiedenen Kategorien zugeordnet. Diese stehen für eine Änderung der Gasbildungsparameter (GP), der hydraulischen Parameter (HP), der Konvergenzparameter und der Zweiphasenflussparameter (ZP). Zusätzlich wurden außerdem zwei Rechenfälle als Benchmark (GF) und mit unterschiedlicher interner Gitterstruktur (GT) betrachtet.



**Abb. 2.2** Schema: Vom Szenario zum Rechenfall

### 3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der deterministischen Simulationsrechnungen dargestellt. Dabei werden häufig Volumina oder auch Volumenflüsse oder -flussraten angegeben. Wenn nicht anders erwähnt sind Volumina (in  $\text{m}^3$ ), auch wenn sie als Flussraten (zum Beispiel in  $\text{m}^3/\text{a}$ ) vorkommen, stets für Normalbedingungen angegeben, dies sind:  $T = 273,15 \text{ K}$  und  $p = 101325 \text{ Pa}$  (siehe dazu auch Anhang A.2). Ebenso wird als Ergebnis der Ausstrom oder Austritt von Radionukliden am Modellrand (Modellränder bzw. „Randelemente“ sind in den Abb. 1.1 bis Abb. 1.6 zu sehen) dargestellt. In diesem Bericht werden nur Simulationsergebnisse als Austritt von Radionukliden betrachtet, wenn rechnerisch am Messpunkt im Modell für ein Radionuklid eine Rate ermittelt wurde, die größer oder gleich  $1 \text{ Bq/a}$  ist. Das entspricht einer Austrittsrate von einem Zerfall des Radionuklids pro Jahr. Alle ermittelten Raten, die unter dieser Grenze liegen werden als Null betrachtet und werden in den Abbildungen dementsprechend behandelt.

Im Rahmen der Ergebnisse wird häufig der Druck bzw. eine zeitliche Entwicklung eines Druckes dargestellt. Wenn nicht anders erwähnt handelt es sich bei dem dargestellten Druck in der Regel um den Gasdruck.

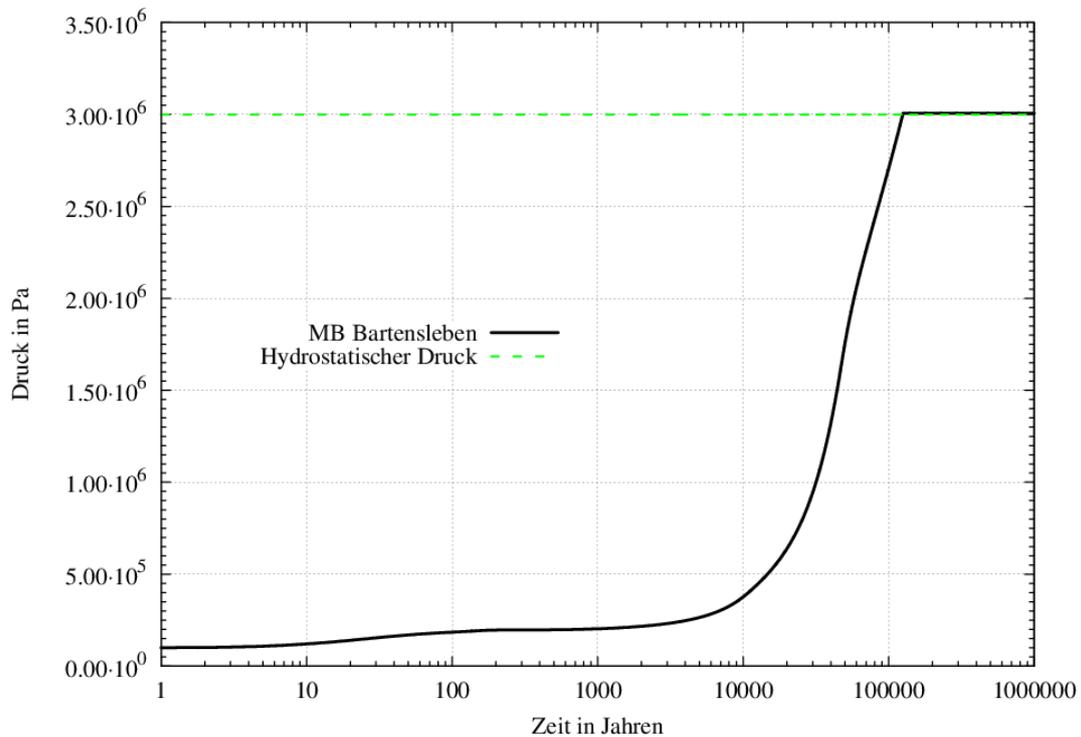
Im Rahmen der Ergebnisdarstellung wird für die Bezugsfälle (siehe Kap. 2.5) jeder Zeitschritt der entsprechenden Simulationsrechnungen dargestellt. Für die Variationsrechnungen ist dies praktisch nicht möglich, da in diesem Fall pro Rechenfall ein Speicherbedarf von 6 – 50 GB entstände. Für die Variationsrechnungen wird deshalb nur jeder 10. Zeitschritt berücksichtigt.

Außerdem wird aus Gründen der Lesbarkeit nur an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass es sich bei allen im Folgenden dokumentierten Ergebnissen um Simulationsergebnisse handelt und Formulierungen wie zum Beispiel „Gas und  $^{14}\text{C}$  treten aus dem Endlager heraus“ nicht die heutige oder zukünftige reale Situation darstellen, sondern Ausdruck dieser Simulationsergebnisse sind.

### 3.1 Basismodell

#### 3.1.1 Bezugsfall „trockene Grube“

Für den Bezugsfall Systementwicklung „trockene Grube“ tritt keine Lösung zu. Der Druck im Endlager erhöht sich kontinuierlich. Prozesse, die dazu beitragen sind die Gasbildung und die Konvergenz des Gebirges. Welchen Beitrag zur Druckerhöhung Gasbildung und Konvergenz leisten, wird in Kap. 3.1.1.1 untersucht. Dargestellt in Abb. 3.1 ist die Druckerhöhung im Mischungsbereich (MB) Bartensleben zusammen mit dem hydrostatischen Druck von 3 MPa am Modellrand. Nach ca. 125.000 a sind 3 MPa im MB Bartensleben erreicht, so dass Gas aus dem Endlager ausströmen und damit der Druck dort nicht weiter ansteigen kann.



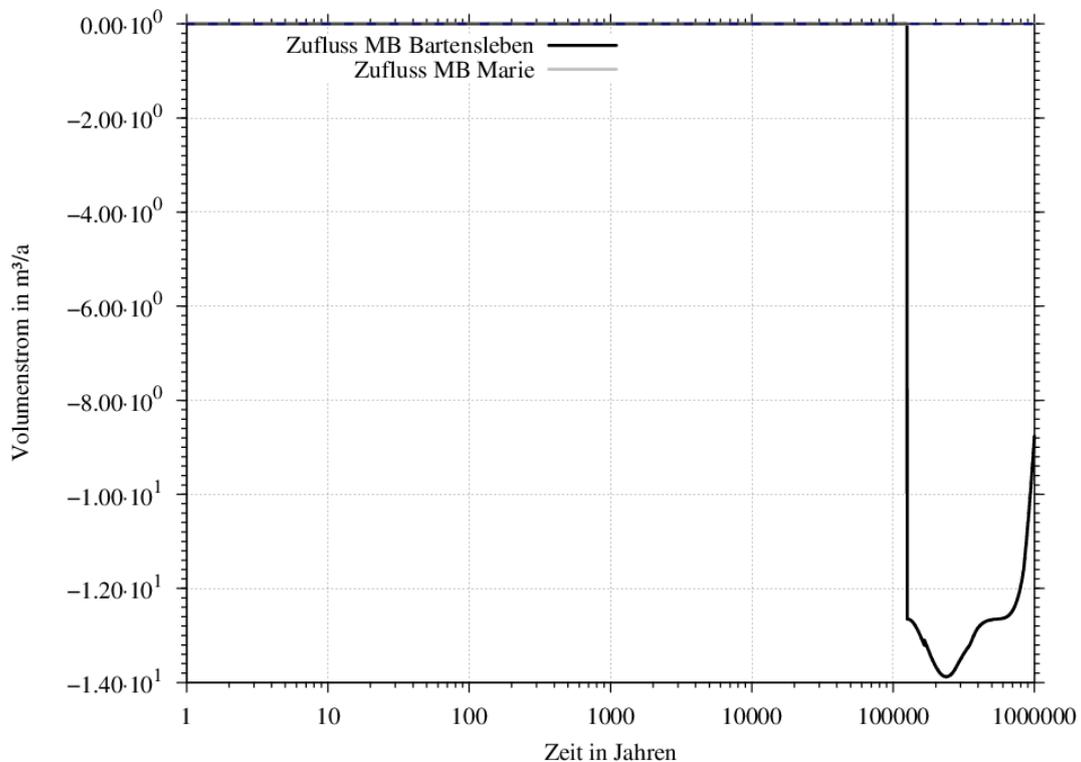
**Abb. 3.1** Druckentwicklung im Mischungsbereich Bartensleben

Schwarze Kurve: Druck im Mischungsbereich Bartensleben.

Grün gestrichelte Kurve: Hydrostatischer Druck am Modellrand Bartensleben.

Dass tatsächlich ab diesem Zeitpunkt Gas aus dem Endlager strömt, zeigt Abb. 3.2. Dargestellt ist der Gasstrom in die Grube, so dass der negative Peak einen hohen Ausstrom von Gas ab 125.600 a mit maximal etwa 14 m<sup>3</sup>/a bedeutet. Dieser Ausstrom geht stetig zurück und zeigt am Ende des Berechnungszeitraums einen Wert von ca.

9 m<sup>3</sup>/a. Im Bezugsfall findet weder ein Zutritt noch ein Ausstrom über den Mischungs-  
bereich Marie statt.



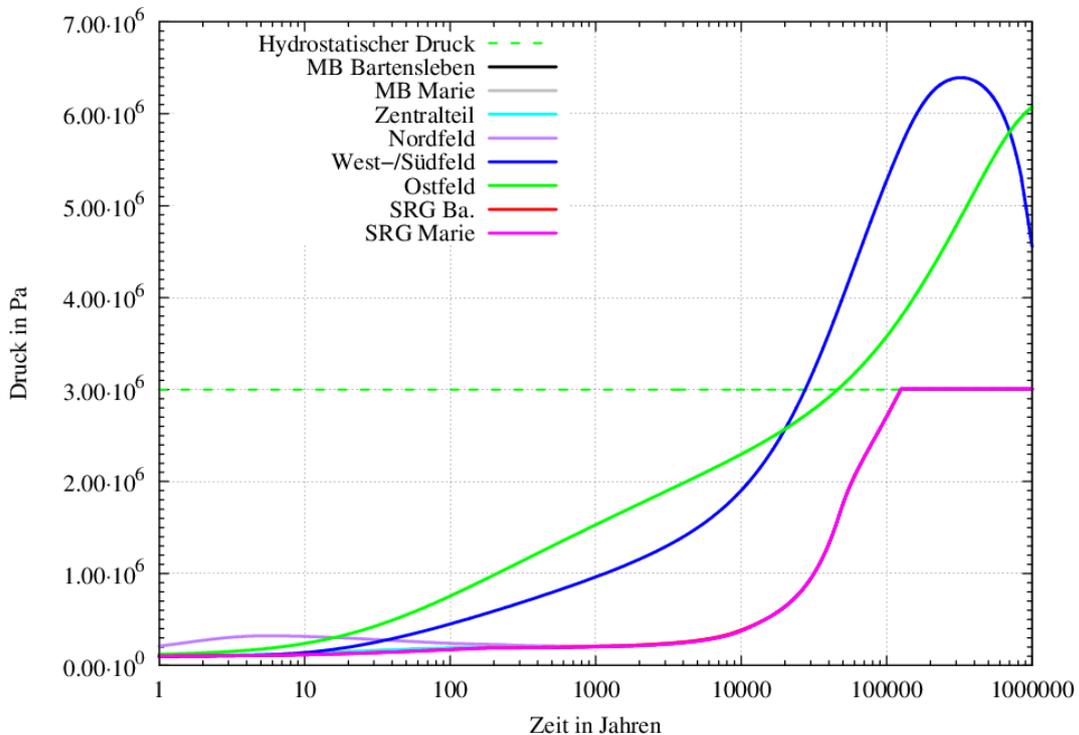
**Abb. 3.2** Gasstrom in das bzw. aus dem ERAM

positiv: Gasstrom in die Grube; negativ: Gasstrom aus der Grube.

Zwischen den einzelnen nicht abgedichteten Bereichen (ELB Nordfeld, ELB Zentralteil, sonstige Restgruben, Mischungsbereiche) herrschen nur minimale Druckunterschiede (siehe Abb. 3.3). Ab ungefähr 500 a ist kein Unterschied im zeitlichen Verlauf der Druckentwicklung zwischen den nicht abgedichteten Grubenbereichen zu erkennen. Somit ist nur die Kurve für die sonstige Restgrube (SRG) Marie zu sehen, weil sie die darunter liegenden verdeckt. Die Permeabilität zwischen den nicht abgedichteten Bereichen ist relativ hoch ( $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ ), so dass sich nach wenigen 10er bis 100er Jahren nahezu die gleichen Drücke eingestellt haben, obwohl in diesen Bereichen des ERAM die Unterschiede in der Gasproduktion deutlich sind. Da diese Bereiche auch über den Mischungsbereich Bartensleben mit dem Modellrand verbunden sind, steigt auch hier der Druck nach Erreichen des hydrostatischen Druckes von 3 MPa nicht weiter an.

Die Druckentwicklung im Südfeld und im Ostfeld ist davon völlig entkoppelt. In diesen abgedichteten Bereichen kann der Druck auf etwas mehr als 6 MPa ansteigen. Dabei ist der maximale Druck im Südfeld (6,4 MPa) etwas höher als im Ostfeld (6,1 MPa). Im

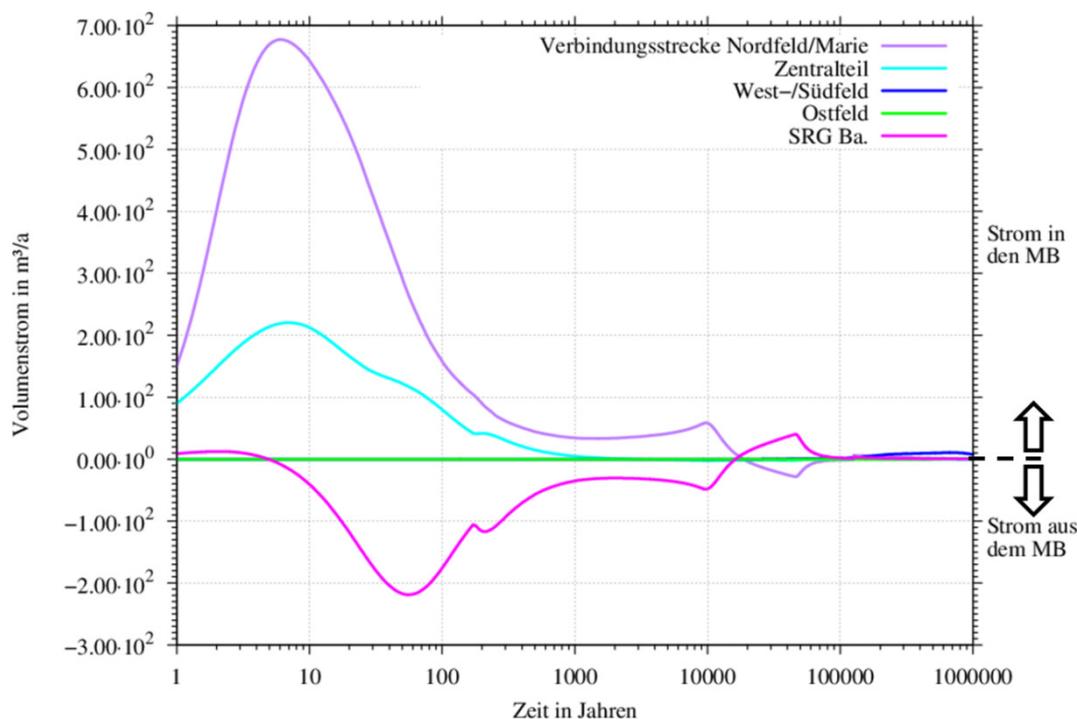
Südfeld wird der maximale Druck früher (nach ca. 323.000 a) erreicht und fällt dann wieder ab, während er im Ostfeld erst am Ende des Berechnungszeitraums erreicht wird.



**Abb. 3.3** Druckentwicklung im ERAM für unterschiedliche Modellbereiche

Weil der Druck zwischen den nicht abgedichteten Bereichen in den ersten 500 Jahren Unterschiede aufweist, die in abgeschwächter Form zu späteren Zeitpunkten weiterhin auftreten (auch wenn sie optisch in Abb. 3.3 nicht erkennbar sind), kommt es zwischen diesen Bereichen zur Gasaustauschströmung (siehe Abb. 3.4). Zunächst strömt Gas aus der Verbindungsstrecke zum MB Marie in den Mischungsbereich Bartensleben. An dieser Verbindungsstrecke ist auch das Nordfeld angeschlossen, in welchem im Vergleich zu anderen nicht abgedichteten Bereichen viel Gas gebildet wird. Ebenso strömt aus dem ELB Zentralteil Gas in den MB Bartensleben. Gleichzeitig strömt Gas aus dem Mischungsbereich Bartensleben in die sonstige Restgrube (SRG) Bartensleben. Da nach etwa 500 a der Druckunterschied zwischen den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen abnimmt, setzt sich dieser Prozess dann auf geringerem Niveau fort. Nach ca. 1.300 a stoppt der Gasfluss aus dem Einlagerungsbereich Zentralteil. Nach etwa 15.00 a kehrt sich die Richtung des Gasflusses insgesamt um. Gas strömt aus der SRG Bartensleben in den MB Bartensleben und vom MB Bartensleben in die Verbindungsstrecke zum MB Marie. Dieser Gasfluss wird stetig kleiner bis er nahe Null ist. Erst zum Zeitpunkt des Erreichens von 3 MPa ist wieder ein geringer Gasfluss erkenn-

bar. Zu diesem Zeitpunkt kann aufgrund des Drucks im MB Bartensleben Gas aus dem Endlager strömen. Dies führt dazu, dass aus allen anderen Bereichen des Endlagers Gas in den MB Bartensleben fließt. Auch aus dem West-/Südfeld strömt zu diesem Zeitpunkt Gas über die Abdichtung. Nur aus dem ELB Ostfeld fließt während des gesamten Berechnungszeitraums kaum Gas in den MB Bartensleben.

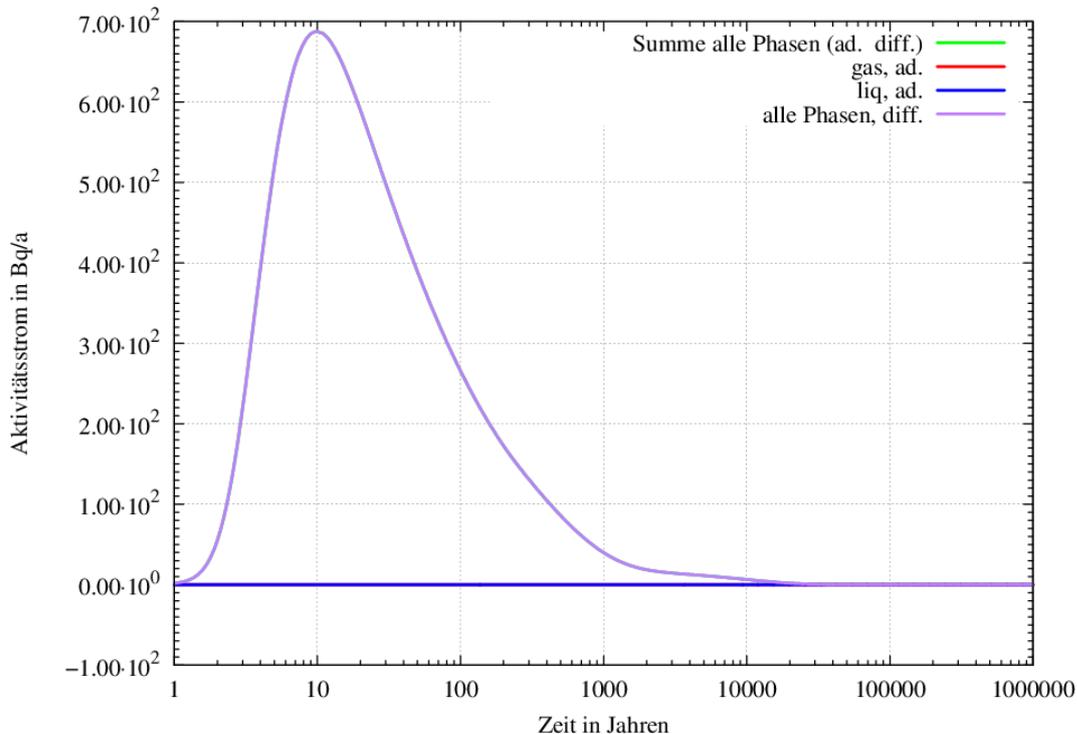


**Abb. 3.4** Gasstrom in und aus dem MB Bartensleben

Positiv: Gasstrom in den MB Bartensleben hinein; negativ: Gasstrom aus dem MB Bartensleben heraus.

Mit dem Gas können Radionuklide aus dem Endlager transportiert werden. Im Bezugsfall beträgt der advective Ausstrom aller Radionuklide jedoch Null (siehe auch Anhang: Abb. A 2). Das in der Gasphase vorhandene  $^{14}\text{C}$  ist zum Zeitpunkt des möglichen advektiven Austrags aus der Grube nach ca. 100.000 a größtenteils zerfallen, die in der flüssigen Phase (eine residuale Flüssigkeitssättigung ist im Modell vorhanden) gelösten Radionuklide können nicht aus dem Endlager austreten, da weder ein Lösungstransport noch ein Lösungszutritt erfolgt. Somit ist im Prinzip aufgrund der Definition des Modellrandes<sup>1</sup> nur der diffusive Austrag von  $^{14}\text{C}$  möglich. Dieser Austrag ist in Abb. 3.5 dargestellt. Der Ausstrom erreicht bei 10 a mit ca. 700 Bq/a ein frühes Maximum und fällt danach stetig auf null ab.

Die Radionuklide, die über den Mischungsbereich Bartensleben aus dem Endlager austreten, stammen zum großen Teil aus dem Nordfeld. Von den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen besitzt das Nordfeld das weitaus größte Inventar an  $^{14}\text{C}$ . Insgesamt befinden sich ca.  $6 \cdot 10^{10}$  Bq  $^{14}\text{C}$  im Nordfeld, während im Zentralteil knapp 40-mal weniger ( $1,6 \cdot 10^9$  Bq) vorhanden sind.



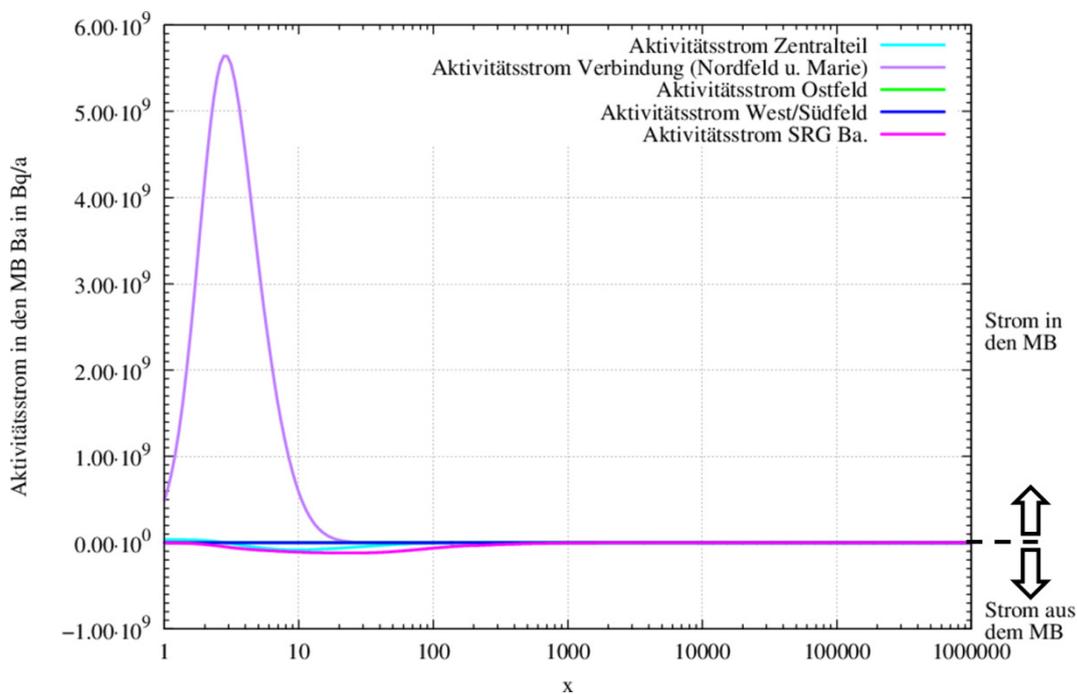
**Abb. 3.5**  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom aus dem ERAM

grün: Ausstrom als Summe aller Phasen (advektiv und diffusiv); rot: Ausstrom mittels der Gasphase (advektiv), blau: Ausstrom mittels der flüssigen Phasen (advektiv); violett: Ausstrom mittels beider Phasen (diffusiv).

In Abb. 3.6 ist dargestellt, aus welchen Bereichen des Endlagers Radionuklide (als Aktivitätsströme dargestellt) in den bzw. aus dem Mischungsbereich Bartensleben strömen. Bereits zu Beginn der Simulation strömt  $^{14}\text{C}$  advektiv aus dem Nordfeld heraus und in den MB Bartensleben hinein. Der Beitrag des  $^{14}\text{C}$ -Transports aus dem Zentralteil in den MB Bartensleben ist nur sehr gering, auch wenn man das Verhältnis des ursprünglichen Inventars der beiden ELB von etwa 40:1 mit einbezieht. Im Verhältnis zum Ursprungsinventar strömt demnach aus dem Nordfeld mehr  $^{14}\text{C}$  enthaltendes Gas in den Mischungsbereich als aus dem Zentralteil.

Die Ursache für den im Vergleich zum Zentralteil hohen Transport von  $^{14}\text{C}$  aus dem Nordfeld liegt an der im Vergleich zum Zentralteil stärkeren Gasbildung im Nordfeld,

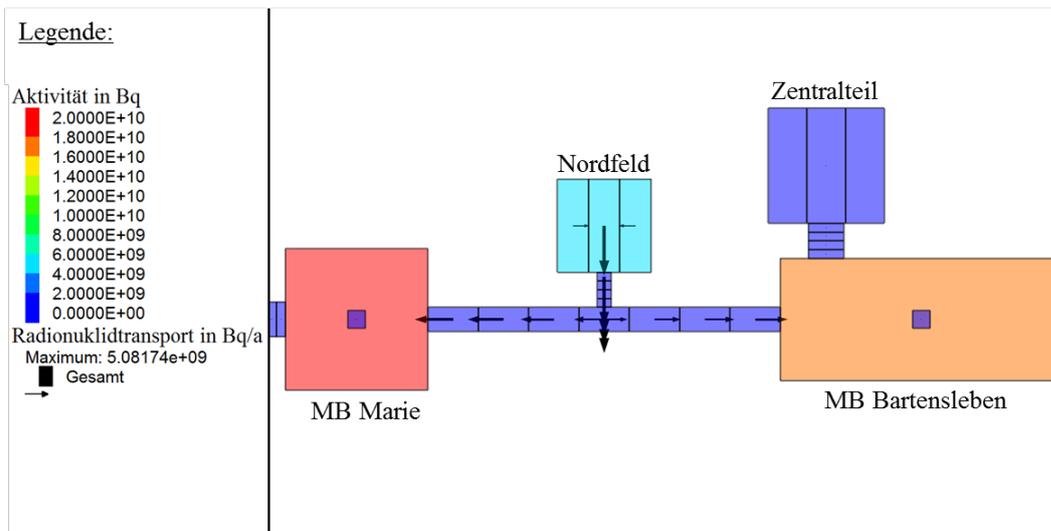
die zu einem hohen Gasdruck (vgl. Abb. 3.3) und damit zu einem hohen Gastransport (vgl. Abb. 3.4) führt.



**Abb. 3.6** Aktivitätsstrom von  $^{14}\text{C}$  in den Mischungsbereich

Positiv:  $^{14}\text{C}$ -Strom in den MB Bartensleben hinein; negativ:  $^{14}\text{C}$ -Strom aus dem MB Bartensleben heraus.

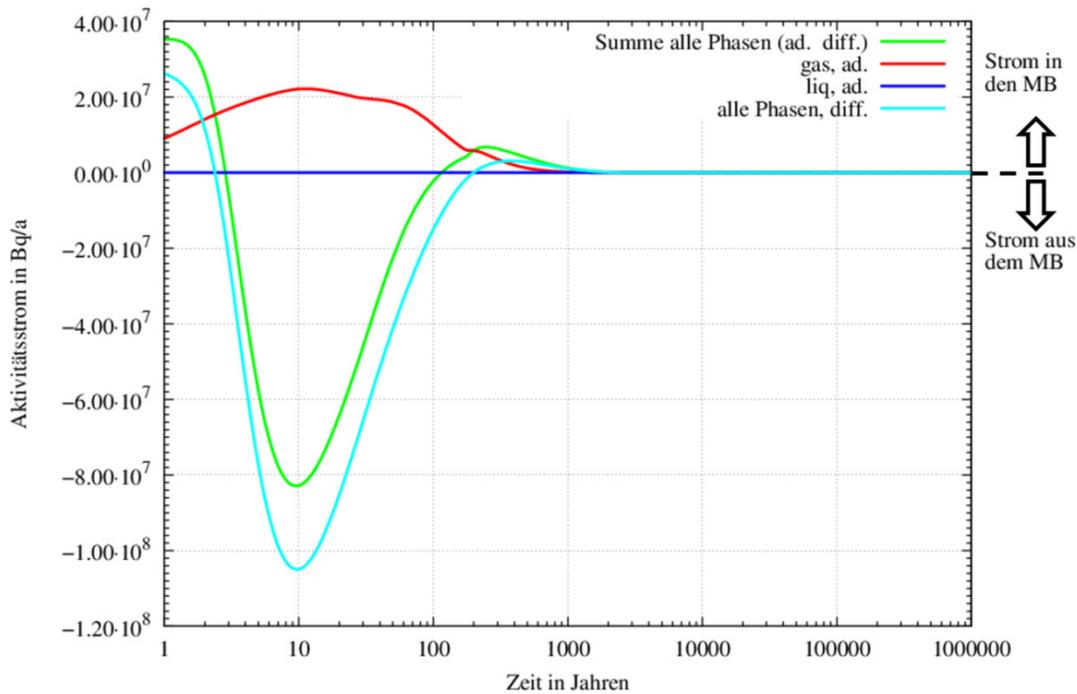
Aus dem Nordfeld werden das entstandene Gas und das darin enthaltene  $^{14}\text{C}$  nicht nur in Richtung des MB Bartensleben transportiert. Es findet auch ein Transport in Richtung MB Marie statt. Dies ist in Abb. 3.7 dargestellt. Die Pfeile zeigen den Transportweg zum Zeitpunkt 5 a aus dem Nordfeld an, der sich am Übergang zur Verbindungsstrecke beider Mischungsbereiche in beide Richtungen aufteilt. Das bedeutet, dass nicht alles  $^{14}\text{C}$  in Richtung des Mischungsbereichs Bartensleben - und damit zum Modellrand - transportiert wird. In Abb. 3.6 ist außerdem zu sehen, dass  $^{14}\text{C}$  auch aus dem Mischungsbereich in die sonstige Restgrube Bartensleben und sogar in den ELB Zentralteil strömt.



**Abb. 3.7** Transportpfad von  $^{14}\text{C}$  zum Zeitpunkt 5 a

Schwarze Pfeile zeigen Radionuklidtransport in Bq/a. Dabei entspricht die Länge des längsten Pfeils dem in der Legende angegebenen Maximum (dies gilt für alle folgenden ähnlichen Abbildungen).

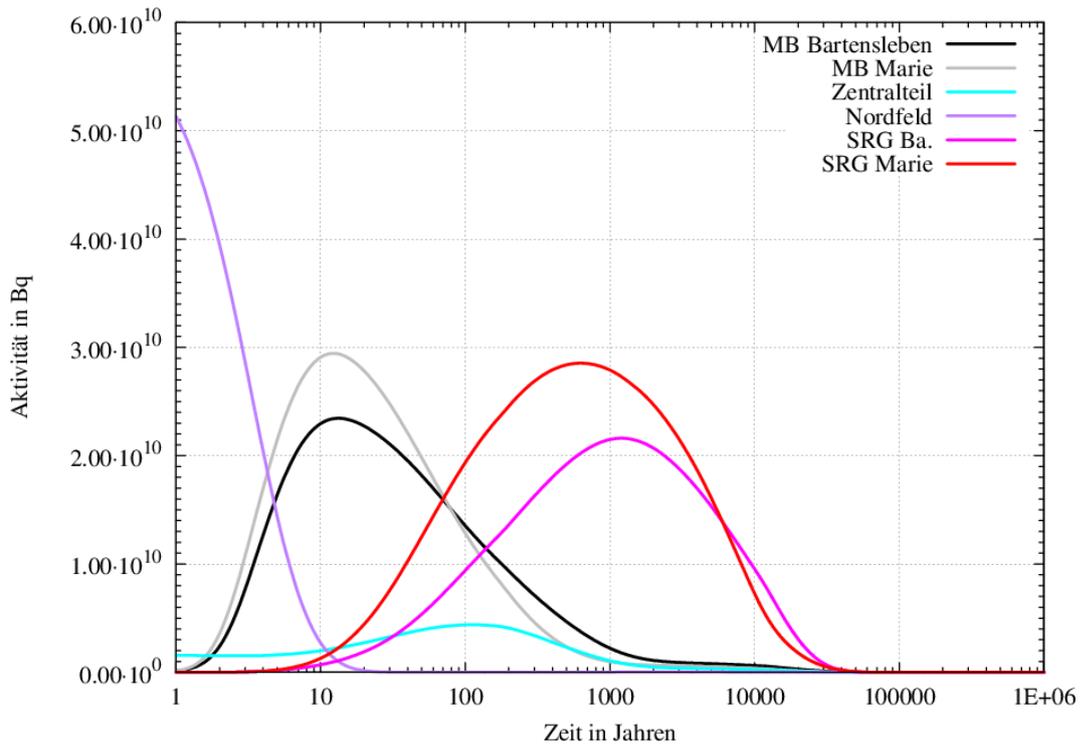
Das bedeutet, dass – obwohl  $^{14}\text{C}$  im ELB Zentralteil vorhanden ist und Gas aus diesem ELB herausströmt, es netto einen  $^{14}\text{C}$ -Einstrom in den ELB Zentralteil gibt. Die Ursache dafür ist ein extrem hoher diffusiver Transport dieses gasförmigen Radionuklids. In Abb. 3.8 sind sowohl der advective, der diffusive und der Netto-Transport (also die Summe aller Phasen und Transportarten) von  $^{14}\text{C}$  aus dem Zentralteil in den Mischungsbereich Bartensleben dargestellt. Man erkennt in Abb. 3.8, dass – wenn die Aktivität im Zentralteil und Mischungsbereich gleich ist (bei ca. 2 a, siehe auch Abb. 3.9) – der diffusive Transportanteil (cyan-farbene Linie) die Nulllinie kreuzt. Der Netto-Transport (grüne Linie) kreuzt die Nulllinie kurze Zeit später (bei etwas mehr als 2 a), wenn advectiver und diffusiver Transport betragsmäßig die gleiche Transportrate erreichen. Danach überwiegt der diffusive Transport in den ELB Zentralteil hinein. Dieser entsteht zum einen aufgrund des hohen Konzentrationsunterschiedes von  $^{14}\text{C}$  zwischen ELB Zentralteil und MB Bartensleben nach etwas mehr als 2 a. Zum anderen entstehen die sehr hohen Diffusionstransportraten durch den hohen Diffusionskoeffizienten von gasförmigem  $^{14}\text{C}$  im Grubengas von  $2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ . Die Aktivität von  $^{14}\text{C}$  in den Teilbereichen der Grube ist in Abb. 3.9 dargestellt.



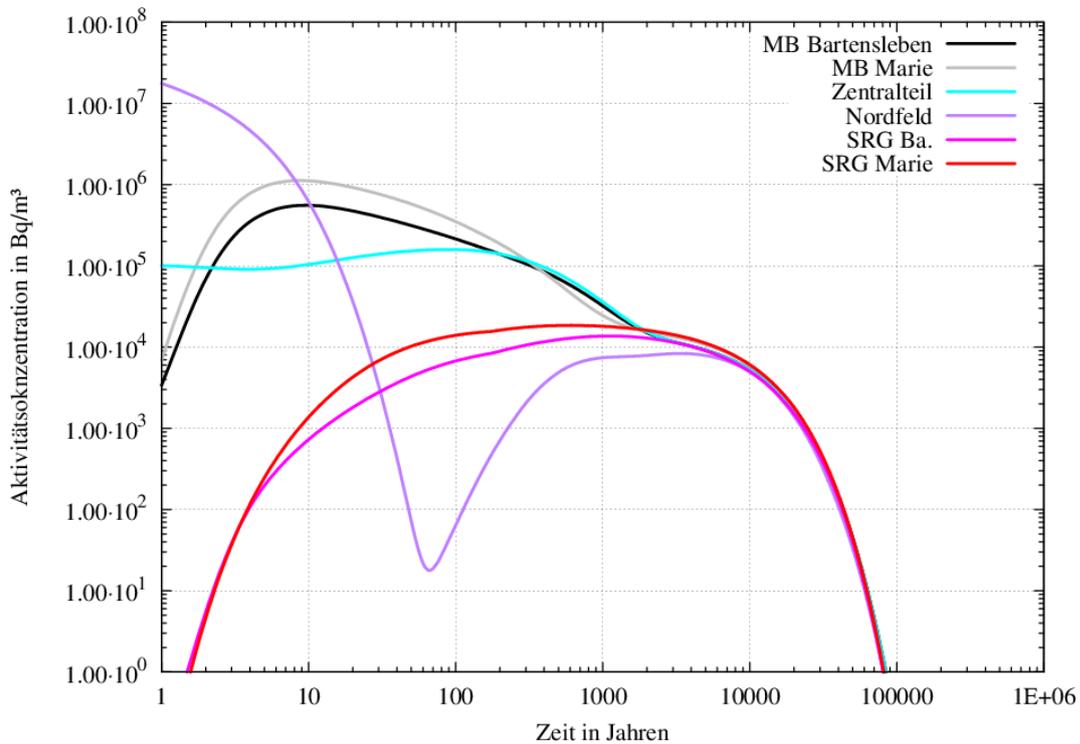
**Abb. 3.8** Aktivitätsstrom von  $^{14}\text{C}$  in den MB Bartensleben (aus dem Zentralteil)

Positiv:  $^{14}\text{C}$ -Strom in den MB Bartensleben hinein; negativ:  $^{14}\text{C}$ -Strom aus dem MB Bartensleben heraus.

Unabhängig vom lokalen Effekt des Zentralteils führt der Transport der Radionuklide in Richtung Mischungsbereich Marie und in Richtung SRG Bartensleben dazu, dass im Mischungsbereich Bartensleben weder die maximale Aktivität noch die maximale Aktivitätskonzentration vorhanden ist. Tatsächlich ist die Aktivität (oder die Aktivitätskonzentration) im Mischungsbereich Bartensleben zu keinem Zeitpunkt maximal (siehe Abb. 3.9 sowie Abb. 3.10). Je nach Zeitpunkt ist in Abb. 3.9 zu erkennen, dass die maximale Aktivität zunächst im Nordfeld, dann im Mischungsbereich Marie, dann in der sonstigen Restgrube Marie und schließlich in der sonstigen Restgrube Bartensleben vorhanden ist. Dadurch, dass der Ausstrom im Bezugsfall zu einem späten Zeitpunkt (wenn kaum noch  $^{14}\text{C}$  im System vorhanden ist) erfolgt, ist dieser Effekt unerheblich. Bei einem früheren Erreichen des Drucks von 3 MPa im MB Bartensleben und dem damit zusammenhängenden früheren Ausstrom könnte dies bedeutsam sein, sowohl was die Rate des Ausstroms betrifft (die konzentrationsabhängig ist) als auch was die Dauer ist. Auch würde die Aktivitätskonzentration vor ca. 1.000 a im Zentralteil oder Mischungsbereich Marie am höchsten sein, an denen sich aber kein Modellrand befindet aus dem Radionuklide austreten könnten.



**Abb. 3.9** Aktivität von  $^{14}\text{C}$  in Teilbereichen des ERAM



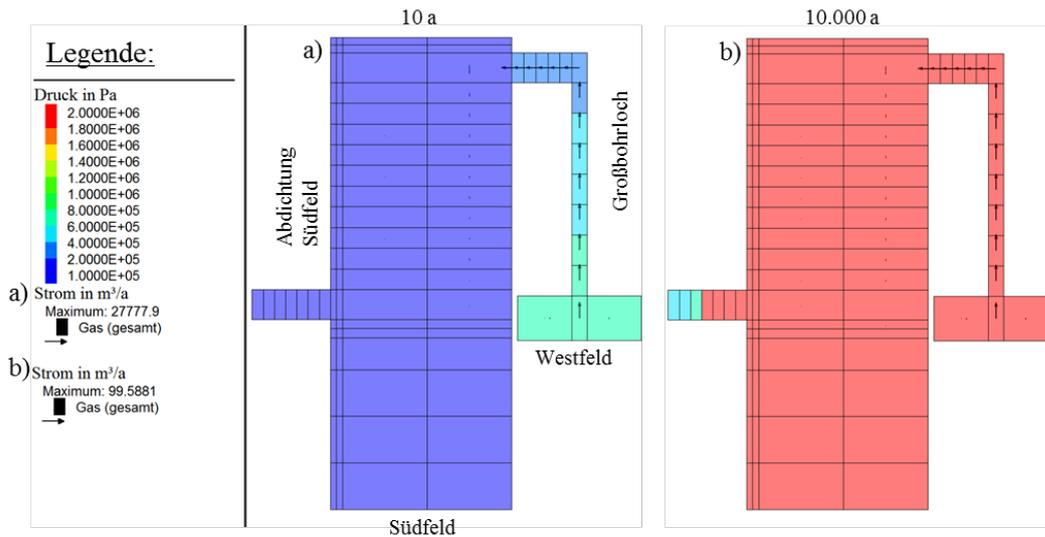
**Abb. 3.10**  $^{14}\text{C}$ -Konzentration in Teilbereichen des ERAM

Innerhalb der abgedichteten Bereiche findet – entkoppelt von der Restgrube – Gas- und Radionuklidtransport statt. In Abb. 3.11 sind Druck und Gasstrom zu verschiede-

nen Zeitpunkten dargestellt. Im Westfeld ist die Gasbildungsrate deutlich höher als im Südfeld. Das führt dazu, dass Gas aus dem Westfeld in das Südfeld strömt (siehe Abb. 3.11 a). Das Maximum des Gasstromes wird relativ früh, etwa zum Zeitpunkt 10 a erreicht, wie auch in Abb. 3.11 a) dargestellt. Nach einem längeren Zeitraum führt der Gasstrom zu einem Druckausgleich zwischen Westfeld und Südfeld, so dass in Abb. 3.11 b) nach 10000 Jahren aufgrund der Skalierung kein Druckunterschied zwischen Westfeld und Südfeld mehr zu erkennen ist und auch bei genauerer Betrachtung der Druckwerte nur geringe Druckunterschiede zwischen diesen Bereichen bestehen.

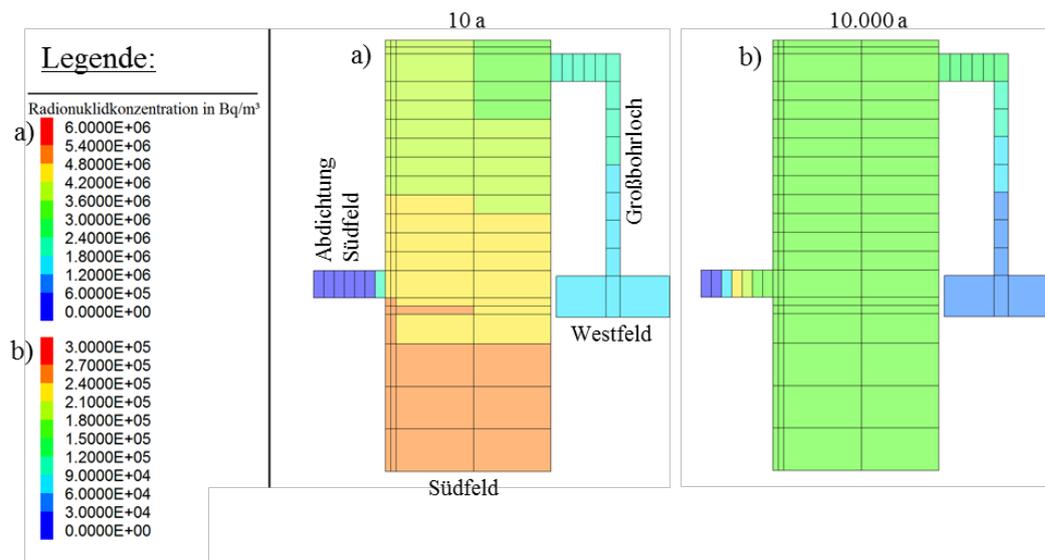
Der advective und diffusive Gasstrom und der damit verbundene Radionuklidtransport innerhalb der abgedichteten Bereiche führen auch dazu, dass die Radionuklidkonzentration innerhalb eines abgedichteten Bereichs homogen ist, im Prinzip wurde die hohe Aktivitätskonzentration im gesamten Südfeld verdünnt. Dieser Effekt ist in Abb. 3.12 zu sehen.

In Abb. 3.12 a) ist die  $^{14}\text{C}$ -Konzentration nach 10 a dargestellt. Auch nach dieser kurzen Zeit haben sich die Radionuklide, die vorher nur lokal im Westfeld und im Abfallbereich des Südfelds vorhanden waren (siehe /FRI 16/) bereits im gesamten West-/Südfeld verteilt. Nach 10.000 a findet sich nur noch im Westfeld (und in der Abdichtung zum West-/Südfeld) eine von der Konzentration im Südfeld abweichende Konzentration. Im gesamten Südfeld ist die  $^{14}\text{C}$ -Konzentration annähernd gleich. Das bedeutet, dass vor der repräsentativen Abdichtung des Südfelds nicht die maximal mögliche Aktivität des Südfelds vorzufinden ist. Zusätzlich bedeutet dies, dass die Position (1. Sohle – 4. Sohle) der Abdichtung in Bezug auf den Nuklidaustrag womöglich eine Rolle spielen könnte. Diese Frage wird unter anderem in Kap. 3.2 mit dem erweiterten Modell näher untersucht.



**Abb. 3.11** Druck und Gasstrom im Südfeld zum Zeitpunkt: a) 10 a und b) 10.000 a

Schwarze Pfeile zeigen Gasstrom, dabei entspricht die Länge des längsten Pfeils dem in der Legende angegebenen Maximum in m³/a.



**Abb. 3.12** Radionuklidkonzentration (<sup>14</sup>C) im Südfeld zum Zeitpunkt a) 10 a und b) 10.000 a

Man beachte die Skalenunterschiede zwischen a) und b); außerdem beachtenswert die Ausführungen zum Volumen des Südfelds in /FRI 16/ Kap. 2.2.2.2

Zusammenfassend lassen sich für das Basismodell zum Bezugsfall „trockene Grube“ folgende Punkte feststellen:

- Das Nordfeld und in geringerem Maße auch der ELB Zentralteil fungieren als Gasquellen, dort werden große Mengen Gas gebildet.

- Die abgedichteten Bereiche tragen nur geringfügig zum Gastransport bei.
- Diese Gasmengen gelangen direkt in den MB Bartensleben.
- Der Mischungsbereich Bartensleben fungiert als Verteiler von Gasen und Radionukliden im Endlager.
- Da am MB Marie außer der Restgrube keine weiteren Bereiche anschließen, fungiert dieser nicht in dem Maße wie der MB Bartensleben als Verteiler.
- Die abgedichteten Einlagerungsbereiche sind von den Prozessen in der nicht abgedichteten Grube nahezu völlig entkoppelt.
- Zum Zeitpunkt des Austrittsbeginns (100.000 a) ist  $^{14}\text{C}$  nur noch in geringfügiger Menge vorhanden (Halbwertszeit: 5730 a), so dass kein  $^{14}\text{C}$  aus dem Endlager tritt.
- Die höchste  $^{14}\text{C}$ -Aktivität ist niemals im Mischungsbereich Bartensleben, sondern immer in anderen Grubenbereichen vorhanden.
- Innerhalb der abgedichteten Bereiche kommt es nach wenigen 1.000 Jahren zum Ausgleich der  $^{14}\text{C}$ -Konzentration.
- Für das Szenario „trockene Grube“ spielen die nicht in gasförmiger Form vorhandenen Radionuklide keine Rolle.
- Für  $^{14}\text{C}$  erfolgt kein advektiver und nur ein geringer diffusiver Austrag.

### 3.1.1.1 Prozesse im Endlagersystem

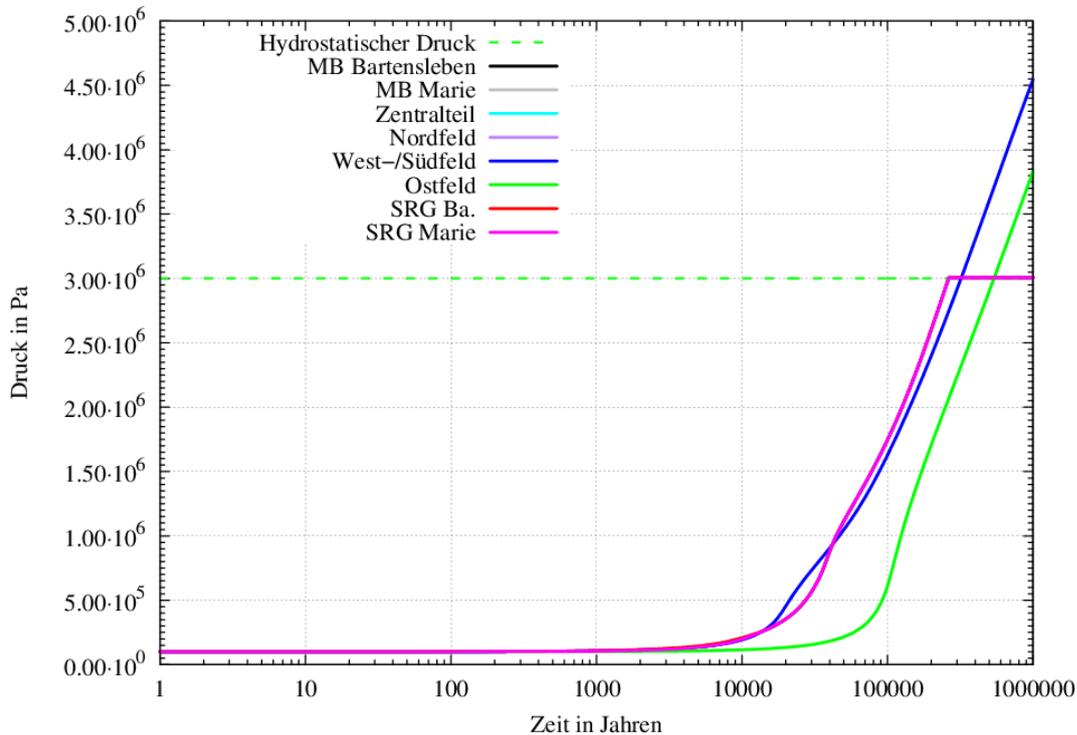
Zahlreiche deterministische Rechenfälle (siehe /FRI 16/) können – indem man sie mit dem Bezugsfall vergleicht – Aufschluss darüber geben, welche Prozesse die Entwicklung des Endlagersystems beeinflussen. Diese Prozesse werden in diesem Kapitel mit Hilfe von Rechenfällen, die Variationen des Bezugsfalls darstellen, näher untersucht. Die Parametervariationen wurden zur besseren Unterscheidbarkeit verschiedenen Kategorien zugeordnet. Diese stehen für eine Änderung der Gasbildungsparameter (GP), der hydraulischen Parameter (HP), der Konvergenzparameter und der Zweiphasenflussparameter (ZP). Zusätzlich wurden außerdem zwei Rechenfälle als Benchmark (GF) und mit unterschiedlichen Modellgittern (GT, nur komplexes Modell) betrachtet. Es werden Teilergebnisse aller betrachteten Rechenfälle gezeigt, folgende Rechenfälle

werden näher betrachtet (die Kürzel der Rechenfälle sind hier der Vollständigkeit halber erwähnt):

- Abschaltung der Gasbildung (Rechenfall GP 1.0),
- Abschaltung der Konvergenz sowie der Versatzkompaktion (Rechenfall KP 1.10),
- Undurchlässige Abdichtungen (Rechenfall GF 1.0, entspricht dem Benchmark – Rechenfall aus Kap. 2.5),
- Änderung der Permeabilität der Abdichtungen auf  $1 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$  (Rechenfall HP 1.6),
- Änderung von Konvergenzparametern (die Referenzkonvergenzrate wurde erhöht; Rechenfälle KP 1.2 und KP 1.3),
- Änderung der Permeabilität aller Abdichtungen auf  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  (Rechenfall HP 1.0), auf  $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$  (Rechenfall HP 1.1) und  $6,7 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  (Rechenfall HP 1.3),
- Änderung der initialen Flüssigkeitssättigung aller Abdichtungen auf 1 % (Rechenfall HP 1.12), 20 % (Rechenfall HP 1.11) und 40 % (Rechenfall HP 1.10),
- Änderung der initialen Flüssigkeitssättigung aller Abdichtungen auf 1 % und Aktivierung des Modellrandes am MB Marie eingeschaltet sowie Deaktivierung am Mischungsbereich Bartensleben (Rechenfall HP 4.1),
- Ausfall der repräsentativen Abdichtung zum ELB West-/Südfeld wird postuliert, das bedeutet Änderung der Permeabilität nur dieser Abdichtung auf  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  (Rechenfall HP 6.0),
- Reduzierung des Gaseindringdrucks aller Abdichtungen auf 0 MPa (Rechenfall ZP 1.0) und 1,2 MPa (Rechenfall ZP 1.1),
- Reduzierung des Gaseindringdrucks aller Materialgebiete auf 0 MPa (Rechenfall ZP 2.2).

Die Druckentwicklung und die Druckunterschiede zwischen den einzelnen Grubenbereichen als Ursache des Transports von Gas und Radionukliden können auf zwei Prozesse zurückgeführt werden. Dies sind die Gasbildung und die Gebirgskonvergenz. In

Abb. 3.13 ist für einen Rechenfall, in welchem die Gasbildung „abgeschaltet“ ist, der resultierende Druckverlauf dargestellt.

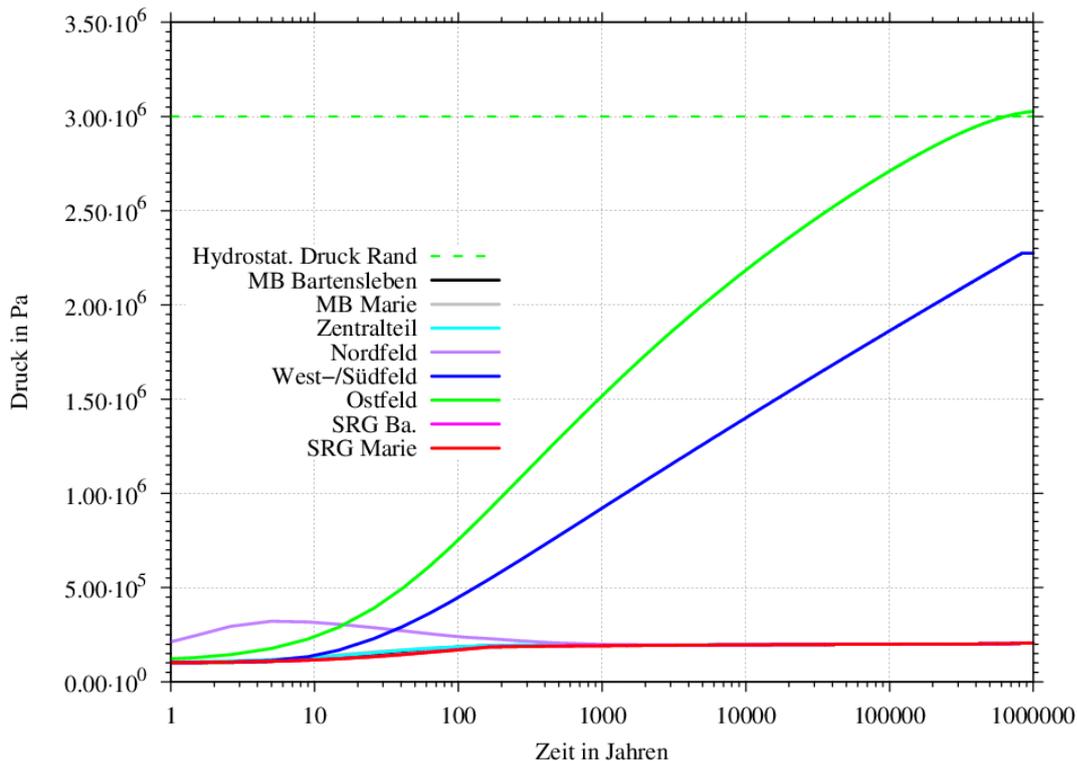


**Abb. 3.13** Druckentwicklung im ERAM für unterschiedliche Modellbereiche

Rechenfall GP 1.0: ohne Gasbildung; sonst wie Bezugsfall

Im Mischungsbereich Bartensleben wird die für den Ausstrom relevante Grenze (siehe auch Kap. 2.2) von 3 MPa erst nach ca. 260.000 a, d. h. deutlich später als im Bezugsfall, erreicht (Kurve ist verdeckt von der exakt gleich verlaufenden magentafarbenen Kurve des SRG Marie). Der Druckverlauf in den nicht abgedichteten Bereichen entspricht im Gegensatz zum Bezugsfall nun auch in den ersten Jahren dem Druckverlauf im MB Bartensleben. In den abgedichteten Bereichen unterscheidet sich der Druckverlauf besonders im West-/Südfeld deutlich von dem des Bezugsfalls. Es werden geringere Drücke als im Bezugsfall (max. 4,5 MPa im Südfeld) zu späten Zeitpunkten, nämlich erst zum Ende des Berechnungszeitraums, erreicht.

In Abb. 3.14 ist der Druckverlauf des komplementären Rechenfalls, also eines Rechenfalls ohne Berücksichtigung der Gebirgskonvergenz aber mit Berücksichtigung der Gasbildung zu sehen. In allen Bereichen steigt der Druck deutlich langsamer an als in den vorher betrachteten Rechenfällen. In den nicht abgedichteten Bereichen wird der zum Entweichen von Gas aus dem Endlager zu überwindende hydrostatische Druck von 3 MPa am Modellrand nicht erreicht.



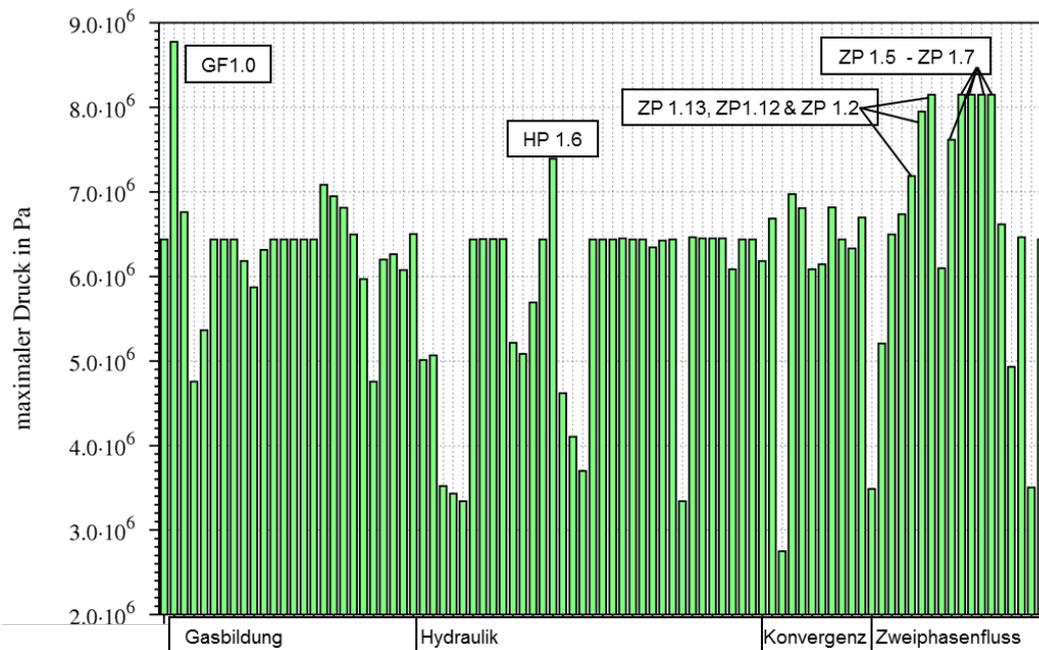
**Abb. 3.14** Druckentwicklung im ERAM für unterschiedliche Modellbereiche

Rechenfall KP 1.10: ohne Gebirgskonvergenz; sonst wie Bezugsfall

Im West-/Südfeld sowie im Ostfeld herrschen höhere Drücke, die aber auch deutlich unter denen des Bezugsfalls oder des Rechenfalls ohne Berücksichtigung der Gasbildung liegen. Es wird deutlich, dass die Druckentwicklung im Endlager und der damit verbundene Transport von Gas und Radionukliden eher vom Prozess der Gebirgskonvergenz als von der Gasbildung gesteuert werden. Damit sind Rechenfälle interessant, in welchen beispielsweise hohe Gasdrücke durch Änderung der Konvergenzparameter erreicht werden und die Konvergenz schnell fortschreitet, so dass der zum Entweichen von Gas aus dem Endlager notwendige hydrostatische Druck am Modellrand zu einem Zeitpunkt erreicht wird, an dem das  $^{14}\text{C}$  noch nicht zum größten Teil zerfallen ist.

Tatsächlich ist es jedoch so, dass die höchsten Gasdrücke für die Rechenfälle berechnet werden, in denen nicht die Konvergenzparameter geändert werden, sondern Parameter, die die Eigenschaften der Abdichtungen betreffen, also beispielsweise die Permeabilität oder die Parameter zur Berechnung der Kapillardruckfunktion. Dementsprechend werden die höchsten Gasdrücke im Endlager im Regelfall in den abgedichteten Bereichen erreicht, wie es auch im Bezugsfall der Fall ist. Die in allen Variationsrechnungen zum Bezugsfall maximalen berechneten Gasdrücke sind in Abb. 3.15 dargestellt. Markiert sind die 10 Rechenfälle mit den höchsten Gasdrücken. Der Fall

GF 1.0 entspricht dem in Kap. 2.5 erwähnten und in Anhang A.1 beschriebenen Benchmark-Fall mit undurchlässiger Abdichtung. Im Fall HP 1.6 wurde die Permeabilität der Abdichtungen um eine Größenordnung auf  $1 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$  reduziert. Alle mit ZP markierten Rechenfälle sind Variationen der Zweiphasenflussparameter (also der relativen Permeabilitätsfunktion und der Kapillardruckfunktion) der Abdichtungen.

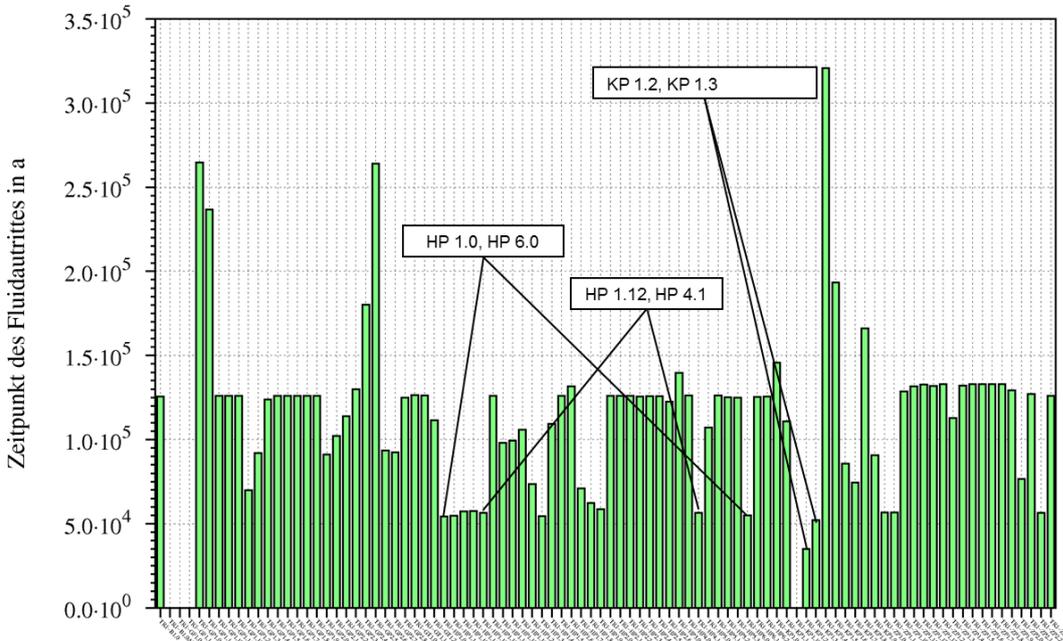


**Abb. 3.15** Maximaldrücke aller Rechenfälle (Basismodell, „trockene Grube“)

Im Histogramm entspricht der 1. Balken dem Bezugsfall; unten angegeben ist die Kategorie, die aussagt welche Art von Parameter geändert wurde

Aus Abb. 3.16 ist zu entnehmen, dass die erhöhte Konvergenz tatsächlich zu einem früheren Erreichen des Druckes von 3 MPa im MB Bartensleben führt als im Bezugsfall. Für die Rechenfälle KP 1.2 und KP 1.3 wird der Druck von 3 MPa sogar zum frühesten Zeitpunkt aller dargestellten Rechenfälle erreicht. Es ist aber ebenfalls aus Abb. 3.16 ersichtlich, dass auch in vielen anderen Fällen ohne Änderung der Konvergenzparameter frühzeitig der Druck von 3 MPa erreicht wird. Dies sind Fälle, in denen die hydraulischen Parameter der Abdichtungen (z. B. Permeabilität oder Sättigung) oder die Zweiphasenflussparameter der Abdichtungen (z. B. Gaseindringdruck) so geändert wurden, dass das Gas aus den abgedichteten Bereichen frühzeitig austreten kann. Vier dieser Fälle sind in Abb. 3.16 markiert. Im Rechenfall HP 1.0 wurde die Permeabilität aller Abdichtungen auf  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  heraufgesetzt, was im Prinzip einem Abdichtungsausfall aller Abdichtbauwerke entspricht. Für Rechenfall HP 6.0 wurde die Permeabilität nur für die repräsentative Abdichtung zum West-Südfeld auf  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$

gesetzt, so dass nur diese Abdichtung ausfällt. Die Rechenfälle HP 1.12 und HP 4.1 sind ebenfalls sehr ähnlich. In beiden Fällen wurde die initiale Flüssigkeitssättigung auf 1 % herabgesetzt. Für den Fall HP 4.1 wurde zusätzlich der Modellrand am MB Bar-tensleben ab- und am MB Marie eingeschaltet.



**Abb. 3.16** Zeitpunkt des Gasaustrittes für alle Rechenfälle (Basismodell, „trockene Grube“)

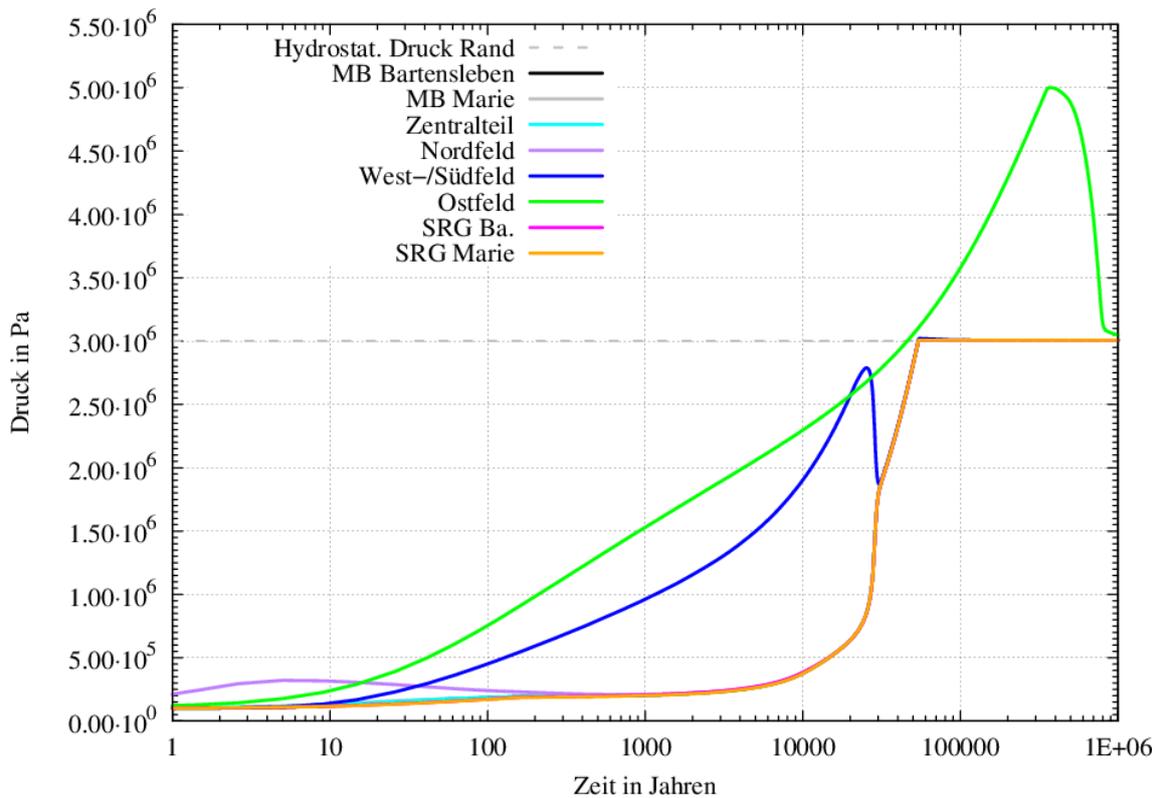
Im Histogramm entspricht der 1. Balken dem Bezugsfall; unten angegeben ist die Kategorie, die aussagt welche Art von Parametern geändert wurde

In Abb. 3.17 ist die Druckentwicklung für den Fall HP 1.0 gezeigt, die Druckentwicklung für Rechenfall HP 6.0 ist dieser sehr ähnlich. Die Permeabilität der Abdichtungen ist in diesem Rechenfall um vier Größenordnungen höher ( $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ ) als im Bezugsfall. Die Erhöhung der Durchlässigkeit der Abdichtungen für Gas und damit auch für den Transport der gasförmigen Radionuklide hat drei wesentliche Auswirkungen auf das Endlagersystem.

- Da das Gas aus dem ELB West-/Südfeld (bzw. ELB Ostfeld) in den MB Bar-tensleben strömen kann, werden in diesen abgedichteten ELB deutlich geringere Maximaldrücke erreicht.
- Da das Gas aus den abgedichteten Bereichen nun im Gesamtsystem zur Ver-fügung steht, wird die für das Ausströmen des Gases über den Modellrand ent-scheidende Grenze von 3 MPa deutlich früher erreicht,

- Die Radionuklide aus den abgedichteten Bereichen können nun mit dem Gas in den Mischungsbereich und damit zum Modellrand gelangen.

Interessant am Druckverlauf im Südfeld und im Ostfeld sind lokale Druckpeaks, die beim Südfeld nach etwa 25.000 a, beim Ostfeld nach ca. 300.000 a auftreten. Anschließend sinkt der Druck in diesen ELB dann rasch auf das Niveau des Drucks im Gesamtsystem. Der Druckabfall für das Ostfeld wird für den Rechenfall HP 6.0 nicht beobachtet.

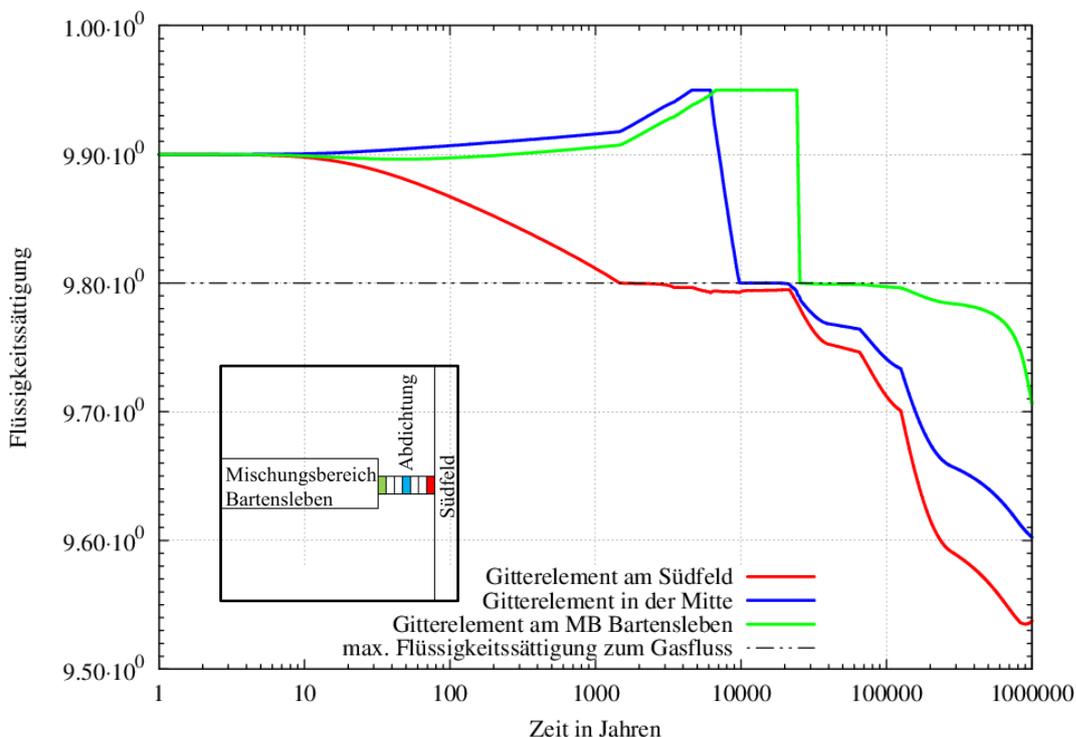


**Abb. 3.17** Druckentwicklung im ERAM für unterschiedliche Modellbereiche

Rechenfall HP 1.0: Permeabilität der Abdichtungen ist  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ ; sonst wie Bezugsfall

Diese Peaks zeigen, dass die Abdichtungen (siehe Abb. 1.1) – obwohl sie eine Permeabilität von  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  besitzen – für die Gasphase nicht vollständig durchlässig sind. Die Abdichtungen sind zu 99 % mit Flüssigkeit gesättigt. Die residuale Gassättigung – also die Gassättigung, die überschritten werden muss, damit ein Gasfluss stattfinden kann – beträgt aber in den Abdichtungen 2 %. Das bedeutet, dass zunächst die Flüssigkeit aus den Abdichtungselementen (die Abdichtungen wurden im Basismodell aus 7 Gitterelementen modelliert) verdrängt werden muss. Erst wenn der Flüssigkeitsgehalt in allen Teilstücken der Abdichtung  $< 98 \%$  ist, kann ein Gasausstrom über diese Abdichtungen erfolgen. Für den dazu erforderlichen Druck, den sog. Gaseindringdruck,

wird in den vorliegenden Rechenfällen 2 MPa angenommen (/FRI 16/). Die Ausnahme sind die Rechenfälle, in denen dieser Parameter variiert wird. Da der Druck aber auch im Mischungsbereich ansteigt, ergibt sich der im Südfeld zur Verdrängung der Flüssigkeit aus der gesamten Abdichtung zu überwindende Druck aus der Summation des Druckes im Mischungsbereich und dem Gaseindringdruck. Der Prozess der Flüssigkeitsverdrängung aus der Abdichtung am West/Südfeld ist in Abb. 3.18 dargestellt. Dort sind die Sättigungsverläufe dreier Teilstücke (Gitterelemente) dieser Abdichtung dargestellt. Das Teilstück der Abdichtung, das sich direkt am Südfeld befindet (rote Kurve), das Teilstück in der Mitte der Abdichtung (blaue Kurve) und das Teilstück, das sich direkt am MB Bartensleben befindet (grüne Kurve). Der Sättigungsverlauf der roten Kurve zeigt den Rückgang der Flüssigkeitssättigung. Um die residuale Gassättigung von 2 % zu erreichen, muss die Flüssigkeitssättigung auf 98 %- abnehmen. Dies ist nach etwas mehr als 1000 a der Fall.



**Abb. 3.18** Flüssigkeitssättigung der repräsentativen Abdichtung zum West-/Südfeld

Skizze zeigt Position der Gitterelemente in Relation zum Südfeld und Mischungsbereich.  
 Rechenfall HP 1.0: Permeabilität der Abdichtungen ist  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ ; sonst wie Bezugsfall

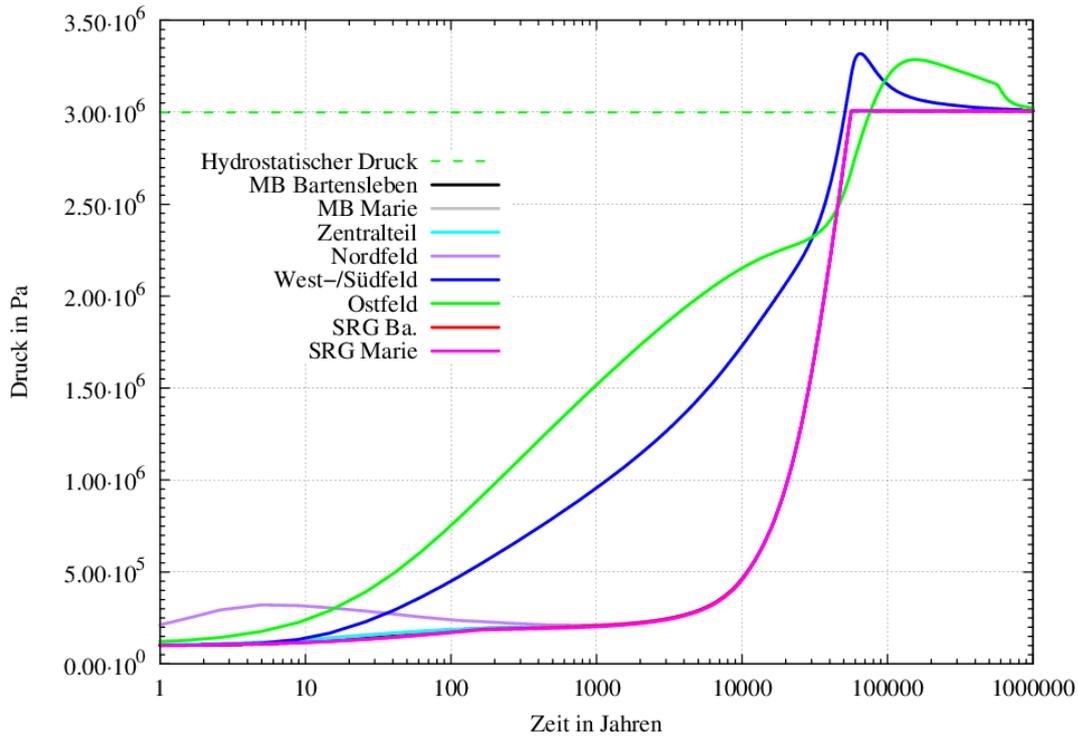
Anhand der blauen Kurve ist ersichtlich, dass die Sättigung im mittleren Gitterelement zunächst leicht ansteigt. Gleiches gilt auch für das Gitterelement am MB Bartensleben (grüne Kurve). Dieser Effekt entsteht dadurch, dass nicht nur Flüssigkeit aus diesen Gitterelementen herausströmt sondern auch ein Einstrom von Flüssigkeit aus dem Git-

terelement der Abdichtung am Südfeld in diese Gitterelemente erfolgt. Nach etwas mehr als 20.000 a erreicht auch die Gassättigung des Gitterelements der Abdichtung am MB Bartensleben die residuale Gassättigung, so dass Gas aus dem Südfeld in den Mischungsbereich strömen kann. Dieser Zeitpunkt stimmt mit dem Zeitpunkt des Druckabfalls im Südfeld (Abb. 3.17) überein.

Wenn initial die Flüssigkeitssättigung der Abdichtungen bereits unterhalb von 98 % liegt und damit die initiale Gassättigung größer als die residuale Gassättigung ist, kann sofort Gas durch die Abdichtungen strömen. Es muss keine Flüssigkeit mehr für einen Gasfluss verdrängt werden, es kann allerdings – je nach initialer Sättigung – weitere Flüssigkeit verdrängt werden. Auch unter der Annahme einer geringen Permeabilität von  $1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  für eine Abdichtung ergeben sich im Systemverhalten des gesamten Endlagersystems große Unterschiede zum Bezugsfall. Um das zu illustrieren ist in Abb. 3.19 die Druckentwicklung für den Fall dargestellt, dass die Permeabilität der Abdichtungen – wie im Bezugsfall –  $1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  beträgt, aber für die initiale Flüssigkeitssättigung der Abdichtungen nur 1 % angenommen wurde.

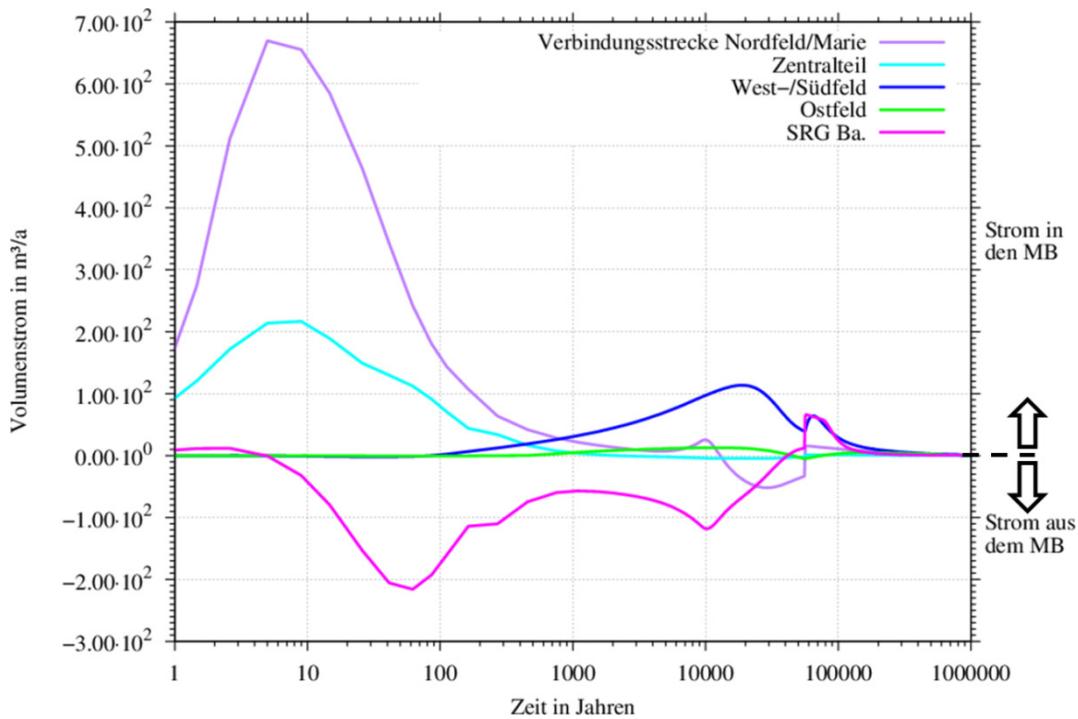
Man erkennt, dass im MB Bartensleben die für das Ausströmen des Gases relevanten 3 MPa bereits nach ca. 50.000 a und damit deutlich früher als im Bezugsfall (Abb. 3.3) erreicht werden. Obwohl auch in diesem Rechenfall sowohl im ELB Südfeld als auch im ELB Ostfeld höhere Drücke als im Mischungsbereich Bartensleben erreicht werden (Abb. 3.19), ist der in beiden ELB berechnete Druck niedriger (ca. 3 MPa) als im Bezugsfall.

Durch die bereits initial bestehende Gasdurchlässigkeit kann – auch bei niedriger Permeabilität – Gas aus den abgedichteten Bereichen in den Mischungsbereich Bartensleben strömen. Dieser Einstrom ist in Abb. 3.20 dargestellt. Im Vergleich zum Bezugsfall (vgl. Abb. 3.4) erkennt man, dass aus dem ELB West-/Südfeld (blaue Linie) eine erhebliche Menge Gas in den Mischungsbereich Bartensleben strömt und auch aus dem ELB Ostfeld eine geringe Menge Zutritt.



**Abb. 3.19** Druckentwicklung im ERAM für unterschiedliche Modellbereiche

Rechenfall HP 1.12: Flüssigkeitssättigung der Abdichtungen 1 %; sonst wie Bezugsfall.



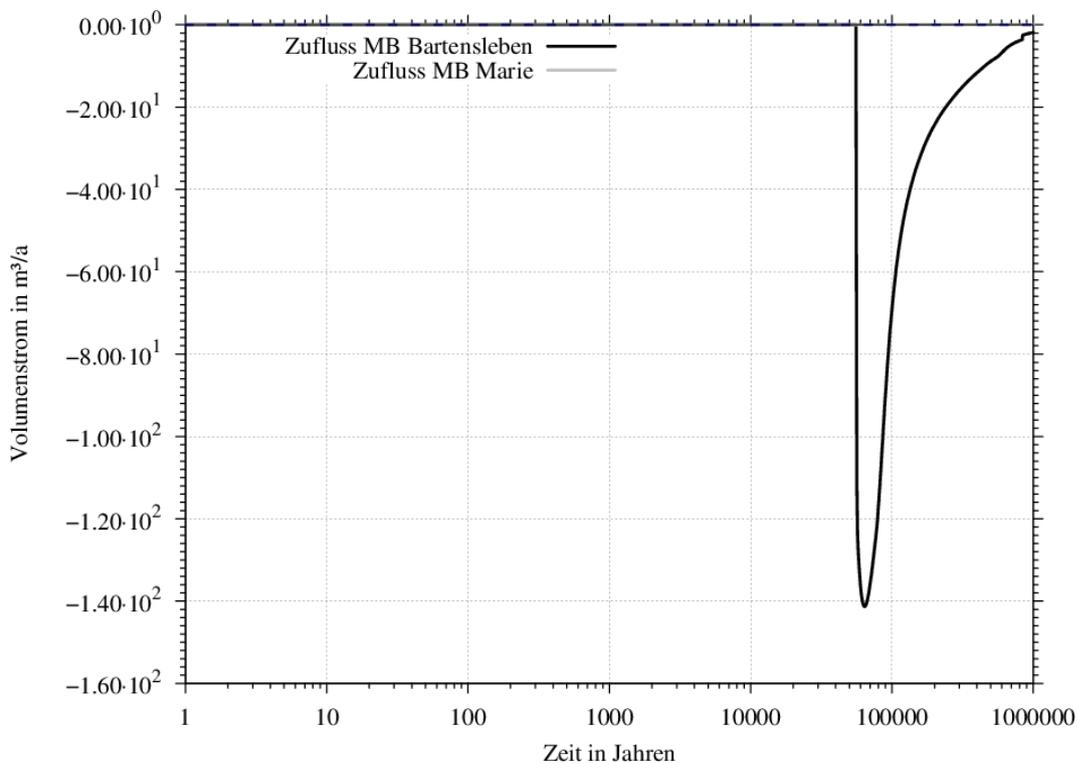
**Abb. 3.20** Gasstrom in und aus dem MB Bartensleben

Rechenfall HP 1.12: Flüssigkeitssättigung der Abdichtungen 1 %; sonst wie Bezugsfall.

Positiv: Gasfluss in den MB Bartensleben hinein; negativ: Gasfluss aus dem MB Bartensleben heraus.

Deutlich prägnanter ist der Peak in den Kurven zum Zeitpunkt des Erreichens des für den Ausstrom aus der Grube notwendigen Drucks von 3 MPa nach ca. 50000 Jahren (Abb. 3.20). Ab diesem Zeitpunkt strömt aus allen Teilbereichen der Grube Gas in den Mischungsbereich, wobei sich ggf. die Flussrichtung schlagartig umkehrt: Beispielsweise strömt kurz vor diesem Zeitpunkt noch Gas in das Nordfeld (violette Kurve in Abb. 3.20), während kurz danach der Strom abrupt die Richtung wechselt und Gas aus dem Nordfeld heraus fließt.

Als Konsequenz ist auch der Gasausstrom aus dem ERAM deutlich erhöht (Abb. 3.21). In diesem Fall ist er mit ca. 140 m<sup>3</sup>/a etwa eine Größenordnung höher als im Bezugsfall (vgl. Abb. 3.2).

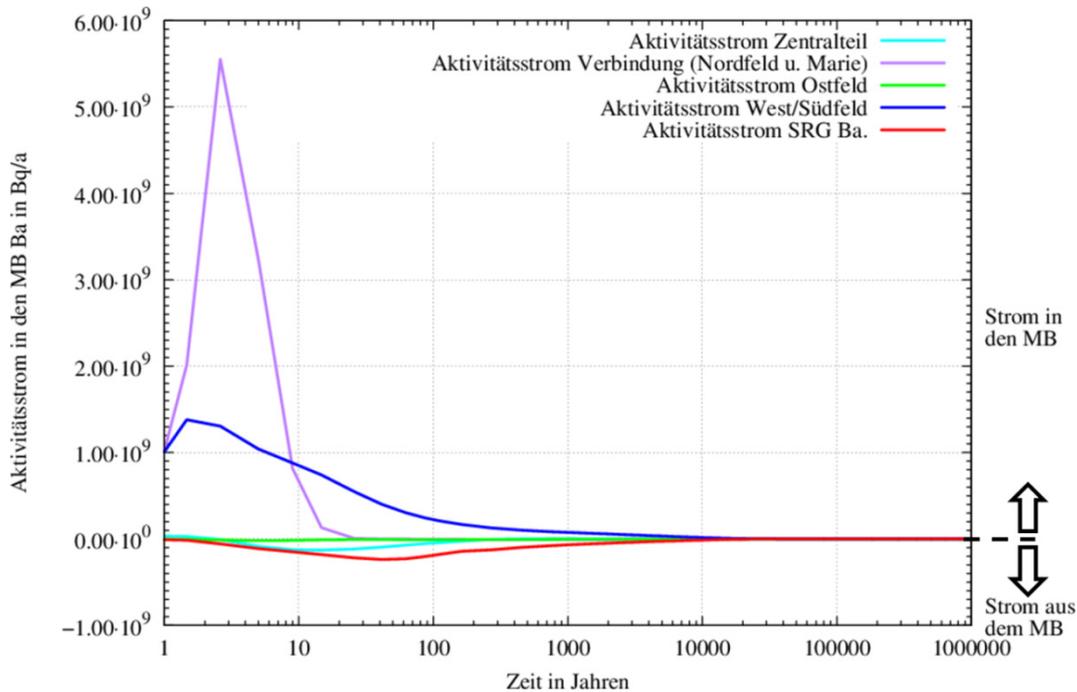


**Abb. 3.21** Gasstrom aus dem ERAM

Rechenfall HP 1.12: Flüssigkeitssättigung der Abdichtungen 1 %; sonst wie Bezugsfall.  
 positiv: Gasfluss in die Grube; negativ: Gasfluss aus der Grube.

Da in den Rechenfällen, in denen die Abdichtungen initial durchlässig für Gas sind bzw. relativ früh durchlässig werden, nicht nur Gas sondern auch gasförmige Radionuklide durch die Abdichtung transportiert werden können, ist die Auswirkung auf die resultierende Aktivität und auch auf den Austritt aus dem gesamten Grubengebäude sehr groß.

Der Transport der  $^{14}\text{C}$ -Aktivität aus den unterschiedlichen Modellbereichen in den Mischungsbereich Bartensleben ist in Abb. 3.22 dargestellt. Im Gegensatz zum Bezugsfall (vgl. Abb. 3.6) ist hier ein Aktivitätsstrom von  $^{14}\text{C}$  aus dem ELB West-/Südfeld von maximal ca.  $1,4 \cdot 10^9$  Bq/a in den Mischungsbereich Bartensleben (blaue Kurve) zu erkennen. Ein Transport von  $^{14}\text{C}$  aus dem ELB Ostfeld ist in dieser Abbildung aufgrund des Maßstabs kaum zu erkennen, ist allerdings auf sehr geringem Niveau vorhanden.



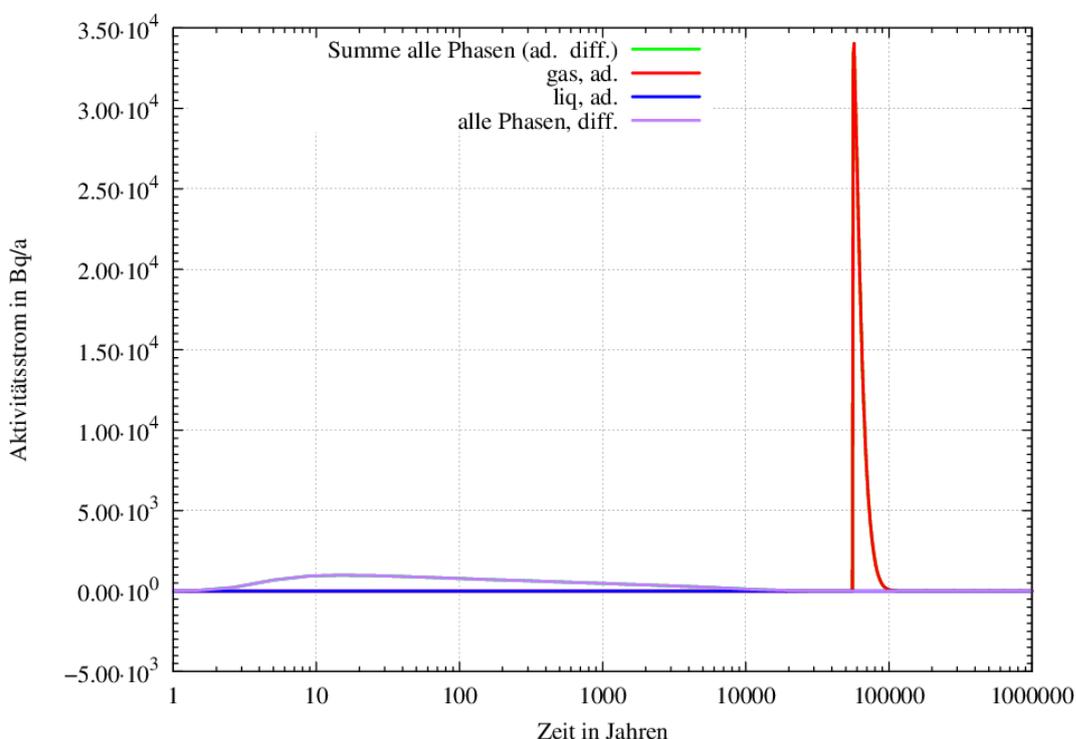
**Abb. 3.22** Aktivitätsstrom von  $^{14}\text{C}$  in den Mischungsbereich Bartensleben

Rechenfall: Flüssigkeitssättigung der Abdichtungen 1 %; sonst wie Bezugsfall.

Positiv:  $^{14}\text{C}$ -Strom in den MB Bartensleben hinein; negativ:  $^{14}\text{C}$ -Strom aus dem MB Bartensleben heraus.

Der Transport der  $^{14}\text{C}$ -Aktivität aus dem gesamten ERAM über den Modellrand am MB Bartensleben wird in Abb. 3.23 gezeigt. Ein erster Anstieg des Austrags ist nach ca. 2 a zu erkennen, ein erstes Maximum nach ca. 10 a. Dieser Anstieg wird wie im Bezugsfall durch den diffusiven Transport von  $^{14}\text{C}$  (vgl. Abb. 3.5) aus dem ERAM heraus verursacht. Im Vergleich zum Bezugsfall liegt dieses erste Maximum mit ca. 950 Bq/a geringfügig höher. Der zweite Peak entsteht nach ca. 50.000 a, also zum Zeitpunkt des aufgrund des Erreichens von 3 MPa am Modellrand beginnenden Gasausstroms. Der  $^{14}\text{C}$ -Transport aus dem Endlager heraus erfolgt somit advektiv mit der Gasphase. Der maximale Aktivitätsausstrom liegt bei ca. 35.000 Bq/a nach ca. 60000 Jahren. Im Bezugsfall dagegen ist kein advektiver Austrag vorhanden (vgl. Abb. 3.5).

Zum Zeitpunkt des Austritts sind bereits annähernd 9 Halbwertszeiten von  $^{14}\text{C}$  (5.730 a) vergangen, so dass die Aktivität insgesamt im Vergleich zur initialen Aktivität (insgesamt  $3,3 \cdot 10^{12}$  Bq  $^{14}\text{C}$  für die Systementwicklung „trockene Grube“) deutlich verringert ist. Insgesamt wird nur in wenigen zum Basismodell „Trockene Grube“ vorliegenden Rechenfällen mehr  $^{14}\text{C}$  aus dem ERAM transportiert als im gerade beschriebenen Rechenfall. Der maximale Aktivitätsstrom von  $^{14}\text{C}$  wird für alle diese Rechenfälle in Abb. 3.24 dargestellt. In den meisten dieser Rechenfälle ist der Austrag mit deutlich unterhalb von 1.000 Bq/a sehr gering. Es gibt jedoch 16 Rechenfälle, in denen deutlich höhere Aktivitätsströme berechnet werden. Einige dieser Rechenfälle auf die im Folgenden näher eingegangen wird, sind in Abb. 3.24 markiert.



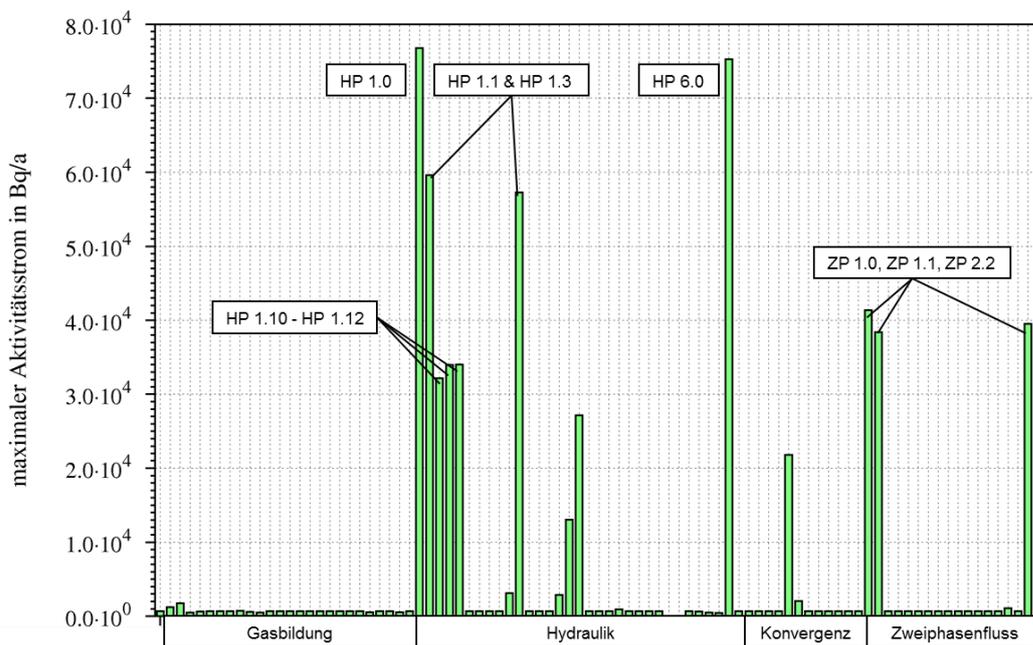
**Abb. 3.23**  $^{14}\text{C}$ -Ausstrom aus dem ERAM (Modellrand MB Bartensleben)

(Rechenfall: Flüssigkeitssättigung der Abdichtungen 1 %; sonst wie Bezugsfall)

grün: Ausstrom als Summe aller Phasen (advektiv und diffusiv); rot: Ausstrom mittels der Gasphase (advektiv), blau: Ausstrom mittels der flüssigen Phasen (advektiv); violett: Ausstrom mittels beider Phasen (diffusiv).

Der höchste Aktivitätsausstrom von  $^{14}\text{C}$  aus dem ERAM wird in den Rechenfällen HP 1.0 und HP 6.0 berechnet. Für den Rechenfall HP 1.0 wurde die Permeabilität aller Abdichtungen variiert zu  $1 \cdot 10^{-14}$  m<sup>2</sup> (bereits in diesem Kapitel untersucht, s. o.). Für Rechenfall HP 6.0 wurde der Ausfall der repräsentativen Abdichtung zum ELB West-/Südfeld postuliert, so dass nur diese Abdichtung eine Permeabilität von

$1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  besitzt. Der Aktivitätsausstrom der Rechenfälle HP 1.1 und HP 1.3 in Abb. 3.24 ist das Ergebnis einer weiteren Variation der Permeabilität aller Abdichtungen auf  $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$  bzw.  $6,7 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ . Die Ergebnisse der Variation der initialen Flüssigkeitssättigung zeigen in Abb. 3.24 zum Beispiel die Rechenfälle HP 1.10 bis HP 1.12, wobei letzterer auf den vorhergehenden Seiten eingehend analysiert wurde. Interessant sind auch die Rechenfälle ZP 1.0, ZP 1.1 und ZP 2.2. Hier wurde der Gaseindringdruck in allen Abdichtungen bzw. nur in der repräsentativen Südabdichtung deutlich reduziert oder sogar ganz vernachlässigt. Damit wird die initial vorhandene Flüssigkeit leichter verdrängt und der frühzeitige Gasausstrom über die Abdichtungen in den MB Bartensleben ermöglicht.



**Abb. 3.24** Maximaler <sup>14</sup>C-Austrag aller Rechenfälle aus dem ERAM (Basismodell, „trockene Grube“)

Im Histogramm entspricht der 1. Balken dem Bezugsfall mit einem Wert von 700 Bq/a (diffusiv); unten angegeben ist die Kategorie, die aussagt welche Art von Parametern geändert wurde

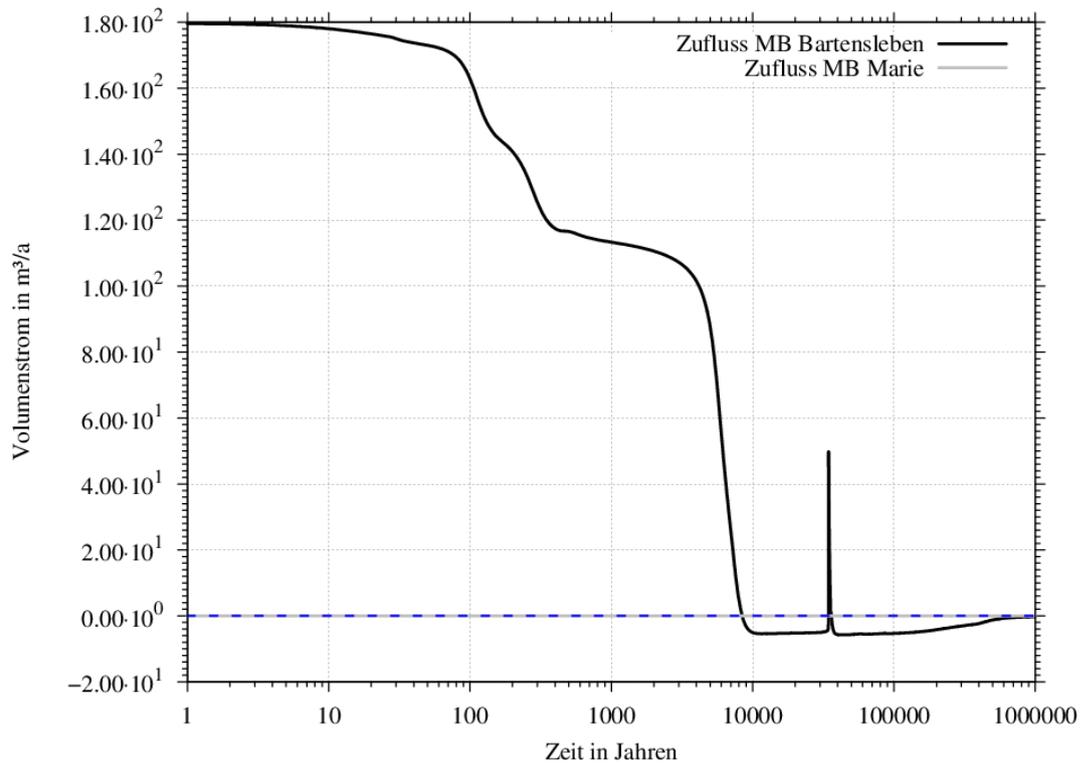
Insgesamt lassen sich für das Basismodell aus den Ergebnissen der Variationsrechnungen für die Systementwicklung „trockene Grube“ folgende Aussagen treffen:

- Die Druckentwicklung wird im Allgemeinen von der Gebirgskonvergenz dominiert und nicht von der Gasbildung.
- Der Zeitpunkt des Beginns der Gasdurchlässigkeit der Abdichtungen ist ein entscheidender Aspekt, der das Systemverhalten stark beeinflusst.

- Wenn die Abdichtungen initial gasdurchlässig sind, dann:
  - wird der zum Ausstrom benötigte Gasdruck deutlich früher erreicht,
  - tritt deutlich früher und deutlich mehr Gas pro Jahr aus dem Endlager heraus,
  - werden auch bei geringer Permeabilität der Abdichtungen gasförmige Radionuklide aus den abgedichteten ELBs heraus transportiert,
  - wird der Austrag der gasförmigen Radionuklide – im Gegensatz zum Bezugsfall – nicht von der Diffusion dominiert, stattdessen erfolgt der Transport advektiv.
  - wird in diesen Fällen der höchste Austrag von  $^{14}\text{C}$  berechnet.
- Wenn die Abdichtungen initial undurchlässig sind, dann:
  - werden die zum Ausströmen über den Modellrand erforderlichen 3 MPa erst nach dem Zerfall des größten Teils des vorhandenen  $^{14}\text{C}$  erreicht,
  - wird nur unter bestimmten Voraussetzungen der zum Ausstrom benötigte Gasdruck früher erreicht, beispielsweise bei geringem Gaseindringdruck der Abdichtungen,
  - wird in diesen Fällen ein niedriger Austrag von  $^{14}\text{C}$  berechnet.

### **3.1.2 Bezugsfall „mit relevantem Lösungszutritt“**

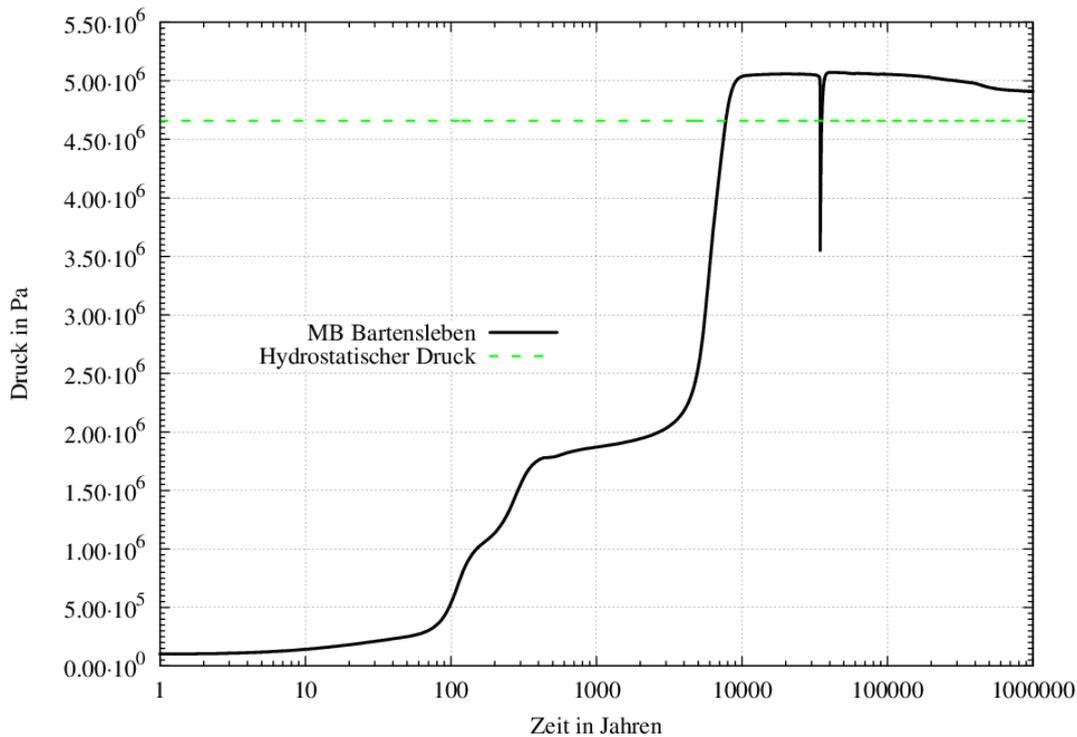
Für die Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“ tritt Lösung mit einer anfänglichen Rate von  $180 \text{ m}^3/\text{a}$  in den Mischungsbereich Bartensleben zu. Dieser Lösungszufluss ist in Abb. 3.25 dargestellt. Aufgrund des Lösungszutritts erhöht sich der Druck im Endlager (Abb. 3.26), als Konsequenz daraus nimmt die Zuflussrate ab. Die Lösung füllt zunächst beide Mischungsbereiche, dann die sonstigen Restgruben und schließlich die ELB Zentralteil und Nordfeld.



**Abb. 3.25** Einstrom von Lösung in das ERAM

positiv: Einstrom in die Grube; negativ: Ausstrom aus der Grube.

Die Zutrittsrate sinkt dabei weiter kontinuierlich (siehe Abb. 3.25) so, wie der Druck im Mischungsbereich Bartensleben dabei steigt (siehe Abb. 3.26). Schließlich übersteigt der Druck im MB Bartensleben nach 8500 a den hydrostatischen Druck am Modellrand. Die Auffüllphase des Endlagers ist beendet und der Zufluss kehrt sich in einen Ausstrom von Lösung um. Dieser Ausstrom setzt sich einige Zeit fort bis es im Zeitraum von ca. 34.400 a – 36.000 a zu einem erneuten kurzzeitigen und hohen Zufluss in die Grube kommt. Die Ursache dieses Zuflusses ist ein Druckabfall im Mischungsbereich Bartensleben (siehe Abb. 3.26) in diesem Zeitraum.



**Abb. 3.26** Druckentwicklung im Mischungsbereich Bartensleben

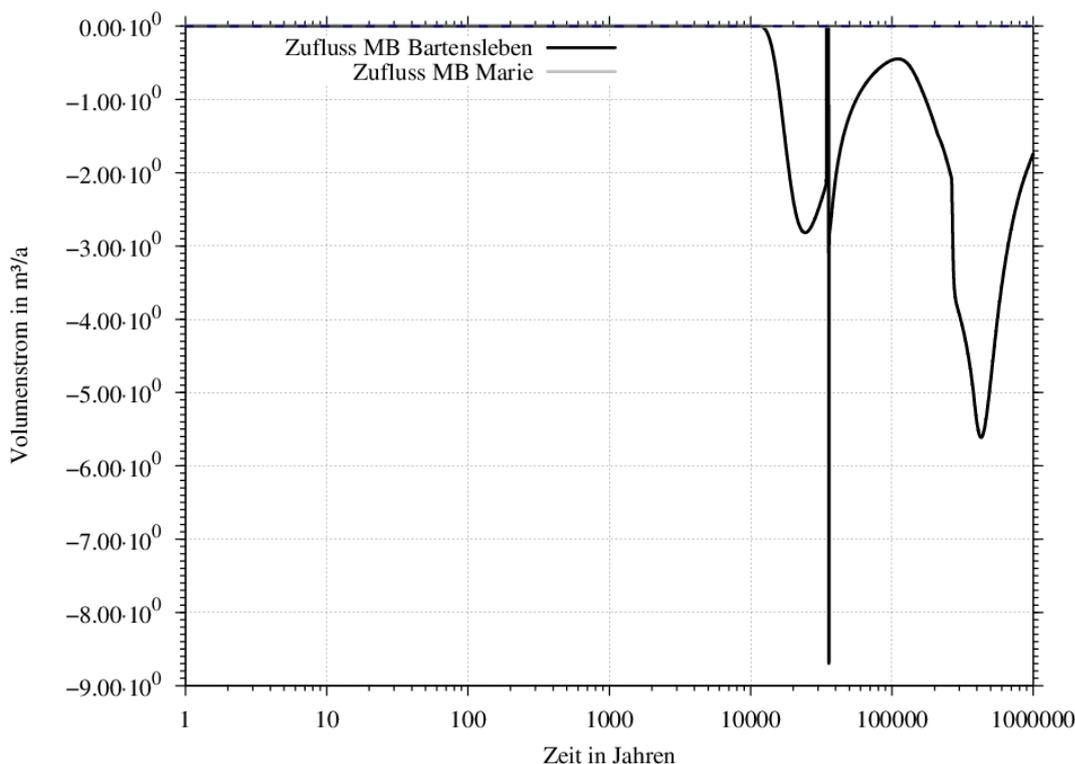
Schwarze Kurve: Druck im Mischungsbereich Bartensleben.

Grün gestrichelte Kurve: Hydrostatischer Druck am Modellrand.

Die Ursache des Druckabfalls ist die Korrosion der repräsentativen Abdichtung zum ELB West-/Südfeld, die durch diese Korrosion ihre vollständige Funktionsfähigkeit einbüßt, so dass sich die Permeabilität der Südabdichtung von  $1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  auf  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  erhöht. Dadurch kann Lösung aus dem Mischungsbereich Bartensleben in den ELB West-/Südfeld fließen. Der Druck im Mischungsbereich Bartensleben verringert sich dementsprechend und es strömt erneut Lösung in das Endlager.

Wenn der entsprechende Druck (4,9 MPa) im MB-Bartensleben erreicht ist und die Auffüllphase beendet ist, strömt nicht nur Lösung sondern auch Gas aus dem Endlager heraus. Dieser geringe Ausstrom von maximal  $9 \text{ m}^3/\text{a}$  ist in Abb. 3.27 dargestellt. Auch in dieser Abbildung ist die Auswirkung des Druckabfalls im MB Bartensleben zu sehen. Dieser führt zunächst zu einer kurzen Unterbrechung des Gasausstroms. Diese Unterbrechung entspricht zeitlich dem erneuten Flüssigkeitseinstrom. Der anschließende wieder einsetzende Ausstrom des Gases erfolgt mit einer Rate, die in Abb. 3.27 einen deutlichen negativen Peak erzeugt (bei 35.700 a). Dieser Peak zeigt kurzzeitiges (etwa 250 a) starkes Ausströmen von Gas an. Dieser Peak hat keine Entsprechung im wieder einsetzenden Lösungsausstrom (vgl. Abb. 3.25), so dass sich die Frage stellt wel-

cher Prozess zu einem Peak im Ausstrom für Gas aber nicht für Flüssigkeit führt: Die Ursache dieser Peaks ist der Anstieg der Gassättigung in den Randelementen (zur Beschreibung der Randelemente siehe Kap. 2.2.6 in /FRI 16/). Die erhöhte Gassättigung in den Randelementen wird durch die Druckentlastung im Mischungsbereich Bartensleben und den damit einhergehenden erhöhten Gastransport aus dem ELB Zentralteil (siehe Abb. 3.33) in den Mischungsbereich Bartensleben zunächst ermöglicht. Von dort strömt das Gas in die höher liegenden Randelemente, da dieses Gas durch die einströmende Flüssigkeit verdrängt wird.

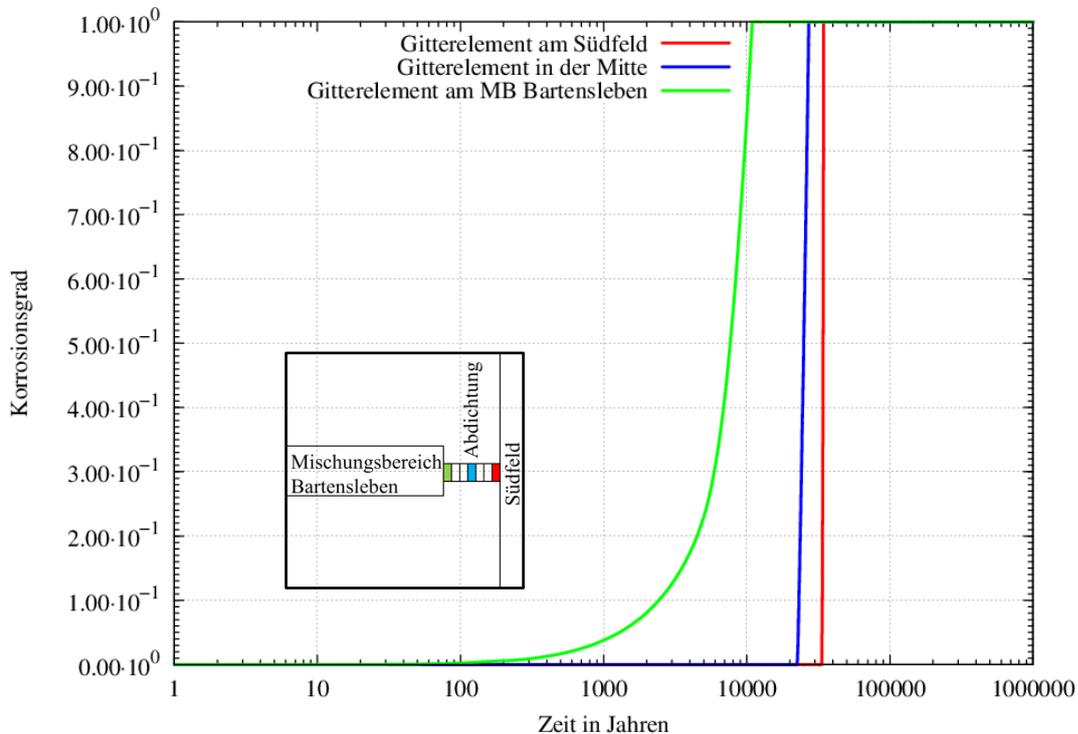


**Abb. 3.27** Einstrom von Gas in das ERAM

positiv: Einstrom in die Grube; negativ: Ausstrom aus der Grube.

Die Korrosion der Abdichtung zum ELB West-/Südfeld verläuft langsamer als es der prägnante zeitliche Verlauf des in den Abb. 3.25 und Abb. 3.26 gezeigten Druckes bzw. Zustroms andeuten. Die zeitliche Entwicklung des Korrosionsgrads einzelner Teilstücke bzw. Gitterelemente der Südabdichtung ist in Abb. 3.28 dargestellt. Die Korrosion der Abdichtung ist abhängig vom Lösungsdurchfluss. Durch den Lösungsdurchfluss verliert die Abdichtung ihre Funktionsfähigkeit, so dass die Permeabilität der Abdichtung von  $1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  auf  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  steigt. Durch den – aufgrund der anfangs niedrigen Permeabilität der Abdichtung von  $1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  – langsamen Durchflusses von Lösung werden zunächst nur das erste von insgesamt sieben Gitterelementen (siehe

/FRI 16/) der Südabdichtung korrodiert. Erst wenn alle Gitterelemente der Abdichtung korrodiert sind und so insgesamt eine Permeabilität von  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  erreicht wurde, strömen große Mengen Lösung durch die Abdichtung in das Südfeld.

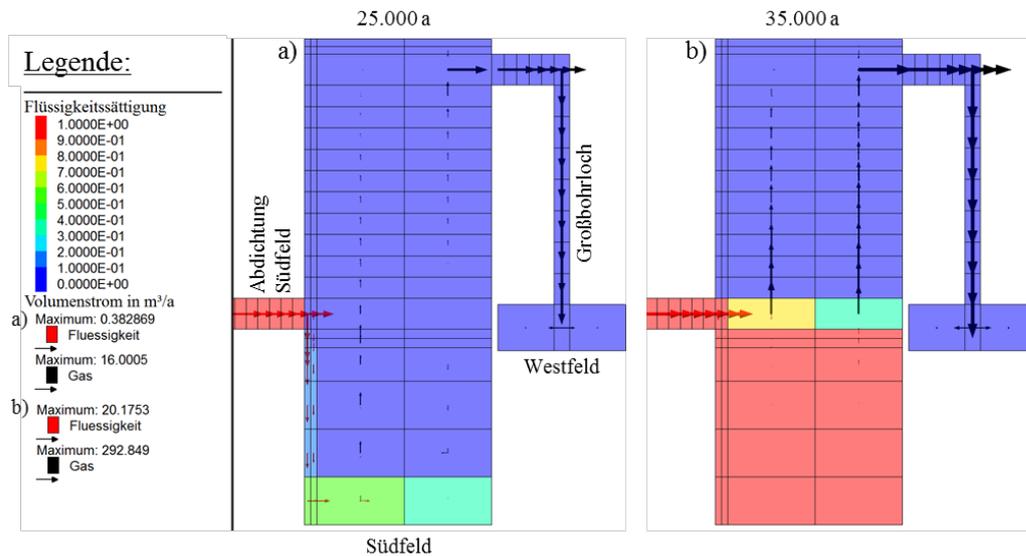


**Abb. 3.28** Korrosionsgrad der Südabdichtung

Die Kurven zeigen den Korrosionsgrad der Gitterelemente der Abdichtung. Die dargestellten Teilstücke grenzen an den Mischungsbereich (grüne Kurve), an das Südfeld (rote Kurve) bzw. befinden sich in der Mitte der Abdichtung (blaue Kurve). Skizze zeigt Position der Gitterelemente in Relation zum Südfeld und Mischungsbereich.

Da die Lösung aus dem Mischungsbereich Bartensleben in Richtung Südfeld strömt, ist zunächst nach ca. 10.000 a das an diesen Mischungsbereich angrenzende Gitterelement der Abdichtung vollständig korrodiert. Nach etwas mehr als 20.000 a verliert auch das Gitterelement in der Mitte und nach etwas mehr als 30.000 a das an das Südfeld angrenzende Gitterelement der Abdichtung ihre Funktionsfähigkeit. Deshalb tritt nach ca. 34.000 a verstärkt Lösung in das Südfeld ein. Die Flüssigkeitssättigung und der Volumenstrom im Südfeld vor und nach dem Zutritt der Lösung sind in Abb. 3.29 dargestellt. Nach ca. 25.000 a strömt geringfügig Lösung in das Südfeld ein. Der Transportpfad der Flüssigkeit (anhand der roten Pfeile in Abb. 3.29 a) zu erkennen) zeigt, dass die Lösung nach dem Durchströmen der Abdichtung im Südfeld an dem in Richtung der Abdichtung liegenden Rand in die tiefen Bereiche des Südfelds fließt. Gleichzeitig strömt das im Südfeld vorhandene bzw. gebildete Gas über das Großbohrloch in das

Westfeld hinein. Nach 35.000 a (Abb. 3.29 b)) ist die Abdichtung bereits vollständig korrodiert. Die unteren Teufenbereiche des Südfelds sind soweit mit Lösung gefüllt, dass sich der Flüssigkeitsspiegel auf Höhe der Abdichtung befindet. Das Gas im Südfeld wird weiterhin in Richtung Westfeld transportiert.



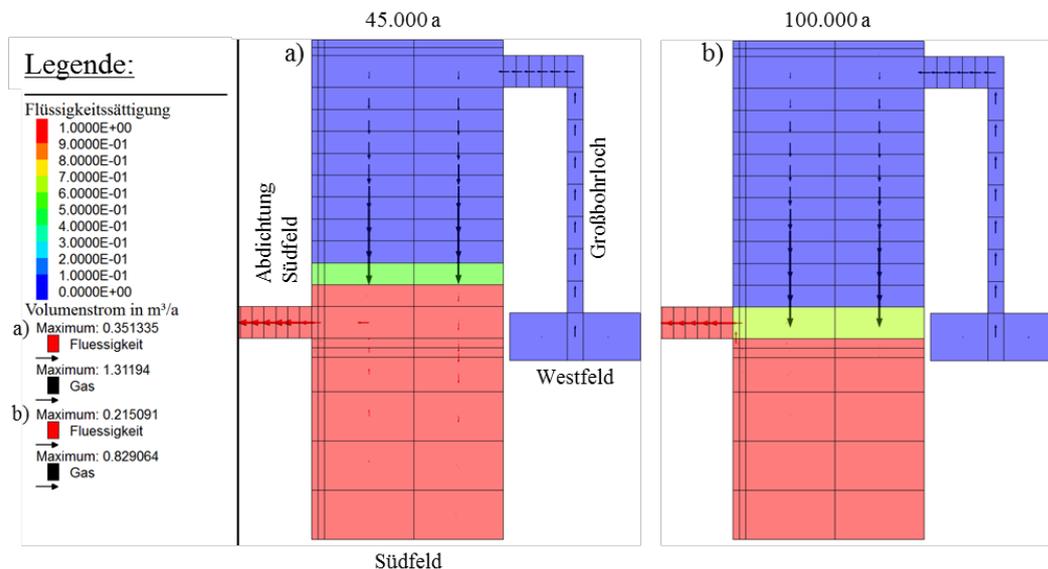
**Abb. 3.29** Flüssigkeitssättigung und Volumenstrom in das Südfeld hinein und innerhalb des West-/Südfelds zum Zeitpunkt a) 25.000 a und b) 35.000 a

Rote Pfeile zeigen den Flüssigkeitsstrom in  $\text{m}^3/\text{a}$ , schwarze Pfeile den Gasstrom in  $\text{m}^3/\text{a}$ . Dabei entspricht die Länge des längsten Pfeils dem in der Legende angegebenen Maximum jeweils für a) oder b) (dies gilt für alle folgenden ähnlichen Abbildungen).

Der Flüssigkeitseinstrom in das Südfeld hält weiter an, so dass die Flüssigkeitssättigung im Südfeld auch oberhalb der Abdichtung zunimmt. Zum Zeitpunkt von 37.690 a kehrt sich die Strömungsrichtung der Flüssigkeit um und verläuft nun vom Südfeld in Richtung Mischungsgebiet Bartensleben. Insgesamt sind bis zu diesem Zeitpunkt ca.  $60.000 \text{ m}^3$  Lösung in das Südfeld zugetreten. Gleichzeitig strömt das Gas aus dem Westfeld heraus. Der maximale Flüssigkeitsspiegel im Südfeld ist in Abb. 3.30 a) noch erkennbar, oberhalb der Abdichtung wird dort nach 45.000 a eine Sättigung von ca. 50 % erreicht. Der Flüssigkeitsspiegel erreicht folglich nicht das Großbohrloch, so dass keine Flüssigkeit in das Westfeld einströmen kann. Nach 100.000 a sind die Grubenbaue oberhalb der Abdichtung weitgehend entsättigt, da die Flüssigkeit über die Abdichtung aus dem Südfeld ausgetreten ist (Abb. 3.30 b).

Die Umkehr der Strömungsrichtung und damit das Auspressen der Lösung im Südfeld erfolgt aufgrund der anhaltenden Erhöhung des Gasdrucks im West-/Südfeld. Diese

Gasdruckerhöhung kann zwei Ursachen haben: Weitere Gasbildung oder Gebirgskonvergenz. Der Gasstrom aus dem Westfeld (bzw. dessen Auslöser, der erhöhte Druck im Westfeld) wird zu diesem Zeitpunkt jedoch von der Gebirgskonvergenz angetrieben, da dort bereits nach wenigen 100 a die Gasbildung aufgrund der limitierenden Wassermenge beendet ist.



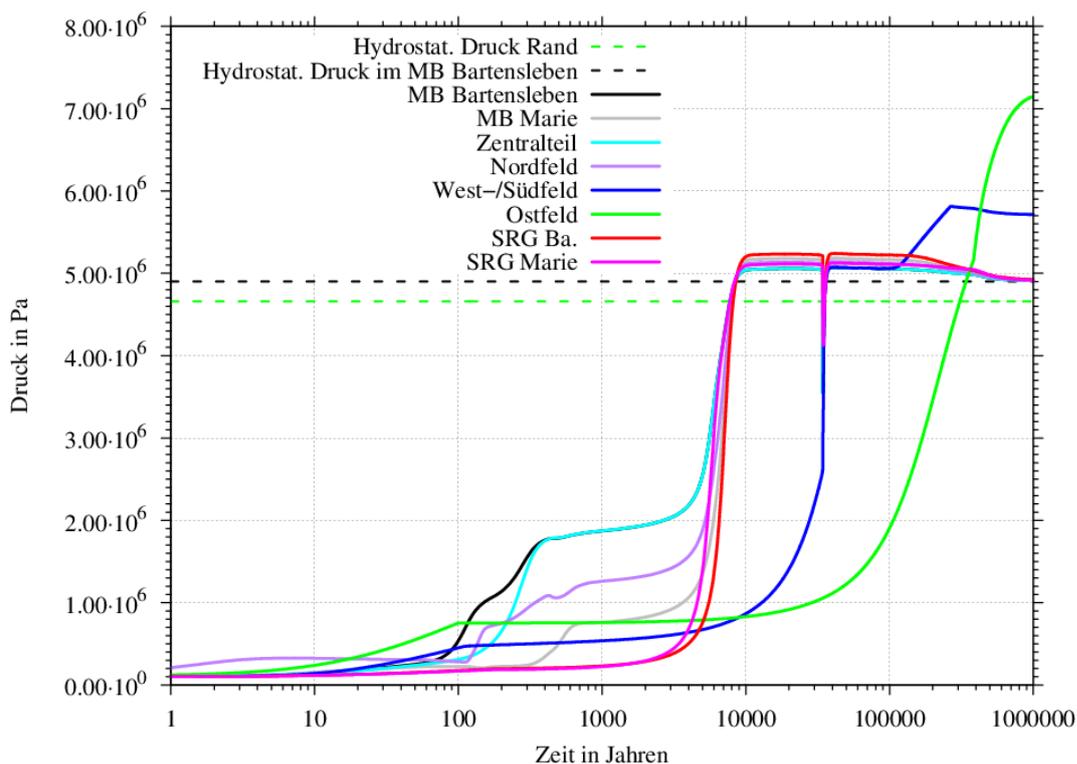
**Abb. 3.30** Flüssigkeitssättigung und Volumenstrom in das Südfeld zum Zeitpunkt a) 45.000 a und b) 100.000 a

Rote Pfeile zeigen den Flüssigkeitsstrom in m<sup>3</sup>/a, schwarze Pfeile den Gasstrom in m<sup>3</sup>/a. Dabei entspricht die Länge des längsten Pfeils dem in der Legende angegebenen Maximum jeweils für a) oder b) (dies gilt für alle folgenden ähnlichen Abbildungen).

Im Südfeld selbst wird durch den Lösungszutritt auch zu späten Zeitpunkten noch Gas gebildet. Dieses trägt neben der Gebirgskonvergenz zur Druckerhöhung bei. Der Einfluss, den Gasbildung und Konvergenz jeweils auf die Druckentwicklung besitzen, wird im nächsten Kapitel (Kap. 3.1.2.1) untersucht.

Aufgrund des Zustroms von Lösung unterscheidet sich die Druckentwicklung im gesamten Endlagersystem und in den Teilbereichen des Endlagers deutlich von der für die Systementwicklung „trockene Grube“ ermittelten Druckentwicklung. Die Entwicklung der Drücke in den Teilbereichen des Endlagers wird in Abb. 3.31 gezeigt. Im Gegensatz zur „trockenen Grube“ sind hier auch für die nicht abgedichteten Bereiche deutliche Unterschiede in der Druckentwicklung der Teilbereiche während der Auffüllphase des Endlagers mit Lösung zu erkennen.

Der Druck im Mischungsbereich Bartensleben und im ELB Zentralteil steigt früh (nach ca. 300 a) auf fast 2 MPa an, während der Druck in den sonstigen Restgruben (SRG) Bartensleben und Marie noch relativ konstant bleibt. Ein mittlerer Druckanstieg zwischen 0,5 MPa und 1,5 MPa lässt sich in den Bereichen ELB Nordfeld, West-/Südfeld, Ostfeld und Mischungsbereich Marie beobachten. Ab etwa 4.000-5.000 a steigt der Druck aller nicht abgedichteten Bereiche (ELB: Nordfeld und Zentralteil sowie Mischungsbereiche und sonstigen Restgrubenbereiche Bartensleben und Marie) dann rasch auf über 5 MPa an und bleibt bis zum Zeitpunkt des erneuten Zuflusses nach ca. 34.400 a relativ konstant. Der Druckabfall, der den Zeitpunkt des erneuten Zuflusses verursacht, lässt sich in allen nicht abgedichteten Teilbereichen des Endlagers beobachten. Anschließend (nach ca.36.000 a) stellt sich der frühere Druck von etwas über 5 MPa wieder ein, der ab ca. 100.000 a bis zum Ende des Berechnungszeitraums auf 4,9 MPa absinkt. Dieser Druck entspricht dem hydrostatischen Druck im Mischungsbereich Bartensleben.



**Abb. 3.31** Druckentwicklung im ERAM für unterschiedliche Modellbereiche

Alle Messpunkte liegen auf der gleichen Teufe. Der abgebildete Druck ist der Gasdruck.

Wie bereits die Ergebnisse der Berechnungen zur Systementwicklung der „trockenen Grube“ zeigen (Kap. 3.1.1), ist auch im hier beschriebenen Szenario die Druckentwicklung in den abgedichteten Bereichen von der Druckentwicklung in den nicht abgedich-

teten Bereichen entkoppelt. Dies ist für den ELB West-/Südfeld allerdings nur solange der Fall, bis die Abdichtung zum West-/Südfeld nach ca. 34.000 a vollständig ihre Funktionsfähigkeit verliert. Nach dem Zustrom von Lösung gleicht sich die Druckentwicklung im Südfeld zunächst der nicht abgedichteten Bereiche an. Ab etwa 100.000 a steigt jedoch der Druck im West-/Südfeld erneut an und sinkt ab ca. 200.000 a bis zum Ende des Berechnungszeitraums nur leicht auf 5,7 MPa ab. Der Druckanstieg nach etwa 100.000 a erfolgt zu dem Zeitpunkt, an dem im Südfeld nur noch die Grubenteile unterhalb der Abdichtung vollständig flüssigkeitsgesättigt sind. Die Abdichtung selbst ist ebenfalls weiterhin nahezu flüssigkeitsgesättigt (siehe auch Abb. 3.30 b), so dass zunächst kein Gas aus dem Südfeld entweichen kann und folglich der Druck im West/Südfeld weiterhin ansteigt. Erst der Druckabfall nach 200.000 a zeigt ein Gasentweichen über die Abdichtung an.

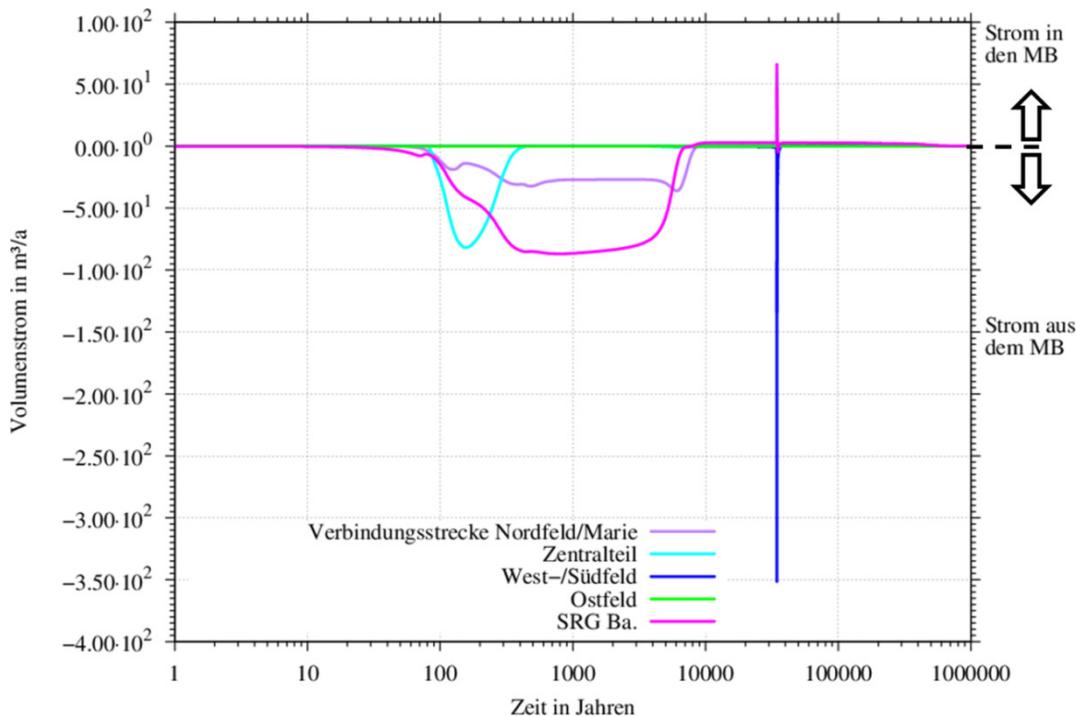
Im ELB Ostfeld steigt der Druck innerhalb von 500.000 a gleichmäßig auf ca. 6,5 MPa und danach langsam bis auf etwa 7,1 MPa am Ende des Berechnungszeitraums. Das Gas kann aus dem ELB Ostfeld aufgrund der stets funktionsfähigen Abdichtungen nicht entweichen, so dass dort der Druck folglich ansteigt. Da keine Lösung Zutritt ist die Druckerhöhung zu frühen Zeiten der Gasbildung und zu späten Zeiten der Konvergenz zuzurechnen.

Die Druckentwicklung (Abb. 3.31) in allen Bereichen des Endlagers (mit Ausnahme des Ostfelds) zeigt, dass sich der Zustrom von Lösung auf das gesamte Endlagersystem auswirkt. Da sich im Modell der Zutrittsort über dem Mischungsbereich Bartensleben befindet, fungiert – wie auch bei der „Systementwicklung trockene Grube“ für Gas – dieser Mischungsbereich als Verteiler von Lösung und Gas in die einzelnen Teilbereiche der Grube. Diese Verteilung wird in den Abb. 3.32 und Abb. 3.33 gezeigt, allerdings ohne den Zufluss in die Grube (dieser ist bereits in Abb. 3.25 dargestellt).

Klar erkennbar in Abb. 3.32 ist der prägnante Peak nach ca. 30.000 a. Der große negative Peak (blaue Kurve) zeigt den Einstrom der Lösung von bis zu 350 m<sup>3</sup>/a in das Südfeld. Diese hohen Werte werden jedoch nur für einen sehr kurzen Zeitraum (ca. 1 Jahr) erreicht. Danach verringert sich der Zufluss in das Südfeld solange, bis ein Druckgleichgewicht erreicht ist. Insgesamt fließen etwa 50.000 m<sup>3</sup> Lösung in das Südfeld. Dessen nutzbares Volumen (zu Definition des nutzbaren Volumens siehe /FRI 16/) hat sich durch die Gebirgskonvergenz und die dadurch bedingte Kompaktion des Versatzes stark verringert. Der steigende Druck im West-/Südfeld führt dazu, dass sich ab ca.

37.500 a der Zustrom in einen Ausstrom aus dem Südfeld in den Mischungsbereich Bartensleben umkehrt.

Die Korrosion der Abdichtung zum Südfeld führt nicht nur dazu, dass von außerhalb der Grube ein Zustrom in den Mischungsbereich Bartensleben stattfindet. Es ist deutlich zu erkennen, dass auch innerhalb der Grube ein Zufluss in diesen Mischungsbereich erfolgt. Insbesondere aus der sonstigen Restgrube (SRG) Bartensleben strömt zum Zeitpunkt 34.500 a Lösung in den Mischungsbereich.



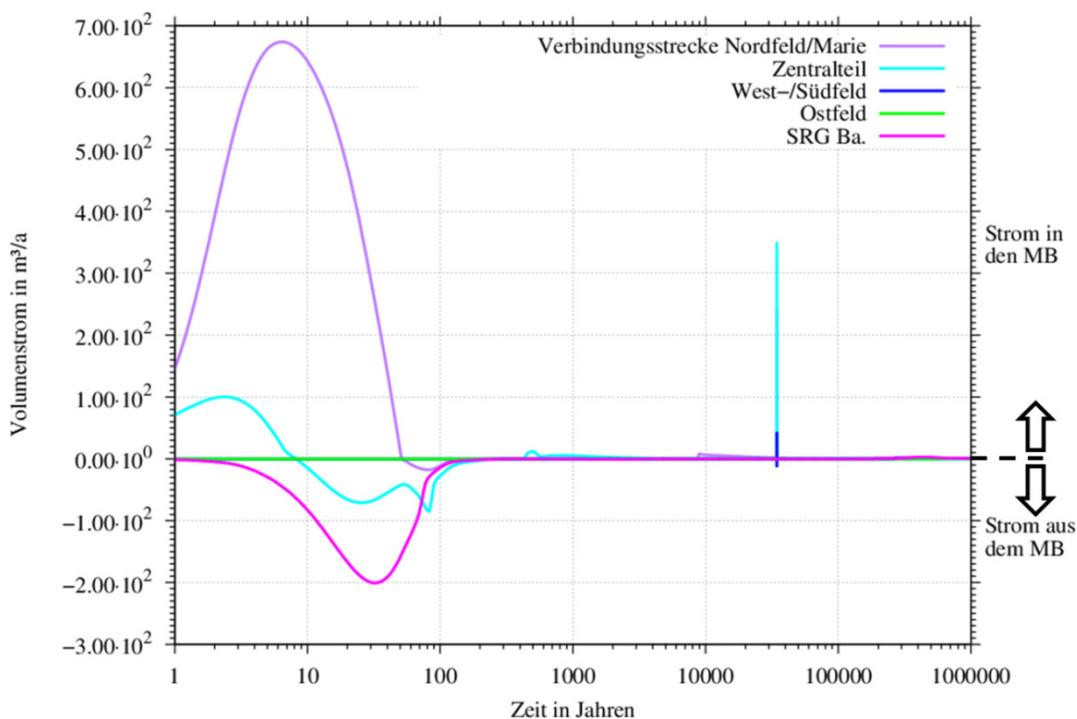
**Abb. 3.32** Flüssigkeitsstrom in und aus dem MB Bartensleben

Positiv: Flüssigkeitsstrom in den MB Bartensleben hinein; negativ: Flüssigkeitsstrom aus dem MB Bartensleben heraus.

Durch den Zutritt von Lösung ist die Verteilerfunktion des Mischungsbereichs Bartensleben für Gas im Vergleich zur Systementwicklung „trockene Grube“ stark eingeschränkt. Wie in Abb. 3.33 zu sehen ist, ähnelt der Gasfluss in den ersten Jahren noch dem der „trockenen Grube“ (vgl. Abb. 3.4 bis ca. 10 a). Danach strömt jedoch kaum noch Gas in den Mischungsbereich. Erst die Korrosion der Südabdichtung nach 34.400 a hat zur Folge, dass eine große Menge Gas aus dem Zentralteil in den Mischungsbereich strömt. Ebenfalls ist in Abb. 3.33 zu sehen, dass eine kleine Menge Gas aus dem Südfeld in den Mischungsbereich und eine weitere sehr geringe Menge Gas aus dem Mischungsbereich in das Südfeld strömt. Das liegt daran, dass vor der

vollständigen Korrosion in der Abdichtung ein Gasüberdruck vorhanden ist. Durch die vollständige Korrosion der Abdichtung und den Strom der flüssigen Phase kann der Überdruck abgebaut werden, das Gas expandiert und nimmt nun ein Volumen im Porenraum ein, das oberhalb der residualen Gassättigung liegt. Dadurch kann das Gas aus den Gitterelementen der Abdichtung in den Mischungsbereich und in das Südfeld strömen.

Beide Abdichtungen zum Ostfeld werden nur geringfügig von der eindringenden Lösung korrodiert, so dass es zu keinem Verlust der abdichtenden Funktion kommt. Dementsprechend gibt es kaum Lösungs- bzw. Gasaustausch zwischen Ostfeld und dem Mischungsbereich Bartensleben.

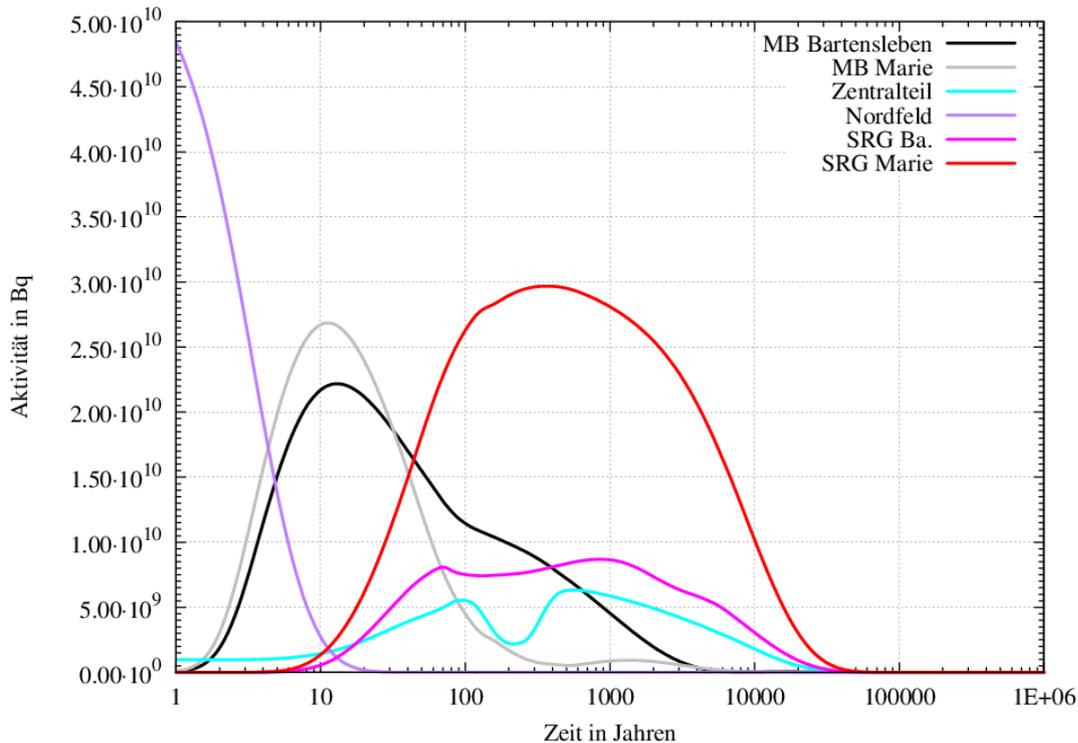


**Abb. 3.33** Gasstrom in und aus dem MB Bartensleben

Positiv: Gasstrom in den MB Bartensleben hinein; negativ: Gasstrom aus dem MB Bartensleben heraus.

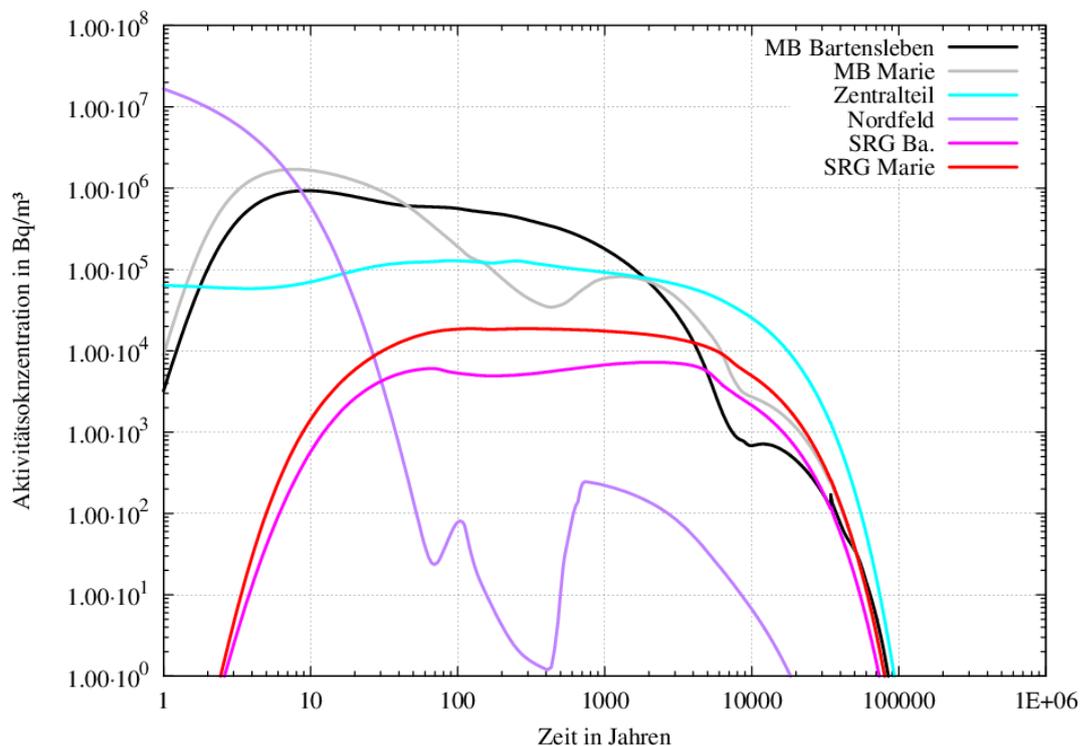
Der Flüssigkeits- und Gasstrom innerhalb der Grube vorwiegend über dem Mischungsbereich Bartensleben führt zu einem Transport der Radionuklide aus dem ELB Nordfeld und dem ELB Zentralteil und somit zu einem frühen Ausgleich der Radionuklidkonzentration in der Restgrube. Die  $^{14}\text{C}$ -Aktivität in den einzelnen Restgrubenbereichen ist in Abb. 3.34 dargestellt und ist dem  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsverlauf für die Systementwicklung „trockene Grube“ (vgl. Abb. 3.9) teilweise ähnlich. Auch in diesem Fall

befindet sich die höchste  $^{14}\text{C}$ -Aktivität bis auf den Zeitpunkt 40 a nicht im Mischungsbe-  
 reich Bartensleben. Ab ca. 100 a ist jedoch der Effekt des kaum noch vorhandenen  
 Gastransports erkennbar (siehe Abb. 3.35). Die  $^{14}\text{C}$ -Konzentration im Gas in den ein-  
 zelnen Teilbereichen des ERAM gleicht sich nicht nach ca. 10.000 a an, sondern  
 nimmt nahezu ausschließlich aufgrund des Zerfalls ab.



**Abb. 3.34** Aktivität von  $^{14}\text{C}$  in Teilbereichen des ERAM

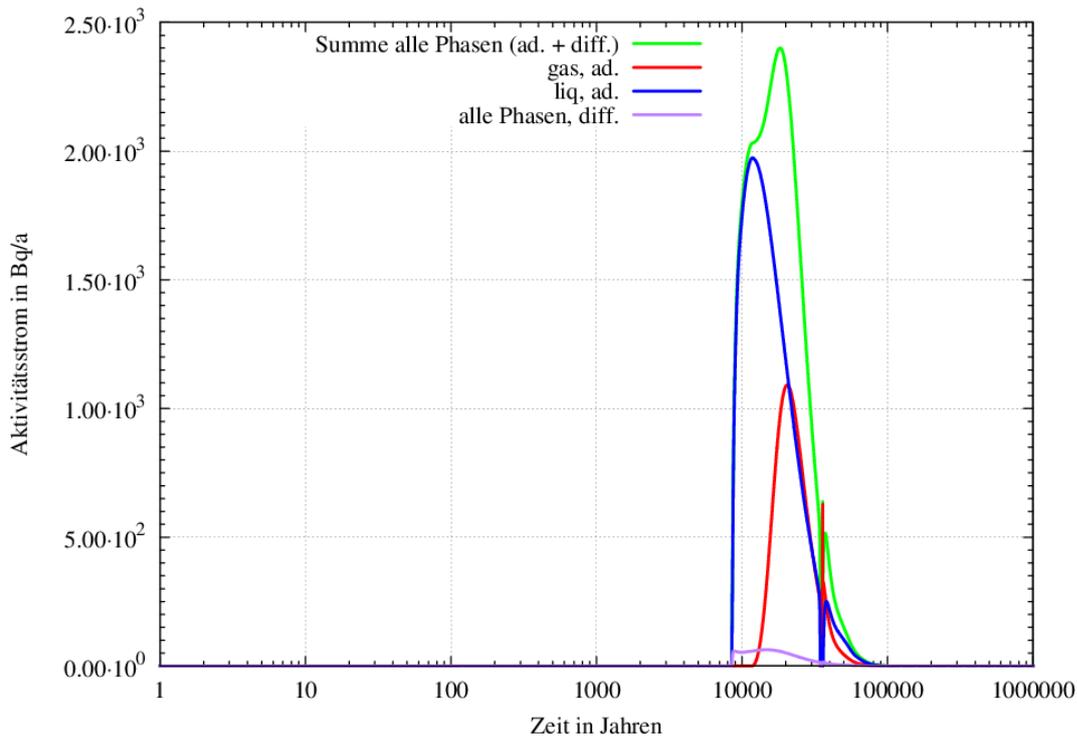
Mit der Lösung und dem Gas werden auch Radionuklide aus dem Endlager heraus  
 transportiert. In Abb. 3.36 ist der Ausstrom von  $^{14}\text{C}$  dargestellt. Im Gegensatz zur Sys-  
 tementwicklung „trockene Grube“ ist der Aktivitätsstrom hier nicht null, sondern beträgt  
 im Maximum ca. 2.500 Bq/a. Auch im Ausstrom von  $^{14}\text{C}$  ist eine kurze Unterbrechung  
 zum Zeitpunkt des erneuten Einströmens von Lösung in das Endlager zu erkennen. Bis  
 ca. 20.000 a ist der  $^{14}\text{C}$ -Ausstrom dominiert vom advektiven Ausstrom der flüssigen  
 Phase, da bis zu diesem Zeitpunkt kaum Gas aus dem Endlager strömt (vgl. Abb. 3.25  
 und Abb. 3.27). Danach ist der Anteil der ausströmenden  $^{14}\text{C}$ -Aktivität zwischen gas-  
 förmiger und flüssiger Phase in etwa gleich, obwohl deutlich mehr  $^{14}\text{C}$  in der gasförmigen  
 Phase vorhanden ist.



**Abb. 3.35**  $^{14}\text{C}$ -Konzentration (in der Gasphase) in Teilbereichen des ERAM

Da im vorliegenden Bezugsfall eine erhebliche Menge Lösung aus dem Endlager austritt, werden dadurch – im Gegensatz zum Bezugsfall der „trockenen Grube“ – auch Radionuklide aus dem Endlager transportiert, die sich in der Lösung befinden. Der Aktivitätsausstrom aller in diesen Berechnungen berücksichtigten Radionuklide (siehe dazu /FRI 16/) ist in Abb. 3.37 zu sehen. Von allen 34 gelösten Radionukliden zeigen nur fünf Radionuklide ( $^{59}\text{Ni}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{94}\text{Nb}$  und  $^{36}\text{Cl}$ ) einen deutlich sichtbaren Austrag. Dabei strömt  $^{59}\text{Ni}$  mit einer Rate von maximal 110.000 Bq/a und  $^{99}\text{Tc}$  mit maximal 98.000 Bq/a aus dem Endlager. Alle anderen Radionuklide zeigen Austragsraten unter 10.000 Bq/a.

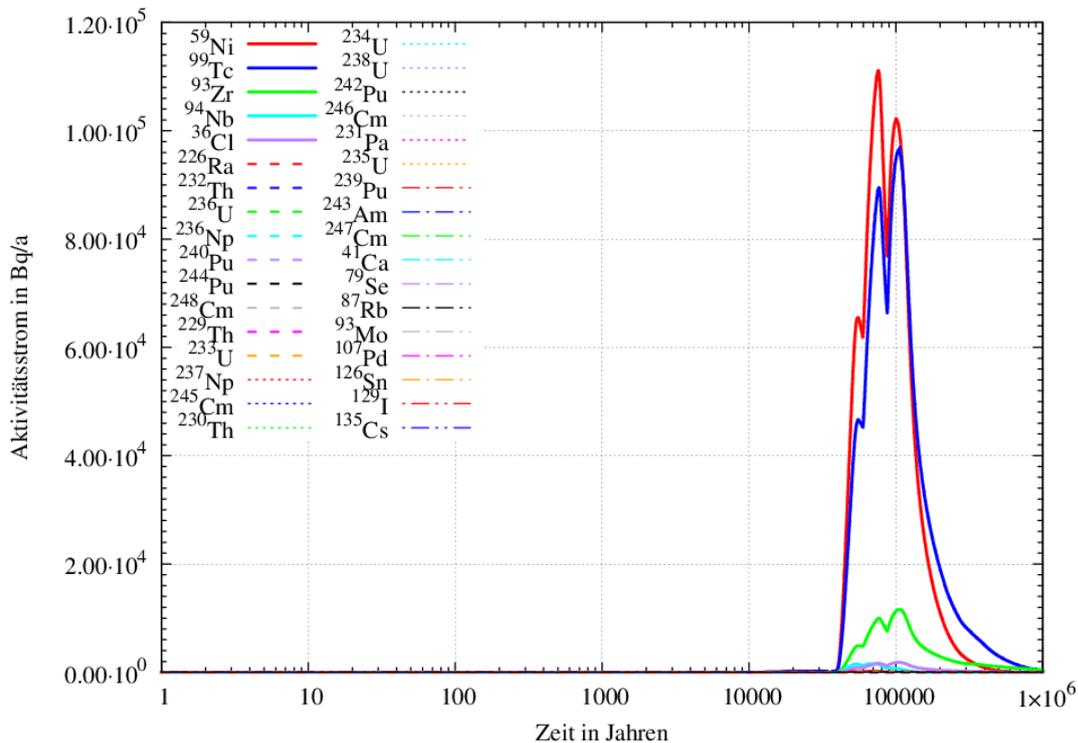
Der prägnante Verlauf des Ausstroms der gelösten Radionuklide in Abb. 3.37 (zwei lokale kurzzeitige Verringerungen der Austrittsrate) ist ein Effekt der groben Diskretisierung des Südfelds oberhalb der Abdichtung und der Entsättigung der entsprechenden Gitterelemente. Detailliert beschrieben und untersucht wird dieser Entsättigungseffekt in /NAV 16b/.



**Abb. 3.36**  $^{14}\text{C}$ -Ausstrom aus dem ERAM

grün: Ausstrom als Summe aller Phasen (advektiv und diffusiv); rot: Ausstrom mittels der Gasphase (advektiv), blau: Ausstrom mittels der flüssigen Phasen (advektiv); violett: Ausstrom mittels beider Phasen (diffusiv).

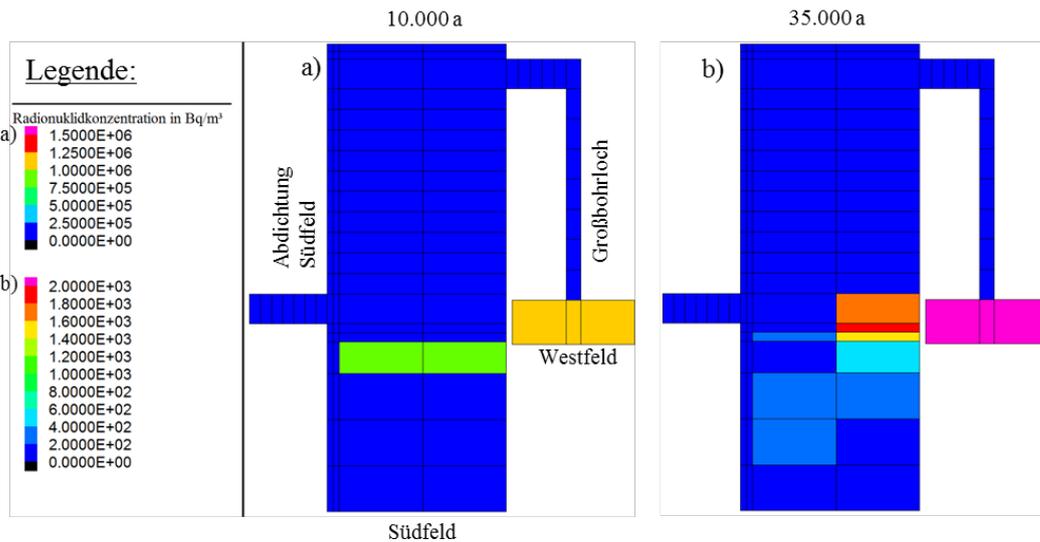
Der Transport der gelösten Radionuklide aus dem Endlager findet erst statt, nachdem die repräsentative Abdichtung zum Südfeld nach 34.400 a ihre Funktionsfähigkeit verloren hat. Dies ist ein deutlicher Hinweis darauf, dass diese Radionuklide aus dem Südfeld stammen. Zudem ist das ursprüngliche Inventar der gelösten Radionuklide im Südfeld zwei Größenordnungen höher als im ELB Nordfeld oder Zentralteil. Die Verteilung des Radionuklidinventars für  $^{59}\text{Ni}$  und  $^{14}\text{C}$  ist in den Abb. 3.38 und Abb. 3.39 nach 10.000 a bzw. 35.000 a dargestellt. In Abb. 3.38 a) erkennt man eine sehr hohe Konzentration von  $^{59}\text{Ni}$ . Dabei steht  $^{59}\text{Ni}$  exemplarisch für alle vorhandenen Radionuklide. Wenn zugetretene Lösung die Lokation der Radionuklide erreicht, sind alle dort vorhandenen Radionuklide instantan mobil. Dies geschieht nach dem Zutritt der Lösung nach 34.500 a: Wie in Abb. 3.38 a) zu sehen ist sinkt die Konzentration deutlich und die im Südfeld eingelagerten Radionuklide (hier  $^{59}\text{Ni}$ ) verteilen sich in der in den unteren Grubenbauen vorhandenen Lösung. Die im Westfeld eingelagerten Radionuklide bleiben im gesamten Berechnungszeitraum immobil, da keine Lösung zutritt.



**Abb. 3.37** Aktivitätsausstrom gelöster Radionuklide aus dem ERAM

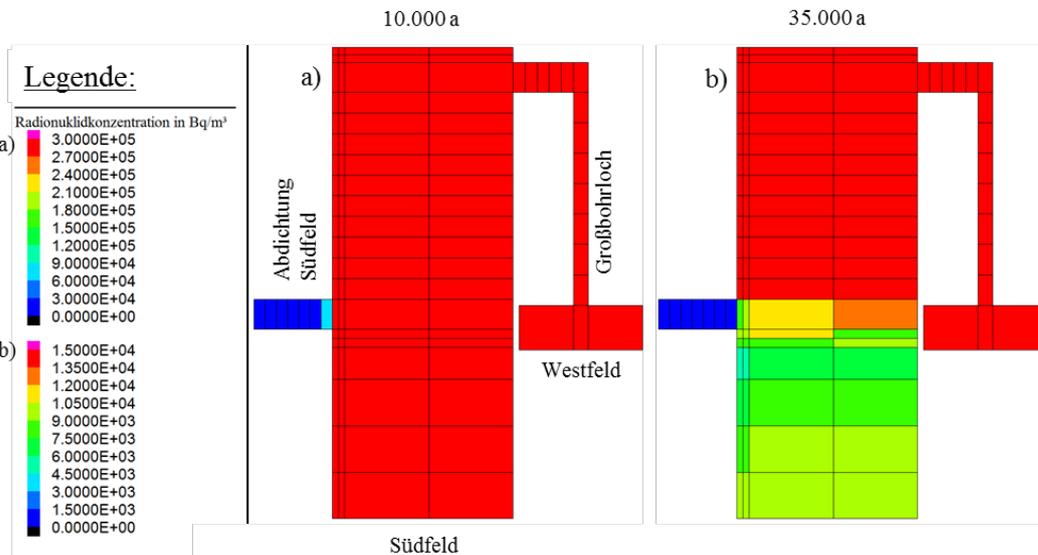
Ausstrom aller betrachteten Radionuklide (außer  $^{14}\text{C}$ ). Die in den meisten vorliegenden Ergebnissen mit der höchsten Aktivität ausströmenden Radionuklide sind als durchgezogene Linien dargestellt, alle anderen Radionuklide als gestrichelte Linien.

Für das gasförmige  $^{14}\text{C}$  ist die Situation anders. Ähnlich wie für die Systementwicklung „trockene Grube“ verteilt sich das Radionuklid durch die interne Gasbewegung im ELB West-/Südfeld, so dass nach 10.000 a (Abb. 3.39 a)) eine gleichmäßige  $^{14}\text{C}$ -Konzentration in diesem ELB vorhanden ist. Anders als im Bezugsfall der „trockenen Grube“ entsteht durch den Zutritt von Lösung eine heterogene Konzentrationsverteilung im ELB West-/Südfeld nach 35.000 a (Abb. 3.39 b)).



**Abb. 3.38** <sup>59</sup>Ni-Konzentration (in der liq. Phase) im Südfeld nach a) 10.000 a und b) 35.000 a

Man beachte die Skalenunterschiede zwischen a) und b). Außerdem zeigt das magentafarbene Westfeld in b), dass die Konzentration über 2000 Bq/m<sup>3</sup> liegt. Beachtenswert sind die Ausführungen zum Volumen des Südfelds in /FRI 16/ Kap. 2.2.2.2



**Abb. 3.39** <sup>14</sup>C-Konzentration (in der gas. Phase) im Südfeld nach a) 10.000 a und b) 35.000 a

Man beachte die Skalenunterschiede zwischen a) und b). Beachtenswert sind die Ausführungen zum Volumen des Südfelds in /FRI 16/ Kap. 2.2.2.2.

Zusammenfassend lassen sich für das Basismodell zum Bezugsfall „mit relevantem Lösungszutritt“ folgende Punkte feststellen:

- Der Mischungsbereich Bartensleben fungiert als Verteiler der Flüssigkeit und der Radionuklide im Endlager.
- Für Gas ist die „Verteilerfunktion“ eingeschränkt. Es findet nur in den ersten Jahren wesentlicher Gastransport über den Mischungsbereich Bartensleben statt.
- Da am MB Marie außer der Restgrube keine weiteren Bereiche anschließen, fungiert dieser nur in sehr geringem Maße als Verteiler.
- Der ELB Ostfeld ist von den Prozessen im Endlagersystem nahezu völlig entkoppelt.
- Innerhalb der abgedichteten Bereiche kommt es nach ca. 6.000 a zum Ausgleich der  $^{14}\text{C}$ -Konzentration.
- Innerhalb der abgedichteten Bereiche kommt es nur dann zu einem Konzentrationsausgleich in fester Form vorliegender Radionuklide, wenn Lösung zutritt.
- Nach ungefähr 8500 a treten erstmals Lösung, Gas und Radionuklide aus dem Endlager aus.
- Nach ca. 34500 a verliert die repräsentative Abdichtung zum West-/Südfeld ihre Funktionsfähigkeit und Lösung tritt ins ELB West-/Südfeld zu.
- Gasförmiges  $^{14}\text{C}$  tritt mit maximal 2.500 Bq/a aus dem Endlager aus.
- Gelöste Radionuklide treten nach ca. 35.000 a aus dem Endlager aus.
- Radionuklide mit den höchsten Aktivitäten, die aus dem Endlager austreten, sind  $^{59}\text{Ni}$  und  $^{99}\text{Tc}$  mit einer maximalen Rate von 110.000 Bq/a bzw. 98.000 Bq/a.

### 3.1.2.1 Prozesse im Endlagersystem

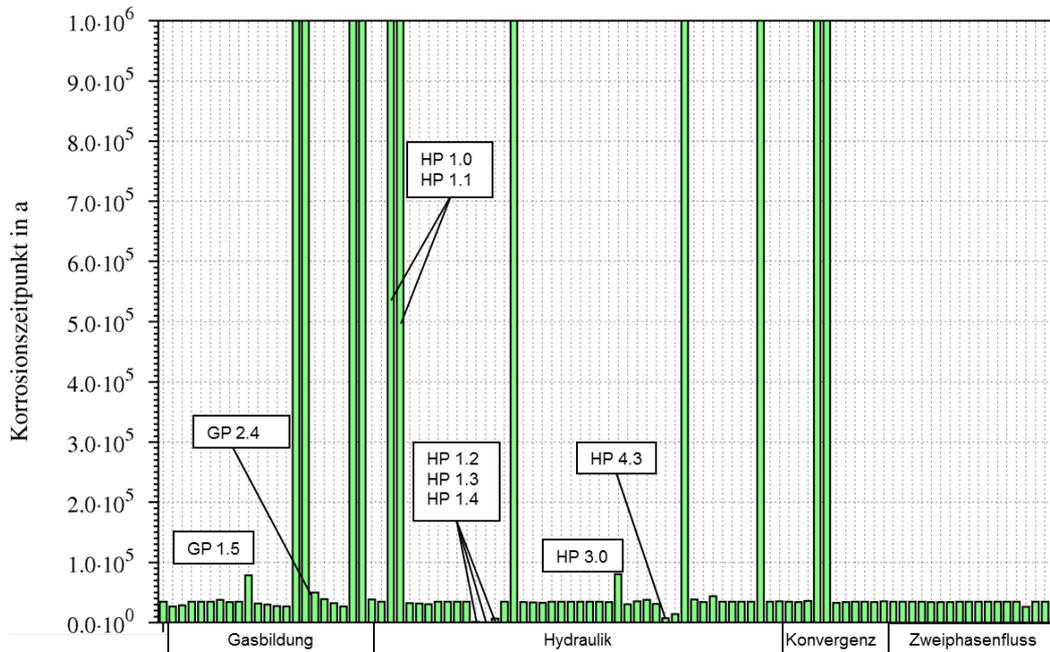
Wie auch für die Systementwicklung „trockene Grube“ werden hier Ergebnisse aller betrachteten Rechenfälle gezeigt. Im Folgenden aufgeführt sind Rechenfälle, die näher betrachtet werden, Details zu den Parametervariationen sind in /FRI 16/ dargelegt:

- Änderung der Permeabilität aller Abdichtungen auf  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  (Rechenfall HP 1.0) und auf  $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$  (Rechenfall HP 1.1). Dabei wird ebenfalls die Abdichtungskorrosion nicht betrachtet, also „abgeschaltet“.
- Änderung der Permeabilität aller Abdichtungen auf  $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ ,  $6,7 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  sowie auf  $1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  (Rechenfälle HP 1.2 bis HP 1.4),
- Initialer „Ausfall“ einzelner Abdichtungen. Dabei wird die Permeabilität zu Beginn der Berechnung auf  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  gesetzt (Rechenfall HP 6.0: Ausfall repräsentative Abdichtung ELB West-/Südfeld; Rechenfall HP 6.1: Ausfall Abdichtung Salzbeton Ostfeld; Rechenfall HP 6.2: Ausfall Abdichtung Sorelbeton Ostfeld).
- Annahme der maximalen Korrosionsraten für die Abdichtungen (Rechenfall HP 4.3),
- Keine Betrachtung der Umlösung der Salze im Grubengebäude (Rechenfall HP 3.0). Hier wird das Modellgitter der „trockenen Grube“ benutzt, was ein kleineres nutzbares Volumen zur Folge hat, sowie die initiale Flüssigkeitssättigung der sonstigen Restgrube Marie und Bartensleben auf 0,1% gesetzt,
- Annahme von unbegrenzt vorhandenem Wasser zur Gasbildung, d. h. Gasbildung ohne limitierendes Wasser (Rechenfall GP 1.5),
- Abschaltung der Gasbildung (Rechenfall GP 1.0),
- Abschaltung der Konvergenz sowie der Versatzkompaktion (Rechenfall KP 1.10).

Bei der Analyse des Bezugsfalls hat sich gezeigt, dass der Lösungszutritt in den ELB West-/Südfeld - sowohl was den Transport von Lösung und Gas als auch den Transport von Radionukliden betrifft - von großer Bedeutung für das Systemverhalten ist. Da der Austritt von den in der Lösung befindlichen Radionukliden vom Ausfall der Abdichtung zum West-/Südfeld gesteuert wird, ist es naheliegend, das Verhalten des Endlagersystems bei einer deutlichen Änderung des Zeitpunkts dieses Ausfalls gegenüber dem des Bezugsfalls zu untersuchen.

Zur Veranschaulichung wird der Zeitpunkt des Ausfalls, also des vollständigen Funktionsverlustes der repräsentativen (siehe /FRI 16/) Abdichtung aufgrund der Korrosion, für alle Rechenfälle des Basismodells „mit relevantem Lösungszutritt“ in Abb. 3.40 ge-

zeigt. Es ist deutlich zu sehen, dass nur eine geringe Variabilität bzgl. dieses Zeitpunktes existiert. Die meisten Rechenfälle zeigen – wie der Bezugsfall – einen Ausfall der repräsentativen Abdichtung zwischen 30.000 a und 40.000 a (Bezugsfall 34.400 a). Für zwei Rechenfälle (HP 1.0; HP 1.1 in Abb. 3.40) wurde die Korrosion der Abdichtung und damit auch ein potenzieller Ausfall nicht betrachtet, in diesen Rechenfällen besitzt die Abdichtung bereits initial eine hohe Permeabilität ( $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  bzw.  $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ ).



**Abb. 3.40** Zeitpunkt der vollständigen Korrosion der repräsentativen Abdichtung zum West-/Südfeld (Basismodell, „mit relevantem Lösungszutritt“)

Im Histogramm entspricht der 1. Balken dem Bezugsfall. Wenn ein durchgehender Balken angegeben ist, verliert die Abdichtung ihre Funktionsfähigkeit nicht. Unten angegeben ist die Kategorie, die aussagt, welche Art von Parametern geändert wurde.

Bei zwei Rechenfällen (GP 1.5 und HP 3.0) fällt die repräsentative Abdichtung zum West-/Südfeld erst nach rund 80.000 a aus. In den Rechenfällen mit einem späten Ausfall dieser Abdichtung wird zum einen (HP 3.0) die Umlösung der Salze im Grubengebäude nicht betrachtet. Dies bedeutet in Bezug auf die Modellparameter, dass ein kleineres initiales nutzbares Volumen und eine geringere initiale Flüssigkeitssättigung der Restgrube in die Berechnung eingehen. Vor allem letzteres führt dazu, dass sich das Endlager im Vergleich zum Bezugsfall deutlich langsamer mit Lösung füllt und deshalb die Abdichtung zum West-/Südfeld erheblich später korrodiert. In der Variationsrechnung GP 1.5 wird unbegrenzt vorhandenes Wasser für die Gasbildung angenommen, so dass zum Beispiel im ELB West-/Südfeld auch ohne Zutritt von Lösung

bis zum Ende des Berechnungszeitraums Gas gebildet werden kann. Dies führt zu einem hohen Gasdruck im West-/Südfeld, der den Zutritt von Lösung in das Südfeld über die Abdichtung behindert und somit die Korrosion der Abdichtung verlangsamt.

Bei insgesamt 9 Rechenfällen (ohne HP 1.0 und HP 1.1) wird die Abdichtung nicht vollständig korrodiert und bleibt deshalb bis zum Ende des Berechnungszeitraums funktionsfähig. Die Gründe sind vielfältig, lassen sich aber alle auf Parameteränderungen zurückführen die sich

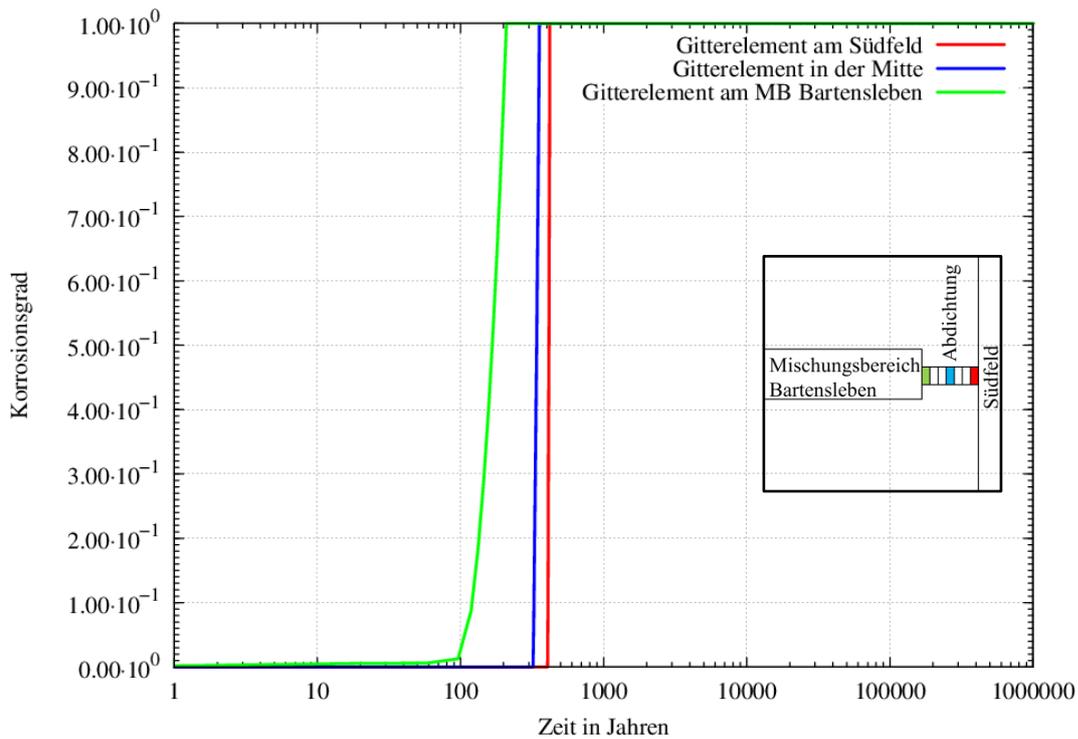
- auf den Gasdruck des West-/Südfelds auswirken und so die Durchströmung der Abdichtung mit korrosiver Lösung hemmen bzw. verhindern oder
- direkt auf die Korrosionsfähigkeit der Lösung beziehen, so dass zwar Flüssigkeit durch die repräsentative Abdichtung hindurchströmt, sie aber nicht korrodiert.

In dieser Hinsicht sind Rechenfälle, in denen die Gasbildung des Referenzfalles aus /BEC 09/ wie in /FRI 16/ beschrieben parametrisiert wurde, interessant. In diesen Rechenfällen wird die repräsentative Abdichtung zum West-/Südfeld im Berechnungszeitraum nicht vollständig korrodiert, da aufgrund des hohen Gasgegendrucks kaum Lösung durch die Abdichtung strömt.

Für insgesamt 4 Rechenfälle fällt die repräsentative Abdichtung bereits nach wenigen hundert (HP 1.2, HP 1.3) bzw. tausend (HP 1.4, HP 4.3) Jahren aus (siehe Abb. 3.40). In diesen Rechenfällen wird die initiale Permeabilität zu  $1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ ,  $6,7 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  sowie zu  $1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  variiert (HP 1.2 – HP 1.4) bzw. maximale Korrosionsraten (HP 4.3) für die Abdichtungen angenommen (siehe /FRI 16/). Im Rechenfall HP 1.3 fällt die Abdichtung als erstes aus. Durch die sehr hohe initiale Permeabilität von  $6,7 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  kann korrosive Lösung schnell durch die Abdichtung in Richtung Südfeld strömen und die Abdichtung dabei korrodieren. In Abb. 3.41 ist zu sehen, dass das letzte direkt am ELB West-/Südfeld gelegene Gitterelement der Abdichtung bereits nach 400 a korrodiert ist und damit die gesamte Abdichtung ausfällt.

Durch die Korrosion wird die Permeabilität der Abdichtung um 4 Größenordnungen erhöht, so dass daraus in Relation zu allen anderen Rechenfällen im Rechenfall HP 1.3 die insgesamt höchste Permeabilität ( $6,7 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ ) resultiert. Dadurch kann die Lösung nicht nur zu einem frühen Zeitpunkt in das Südfeld strömen sondern das Südfeld auch

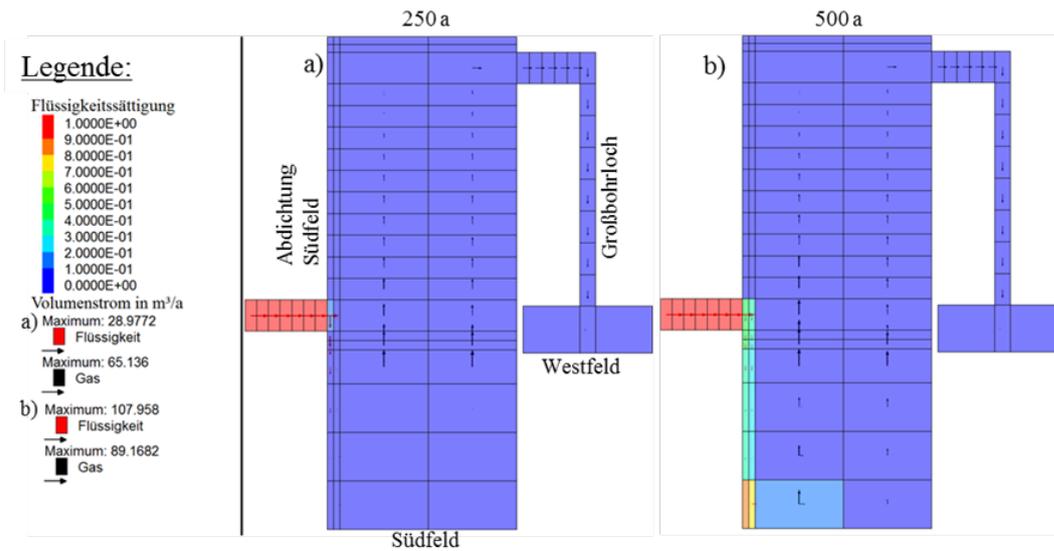
schnell auffüllen. In Abb. 3.42 ist die Situation bzgl. der Flüssigkeitssättigung und den Transportpfaden im West-/Südfeld kurz vor (Abb. 3.42 a)) und kurz nach (Abb. 3.42 b)) der Korrosion der Abdichtung nach 250 bzw. 500 Jahren dargestellt. Man erkennt, dass der Flüssigkeitsstrom vor der Korrosion (ca.  $29 \text{ m}^3/\text{a}$ , Abb. 3.42 a)) bereits in der Größenordnung des Flüssigkeitsstroms nach der Korrosion im Bezugsfall liegt (vgl. Abb. 3.29 b) bei  $35.000 \text{ a}$ ).



**Abb. 3.41** Korrosionsgrad der Südabdichtung

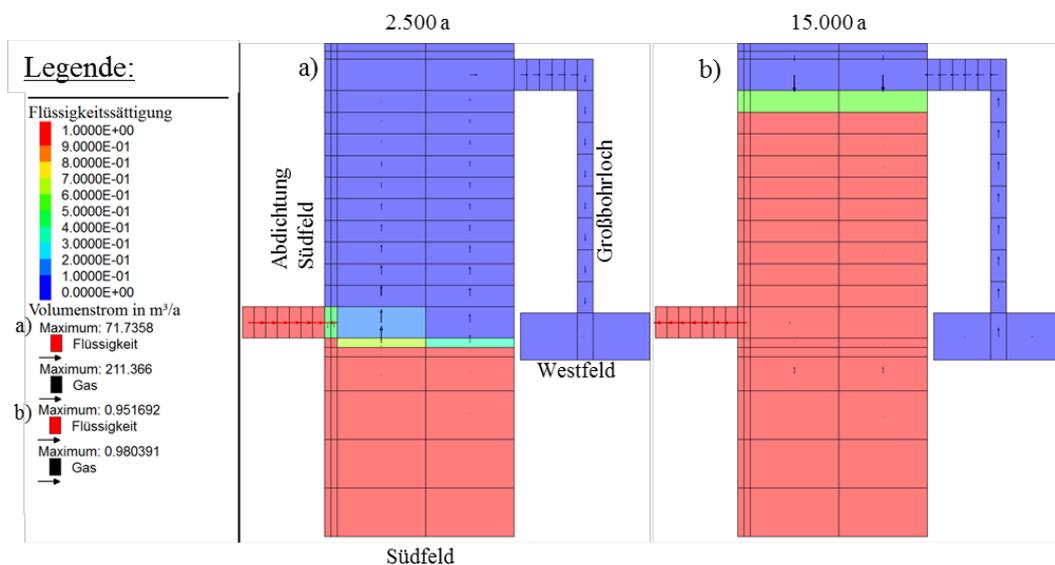
Rechenfall HP 1.3 mit hoher initialer Abdichtungspermeabilität von  $6,7 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ ; sonst wie Bezugsfall. Die Kurven zeigen den Korrosionsgrad der Gitterelemente der Abdichtung. Die dargestellten Gitterelemente grenzen an den Mischungsbebereich (grüne Kurve), an das Südfeld (rote Kurve) bzw. befinden sich in der Mitte der Abdichtung (blaue Kurve). Die Skizze zeigt die Position der Gitterelemente in Relation zum Südfeld und zum Mischungsbebereich.

Nach dem Ausfall der Abdichtung liegt der Flüssigkeitszutritt mit mehr als  $100 \text{ m}^3/\text{a}$  bei etwa  $2/3$  der Zutrittsrate in die Gesamtgrube, die zu diesem Zeitpunkt etwa  $150 \text{ m}^3/\text{a}$  beträgt. Der ELB West-/Südfeld kann sich deshalb sehr schnell mit Lösung auffüllen. In Abb. 3.43 ist der Auffüllprozess zu den Zeitpunkten  $2.500 \text{ a}$  (Abb. 3.43 a)) und  $15.000 \text{ a}$  (Abb. 3.43 b)) zu sehen.



**Abb. 3.42** Flüssigkeitssättigung und Volumenstrom in das Südfield bzw. innerhalb des West-/Südfelds zum Zeitpunkt a) 250 a und b) 500 a

Rechenfall HP 1.3 mit hoher initialer Abdichtungspermeabilität von  $6,7 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ ; sonst wie Bezugsfall. Rote Pfeile zeigen den Flüssigkeitsstrom in m<sup>3</sup>/a, schwarze Pfeile den Gasstrom in m<sup>3</sup>/a. Dabei entspricht die Länge des längsten Pfeils dem in der Legende angegebenen Maximum (dies gilt für alle folgenden ähnlichen Abbildungen).

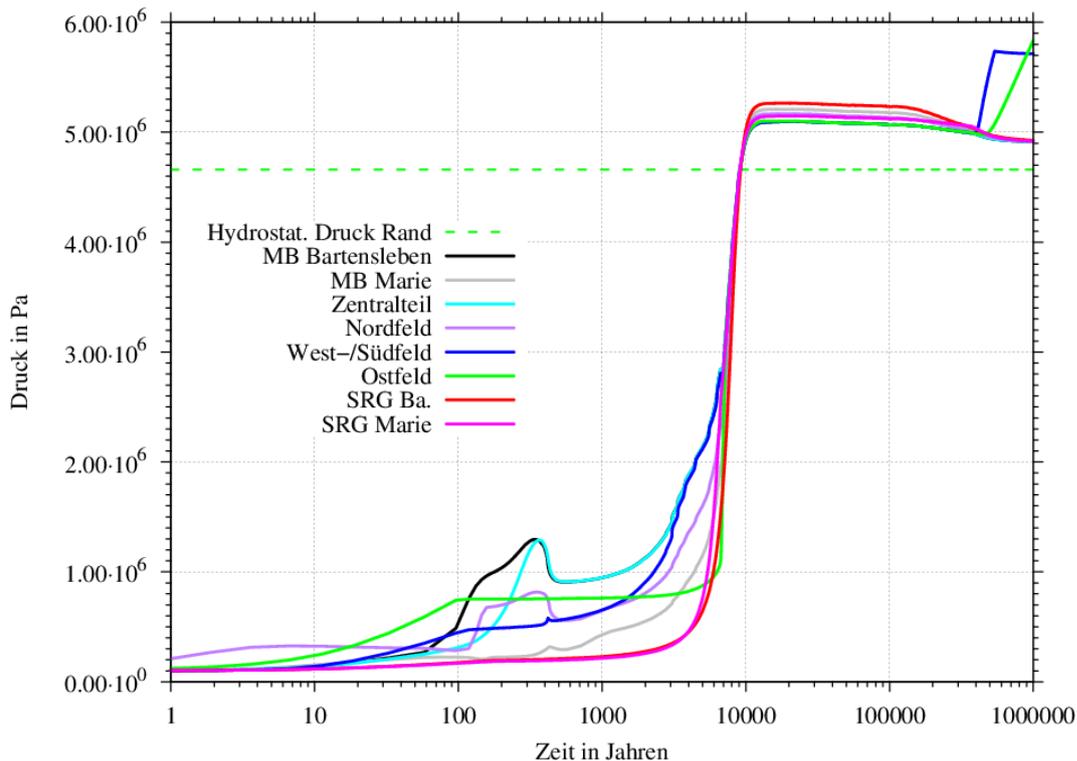


**Abb. 3.43** Flüssigkeitssättigung und Volumenstrom in das Südfield bzw. innerhalb des West-/Südfelds zum Zeitpunkt a) 2.500 a und b) 15.000 a

Rechenfall HP 1.3 mit hoher initialer Abdichtungspermeabilität von  $6,7 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ ; sonst wie Bezugsfall. Rote Pfeile zeigen den Flüssigkeitsstrom in m<sup>3</sup>/a, schwarze Pfeile den Gasstrom in m<sup>3</sup>/a. Dabei entspricht die Länge des längsten Pfeils dem in der Legende angegebenen Maximum (dies gilt für alle folgenden ähnlichen Abbildungen).

Bereits nach 2.500 a sind die Grubenteile unterhalb der Abdichtung nahezu lösungs-gesättigt. Das Gas strömt, wie auch im Bezugsfall, in Richtung Westfeld. Nach 15.000 a zeigt sich ein deutlicher Unterschied zum Bezugsfall: Im ELB West-/Südfeld füllt sich das Südfeld bis fast auf die Teufe des Großbohrlochs. Kurz darunter (grün gefärbte Gitterelemente in Abb. 3.43 b)) beträgt die Sättigung ca. 58 %. Auch in diesem Rechenfall tritt keine Lösung in das Westfeld ein. Der Grund für das Aufsteigen der Lösung in die oberen Teufenbereiche des Südfelds liegt in dem fehlenden (Gas-) Gegen-druck, der sich zu so einem frühen Zeitpunkt (400 – ca. 10.000 a) noch nicht entspre-chend aufgebaut hat. In Abb. 3.44 ist die Druckentwicklung für die verschiedenen Teilbereiche des Endlagers gezeigt, zum Zeitpunkt des Lösungszutritts in das Südfeld (etwa 400 a) beträgt der Gasdruck im West-/Südfeld nur ca. 0,5 MPa. Erst ab etwa 3.000 a beginnt der Druck im West-/Südfeld deutlich zu steigen. Damit kann, unter Be-rücksichtigung des hydrostatischen Drucks der sich aufgrund der ansteigenden Flüs-sigkeitssäule einstellt, die Lösung die oberen Grubenbaue erreichen. Der Druck der Flüssigkeitssäule im Südfeld und der Gasgegendruck im Westfeld führen jedoch dazu, dass keine Lösung in das Westfeld zutritt. Nach etwa 10.000 a Jahren wird im Endla-ger der am Modellrand anstehende hydrostatische Druck erreicht und es beginnt die Ausstromphase für Gas und Lösung aus dem Endlager.

Wenn also die Druckentwicklung aufgrund von Konvergenz und/oder Gasbildung im West-/Südfeld die Ursache dafür ist, dass der Flüssigkeitsspiegel die Verbindung zum Westfeld nicht erreicht, kann es alternative Rechenfälle geben, in denen aufgrund feh-lenden Gegendrucks der Flüssigkeitsspiegel bis zu dieser Verbindung ansteigt. Geeig-nete Rechenfälle zur Untersuchung dieses Prozesses sind die bereits für die System-entwicklung „trockene Grube“ betrachteten Fälle ohne Gebirgskonvergenz (Rechenfall KP 1.10) und ohne Gasbildung (Rechenfall GP 1.0).

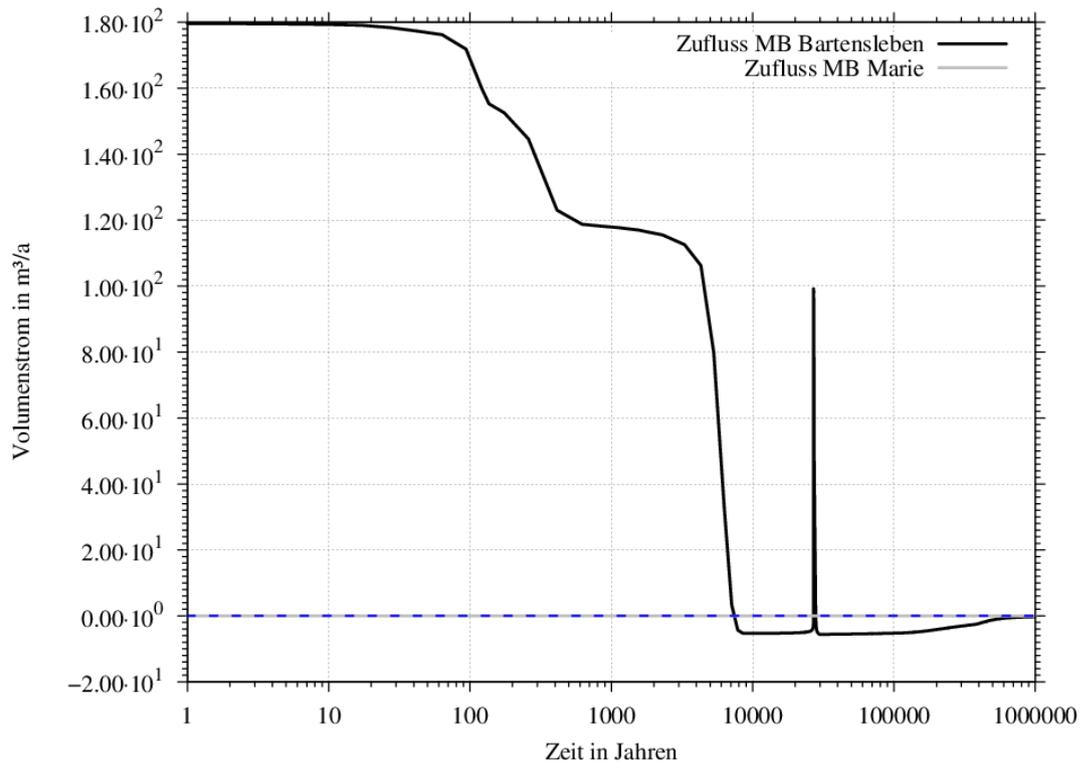


**Abb. 3.44** Druckentwicklung im ERAM für unterschiedliche Modellbereiche

Rechenfall HP 1.3 mit hoher initialer Abdichtungspermeabilität von  $6,7 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ ; sonst wie Bezugsfall. Alle Messpunkte liegen auf der gleichen Teufe. Der abgebildete Druck ist der Gasdruck.

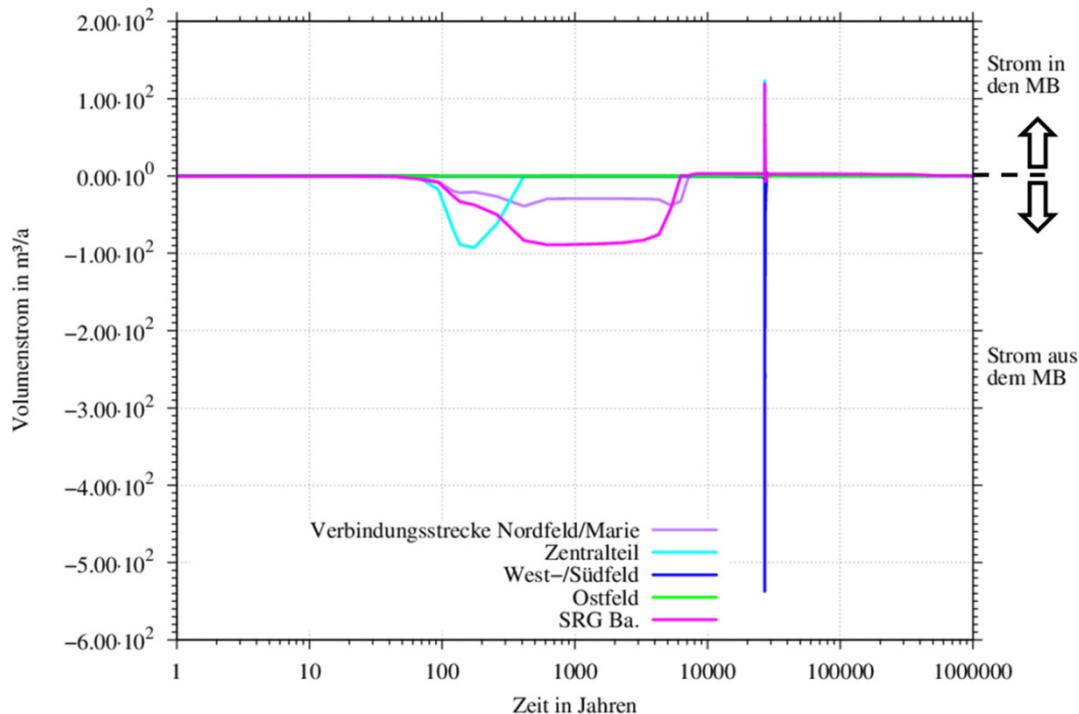
Tatsächlich sind bereits für den Rechenfall GP 1.0 in Abb. 3.45 deutliche Unterschiede zum Bezugsfall (vgl. Abb. 3.25) zu erkennen. Der Einstrom von Lösung in das Endlager zeigt hier ohne Berücksichtigung der Gasbildung zwar in den ersten 8.500 a nur kleine Unterschiede zum Bezugsfall, allerdings ist der Peak, der die vollständige Korrosion der Abdichtung zum West-/Südfeld und demzufolge erneutes Einströmen signalisiert, deutlich ausgeprägter als im Bezugsfall.

Über einen Zeitraum von ca. 1.000 a (26.980 a - 27.930 a) strömt Lösung mit einem Maximalwert von  $100 \text{ m}^3/\text{a}$  in das Endlager. In das West-/Südfeld strömt die Lösung sogar mit einer weitaus höheren maximalen Rate von ca.  $520 \text{ m}^3/\text{a}$  ein, wie die blaue Kurve in Abb. 3.46 zeigt. Der Grund für die hohe Rate ist der fehlende Gasgegendruck im West-/Südfeld zu diesem Zeitpunkt. Die positiven Peaks zum nahezu gleichen Zeitpunkt zeigen, dass aus der sonstigen Restgrube Bartensleben, aus dem Zentralteil und auch aus der Verbindungsstrecke zum Nordfeld/Marie Lösung in den Mischungsbe-  
reich Bartensleben nachströmt.



**Abb. 3.45** Einstrom von Lösung in das ERAM

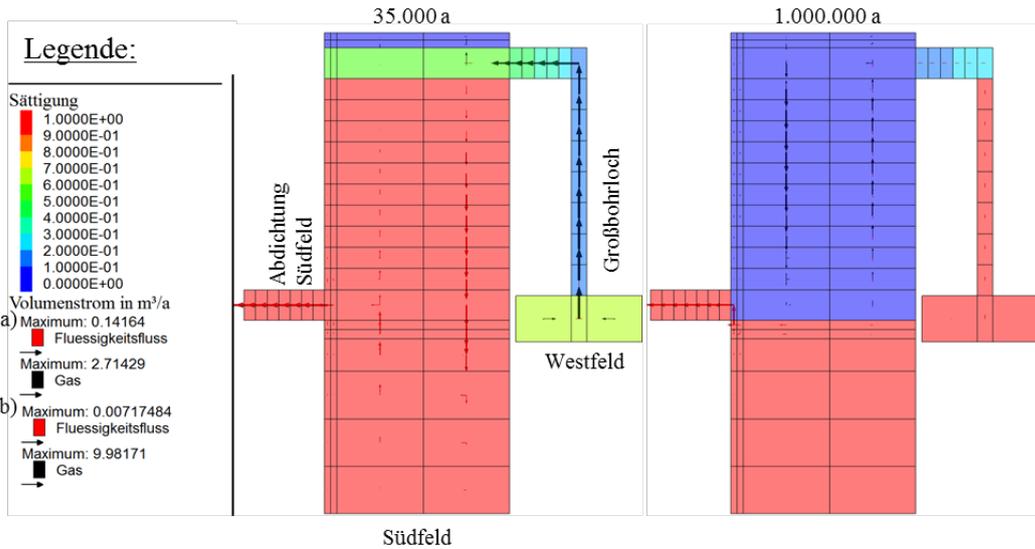
Rechenfall GP 1.0: ohne Gasbildung; sonst wie Bezugsfall. Positiv: Einstrom in die Grube;  
negativ: Ausstrom aus der Grube.



**Abb. 3.46** Flüssigkeitsstrom in und aus dem MB Bartensleben

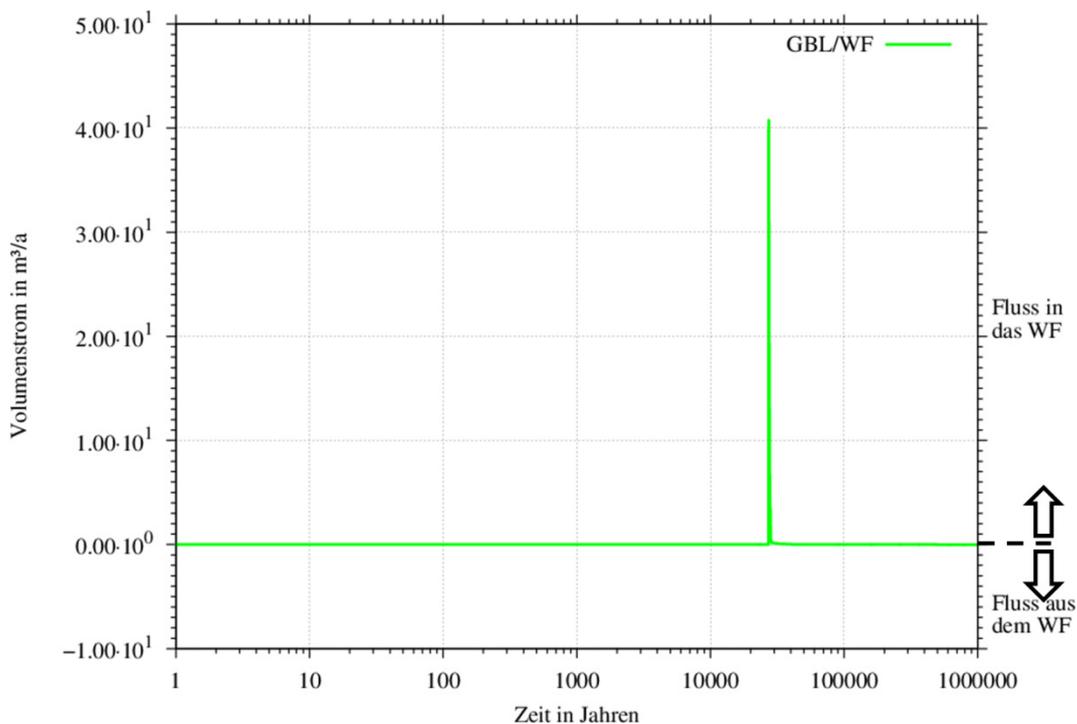
Rechenfall GP 1.0: ohne Gasbildung; sonst wie Bezugsfall. Positiv: Flüssigkeitsstrom in den MB Bartensleben; negativ: Flüssigkeitsstrom aus dem MB Bartensleben. Die Kurve für die Verbindungsstrecke Nordfeld/Marie liegt zum Zeitpunkt des Peaks hinter den anderen Kurven und ist deshalb nicht zu sehen.

Dieser hohe Lösungseinstrom in das Südfeld wirkt sich auf den Flüssigkeitsspiegel im West-/Südfeld aus (siehe Abb. 3.47a)). Dort ist eine deutliche Sättigungszunahme auf ca. 57 % in Höhe des Zugangs zum Großbohrloch zu erkennen. Damit ist ein Lösungszutritt in das Westfeld möglich, die durch die Sättigung des Westfelds (ca. 60 % in Abb. 3.47 a)) angezeigt wird. Der Volumenstrom aus dem Südfeld in das Großbohrloch ist in Abb. 3.48 dargestellt. Dort ist zu erkennen, dass kurz nach der Korrosion der Abdichtung zwischen 27.200 a und 28.000 a Lösung in das Westfeld mit einer maximalen Rate von ca. 40 m³/a hineinströmt. Nach dem einmaligen hohen Zustrom findet im Berechnungszeitraum weder ein weiterer signifikanter Einstrom in das Westfeld noch ein signifikanter Ausstrom aus dem Westfeld, z. B. durch einen Auspressvorgang aufgrund der Gebirgskonvergenz, statt. Im Gegensatz zum Westfeld wird aus dem Südfeld die Lösung im Laufe des Berechnungszeitraums herausgepresst (siehe Abb. 3.47 b)), so dass der Flüssigkeitsspiegel dort nach 1.000.000 a unterhalb der Abdichtung liegt.



**Abb. 3.47** Flüssigkeitssättigung und Volumenstrom in das Südfeld und Westfeld zum Zeitpunkt a) 35.000 a und b) 1.000.000 a

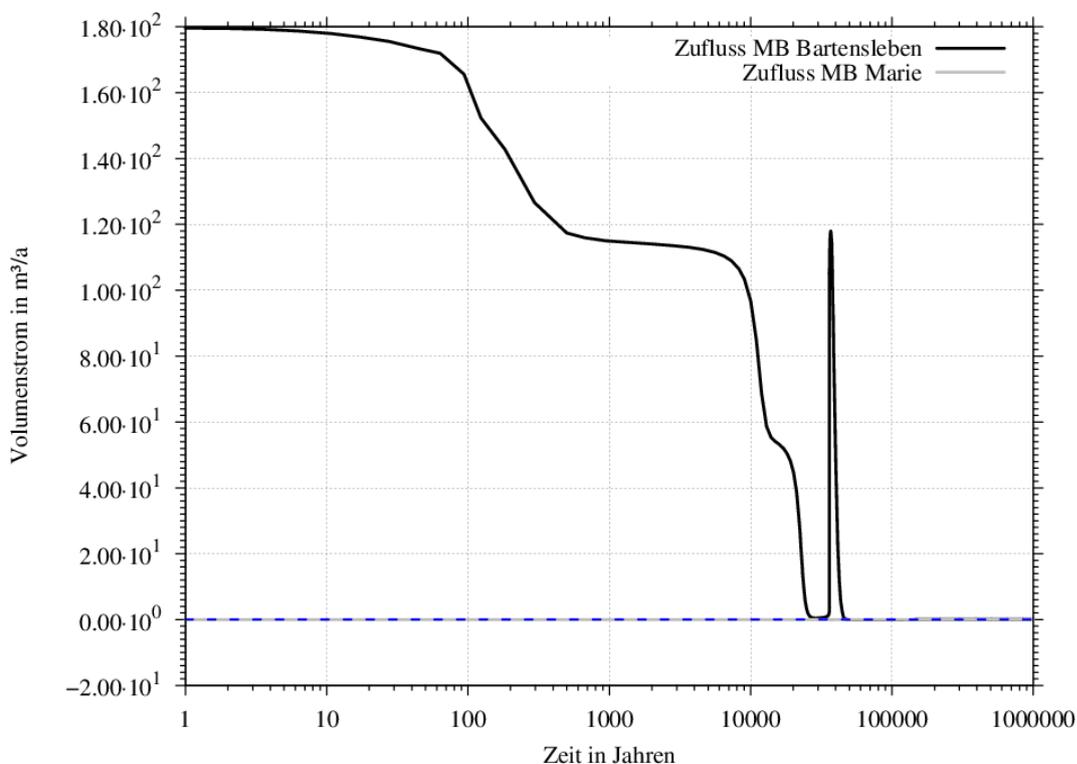
Rechenfall GP 1.0: ohne Gasbildung; sonst wie Bezugsfall. Rote Pfeile zeigen den Flüssigkeitsstrom in m³/a, schwarze Pfeile den Gasstrom in m³/a. Dabei entspricht die Länge des längsten Pfeils dem in der Legende angegebenen Maximum (dies gilt für alle folgenden ähnlichen Abbildungen).



**Abb. 3.48** Flüssigkeitsstrom in und aus dem Westfeld

Rechenfall GP 1.0: ohne Gasbildung; sonst wie Bezugsfall. Positiv: Flüssigkeitsstrom in das Westfeld hinein (aus dem Bohrloch); negativ: Flüssigkeitsstrom aus Westfeld heraus (in Richtung Bohrloch).

Der zweite Rechenfall mit potenziell hohem Flüssigkeitsspiegel, der Rechenfall KP 1.10 ohne Berücksichtigung der Gebirgskonvergenz, zeigt ein etwas anderes Verhalten als der Rechenfall GP 1.0. Wie aus Abb. 3.49 hervorgeht, ist die max. Einstromrate mit ca.  $120 \text{ m}^3/\text{a}$  wiederum höher als im Fall GP 1.0 (ohne Gasbildung, vgl. Abb. 3.45), findet aber bei 36.000 a und damit fast 10.000 a später statt. Der größte Unterschied zwischen den Abbildungen für die beiden Rechenfälle ist jedoch das Fehlen eines Ausströmprozesses für Rechenfall KP 1.10. Dies ist in Abb. 3.49 erkennbar, da die Kurve keine negativen Werte zeigt. Die nicht betrachtete Gebirgskonvergenz (also die nicht aktivierte Berechnung der Gebirgskonvergenz im Rechenfall) führt dazu, dass die zugetretene Lösung aus dem Endlager nicht wieder herausströmt.

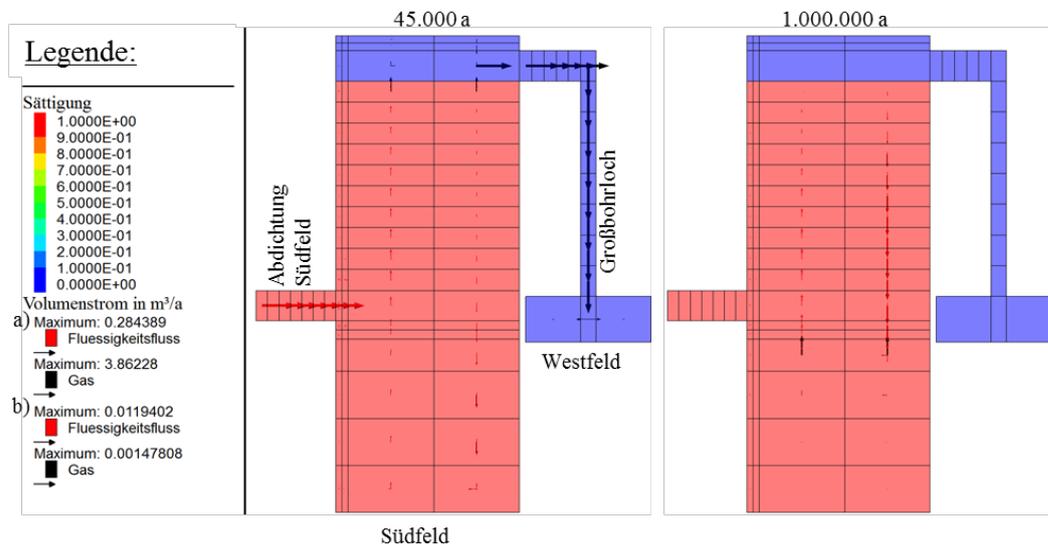


**Abb. 3.49** Einstrom von Lösung in das ERAM

Rechenfall KP 1.10: ohne Gebirgskonvergenz; sonst wie Bezugsfall. Positiv: Einstrom in die Grube; negativ: Ausstrom aus der Grube.

Die nach der Korrosion der Abdichtung zum Südfeld zuströmende Lösung führt auch in diesem Fall zu einem schnellen und hohen Anstieg der Flüssigkeitssäule im Südfeld (siehe Abb. 3.50 a)). Bereits nach 45.000 a ist das Südfeld bis zur Unterkante des Großbohrlochs mit Flüssigkeit gesättigt. Trotzdem tritt in diesem Rechenfall keine Lösung in das Westfeld zu, da der früh aufgrund der Gasbildung entstandene Gasgegen- druck und der hydrostatische Druck der Lösungssäule im Südfeld etwas höher sind als

der Druck am Rand der Abdichtung. Die nicht betrachtete Gebirgskonvergenz und das Fehlen eines signifikanten Auspressvorgangs zeigt sich auch in Abb. 3.50 b). Dort steht die Flüssigkeitssäule nach 1.000.000 nach wie vor auf dem Niveau der Unterkante des Großbohrlochs.

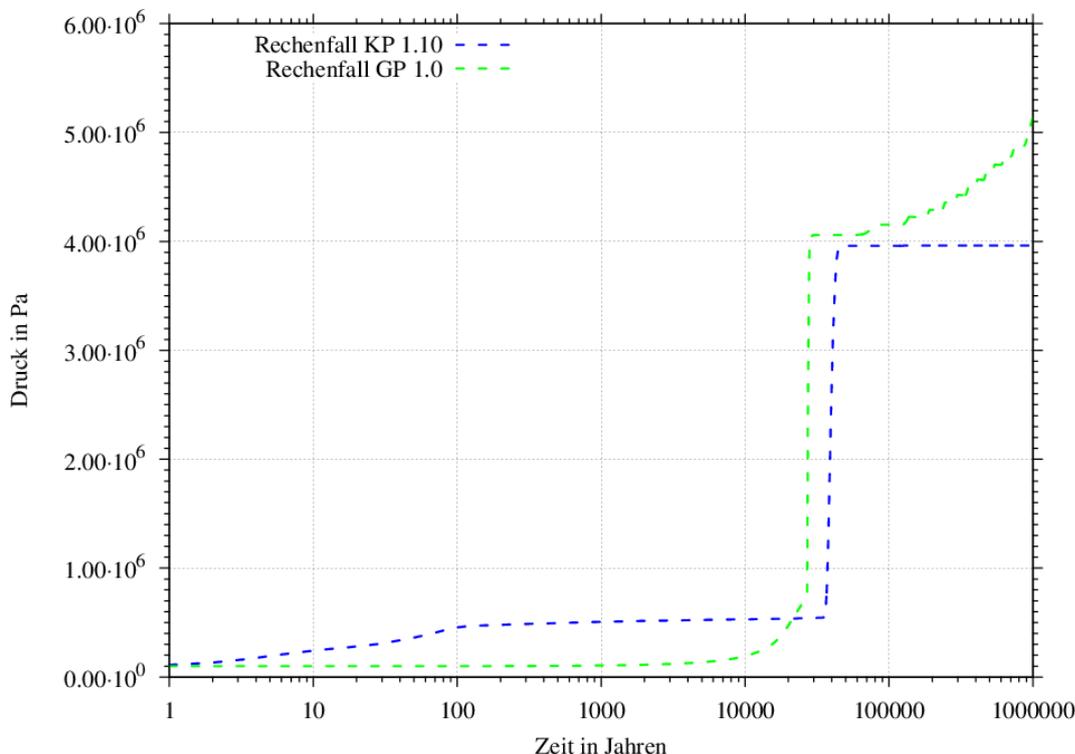


**Abb. 3.50** Flüssigkeitssättigung und Volumenstrom in das Südfeld und Westfeld zum Zeitpunkt a) 35.000 a und b) 1.000.000 a

Rechenfall KP 1.10: ohne Gebirgskonvergenz; sonst wie Bezugsfall. Rote Pfeile zeigen den Flüssigkeitsstrom in  $\text{m}^3/\text{a}$ , schwarze Pfeile den Gasstrom in  $\text{m}^3/\text{a}$ . Dabei entspricht die Länge des längsten Pfeils dem in der Legende angegebenen Maximum (dies gilt für alle folgenden ähnlichen Abbildungen).

Die wesentliche Ursache für den Lösungszutritt in das Westfeld und damit der wesentliche Unterschied zwischen den beiden untersuchten Rechenfällen mit hohem Flüssigkeitsspiegel liegt in der zeitlichen Entwicklung der Gasdrücke (siehe Abb. 3.51). Im Rechenfall GP 1.0 (ohne Berücksichtigung der Gasbildung) ist der Gasdruck wegen der fehlenden Gasbildung zu frühen Zeitpunkten niedrig und späten Zeitpunkten aufgrund der Konvergenz höher. Deshalb kann Lösung in das Westfeld zutreten und aus dem Südfeld wieder ausgepresst werden. Im Rechenfall KP 1.10 (ohne Berücksichtigung der Gebirgskonvergenz) ist der Gasdruck zu frühen Zeitpunkten etwas höher, so dass keine Lösung in das Westfeld zutritt. Der Anstieg beider Kurven zeigt die Gaskompression aufgrund der aufsteigenden Flüssigkeitssäule, da das Gas nicht aus dem West-/Südfeld entweichen kann. Der Lösungszutritt in das Westfeld stoppt für den Rechenfall GP 1.0 zum Zeitpunkt 28.000 a etwa bei 3,9 MPa, danach steigt der Druck aufgrund der Gebirgskonvergenz weiter an. Für den Rechenfall KP 1.10 bleibt der Druck nach

dem Anstieg relativ konstant, die Gasbildung im Südfeld führt nur zu einer geringen Erhöhung und zu einer sehr geringen Auspressrate ( $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{a}$  nach 100.000 a) von Lösung aus dem Südfeld.



**Abb. 3.51** Entwicklung des Gasdrucks im Südfeld auf der Höhe des Großbohrlochs

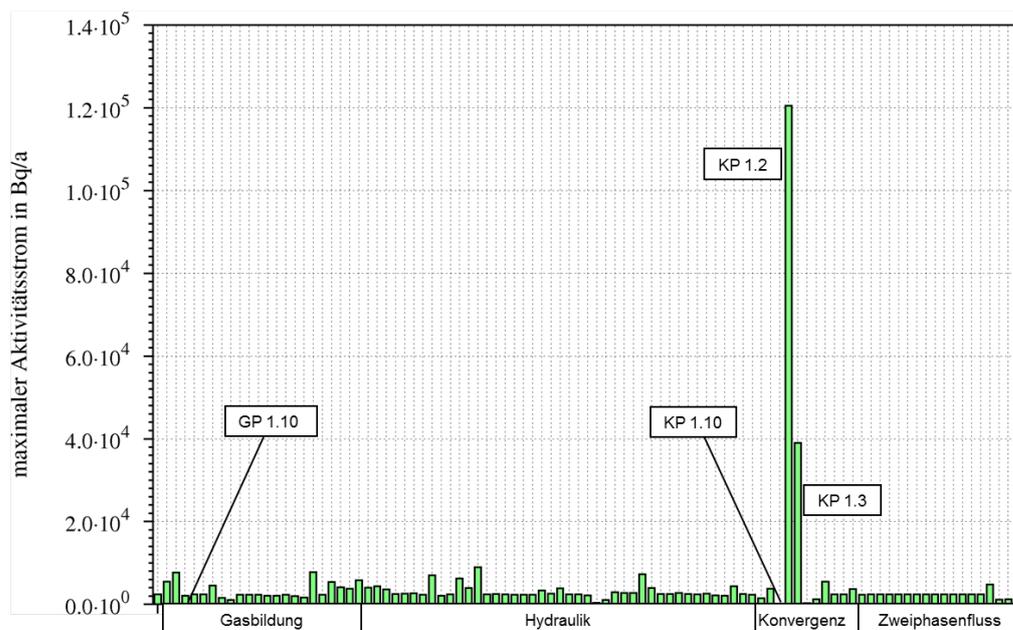
Rechenfall KP 1.10: ohne Gebirgskonvergenz; Rechenfall GP 1.0 ohne Gasbildung. Beide Rechenfälle sonst wie Bezugsfall.

Die unterschiedlichen zeitlichen Entwicklungen des Gasdrucks haben auch eine Auswirkung auf den Radionuklidaustrag aus dem Endlager. Ein Vergleich der maximalen Radionuklidausträge für  $^{14}\text{C}$  ist in Abb. 3.52 für alle betrachteten Rechenfälle dargestellt, der Vergleich für  $^{59}\text{Ni}$  in Abb. 3.53. Im Prinzip ließe sich dieser Vergleich mit jedem im ERAM (bzw. Modell) vorhandenem Radionuklid durchführen. Im Modell sind die Transporteigenschaften für die Radionuklide, die sich in Lösung befinden, jedoch identisch (Ausnahme:  $^{226}\text{Ra}$ ), so dass hier nur  $^{59}\text{Ni}$  als Indikator für den Transport dieser Radionuklide aus dem ERAM angegeben wird.

Während der Austrag im Rechenfall GP 1.10 für  $^{14}\text{C}$  und  $^{59}\text{Ni}$  dem des Bezugsfalls ähnelt, zeigt sich im Rechenfall KP 1.10 weder für  $^{14}\text{C}$  noch für  $^{59}\text{Ni}$  ein Austrag. Die Konvergenz des Grubenbaus ist deshalb die wesentliche treibende Kraft für den Austrag von gasförmigen und in Lösung transportierten Radionukliden.

Der Vergleich der maximalen Aktivitätsströme von  $^{14}\text{C}$  aus dem Endlager (Abb. 3.52) zeigt, dass der Bezugsfall im Vergleich einen eher niedrigen  $^{14}\text{C}$ -Austrag (ca. 2500 Bq/a) aufweist. Viele Rechenfälle zeigen zumindest einen leicht höheren, wenn nicht einen deutlich höheren Austrag. Zwei Rechenfälle (KP 1.2 und KP 1.3) liegen mit einem  $^{14}\text{C}$ -Austrag von  $1,2 \cdot 10^5$  Bq/a und  $4 \cdot 10^4$  Bq/a deutlich über dem des Bezugsfalls. Für diese Rechenfälle wurde eine höhere Referenzkonvergenzrate angenommen. Dies zeigt ebenfalls die Abhängigkeit des Radionuklidaustrags von der Konvergenz des Grubenbaus. In diesen Rechenfällen liegen die Peak des  $^{14}\text{C}$ -Austrags sehr früh ( $< 10.000$  a), das ausströmende Inventar stammt also nicht aus dem ELB West-/Südfeld, sondern aus den nicht abgedichteten Bereichen.

Insgesamt zeigen die Variationsrechnungen zur Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“ einen mit der Systementwicklung „trockene Grube“ vergleichbaren  $^{14}\text{C}$ -Austrag mit geringer Variabilität.



**Abb. 3.52** Maximaler  $^{14}\text{C}$ -Austrag für alle Rechenfälle (Basismodell, „mit relevantem Lösungszutritt“)

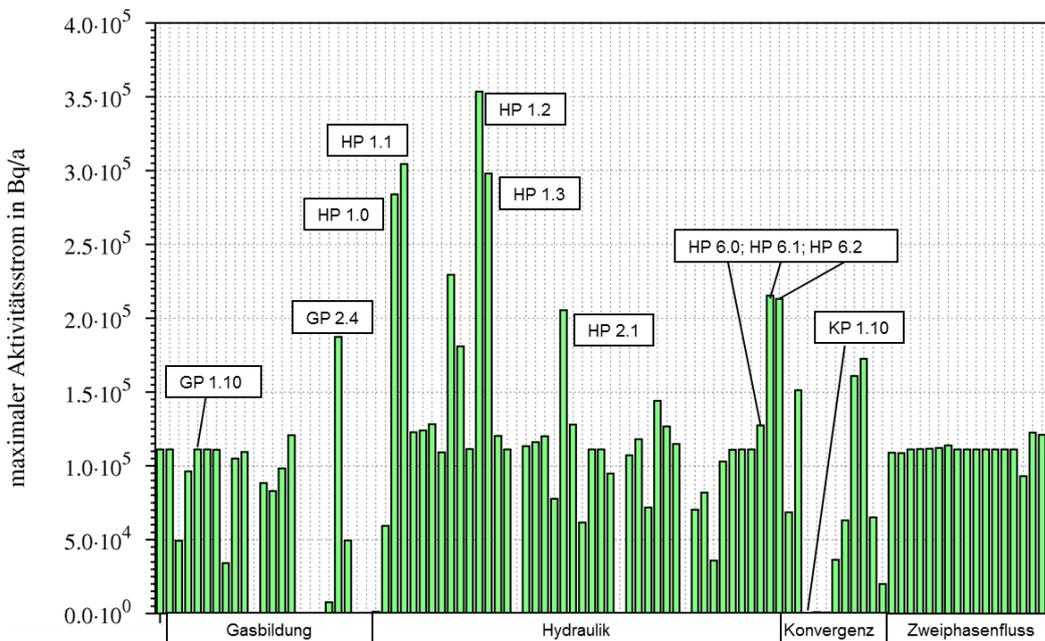
Im Histogramm entspricht der 1. Balken dem Bezugsfall mit einem Wert von ca. 2500 Bq/a; unten angegeben ist die Kategorie, die aussagt welche Art von Parametern geändert wurde.

Für  $^{59}\text{Ni}$  und damit für alle in der Lösung transportierten Radionuklide ergibt sich ein anderes Bild. Während – wie Abb. 3.53 zeigt – die Konvergenz einen großen Einfluss auf den Austrag hat, was die Variabilität in der Kategorie „Konvergenz“ stark beein-

flusst, werden die höchsten Radionuklidausträge in den Rechenfällen erreicht, in denen verschiedene hydraulische Parameter variiert werden.

Neben den Änderungen der Permeabilität aller Abdichtungen (HP 1.0 – HP 1.3), die bereits in diesem Kapitel untersucht wurden, hat der Ausfall einzelner Abdichtungen (HP 6.0 – HP 6.2), ein erhöhter Diffusionskoeffizient (HP 2.1) sowie die Annahme einer anderen Gasbildungsfunktion mit geringerem Gasbildungsinventar (GP 2.4, nach /BEC 09/, vgl. /FRI 16/) einen deutlichen Einfluss auf den  $^{59}\text{Ni}$ -Austrag.

Im Rechenfall GP 2.4 führt die Annahme einer anderen Gasbildungsfunktion mit geringerem Gasbildungsinventar (Beschreibung siehe /FRI 16/) dazu, dass die repräsentative Abdichtung zum West-/Südfeld aufgrund des geringeren Gasgedrucks früh ausfällt (vgl. Abb. 3.40). Dies führt wiederum zu erhöhtem Austrag von  $^{59}\text{Ni}$ . Interessant dabei ist, dass in diesem Fall deutlich mehr  $^{59}\text{Ni}$  ausströmt, als wenn die Abdichtung von Beginn an nicht funktionsfähig ist (siehe Abb. 3.53, Rechenfall HP 6.0; nicht funktionsfähig bedeutet eine Permeabilität von  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ ). Ebenso hat die Annahme, dass eine der beiden Abdichtungen zum Ostfeld von Beginn an nicht funktionsfähig ist (HP 6.1, HP 6.2) zur Folge, dass mehr Radionuklide ausströmen als im Fall der Annahme einer initial nicht funktionsfähigen Abdichtung zum West-/Südfeld.



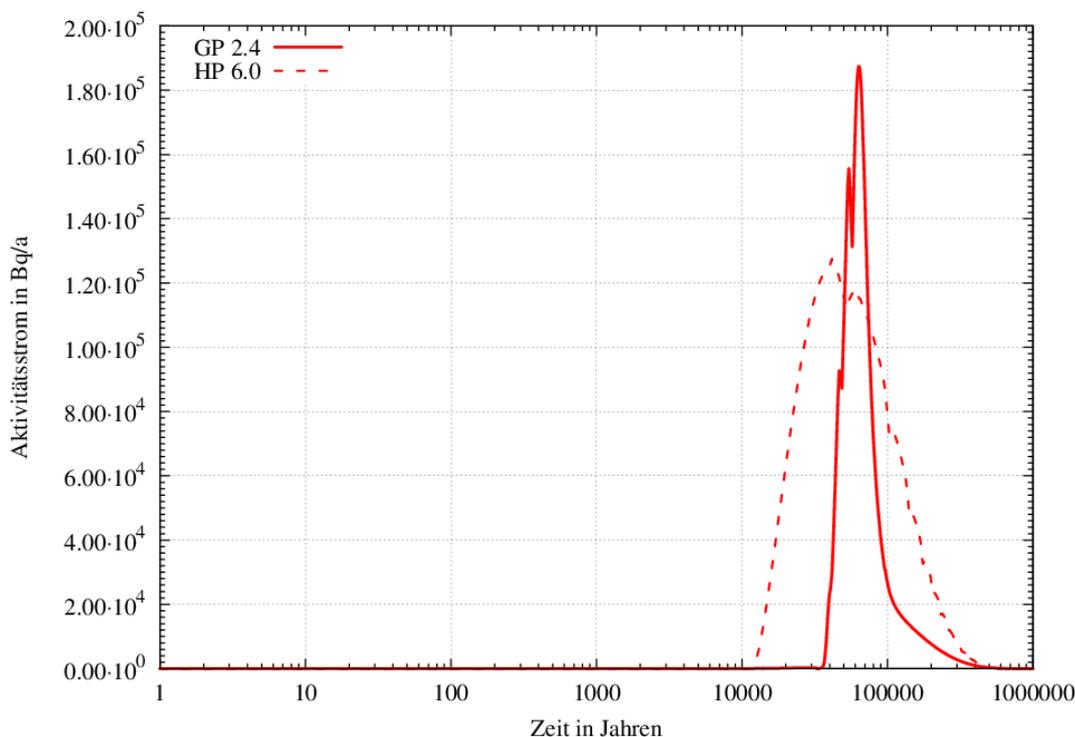
**Abb. 3.53** Maximaler  $^{59}\text{Ni}$ -Austrag für alle Rechenfälle (Basismodell, „mit relevantem Lösungszutritt“)

Im Histogramm entspricht der 1. Balken dem Bezugsfall mit einem Wert von  $1,1 \cdot 10^5 \text{ Bq/a}$ ; unten angegeben ist die Kategorie, die aussagt welche Art von Parametern geändert wurde.

In Rechenfall GP 2.4 führt der (im Vergleich zum Bezugsfall mit 34.000 a) etwa 2.000 a früher stattfindende Ausfall der repräsentativen Abdichtung zum ELB West-/Südfeld dazu, dass die Radionuklide – wie im Bezugsfall – aus dem Südfeld über den Mischungsbereich aus dem Endlager transportiert werden. Durch den zunächst niedrigeren Gasdruck ist die Gebirgskonvergenz weiter fortgeschritten als im Bezugsfall, so dass weniger Lösung in das Südfeld zufließen kann. Der Austrag der Radionuklide aus dem Südfeld durch die weitere Gebirgskonvergenz erfolgt daher in höherer Konzentration und erzeugt dementsprechend einen höheren maximalen Aktivitätsstrom als der Bezugsfall. Der initiale Ausfall der Abdichtung (Rechenfall HP 6.0) hat dagegen einen sofortigen Einstrom zur Folge. Da zu Beginn der Simulation noch kein hoher Gasdruck im Südfeld herrscht, kann die zugetretene Lösung im Südfeld hoch aufsteigen. Insgesamt gelangt in diesem Rechenfall (HP 6.0) deutlich mehr Lösung in das Südfeld, so dass die Konzentration der Radionuklide im Vergleich gering ist. Obwohl somit früh im Simulationszeitraum Radionuklide entweichen und durch die längere Auspressphase aufgrund der Steighöhe im Südfeld auch länger ausströmen können, bleibt der maximale Aktivitätsstrom gering im Vergleich zu Rechenfall GP 2.4. Wenn man die beiden Rechenfälle direkt miteinander vergleicht (siehe Abb. 3.54) ist der Unterschied im Ausstromverhalten von  $^{59}\text{Ni}$  gut zu sehen. Für den Rechenfall HP 6.0 gibt es einen breiten und vergleichsweise niedrigen Kurvenverlauf, während dieser für den Rechenfall GP 2.4 schmal und hoch ist. An diesen beiden Rechenfällen zeigt sich erneut, dass der Gasdruck zu frühen Zeitpunkten von der Gasbildung bestimmt wird und deshalb vor allem Auswirkungen auf die frühe Entwicklung des Endlagersystems hat (etwa die Korrosion der repräsentativen Abdichtung zum West-/Südfeld). Zu späten Zeitpunkten wird der Gasdruck von der Gebirgskonvergenz gesteuert, welche dann maßgeblich das Strömungsverhalten aus dem Südfeld bzw. aus dem Endlager steuert.

Der initiale Ausfall einer der beiden Ostabdichtungen (Rechenfälle HP 6.1 und HP 6.2) hat einen großen Einfluss auf den  $^{59}\text{Ni}$ -Austrag, da sowohl Inventar aus dem Ostfeld als auch aus dem Südfeld ausgetragen wird: Die Abdichtung zum Südfeld korrodiert auch im Falle einer nicht funktionsfähigen Ostabdichtung, so dass  $^{59}\text{Ni}$  aus dem Südfeld und damit aus dem Endlager ausströmen kann. Da sich aufgrund der nicht funktionsfähigen Abdichtung zum Ostfeld bereits gelöste Radionuklide im Mischungsbereich Bartensleben befinden, ist der resultierende Austrag besonders hoch. Umgekehrt ist dies im Rechenfall HP 6.0 nicht der Fall: Im Falle einer nicht funktionsfähigen repräsentativen Abdichtung zum West-/Südfeld findet eine vollständige Korrosion einer der Ab-

dichtungen zum Ostfeld nicht statt, so dass in diesem Fall nur das Inventar des Südfelds ausströmen kann.



**Abb. 3.54**  $^{59}\text{Ni}$ -Ausstrom aus dem ERAM für die Rechenfälle GP 2.4 und HP 6.0

Insgesamt lassen sich für das Basismodell aus den Ergebnissen der Variationsrechnungen für die Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“ folgende Aussagen treffen:

- Die Druckentwicklung wird im Berechnungszeitraum insgesamt von der Gebirgskonvergenz dominiert und nicht von der Gasbildung.
- Die Gasbildung spielt allerdings im System zu frühen Zeiten (ca. < 50.000 a) zunächst eine große Rolle, da sie unter anderem die Korrosion der Abdichtungen (und speziell der repräsentativen Abdichtung zum West-Südfeld) beeinflusst.
- Der maximale Ausstrom (Peak) von  $^{14}\text{C}$  erfolgt im Wesentlichen unabhängig vom Zustand der repräsentativen Abdichtung zum ELB West-/Südfeld bzw. ist unabhängig von den abgedichteten Bereichen.
- Der Ausstrom (Maximum und zeitliche Entwicklung) der gelösten Radionuklide ist dagegen stark abhängig vom Zusammenwirken folgender Eigenschaften und Prozesse:

- der initialen Durchlässigkeit der repräsentativen Abdichtung zum West-/Südfeld,
- dem Zeitpunkt der vollständigen Korrosion der repräsentativen Abdichtung zum ELB West-/Südfeld,
- der Gasdruckentwicklung im West-/Südfeld.
- Das Ostfeld spielt weder für die Systementwicklung noch für den Radionuklidaustrag eine entscheidende Rolle. Die Ausnahme bilden Rechenfälle, in denen die Abdichtungen zum Ostfeld als durchlässig angenommen oder ein Bypass postuliert wird.

## **3.2 Erweitertes Modell**

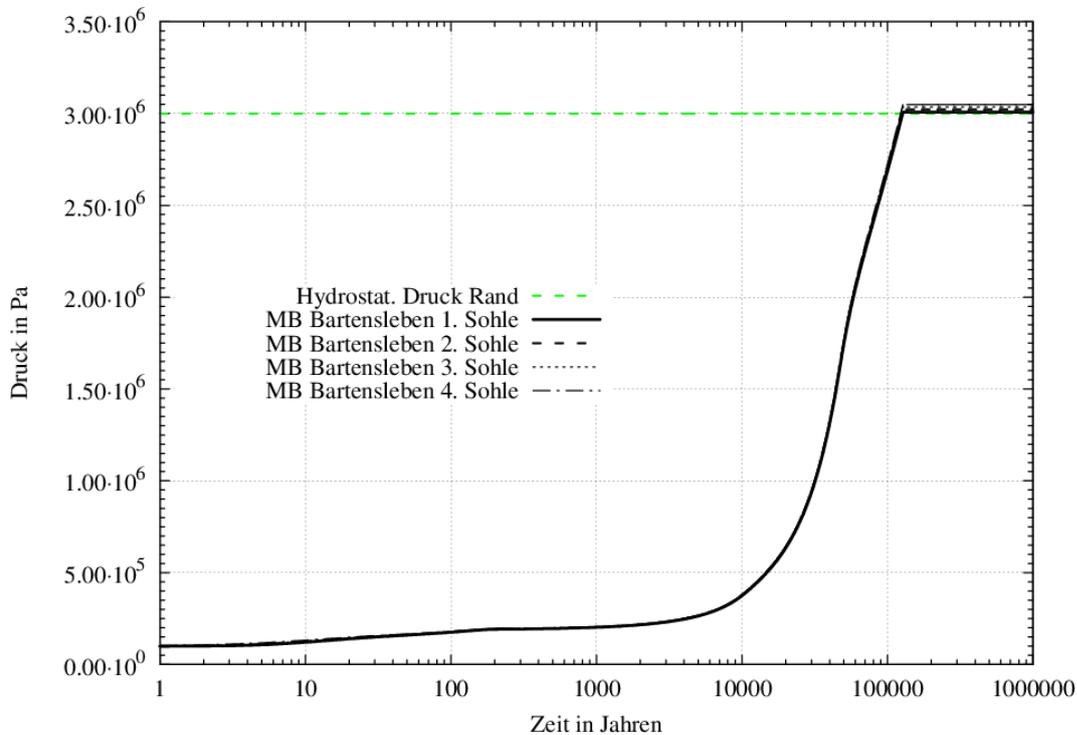
### **3.2.1 Bezugsfall „trockene Grube“**

Die Bezugsfälle des Basismodells und des erweiterten Modells für die Systementwicklung „trockene Grube“ stimmen in allen Parametern überein, einziger Unterschied ist das verwendete Gittermodell (vgl. Kap. 1.3 und die Abb. 1.1 bis Abb. 1.4). Da das erweiterte Modell einzelne Sohlen im Endlager berücksichtigt, sind die Resultate der Simulationen teufenabhängig, was in den folgenden Abbildungen berücksichtigt werden muss. Trotzdem gibt es zwischen dem Bezugsfall für das Basismodell und dem erweiterten Modell in Bezug auf die Simulationsergebnisse sehr oft nur geringe Unterschiede, die in den folgenden Kapiteln erläutert werden. Aus diesem Grund wird auf manche Prozesse an dieser Stelle nicht detailliert eingegangen, da sie bereits in den vorausgegangenen Kapiteln untersucht wurden.

In Abb. 3.55 ist die Druckentwicklung im Mischungsbereich Bartensleben für die Teufen der einzelnen Sohlen (1. bis 4. Sohle) dargestellt. Nach 127.000 a ist der Druck auf der 1. Sohle auf 3 MPa angestiegen, so dass Gas über den Modellrand entweichen kann. Dies ist in Abb. 3.56 dargestellt. Der zeitliche Verlauf des Gasausstroms sowie die maximale Rate von ca. 14 m<sup>3</sup>/a stimmen nahezu exakt mit denen des Basismodells (vgl. Abb. 3.2) überein.

Auch die Druckentwicklung im Endlagersystem verläuft ähnlich wie im Basismodell (siehe Abb. 3.57; vgl. Abb. 3.3). Nach wenigen Jahren (ca. 200 a) gleichen sich die Drücke in den nicht abgedichteten Bereichen an und steigen nach 127.000 a bis auf 3

MPa. Das Südfeld und das Ostfeld zeigen einen davon entkoppelten, schneller ansteigenden Druckverlauf. Auch diese Druckentwicklung stimmt nahezu exakt mit der des Basismodells überein. Insgesamt gibt es nur geringe Druckunterschiede in den unterschiedlichen Teufenbereichen, da das Grubengebäude praktisch gasgesättigt ist.

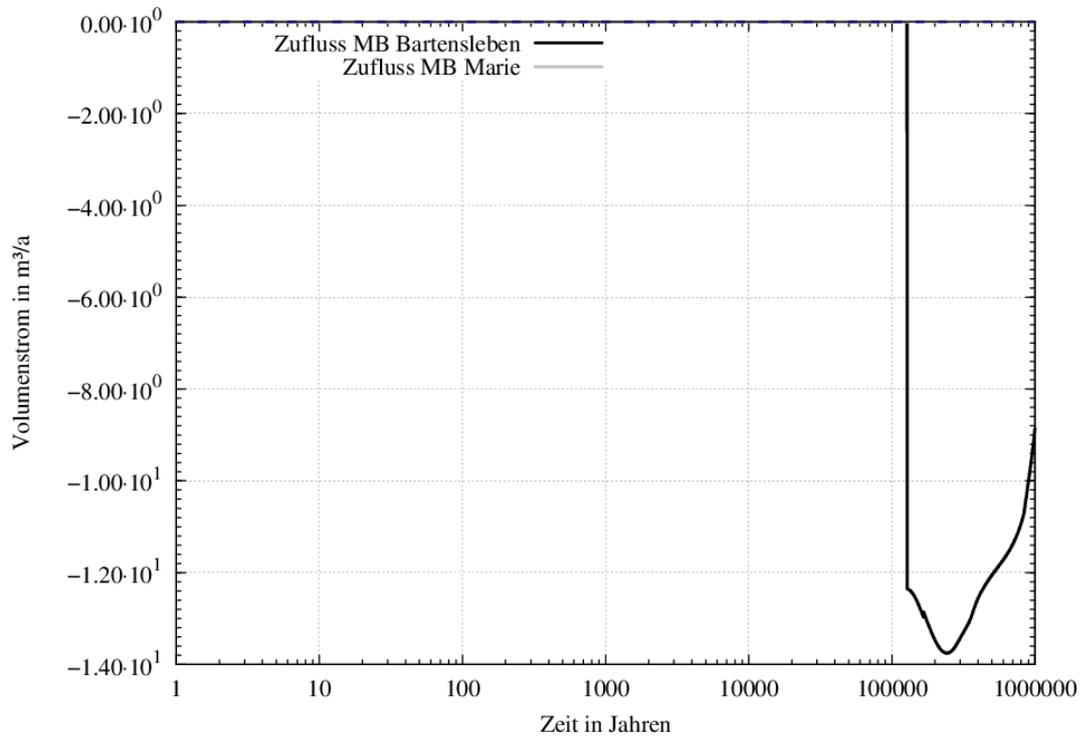


**Abb. 3.55** Druckentwicklung im Mischungsbereich Bartensleben

Schwarze Kurven (auch gestrichelt/gedoppelt): Druck im Mischungsbereich Bartensleben auf den jeweiligen Sohlen. Messpunkte liegen auf der Höhe der Abdichtungen zum Südfeld (vgl. Abb. 1.4). Grün gestrichelte Kurve: Hydrostatischer Druck am Modellrand Bartensleben.

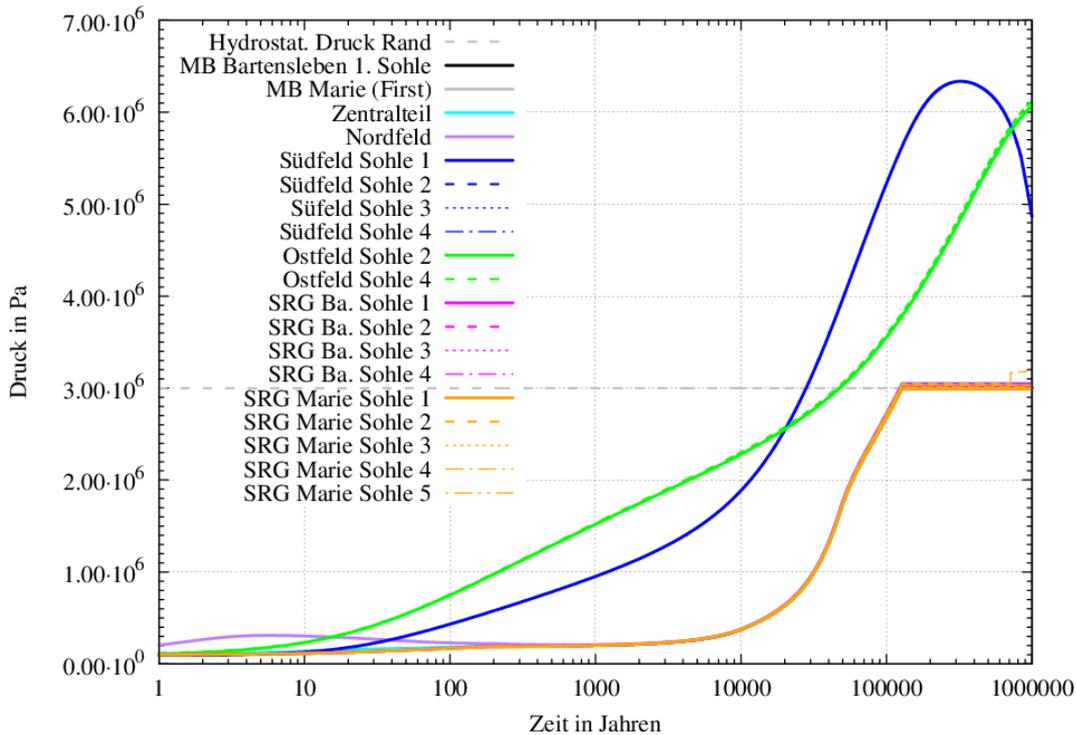
Nur gegen Ende des Berechnungszeitraums erkennt man einen leichten Druckanstieg in der SRG Marie Sohle 5 von 3 MPa auf etwa 3,4 MPa aufgrund der fortschreitenden Konvergenz, die zu einem sehr kleinen Porenraum führt. Da für jedes Material eine sehr geringe initiale Flüssigkeitssättigung von 0,1 % vorgegeben wird, vergrößert sich diese relativ gesehen bei einer Verringerung des Porenraums. Da die residuale Flüssigkeitssättigung ebenfalls 0,1 % beträgt, wird die Flüssigkeit bei einer Verringerung der Porosität mobil, so dass die Flüssigkeit in die Tiefe strömen kann. Da nur sehr kleine Flüssigkeitsmengen bewegt werden ist die Sättigung der unteren Teufenbereiche erst nach langer Zeit merklich erhöht. Nach ca. 700.000 a hat die Flüssigkeitssättigung im untersten Gitterelement der SRG Marie ca. 0.979 erreicht, die Gitterelemente darüber haben eine Sättigung von ca. 0.25. Bei fortschreitender Konvergenz erhöht sich

deshalb der Gasdruck deutlich: Zum einen ist die Flüssigkeit im Modell inkompressibel, so dass die Konvergenz zur Gaskomprimierung führt, zum anderen kann das Gas aufgrund der niedrigen relativen Permeabilität durch die erhöhte Flüssigkeitssättigung nicht entweichen.



**Abb. 3.56** Gasstrom in das bzw. aus dem ERAM

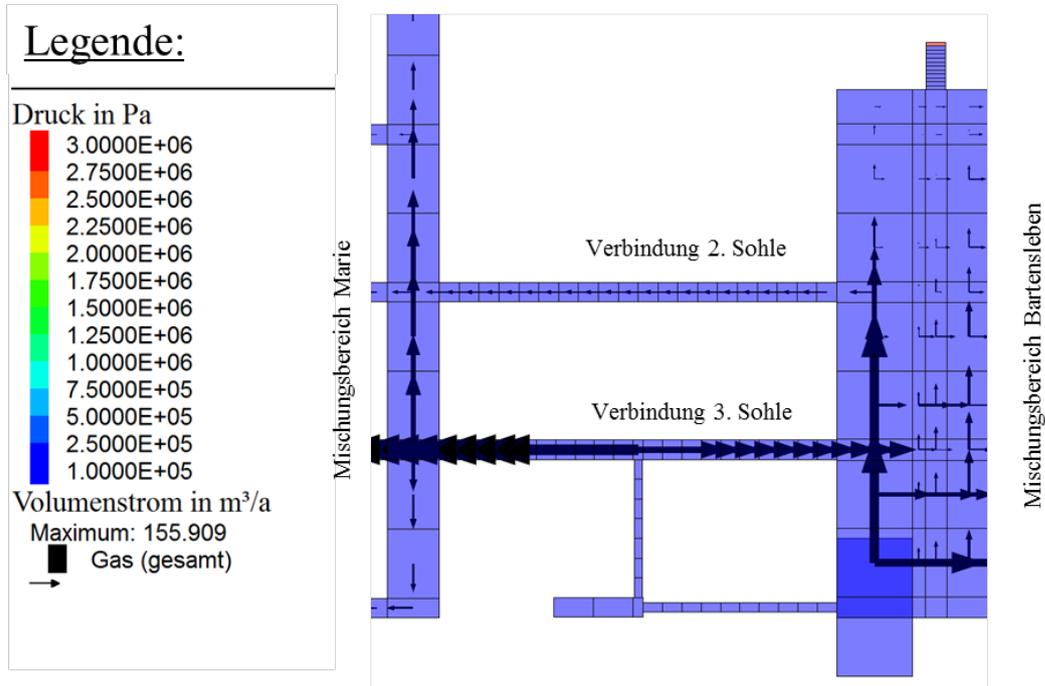
positiv: Gasstrom in die Grube; negativ: Gasstrom aus der Grube



**Abb. 3.57** Druckentwicklung im ERAM für unterschiedliche Modellbereiche

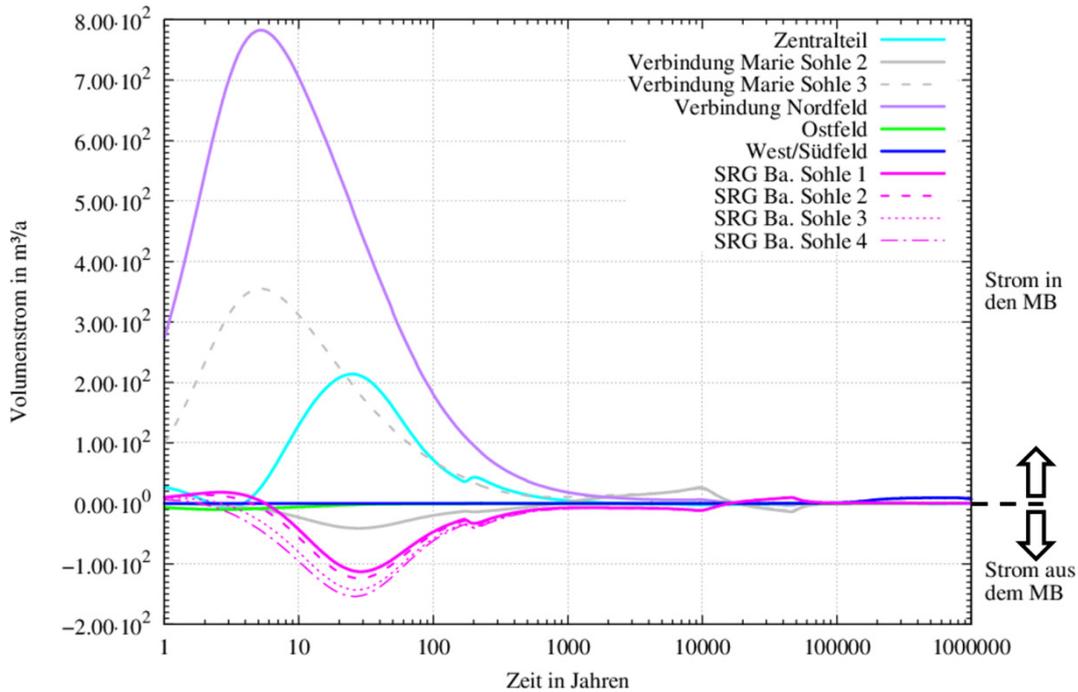
In Abb. 3.59 ist der Gasstrom aus den Teilbereichen des ERAM in den Mischungsbe-  
reich Bartensleben dargestellt. Die maximalen Strömungsraten zeigen deutliche Unter-  
schiede zu denen des Basismodells (vgl. Abb. 3.4). Für das erweiterte Modell liegen  
die Strömungsraten für die einzelnen Kompartimente (z. B. sonstige Restgrube Bar-  
tensleben) in der Summe über die einzelnen Sohlen höher. Dies betrifft sowohl den  
Gasstrom in den Mischungsbereich hinein als auch heraus. Da sowohl die Parametrie-  
rung von Gasbildung und Konvergenz als auch die Parametrierung (Strömungswider-  
stand, Volumen) des Modellgitters dieselben sind wie im Basismodell, müssen die neu  
geschaffenen Verbindungen, die letztlich den Gesamtquerschnitt der Verbindungen  
insgesamt erhöhen, der Grund für die Erhöhung der Raten (in der Summe) sein. Das  
im Nordfeld gebildete Gas kann nun einerseits direkt in den Mischungsbereich und an-  
dererseits ebenso vertikal in Richtung der Verbindung der beiden Mischungsbereiche  
strömen (Modellgitter siehe Abb. 1.5). Dazu existiert nun eine weitere Verbindung zwi-  
schen den Mischungsbereichen. In den beiden Verbindungen zwischen den Mi-  
schungsbereichen strömt das Gas zunächst in unterschiedliche Richtungen (siehe  
Abb. 3.58). Auf der dritten Sohle aus dem Mischungsbereich Marie (und mit dem Gas  
aus dem Nordfeld) in Richtung Mischungsbereich Bartensleben, auf der zweiten Sohle  
in die umgekehrte Richtung. Für die Verbindung zum ELB Zentralteil hat sich in Bezug

auf den Gasstrom wenig geändert, dort verläuft der Gasstrom ähnlich wie im Basismodell.



**Abb. 3.58** Druck und Gasstrom zwischen den Mischungsbereichen zum Zeitpunkt 100 a

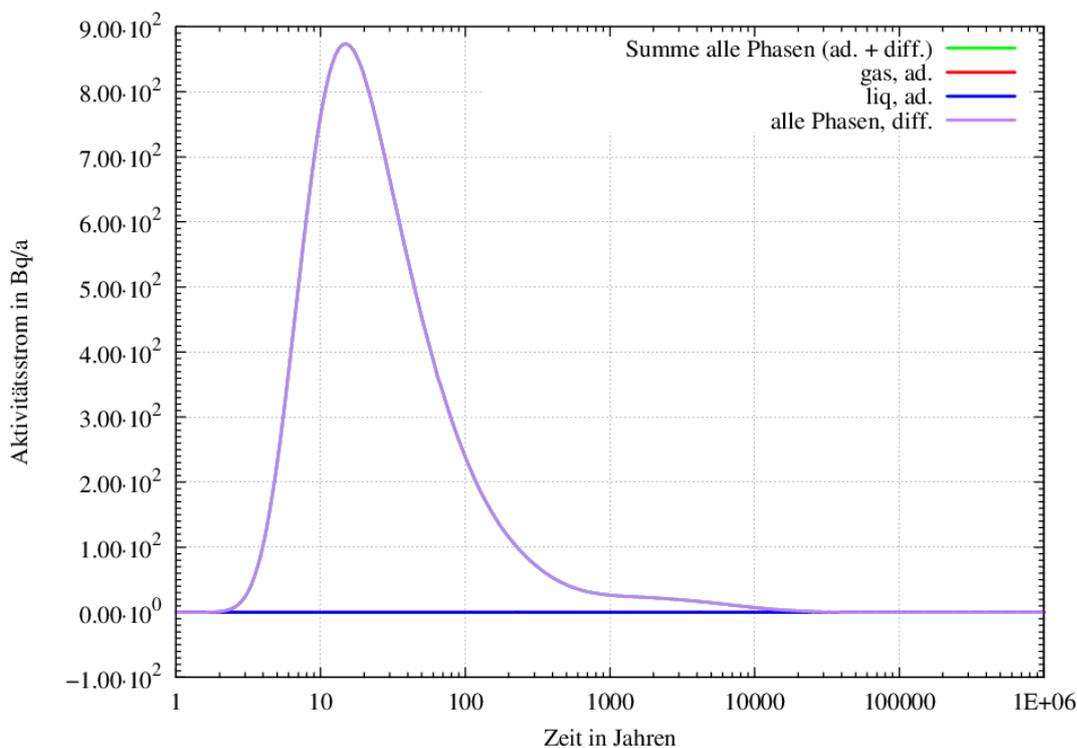
Schwarze Pfeile kennzeichnen Strömungsrichtung. Aus Skalierbarkeitsgründen ist der Gasstrom direkt aus dem Nordfeld nicht aufgetragen



**Abb. 3.59** Gasstrom in und aus dem MB Bartensleben

Positiv: Gasstrom in den MB Bartensleben; negativ: Gasstrom aus dem MB Bartensleben.

Insgesamt zeigen die Strömungskurven jedoch die gleiche Charakteristik wie im Basismodell: Nach etwa 15.000 a erfolgt eine Umkehr der Strömungsrichtung. Das Gas strömt nicht länger in die SRG Bartensleben hinein, sondern aus ihr hinaus. Umgekehrt strömt nun Gas in Richtung Mischungsbereich Marie.

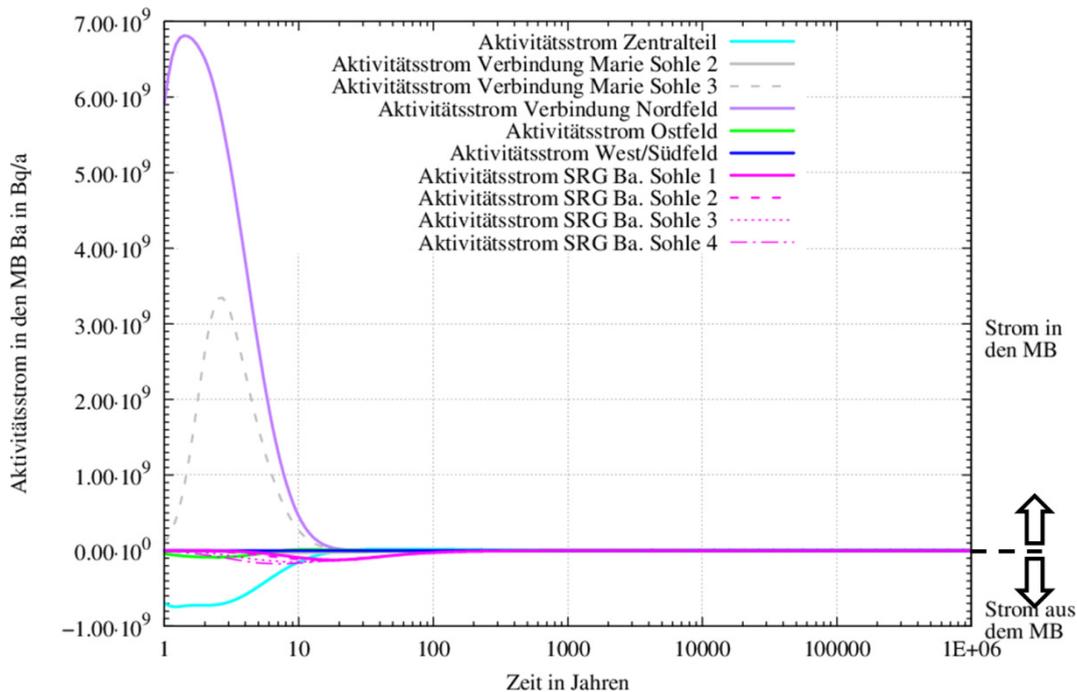


**Abb. 3.60**  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom aus dem ERAM

grün: Ausstrom als Summe aller Phasen (advektiv und diffusiv); rot: Ausstrom mittels der Gasphase (advektiv), blau: Ausstrom mittels der flüssigen Phasen (advektiv); violett: Ausstrom mittels beider Phasen (diffusiv). Grüne und rote Kurve liegen „hinter“ der blauen Kurve und sind nicht sichtbar.

Im Unterschied zum Basismodell liegt der diffusive Ausstrom von  $^{14}\text{C}$  aus dem Endlager im erweiterten Modell mit einer maximalen Rate von 900 Bq/a im erweiterten Modell geringfügig höher (siehe Abb. 3.60 und vgl. Abb. 3.5). Die Ursache liegt im Aktivitätsstrom in den Mischungsbereich Bartensleben der im erweiterten Modell zu frühen Zeitpunkten höher als im Basismodell ist (siehe Abb. 3.61 und vgl. Abb. 3.6). Der direkte Beitrag aus dem Nordfeld liegt dabei in einer ähnlichen Höhe (max.  $6 \cdot 10^9$  Bq/a). Interessant ist der Anteil aus den Verbindungsstrecken zum Mischungsbereich Marie, der im Maximum ca.  $3 \cdot 10^9$  Bq/a beträgt. Im Mischungsbereich Marie und in der sonstigen Restgrube Marie sind initial jedoch keine Radionuklide vorhanden. Deshalb muss die-

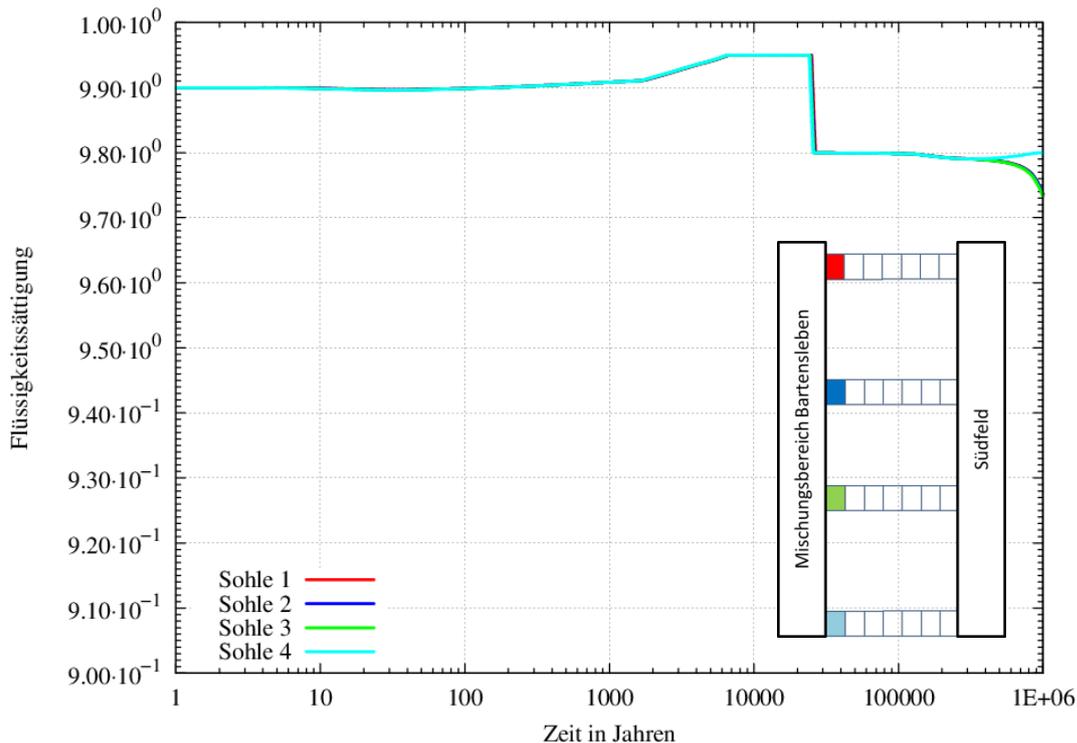
ser Beitrag ebenfalls aus dem Nordfeld kommen, welches im Modell auf der 3. Sohle vertikal mit der Verbindungsstrecke zum Mischungsbereich Marie verbunden ist. Der große  $^{14}\text{C}$ -Strom in den Mischungsbereich Bartensleben führt zu einer starken Erhöhung der Konzentration (siehe Abb. 3.63). Dadurch, dass die Konzentration im Verbindungselement zwischen Mischungsbereich und Zentralteil Null beträgt, ist der Konzentrationsgradient zum Mischungsbereich sehr groß und es entsteht – entgegen der advektiven Gasströmung – ein diffusiver Transport von  $^{14}\text{C}$  in Richtung des Zentralteils.



**Abb. 3.61** Aktivitätsstrom von  $^{14}\text{C}$  in den Mischungsbereich Bartensleben

Positiv:  $^{14}\text{C}$ -Strom in den MB Bartensleben hinein; negativ:  $^{14}\text{C}$ -Strom aus dem MB Bartensleben heraus.

Aus dem Südfeld strömt  $^{14}\text{C}$  nur in sehr geringem Maße in den Mischungsbereich. Der ansteigende Druck verursacht zwar eine Ent sättigung der Abdichtungen auf allen Sohlen, die Flüssigkeitssättigung sinkt jedoch für alle Abdichtungen erst nach mehr als 100.000 a auf weniger als 98 % (siehe Abb. 3.62). Aufgrund der Halbwertszeit von  $^{14}\text{C}$  (5.730 a) kann deshalb das ausströmende Gas zu diesem Zeitpunkt keinen relevanten Anteil von  $^{14}\text{C}$  mehr in den Mischungsbereich transportieren.

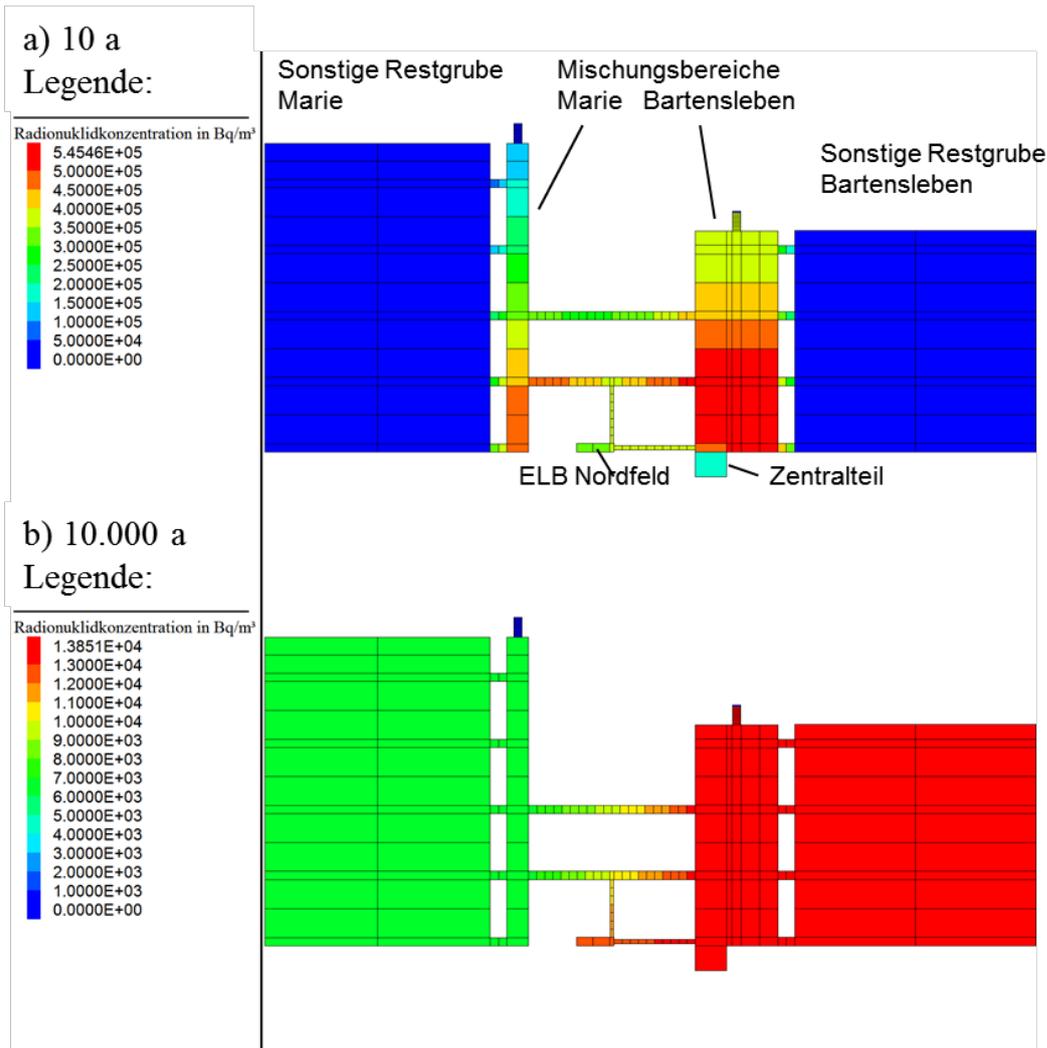


**Abb. 3.62** Flüssigkeitssättigung der repräsentativen Abdichtung zum West-/Südfeld

Skizze zeigt Position der Gitterelemente in Relation zum Südfeld und Mischungsbereich.

Aus dem  $^{14}\text{C}$ -Strom innerhalb des Endlagersystems resultiert eine Verteilung der Aktivität im Endlager. Aufgrund der höheren Diskretisierung wird die  $^{14}\text{C}$ -Konzentration in den einzelnen Teilbereichen im Vergleich zum Basismodell (vgl. Abb. 3.10) nun im Gittermodell veranschaulicht. In Abb. 3.63a) ist zu erkennen, dass nach 10 Jahren die Radionuklidkonzentration im Mischungsbereich Bartensleben am höchsten ist. Im Gegensatz zum Basismodell (vgl. Abb. 3.9) gilt das auch für die Gesamtaktivität. Auch diese zeigt nach 10 Jahren im Mischungsbereich Bartensleben mit  $3,35934 \cdot 10^{10}$  Bq den höchsten Wert. Zu Simulationsbeginn liegt nahezu das gesamte in den nicht abgedichteten Bereichen vorhandene  $^{14}\text{C}$ -Inventar im Nordfeld vor. Deshalb zeigt die  $^{14}\text{C}$ -Aktivität und  $^{14}\text{C}$ -Konzentration, dass bereits nach 10 Jahren das als instantan mobil postulierte  $^{14}\text{C}$  zu einem großen Teil aus dem Nordfeld heraus transportiert wurde. Dabei zeigt Abb. 3.63 a), dass im ELB Zentralteil sogar kurzzeitig mehr  $^{14}\text{C}$  als initial ( $1,6 \cdot 10^9$  Bq) vorhanden ist. Der Zutritt von  $^{14}\text{C}$  in den Zentralteil erfolgt aufgrund des sehr großen Konzentrationsunterschiedes zwischen dem Verbindungselement des Zentralteils, dem ELB Zentralteil selbst und dem Mischungsbereich Bartensleben vorwiegend diffusiv. Diese Prozesse und deren Auswirkungen spielen jedoch nur eine Rolle, so lange die Unterschiede in den Radionuklidkonzentrationen hoch sind. Dies ist eine sehr kurze Zeitspanne, für den ELB Zentralteil z. B. maximal 20 a.

Nach 10.000 a ist die  $^{14}\text{C}$ -Konzentration im Grubenteil Bartensleben ausgeglichen (siehe Abb. 3.63 b)). Sowohl in der sonstigen Restgrube, im Mischungsbereich und auch in den ELB Zentralteil und Nordfeld ist eine identische Konzentration erkennbar. In der Grube Marie ist die Konzentration geringer als in der Grube Bartensleben, aber innerhalb der Grube Marie ist sie ebenfalls identisch. Ein weiterer Konzentrationsausgleich zwischen beiden Gruben findet über die beiden Verbindungen auf der 2. und 3. Sohle statt.



**Abb. 3.63**  $^{14}\text{C}$ -Konzentration in den nicht abgedichteten Bereichen zum Zeitpunkt a) 10 a und b) 10.000 a

a) Zum Zeitpunkt 10 a beträgt die  $^{14}\text{C}$ -Aktivität in den einzelnen Bereichen wie folgt: MB Ba:  $3,35934 \cdot 10^{10}$  Bq; MB Ma:  $1,2366 \cdot 10^{10}$  Bq; SR BA:  $2,92646 \cdot 10^9$  Bq; SR MA:  $1,7825e \cdot 10^9$  Bq; Zentralteil:  $5,53774 \cdot 10^9$  Bq; Nordfeld:  $2,455 \cdot 10^9$  Bq.

b) Zum Zeitpunkt 10.000 a beträgt die  $^{14}\text{C}$ -Aktivität in den einzelnen Bereichen wie folgt: MB Ba:  $7,01635 \cdot 10^8$  Bq; MB Ma:  $2,26412 \cdot 10^8$  Bq; SR BA:  $1,23596 \cdot 10^{10}$  Bq; SR MA:  $4,22603 \cdot 10^9$  Bq; Zentralteil:  $2,80753 \cdot 10^8$  Bq; Nordfeld:  $1,52569 \cdot 10^7$  Bq.

Identische Konzentrationen im Mischungsbereich und der sonstigen Restgrube Bartensleben bedeuten aber auch, dass die Gesamtaktivität im Mischungsbereich deutlich gesunken sein muss. Die Gesamtaktivität im Mischungsbereich Bartensleben beträgt zum Zeitpunkt 10.000 a knapp  $7 \cdot 10^8$  Bq, während sie in der Restgrube Bartensleben rund  $1,2 \cdot 10^{10}$  Bq beträgt, also um fast 2 Größenordnungen höher ist. Im restlichen Berechnungszeitraum gleicht sich die Konzentration im gesamten ERAM weiter an, ist jedoch zu keinem Zeitpunkt im gesamten Endlager identisch. Eine Anreicherung findet in keinem Bereich des Endlagers statt. Die höchste Aktivität ist also auch im erweiterten Modell während nahezu (ab 10.000 a) des gesamten Berechnungszeitraums nicht im Mischungsbereich Bartensleben zu finden. Dies besitzt jedoch kaum Relevanz, da der zum Ausstrom von Fluiden aus dem ERAM erforderliche Druck von 3 MPa erst nach 127.000 a erreicht wird. Bereits nach 100.000 a beträgt die Konzentration von  $^{14}\text{C}$  im gesamten Endlager weniger als  $1\text{Bq/m}^3$ .

Zusammenfassend lassen sich für das erweiterte Modell zum Bezugsfall „trockene Grube“ folgende Aussagen treffen:

- Im Vergleich zu den Ergebnissen der Berechnungen zum Basismodell erweisen sich dieselben Prozesse und Effekte auch für das erweiterte Modell als relevant. Die wichtigsten werden hier noch einmal wiederholt:
  - Die Bedeutung des Nordfelds hinsichtlich des  $^{14}\text{C}$ -Transports in den Mischungsbereich Bartensleben hat sich erhöht.
  - Der Mischungsbereich Bartensleben fungiert als Verteiler von Gasen und gasförmigen Radionukliden im Endlager.
  - Die abgedichteten Einlagerungsbereiche sind von den Prozessen in der nicht abgedichteten Grube nahezu völlig entkoppelt: Der Druck entwickelt sich unabhängig voneinander und Transportprozesse zwischen den abgedichteten und nicht abgedichteten Bereichen finden – wenn überhaupt – nur in geringem Maße statt.
  - Zum Zeitpunkt des Beginns des advektiven Gasaustrags (127.000 a) ist  $^{14}\text{C}$  nur noch in geringfügiger Menge vorhanden (Halbwertszeit: 5.730 a), so dass kein  $^{14}\text{C}$  aus dem Endlager tritt.
  - Innerhalb der abgedichteten Bereiche kommt es nach wenigen 1.000 Jahren zum Ausgleich der  $^{14}\text{C}$ -Konzentration.

- Insgesamt gibt es für den Bezugsfall keine wesentlichen Differenzen zum Basismodell, im Detail (z. B. Gasströmung und  $^{14}\text{C}$ -Transport aus dem Nordfeld) treten jedoch Unterschiede auf.

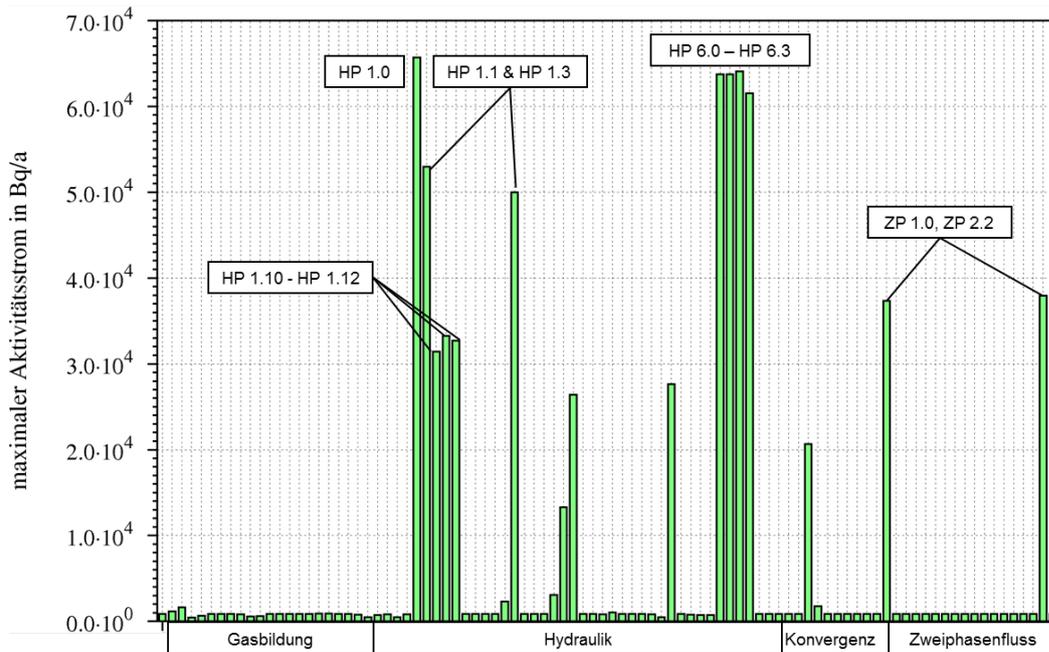
### 3.2.1.1 Prozesse im Endlagersystem

Wie im Bezugsfall sind auch die Ergebnisse einiger Variationsrechnungen denen des Basismodells sehr ähnlich. Im Folgenden wird deshalb besonders auf die Variationsrechnungen eingegangen, deren Ergebnisse einen Unterschied zu denen des Basismodells aufweisen. Die folgenden Rechenfälle werden deshalb näher betrachtet, Details zu den Parametervariationen sind in /FRI 16/ dargelegt:

- Ausfall der Abdichtungen auf den einzelnen Sohlen. Ausfall bedeutet, dass die Permeabilität einer Abdichtung auf  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  gesetzt wird. Das sind die Rechenfälle HP 6.0 – HP 6.5 mit jeweils dem Ausfall folgender Abdichtung: Südfeld (1. Sohle), Südfeld (2. Sohle), Südfeld (3. Sohle), Südfeld (4. Sohle), Ostfeld (2. Sohle), Ostfeld (4. Sohle).

Einer der bedeutendsten Unterschiede zwischen dem Basis- und dem erweiterten Modell besteht in der Modellierung der Abdichtungen. Während die beiden auch in der Realität geplanten Abdichtungen zum Ostfeld im erweiterten Modell auf den jeweiligen Teufen modelliert werden, ist die repräsentative Abdichtung zum Südfeld auf vier Sohlen aufgeteilt (siehe Abb. 1.4, auch /FRI 16/). Im Fokus steht dabei das potenzielle Ausströmen von Gas über die Abdichtung auf der 1. Sohle, welches möglicherweise zu frühem Radionuklidaustrag gasförmiger Radionuklide (hier  $^{14}\text{C}$ ) aus dem Südfeld führen könnte. Der Ausfall der Abdichtung zum Südfeld auf der 1. Sohle könnte demnach direkte Folgen für den Radionuklidaustrag aus dem gesamten Endlager haben. Ein Vergleich des  $^{14}\text{C}$ -Austrags für alle Rechenfälle ist in Abb. 3.64 dargestellt.

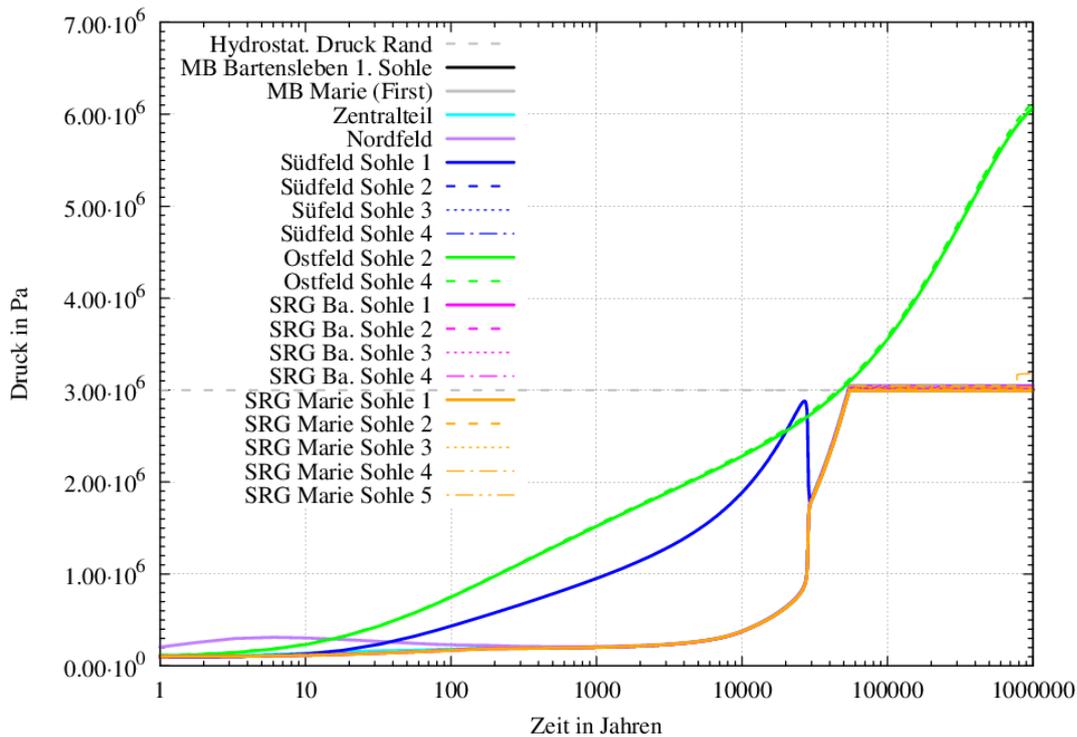
Der Rechenfall HP 6.0 in Abb. 3.64 zeigt, dass ein Ausfall der obersten Abdichtung zum Südfeld tatsächlich einen höheren Radionuklidaustrag (ca. 64.000 Bq/a, Abb. 3.64) im Vergleich zum Bezugsfall (900 Bq/a) zur Folge hat. Allerdings liegt der  $^{14}\text{C}$ -Austrag ebenso hoch (bzw. ähnlich hoch) wie der Austrag beim postulierten Ausfall der Abdichtungen auf der 2. bis 4. Sohle (Rechenfälle HP 6.1 – HP 6.3). Der  $^{14}\text{C}$ -Austrag liegt etwas niedriger als der Austrag im entsprechenden Rechenfall (HP 6.0 mit ca. 74.000 Bq/a) für das Basismodell (vgl. Abb. 3.24).



**Abb. 3.64** Maximaler  $^{14}\text{C}$ -Austrag aller Rechenfälle aus dem ERAM (erweitertes Modell, „trockene Grube“)

Im Histogramm entspricht der 1. Balken dem Bezugsfall mit einem Wert von ca. 900 Bq/a; unten angegeben ist die Kategorie, die aussagt welche Art von Parameter geändert wurde.

Die Prozesse, die zum Ausströmen von  $^{14}\text{C}$  aus dem Südfeld führen, sind die gleichen wie im Basismodell, sogar die Entwicklung des Drucks im Südfeld (siehe Abb. 3.65) stimmt im zeitlichen Verlauf mit dem des Basismodells gut überein. In Kap. 3.1.1.1 sind diese Prozesse für den Rechenfall HP 1.0 beschrieben, in welchem (bis auf das Ostfeld) die gleichen Prozesse ablaufen (vgl. auch Abb. 3.17). Die Gründe für den prägnanten Peak in der Druckentwicklung des Südfelds zum Zeitpunkt 25.000 a sind in diesem Kapitel ebenfalls detailliert dargelegt. Für die hier betrachteten Rechenfälle ist die Frage interessant, weshalb nicht der Rechenfall HP 6.0 (mit dem Ausfall der Abdichtung auf der 1. Sohle), sondern der Rechenfall HP 6.2 (mit dem Ausfall der Abdichtung auf der 3. Sohle) den etwas höheren Austrag von  $^{14}\text{C}$  aufweist.



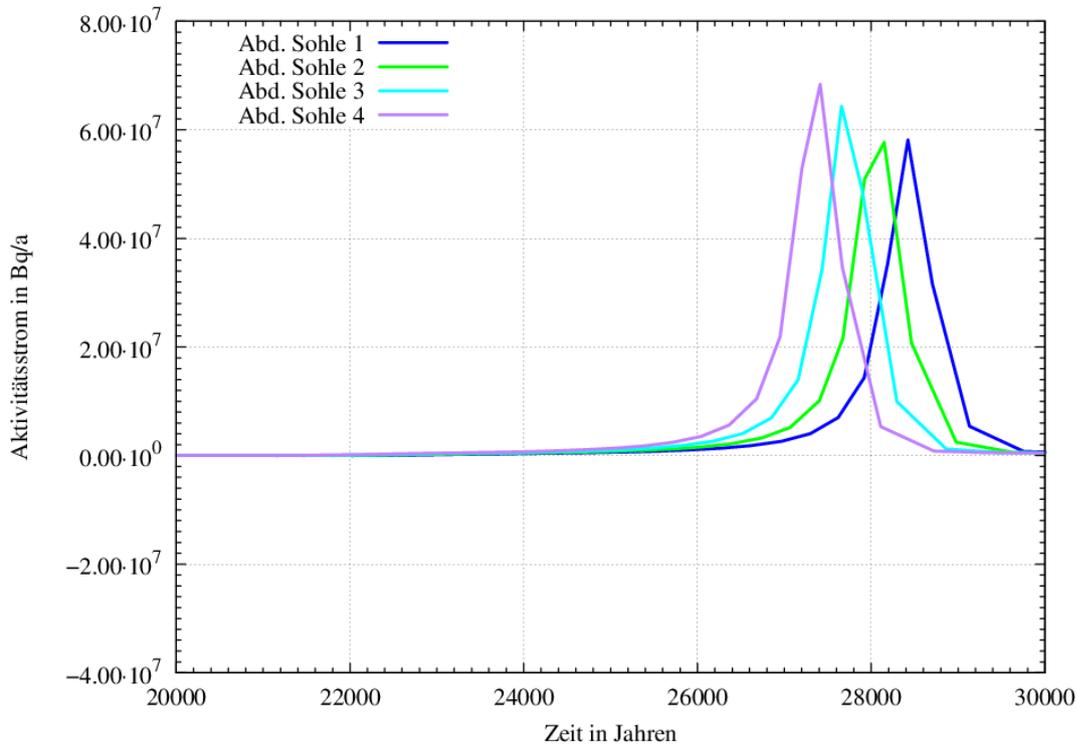
**Abb. 3.65** Druckentwicklung im ERAM für unterschiedliche Modellbereiche

Rechenfall HP 6.0: Permeabilität der Abdichtungen zum Südfeld ist  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ ; sonst wie Bezugsfall

Während der Druckerhöhung und des Auspressvorgangs von Flüssigkeit aus den Abdichtungen wird mit dem Gas bereits  $^{14}\text{C}$  in die Abdichtungen hinein transportiert. Die Aktivität in den unteren Abdichtungen liegt dabei generell etwas höher als in den oberen Abdichtungen. Von diesem Effekt ist die Abdichtung, die initial keine Funktionsfähigkeit hat und deshalb mit einer Permeabilität von  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  belegt ist, weniger stark betroffen. Außerdem wird die Flüssigkeit schneller verdrängt, je tiefer eine Abdichtung liegt. Diese Prozesse machen sich beim Ausstrom des Gases durch die jeweils defekte Abdichtung bemerkbar. In Abb. 3.66 ist der Ausstrom von  $^{14}\text{C}$  durch die defekten Abdichtungen in den Rechenfällen HP 6.0 – HP 6.3 dargestellt. Es ist erkennbar, dass der Ausstrom früher beginnt und höher ist, je tiefer die defekte Abdichtung liegt. Der Aktivitätsausstrom von  $^{14}\text{C}$  aus dem Südfeld in den einzelnen Rechenfällen gibt dabei nicht den Aktivitätsausstrom aus dem ERAM wieder.

Die in allen vier Rechenfällen nur geringe Abweichungen zeigende maximale Höhe des Radionuklidaustrags (siehe Abb. 3.64) aus dem ERAM ist demnach kein direkter Effekt des Ausstroms aus dem Südfeld über die Abdichtungen auf den unterschiedlichen Sohlen. Der Beginn des  $^{14}\text{C}$ -Ausstroms (nach ca. 55.000 a) aus dem ERAM selbst ist

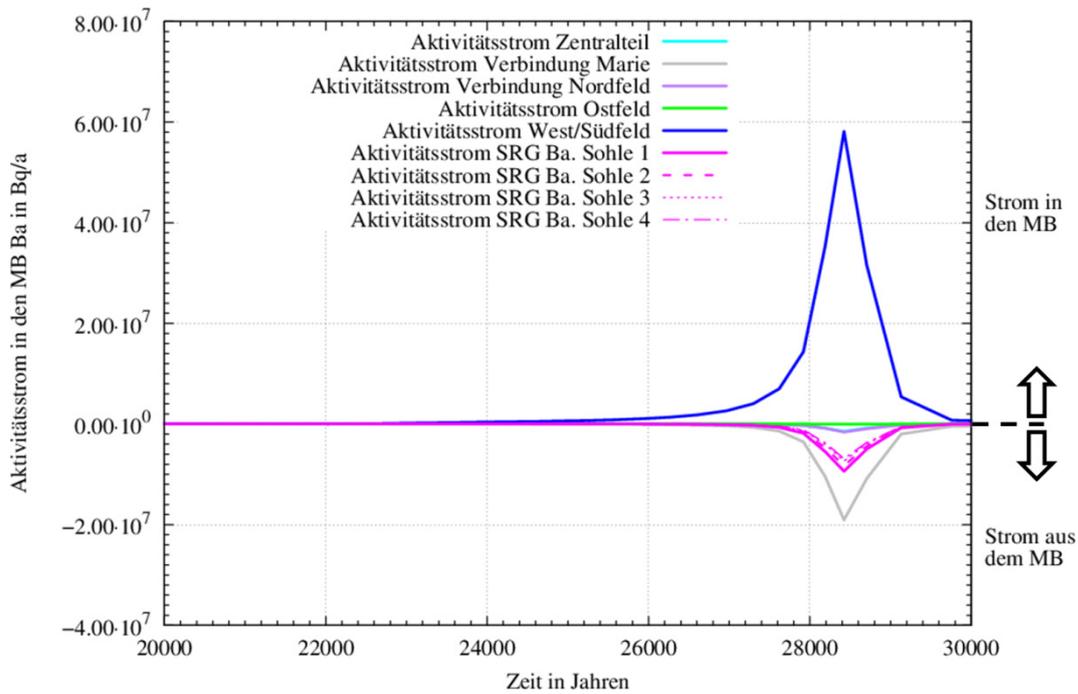
in diesen Rechenfällen (HP 6.0 – HP 6.3) ebenso ähnlich und kann deshalb ebenfalls keine Auswirkungen auf den maximalen Aktivitätsstrom haben.



**Abb. 3.66** Ausstrom von  $^{14}\text{C}$  aus den jeweils ausgefallenen Abdichtungen zum Südfeld

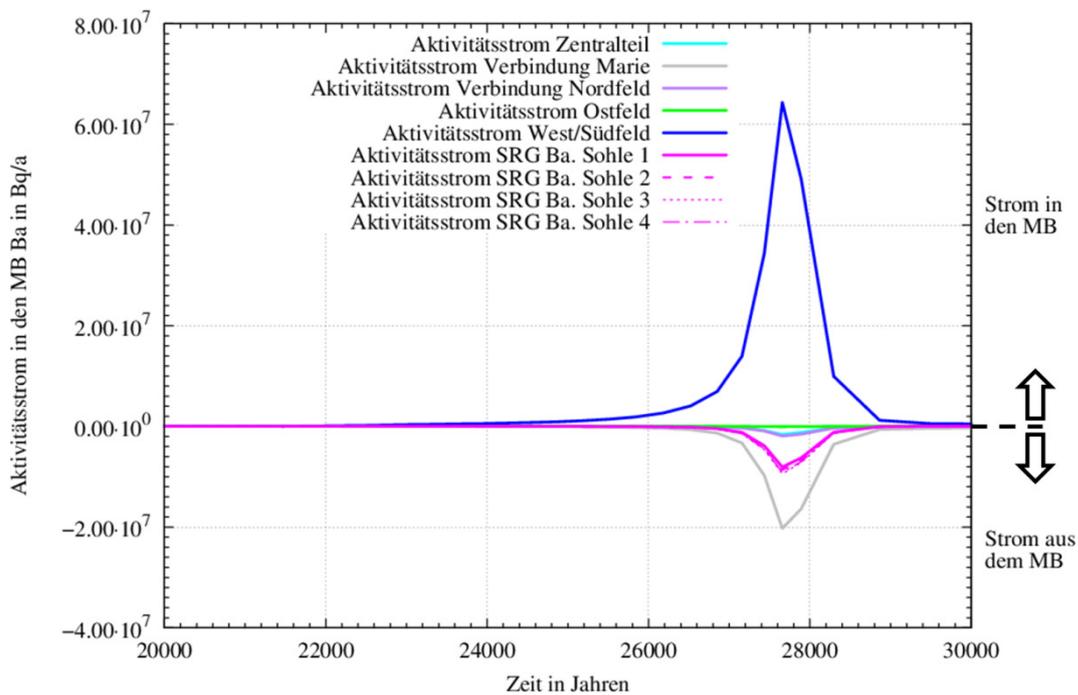
Rechenfälle HP 6.0 bis HP 6.3; jeweils eine Abdichtung ist mit einer Permeabilität von  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  belegt; sonst wie Bezugsfall.

Damit bleibt nur die Möglichkeit, dass sich das  $^{14}\text{C}$  in den einzelnen Rechenfällen nach dem Transport über die Abdichtungen auf den vier Sohlen in den Mischungsbereich hinein unterschiedlich im restlichen Endlager verteilt. Dieser Prozess ist im Modell nicht vollständig zu bilanzieren, jedoch zeigen die Abb. 3.67 (für Rechenfall HP 6.0) und Abb. 3.68 (für Rechenfall HP 6.2) deutliche Unterschiede hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs des  $^{14}\text{C}$ -Transports aus dem Mischungsbereich Bartensleben hinaus (vgl. neg. Wertebereich in Abb. 3.67 und Abb. 3.68; späterer Transport für HP 6.0 im Vergleich zu HP 6.22). Das  $^{14}\text{C}$  verbleibt folglich nicht im Mischungsbereich, sondern wird im Endlagersystem verteilt. Das heißt, dass die unterschiedlichen - als defekt postulierten - Abdichtungen einen indirekten Einfluss auf den  $^{14}\text{C}$ -Transport aus dem ERAM ausüben, die direkte Ursache aber Strömungsprozesse im Mischungsbereich sind.



**Abb. 3.67** Aktivitätsstrom von  $^{14}\text{C}$  in den MB Bartensleben

Positiv:  $^{14}\text{C}$ -Strom in den MB Bartensleben hinein; negativ:  $^{14}\text{C}$ -Strom aus dem MB Bartensleben heraus. Rechenfall HP 6.0: Abdichtung 1. Sohle mit Permeabilität von  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  belegt; sonst wie Bezugsfall



**Abb. 3.68** Aktivitätsstrom von  $^{14}\text{C}$  in den MB Bartensleben

Positiv:  $^{14}\text{C}$ -Strom in den MB Bartensleben hinein; negativ:  $^{14}\text{C}$ -Strom aus dem MB Bartensleben heraus. Rechenfall HP 6.2: Abdichtung 3. Sohle mit Permeabilität von  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  belegt; sonst wie Bezugsfall

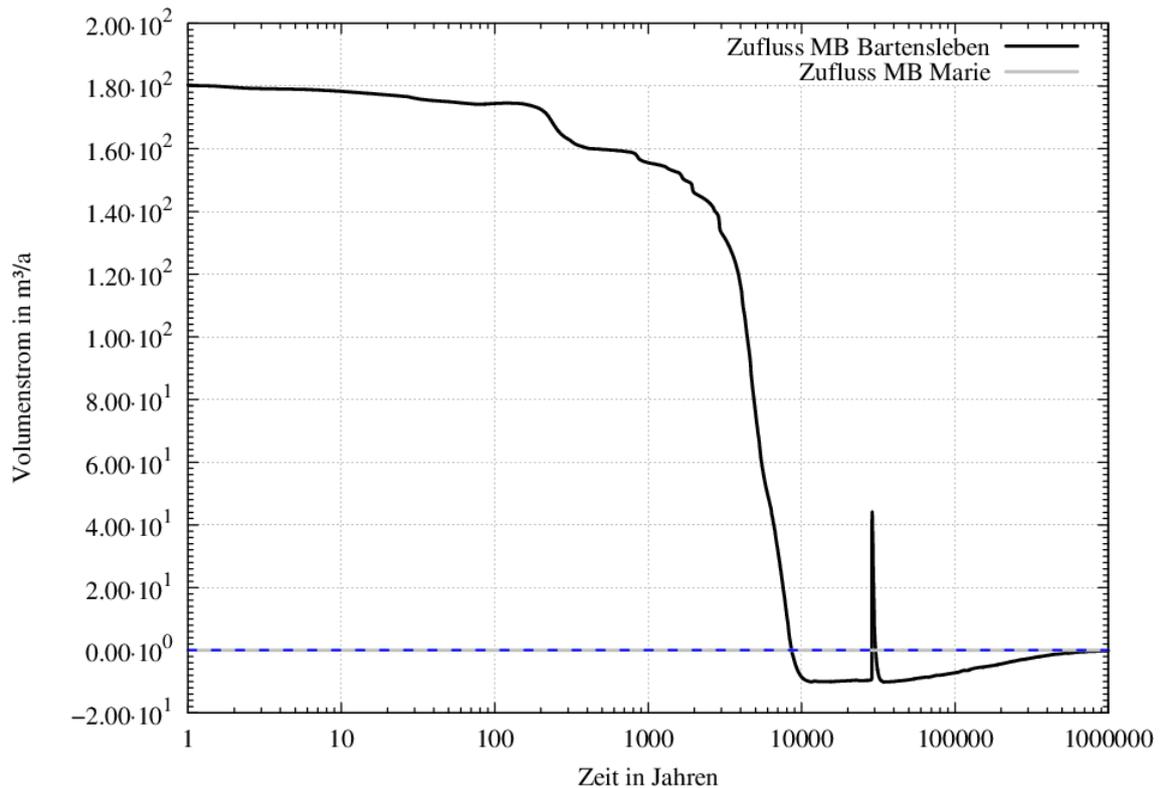
Der postulierte Ausfall der Abdichtungen zum Ostfeld (Rechenfall HP 6.4 und HP 6.5) hat offensichtlich keine Auswirkungen auf den Radionuklidaustrag. Die Auspressung der Flüssigkeit aus diesen Abdichtungen dauert deutlich länger als die aus den kürzeren Abdichtungen zum Südfeld. Aus dem Ostfeld tritt erst nach ca. 400.000 a Gas aus. Zu diesem Zeitpunkt ist das  $^{14}\text{C}$  bereits zerfallen.

Insgesamt lassen sich für das erweiterte Modell aus den Ergebnissen der Variationsrechnungen für die Systementwicklung „trockene Grube“ folgende Aussagen treffen:

- Die Ergebnisse der Variationsrechnungen weisen eine starke Ähnlichkeit mit den Variationsrechnungen zum Basismodell auf.
- Insgesamt treffen deshalb die gleichen Schlussfolgerungen wie für die Ergebnisse des Basismodells zu (vgl. Kap. 3.1.1.1).
- Die Lokalisation der Abdichtungen auf den unterschiedlichen Teufen hat im Detail Auswirkungen auf das Strömungsverhalten von Fluiden und damit das Transportverhalten der gasförmigen Radionuklide innerhalb des Endlagersystems, jedoch keine signifikante Auswirkung auf den  $^{14}\text{C}$ -Austrag aus dem ERAM.

### **3.2.2 Bezugsfall „mit relevantem Lösungszutritt“**

Auch für die Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“ stimmen die Bezugsfälle des Basismodells und des erweiterten Modells in allen Parametern – bis auf das verwendete Gittermodell – überein. Dies spiegelt sich deshalb auch in den Resultaten der Simulationen wieder. In Abb. 3.69 ist der Zustrom von Lösung in das ERAM gezeigt. Auch hier lässt sich beobachten, dass der durch den Zustrom ansteigende Druck im Mischungsbereich Bartensleben (siehe Abb. 3.70) eine Reduzierung der Zustromrate zur Folge hat. Nach etwa 8.600 a kehrt sich der Zustrom in einen Ausstrom um. Auch in diesem Rechenfall sieht man in Abb. 3.69 einen prägnanten Einstrompeak, der signalisiert, dass Lösung in einen abgedichteten Einlagerungsbereich zufließen kann.

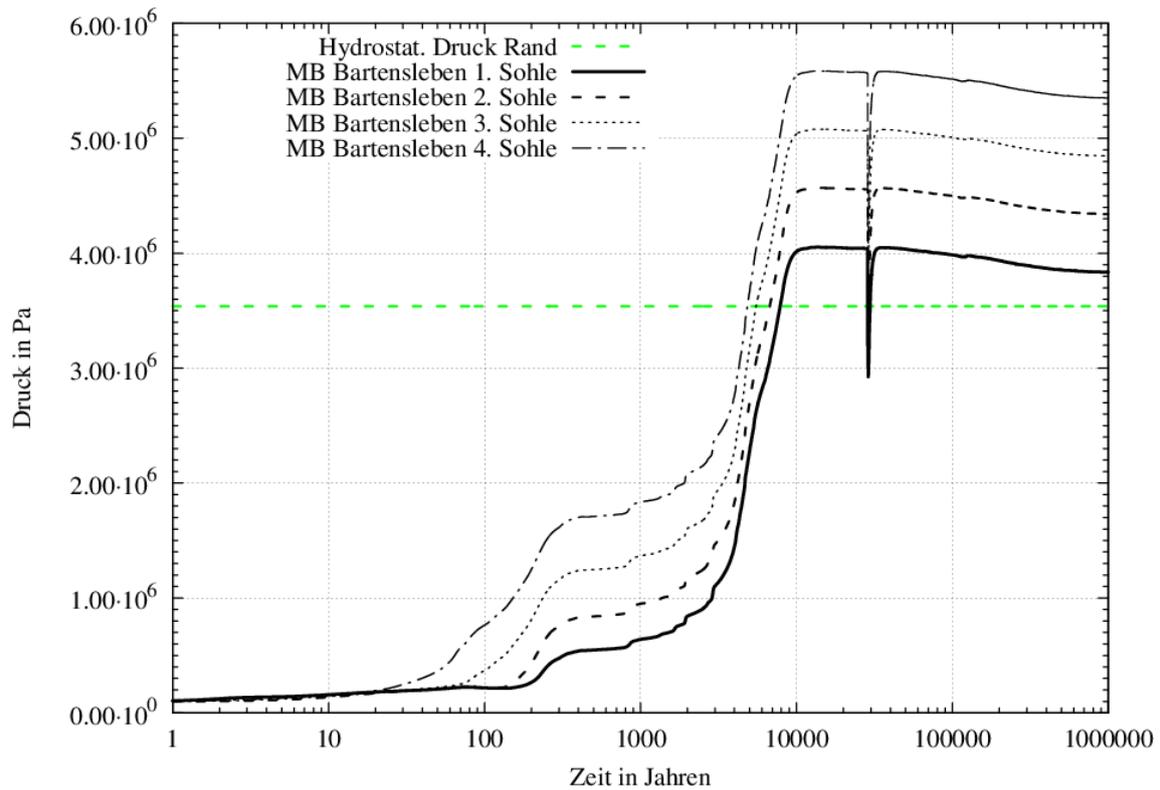


**Abb. 3.69** Einstrom von Lösung in das ERAM

Positiv: Einstrom in die Grube; negativ: Ausstrom aus der Grube.

Das erweiterte Modell verfügt im Vergleich zum Basismodell über Abdichtungen, die sich auf unterschiedlichen Sohlen befinden (vgl. Abb. 1.2 mit Abb. 1.4). Deshalb stellt sich die Frage, ob im erweiterten Modell und im Basismodell äquivalente Prozesse zu beobachten sind. Der erneute kurzzeitige Einstrom von Lösung in das ERAM findet im Zeitraum von 28.800 a bis 30.300 a und damit im Vergleich zum Basismodell etwas früher (Basismodell: 34.400 a – 36.000 a) statt, hat aber ungefähr die gleiche Dauer.

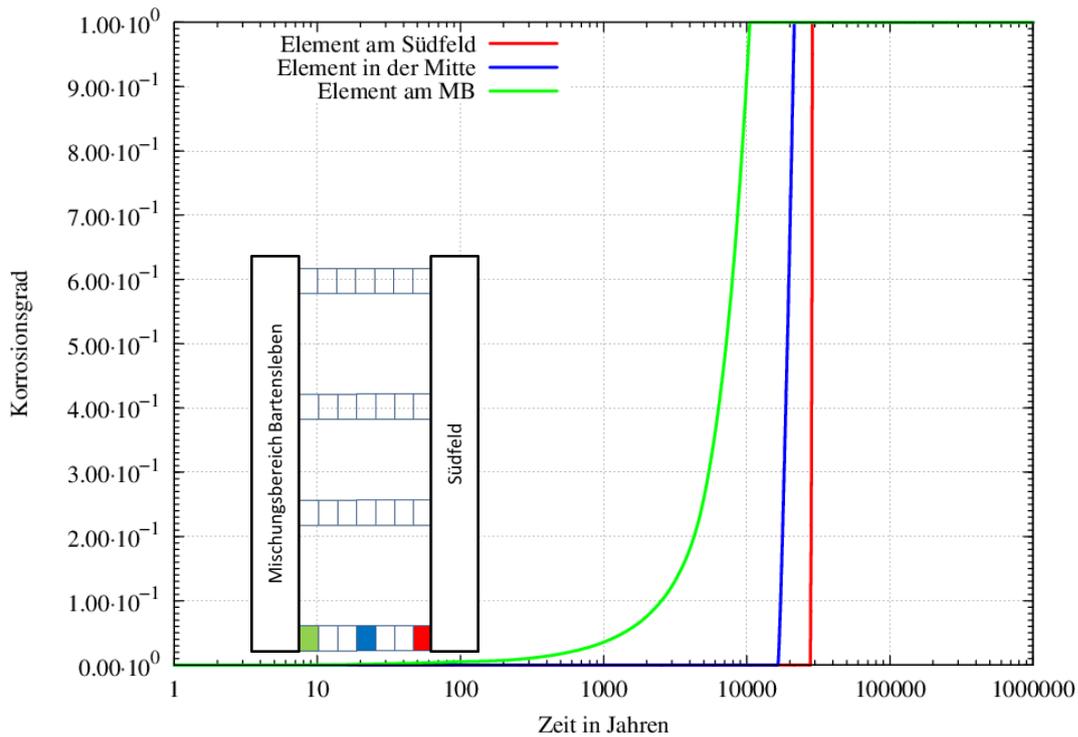
In Abb. 3.70 ist die Druckentwicklung im Mischungsbereich Bartensleben in den den Sohlen 1 bis 4 entsprechenden Teufen dargestellt. Außerdem aufgetragen ist der hydrostatische Druck am Randelement, welches 10 m oberhalb des Firstes der 1. Sohle liegt. Der hydrostatische Druck des Randelements wird sukzessive auf den Sohlen 4 – 1 erreicht, erst nach Überschreiten dieses Drucks auf der 1. Sohle kann Lösung aus dem Endlager herausströmen. In allen 4 Druckverläufen ist die kurzzeitige Druckentlastung zum Zeitpunkt des Einströmens der Lösung in einen abgedichteten Bereich nach der Korrosion der entsprechenden Abdichtung zu beobachten.



**Abb. 3.70** Druckentwicklung im Mischungsbereich Bartensleben

Schwarze Kurven (auch gestrichelt/gedoppelt): Druck im Mischungsbereich Bartensleben auf den jeweiligen Sohlen. Messpunkte liegen auf der Höhe der Abdichtungen zum Südfeld (vgl. Abb. 1.4). Grün gestrichelte Kurve: Hydrostatischer Druck am Modellrand.

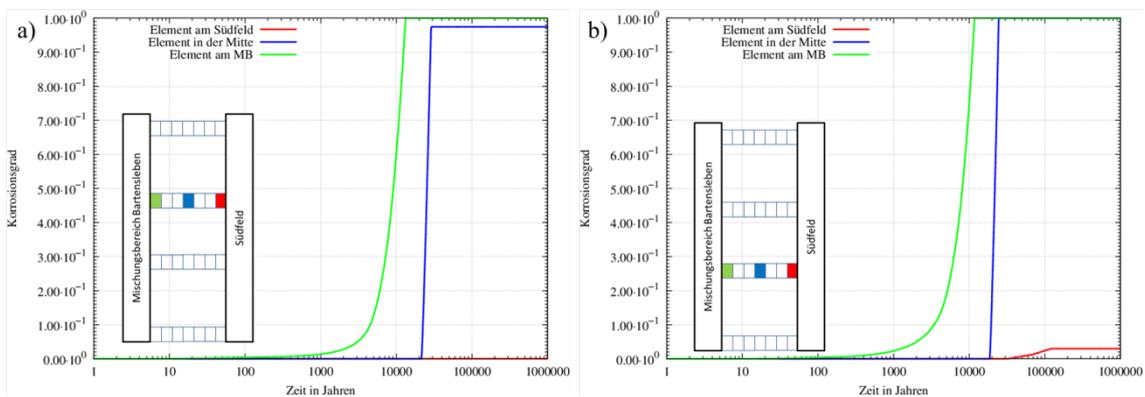
Die Abdichtung auf der 4. Sohle ist nach 28.700 a vollständig korrodiert (siehe Abb. 3.71) und verliert damit ihre volle Funktionsfähigkeit. Genau wie im Bezugsfall des Basismodells strömt die Lösung anschließend in das West-/Südfeld.



**Abb. 3.71** Korrosionsgrad der Südabdichtung 4. Sohle

Skizze zeigt Position der Gitterelemente in Relation zum Südfeld und Mischungsbereich. Die Kurven zeigen den Korrosionsgrad der Gitterelemente der Abdichtung. Die dargestellten Gitterelemente grenzen an den Mischungsbereich (grüne Kurve), an das Südfeld (rote Kurve) bzw. befinden sich in der Mitte der Abdichtung (blaue Kurve).

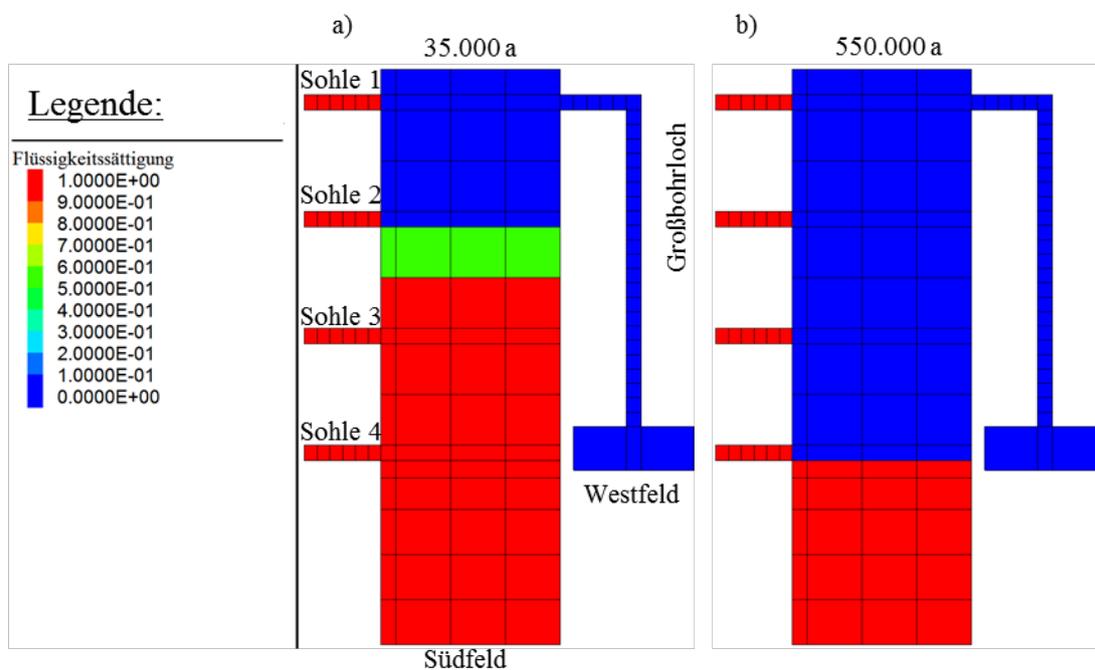
Der Druckausgleich zwischen Südfeld und Mischungsbereich kann damit über die 4. Sohle stattfinden, so dass der Korrosionsprozess der Abdichtungen auf den darüber liegenden Sohlen stoppt (siehe Abb. 3.72 a)) oder nur langsam fortschreitet (siehe Abb. 3.72 b)).



**Abb. 3.72** Korrosionsgrad der Südabdichtung a) 2. Sohle und b) 3. Sohle

Legende: siehe Abb. 3.71

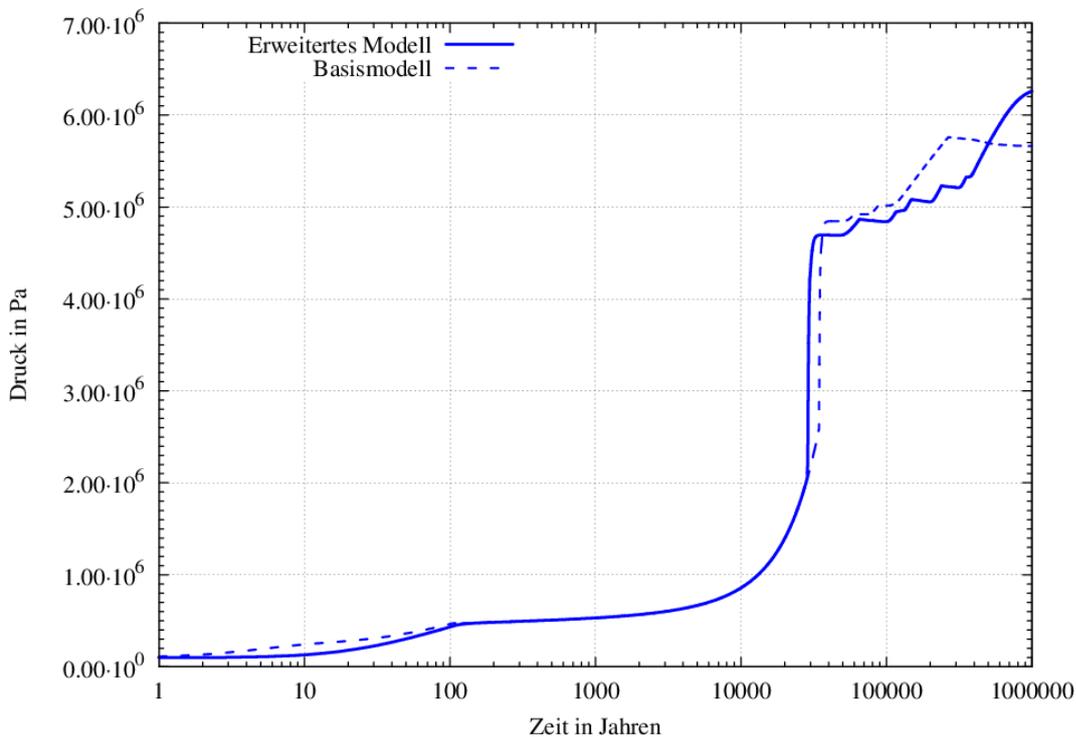
Der Flüssigkeitsspiegel im Südfeld steigt weiter an und erreicht seinen höchsten Punkt unterhalb der Abdichtung der 2. Sohle zum Zeitpunkt 32.300 a (ähnlich Abb. 3.73 a) bei 35.000 a). Zu diesem Zeitpunkt sind bereits 75.000 m<sup>3</sup> Lösung in das Südfeld zuge- treten, etwa 15.000 m<sup>3</sup> mehr als im Basismodell. Zu diesem früheren Zutrittszeitpunkt (Basismodell: 37.690 a) ist noch deutlich mehr Porenraum als im Basismodell vorhan- den, der mit Lösung gefüllt werden kann. Der Zutrittszeitpunkt liegt im Vergleich zum Basismodell früher, da die Korrosion der Abdichtung schneller als im Basismodell fort- schreitet. In Bezug auf die Abdichtungskorrosion ist das Volumen der Abdichtung ent- scheidend: Das Volumen der repräsentativen Abdichtung zum West-/Südfeld ist im Ba- sismodell deutlich größer, da das Volumen dieser Abdichtung im erweiterten Modell auf die vier Sohlen aufgeteilt wurde.



**Abb. 3.73** Flüssigkeitssättigung im Südfeld und Westfeld zum Zeitpunkt a) 35.000 a und b) 550.000 a

Nach dem Höchststand sinkt der Flüssigkeitsspiegel, allerdings fällt der Pegel langsa- mer als im Basismodell. Erst nach 550.000 a erreicht der Pegel wieder die Unterkante der Abdichtung auf der 4. Sohle (siehe Abb. 3.73 b)). Im Basismodell beträgt die Dauer dieses Prozesses nur ca. 100.000 a (vgl. Abb. 3.30). Für diesen Effekt gibt es mehrere Gründe: Ein Grund dafür ist, dass insgesamt mehr Lösung in das Südfeld zuge- treten ist und schon deshalb der Auspressvorgang länger dauern würde. Ein weiterer Grund ist der aufgrund der sohlenabhängigen Modellierung im erweiterten Modell im Ver-

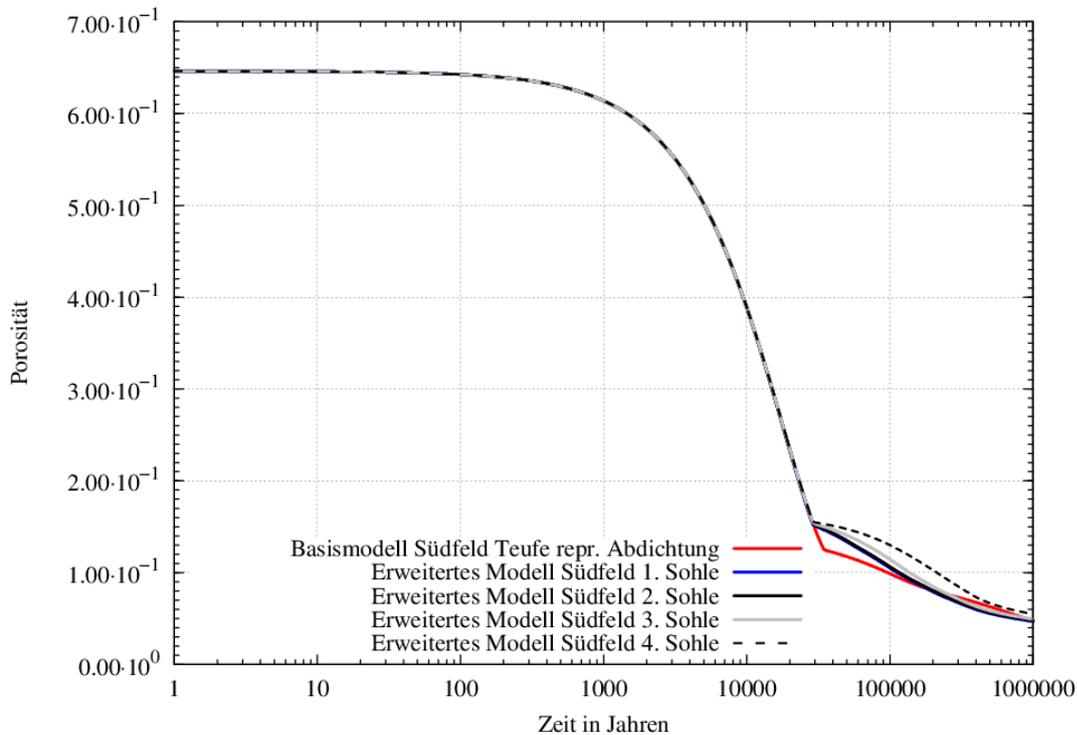
gleich zum Querschnitt der repräsentativen Abdichtung im Basismodell verringerte Querschnitt der Abdichtung auf der 4. Sohle. Dieser führt ebenfalls zu einem langsameren Ausströmen der Lösung aus dem Südfeld. Der wesentlichste Grund sind jedoch die unterschiedlichen Druckentwicklungen im Südfeld, die für das Basismodell und das erweiterte Modell in Abb. 3.74 dargestellt werden. Während des Lösungszutritts steigt für beide Modelle der Druck innerhalb kurzer Zeit an. Danach erhöht sich der Druck im erweiterten Modell zunächst deutlich langsamer, bevor er zum Zeitpunkt von 500.000 a höher als der Druck im Basismodell ist.



**Abb. 3.74** Druckentwicklung im Südfeld (Teufe 1. Sohle bzw. Großbohrloch) für das Basis- und das erweiterte Modell

Die Ursache für die unterschiedliche Druckentwicklung lässt sich gut anhand der Porositätsentwicklung im Südfeld für beide Modelle nachvollziehen (siehe Abb. 3.75). Bis zum Lösungszutritt nach 28.800 a (erweitertes Modell) bzw. 34.400 a (Basismodell) ist die Entwicklung der Porosität für beide Modelle identisch. Der Lösungszutritt bewirkt einen deutlich erkennbaren Knick in der Abnahme der Porosität, da die Flüssigkeit einen stärkeren Gegendruck zum Gebirgsdruck als das vorher vorhandene Gas aufbauen kann und so eine stützende Wirkung entfaltet. Diese hemmt die weitere Gebirgskonvergenz und damit die Kompaktion des Versatzes. Da im erweiterten Modell die Lösung (aus den oben genannten Gründen) früher in das Südfeld zutritt als im Basismodell, erfolgt der Knick in der Porositätsentwicklung dort ebenfalls früher und folglich

bei einer höheren Porosität. Da aber für beide Modelle sowohl das gleiche Gasvolumen initial vorhanden ist als auch durch die Gasbildung erzeugt wird, ist im Basismodell bei späterem Lösungszutritt und kleinerer Porosität der Gasdruck aufgrund des geringeren Porenvolumens höher als im erweiterten Modell.



**Abb. 3.75** Porositätsentwicklung des Südfelds für das Basis- und das erweiterte Modell

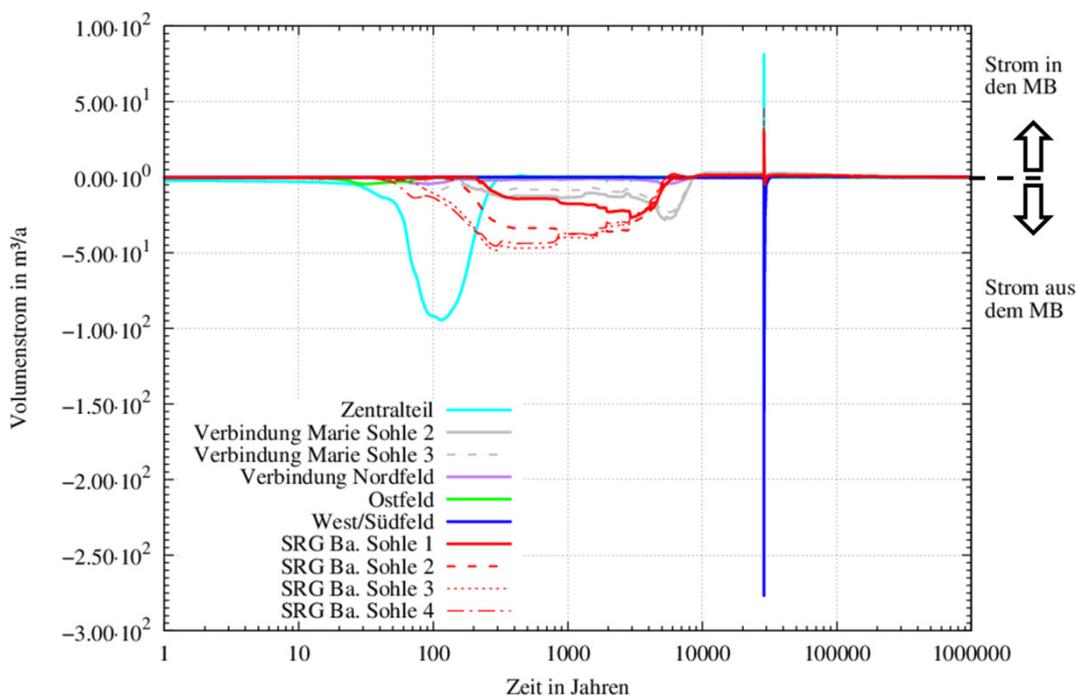
(für das Basismodell liegen teufenabhängige Werte nicht als Zeitreihe vor, der Messpunkt liegt auf der Höhe der repräsentativen Abdichtung)

In Abb. 3.75 ist ebenfalls deutlich zu erkennen, dass vom Zeitpunkt des Lösungszutritts an die Porositätsentwicklung auf den einzelnen Sohlen des erweiterten Modells unterschiedlich verläuft, da auf den oberen Sohlen nach wie vor ausschließlich der Gasdruck die Konvergenz und damit die Kompaktion behindert. Die weitere Entwicklung der Porosität ist folglich teufenabhängig. Das gilt auch im Basismodell, für das aber keine teufenabhängigen Zeitreihen vorliegen.

Die weitere Druckentwicklung im Südfeld zeigt zunächst den Auspressvorgang der Lösung auf (siehe Abb. 3.74). Dabei sind für das erweiterte Modell einzelne Stufen erkennbar, die zeigen, dass der Auspressvorgang die Diskretisierung des Modellgitters abbildet. Eine detaillierte Erläuterung, wie diese Stufen entstehen, ist in /NAV 16b/ zu finden. Zu späten Zeitpunkten ist der Gasdruck im erweiterten Modell höher, da im Ba-

sismodell der hohe Druck zu einer Teilentsättigung der Abdichtung geführt hat und damit Gas aus dem Südfeld entweichen kann. Auch im erweiterten Modell sinkt die Sättigung der Abdichtung auf der 1. Sohle kontinuierlich, so dass nach 600.000 a ein Ausstrom von Gas möglich ist. Da diese Abdichtung allerdings kaum von der Abdichtungskorrosion betroffen gewesen ist und damit die Permeabilität insgesamt noch sehr niedrig ist ( $1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ ), strömt nur sehr wenig Gas über diese Abdichtung.

Wie auch im Basismodell erzeugt der Flüssigkeitseinstrom in das Südfeld einen Flüssigkeitsstrom aus den nicht abgedichteten Bereichen (z. B. der sonstigen Restgrube Bartensleben) in den Mischungsbereich Bartensleben (Abb. 3.76).

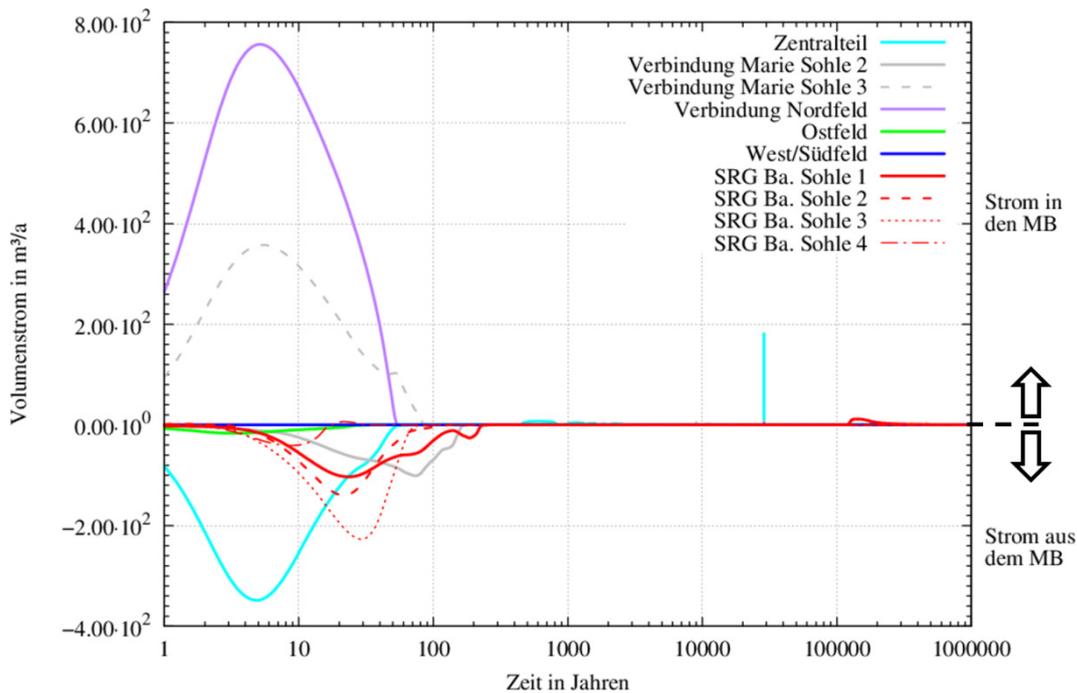


**Abb. 3.76** Flüssigkeitsstrom in und aus dem MB Bartensleben

Positiv: Flüssigkeitsstrom in den MB Bartensleben hinein; negativ: Flüssigkeitsstrom aus dem MB Bartensleben heraus.

Auch der Gasstrom in den Mischungsbereich Bartensleben hinein und aus diesem heraus ist dem im Basismodell sehr ähnlich (siehe Abb. 3.77, vgl. Abb. 3.33). Im Unterschied zum Basismodell strömt in den ersten 100 a nur Gas in Richtung ELB Zentralteil hinein und nicht in Richtung Mischungsbereich Bartensleben. Außerdem interessant ist der Effekt, dass durch die Verbindung zwischen den beiden Mischungsbereichen auf der 2. Sohle Gas in Richtung des Mischungsbereichs Marie, auf der 3. Sohle das Gas aber in Richtung des Mischungsbereichs Bartensleben strömt.

Der  $^{14}\text{C}$ -Ausstrom aus dem Endlager heraus, der in Abb. 3.78 zu sehen ist, unterscheidet sich deutlich von dem des Basismodells (vgl. Abb. 3.36). Durch die tiefenbezogene Diskretisierung des Gittermodells und in diesem Fall insbesondere des Mischungsbereichs Bartensleben befindet sich im oberen Bereich des Mischungsbereichs mehr Gas als im unteren Bereich, so dass der Peak des  $^{14}\text{C}$ -Austrags auf den Gasausstrom zurückzuführen ist. Nach diesem Peak wird der Ausstrom dann vom deutlich geringeren  $^{14}\text{C}$  Gehalt in der flüssigen Phase dominiert.



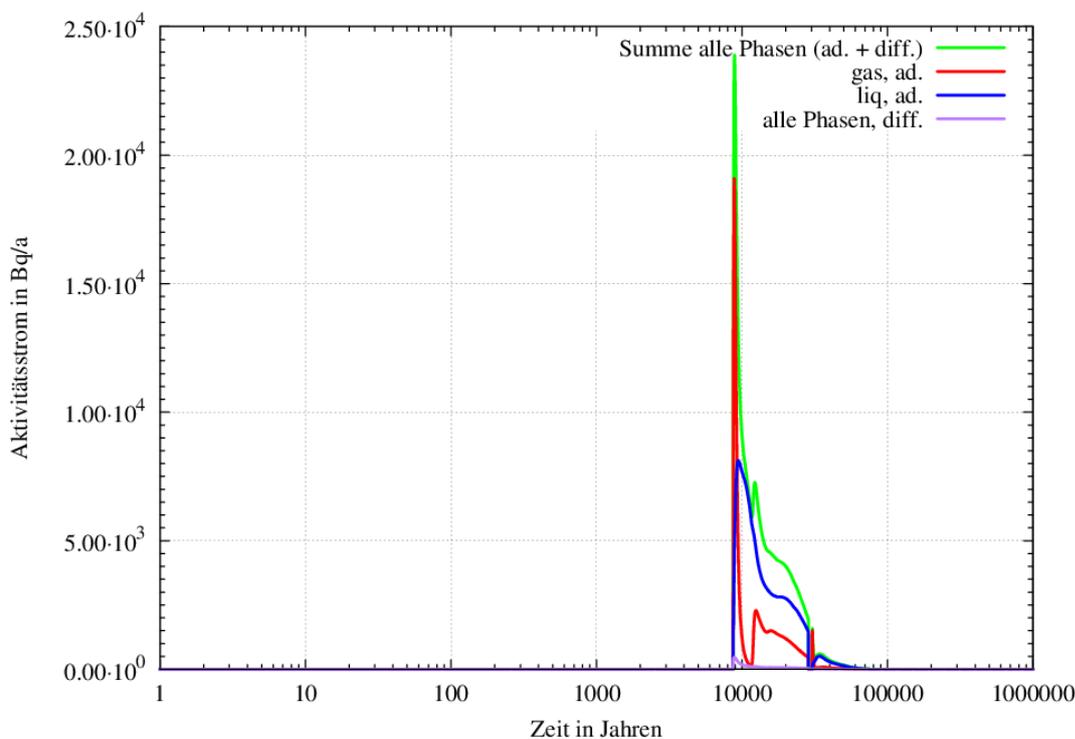
**Abb. 3.77** Gasstrom in und aus dem MB Bartensleben

Positiv: Gasstrom in den MB Bartensleben hinein; negativ: Gasstrom aus dem MB Bartensleben heraus.

Der Ausstrom der anderen in der flüssigen Phase gelösten Radionuklide aus dem ERAM liegt dagegen im Vergleich zum Basismodell auf einem ähnlichen Niveau (siehe Abb. 3.79, vgl. Abb. 3.37). Zwei Unterschiede sind zum einen ein geringer Peak nach ca. 30.000 a vor dem eigentlichen hohen Austrag nach ca. 100.000 a. Der geringere Peak wird durch Radionuklide aus dem Nordfeld verursacht, die aus dem Endlager transportiert werden, während der höhere Peak von den Radionukliden aus dem Südfeld stammt. Der kleinere Peak ist damit auf die Änderung der Anbindung des Nordfelds an den Mischungsbereich Bartensleben bzw. Marie zurückzuführen (vgl. Abb. 1.1 und Abb. 1.5). Diese Änderung äußert sich auch in einer vertikalen Verbindung zwischen Nordfeld und der Verbindungsstrecke der Mischungsbereiche. Damit kann Gas

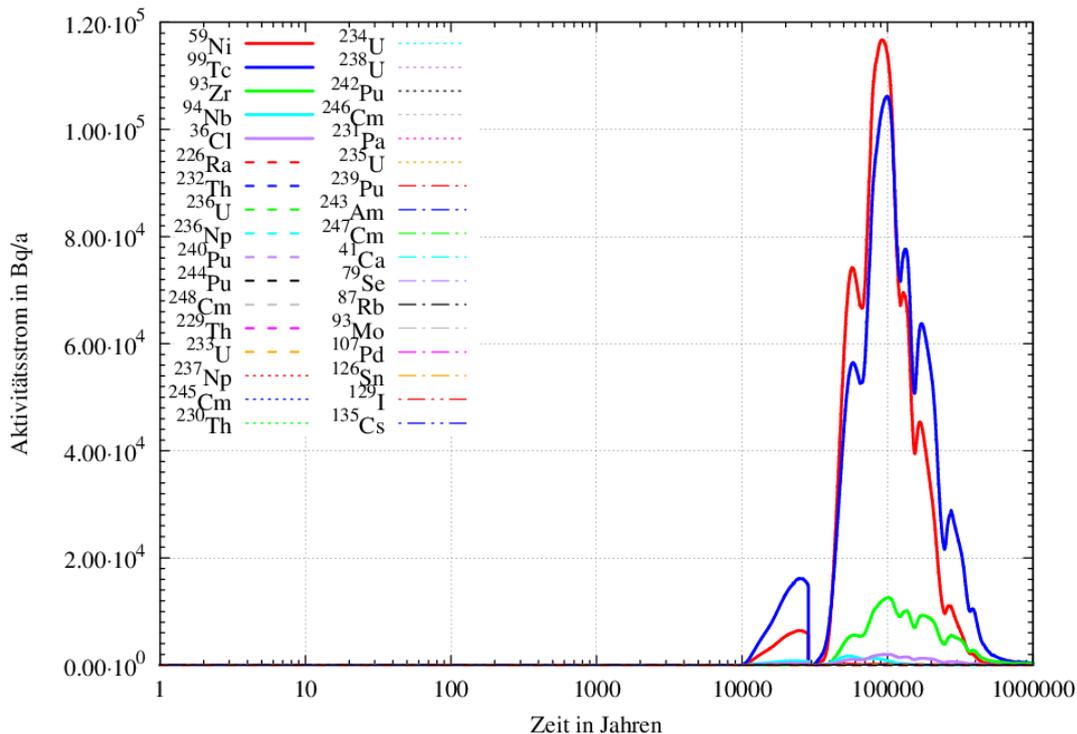
aus dem Nordfeld in diese Strecke entweichen und die Flüssigkeit damit eher als im Basismodell in das Nordfeld vordringen. Ein Austrag der Flüssigkeit aus dem Nordfeld hat zur Folge, dass dieser mit Radionukliden behaftete Flüssigkeitsstrom sich nicht zwischen den Mischungsbereichen aufteilen kann. Im Basismodell konnte der Flüssigkeitsstrom aus dem Nordfeld im Prinzip sogar vollständig in Richtung Mischungsbereich Marie strömen. Im erweiterten Modell strömt die Lösung (inkl. Radionukliden) vollständig in den Mischungsbereich Bartensleben und verursacht dort den Peak im Aktivitätsstrom bei ca. 30.000 a.

Außerdem sind einzelne kurzzeitige Rückgänge im Austrag der Radionuklide deutlich in Abb. 3.79 zu erkennen. Diese sind zeitlich äquivalent zu den Druckstufen, die während der Auspressung der Lösung (Entsättigung) aus dem Südfeld beobachtet werden (vgl. Abb. 3.74).



**Abb. 3.78** <sup>14</sup>C-Ausstrom aus dem ERAM

grün: Ausstrom als Summe aller Phasen (advektiv und diffusiv); rot: Ausstrom mittels der Gasphase (advektiv), blau: Ausstrom mittels der flüssigen Phasen (advektiv); violett: Ausstrom mittels beider Phasen (diffusiv).



**Abb. 3.79** Aktivitätsausstrom gelöster Radionuklide aus dem ERAM

Ausstrom aller betrachteten Radionuklide (außer  $^{14}\text{C}$ ). Die Radionuklide, die in den meisten Rechenfällen den höchsten Aktivitätsstrom zeigen sind als durchgezogene Linien dargestellt, alle anderen Radionuklide als gestrichelte Linien.

Zusammenfassend lassen sich für das erweiterte Modell zum Bezugsfall „mit relevantem Lösungszutritt“ folgende Punkte feststellen:

- Im Vergleich zum Basismodell erweisen sich für das erweiterte Modell zu einem im Prinzip die gleichen Prozesse und Effekte als relevant, die aber teilweise zu unterschiedlichen Zeitpunkten wirken. Wichtige Prozesse und Effekte werden hier aufgeführt:
  - Die Bedeutung des Nordfelds hinsichtlich des Radionuklidtransports in den Mischungsbereich hat sich erhöht.
  - Der Mischungsbereich Bartensleben fungiert als Verteiler von Fluiden (hauptsächlich Flüssigkeit) und Radionukliden im Endlager.
  - Nach ungefähr 8.700 a treten erstmals Lösung, Gas und Radionuklide aus dem Endlager aus.

- Die Abdichtung auf der 4. Sohle zum ELB West-/Südfeld verliert ihre Funktionsfähigkeit und Lösung tritt ins ELB West-/Südfeld zu.
- Radionuklide mit den höchsten Aktivitätsströmen, die aus dem Endlager austreten, sind  $^{59}\text{Ni}$  und  $^{99}\text{Tc}$  mit einer maximalen Rate von 120.000 Bq/a bzw. 105.000 Bq/a.
- Der ELB Ostfeld ist von den Prozessen im Endlagersystem nahezu völlig entkoppelt.

Im Gegensatz zur Systementwicklung „trockene Grube“, für die nur geringe Unterschiede in den Ergebnissen beider Modelle auftreten, existieren für die Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“ aber auch größere Unterschiede zwischen Basis- und erweitertem Modell:

- Folgende Unterschiede treten im erweiterten Modell zu Tage:
  - $^{14}\text{C}$  tritt mit maximal 24.000 Bq/a aus dem Endlager aus. Das ist etwa die 10-fache Rate im Vergleich zum Basismodell. Dieser Effekt ist auf die Phasenseparierung von Gas und Flüssigkeit im Mischungsbereich Bartensleben zurückzuführen, die im Basismodell nicht möglich war.
  - Gelöste Radionuklide treten erstmals bereits nach ca. 10.000 a aus dem Endlager aus, im Basismodell erst nach 35.000 a. Dieser Effekt ist auf die geänderte Anbindung des Nordfelds in Bezug zum Mischungsbereich Bartensleben und zu den Verbindungsstrecken zum Mischungsbereich Marie zurückzuführen.
  - Die Abdichtung auf der 4. Sohle zum ELB West-/Süd Südfeld korrodiert deutlich früher als die repräsentative Abdichtung zum ELB West-/Süd Südfeld im Basismodell. In der Konsequenz unterscheidet sich der zeitliche Verlauf des Strömungsverhaltens in diesem ELB (Auspressung, etc.) deutlich. Auf den Austrag von in der Flüssigkeit gelösten Radionukliden ist keine deutliche Auswirkung zu sehen.
  - Ein Effekt der vertikalen Diskretisierung im Südfeld tritt besonders stark zu Tage: Ausbildung von Druckstufen bzw. daraus resultierend ein periodischer Abfall des Radionuklidaustrags in der flüssigen Phase: Nach /NAV 16b/ konnte dieses Phänomen *„an einem vertikalen Säulenmodell, in dem Wasser durch Gas verdrängt wird, reproduziert und als Effekt der räumlichen Diskretisierung*

*erklärt werden. Ursache der treppenförmigen Verläufe ist die abwechselnde Über- und Unterschätzung der Entsättigungsgeschwindigkeit einzelner Gitterelemente. Im Mittel kompensieren sich diese Über- und Unterschätzungen jedoch, so dass das Systemverhalten auf der Skala des Gesamtsystems richtig prognostiziert wird.“*

### **3.2.2.1 Prozesse im Endlagersystem**

Wie für den Bezugsfall sind auch die Ergebnisse der Variationsrechnungen zum erweiterten Modell denen des Basismodells sehr ähnlich. Im Folgenden wird deshalb besonders auf die Ergebnisse der Variationsrechnungen eingegangen, die einen Unterschied zum Basismodell aufweisen. Die folgenden Rechenfälle werden deshalb näher betrachtet, Details zu den Parametervariationen sind in /FRI 16/ dargelegt:

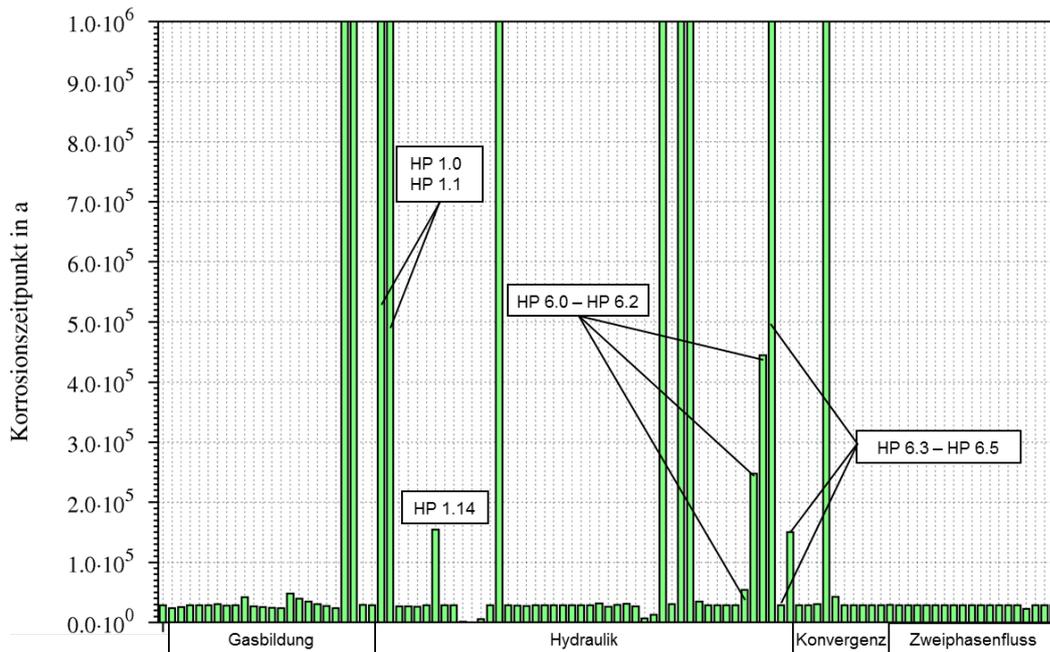
- Initialer Ausfall der Abdichtungen auf den einzelnen Sohlen. Ausfall bedeutet, dass die Permeabilität einer Abdichtung initial auf  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  gesetzt wird. Das sind die Rechenfälle HP 6.0 – HP 6.5 mit jeweils dem Ausfall der folgenden Abdichtung: Südfeld (1. Sohle), Südfeld (2. Sohle), Südfeld (3. Sohle), Südfeld (4. Sohle), Ostfeld (2. Sohle), Ostfeld (4. Sohle).
- Variation von Gasbildungsparametern, so dass der Gasdruck durch die Gasproduktion nur unwesentlich ansteigt: Zum Beispiel wird im Rechenfall GP 1.0 gar kein Gas gebildet, in GP 1.1 wird insgesamt wenig Gas mit geringer Gasbildungsrate produziert. In den Rechenfällen GP 1.6 bis GP 1.8 steht weniger Behälterwasser für die Gasproduktion zur Verfügung, so dass weniger Gas gebildet werden kann.
- Variation von Gasbildungsparametern, so dass der Gasdruck durch die Gasproduktion stark ansteigt. Dies sind die Rechenfälle GP 2.0, GP 2.1 und GP 2.2. In diesen Rechenfällen wird die Gasbildung nach /BEC 09/ parametrisiert.
- Änderung von Konvergenzparametern: In den Rechenfällen KP 1.2 und KP 1.3 wurde die Referenzkonvergenzrate erhöht.
- Variation von Zweiphasenflussparametern: In den Rechenfällen ZP 1.0, ZP 2.0 und ZP 2.2 wird der sog. „Gaseindringdruck“ (siehe /FRI 16/) reduziert.
- Änderung von hydraulischen Eigenschaften

In Abb. 3.80 ist der Zeitpunkt des Ausfalls der Abdichtung zum ELB West-/Südfeld auf der 4. Sohle für die einzelnen Rechenfälle aufgetragen. Wie auch im Basismodell ist

die Variabilität des Ausfalls der Abdichtung in den unterschiedlichen Rechenfällen sehr gering, der Zeitpunkt liegt meistens um die 30.000 a. In 8 Rechenfällen verliert die Abdichtung ihre Funktionsfähigkeit nicht, in 3 Fällen wurde der Ausfall nicht betrachtet (HP 1.0, HP 1.1 sowie HP 6.3), so dass in diesen Rechenfällen ein durchgehender Balken in Abb. 3.80 zu erkennen ist.

Es ist ersichtlich, dass drei Faktoren den Zeitpunkt der vollständigen Korrosion der Abdichtung auf der 4. Sohle beeinflussen. Einerseits ist dies der Gasdruck, der entweder durch eine Variation der Gasbildungsparameter oder durch eine Variation der Konvergenzparameter beeinflusst wird. Ein hoher Gasdruck verzögert die Abdichtungskorrosion oder verhindert diese sogar vollständig. Zum anderen ist dies die Variation der Korrosionsparameter selbst, zum Beispiel um eine korrosivere Lösungszusammensetzung zu simulieren. Der dritte Faktor wiederum ist der Ausfall und damit die Permeabilitätserhöhung einer anderen Abdichtung. Die Ergebnisse der Rechenfälle HP 6.0 – HP 6.2 zeigen die Auswirkung des initialen Ausfalls der Abdichtung zum ELB West-/Südfeld auf der 1. bis 3. Sohle. Im Rechenfall HP 6.3 wird der initiale Ausfall der Abdichtung auf der 4. Sohle angenommen, deshalb ist in Abb. 3.80 ein durchgehender Balken zu sehen. Die Ergebnisse der Rechenfälle HP 6.4 und HP 6.5 zeigen die Auswirkung des initialen Ausfalls der Abdichtungen zum Ostfeld auf der 4. bzw. auf der 2. Sohle.

Wenn die Abdichtung zum ELB West-Südfeld auf der 3. Sohle ausfällt (also initial eine Permeabilität von  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  besitzt), liegt der Zeitpunkt der vollständigen Korrosion der Abdichtung auf der 4. Sohle deutlich später als bei initialem Ausfall der Abdichtung auf der 1. oder 2. Sohle (Abb. 3.80). Je höher also die „ausgefallene“ Abdichtung liegt, desto früher erfolgt die Korrosion der Abdichtung auf der 4. Sohle. Der Druck der Flüssigkeitssäule kann in diesem Fall länger auf die Abdichtung der 4. Sohle wirken und es kann mehr korrosive Lösung in die Abdichtung eindringen.



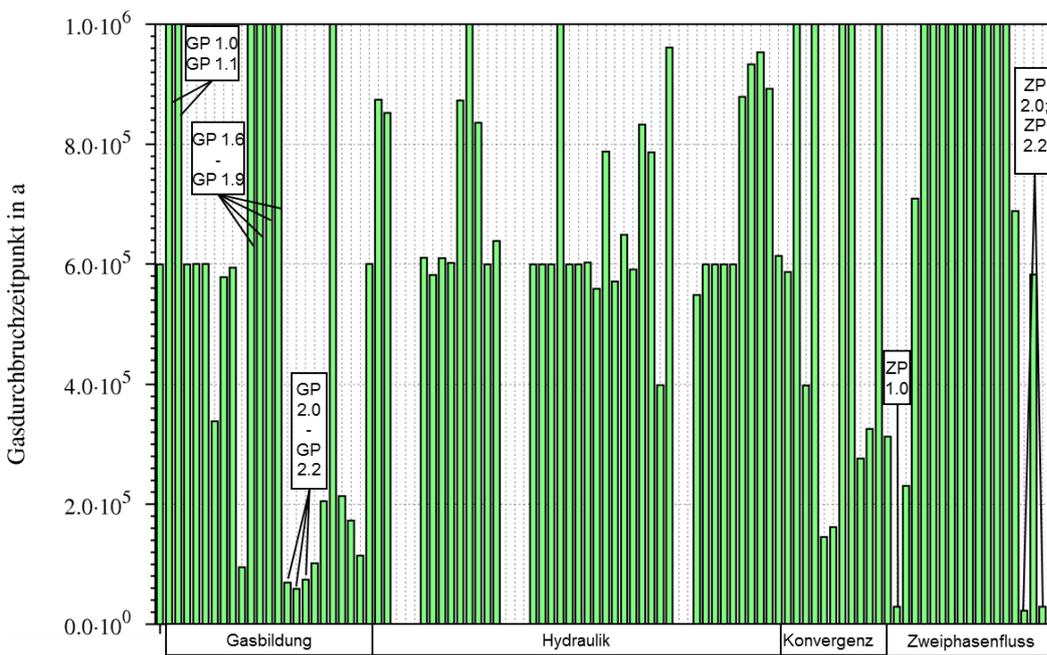
**Abb. 3.80** Zeitpunkt der vollständigen Korrosion der Abdichtung auf der 4. Sohle zum West-/Südfeld

Im Histogramm entspricht der 1. Balken dem Bezugsfall. Wenn ein durchgehender Balken angegeben ist, verliert die Abdichtung ihre Funktionsfähigkeit nicht. Unten angegeben ist die Kategorie, die aussagt, welche Art von Parameter geändert wurde.

Bereits für die Systementwicklung „trockene Grube“ wurde untersucht, welche Auswirkung ein möglicher früher Zeitpunkt des Gasausstroms in den Mischungsbereich Bartensleben durch die Abdichtung auf der 1. Sohle zum Südfeld im Endlagersystem haben kann. Neben einem potenziellen initialen Defekt dieser Abdichtung kann auch ein hoher Gasdruck im ELB West/Südfeld eine Entsättigung dieser Abdichtung verursachen und so einen Gasstrom und damit auch gasförmige Radionuklide aus dem ELB West-/Südfeld in den Mischungsbereich Bartensleben transportieren. Der Beginn des Gasausstroms durch eine Abdichtung („Gasdurchbruch“) kann aufgrund der Halbwertszeit von  $^{14}\text{C}$  für diesen Prozess und den potenziellen Austrag von Radionukliden aus dem Endlager wichtig sein. Deshalb ist in Abb. 3.81 der Zeitpunkt des Gasdurchbruchs für die Abdichtung auf der 1. Sohle zum ELB West-/Südfeld für alle hier betrachteten Rechenfälle dargestellt. Dort ist zu sehen, dass es zahlreiche Rechenfälle gibt, für die im Berechnungszeitraum kein Gasdurchbruch durch die oberste Abdichtung festzustellen ist. Dies gilt z. B. für die in Abb. 3.81 mit „GP 1.x“ beschrifteten Fälle. In diesen Rechenfällen werden die Parameter zur Gasbildung so variiert, dass der resultierende Gasdruck gering ist und damit ein Gasdurchbruch nicht stattfindet.

Ebenso gibt es zahlreiche Fälle, in welchen der Zeitpunkt des Gasdurchbruchs aufgrund des aus den variierten Gasbildungsparametern resultierenden hohen Gasdrucks im ELB West/Südfeld früh liegt (zum Beispiel Rechenfälle GP 2.x in Abb. 3.81).

Für die Variation der Konvergenzparameter lassen sich ähnliche Fälle finden. Somit ist festzustellen, dass der resultierende Gasdruck nicht nur die Korrosion der Abdichtung auf der 4. Sohle zum ELB West-/Südfeld, sondern auch den Gasdurchbruchzeitpunkt zum Mischungsbereich Bartensleben durch die Abdichtung auf der 1. Sohle zum ELB West-/Südfeld steuert.



**Abb. 3.81** Zeitpunkt des Gasdurchbruchs durch die Abdichtung auf der 1. Sohle zum West-/Südfeld

Im Histogramm entspricht der 1. Balken dem Bezugsfall. Wenn ein durchgehender Balken angegeben ist, findet im Berechnungszeitraum kein Gasdurchbruch statt. Wenn kein Balken angegeben ist, ist die initiale Gassättigung bereits größer als die residuale Sättigung, die zum Strömen notwendig ist. Angegeben ist die Kategorie, die aussagt, welche Art von Parameter geändert wurde.

Die Gasströmung durch die Abdichtung auf der 1. Sohle wird außerdem von den Parametern zum Zweiphasenfluss beeinflusst. Die Rechenfälle ZP 1.0, ZP 2.0 und ZP 2.2 zeigen die frühesten Gasdurchbruchzeitpunkte aller Rechenfälle mit initial gasundurchlässigen Abdichtungen. Bereits nach ca. 29.000 a (ZP 1.0, ZP 2.2), und 22.000 a (ZP 2.0) strömt Gas durch die obere Abdichtung. In diesen Rechenfällen wurde der Gaseindringdruck der Abdichtungen reduziert. Das bedeutet, dass der Gasdruck im

ELB West-/Südfeld einen geringeren Druck erreichen muss, um die in der Abdichtung initial enthaltene Flüssigkeit zu verdrängen.

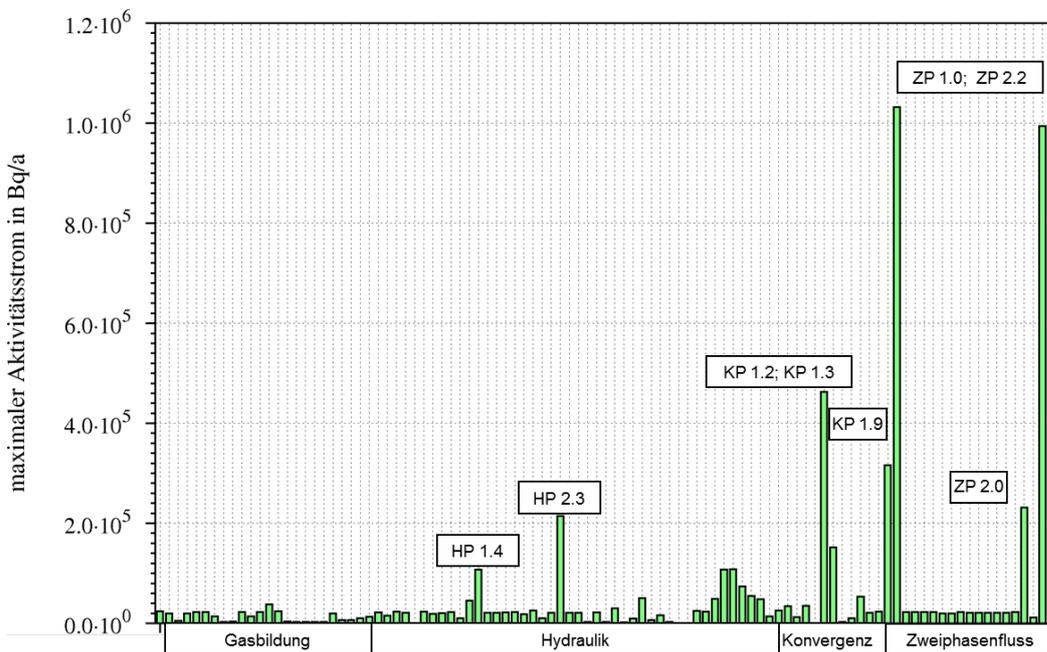
Insgesamt sind im erweiterten Modell drei Prozesse für den Radionuklidtransport vom ELB West-/Südfeld in den Mischungsbereich Bartensleben von Bedeutung:

- Frühe Korrosion der Abdichtung auf der 4. Sohle, die durch einen geringen Gegendruck im ELB West-/Südfeld begünstigt wird.
- Früher Gasdurchbruch durch die Abdichtung auf der 1. Sohle, der durch einen hohen Druck im ELB West-/Südfeld begünstigt wird.
- Früher Gasdurchbruch durch die Abdichtung auf der 1. Sohle, der durch einen niedrigen Gaseindringdruck der Abdichtungen zum ELB West-/Südfeld begünstigt wird.

Dabei ist festzustellen, dass die beiden ersten Prozesse nicht gleichzeitig auftreten können, da sich die Voraussetzungen (niedriger bzw. hoher Druck im ELB West-/Südfeld) widersprechen. Erst wenn ein niedriger Gaseindringdruck für die Abdichtungen postuliert wird, ist auch bei niedrigem Druck im ELB West-/Südfeld die Verdrängung von Lösung aus der Abdichtung der 1. Sohle möglich, ohne dass der Zeitpunkt der vollständigen Korrosion der Abdichtung auf der 4. Sohle später liegt. In diesem Fall kann sowohl Lösung auf der 4. Sohle in den ELB West-Südfeld ein als auch Gas auf der 1. Sohle ausströmen. Der Flüssigkeitszutritt verstärkt den Austrag von gasförmigen Radionukliden aus dem ELB. Dies wirkt sich direkt auf den  $^{14}\text{C}$ -Austrag des Gesamtsystems aus. Der maximale  $^{14}\text{C}$ -Austrag aller Variationsrechnungen zur Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“ für das erweiterte Modell ist in Abb. 3.82 dargestellt. Rechenfälle, in denen der Gaseindringdruck der Abdichtungen reduziert wurde (ZP 1.0, ZP 2.0 und ZP 2.2) zeigen dabei den höchsten Austrag.

Ein hoher  $^{14}\text{C}$ -Austrag wird auch in den Rechenfällen KP 1.2 und KP 1.3 berechnet. In diesen Rechenfällen führt eine erhöhte Konvergenzrate zu einem hohen Gasdruck im gesamten Endlager. Das den maximalen Austrag verursachende  $^{14}\text{C}$  stammt in diesen Rechenfällen nicht aus dem ELB West-/Südfeld. Trotz des hohen Gasdrucks liegt im Rechenfall KP 1.2 der Gasdurchbruchzeitpunkt aus dem ELB West-Südfeld bei über 100.000 a, so dass zu diesem Zeitpunkt aufgrund der Halbwertszeit von 5.730 a kaum noch  $^{14}\text{C}$  vorhanden ist. Verantwortlich für den hohen  $^{14}\text{C}$ -Austrag im Falle KP 1.2 ist

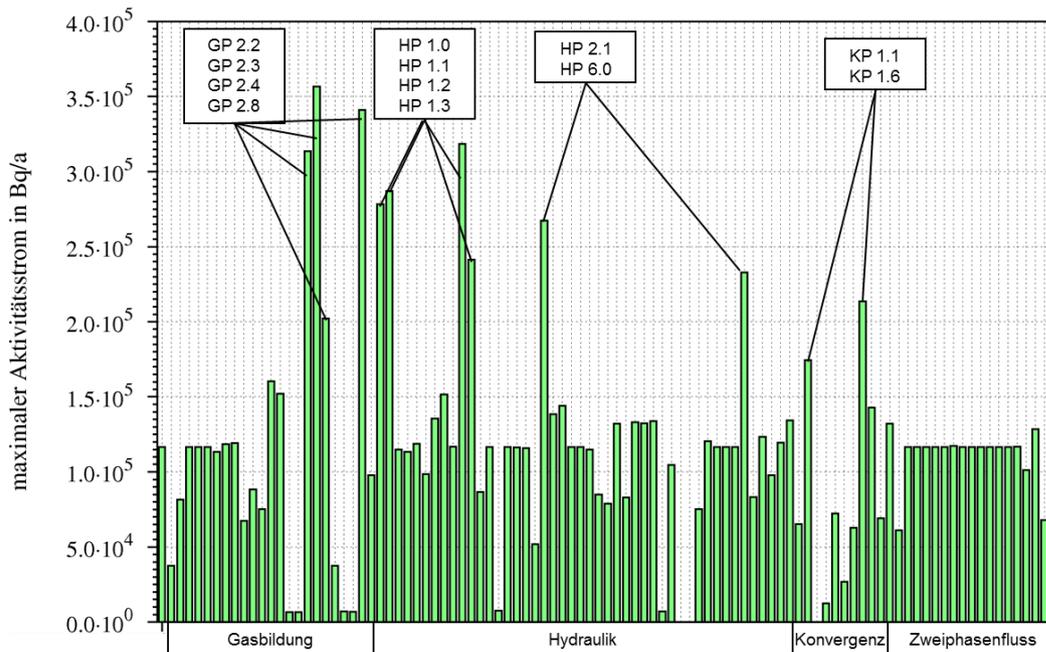
das  $^{14}\text{C}$  aus dem ELB Nordfeld, das durch die hohe Konvergenzrate und den dadurch resultierenden hohen Druck bereits nach ca. 300 a aus dem Endlager austritt.



**Abb. 3.82** Maximaler  $^{14}\text{C}$ -Austrag aller Rechenfälle (erweitertes Modell, „mit relevantem Lösungszutritt“)

Im Histogramm entspricht der 1. Balken dem Bezugsfall mit einem Wert von ca. 24.000 Bq/a; unten angegeben ist die Kategorie, die aussagt welche Art von Parameter geändert wurde.

Zur Illustration des Austrags von Radionukliden, die nur in der flüssigen Phase transportiert werden, wird wiederum  $^{59}\text{Ni}$  als Indikator benutzt. Der Austrag dieses Radionuklids ist in Abb. 3.83 für alle Variationsrechnungen dargestellt. Für den Austrag der gelösten Radionuklide ist der Gasdurchbruchzeitpunkt der oberen Abdichtung völlig unerheblich. Der Korrosionszeitpunkt der Abdichtung auf der 4. Sohle ist ein wichtiger Faktor, der den Radionuklidaustrag beeinflusst. In den Rechenfällen GP 2.2 bis GP 2.8 wird die Gasbildung nach /BEC 09/ entweder mit einem geringen Gasbildungsinventar oder mit einer niedrigen Gasbildungsrate parametrisiert. Dabei wird die höchste Austragsrate nicht für die geringste mögliche Gasbildung berechnet, da in diesem Fall auch viel Lösung in den ELB West-/Südfeld einströmt und sich der Auspressvorgang der Lösung über einen langen Zeitraum erstreckt. Da eine starke Gasbildung zur Folge hat, dass keine Lösung oder Lösung erst spät eindringt, wird der höchste  $^{59}\text{Ni}$ -Austrag von einem mittleren Gasbildungsinventar (Rechenfall GP 2.3) bestimmt.



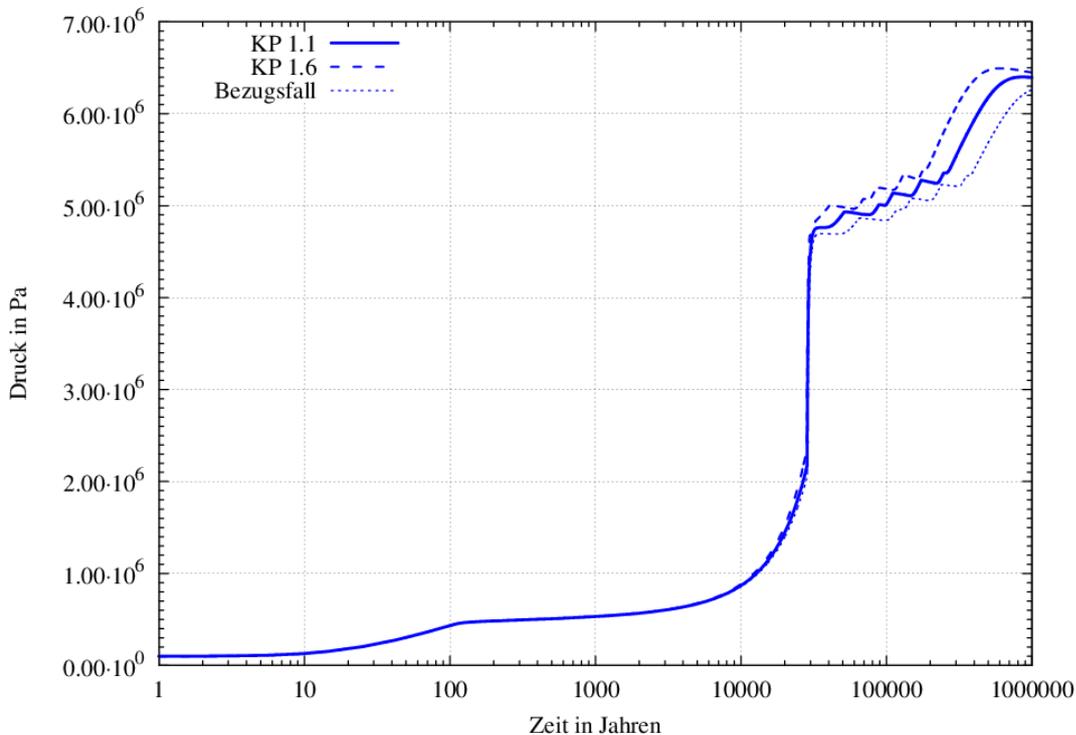
**Abb. 3.83** Maximaler <sup>59</sup>Ni-Austrag aller Rechenfälle (erweitertes Modell, „mit relevantem Lösungszutritt“)

Im Histogramm entspricht der 1. Balken dem Bezugsfall mit einem Wert von  $1,1 \cdot 10^5$  Bq/a; unten angegeben ist die Kategorie, die aussagt welche Art von Parameter geändert wurde.

Die Änderung der Konvergenzparameter hat einen ähnlichen Effekt auf den Korrosionszeitpunkt der Abdichtung auf der 4. Sohle wie die Änderung der Gasbildungsparameter. Auch hier sind nicht die Änderungen der Konvergenzrate für den Austrag entscheidend die eine extreme Auswirkung auf die Druckentwicklung haben (das wären beispielsweise die Rechenfälle KP 1.2 oder KP 1.3). Vielmehr ist der zeitliche Aspekt der Druckerhöhung über der Flüssigkeitssäule im ELB West-/Südfeld nach der Korrosion der Abdichtung von Bedeutung. Dieser ist nach der Korrosion der Abdichtung und bis ca. 100.000 a, also während der Auspressphase, tatsächlich deutlich höher als im Bezugsfall. Dies ist in Abb. 3.84 dargestellt. Der jeweils maximale Druck ist zwar ebenso deutlich erhöht, der Austragspeak von <sup>59</sup>Ni liegt jedoch in allen Rechenfällen zwischen 50.000 und 100.000 a Jahren, so dass die Auspressphase (mit den in Kap. 3.2.2 und in /NAV 16b/ erwähnten charakteristischen „Stufen“) entscheidend für den <sup>59</sup>Ni-Austrag ist.

Im Gegensatz dazu ist der Einfluss der Änderung der hydraulischen Parameter auf den <sup>59</sup>Ni-Austrag direkt zu erkennen (siehe Abb. 3.83). Eine Erhöhung der Permeabilität aller Abdichtungen (Rechenfälle HP 1.0 bis HP 1.3) oder der der einzelnen repräsentativen Abdichtungen zum ELB West-/Südfeld (Rechenfall HP 6.0) sowie die Erhöhung

des Diffusionskoeffizienten für die Radionuklide in der flüssigen Phase um eine Größenordnung auf  $1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  (Rechenfall HP 2.1) hat eine Erhöhung des  $^{59}\text{Ni}$ -Austrags zur Folge.



**Abb. 3.84** Vergleich des Druckaufbaus im Südfeld auf Höhe der 1. Sohle

Rechenfälle KP 1.1 (Lithostatischer Druck der 4. Sohle wird zur Berechnung der Konvergenz genutzt), KP 1.6 (ein geringerer Spannungsexponent von  $m=4$  wird zur Berechnung der Konvergenz genutzt) und Bezugsfall (B1.0, Lithostatischer Druck der 3. Sohle und  $m=5$ ). Zu Details siehe /FRI 16/

Insgesamt lassen sich für das erweiterte Modell aus den Ergebnissen der Variationsrechnungen für die Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“ folgende Aussagen treffen:

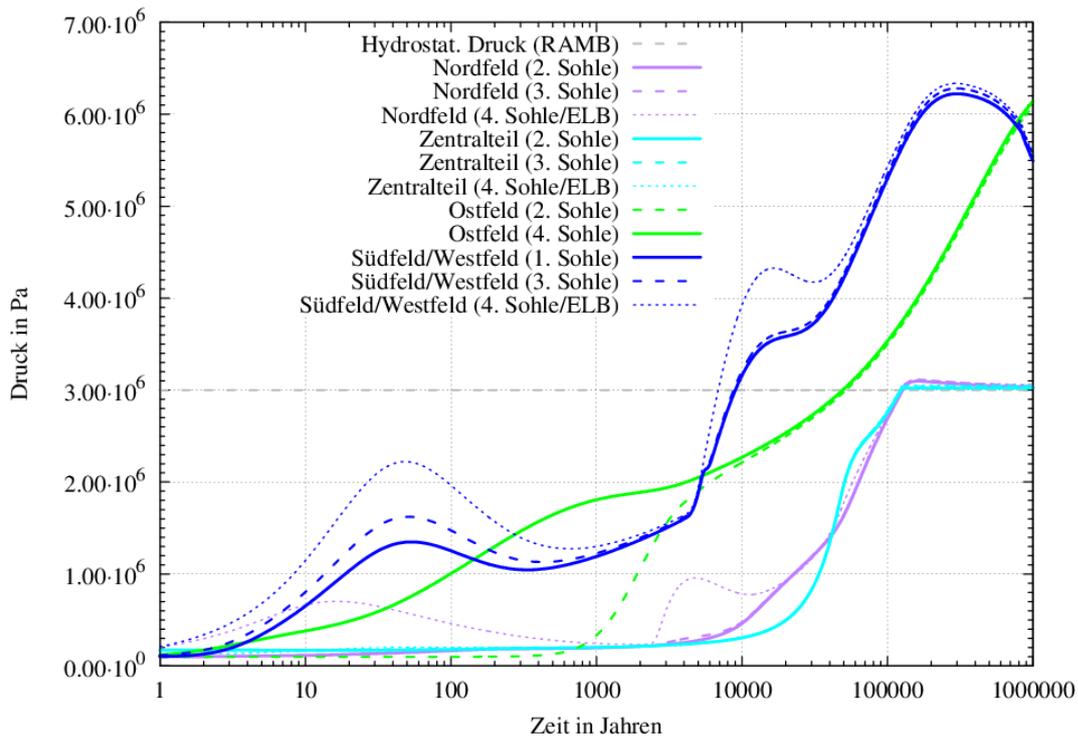
- Die Druckentwicklung wird auch im erweiterten Modell im Allgemeinen von der Gebirgskonvergenz dominiert und nicht von der Gasbildung.
- Der Zeitpunkt des Gasdurchbruchs und der vollständigen Korrosion der Abdichtungen
  - sind entscheidende Aspekte, die das Systemverhalten stark beeinflussen und

- werden in entgegengesetzter Weise vom im Südfeld herrschenden Gasdruck gesteuert.
- Der Gaseindringdruck als Zweiphasenflussparameter hat den größten Einfluss sowohl auf das Systemverhalten als auch auf die  $^{14}\text{C}$ -Austragsrate.
- Die Veränderung „hydraulischer“ Parameter (z. B. die Erhöhung der Permeabilität) hat einen direkten Einfluss auf den Austrag der gelösten Radionuklide (z. B.  $^{59}\text{Ni}$  oder  $^{99}\text{Tc}$ , etc.), aber keinen unmittelbaren Einfluss auf die Austragsrate von  $^{14}\text{C}$ . Diese wird durch komplexe Prozesse im Endlagersystem mit bestimmt.

### **3.3 Komplexes Modell**

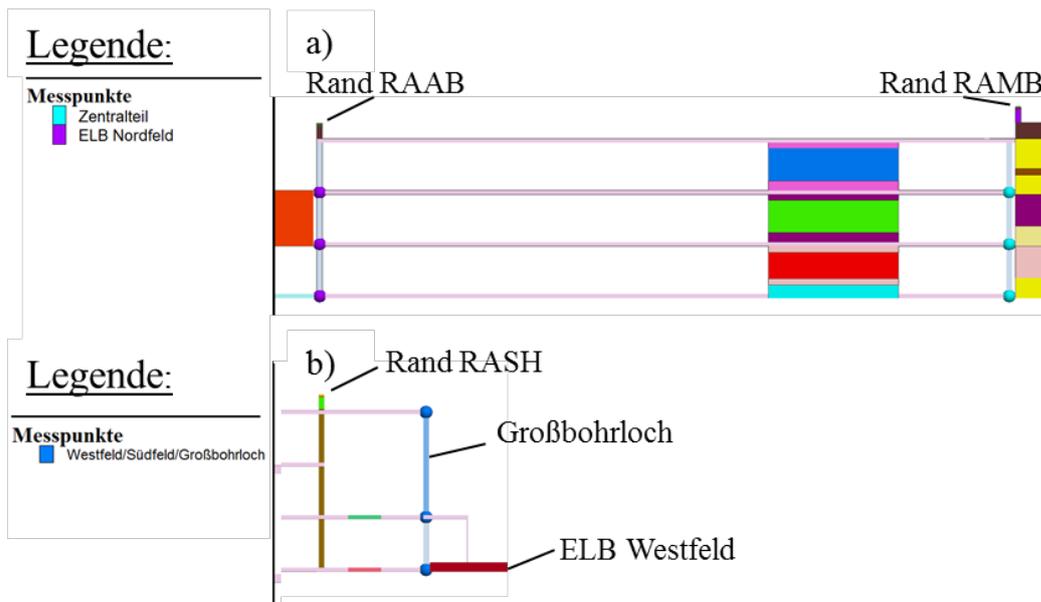
#### **3.3.1 Bezugsfall „trockene Grube“**

Die Ergebnisse des Bezugsfalls „trockene Grube“ unterscheiden sich in einigen Punkten deutlich von denen der Bezugsfälle des Basis- und erweiterten Modells. Da nicht alle Modellbereiche des Basis- und erweiterten Modells eine direkte Entsprechung im komplexen Modell besitzen ist ein direkter Vergleich der Modellergebnisse nicht immer möglich. Vergleichbar und ähnlich ist jedoch die Druckentwicklung in den verschiedenen Teilbereichen des ERAM. Für das komplexe Modell ist diese in Abb. 3.85 zu sehen.



**Abb. 3.85** Druckentwicklung im ERAM für unterschiedliche Modellbereiche

Farben kennzeichnen einzelne Modellbereiche; durchgezogene und gestrichelte Linien verschiedene Teufen: Cyan: Messpunkte an den vertikalen Verbindungen des ELB Zentralteils zum Rand RAMB (vgl. Abb. 3.86 a)); Violett: Messpunkte an den vertikalen Verbindungen vom ELB Nordfeld zum Rand RAAB (vgl. Abb. 3.86 a)); Blau: Messpunkte am Übergang Südfeld/Westfeld unterhalb des Großbohrlochs (vgl. Abb. 3.86 b)) ; Grün: Messpunkte im Ostfeld direkt seitlich der Abdichtungen; Grau gestrichelt: Druck am Rand/erforderlicher Druck im Endlager zum Entweichen

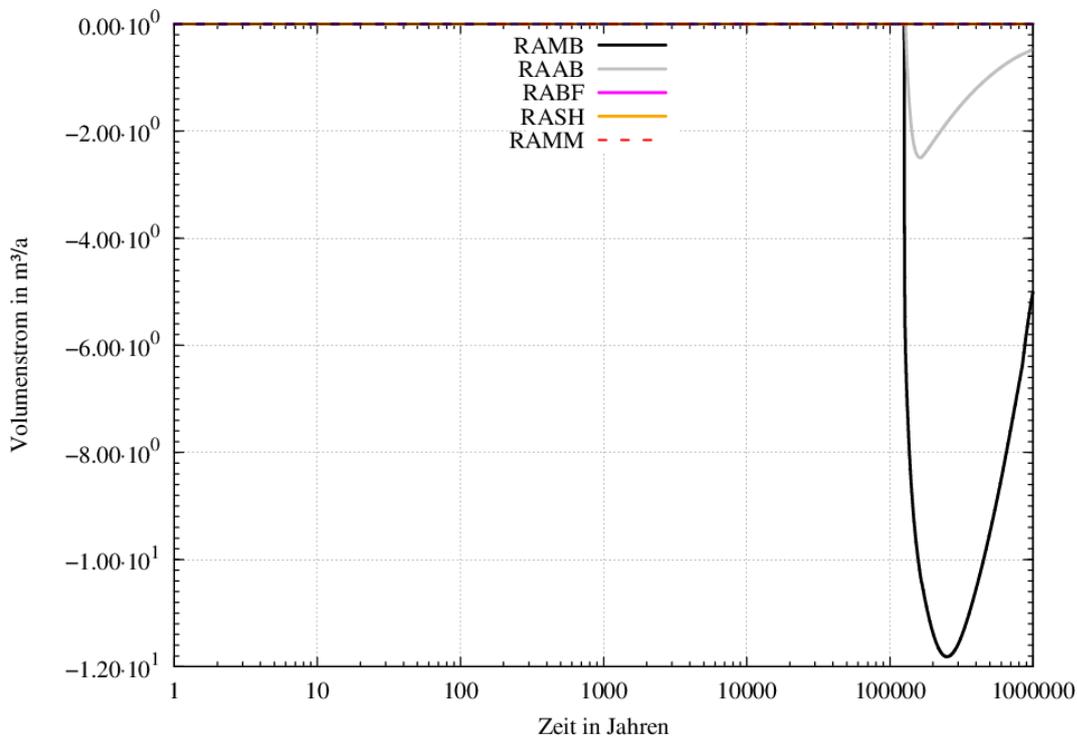


**Abb. 3.86** Messpunkte für Druckkurven in der Umgebung a) der Ränder RAAB und RAMB und b) des Randes RASH und des Großbohrlochs

Deutlich erkennbar ist, dass es zwar lokale, teufenbezogene Unterschiede in der Druckentwicklung gibt, diese aber zum Beispiel am Übergang Südfeld/Westfeld insgesamt der Druckentwicklung im West-/Südfeld im Basis- bzw. erweiterten Modell ähnelt (vgl. Abb. 3.3). Auch hier wird nach ca. 300.000 a ein maximaler Druck von nahezu 6,5 MPa erreicht. Ebenso zeigt die Druckentwicklung für die nicht abgedichteten Bereiche (ELB Nordfeld und ELB Zentralteil), dass dort nach ca. 126.800 a der zum Entweichen von Gas aus dem Endlager benötigte kritische Druck von 3 MPa erreicht wird. Dieser Zeitpunkt liegt ca. 1.800 a später als im Basismodell und ist fast identisch (200 a früher) mit dem im erweiterten Modell ermittelten (vgl. Kap.3.1.1 und 3.2.1).

Der aus dem Erreichen des kritischen Drucks resultierende Ausstrom von Gas für alle potenziell aktiven Ränder ist in Abb. 3.87 dargestellt. Für den Bezugsfall sind sowohl der Rand „RAAB“, der mehrere Sohlen über dem ELB Nordfeld lokalisiert ist, als auch der Rand „RAMB“, der sich mehrere Sohlen über dem ELB Zentralteil befindet, aktiv. Die postulierte Lokation dieser Randelemente (die nicht im Zusammenhang mit rezenten Lösungszutritt steht) ist einer der wesentlichen Unterschiede zwischen diesem komplexen Modell und dem Basis- und erweiterten Modell sowie ebenfalls zur Lokation der Randelemente aus /BEC 09/, /NIE 09/. Näheres dazu ist in /FRI 16/ ausgeführt. Diese Ränder sind in Abb. 1.6 als „Rand Abbaustrecke 5“ (RAAB) bzw. „Rand Abbau 1a“ (RAMB) bezeichnet und auch in Abb. 3.86. Über den Rand RAMB strömt mit ca. 12 m<sup>3</sup>/a deutlich mehr Gas aus dem Endlager als über den Rand RAAB mit ca. 2 m<sup>3</sup>,

insgesamt ist jedoch der Gesamtgasaustrag mit ca.  $14 \text{ m}^3/\text{a}$  äquivalent zu den im Basis- und erweitertem Modell errechneten Werten (vgl. Abb. 3.2 sowie Abb. 3.56).



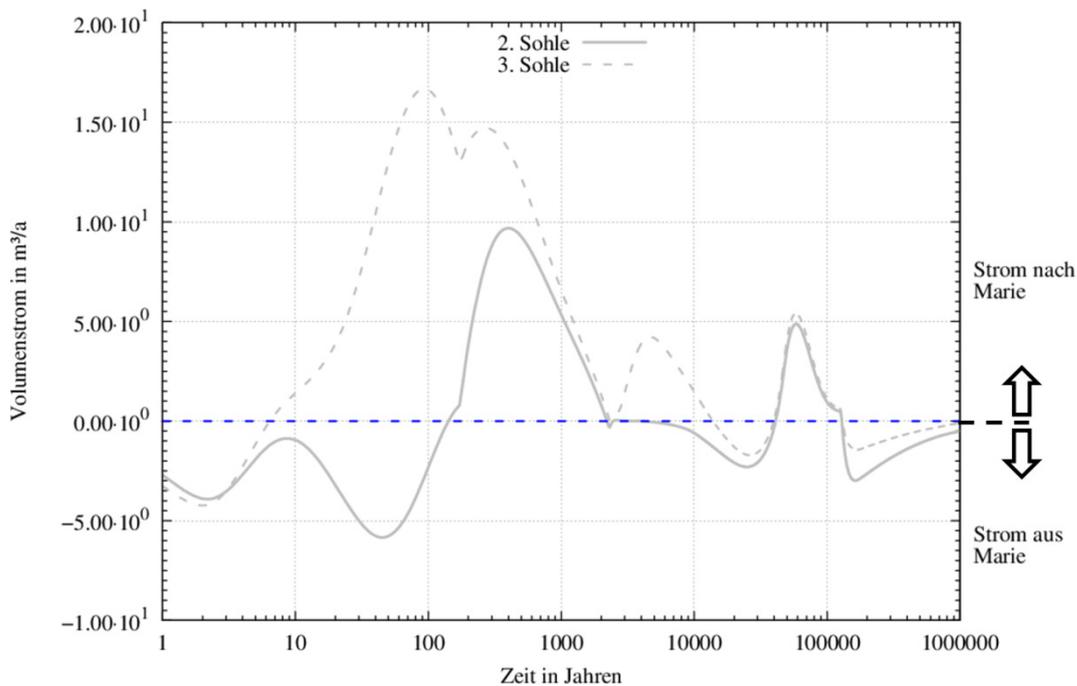
**Abb. 3.87** Gasstrom in das bzw. aus dem ERAM

positiv: Gasstrom in die Grube; negativ: Gasstrom aus der Grube.

Der Grund für den deutlich unterschiedlichen Ausstrom über die beiden Ränder liegt an deren jeweiliger Lokation und wird deshalb durch den in verschiedenen Lokationen des Endlagers unterschiedlich ablaufendem Konvergenzprozess gesteuert. Der Rand RAMB liegt direkt am First des Abbaus 1a (siehe /FRI 16/) und am Rande des Zentralteils, welches ein komplexes Kammer/Schwebe/Strecken-System darstellt. Dieser Abbau fungiert zunächst als Gasreservoir und nach Erreichen des kritischen Drucks kann das Gas aus dieser Kammer entweichen. Die Permeabilität des Abbaus ist auch nach langer Zeit groß ( $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ ), da sie als konstant angenommen wird, auch wenn der Porenraum durch die Gebirgskonvergenz reduziert wird. Der Rand RAAB ist dagegen über einer Strecke lokalisiert, die nicht als Gasreservoir fungieren kann und deren Permeabilität durch Gebirgskonvergenz und Firstspaltreduktion abnimmt und so 100.000 a bereits eine geringe Permeabilität von  $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$  besitzt. Entsprechend kann nur wenig Gas nachströmen.

Im Gegensatz zum Basis- und erweitertem Modell kann im komplexen Modell nicht vollständig bilanziert werden, welche Gas-, Flüssigkeits- und Radionuklidströme im Endla-

gersystem bewegt werden. Die Anzahl der dazu notwendigen Punkte, für die die Variablen jedes Zeitschritts gespeichert werden müssten, übersteigt das technisch mögliche. Das gilt auch für die Umgebung der beiden aktiven Randelemente RAAB und RAMB), zwischen denen ein Kammer/Schwebe/Strecken-System liegt.



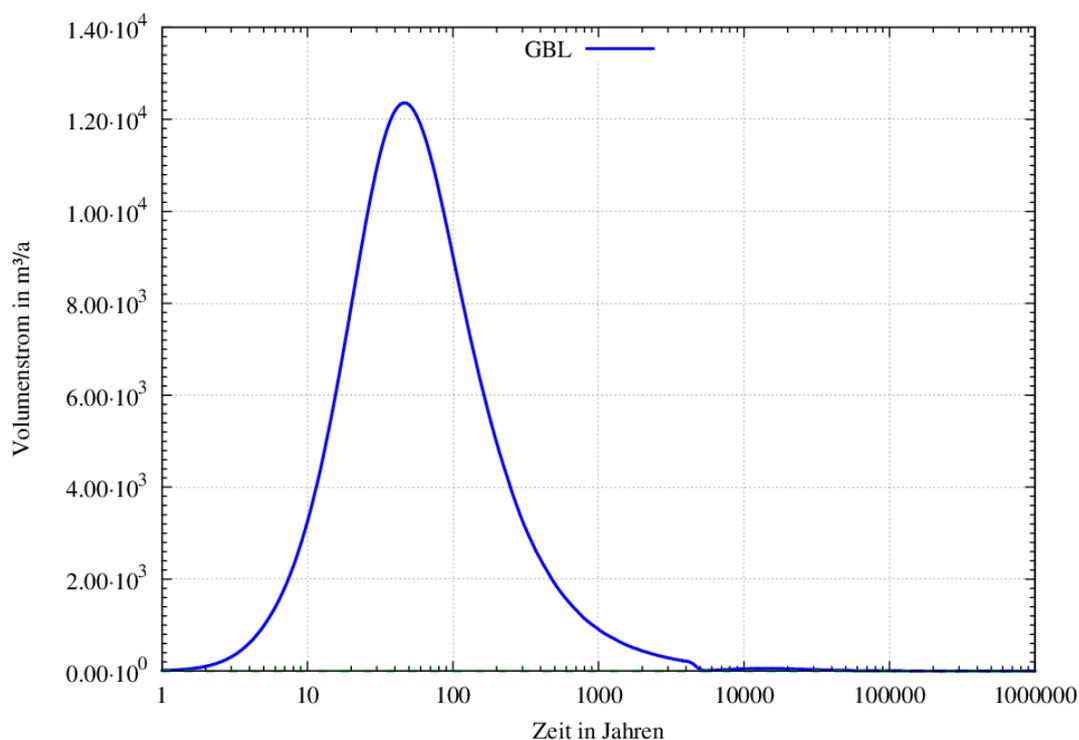
**Abb. 3.88** Gasstrom in und aus der Grube Marie

Positiv: Gasstrom in die Grube Marie; negativ: Gasstrom aus der Grube Marie

Für vereinzelte Messpunkte ist eine solche Bilanzierung jedoch möglich. Im Bereich des Übergangs von der Grube Marie zur Grube Bartensleben gibt es zwei Verbindungsstrecken auf der 2. und 3. Sohle (Lokation siehe Abb. 3.86): Messpunkte auf der 2. und 3. Sohle über dem ELB Nordfeld), für die eine Darstellung des Stroms möglich ist. Dieser Gasstrom ist in Abb. 3.88 dargestellt. Neben der Tatsache, dass der Gasstrom für beide Sohlen zeitweilig deutliche Unterschiede aufweist (zwischen 10 und 100 a unterscheidet sich z. B. die Strömungsrichtung auf beiden Sohlen) ist deutlich zu erkennen, dass ab dem Zeitpunkt des Erreichens des kritischen Drucks nach 126.800 a das Gas auf beiden Sohlen in Richtung der Randelemente, also aus der Grube Marie in Richtung Grube Bartensleben strömt.

Eine Bilanzierung ist ebenso zur Untersuchung der Strömungsprozesse in der Umgebung des geplanten Großbohrlochs im West-/Südfeld möglich. In Abb. 3.89 ist zu erkennen, dass im Maximum ca. 12.000 m³/a Gas über das Großbohrloch vom Westfeld in das Südfeld strömen. Dieses Maximum ist bereits nach 50 a erreicht. Danach verrin-

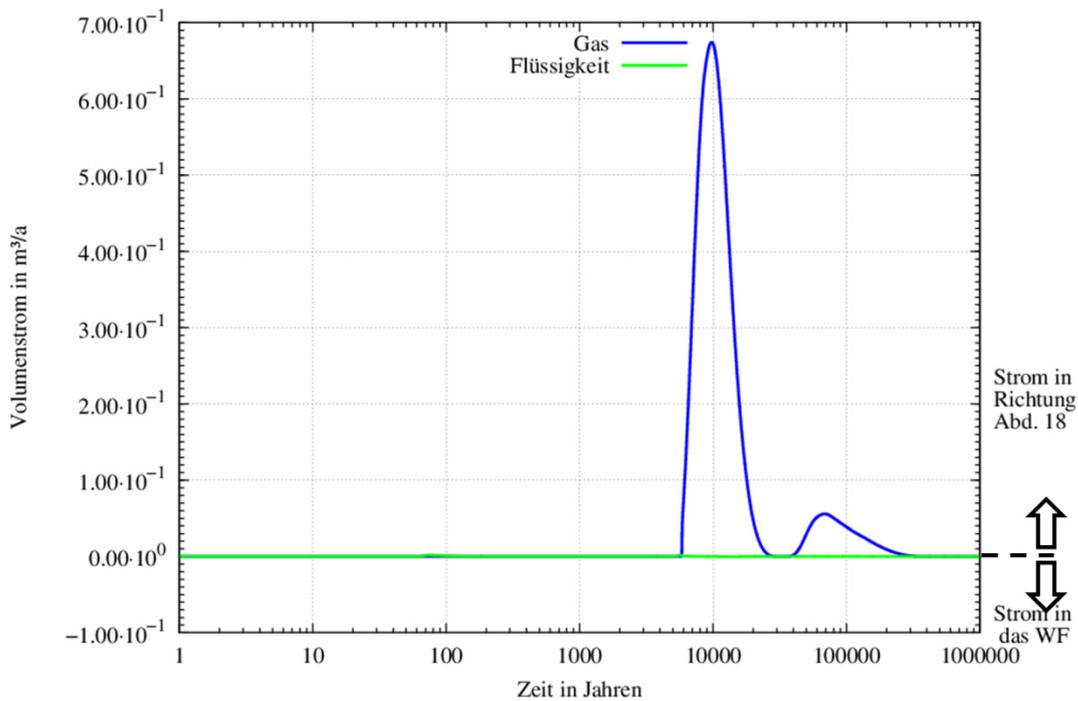
gert sich der Gasstrom vom Westfeld in das Südfeld kontinuierlich nach ca. 6.000 a bis auf null. Von ca. 10.000 a bis ca. 20.000 a ist ein Gasausstrom auf einem sehr geringen Niveau erkennbar. Nach dem Peak verringert sich der Ausstrom aus zwei Gründen. Der Druck auf den unterschiedlichen Sohlen des West-/Südfelds gleicht sich bis ca. 7.000 a zunächst an (siehe auch Abb. 3.85), gleichzeitig wirkt die Gebirgskonvergenz, so dass sich in der Umgebung des Großbohrlochs auf der 1. Sohle die Permeabilität des Streckenversatzes bereits nach ca. 6.500 a auf  $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$  verringert hat. Diese minimale Permeabilität verursacht den Abfall des Gasausstroms auf null. Infolgedessen steigt der Druck im Westfeld (bzw. auf der 4. Sohle des Westfeldes) wiederum an (vgl. Abb. 3.85) und induziert einen geringen Strom vom Westfeld in das Südfeld. Nach mehreren 10.000 bzw. 100.000 a gleichen sich der Druck auf den unterschiedlichen Sohlen des West-/Südfelds abermals an und der Ausstrom sinkt erneut.



**Abb. 3.89** Gasstrom aus dem Westfeld über das Großbohrloch in das Südfeld

Trotz der hohen Drücke im Westfeld ist ein kontinuierlicher Strom über die Abdichtungen (Abdichtungen A15 bis A18, siehe Abb. 4.8 in /FRI 16/) aus dem Westfeld in das Südfeld nicht vorhanden. Allenfalls sind Aufsättigungs- und Entsättigungsprozesse der randständigen Gitterelemente einer Abdichtung im Modell zu beobachten. Die Maximalraten dieser Auf- oder Entsättigungsprozesse betragen wenige Liter pro Jahr. Eine Ausnahme bildet Abdichtung 17 (Lokation siehe /FRI 16/ Abb. 4.8), die sich im Modell-

gitter zwischen ELB Westfeld und Abdichtung 18 befindet. Über diese Abdichtung erfolgt zum Zeitpunkt 1.000 a ein Gasausstrom von maximal ca.  $0,7 \text{ m}^3/\text{a}$  in Richtung der Abdichtung 18 (siehe Abb. 3.90). Dieser findet jedoch keine Entsprechung in Abdichtung 18, da die Höhe des Drucks zwischen Abdichtung 17 und 18 nicht ausreicht die Abdichtung 18 soweit zu entsättigen, dass ein Gasstrom möglich ist. Das Gas welches durch die Abdichtung 17 strömt verbleibt letztlich im Westfeld.



**Abb. 3.90** Gas- und Flüssigkeitsstrom durch die Abdichtung 17

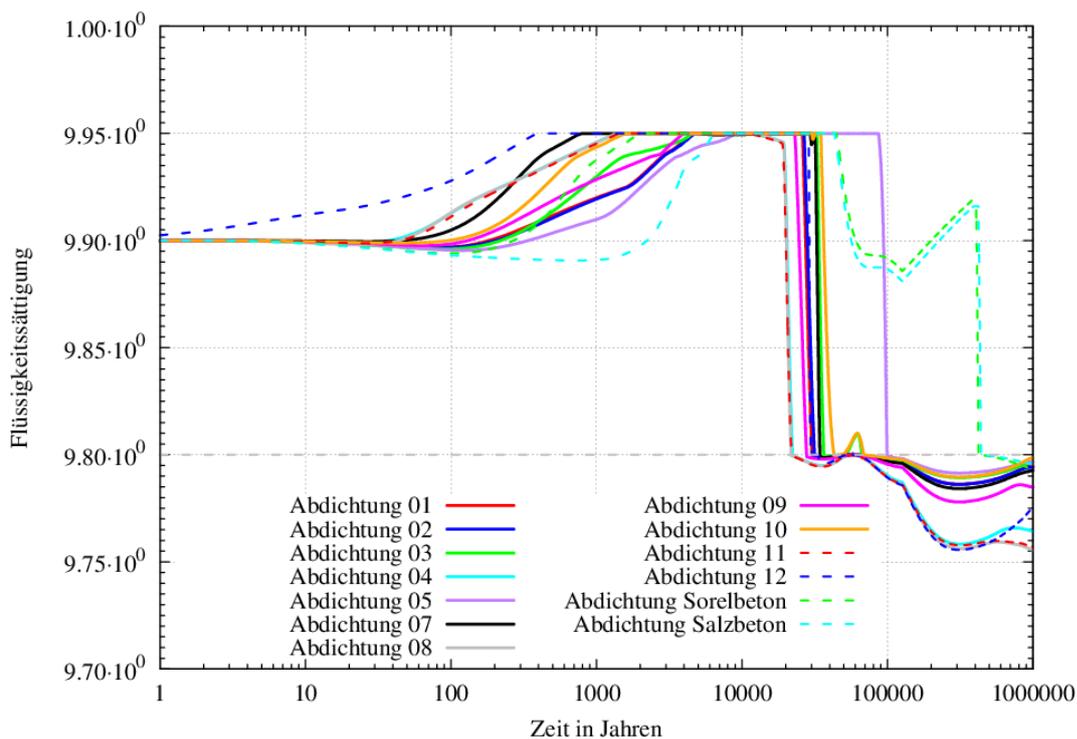
Positiv: Gasstrom in Richtung Abdichtung 18; negativ: Gasstrom in Richtung ELB Westfeld

Wie bereits in den vorhergehenden Kapiteln erläutert wurde, muss zunächst ein Teil der Flüssigkeit verdrängt werden, damit Gas durch eine vollständig mit Flüssigkeit gesättigte Abdichtung strömen kann. Die Flüssigkeitssättigung muss unter 0,98 fallen. Dieser Entsättigungsprozess findet in ausnahmslos allen Abdichtungen zwischen dem Südfeld und dem Zentralteil statt und ist in Abb. 3.91 dargestellt. Spätestens zum Zeitpunkt 100.000 a liegt bei allen diesen Abdichtungen die Flüssigkeitssättigung so niedrig (d.h. unter 98 %), dass ein Gasstrom über die Abdichtung stattfinden kann („Gasdurchbruch“), in der Regel liegt der Zeitpunkt jedoch deutlich früher bei etwa 70.000 a.

Für die Abdichtungen des Ostfelds findet dieser Prozess ebenfalls statt, da auch in diesen Abdichtungen die Flüssigkeitssättigung unter 98 % sinkt, so dass ein Gasaus-

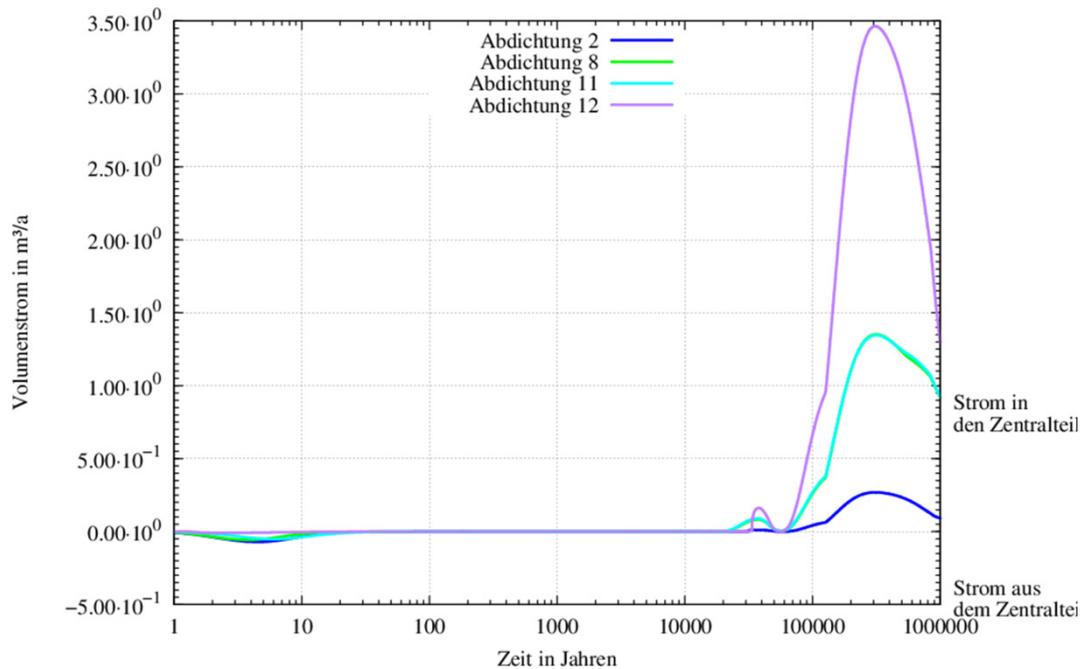
strom möglich ist. Der Zeitpunkt dieses Gasdurchbruchs liegt im Vergleich zu den Abdichtungen des Südfelds jedoch deutlich später bei ca. 500.000 a (siehe Abb. 3.91).

Für nahe zu alle Abdichtungen ist ebenfalls ein Aufsättigungsprozess zu beobachten, der bis zu einen Zeitpunkt von ca. 8.000 a stattfindet. Dieser Prozess hat seine Ursache darin, dass eine initial vorhandene immobile (residuale) Flüssigkeitsmenge, die im Porenraum vorhanden ist, mobil werden kann wenn der Porenraum sich verringert: In allen Gitterelementen ist eine residuale sehr geringe (0,1 %) Flüssigkeitssättigung enthalten. Durch die Gebirgskonvergenz verringert sich der Porenraum. Dadurch steigt die Flüssigkeitssättigung, die eine relative Größe in Bezug auf den Porenraum ist, an (die tatsächliche Flüssigkeitsmenge erhöht sich nicht). Wenn die Flüssigkeitssättigung eine Grenze, die sogenannte residuale Flüssigkeitssättigung übersteigt, wird die Flüssigkeit mobil (siehe auch 2.3 „Phasensättigung“). Diese Flüssigkeit kann damit an Strömungsvorgängen im Endlager teilnehmen. Aufgrund des steigenden Umgebungsdrucks strömt die Flüssigkeit in diesem Fall in die Gitterelemente der Abdichtung ein.



**Abb. 3.91** Sättigungsentwicklung der Abdichtungen zwischen Zentralteil und Südfeld sowie Zentralteil und Ostfeld

Graue, gestrichelte Linie: Unterhalb einer Flüssigkeitssättigung von 0,98 ist ein Gasstrom möglich; nummerierte Abdichtungen liegen zwischen Südfeld und Zentralteil (Abdichtung 6 nicht abgebildet); Abdichtung Sorelbeton und Salzbeton liegen zwischen Zentralteil und Ostfeld



**Abb. 3.92** Gasstrom durch die Abdichtungen zwischen Zentralteil und Südfeld

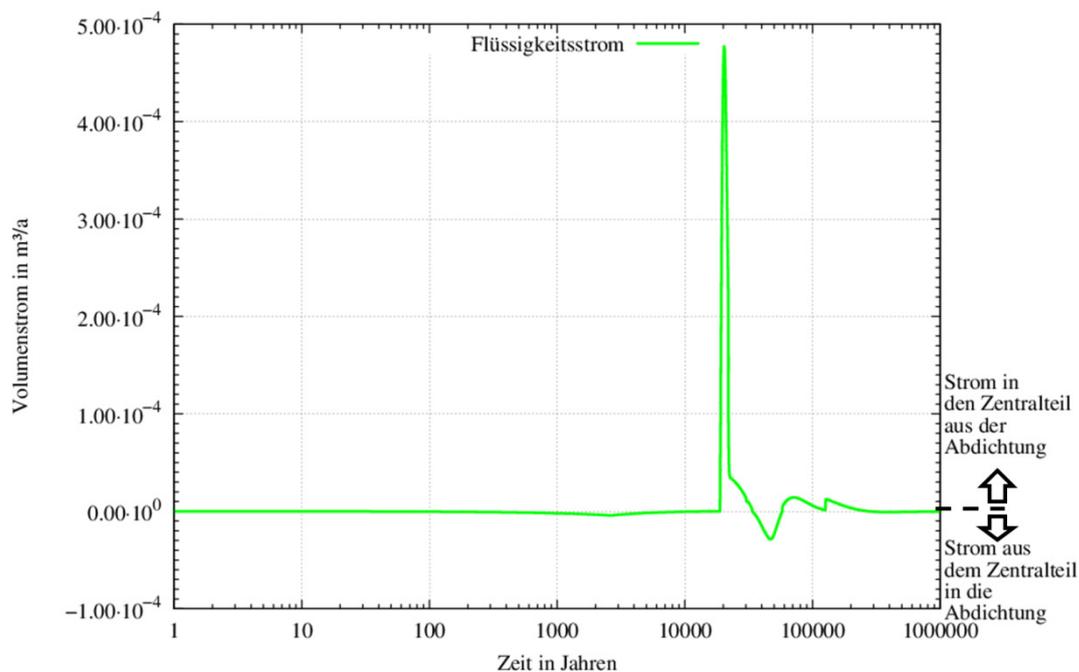
Positiv: Gasstrom in Richtung Zentralteil; Negativ: Gasstrom aus dem Zentralteil

Der Gasstrom durch die Abdichtungen 2, 8, 11 und 12 ist in Abb. 3.92 dargestellt. Es sind für jede Abdichtung zwei, teilweise auch drei Peaks erkennbar: ein früher, niedriger negativer Peak sowie ein später hoher positiver Peak, für die Abdichtungen 11 und 12 zeigt sich zusätzlich kurz vor dem hohen Peak ein niedriger positiver Peak. Der frühe niedrige negative Peak spiegelt wieder, dass zu einem frühen Zeitpunkt kurzzeitig (bis ca. 20 a) der Druck im Zentralteil höher als in der Abdichtung ist und so Gas in das an den Zentralteil angrenzende Gitterelement der Abdichtung strömen kann. Ein kontinuierlicher Gasstrom durch die Abdichtung findet zu diesem Zeitpunkt nicht statt.

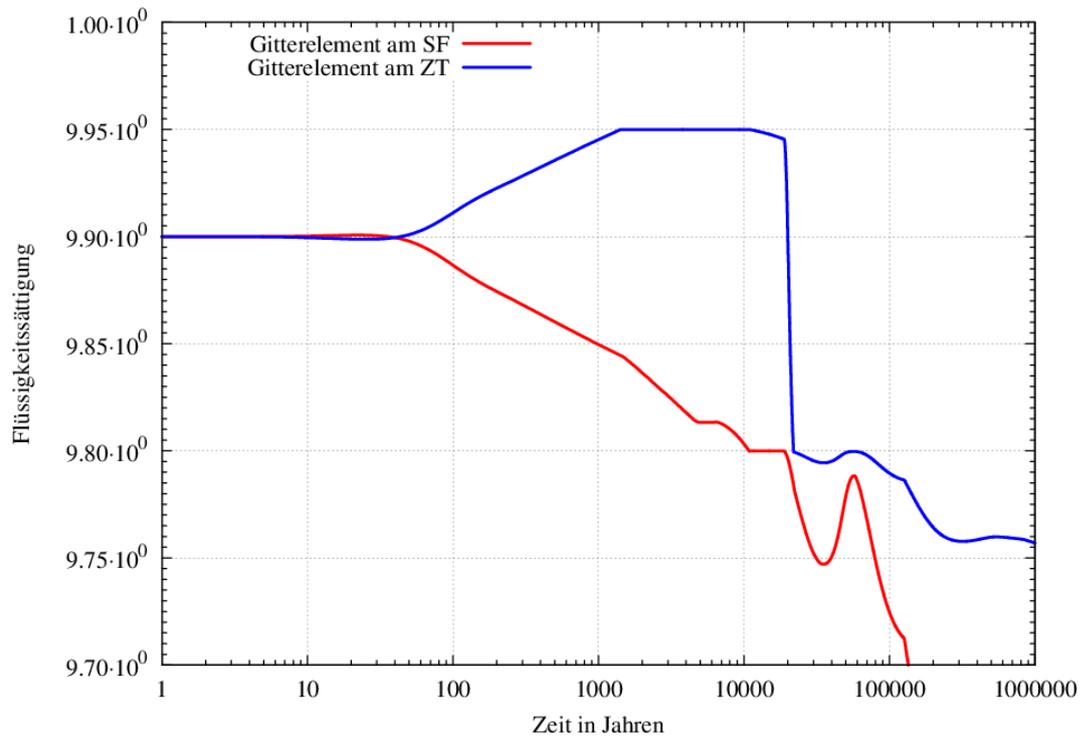
Anhand der Abdichtung 11 auf der 4. Sohle lassen sich die ablaufenden Prozesse darstellen: Der niedrige positive Peak zwischen 20.000 und 50.000 a zeigt, dass zunächst Gas aus der Abdichtung strömen kann, dieser Strom nach kurzer Zeit jedoch wieder zum Erliegen kommt. Der Gasausstrom ist möglich, da aufgrund des höheren Druckes im Südfeld auch Flüssigkeit aus der Abdichtung verdrängt wird (siehe Abb. 3.93, 20.000 a) und somit in beiden Gitterelementen die Flüssigkeitssättigung unter 0,98 absinkt (siehe Abb. 3.94 von 20.000 a bis ca. 50.000 a). Durch das Ausströmen der Flüssigkeit steigt der Kapillardruck an (siehe Abb. 3.95, vor allem im Gitterelement am SF bei 20.000 a). Dies führt wiederum dazu, dass die Flüssigkeit aus den an die Abdichtung grenzenden Gitterelementen in die Abdichtung strömen kann. Der Gasdruck im

Südfeld (siehe Abb. 3.96) ist offensichtlich zu diesem Zeitpunkt (zwischen 20.000 a und 50.000 a) noch nicht hoch genug (zwischen 2,2 MPa und 3,8 MPa), um einen kontinuierlichen Gasstrom durch die Abdichtung zu erzeugen. Der daraus resultierende Anstieg der Flüssigkeitssättigung behindert den Gasfluss, da die Flüssigkeitssättigung im Gitterelement am Zentralteil mehr als 0,98 beträgt (siehe Abb. 3.94, Gitterelement am ZT bei 50.000 a). Dass überhaupt mobile Flüssigkeit in den an die Abdichtungen angrenzenden Gitterelementen vorhanden ist, liegt zum einen an dem vorher stattgefundenen Verdrängungsvorgang der Flüssigkeit aus der Abdichtung, zum anderen an der Mobilisierung der zuvor nur residual vorhandenen Flüssigkeit (siehe oben). Erst der dritte Peak (ab ca. 60.000 a in Abb. 3.92) zeigt einen langfristigen Ausströmvorgang.

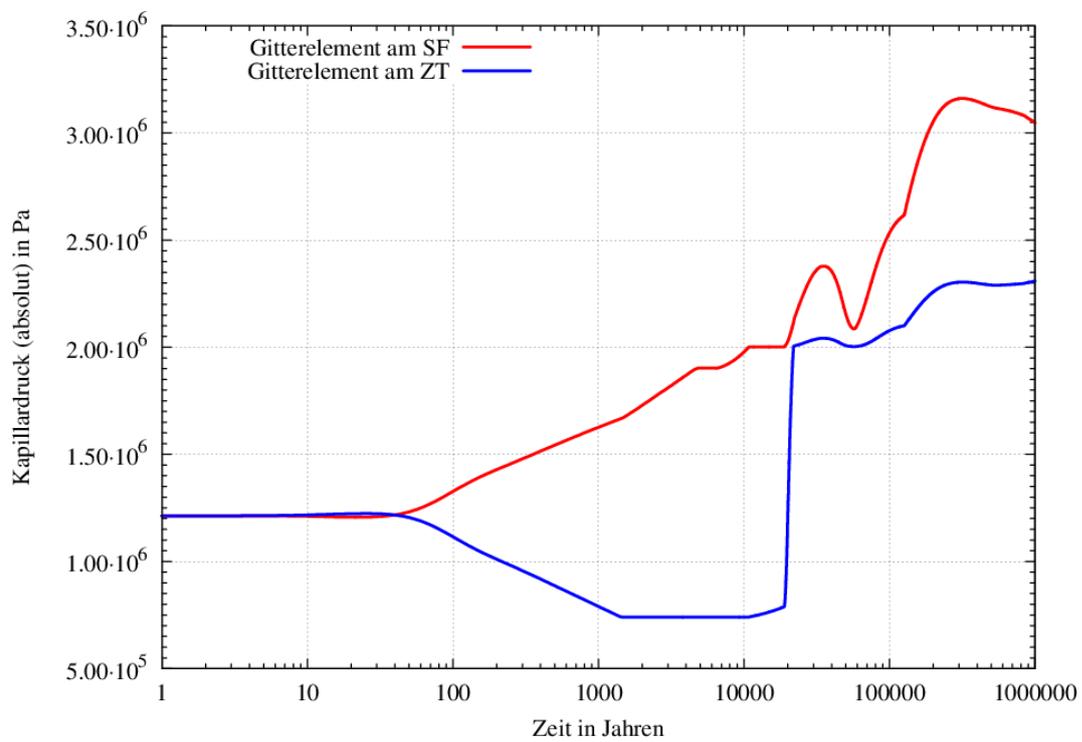
Dieser langfristige Ausströmvorgang kann aufgrund der Sättigungsentwicklung in der Abdichtung und des Drucks im Südfeld stattfinden: Aus der Abdichtung wird ab 60.000 a Flüssigkeit mit einer verringerten Rate über einen langen Zeitraum ausgepresst (siehe Abb. 3.93), so dass die Flüssigkeitssättigung kontinuierlich sinkt (siehe Abb. 3.94). Der Kapillardruck in der Abdichtung steigt zwar ab diesem Zeitpunkt wieder an, sogar bis auf 2,5 MPa bzw. 3,3 MPa (siehe Abb. 3.95, ab 60.000 a), der Druck im Südfeld steigt ab 60.000 a auf deutlich über 5 MPa (siehe Abb. 3.96), so dass ein kontinuierlicher Strom aufrecht erhalten werden kann.



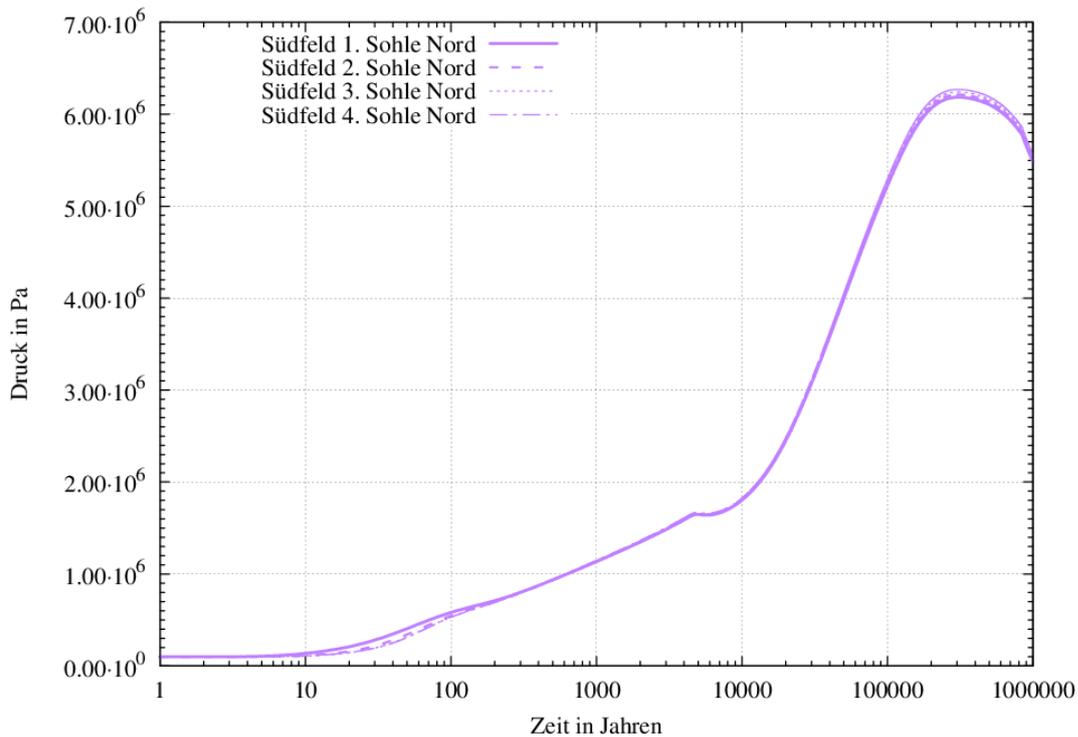
**Abb. 3.93** Flüssigkeitsstrom in bzw. aus der Abdichtung 11



**Abb. 3.94** Sättigungsentwicklung der Abdichtung 11

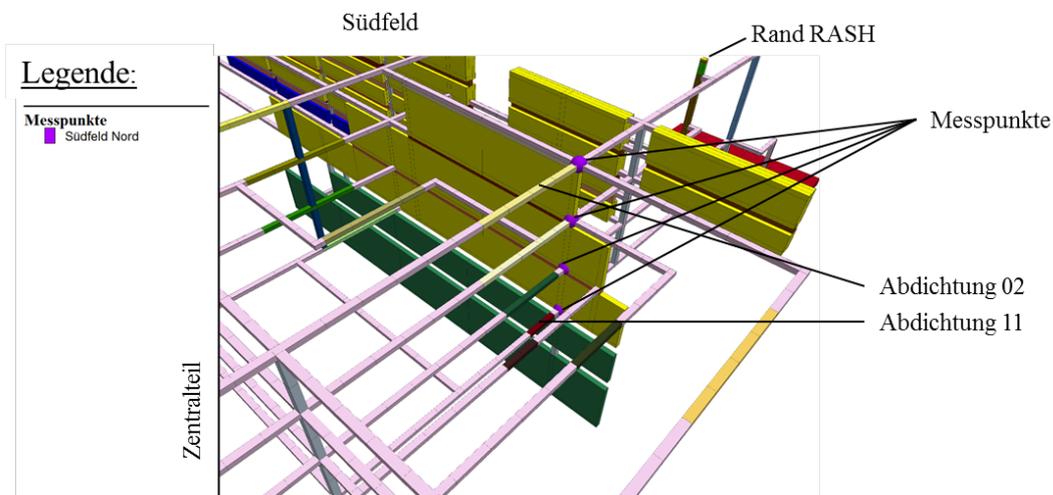


**Abb. 3.95** Kapillardruckentwicklung in der Abdichtung 11



**Abb. 3.96** Druck im Südfeld

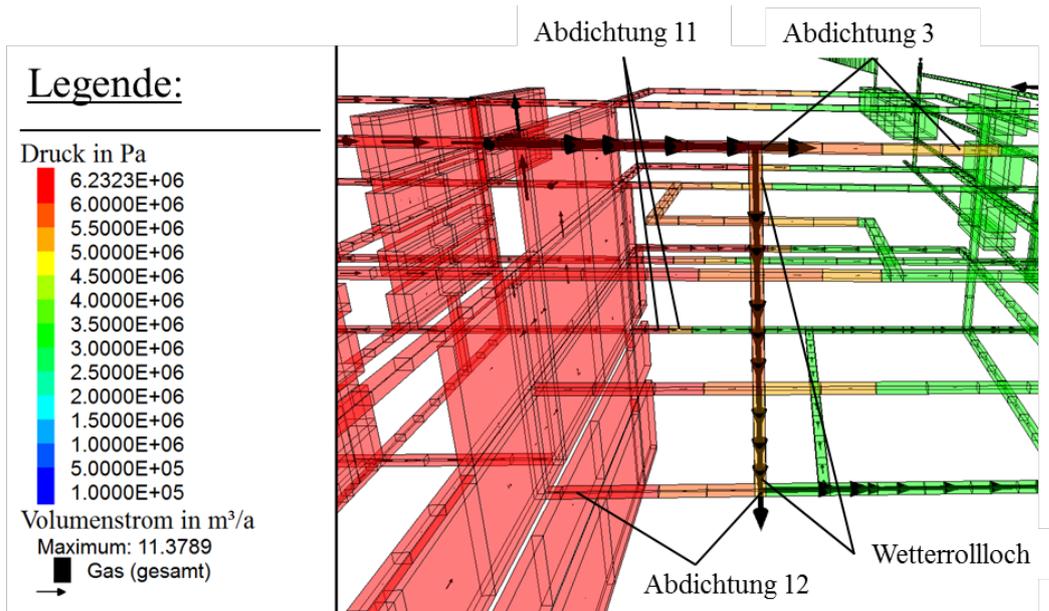
Lokation: An der Nordseite in der vertikalen Verbindung an den Abdichtungen 11 (Sohle 4), 9 (Sohle 3) , 5 (Sohle 2), 2 (Sohle 1); siehe Abb. 3.97



**Abb. 3.97** Messpunkte für Druckkurven in der Umgebung des nördlichen Teils des Südfelds

Der höchste Gasausstrom aus dem Südfeld in den Zentralteil erfolgt über die Abdichtungen 8 und 11 und insbesondere über die Abdichtung 12 (siehe Abb. 3.92). Die durch die Abdichtung 2 strömende Gasmenge ist vergleichbar mit der der anderen (nicht abgebildeten) Abdichtungen. Das ist insofern zunächst überraschend, da sich

Abdichtung 2 auf der 1. Sohle in Strömungsrichtung des Gases befindet, das aus dem Westfeld über das Großbohrloch auf die 1. Sohle des Südfelds strömt. Zum Zeitpunkt des Gasausstroms durch Abdichtung 2 (ca. 200.000 a) erfolgt jedoch kein hoher Gasausstrom aus dem Westfeld mehr, er liegt mit  $4 \text{ m}^3/\text{a}$  in etwa auf dem Niveau des Gasstroms durch die Abdichtung 12. Wie oben bereits erwähnt weisen die Strecken zu diesem Zeitpunkt eine sehr geringe Permeabilität von  $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$  auf, der Gasdruck innerhalb des gesamten Südfelds ist – bis auf geringe teufenbezogene Unterschiede – nahezu identisch (siehe auch Abb. 3.96). Der hohe Gasstrom durch die Abdichtungen 8 und 11 wird durch den geringeren Strömungswiderstand dieser Abdichtungen verursacht, da diese im Vergleich zu den anderen Abdichtungen die kürzesten sind. Der hohe Gasstrom durch die Abdichtung 12 ist dadurch jedoch nicht zu erklären, da diese Abdichtung eine größere Länge (als Abdichtung 8 oder 11) aufweist. Der Gasstrom durch die Abdichtung 12 ist in Abb. 3.98 detailliert dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass der Gasstrom nicht durch die gesamte Abdichtung 12 verläuft, sondern durch das ebenfalls abgedichtete sog. Wetterrollloch. Für den Bezugsfall wird allerdings angenommen, dass die Abdichtung des Wetterrolllochs nach 30.000 a ihre Funktion verliert. Im Modell befindet sich das Gitterelement der Abdichtung 12, welches an den Zentralteil grenzt, unterhalb der Abdichtung der Wetterrolllochs (siehe Abb. 3.98; siehe auch /FRI 16/, Abb. 4.10). Das Gitterelement der Abdichtung 3, welches an das Südfeld grenzt, befindet sich im Modell oberhalb des Wetterrolllochs (siehe Abb. 3.98; siehe auch /FRI 16/, Abb. 4.10). Diese Annahme und die Lokation der Abdichtungen im Modell führen dazu, dass im Anschluß an den Funktionsverlust der Rollloch-Abdichtung und der Entsättigung des Gitterelements der Abdichtung 12 am Zentralteil sowie des Gitterelements der Abdichtung 3 am Südfeld der geringste Strömungswiderstand am Wetterrollloch sowie Teilen der Abdichtung 3 und 12 vorhanden ist. Daraus resultiert die höchste Strömungsrate an der Abdichtung 12.

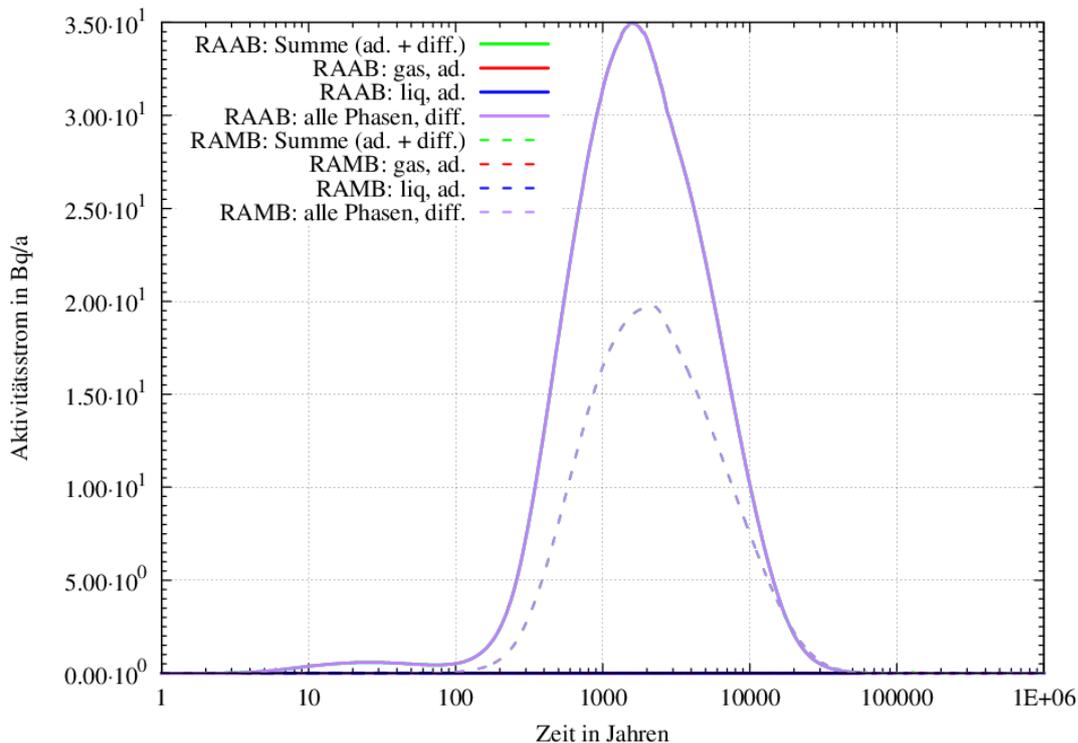


**Abb. 3.98** Gasstrom durch die Abdichtungen 11 und 12 sowie durch das Wetterrollloch zwischen Südfeld (links) und Zentralteil (rechts) zum Zeitpunkt 200.000 a

Schwarze Pfeile: Gasströmungsrichtung. Längster Pfeil im Bild entspricht dabei dem Maximum in der Legende

Da der Gasausstrom über die Abdichtungen sehr spät (ab 60.000 a mit Peak bei 200.000 a) stattfindet, ist im Endlager nur noch ein geringes <sup>14</sup>C-Inventar (Halbwertszeit: 5.730 a) vorhanden. Da in den nicht abgedichteten Bereichen der zum Ausstrom über den Modellrand erforderliche Druck erst nach 126.800 a erreicht wird, tritt aus dem Endlager kein <sup>14</sup>C advektiv aus. Wie sowohl im Basis- als auch im erweiterten Modell ist die Diffusion von Radionukliden über die Randlelemente jedoch immer möglich. Deshalb ist in Abb. 3.99, in der der <sup>14</sup>C-Austrag über die Randlelemente RAMB und RAAB dargestellt ist, zwischen 1.000 a und 2.000 a ein diffusiver <sup>14</sup>C-Austrag von maximal 35 Bq/a zu sehen. Im Vergleich zum Basis- und erweiterten Modell ist der Peak deutlich später (ca. 2.000 a statt 20 a) und geringer, da die Wegstrecke von den ELB zu den Randlelementen im komplexen Modell deutlich länger ist als in den anderen Modellen.

Der Austrag über den Rand RAAB ist deutlich höher als über den Rand RAMB. Dies liegt an der initialen <sup>14</sup>C-Konzentration in den ELB, deren Entfernung zu den jeweiligen Randlelementen am geringsten ist. Die <sup>14</sup>C-Konzentration im Nordfeld, welches dem Rand RAAB am nächsten liegt, ist höher als die <sup>14</sup>C-Konzentration im Zentralteil, dessen Entfernung zum Rand RAMB am kürzesten ist.



**Abb. 3.99**  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom aus dem ERAM

Für die Randelemente RAAB (durchgezogene Linie) und RAMB (gestrichelt); grün: Ausstrom als Summe aller Phasen (advektiv und diffusiv); rot: Ausstrom mittels der Gasphase (advektiv), blau: Ausstrom mittels der flüssigen Phasen (advektiv); violett: Ausstrom mittels beider Phasen (diffusiv)

Zusammenfassend lassen sich für das komplexe Modell zum Bezugsfall „trockene Grube“ folgende Aussagen treffen:

- Die abgedichteten Einlagerungsbereiche sind von den Prozessen in der nicht abgedichteten Grube nahezu völlig entkoppelt: Der Druck entwickelt sich unabhängig voneinander und Transportprozesse zwischen den abgedichteten und nicht abgedichteten Bereichen finden – wenn überhaupt – nur in geringem Maße statt.
- Zum Zeitpunkt des Beginns des advektiven Gasaustrags aus dem ERAM (126.800 a) ist  $^{14}\text{C}$  nur noch in so geringfügiger Menge vorhanden (Halbwertszeit: 5.730 a), dass kein  $^{14}\text{C}$  aus dem Endlager tritt.
- Hinsichtlich des Austrags aus dem Endlager (Gas & Radionuklide) gibt es nahezu keinen Unterschied zum Basis- oder erweitertem Modell. Das gilt allerdings nicht für den diffusiven Austrag: Durch die größere Entfernung der ELB zu

den Rändern ist der diffusive Austrag geringer und der Peak der Austragsrate liegt deutlich später.

Die Gemeinsamkeiten und geringen Unterschiede zu den Ergebnissen des Basis- und des erweiterten Modells zeigen für die Systementwicklung trockene Grube, dass ein aufgrund der Komplexität des Modells nicht im Modell vorhandener Mischungsbereich im Vergleich zu Modellen mit modelliertem Mischungsbereich kaum unterschiedliche Resultate hervorbringt. Im Vergleich zu den Ergebnissen der Simulationen zum Basismodell und zum erweiterten Modell erweisen sich dieselben Prozesse als relevant. Obwohl die Komplexität des Modells deutlich erhöht ist, wurden nur wenige Effekte beobachtet, die durch die Komplexität des Modells gesteuert werden (z. B. Prozesse an den Abdichtungen, diffusiver Austrag).

### **3.3.1.1 Prozesse im Endlagersystem**

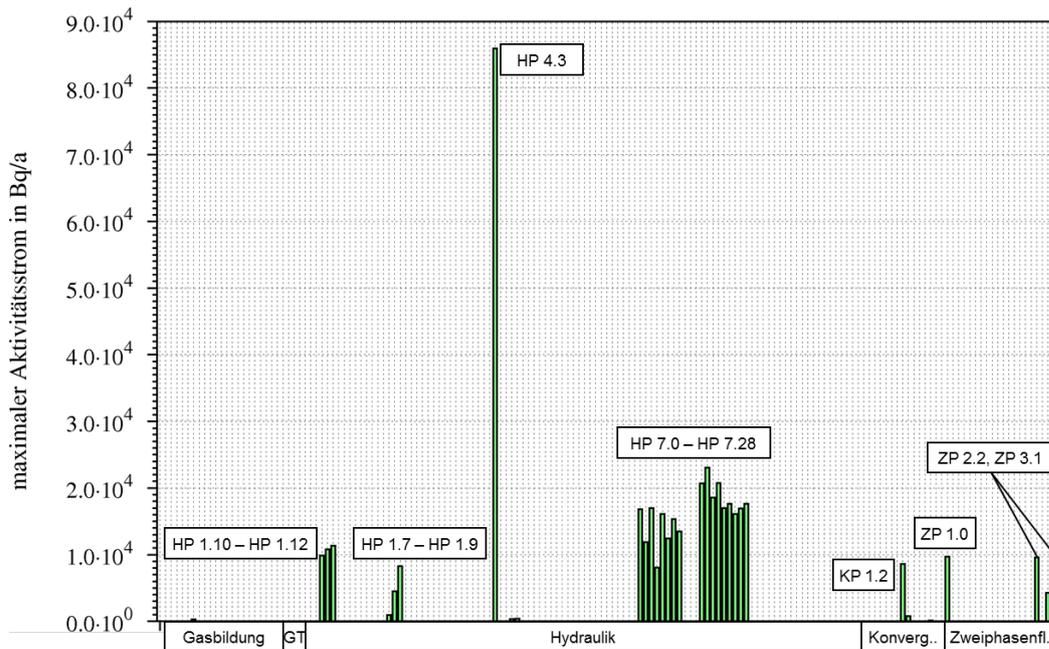
Wie für das Basis- und das erweiterte Modell auch, wird im Folgenden auf bemerkenswerte Variationsrechnungen eingegangen. Die folgenden Rechenfälle werden deshalb näher betrachtet, Details zu den Parametervariationen sind in /FRI 16/ dargelegt:

- Der „what-if“ Fall „mangelhafte Schachtabdichtung“ (siehe /NIE 09/). Dies ist Rechenfall HP 4.3.
- Reduktion des Gaseindringdrucks aller Abdichtungen auf null (Rechenfall ZP 1.0), sowie „Abschaltung“ der Kapillardruckfunktion aller Materialien (z. B. Abdichtungen, Strecken, etc.) in Rechenfall ZP 2.2.
- Unentdeckte Wegsamkeiten: Dies sind:
  - die Rechenfälle HP 7.0 bis HP 7.9: Jeweils ein vollständiger Streckenabschnitt (inkl. Abdichtung) zwischen Zentralteil und Südfeld (bzw. Ostfeld) ist hydraulisch durchlässig (Permeabilität:  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ ),
  - die Rechenfälle HP 7.10 bis HP 7.19: Jeweils ein vollständiger Streckenabschnitt (inkl. Abdichtung) zwischen Zentralteil und Südfeld (bzw. Ostfeld inkl. D-Gesenk, siehe /FRI 16/) ist hydraulisch durchlässig, alle weiteren Parameter (z. B. Flüssigkeitssättigung, Kapillardruckfunktion) werden ebenfalls so gewählt, dass die Durchlässigkeit erhöht wird (Für die jeweilige Abdich-

tung gilt: Permeabilität:  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ ; Flüssigkeitssättigung: 1 %, Kapillardruckfunktion: ausgeschaltet),

- die Rechenfälle HP 7.20 bis HP 7.27: wie im zweiten Spiegelstrich, jedoch wird angenommen, dass sich die Wegsamkeit aus dem Südfeld bis zum Abbau 1a (inkl. vertikale Verbindungen) fortsetzt,
  - der Rechenfall HP 7.28 in welchem alle unentdeckten Wegsamkeiten gleichzeitig betrachtet werden.
- Variation der initialen Flüssigkeitssättigung der Abdichtungen von 1 % bis 90 % (HP 1.7 bis HP 1.12).
  - Variation der Permeabilität der vertikalen Verbindungen (von  $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$  auf  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  im Fall HP 10.0).
  - Variation der Permeabilität der vertikalen Verbindungen (von  $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$  auf  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  sowie ein geringerer Verfüllgrad der Strecken (65 % statt 90 %; Rechenfall HP 11.0) und zusätzlich die Nichtbetrachtung der Gebirgskonvergenz (Rechenfall HP 11.1).

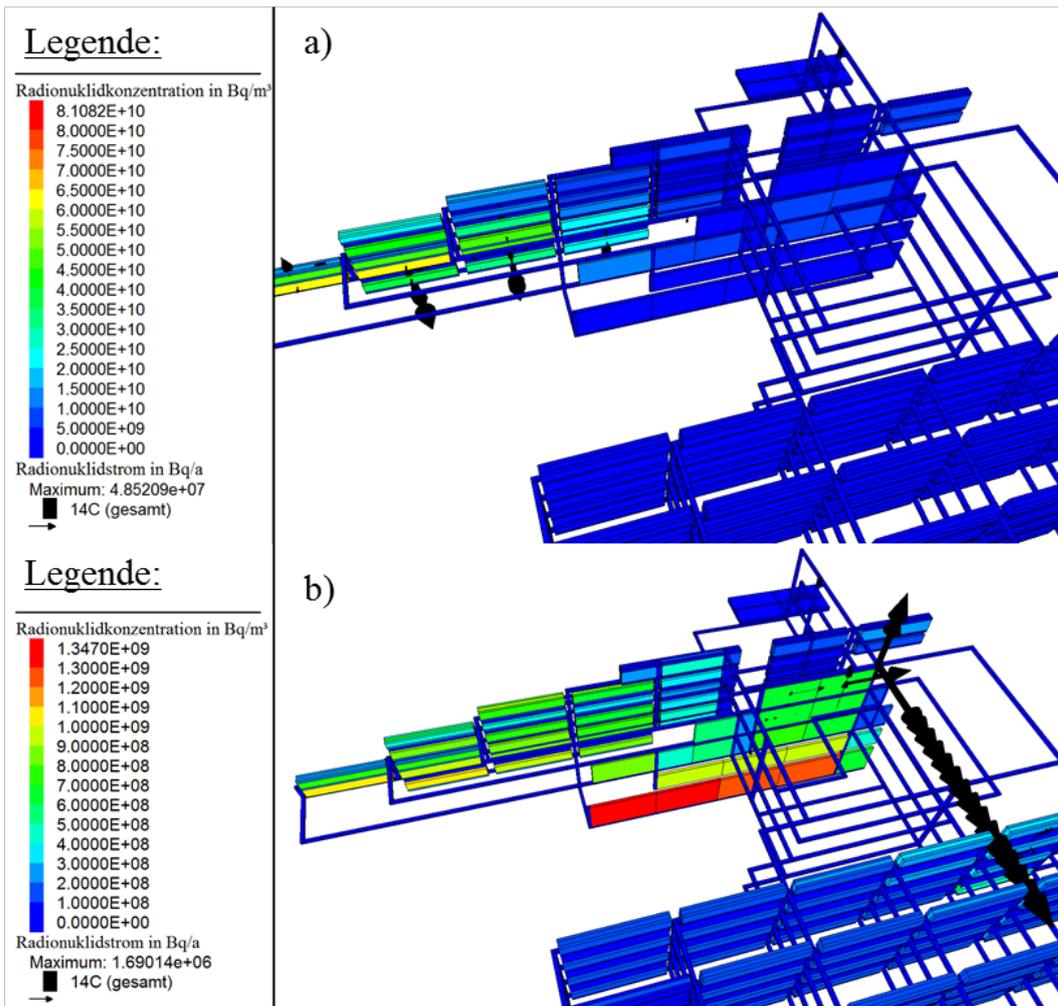
In Abb. 3.100 ist der maximale  $^{14}\text{C}$ -Ausstrom aus dem ERAM über den Rand RAMB für alle hier untersuchten Rechenfälle dargestellt. Insgesamt ist der Ausstrom eher gering. Auffallend ist der hohe Austrag für den Rechenfall HP 4.3. Dabei handelt es sich um den „what-if“ Fall „mangelhafte Schachtabdichtung“ (siehe /NIE 09/). Der Austrag erfolgt hier nicht über den Rand RAMB. Es wird vielmehr angenommen, dass durch eine mangelhafte Abdichtung des Schachts Bartensleben Gas und Radionuklide über den Rand RASH (siehe Abb. 1.6; Rand RASH entspricht dort „Rand Schacht Bartensleben“), der sich zwischen Westfeld und Südfeld befindet, austreten kann.



**Abb. 3.100** Maximaler  $^{14}\text{C}$ -Austrag aller Rechenfälle aus dem ERAM über den Rand RAMB (komplexes Modell, „trockene Grube“)

Im Histogramm entspräche der 1. Balken dem Bezugsfall mit einem Wert von ca. 20 Bq/a (nicht sichtbar); unten angegeben ist die Kategorie, die aussagt welche Art von Parameter geändert wurde, für das komplexe Modell hinzugekommen ist die Kategorie „Gt“ in welcher die interne Struktur des Gitters geändert wurde. Für den Rechenfall HP 4.3 erfolgt der Austritt nicht über den Rand RAMB, sondern über den Rand RASH

Interessant ist der Austrag für die Rechenfälle HP 7.0 bis HP 7.28. Für diese Rechenfälle wurden verschiedene unentdeckte Wegsamkeiten angenommen (siehe /FRI 16/). Diese wurden durch die Verwendung einer hohen Permeabilität ( $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ ) sowie einer niedrigen Flüssigkeitssättigung (1 %) so parametrisiert, dass eine durchgehende Wegsamkeit für Fluide vom Südfeld bis zum Rand RAMB existiert. Der dennoch geringe Austrag resultiert vor allem daraus, dass der zum Ausströmen über die Randelemente erforderliche kritische Druck im Endlager erst zu späten Zeitpunkten (je nach Rechenfall frühestens ab 60.000 a) erreicht wird und zu diesem Zeitpunkt der weitaus größte Teil des  $^{14}\text{C}$  bereits zerfallen ist. Außerdem führt die Existenz einer unentdeckten Wegsamkeit im Vergleich zum Bezugsfall (siehe Abb. 3.101 a)) dazu, dass sich die Radionuklide im Südfeld und auch im Zentralteil verteilen können und sich so die  $^{14}\text{C}$ -Konzentration verringert (siehe Abb. 3.101 b)); ein gerichteter Strom in Richtung der Randelemente findet erst nach Erreichen des kritischen Drucks statt.

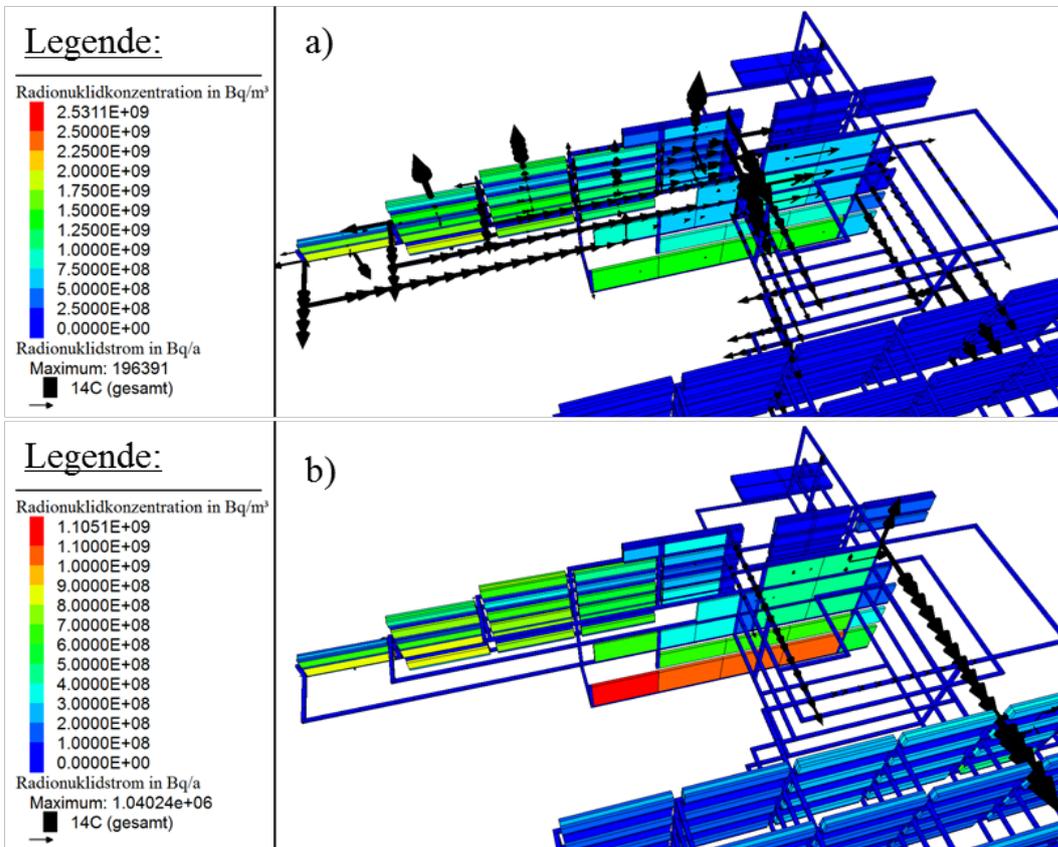


**Abb. 3.101** <sup>14</sup>C-Konzentration im Südfeld und Zentralteil für den a) Bezugsfall und b) Rechenfall HP 7.20

Rechenfall HP 7.20: eine potentielle unentdeckte Wegsamkeit wird im Norden der Grube Bartsleben zwischen 1. Sohle Zentralteil bis 1. Sohle Südfeld angenommen (vgl. Abb. 7.2 in /FRI 16/), sonst wie Bezugsfall

Die initiale Flüssigkeitssättigung aller Abdichtungen wurden in den Rechenfällen HP 1.7 bis HP 1.12 von 90 % bis 1 % variiert. Die resultierende Erhöhung der Gasdurchlässigkeit und die daraus folgende Verteilung der Radionuklide im Endlagersystem ist vergleichbar – wenn auch nicht so ausgeprägt – mit den oben beschriebenen Rechenfällen zu den unentdeckten Wegsamkeiten. Die <sup>14</sup>C-Konzentration für den Fall einer Flüssigkeitssättigung der Abdichtung von 1 % (HP 1.12) ist in Abb. 3.102 a) dargestellt, für den Rechenfall HP 7.28 in welchem alle postulierten unentdeckten Wegsamkeiten auch tatsächlich im Modell vorhanden sind in Abb. 3.102 b). Im Vergleich zum Bezugsfall (vgl. Abb. 3.101 a)) ist die <sup>14</sup>C-Konzentration geringer, im Vergleich zum Fall einer unentdeckten Wegsamkeit (vgl. Abb. 3.101 b)) aber höher. Eine sehr

geringe  $^{14}\text{C}$ -Konzentration und weitere Verteilung des  $^{14}\text{C}$  im Zentralteil zeigt der Fall HP 7.28. Die zahlreichen postulierten unentdeckten Wegsamkeiten zwischen Südfeld und Zentralteil sowohl im Süden und Norden haben zu einer Konzentrationsverringering des  $^{14}\text{C}$  geführt.



**Abb. 3.102**  $^{14}\text{C}$ -Konzentration im Südfeld und Zentralteil für den Rechenfall a) HP 1.12 und b) HP 7.28

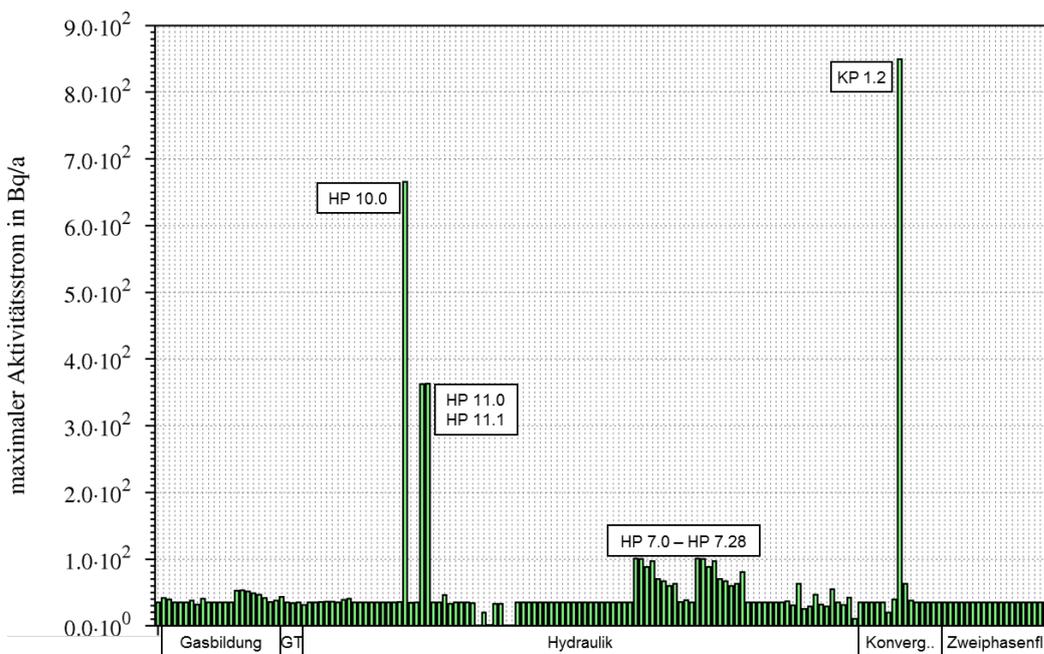
Rechenfall HP 1.12: allen Abdichtungen wurde eine initiale Flüssigkeitssättigung von 1 % zugewiesen, sonst wie Bezugsfall; Rechenfall HP 7.28: alle potentiellen unentdeckten Wegsamkeiten werden in der Grube Bartensleben zwischen 1. Sohle Zentralteil und 1. bis 4. Sohle Südfeld gleichzeitig postuliert (vgl. Abb. 7.2 in /FRI 16/), sonst wie Bezugsfall

Die Gasdurchlässigkeit der Abdichtungen sowie aller anderen Bereiche (z. B. Strecken, Kammern, Schweben, etc.) wird in den Rechenfällen ZP 1.0 und ZP 2.2 indirekt verändert. Im Rechenfall ZP 1.0 wird der Gaseindringdruck aller Abdichtungen auf null reduziert, im Rechenfall ZP 2.2 wird die Kapillardruckfunktion aller Materialien (z. B. Abdichtungen, Strecken, etc.) „abgeschaltet“, der Kapillardruck wird also nicht betrachtet. In der Konsequenz sind die Abdichtungen für Gas durchlässiger bzw. die Gasdurchlässigkeit aller Materialien wird ausschließlich durch die relative Permeabilitätsfunktion bestimmt. Der Effekt für den  $^{14}\text{C}$ -Transport innerhalb des Endlagers ist damit

wiederum der gleiche wie der oben bereits beschriebene: die Radionuklide aus dem Südfeld können sich im Zentralteil verteilen und ein gerichteter Strom in Richtung der Randelemente findet erst nach Erreichen des kritischen Drucks statt.

Wie auch für das Basis- und das erweiterte Modell führt die Annahme einer erhöhten Konvergenzrate (Rechenfall KP 1.2) dazu, dass der für einen Ausstrom aus dem Endlager erforderliche Druck deutlich früher (hier nach ca. 32.900 a) erreicht wird und so gasförmiges  $^{14}\text{C}$  bereits zu einem vergleichsweise frühen Zeitpunkt aus dem Endlager entweichen kann.

Der maximale  $^{14}\text{C}$ -Austrag aus dem ERAM über den Rand RAAB ist in Abb. 3.103 gezeigt. Über den Rand RAAB ist der  $^{14}\text{C}$ -Austrag für alle Rechenfälle sehr gering. Selbst die maximalen Werte liegen zwei Größenordnungen unter den Maxima für den Rand RAMB (vgl. Abb. 3.100).



**Abb. 3.103** Maximaler  $^{14}\text{C}$ -Austrag aller Rechenfälle aus dem ERAM über den Rand RAAB (komplexes Modell, „trockene Grube“)

Im Histogramm entspräche der 1. Balken dem Bezugsfall mit einem Wert von ca. 35 Bq/a; unten angegeben ist die Kategorie, die aussagt welche Art von Parameter geändert wurde, für das komplexe Modell hinzugekommen ist die Kategorie „GT“ in welcher die interne Struktur des Gitters geändert wurde. Das Ergebnis für den Rechenfall HP 4.3 entspricht dem in Abb. 3.100 und ist hier nicht dargestellt, da aufgrund der Skalierung ansonsten der Austrag der anderen Rechenfälle nicht erkennbar wäre

Es ist ersichtlich, dass die Rechenfälle für die potentiellen unentdeckten Wegsamkeiten (HP 7.0 bis HP 7.28) kaum einen Effekt auf den  $^{14}\text{C}$ -Ausstrom an diesem Rand haben, für diese Rechenfälle ist der Rand RAMB entscheidend. Das gilt auch für den Rechenfall KP 1.2, der für den Rand RAAB zwar den höchsten Peak erzeugt, der aber im Vergleich zum Rand RAMB (vgl. Abb. 3.100) immer noch gering ist.

Auffallend sind insgesamt drei Rechenfälle, die im Vergleich zum Bezugsfall einen geringfügig erhöhten Austragspeak erzeugen. Dies sind die Rechenfälle HP 10.0 sowie HP 11.0 und HP 11.1. Für den Rechenfall HP 10.0 wurde die Permeabilität aller vertikalen Verbindungen von  $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$  auf  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  erhöht. In der Konsequenz kann das im Nordfeld vorhandene  $^{14}\text{C}$  ungehindert auf die höher gelegenen Sohlen strömen. Das Nordfeld befindet sich vier Sohlen unterhalb des Randes RAAB. Dass der  $^{14}\text{C}$ -Ausstrom dennoch niedrig bleibt liegt daran, dass die beschriebene Parameteränderung kaum Auswirkungen auf den Zeitpunkt hat, zu welchem der zum Entweichen des Gases über den Rand erforderliche Druck erreicht wird (Bezugsfall: 126.800 a). Zu diesem Zeitpunkt ist bereits der Großteil des initial vorhanden  $^{14}\text{C}$  zerfallen. Der Austragszeitpunkt liegt aber früh bei ca. 2.000 a. Der hohe Peak in Abb. 3.103 wird somit erzeugt, indem  $^{14}\text{C}$  durch die durchlässigen vertikalen Verbindungen auf die oberen Sohlen strömt und so einen frühen diffusiven Austrag über den Rand RAAB erzeugt.

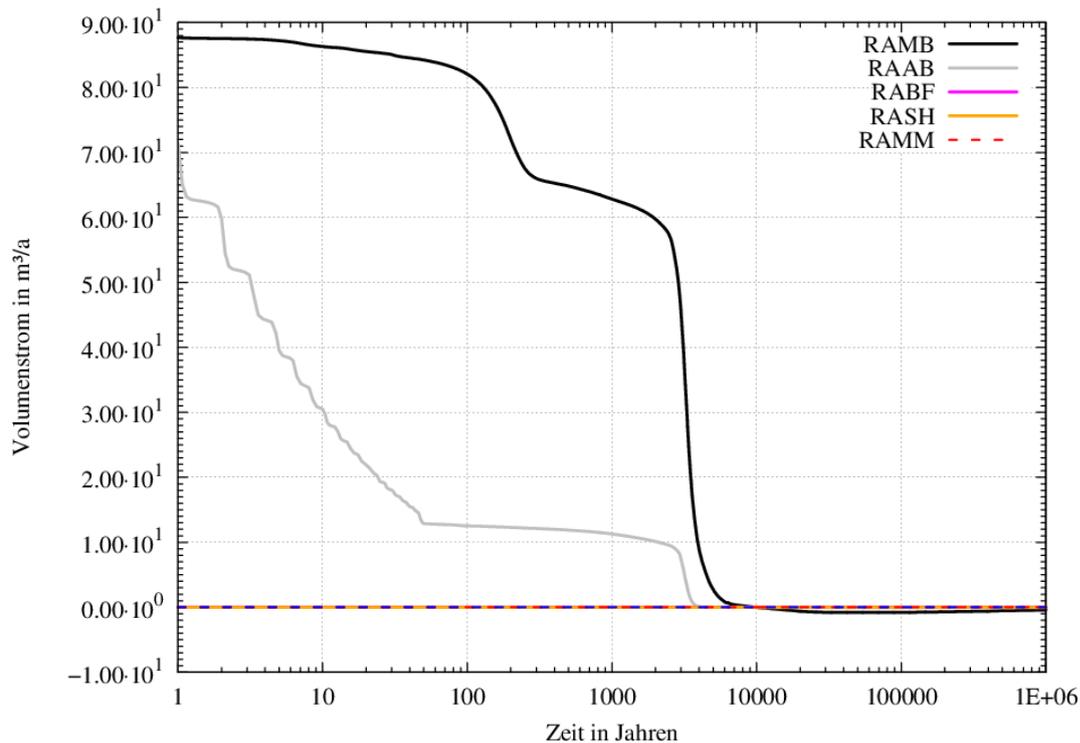
Für die Rechenfälle HP 11.0 und HP 11.1 wurden die gleichen Annahmen wie für den Rechenfall HP 10.0 getroffen. Zusätzlich wurde für die Strecken ein größerer Firstspalt angenommen (35 % im Gegensatz zu 10 % für den Bezugsfall; Rechenfälle: HP 11.0 und HP 11.1) sowie darüber hinaus die Gebirgskonvergenz nicht betrachtet (dieses Modul also „ausgeschaltet“; Rechenfall: HP 11.1). Auch in diesem Fall kann das gasförmige  $^{14}\text{C}$  auf die oberen Sohlen strömen und so zu einem erhöhten diffusivem Austrag beitragen. Da in diesen Rechenfällen auch die Strecken eine erhöhte Permeabilität besitzen (HP 11.1) und dies durch den größeren Firstspalt im Vergleich zum Bezugsfall zumindest für einen längeren Zeitraum gilt (HP 11.0), kann sich das  $^{14}\text{C}$  im Endlager-system besser verteilen, so dass die Konzentration insgesamt sinkt und der resultierende  $^{14}\text{C}$ -Austrag aus dem Endlager geringer ist als im Rechenfall HP 10.0.

Insgesamt lassen sich für die Systementwicklung „trockene Grube“ folgende Feststellungen treffen:

- Die Durchlässigkeit der Abdichtungen hat einen merklichen Einfluss auf den  $^{14}\text{C}$ -Austrag des ERAM insbesondere für den Rand RAMB. Die Durchlässigkeit der Abdichtungen wird gesteuert durch:
  - die initiale Sättigung,
  - die initiale Permeabilität sowie
  - den Gaseindringdruck.
- Das  $^{14}\text{C}$  verteilt sich im Endlagersystem, so dass sich die  $^{14}\text{C}$ -Konzentration verringert. Je durchlässiger die Abdichtungen sind, desto besser kann sich das  $^{14}\text{C}$  verteilen und umso geringer ist die  $^{14}\text{C}$  Konzentration im Endlager.
- Die Durchlässigkeit hat kaum einen Einfluss auf den späten Zeitpunkt ( $> 100.000$  a) zu dem der kritische Druck erreicht wird. Das Entweichen von Gas und potenziell auch  $^{14}\text{C}$  ist somit nur nach mehr als 10 Halbwertszeiten möglich.
- Aus der geringen  $^{14}\text{C}$ -Konzentration (auch bei durchlässigen Abdichtungen) und des späten Zeitpunkts des Gasentweichens folgt ein geringer  $^{14}\text{C}$ -Austrag
- Insgesamt ist auch am Rand RAAB ein sehr geringer Austrag zu beobachten, dieser wird jedoch klar von der Durchlässigkeit der vertikalen Verbindungen gesteuert.
- Die Ränder (RAAB und RAMB) liegen nah beieinander und zeigen trotzdem völlig unterschiedliches Verhalten was den  $^{14}\text{C}$ -Austrag betrifft.

### 3.3.2 Bezugsfall „mit relevantem Lösungszutritt“

Für den Bezugsfall mit relevantem Lösungszutritt tritt jeweils über die Randelemente RAAB und RAMB initial  $90 \text{ m}^3/\text{a}$  Lösung zu. Dies ist in Abb. 3.104 dargestellt. Der Gasstrom aus dem ERAM wird in Abb. 3.105 gezeigt.



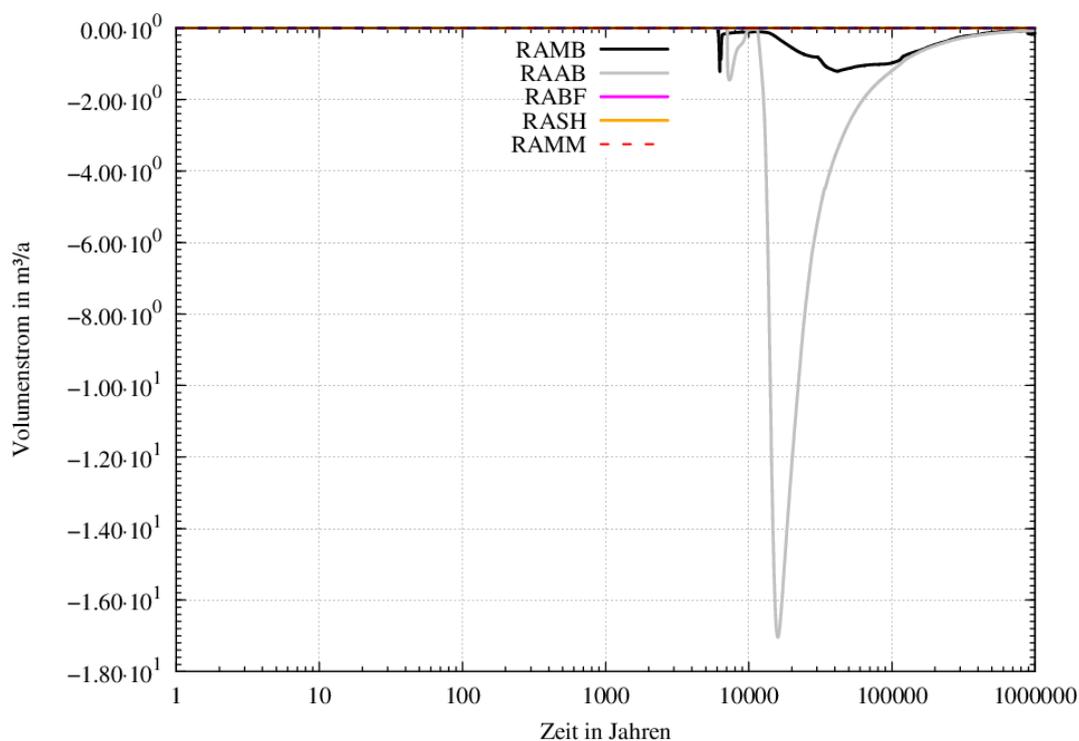
**Abb. 3.104** Einstrom von Lösung in das ERAM

Positiv: Einstrom in die Grube; negativ: Ausstrom aus der Grube; Position der Randelemente siehe Abb. 1.6

In Abb. 3.104 ist deutlich zu erkennen, dass sich der Zustrom/Ausstrom über beide Randelemente bereits nach 1 a (Flüssigkeit) und nach ca. 10.000 a signifikant voneinander und auch von dem der bisher betrachteten Modelle unterscheidet (vgl. Abb. 3.25 und Abb. 3.69). Ähnliches gilt für den Gasstrom aus dem ERAM (siehe Abb. 3.105): auch hier unterscheidet sich der Gasausstrom über die beiden Randelemente deutlich (vgl. Abb. 3.27).

Der Grund für diese Unterschiede liegt in den Eigenschaften der unter den Randelementen liegenden Grubenbaue, die im Basis- und erweiterten Modell in Form des Mischungsbereichs modelliert wurden und deren Transporteigenschaften sich deshalb stark von denen des komplexen Modells unterscheiden (siehe /FRI 16/): Unterhalb des Randes RAMB liegt der Abbau 1a. Dieser hat ein relativ großes Volumen und eine konstant hohe Permeabilität von  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ . Darunter folgen mehrere Schweben/Abbau – Abfolgen. Für die Schweben gilt die Annahme einer sich nicht schließenden Wegsamkeit, so dass diese eine konstante Permeabilität von  $1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  aufweisen. Unterhalb des Randes RAAB liegen auf den Sohlen 1 - 4 je eine Strecke sowie jeweils eine vertikale Verbindung zwischen den Strecken, die die Sohlen miteinander verbindet

(siehe Abb. 1.6). In der Strecke und in den vertikalen Verbindungen ist kaum Porenvolumen vorhanden. Zudem ist die Permeabilität der vertikalen Verbindungen initial bereits sehr klein ( $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ ), verringert sich aber nicht weiter. Die Permeabilität der Strecken nimmt aufgrund der Gebirgskonvergenz kontinuierlich ab, dies erfolgt jedoch auf jeder Sohle aufgrund des variierenden Stützdruckes der Fluide mit unterschiedlicher Geschwindigkeit. Die Strecken auf den Sohlen 2 und 3 weisen in der Umgebung des Randes RAAB bereits nach 10.000 a eine Permeabilität von  $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$  auf, während dies bei der Strecke auf der 1. Sohle erst nach 35.000 a und auf der 4. Sohle erst nach 45.000 a der Fall ist. Aus den genannten Gründen ist der Zustrom bzw. auch der Ausstrom der Flüssigkeit über den Rand RAAB nach mehr als 10.000 a nur sehr gering.

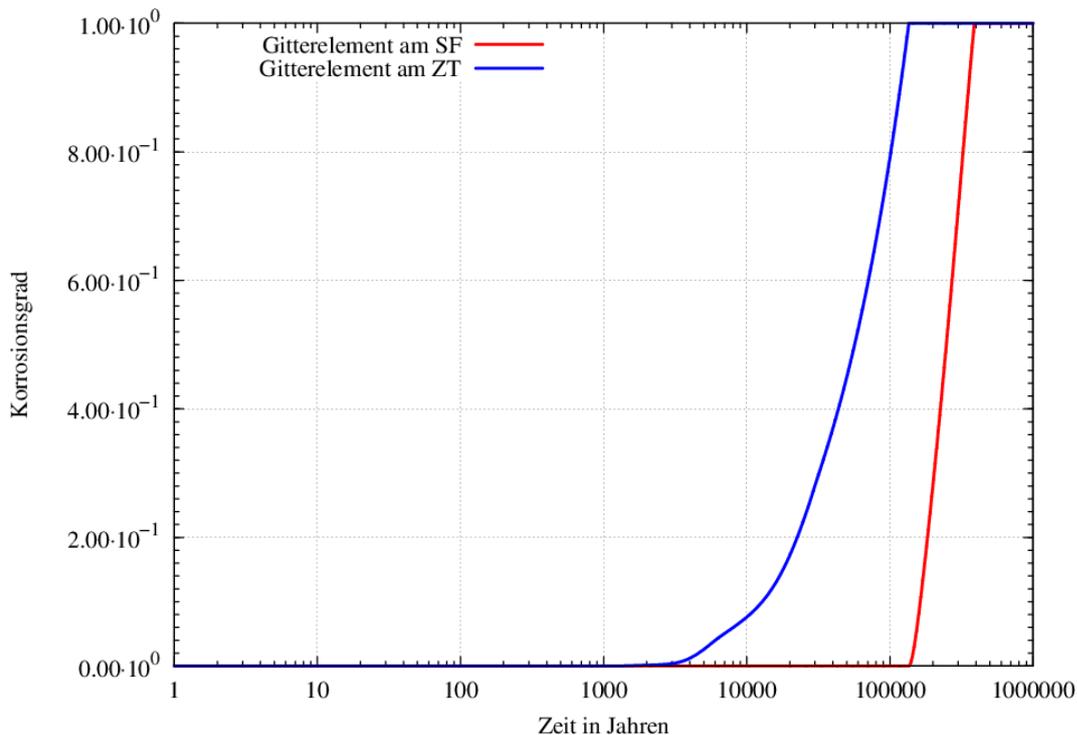


**Abb. 3.105** Gasstrom aus dem ERAM

positiv: Gasstrom in die Grube; negativ: Gasstrom aus der Grube

Ein weiterer Unterschied zu den Resultaten der bisher betrachteten Modelle ist das Fehlen eines Peaks in Abb. 3.104, der einen erneuten Einstrom von Lösung in das Endlager anzeigt. In den bisherigen Modellen ist dieser Peak das Anzeichen für die Korrosion der Abdichtung (Basismodell) bzw. einer der Abdichtungen (erweitertes Modell) zum West-/Südfeld. Diese Korrosion führt zum Funktionsverlust der bzw. einer der Abdichtungen. Dies verursacht den Einstrom von Lösung in das West-/Südfeld und damit einhergehend auch in das Endlager.

Tatsächlich korrodiert auch im komplexen Modell eine der Abdichtungen. Es handelt sich um die mit 26 m Länge im Vergleich zu den anderen Abdichtungen kurze Abdichtung 11 auf der 4. Sohle in der nördlichen Verbindung zwischen Zentralteil und Südfeld (Abb. 4.10 in /FRI 16/). Der Korrosionsverlauf dieser Abdichtung ist in Abb. 3.106 dargestellt. Der vollständige Verlust der Funktionsfähigkeit geschieht im Vergleich zum Basis- und erweiterten Modell (ca. 34.000 a bzw. 28.700 a) aber erst sehr spät nach ca. 389.000 a.

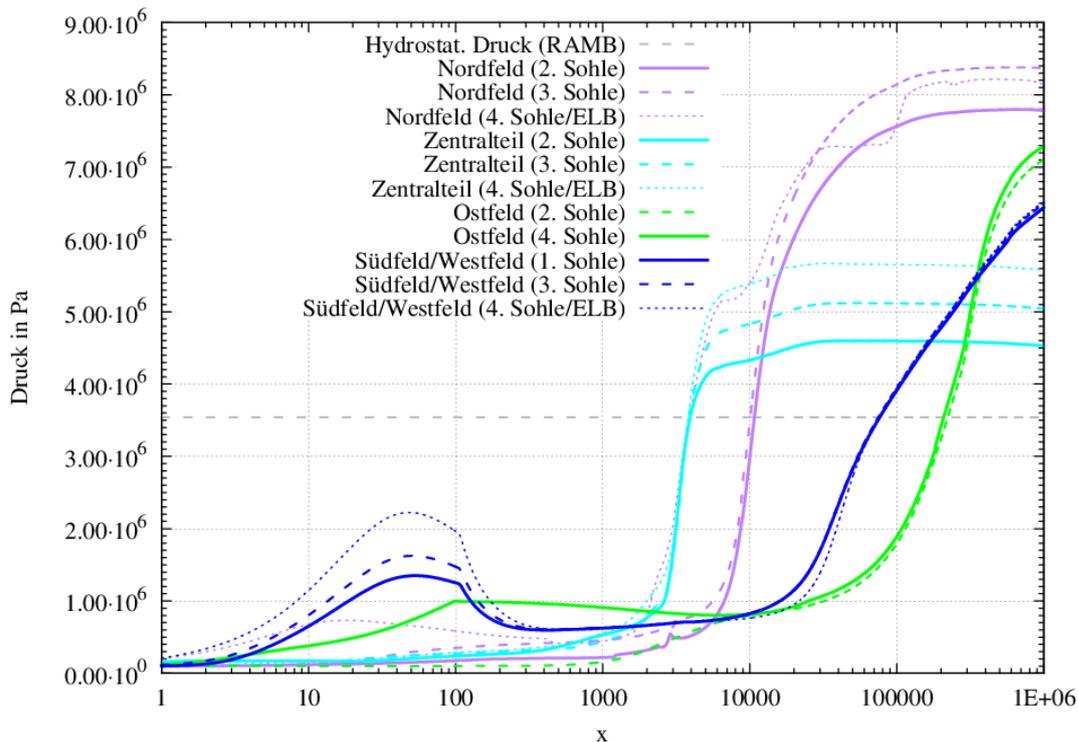


**Abb. 3.106** Korrosionsgrad der Abdichtung 11 (4. Sohle, nördliche Verbindung)

Die Kurven zeigen den Korrosionsgrad der Gitterelemente der Abdichtung 11. Die dargestellten Teilstücke grenzen an das Südfeld (rote Kurve) und an den Zentralteil (blaue Kurve). Die Position der Abdichtung 11 auf der 4. Sohle ist in Abb. 4.10 in /FRI 16/ dargestellt

Der Korrosionsprozess verläuft deshalb so langsam, weil kaum Lösung die Abdichtung durchströmt. Die Gebirgskonvergenz führt zum Verschluss des Firstspalts in den Strecken. In den die Abdichtung umgebenden Strecken im Zentralteil ist die Permeabilität bereits nach 6.500 a auf  $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$  gesunken. Deshalb kann die korrosive Lösung nur langsam nachströmen. Die Permeabilität der Strecken im Südfeld ist ebenso gering wie die im Zentralteil, so dass die Lösung nur langsam in das Südfeld einströmen kann. Außerdem ist der Druck im Südfeld zum Zeitpunkt der vollständigen Korrosion (389.00 a) bereits sehr hoch ( $> 7 \text{ MPa}$ ), so dass der Zustrom von Lösung dadurch

ebenfalls behindert wird. Die Druckentwicklung für das komplexe Modell ist anhand ausgewählter Lokationen in Abb. 3.107 dargestellt. Diese Lokationen sind nicht unmittelbar mit den Lokationen der dargestellten Druckverläufe für das Basis- und das erweiterte Modell vergleichbar (vgl. Abb. 3.26 und Abb. 3.70), da sie nur für die jeweiligen Messpunkte gelten und nicht für große Volumenbereiche im Endlager (Kompartimente). Sie können aber zumindest Hinweise auf die Druckverhältnisse in diesen Bereichen für einen Vergleich geben.



**Abb. 3.107** Druckentwicklung im ERAM für unterschiedliche Modellbereiche

Farben kennzeichnen einzelne Modellbereiche; durchgezogene und gestrichelte Linien verschiedene Teufen: Cyan: Messpunkte an den vertikalen Verbindungen des ELB Zentralteils zum Rand RAMB (vgl. Abb. 3.86 a)); Violett: Messpunkte an den vertikalen Verbindungen vom ELB Nordfeld zum Rand RAAB (vgl. Abb. 3.86 a)); Blau: Messpunkte am Übergang Südfeld/Westfeld unterhalb des Großbohrlochs (vgl. Abb. 3.86 b)) ; Grün: Messpunkte im Ostfeld direkt seitlich der Abdichtungen; Grau gestrichelt: Druck am Rand/erforderlicher Druck im Endlager zum Entweichen

Nicht nur der Zustrom der Lösung, sondern auch die Druckentwicklung im Endlager-system (Abb. 3.107) unterscheidet sich deutlich von der Druckentwicklung für das Basis- und das erweiterte Modell.

Interessant ist, dass sich der Druck im Bereich der benachbarten ELB Nordfeld und ELB Zentralteil sehr unterschiedlich entwickelt und einen Differenzdruck von mehr als 2

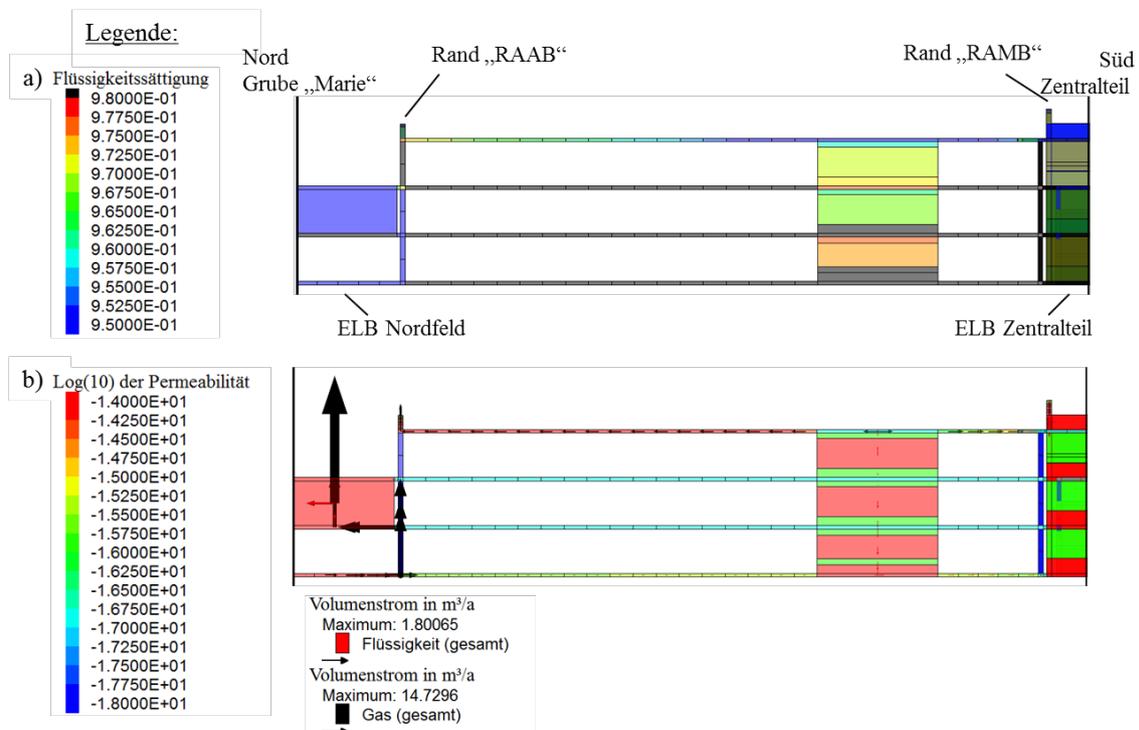
MPa aufweist, obwohl die Teufen der Sohlen identisch sind. Ebenso ist interessant, dass der Druck auf der 4. Sohle des Nordfelds geringer ist als direkt darüber auf der 3. Sohle am Übergang Marie/Bartensleben (im Folgenden auch „Druckinversion“ genannt). Zwischen beiden Randelementen sowie den Kammern, Schweben und Strecken entwickelt sich ein komplexer Prozessablauf, dessen Ursachen der Flüssigkeitszutritt, die Gasbildung und die Lokation der Randelemente, Kammern und Strecken im Modellgitter sind.

Die divergente Druckentwicklung zwischen dem Bereich ELB Zentralteil und dem Bereich ELB Nordfeld kann auf die oben genannten Ausführungen hinsichtlich des Zustroms bzw. der Permeabilität im Bereich der Ränder RAMB und RAAB zurückgeführt werden. Oberhalb des ELB Zentralteil befindet sich ein – auch nach langen Zeiträumen relativ durchlässiges Kammer/Schweben – System, während in der Umgebung des ELB Nordfeld Strecken bzw. vertikale Verbindungen vorhanden sind, deren Permeabilität initial oder nach mittleren Zeiträumen (etwa wenige 10.000 a) durch die Gebirgskonvergenz sehr gering ist. Auch die Änderung der relativen Permeabilität für Gas in diesen Grubenbereichen durch den Lösungszutritt wirkt sich auf die Druckentwicklung aus.

Die Druckerhöhung selbst ist zunächst (bis ca. 10.000 a) eine Folge der Gasbildung, die im ELB Nordfeld deutlich höher ist als im ELB Zentralteil. Im ELB Nordfeld wird – mit Unterbrechungen – bis etwa 200.000 a Gas gebildet. Ab ca. 10.000 a ist jedoch bereits die Gebirgskonvergenz die Ursache für die Druckerhöhung im Endlager. Das Entweichen des Gases aus der Umgebung des Nordfelds aufgrund der Druckerhöhung wird in vertikaler Richtung nicht nur durch die ohnehin geringe Permeabilität behindert. Durch den Lösungszutritt erhöht sich auch die Flüssigkeitssättigung der Strecken und der vertikalen Verbindungen, so dass dadurch ebenfalls die Gaspermeabilität sinkt.

In diesem Zusammenhang ist auch die Druckinversion der 4. Sohle am ELB Nordfeld und der 3. Sohle oberhalb des ELB Nordfeld zu sehen. Ab ca. 30.000 a (siehe Abb. 3.107) steigt der Druck auf der 3. Sohle weiterhin kontinuierlich an, während er auf der 4. Sohle zunächst stagniert. Ab diesem Zeitpunkt ist demnach der Fluidruck (Gas- und Flüssigkeitsdruck sind identisch) auf der 3. Sohle höher als auf der 4. Sohle. Die Ursache hierfür ist das komplexe Zusammenspiel zwischen der Gebirgskonvergenz und der daraus resultierenden Abnahme der Porosität/Permeabilität einerseits und der Verringerung ausschließlich der Gaspermeabilität durch den Anstieg der Flüs-

sigkeitssättigung andererseits. Das Ergebnis dieser beiden Prozesse nach 7.500 a ist in Abb. 3.108 dargestellt. In Abb. 3.108 a) ist erkennbar, dass der Einstrom von Flüssigkeit zu einer Sättigung von  $> 0,98$  in der vertikalen Verbindung unterhalb des Randes RAAB zwischen der 1. und 2. Sohle geführt hat. Die Sättigung der Strecken auf der 2. Sohle und 3. Sohle ist genau so hoch. Damit kann durch diese Strecken und durch die Verbindung zwischen 1. und 2. Sohle kein Gas strömen, obwohl die Permeabilität noch relativ hoch ist (zwischen  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  auf Sohle 1 und  $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$  auf den Sohlen 2/3; siehe Abb. 3.108 b)). Auf der 1. Sohle ist jedoch ein Gasstrom aufgrund der geringeren Flüssigkeitssättigung und der noch hohen Permeabilität möglich, so dass ein geringer Ausstrom am Rand RAAB zu beobachten ist. Dieser Gasstrom entspricht dem 1. negativen Peak in Abb. 3.105. Der 1. Peak wird also aus der 1. Sohle zwischen beiden Rändern gespeist.

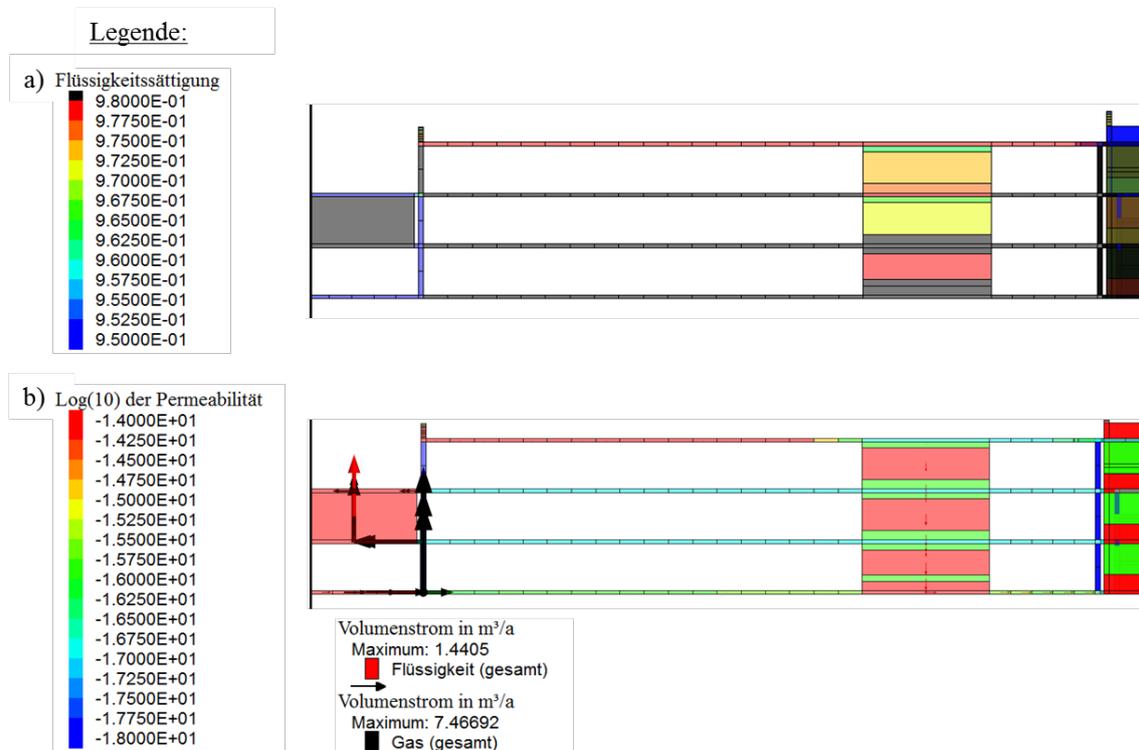


**Abb. 3.108** Prozesse im Bereich der Ränder RAAB und RAMB zum Zeitpunkt 7.500 a: a) Flüssigkeitssättigung; b) Gas- und Flüssigkeitsstrom sowie  $\text{Log}_{10}$  der Permeabilität

a) Flüssigkeitssättigung zwischen 0,95 und 0,98 farbig kodiert. Flüssigkeitssättigung  $> 0,98$  in grau dargestellt. Beschriftung der Gruben- bzw. Modellteile (Ränder, ELB, ...) gilt für alle nachfolgenden ähnlichen Abbildungen b) Volumenstrom: längster sichtbarer Pfeil entspricht dem angegebenen Maximum des Stroms. Rote Pfeile: Flüssigkeitsstrom; Schwarze Pfeile:

Gasstrom. Die Basis des Pfeils liegt in dem Gitterelement des Ursprungsorts des Stroms, die Spitze des Pfeils liegt nicht im Zielgitterelement.

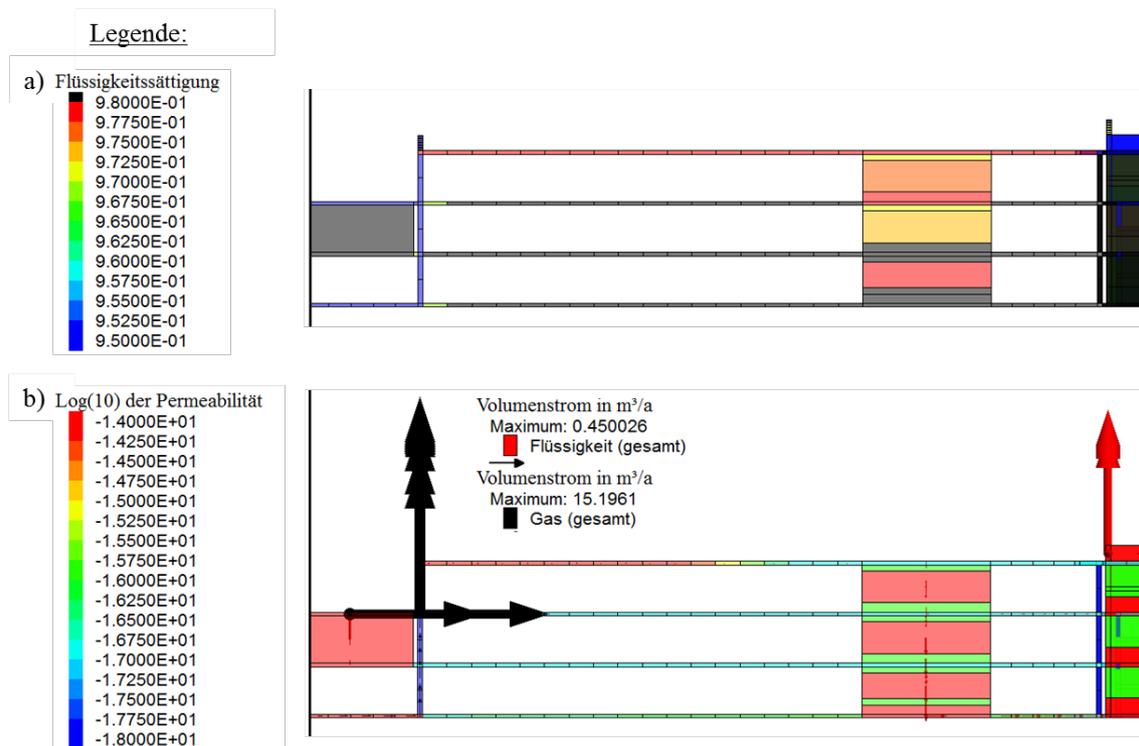
Auch nach 10.000 a wird der Gasstrom durch die Flüssigkeitssättigung weiter eingeschränkt. Diese ist in der Strecke auf der 2. und 3. Sohle nach wie vor so hoch (Flüssigkeitssättigung > 0.98), dass kein Gas in Richtung Zentralteil strömen kann (Abb. 3.109 a)). Unterhalb des Randes RAAB in der vertikalen Verbindung (nicht in der Strecke auf der 1. Sohle) ist die Flüssigkeitssättigung ebenso hoch. Der resultierende Gasstrom verläuft deshalb vom ELB Nordfeld in die vertikalen Verbindungen und dann in den Streckenstummel in Richtung Grube Marie auf der 3. und auf der 2. Sohle, d. h. auf beiden Sohlen findet ein Gasausstrom in die Grube Marie statt. Das entsprechende Gitterelement ist in Abb. 3.109 b) nicht zu sehen, die Sättigung liegt dort bei 0,97.



**Abb. 3.109** Prozesse in der Umgebung der Ränder RAAB und RAMB zum Zeitpunkt 10.000 a: a) Flüssigkeitssättigung; b) Gas- und Flüssigkeitsstrom sowie Log<sub>10</sub> der Permeabilität

a) Flüssigkeitssättigung zwischen 0,95 und 0,98 farbig kodiert. Flüssigkeitssättigung > 0.98 in grau dargestellt b) Volumenstrom: längster sichtbarer Pfeil entspricht dem angegebenen Maximum des Stroms. Rote Pfeile: Flüssigkeitsstrom; Schwarze Pfeile: Gasstrom. Die Basis des Pfeils liegt in dem Gitterelement des Ursprungsorts des Stroms, die Spitze des Pfeils liegt nicht im Zielgitterelement.

Zum Zeitpunkt 15.000 a liegt eine leicht veränderte Situation vor, diese ist in Abb. 3.110 gezeigt: Die Flüssigkeitssättigung in der vertikalen Verbindung zwischen der 1. und 2. Sohle hat sich auf unter 0,98 verringert (siehe Abb. 3.110 a)). Ein Gasstrom vom ELB Nordfeld (4. Sohle) über alle vertikalen Verbindungen in Richtung Rand ist deshalb möglich (siehe Abb. 3.110 b)). Maßgeblich für die Höhe des Gasstroms in Richtung des Randes ist allerdings der Gasstrom aus der Grube Marie über die Strecke auf der 2. Sohle in die vertikale Verbindung (siehe Abb. 3.110 b, lange horizontale und vertikale Pfeile). Dieser Gasstrom entspricht dem 2. hohen negativen Peak in Abb. 3.105.

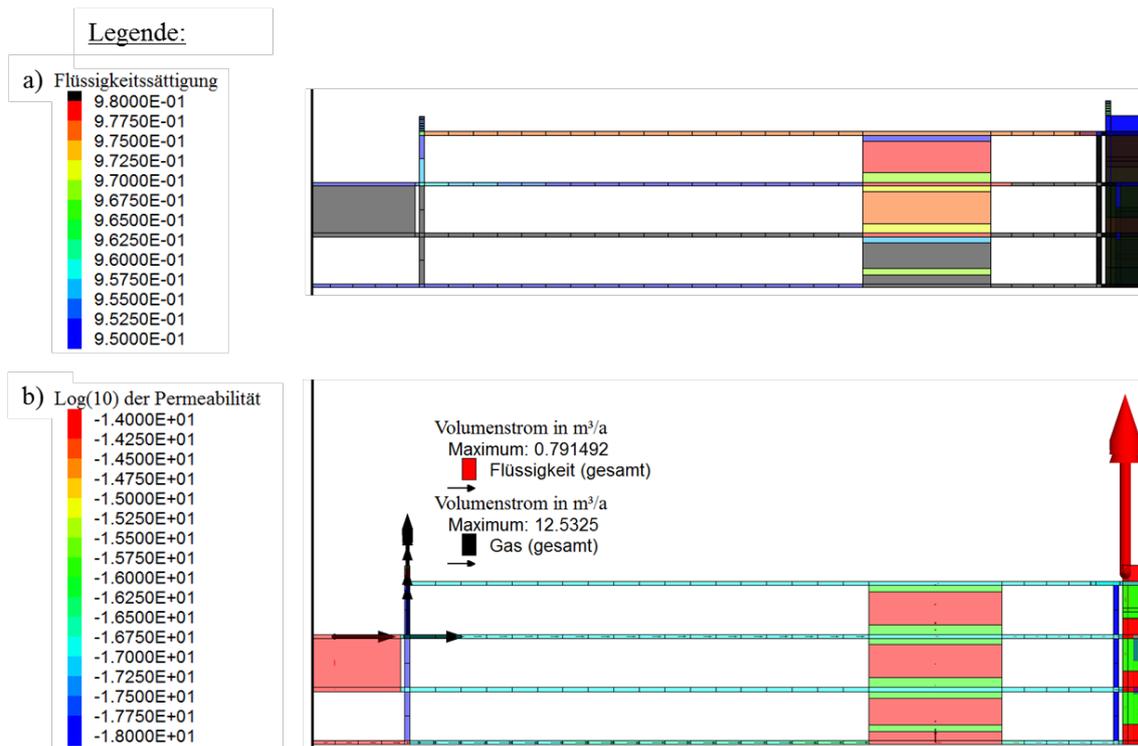


**Abb. 3.110** Prozesse in der Umgebung der Ränder RAAB und RAMB zum Zeitpunkt 15.000 a: a) Flüssigkeitssättigung; b) Gas- und Flüssigkeitsstrom sowie  $\text{Log}_{10}$  der Permeabilität

a) Flüssigkeitssättigung zwischen 0,95 und 0,98 farbig kodiert. Flüssigkeitssättigung  $> 0,98$  in grau dargestellt b) Volumenstrom: längster sichtbarer Pfeil entspricht dem angegebenen Maximum des Stroms. Rote Pfeile: Flüssigkeitsstrom; Schwarze Pfeile: Gasstrom. Die Basis des Pfeils liegt in dem Gitterelement des Ursprungsorts des Stroms, die Spitze des Pfeils liegt nicht im Zielgitterelement.

In Abb. 3.110 a) ist ebenfalls erkennbar, dass sich die Flüssigkeitssättigung in den ersten Gitterelementen seitlich der vertikalen Verbindungen der Strecken auf der 2. und 4. Sohle in Richtung des Zentralteils bereits nach 15000 a verringert hat. Dieser Prozess

setzt sich fort. Nach 35.000 a hat die Flüssigkeitssättigung in den Strecken der 2. und der 4. Sohle soweit abgenommen, dass ein Gasstrom durch die gesamte Strecke möglich ist. Dies ist in Abb. 3.111 a) dargestellt. Somit wäre auf der 2. Sohle (sowohl in der Grube Bartensleben als auch in der Grube Marie) ein Strom in Richtung des Randes RAAB möglich (siehe Abb. 3.111 b)). Da aber in der vertikalen Verbindung zwischen 2. und 3. Sohle, sowie in der Strecke auf der 3. Sohle nach wie vor eine hohe Flüssigkeitssättigung den Gasstrom verhindert, kann das Gas aus der 4. Sohle nicht auf die 3. Sohle und damit in Richtung des Randes RAAB strömen. Deshalb bewegt sich das Gas auf der 4. Sohle in Richtung Zentralteil und der Druck durch die Gasbildung kann sich infolgedessen abbauen. Das Gas, welches zum Zeitpunkt 10.000 a auf die 3. Sohle gelangen konnte, kann jetzt nicht in andere Grubenbereiche strömen, da die Flüssigkeitssättigung in den vertikalen Verbindungen, in der Strecke zum Zentralteil und auch in der Grube Marie deutlich über 0,98 liegt. Dies bedeutet, dass das Gas eingeschlossen ist. Gleichzeitig führt die anhaltende Gebirgskonvergenz dazu, dass sich der Druck gleichmäßig erhöht, so dass der Druck auf der 3. Sohle größer als auf der 4. Sohle wird.

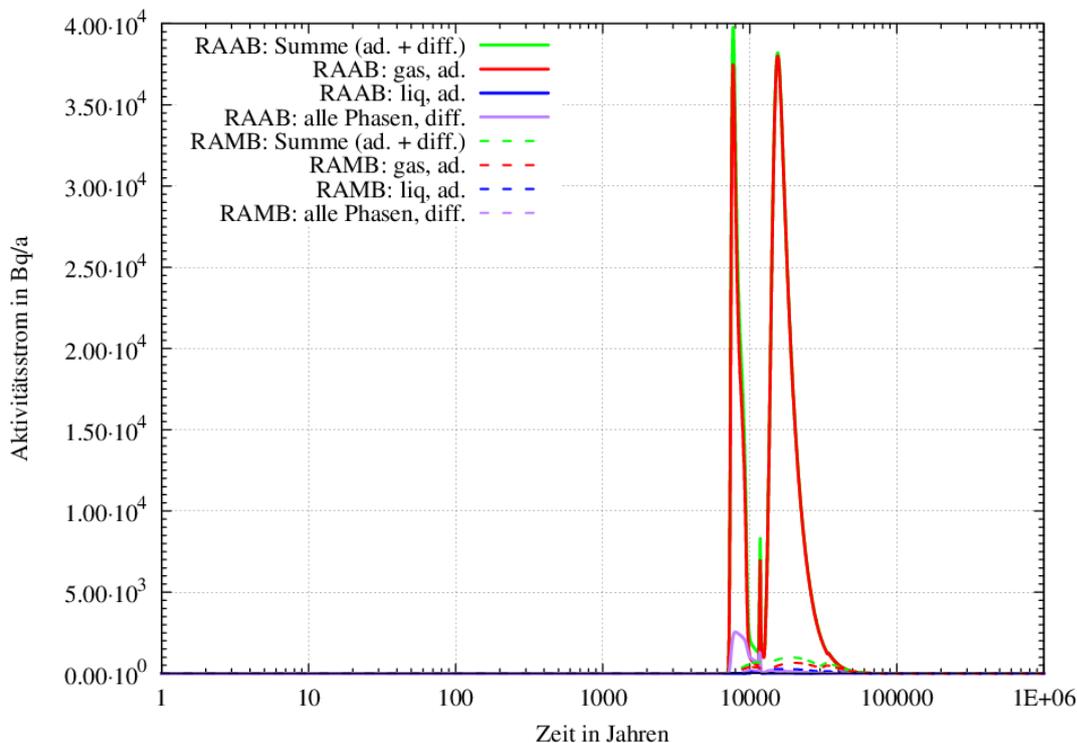


**Abb. 3.111** Prozesse in der Umgebung der Ränder RAAB und RAMB zum Zeitpunkt 35.000 a: a) Flüssigkeitssättigung; b) Gas- und Flüssigkeitsstrom sowie Log<sub>10</sub> der Permeabilität

a) Flüssigkeitssättigung zwischen 0,95 und 0,98 farbig kodiert. Flüssigkeitssättigung > 0,98 in grau dargestellt b) Volumenstrom: längster sichtbarer Pfeil entspricht dem angegebenen Maximum des Stroms. Rote Pfeile: Flüssigkeitsstrom; Schwarze Pfeile: Gasstrom. Die Basis des Pfeils liegt in dem Gitterelement des Ursprungsorts des Stroms, die Spitze des Pfeils liegt nicht im Zielgitterelement.

Mit der gasförmigen und der flüssigen Phase treten auch Radionuklide aus dem Endlager aus. In Abb. 3.112 ist der <sup>14</sup>C-Ausstrom über die beiden Randelemente RAAB und RAMB dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass der Aktivitätsstrom über den Rand RAAB wesentlich höher ist als der über den Rand RAMB. Dies ist auf das höhere <sup>14</sup>C-Inventar des Nordfelds zurückzuführen, das sich wesentlich näher am Randelement RAAB als am Randelement RAMB befindet. Ebenso ist zu sehen, dass der <sup>14</sup>C-Austrag über den Rand RAAB von zwei Peaks bestimmt wird, die durch die beiden Peaks des Gasausstroms (vgl. Abb. 3.105) verursacht werden. Obwohl die Peaks des Gasausstroms deutliche Unterschiede in der Höhe zeigen, sind die resultierenden <sup>14</sup>C-Ausstromraten etwa gleich hoch. Das liegt zum einen an den unterschiedlichen Zeitpunkten: zwischen beiden Peaks liegen etwa 7.500 a, also mehr als eine Halbwertszeit von <sup>14</sup>C. Zum anderen ist im Gasausstrom, der den 1. Peak erzeugt, deutlich mehr <sup>14</sup>C

enthalten als im Gasaustrom, der den 2. Peak bildet, da dieser Gasaustrom aus der 1. Sohle zwischen beiden Rändern gespeist wird (vgl. Abb. 3.108) und somit  $^{14}\text{C}$  aus dem ELB Nordfeld und in geringem Maße aus dem ELB Zentralteil enthält. Der zweite Peak wird vorwiegend aus dem Gasaustrom der Grube Marie gespeist (vgl. Abb. 3.111), in welchem in geringem Maße  $^{14}\text{C}$  aus dem ELB Nordfeld vorhanden ist, welches durch das große Volumen der Grube verdünnt wurde.

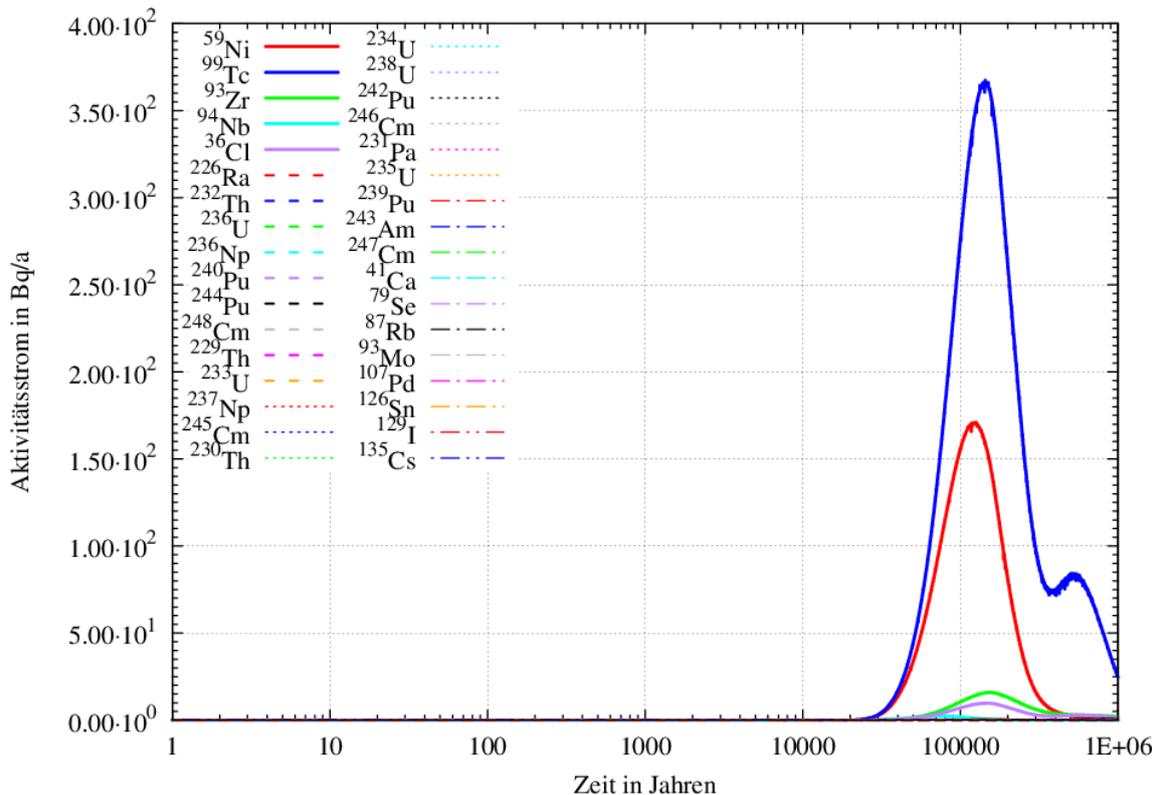


**Abb. 3.112**  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom aus dem ERAM über die Randelemente RAAB und RAMB

Für die Randelemente RAAB (durchgezogene Linie) und RAMB (gestrichelt); grün: Ausstrom als Summe aller Phasen (advektiv und diffusiv); rot: Ausstrom mittels der Gasphase (advektiv), blau: Ausstrom mittels der flüssigen Phasen (advektiv); violett: Ausstrom mittels beider Phasen (diffusiv)

In Abb. 3.113 ist der Radionuklidstrom der in Lösung befindlichen Radionuklide aus dem ERAM über den Rand RAMB dargestellt. Ein geringfügiger Ausstrom von  $^{59}\text{Ni}$  (ca. 170 Bq/a) und  $^{99}\text{Tc}$  (360 Bq/a) sowie  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  und  $^{94}\text{Ni}$  (alle < 20 Bq/a) ist erkennbar. Der Ausstrom zeigt einen Peak bei ca. 110.000 a sowie einen kleinen 2. Peak bei ca. 600.000 a. Da nach 100.000 a die Abdichtung 11 zum Südfeld noch nicht vollständig korrodiert ist (siehe Abb. 3.106), wird dieser Peak durch Radionuklide aus dem ELB Nordfeld und ELB Zentralteil verursacht. Der 2. Peak entsteht durch Radionuklide aus dem Südfeld, nachdem die Abdichtung korrodiert ist.

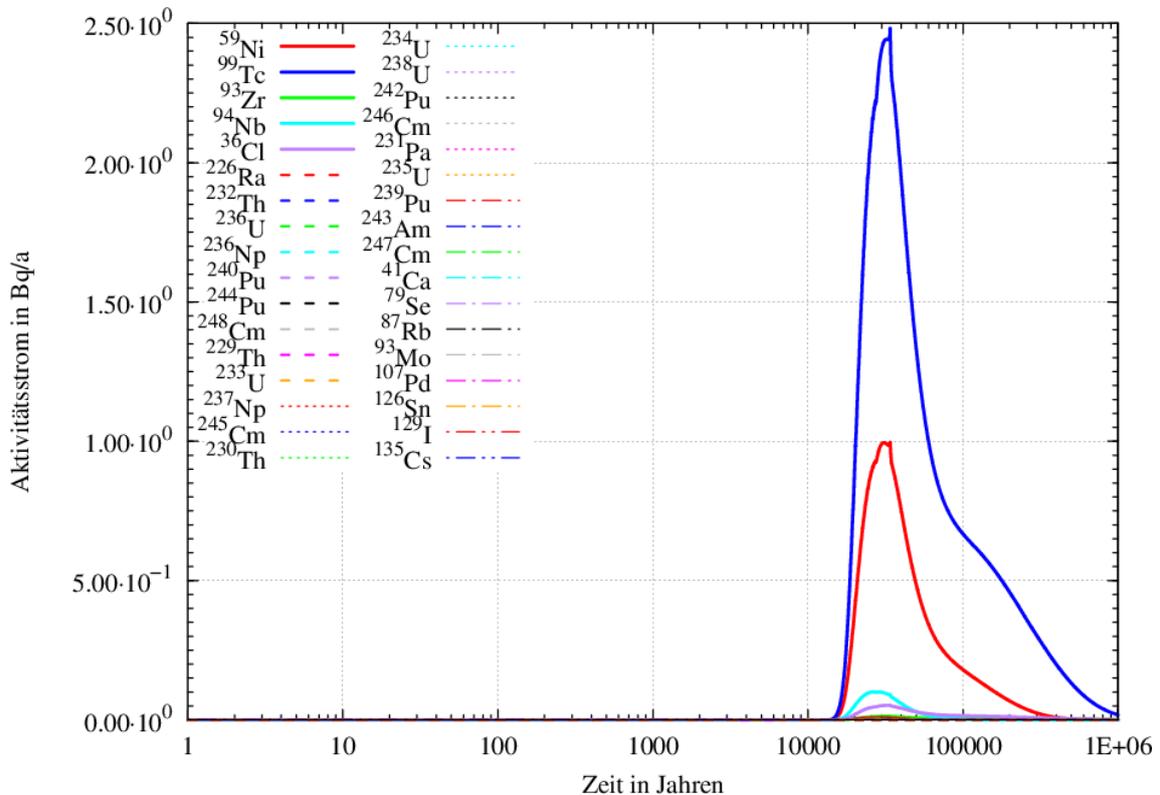
Der Ausstrom der in der flüssigen Phase gelösten Radionuklide über den Rand RAAB ist deutlich geringer. Dieser Austrag ist in Abb. 3.114 zu sehen. Bis auf  $^{99}\text{Tc}$  liegt der Aktivitätsstrom aller Radionuklide unterhalb der Grenze für einen Austrag von Null ( $< 1\text{Bq/a}$ ). Der frühe Zeitpunkt des Peaks bei ca. 30.000 a deutet auch hier darauf hin, dass diese Radionuklide aus dem ELB Nordfeld und dem ELB Zentralteil stammen. Ein Einfluss des Südfelds auf den Ausstrom der Radionuklide über das Randelement RAAB ist nicht zu erkennen.



**Abb. 3.113** Aktivitätsstrom gelöster Radionuklide aus dem ERAM über den Rand RAMB

Ausstrom aller betrachteten Radionuklide (außer  $^{14}\text{C}$ ). Die Radionuklide, die in den meisten Rechenfällen den höchsten Aktivitätsstrom zeigen sind als durchgezogene Linien dargestellt, alle anderen Radionuklide als gestrichelte Linien. Im Bereich der Peaks von  $^{99}\text{Tc}$  und  $^{59}\text{Ni}$  sind Ausreißer zu sehen<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Diese Ausreißer sind eine Folge der Berechnungspräzision und der im Endlager vorhandenen sehr geringen Radionuklidmassen. Im Vorhaben ist die Präzision des Radionuklidmoduls /NAV 16a/ im Code kontinuierlich erhöht worden. Für das komplexe Modell zeigt sich, dass eine weitere Erhöhung der Berechnungspräzision möglicherweise wünschenswert (jedoch nicht zwingend erforderlich) ist. Dies wurde für den Code durchgeführt. In den damit errechneten Resultaten zeigen sich tatsächlich keine Ausreißer, ansonsten sind die Resultate identisch. Da jedoch alle Rechnungen mit der gleichen Code-Version durchgeführt werden sollten, wurde darauf verzichtet, diese Resultate hier zu zeigen.



**Abb. 3.114** Aktivitätsstrom gelöster Radionuklide aus dem ERAM über den Rand RAAB

Ausstrom aller betrachteten Radionuklide (außer <sup>14</sup>C). Die Radionuklide, die in den meisten Rechenfällen den höchsten Aktivitätstrom zeigen sind als durchgezogene Linien dargestellt, alle anderen Radionuklide als gestrichelte Linien.

Zusammenfassend lassen sich für das komplexe Modell zum Bezugsfall „mit relevantem Lösungszutritt“ folgende Punkte feststellen:

- Der potenzielle Einstrom über zwei Randelemente hat einen deutlichen Effekt auf das Strömungs- und Transportverhalten des Gases und des gasförmigen <sup>14</sup>C im ERAM.
- Der Struktur des Modells zwischen den beiden potenziellen Zutrittsorten spielt für das Strömungs- und Transportverhalten des ERAM ebenso eine große Rolle.
- Auch für die in Lösung befindlichen Radionuklide (z. B. <sup>59</sup>Ni, <sup>99</sup>Tc, etc.) gibt es Unterschiede in der Austragsrate. Dies ist allerdings kein Effekt der Mo-

dellstruktur zwischen beiden Rändern, sondern der relativen Nähe der Lokation des Randes RAMB zum ELB Südfeld geschuldet.

- Trotz der Korrosion einer Abdichtung zwischen Südfeld und Zentralteil ist kein deutlicher erneuter Einstrompeak der Lösung zu erkennen.

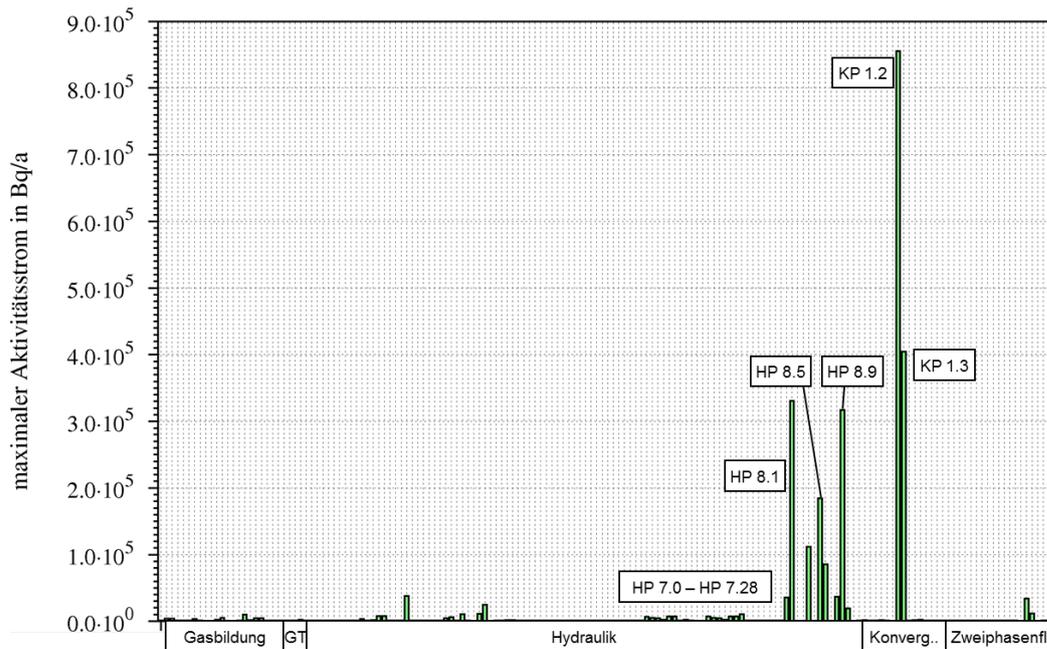
### 3.3.2.1 Prozesse im Endlagersystem

Auch hier wird im Rahmen der Prozessbetrachtungen auf Variationsrechnungen eingegangen. Details zur Parametrierung dieser Berechnungen sind in /FRI 16/ zu finden. In diesem Kapitel wird näher auf folgende Variationsrechnungen eingegangen:

- Der „what-if“ Fall „mangelhafte Schachtabdichtung“ (siehe /NIE 09/). Dies ist Rechenfall HP 4.9.
- Änderung von Konvergenzparametern (die Referenzkonvergenzrate wurde erhöht; Rechenfälle KP 1.2 und KP 1.3),
- Änderung des Verfüllgrades (und damit des Firstspaltes der Strecken) zwischen 65 % und 99 % sowie der initialen Permeabilität in den Strecken zwischen  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  und  $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ : Rechenfälle HP 8.0 bis HP 8.10, insbesondere Rechenfall HP 8.1 mit einer Streckenverfüllung von 65 % und einer initialen Permeabilität von  $1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ , Rechenfall HP 8.5 mit einer Streckenverfüllung von 95 % und einer initialen Permeabilität von  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  sowie Rechenfall HP 8.9 mit einer Streckenverfüllung von 99 % und einer initialen Permeabilität von  $1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ .
- Änderung der vertikalen Auflösung der Abbaue (Verdopplung, Rechenfall GT 1.3) sowie Änderung der vertikalen Auflösung der Abbaue und der Strecken (Verdopplung, Rechenfall GT 1.4).
- Variation der Permeabilität der vertikalen Verbindungen (von  $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$  auf  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  im Fall HP 10.0).
- Änderung der Viskosität und der Umlösekapazität der zutretenden Lösung (sowohl die Viskosität der Lösung auf  $5,4 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$  als auch die Umlösekapazität der Abdichtungen um den Faktor 10 erhöht).

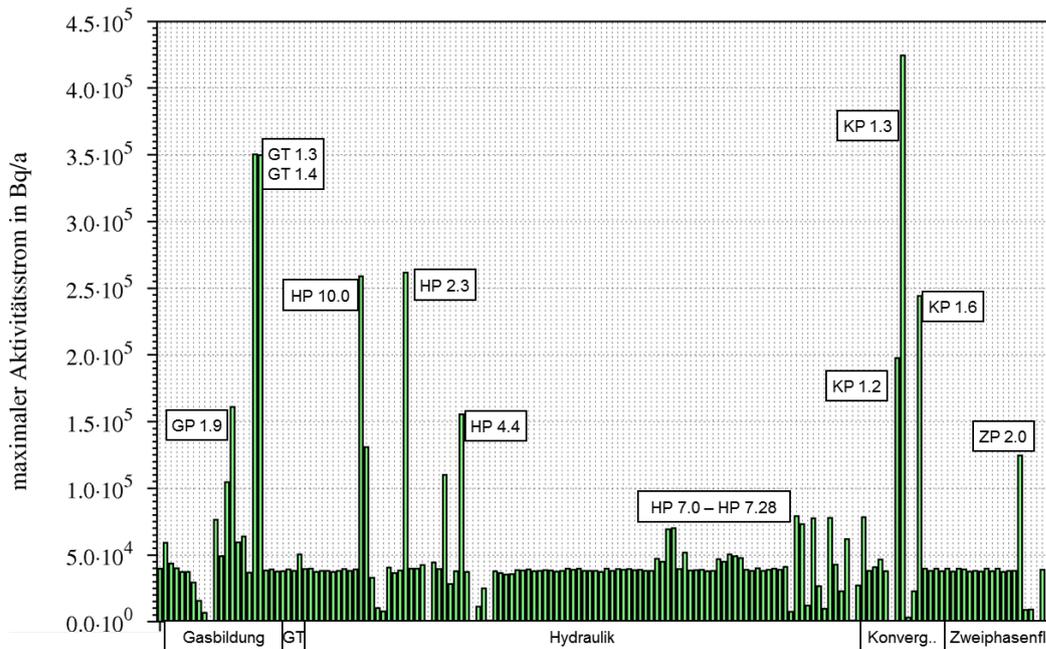
In Abb. 3.115 ist die maximale  $^{14}\text{C}$ -Austragsrate aus dem ERAM über den Rand RAMB sowie in Abb. 3.116 für den Rand RAAB aufgetragen. Nicht in den Abbildungen enthalten ist der Ausstrom für den „what-if“ Rechenfall „mangelhafte Schachtabdichtung (HP 4.9, Randelement RASH z. B. in Abb. 1.6 und Abb. 3.86). Der Ausstrom in diesem Rechenfall ist im Vergleich mit dem der anderen Rechenfälle so hoch, dass man auf den Abbildungen keine weiteren potentiell interessanten Rechenfälle identifizieren könnte, und wird deshalb separat im Anhang A.4, Abb. A 3 dargestellt.

Die höchste  $^{14}\text{C}$ -Austragsrate für alle hier dargestellten Rechenfälle ergibt sich in den Rechenfällen KP 1.2 und KP 1.3 mit ca.  $8,3 \cdot 10^5 \text{ Bq/a}$  bzw.  $4 \cdot 10^5 \text{ Bq/a}$  über das Randelement RAMB (siehe Abb. 3.115). Diese Rechenfälle erzeugen auch die höchsten  $^{14}\text{C}$ -Austragsraten über das Randelement RAAB (siehe Abb. 3.116), hier zeigt jedoch der Rechenfall KP 1.3 den höheren und KP 1.2 den niedrigeren Peak, für das Randelement RAMB ist es genau umgekehrt. Die Ursache liegt im komplexen Systemverhalten der Grube zwischen den beiden Rändern, diese wurde für den Bezugsfall in Kap. 3.3.2 detailliert erläutert. Die Prozesse (z. B.: Anstieg der Flüssigkeitssättigung mit folgender Behinderung des Gasstroms, Gebirgskonvergenz mit Schließung des Firstspaltes und Verringerung der Permeabilität, etc.) die in den Strecken, vertikalen Verbindungen, Kammern und Schweben ablaufen, zeigen nach Parameteränderungen der Referenzkonvergenzrate einen deutlichen Einfluss auf die Rechenergebnisse. Die Summe der  $^{14}\text{C}$ -Austräge über beide Ränder ergibt in diesen Rechenfällen (KP 1.2, KP 1.3) insgesamt die höchsten Austragsraten.



**Abb. 3.115** Maximaler <sup>14</sup>C-Austrag aller Rechenfälle aus dem ERAM über den Rand RAMB (komplexes Modell, „mit relevantem Lösungszutritt“)

Im Histogramm entspräche der 1. Balken dem Bezugsfall mit einem Wert von ca. 1.000 Bq/a; unten angegeben ist die Kategorie, die aussagt welche Art von Parameter geändert wurde. Für das komplexe Modell hinzugekommen ist die Kategorie „GT“ in welcher die interne Struktur des Gitters geändert wurde. Das Ergebnis für den Rechenfall HP 4.9 ist hier nicht dargestellt, da aufgrund der Skalierung ansonsten der Austrag der anderen Rechenfälle nicht erkennbar wäre. Dieser Rechenfall ist im Anhang A.4 gezeigt



**Abb. 3.116** Maximaler  $^{14}\text{C}$ -Austrag aller Rechenfälle aus dem ERAM über den Rand RAAB (komplexes Modell, „mit relevantem Lösungszutritt“)

Im Histogramm entspräche der 1. Balken dem Bezugsfall mit einem Wert von ca. 40.000 Bq/a; unten angegeben ist die Kategorie, die aussagt welche Art von Parameter geändert wurde. Für das komplexe Modell hinzugekommen ist die Kategorie „GT“ in welcher die interne Struktur des Gitters geändert wurde. Das Ergebnis für den Rechenfall HP 4.9 ist hier nicht dargestellt, da aufgrund der Skalierung ansonsten der Austrag der anderen Rechenfälle nicht erkennbar wäre

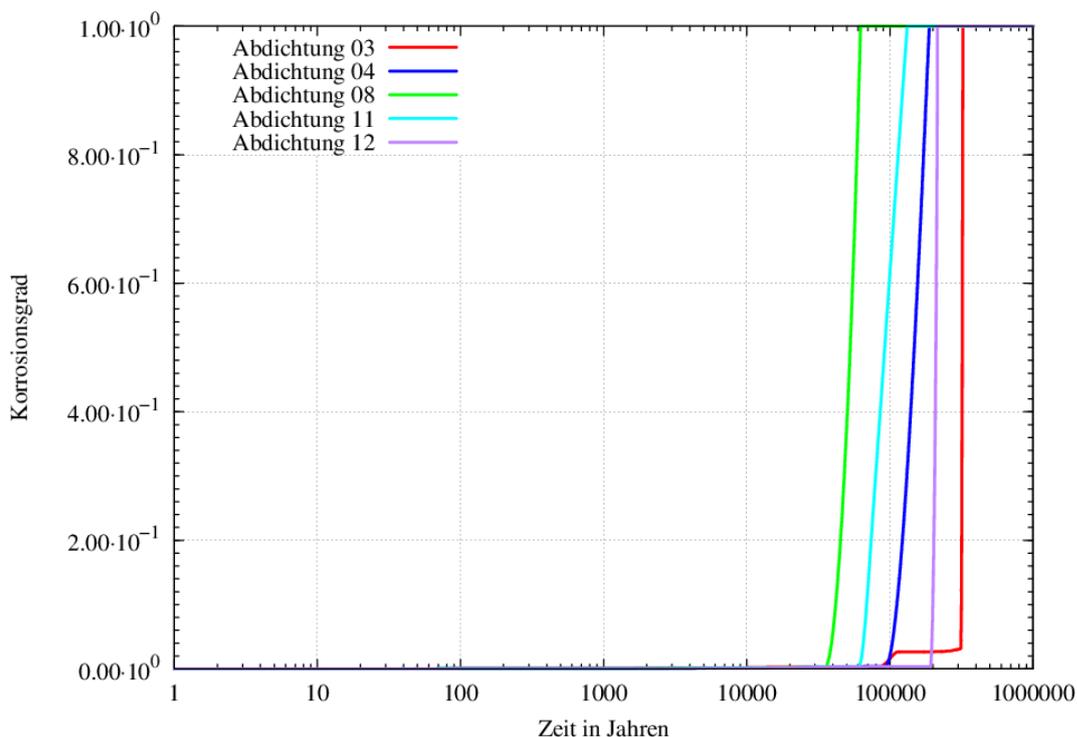
Außerdem sind in Abb. 3.115 die Rechenfälle HP 8.1, HP 8.5 sowie HP 8.9 aufgrund ihres relativ hohen  $^{14}\text{C}$ -Austrags gekennzeichnet. In diesen Rechenfällen wurden die Annahmen zur Höhe des Firstspaltes (bzw. des Verfüllgrades) und der initialen Permeabilität des Salzbetons in den Strecken variiert. Für Rechenfall HP 8.1 wird ein Verfüllgrad von 65 % mit einer initialen Permeabilität von  $1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ , für den Rechenfall HP 8.5 ein Verfüllgrad von 95 % mit einer initialen Permeabilität von  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  und für den Rechenfall HP 8.9 ein Verfüllgrad von 99 % und eine initiale Permeabilität von  $1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  angenommen. Die in Abb. 3.115 nicht gekennzeichneten Rechenfälle, deren Ergebnisse zwischen denen der Rechenfälle HP 8.1 und HP 8.10 aufgetragen wurden, zeigen ebenfalls Resultate dieser Verfüllgrads- und Permeabilitäts-Variationen. Anhand dieser Ergebnisse lässt sich kein einfacher linearer Zusammenhang in Bezug auf die Höhe des  $^{14}\text{C}$ -Austrags feststellen: der Verringerung des Verfüllgrads folgt ebenso wenig wie der Erhöhung der initialen Permeabilität zwingend eine Erhöhung der Austragsrate.

Das sich ändernde Systemverhalten je nach Verfüllgrad und initialer Permeabilität ist erneut dem Zusammenspiel zwischen der Behinderung des Gasstroms durch den Lösungszutritt, die Verringerung der Permeabilität aufgrund der Gebirgskonvergenz sowie der Grubenstruktur zwischen den beiden Rändern geschuldet. Die hohen Peaks des  $^{14}\text{C}$ -Austrags in den Rechenfällen HP 8.1 und HP 8.9 werden beide dadurch verursacht, dass der Austrag von Gas und gasförmigen Radionukliden nahezu ausschließlich über den Rand RAMB erfolgt, während sich niedrigere Austragsraten in Rechenfällen zeigen, in denen sowohl der Gas- als auch der Ausstrom der gasförmigen Radionuklide über beide Randelemente erfolgt. In diesen Fällen ist die Summe des  $^{14}\text{C}$ -Austrags über beide Randelemente trotzdem geringer als die Peaks des maximalen  $^{14}\text{C}$ -Austrags in den Rechenfällen HP 8.1 oder HP 8.9. Die Ursache hierfür sind unterschiedliche Austragszeitpunkte und ein dementsprechend unterschiedlich fortgeschrittener Zerfall des  $^{14}\text{C}$  und auch der Verbleib der Radionuklide im Endlagersystem (zum Beispiel in der Kammer/Schweben-Struktur zwischen den Rändern), da ein weiterer Transport durch eine hohe Flüssigkeitssättigung oder eine niedrige Permeabilität verhindert wird. Im Zusammenhang mit dem Zusammenspiel von Flüssigkeitssättigung, Verringerung der Permeabilität und der komplexen geometrischen Struktur zwischen den Rändern ist auch die Erhöhung der Austragsrate (im Vergleich zum Bezugsfall) in den Rechenfällen GT 1.3 und GT 1.4 über den Rand RAAB (Abb. 3.116) zu sehen. In diesen Rechenfällen wird das Modellgitter in den Kammern verändert: es wird eine zusätzliche vertikale Diskretisierung eingeführt, allerdings ohne die Parametrierung der Kammer zu ändern. Diese Parametrierung ist beispielsweise die Angabe einer durchschnittlichen Porosität und Permeabilität aus Hohlraum und Altversatz (und in den Einlagerungskammern auch Abfall) für eine gesamte Kammer (Details siehe /FRI 16/), die bei einer Erhöhung der vertikalen Diskretisierung angepasst werden könnte. Außerdem wurden auch Zweiphasenflussparameter (für die relative Permeabilitätsfunktion und die Kapillardruckfunktion) als Durchschnittswerte des Hohlraums und Altversatzes (und in den Einlagerungskammern auch Abfalls) beibehalten.

In Abb. 3.115 und Abb. 3.116 ist ebenso der geringe Einfluss der Annahme von unentdeckten Wegsamkeiten (HP 7.0 bis HP 7.28) auf den Austrag von  $^{14}\text{C}$  zu erkennen. Deutlich größer ist der Einfluss der Höhe der initialen Permeabilität der vertikalen Verbindungen (HP 10.0 mit einer Permeabilität von  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ ) – wie auch für die Systementwicklung „trockene Grube“ beschrieben (siehe Kap. 3.3.1.1) – für den  $^{14}\text{C}$ -Austrag über den Rand RAAB, da in diesem Fall die Permeabilität der vertikalen Verbindung über dem ELB Nordfeld entscheidend ist. Die Erhöhung der Permeabilität (von

$1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  auf  $1 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$ ) der ELB und sonstigen Kammern und Abbaue (Rechenfall HP 2.3; auch in der Grube Marie) erzeugt ebenfalls eine erhöhte  $^{14}\text{C}$ -Austragsrate über den Rand RAAB, ebenso wie die Annahme, dass die Gasbildung in den ELB erst beginnt, wenn tatsächlich Lösung zutritt (GP 1.9), da kein Behälterwasser vorhanden ist.

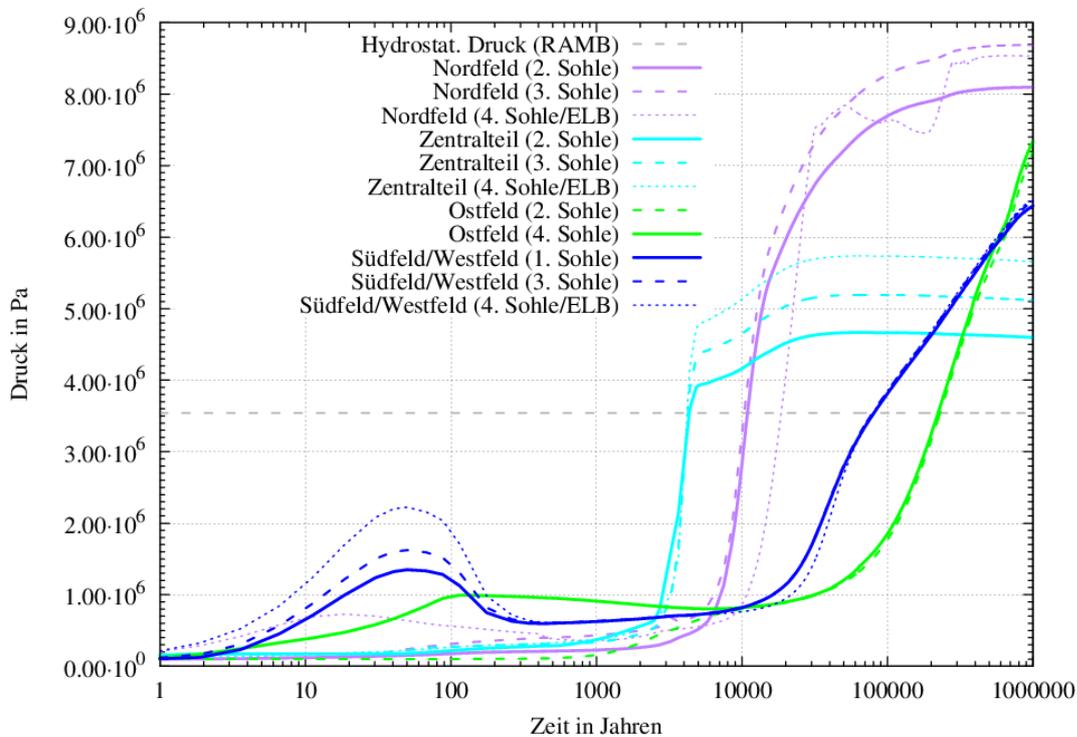
Interessant ist der Rechenfall HP 4.4, der ebenfalls einen deutlichen  $^{14}\text{C}$ -Austrag über den Rand RAAB zeigt (Abb. 3.116). In diesem Rechenfall wurde sowohl die Viskosität der Lösung auf  $5,4 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$  als auch die Umlösekapazität der Abdichtungen um den Faktor 10 erhöht. In der Konsequenz korrodieren nicht nur die Abdichtung 11, sondern auch einige andere Abdichtungen zum Südfeld vollständig (siehe Abb. 3.117). Dabei findet die Korrosion im Vergleich zum Bezugsfall deutlich früher, zum Beispiel die der Abdichtung 8 nach ca. 60.000 a statt. Wie im Folgenden erläutert wird, spielt allerdings die Korrosion der Abdichtungen für den erhöhten  $^{14}\text{C}$ -Ausstrom keine Rolle. Entscheidend für den erhöhten  $^{14}\text{C}$ -Austrag ist die Viskosität der Lösung. Die Abdichtungen zwischen Ostfeld und Zentralteil korrodieren auch in diesem Rechenfall nicht vollständig.



**Abb. 3.117** Zeitpunkt der Korrosion der Abdichtung (bzw. des letzten korrodierten Gitterelementes der Abdichtung)

Die Erhöhung der Viskosität bewirkt eine Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit der zutretenden Lösung, dies führt in der Umgebung der Ränder zu einer höheren

Flüssigkeitssättigung. Infolgedessen sinkt die Mobilität des Gases in diesem Bereich. Die Flüssigkeitssättigung der einzelnen Bereiche des Endlagers ist in diesem Rechenfall dadurch anders verteilt als im Bezugsfall. Der Effekt der Druckinversion, der im Bezugsfall beobachtet wird, wird dadurch noch verstärkt (siehe Abb. 3.118): Der Druck der 3. Sohle übersteigt bereits nach ca. 7.000 a den Druck auf der 4. Sohle.

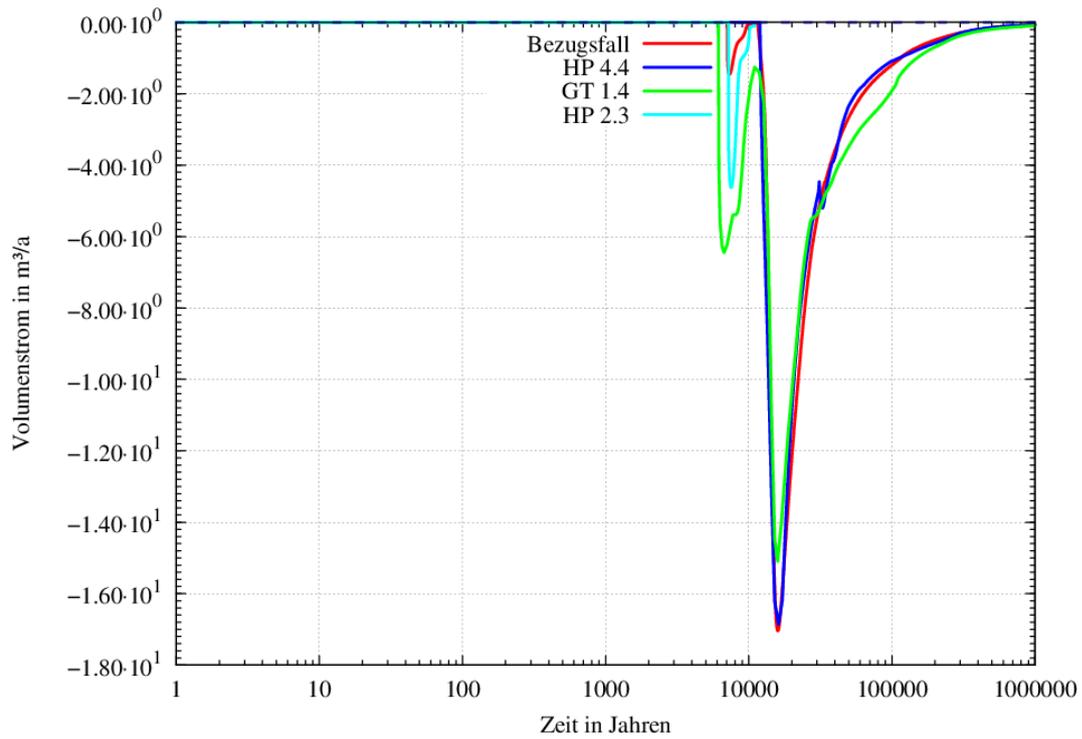


**Abb. 3.118** Druckentwicklung im ERAM für unterschiedliche Modellbereiche

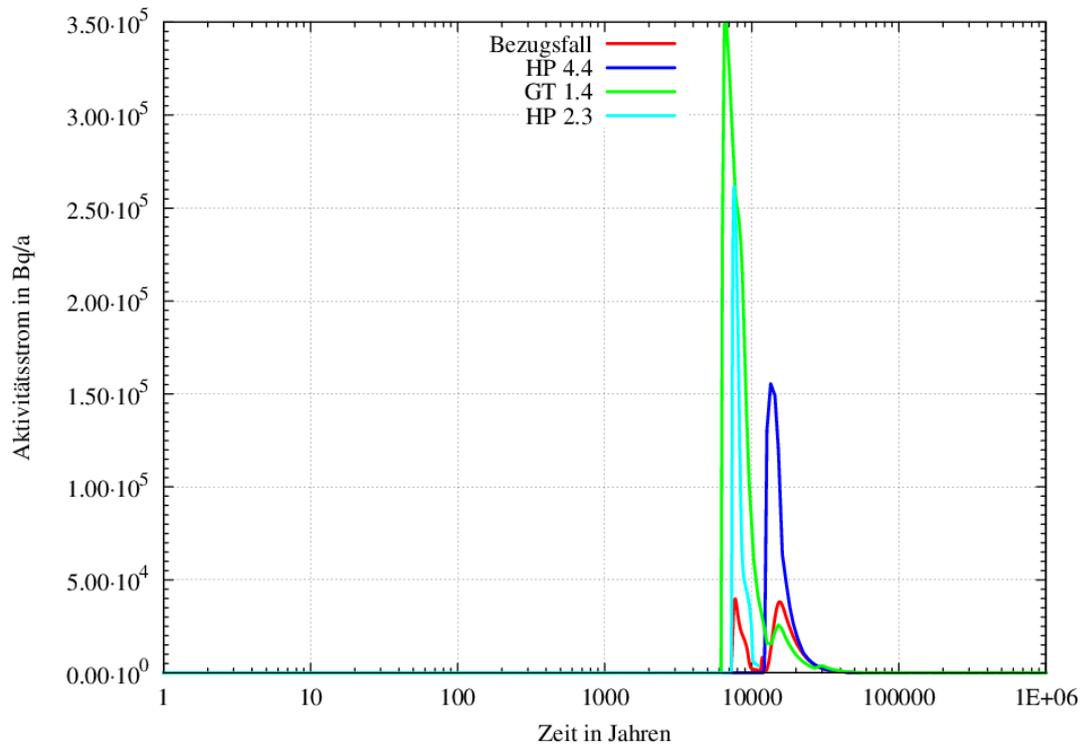
Rechenfall HP 4.4; Farben kennzeichnen einzelne Modellbereiche; durchgezogene und gestrichelte Linien verschiedene Teufen: Blau: Messpunkte am Übergang Südfeld/Westfeld im Bereich des Schachts Bartensleben; Cyan: Messpunkte an den vertikalen Verbindungen des ELB Zentralteils zum Rand RAMB; Violett: Messpunkte an den vertikalen Verbindungen vom ELB Nordfeld zum Rand RAAB; Grün: Messpunkte im Ostfeld direkt seitlich der Abdichtungen; Grau gestrichelt: Druck am Rand/kritischer Druck zum Entweichen

Diese Parameteränderungen zeigen, dass generell das Ausstromverhalten des Gases aus dem ERAM von den Parametern, die die Prozesse zwischen beiden Rändern und der daran angrenzenden Kammer/Schweben-Struktur steuern, deutlich beeinflusst wird. Ein Vergleich des Gasausstroms im Bezugsfall und in den Rechenfällen HP 4.4, GT 1.4 und HP 2.3 ist in Abb. 3.119 gezeigt, der Vergleich des daraus resultierend  $^{14}\text{C}$ -Austrags in Abb. 3.120. Der erste Peak des Gasausstroms, der im Bezugsfall bei ca. 7.500 a auftritt, fehlt im Rechenfall HP 4.4, während er in den Rechenfällen HP 2.3 und besonders GT 1.4 sehr ausgeprägt ist (Abb. 3.119). Im Rechenfall HP 4.4 verteilt sich infolgedessen der  $^{14}\text{C}$ -Austrag nicht auf zwei Peaks, sondern nur auf einen Peak

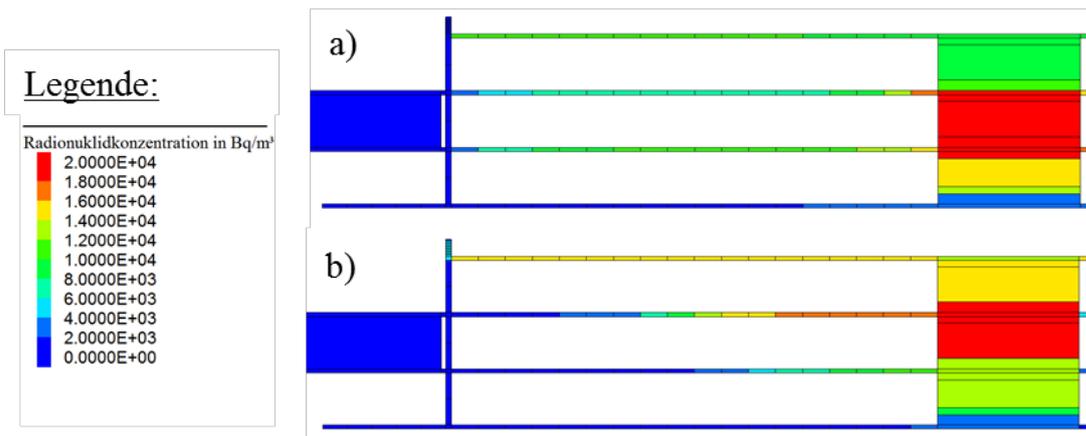
zu einem späteren Zeitpunkt (ca. 15.000 a). In den Rechenfällen GT 1.4 und HP 2.3 ist das Gegenteil der Fall: durch den erhöhten 1. Peak des Gasausstroms wird besonders viel  $^{14}\text{C}$  ausgetragen. Zeitpunkt und Höhe des Gasausstroms, die Prozesse in der Umgebung der Randelemente (insbesondere des Randelementes RAAB) und der damit verbundene  $^{14}\text{C}$ -Austrag haben eine Auswirkung auf die  $^{14}\text{C}$ -Konzentration in der Grube. Besonders die  $^{14}\text{C}$ -Konzentration unterhalb des Randes RAAB auf der 1. Sohle wird durch diese Prozesse beeinflusst, wie ein Vergleich mit dem Bezugsfall zeigt (siehe Abb. 3.121).



**Abb. 3.119** Vergleich des Gasausstroms über das Randelement RAAB für unterschiedliche Rechenfälle



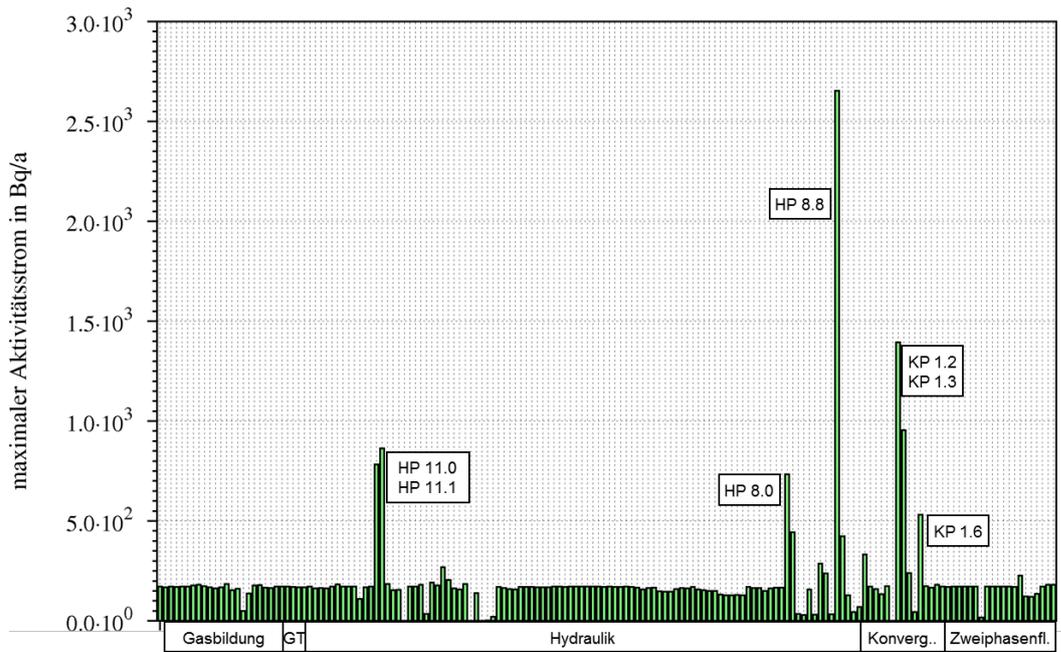
**Abb. 3.120** Vergleich des <sup>14</sup>C-Aktivitätsstroms über das Randelement RAAB für unterschiedliche Rechenfälle



**Abb. 3.121**  $^{14}\text{C}$ -Konzentration in der Umgebung des Randelementes RAAB für den a) Bezugsfall sowie b) Rechenfall HP 4.4 zum Zeitpunkt 15.000 a

Zur Illustration des Austrags von Radionukliden, die nur in der flüssigen Phase transportiert werden, wird wiederum  $^{59}\text{Ni}$  als Indikator benutzt, alle beschriebenen Prozesse gelten genauso für alle anderen Radionuklide die sich in Lösung befinden. Der Austrag dieses Radionuklids über den Rand RAMB ist in Abb. 3.122 und über den Rand RAAB in Abb. 3.123 für alle Variationsrechnungen dargestellt. Der Ausstrom von  $^{59}\text{Ni}$  ist im Allgemeinen sehr gering und liegt, bis auf den Rechenfall HP 8.8 bei  $< 200 \text{ Bq/a}$  (Randelement RAMB) bzw. bis auf einige wenige Rechenfälle bei Null (Randelement RAAB).

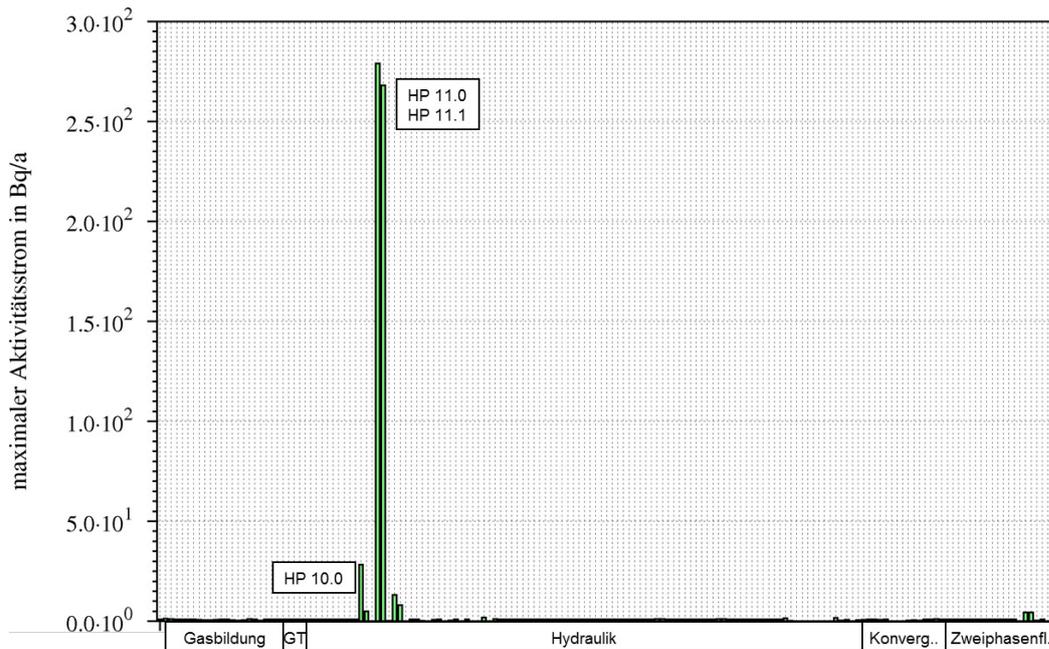
Die Effekte, die aufgrund der Parameteränderungen in den meisten der in Abb. 3.122 und Abb. 3.123 markierten Rechenfälle auftreten, sind bereits untersucht und beschrieben worden. Auch für die flüssige Phase lässt sich kein einfacher linearer Zusammenhang zwischen Verfüllgrad, initialer Permeabilität der Strecken und dem resultierenden Austrag feststellen. Zu beobachten ist jedoch, dass der Peak des  $^{59}\text{Ni}$ -Austrags in den Rechenfällen HP 8.8 (Verfüllgrad 99 %, initiale Permeabilität  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ ) und HP 8.0 (Verfüllgrad 65 %, initiale Permeabilität  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ ) nach der Korrosion sowohl der Abdichtung 8 und 11 auftreten. Insbesondere die Abdichtung 8 korrodiert in diesen Rechenfällen früh, nach ca. 80.000 a. Das bedeutet, dass die Radionuklide (hier  $^{59}\text{Ni}$ ), die diese Peaks verursachen, ihren Ursprung im Südfeld haben. Das heißt auch, dass Verfüllgrad und initiale Permeabilität zumindest einen Einfluss auf den Lösungsstrom innerhalb der Grube haben und damit auch die Korrosion der Abdichtungen beeinflusst wird.



**Abb. 3.122** Maximaler  $^{59}\text{Ni}$ -Austrag über den Rand RAMB für alle Rechenfälle (komplexes Modell, „mit relevantem Lösungszutritt“)

Im Histogramm entspricht der 1. Balken dem Bezugsfall mit einem Wert von  $170 \text{ Bq/a}$ ; unten angegeben ist die Kategorie, die aussagt, welche Art von Parameter geändert wurde.

Die Ergebnisse der Rechenfälle HP 10.0, HP 11.0 sowie HP 11.1 zeigen erneut den Einfluss einer aufgrund der vergrößerten Permeabilität ( $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ ) potentiell erhöhten Durchströmbarkeit der vertikalen Verbindungen. Die Ergebnisse der Rechenfälle KP 1.2 und KP 1.3 zeigen die Auswirkungen beschleunigter Konvergenzprozesse auf das Auspressverhalten der Lösung im Endlager.



**Abb. 3.123** Maximaler  $^{59}\text{Ni}$ -Austrag über den Rand RAAB für alle Rechenfälle (komplexes Modell, „mit relevantem Lösungszutritt“)

Im Histogramm entspricht der 1. Balken dem Bezugsfall mit einem Wert von  $< 1 \text{ Bq/a}$ ; unten angegeben ist die Kategorie, die aussagt, welche Art von Parameter geändert wurde

Insgesamt lassen sich für die Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“ folgende Feststellungen treffen:

- In einigen Rechenfällen führen kleine Parameteränderungen zu einer deutlichen Änderung des Systemverhaltens. Dies betrifft den Gasstrom innerhalb der Grube und insbesondere zwischen den Randelementen RAAB und RAMB.
- Diese Änderungen führen in der Folge im Vergleich mit dem Bezugsfall zu einem deutlich unterschiedlichen  $^{14}\text{C}$ -Austrag.
- Aber: in den meisten Rechenfällen liegt der  $^{14}\text{C}$ -Austrag relativ einheitlich bei  $< 50.000 \text{ Bq/a}$  (Randelement RAAB) bzw.  $< 1.000 \text{ Bq/a}$  (Randelement RAMB).  
 ➔ Für die Gasphase und die darin enthaltenen Radionuklide (hier nur  $^{14}\text{C}$ ) ist die Struktur des Modells zwischen den beiden Rändern inklusive der ELB Nordfeld und ELB Zentralteil eine überaus sensitive Lokation.
- Der Austrag der gelösten Radionuklide ( $^{59}\text{Ni}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ , etc.) ist von dem Systemverhalten zwischen den Randelementen RAAB und RAMB unbeeinflusst.

- Insgesamt führen auch große Parameteränderungen zu geringen Ergebnisänderungen, das System kann man besonders aufgrund der niedrigen Permeabilität der Strecken als „träge“ bezeichnen.

## **4 Schlussfolgerungen und Zusammenfassung**

### **4.1 Schlussfolgerungen**

#### **4.1.1 Zweiphasenflussprozesse und Modellkomplexität**

Die Berücksichtigung von Zweiphasenflussprozessen im Endlagersystem führt zu Prozessen und Effekten, die das Transportverhalten der Radionuklide entscheidend beeinflussen.

#### **Die Rolle von Zweiphasenflussprozessen**

Unter den gegebenen Randbedingungen (aus /BEC 09/, /NIE 09/) führt die Berücksichtigung zweier Phasen zu der erwarteten vertikalen Phasenseparierung (Aufstieg von Gas), sobald ein in der Vertikalen diskretisiertes Gittermodell verwendet wird. Dies führt zur Separierung der gasförmigen Radionuklide (hier  $^{14}\text{C}$ ), die in beiden Phasen (auch geringfügig in der flüssigen Phase) enthalten sind. Im Modellkonzept des Basismodells führt dies dazu, dass effektiv kein bzw. kaum Transport von  $^{14}\text{C}$  aus dem West-/Südfeld stattfinden kann, da die repräsentative Abdichtung für Gase effektiv undurchlässig ist und bleibt.

In den vertikal nicht diskretisierten Bereichen und dabei insbesondere im Mischungsbereich des Basismodells findet folglich keine Phasenseparierung statt. Dies bedeutet, dass gleichzeitig sowohl gasförmige als auch in Lösung befindliche Radionuklide (genau wie die Fluide selbst) im gesamten Mischungsbereich (Bartensleben und Marie) und in den weiteren nicht abgedichteten Bereichen vorhanden sind. Dabei findet – wie in /BEC 09/, /NIE 09/ angegeben – innerhalb der relativ großen Gitterelemente für beide Phasen ein instantaner Konzentrationsausgleich und eine Verdünnung statt. Diese Vorgänge in den Mischungsbereichen sind relevant, denn der Mischungsbereich fungiert als Verteilerzentrum für Fluide und Radionuklide – je nach Systementwicklung in erster Linie für Gas oder für Flüssigkeit. So sind im einfachen System des Basismodells bereits komplexe Transportvorgänge beobachtbar.

Aus diesen Beobachtungen heraus entstand das Konzept des erweiterten Modells, das insbesondere für die Mischungsbereiche, aber auch für andere Modellbereiche die Separierung der Phasen und damit der gasförmigen und der in der Lösung enthaltenen

Radionuklide ermöglicht. Beide Modelle, das Basismodell und das erweiterte Modell, beruhen dabei konzeptionell weiterhin auf der Kompartimentvorstellung, also der Vorstellung, große Bereiche des Endlagersystems durch jeweils ein großes (intern unstrukturiertes) Volumen abbilden zu können. Trotz erhöhter Diskretisierung und der Schaffung neuer Verbindungen zwischen den Kompartimenten wird eine Komplexitätserhöhung der Strömungsvorgänge im erweiterten Modell jedoch nur in geringem Maße beobachtet. Insgesamt kann man bei einem Vergleich hinsichtlich der Zweiphasenflussprozesse von Basis- und erweitertem Modell Folgendes feststellen:

Für die Systementwicklung „trockene Grube“ gilt, dass

- die Gasdurchlässigkeit der Abdichtungen das System steuert. Gasdurchlässigere Abdichtungen ermöglichen
  - den Transport von Gas und Radionukliden (hier  $^{14}\text{C}$ ) aus den abgedichteten Einlagerungsbereichen,
  - ein frühes Erreichen des für das Entweichen von Fluiden über den Modellrand kritischen Drucks von 3 MPa und somit
  - den – bei einem insgesamt sehr geringen  $^{14}\text{C}$  Austrag – entsprechend höheren Austrag von  $^{14}\text{C}$ .

Für die Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“ gilt, dass

- der Gasdruck im West-/Südfeld die Sättigungsentwicklung und die Korrosionsgeschwindigkeit der Abdichtung steuert und damit ihre Durchlässigkeit mittelbar beeinflusst,
- insbesondere im erweiterten Modell der Gasdruck im West-/Südfeld teilweise auf den unterschiedlichen Sohlen eine entgegengesetzte Auswirkungen auf die Sättigungsentwicklung und Korrosionsgeschwindigkeit der Abdichtungen (und damit wiederum ihrer Durchlässigkeit) hat,
- die Berücksichtigung von Zweiphasenflussparametern (z. B. der Gaseindringdruck) bei den Simulationsrechnungen die Sättigungsentwicklung der Abdichtungen steuert und dadurch die Permeabilität der Abdichtungen für Gas auf den jeweiligen Sohlen beeinflusst wird, sowie

- insgesamt die Radionuklidaustragsrate ( $^{14}\text{C}$  und gelöste Radionuklide) im erweiterten Modell höher ist als im Basismodell.

Der direkte Vergleich der Auswirkungen von Zweiphasenflussprozessen im komplexen Modell mit dem Basis- und erweiterten Modell ist schwierig durchzuführen, da im Zuge der Komplexitätserhöhung des Modellgitters zusätzlich eine abweichende Parametrierung vieler Modellbereiche stattfinden musste. Es lassen sich dennoch einige Feststellungen durch einen direkten Vergleich der Berechnungsergebnisse für die unterschiedlichen Modellgitter treffen:

Im komplexen Modell haben die Zweiphasenflussprozesse in den Abdichtungen – obwohl die gleichen Prozesse stattfinden – insgesamt einen geringeren Einfluss auf das Systemverhalten als im Basis- oder erweiterten Modell. Ein Gas- und/oder Lösungsstrom durch eine der Abdichtungen am Südfeld findet in der Regel erst spät im Berechnungszeitraum statt. Im komplexen Modell sind daher die abgedichteten Bereiche länger von den nicht abgedichteten Bereichen entkoppelt als in den anderen Modellen. Der Einfluss des Südfelds auf den  $^{14}\text{C}$ -Austrag ist wegen dieser Entkopplung gering. Da der Gas-, Lösungs-, und Radionuklidausstrom aus dem Südfeld relativ spät stattfindet, ist der größte Teil des  $^{14}\text{C}$  zu diesem Zeitpunkt bereits zerfallen.

Selbst in den Rechenfällen, in denen die Abdichtungen beispielsweise durch die Variation der Permeabilität oder Flüssigkeitssättigung durchlässiger für Gas oder Lösung gemacht wurden, sind die Auswirkungen auf den  $^{14}\text{C}$ -Austrag vergleichsweise gering, da die geringe Permeabilität der Strecken nach mittleren Zeiträumen (10.000 a bis 50.000 a) einen langsamen Transport der Fluide und Radionuklide verursacht.

An anderen Lokationen des komplexen Modells haben Zweiphasenflussprozesse jedoch eine sehr große Bedeutung für das Strömungsverhalten und damit auch für den Radionuklidaustrag. Die Untersuchung der Strömungsvorgänge an beiden Randelementen, zwischen denen eine geometrisch komplexe Struktur lokalisiert ist, verdeutlicht die Bedeutung der Flüssigkeitssättigung der Strecken, vertikaler Verbindungen oder anderer Bereiche des Endlagers für den Gastransport und den darin enthaltenen gasförmigen Radionukliden. Die Flüssigkeitssättigung, die durch den Einstrom der Lösung für einige Lokationen nach kurzer Zeit nahe 0,98 (nur darunter ist im Modell Gasstrom möglich) liegt, steuert das System deutlicher als im Basis- und erweiterten Modell. Das gilt insbesondere in Bezug auf die Abdichtungen zum West-/Südfeld. Im

komplexen Modell kann die Flüssigkeitssättigung an vielen Lokationen im Modellgitter gleichsam als Schalter angesehen werden, der den Gastransport über diese Abzweigungen aus- oder einschaltet. Dies ist im Basis- und erweiterten Modell im Gegensatz dazu nur an wenigen ausgewählten Lokationen (wie einem Mischungsbereich) möglich. Inwieweit ein solches schalterartiges Verhalten auch im ERAM zu erwarten ist, ist schwierig zu beurteilen, da dieses Verhalten deutlich von der verwendeten Modellgeometrie und der den Zweiphasenflussprozessen zu Grunde liegenden Parametern abhängt.

### **Die Rolle der Modellkomplexität**

Bei allen Modellen wird deutlich, dass das Nordfeld als Gas- und Radionuklidquelle eine wichtige Rolle für den frühen Ausstrom von Gas und gasförmigen Radionukliden spielt. Dies gilt insbesondere für die Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“, da hier das Erreichen  $^{14}\text{C}$  potenziell bereits sehr früh aus dem Endlager entweichen kann, während für die Systementwicklung „trockene Grube“ der Zeitpunkt des potenziellen Entweichens von  $^{14}\text{C}$  erst spät nach dem Zerfall des größten Teils von  $^{14}\text{C}$  erreicht wird.

Die genannten Feststellungen in Bezug auf das berechnete Strömungsverhalten der Fluide innerhalb des ERAM (bzw. des Modells) – insbesondere in der Umgebung der Zu- und Austrittsorte – erlauben jedoch Rückschlüsse hinsichtlich der Rolle des Mischungsbereichs: Die Untersuchungen zum Basis- und erweiterten Modell zeigen, dass dem Mischungsbereich in den entsprechenden Berechnungen eine große Bedeutung als Fluid- und Radionuklidverteiler zukommt.

Ein Strömungsverhalten, das ausschließlich den Ein- und Ausstromvorgängen am Mischungsbereich ähnelt, findet man im komplexen Modell in Ansätzen im Bereich unterhalb des Randes RAMB (am First des Abbaus 1a), allerdings nicht im Bereich unterhalb des Randes RAAB (geometrisch vier Sohlen „über“ dem ELB Nordfeld).

Die Verteilerfunktion des Mischungsbereiches, die im Basis- und erweitertem Modell beobachtet wurde – also die Rolle des Mischungsbereich als Knotenpunkt zwischen allen anderen Bereichen des Endlagers, der für schnellen Transport in alle Bereiche des Endlagers sorgt ist im komplexen Modell – ist im komplexen Modell nicht zu finden.

In dieser Hinsicht (Verteilerfunktion) zeigt sich an beiden Randelemente und insbesondere in den die Randelemente umgebenden Bereich des Endlagers ein mit dem für den Mischungsbereich berechneten nicht vergleichbares Strömungs- und Transportverhalten. Es zeigt sich, dass hier sogar das Gegenteil der Fall ist und die Radionuklide aus den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen größtenteils im Bereich des Endlagers zwischen den beiden Zu- und Austrittslokalationen verbleiben.

Für die Systementwicklung „trockene Grube“ lässt sich feststellen, dass die Mehrsöhlichkeit, die mit dem erweiterten Modell eingeführt wurde, im Vergleich zum Basismodell kaum einen Einfluss auf das Verhalten (interne Strömungs- und Transportprozesse) des Modellsystems hat.

Für die Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“ ist dagegen der Einfluss der Mehrsöhlichkeit auf den Transport gasförmiger Radionuklide deutlich vorhanden: der  $^{14}\text{C}$ -Austrag ist im erweiterten Modell bis zu einer Größenordnung höher als im Basismodell. Für die Radionuklide, die sich in Lösung befinden, ist dagegen dieser Einfluss weniger deutlich ausgeprägt.

Die Bedeutung des Einlagerungsbereiches Nordfeld und dessen Umgebung in Bezug auf den Radionuklidaustrag ist insbesondere im komplexen Modell sichtbar. Nahezu alle signifikanten Änderungen (im Vergleich zum Bezugsfall) im Ausstromverhalten von Gas und in der Konsequenz von  $^{14}\text{C}$  lassen sich auf die Rolle dieses Einlagerungsbereiches sowie der Kammer/Schweben-Struktur im komplexen System zwischen den beiden Rändern RAAB und RAMB zurückführen.

Die Erhöhung der Modellkomplexität, die im komplexen Modell durch ein verzweigtes Streckennetz (inkl. vertikaler Verbindungen und Kammer/Schweben) realisiert wurde, beeinflusst das Systemverhalten (Gas, Lösungs- und Radionuklidstrom). Dies zeigt beispielsweise die Auswertung der Entwicklung der Radionuklidkonzentration bei Variation der potenziellen Lokation der unentdeckten Wegsamkeiten. Bei der Analyse des Einflusses der Modellkomplexität lässt sich allerdings nur schwer unterscheiden, welchen Anteil die geänderte Geometrie an diesem Einfluss hat und welche die spezifischen Materialeigenschaften, die teilweise anders gewählt werden mussten als im Basis- bzw. erweiterten Modell.

## Probabilistische Parametervariationen

Insbesondere die nach wie vor vorhandene Ungewissheit in Bezug auf die verwendeten Zweiphasenflussparameter spielt eine große Rolle hinsichtlich der Bandbreite der Höhe des berechneten Radionuklidaustrags. Die probabilistischen Berechnungen (Anhang B) zeigen – je nach Systementwicklung – eine unterschiedliche Bedeutung der Zweiphasenflussparameter. Die Bandbreite des Indikators  $^{14}\text{C}$ -Ausstrom bewegt sich dabei in ähnlichen Größenordnungen wie die der deterministischen Parametervariationen.

Für die Systementwicklung „trockene Grube“ reagieren die  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsströme – unabhängig von dem betrachteten Rand – am sensitivsten auf den Parameter  $\lambda$  der van-Genuchten-Kapillardruckfunktion (der für Strecken und Abdichtungen gleich gesetzt wurde). Allerdings wurden nur für den Austrag über den Rand Abbau 1a (RAMB) hohe Bestimmtheitsmaße ermittelt. Die hohe Sensitivität des Parameters  $\lambda$  dürfte dessen Einfluss auf die Gasdurchlässigkeit der Abdichtung geschuldet sein. Verringerte Werte von  $\lambda$  vermindern den Gaseindringdruck und erleichtern ein Entweichen von  $^{14}\text{C}$ -haltigem Gas in die Restgrube.

Für die Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“ weist sich beim  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom der Parameter  $p_0$  der Strecken als der sensitivste Parameter aus. Allerdings ist diese Aussage nur für den  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom über die Abbaustrecke 5 mit hohen Bestimmtheitsmaßen verbunden. Beim Austrag über diesen Rand ist die residuale Gassättigung der relativen Permeabilitätsfunktion der am zweitbesten korrelierte Parameter. Der große Einfluss des Strecken-Parameters  $p_0$  auf den  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom dürfte dadurch begründet sein, dass niedrige  $p_0$ -Werte die Fähigkeit des Gases erhöhen, Flüssigkeit aus den Poren des Streckenversatzes zu verdrängen.  $^{14}\text{C}$  kann dann leichter ausgetragen werden.

Der  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom weist eine starke Korrelation zur Permeabilität der vertikalen Verbindung zwischen dem Nordfeld und dem Rand Abbaustrecke 5 (RAAB) auf (siehe Abb. B.2). Eine Besonderheit ist, dass diese Korrelation mit hohen Bestimmtheitsmaßen verbunden ist, obwohl die Anzahl der Modellläufe im Verhältnis zur Anzahl der variierten Parameter sehr gering ist (siehe auch Anhang B.2). Die Bedeutung dieser Verbindung deckt sich mit den vorausgegangenen Ergebnissen der deterministischen Berechnungen (siehe Kap. 3.3.2), in welchen gezeigt wurde, dass die vertikale Verbin-

derung unterhalb des Randes RAAB ein schalterartiges Verhalten bezüglich ihrer Gasdurchlässigkeit zeigen kann und so die  $^{14}\text{C}$ -Ausstromrate steuert.

Der  $^{59}\text{Ni}$ -Aktivitätsstrom zeigt durchweg eine geringe Variabilität, so dass keiner der veränderten Parameter eine signifikante Auswirkung auf den Ausstrom hat. Das bedeutet, dass die große Bandbreite der Zweiphasenflussparameter nahezu keinen Einfluss auf das Systemverhalten der gelösten Radionuklide im ERAM hat.

Auch für die Variation der Permeabilität (für Schweben und vertikale Verbindungen) zeigt sich kein besonders sensibler Parameter. Dies kann aber der geringen Anzahl von Modellläufen geschuldet sein und lässt keine weitere Interpretation zu.

#### **4.1.2 Berührungspunkte zur ESK-Stellungnahme /ESK 13/**

Wie in Kap. 1.2 bereits erwähnt wurden von der Entsorgungskommission des Bundes (ESK) Fragen formuliert, die Parallelen zu den Zielen des Vorhabens ZIESEL aufweisen.

Inbesondere für die aufgeworfenen Fragen zur Modellkomplexität, zu den „kompartiment-internen Strömungsprozessen“ und zu der „kaum berücksichtigten Zweiphasenfluss – Problematik“ /ESK 13/ in den vorhandenen Berechnungen /BEC 09/, /NIE 09/ zum Nachweis der Langzeitsicherheit des ERAM liefern die vorliegenden Untersuchungen möglicherweise einen Beitrag.

Im Rahmen des Vorhabens konzeptionell interessant ist – in Bezug auf die im Vorhaben untersuchten Auswirkungen der Modellkomplexität – die von der ESK aufgeworfene Frage zu potentiell unentdeckten Verbindungen im Endlager. Da sowohl das Vorhandensein als auch die Lokation einer solchen Verbindung unsicher ist, ist es eine Herausforderung eine solche Verbindung zu modellieren. Die Berücksichtigung aller möglichen Lokationen einer solchen Verbindung beispielsweise zwischen Südfeld und Zentralteil würde in einer unüberschaubaren Anzahl von Gittermodellen resultieren, so dass diese Variante technisch nicht lösbar ist.

Da diese Frage letztlich nur mit Hilfe eines komplexen Gittermodells untersucht werden kann, wurde diese interessante Problemstellung im Vorhaben untersucht. Das hier (sowie in /FRI 16/ beschriebene) verfolgte Analysekonzept sieht vor, jeweils eine für Gas und Lösung durchlässige Verbindung vom nächstgelegenen Rand (hier RAMB) zu

allen Sohlen des Süd- bzw. Ostfelds zu modellieren. Dies konnte im vorhandenen komplexen Gittermodell realisiert werden ohne jeweils ein neues Gittermodell für jede potentielle Verbindung erzeugen zu müssen.

Obwohl Konservativitätsbetrachtungen nicht explizites Ziel dieses Vorhabens waren, ist zu beobachten, dass die für das komplexe Modell berechneten maximalen Radionuklidaustragsraten geringer sind als die für das hier ebenfalls betrachtete sogenannte erweiterte Modell.

Für den Bezugsfall „trockene Grube“ zeigt das komplexe Modell die geringste  $^{14}\text{C}$ -Austragsrate, wohingegen für das erweiterte Modell die höchste Rate errechnet wird. Allerdings sind alle Austragsraten sehr niedrig und werden ausschließlich durch die Diffusion über den Modellrand bzw. die Ränder verursacht.

Für den Bezugsfall „mit relevantem Lösungszutritt“ zeigt das komplexe Modell die höchste  $^{14}\text{C}$ -Austragsrate und das Basismodell die geringste, der Unterschied dieser beiden Raten ist relativ gering und beträgt weniger als eine Größenordnung. Dagegen ist der  $^{59}\text{Ni}$ -Austrag für das komplexe Modell mit deutlichem Abstand (drei Größenordnungen) geringer als der für das erweiterte Modell berechnete maximale  $^{59}\text{Ni}$ -Austrag.

#### **4.1.3 Überblick**

Der Vergleich der Ergebnisse aller Modelle zeigt, dass

- ein zentraler Mischungsbereich als „Verteiler“ deutliche Relevanz für das Systemverhalten hat, im komplexen Modell jedoch keine geometrische Struktur vorhanden ist, die diese Verteilerfunktion übernimmt,
- im Gegensatz dazu im komplexen Modell die komplexe geometrische Struktur zwischen den beiden Randelementen eine erhebliche Beutung für das Systemverhalten hat,
- bereits eine einfache Kompartimentstruktur wie im Basismodell komplexe Strömungs- und Transportvorgänge erzeugt, wobei diese komplexen Strömungs- und Transportvorgänge vielerorts auch im komplexen Modell zu beobachten sind,

- eine Modellerweiterung auf mehrere Sohlen und eine Komplexitätserhöhung der Modellgeometrie (z. B. stärkere Lokalisierung der Fließwege) nicht generell bzw. zwingend zu deutlich komplexeren Strömungs- und Transportprozessen führen,
- jedoch an einzelnen Strukturen oder Lokationen (z. B. die komplexe geometrische Struktur zwischen den beiden Randelementen) die Kombination von Zweiphasenflussprozessen, erhöhter Modellkomplexität, der Parametrierung und der Randbedingungen (Einstrom an zwei Zutrittsorten) zu komplexen Strömungs- und Transportprozessen führen, die lokal eine große Auswirkung (z. B. eine deutliche Erhöhung der  $^{14}\text{C}$ -Austragsrate) haben,
- für das komplexe Modell die Bandbreite des Radionuklidaustrags der probabilistischen und deterministischen Berechnungen vergleichbar ist,
- sich der für das komplexe Modell berechnete Zeitpunkt der Korrosion der Abdichtungen sowie der Radionuklidaustrag signifikant von den Ergebnissen aus /BEC 09/, /NIE 09/ unterscheiden. Der Zeitpunkt der Abdichtungskorrosion liegt in der Regel deutlich später und der Radionuklidaustrag ist in allen Fällen geringer als in /BEC 09/, /NIE 09/ dargestellt.

## 4.2 Zusammenfassung

Das übergeordnete Ziel des Vorhabens ist es, Zweiphasenflussprozesse in einem komplexen Endlagersystem besser zu verstehen. Es ist ersichtlich, dass die Berücksichtigung von Zweiphasenflussprozessen bei den Berechnungen für das modellierte Endlagersystem zu Prozessen und Effekten führt, die das Transportverhalten von Fluiden und Radionukliden stark beeinflussen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Zweiphasenflussprozesse nicht nur die Kapillardrücke und relativen Permeabilitäten umfassen, sondern auch eine grundsätzliche Konkurrenz der Phasen um den Porenraum in Bezug auf Speicherung und Transport sowie die dichtegetriebene, vertikale Separierung der Phasen.

Im Wesentlichen haben sich (abhängig von der Modellkomplexität) zwei Modellkomponenten als wichtig für das Systemverhalten erwiesen. Dies sind einerseits die Abdichtungen (zum West-/Südfeld bzw. Südfeld), die, beeinflusst vom Gasdruck, das Sys-

temverhalten steuern. Andererseits ist dies die Modellgeometrie unterhalb der Zutrittslokationen, die in keinster Weise einem Mischungsbereich, wie dies in den Kompartimentmodellen angenommen wurde, ähnelt.

Für das Systemverhalten der beiden oben beschriebenen Komponenten sind die elementaren hydraulischen Eigenschaften (wie die Höhe der Permeabilität) von Bedeutung. Je komplexer das Modell, desto wichtiger werden aber die Eigenschaften, die das Zweiphasenflussverhalten steuern: Zum Beispiel ist für den Korrosionszeitpunkt der Abdichtungen im Basismodell eine geringe Permeabilität deutlich bestimmender als die Höhe der Flüssigkeitssättigung. Im komplexen Modell dagegen ist die Flüssigkeitssättigung der vertikalen Verbindung zwischen dem ELB Nordfeld und dem Rand RAAB ein viel bestimmenderer Parameter, da die Permeabilität der vertikalen Verbindungen konstant niedrig ( $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ ) ist und aufgrund der Gebirgskonvergenz die Permeabilität der Strecken oft nach wenigen 1000 Jahren bis auf den angenommenen minimalen Wert ( $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ ) abgesunken ist.

Die von der ESK in /ESK 13/ formulierten Fragen berühren das Vorhaben ZIESEL inhaltlich und die hier durchgeführten Berechnungen liefern möglicherweise einen Beitrag zur Beantwortung der Fragen.

Im hier vorliegenden Synthesebericht sowie in Teil 2 des Syntheseberichts /FRI 16/ sind die wesentlichen Ergebnisse dokumentiert, die im Vorhaben „Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zum Zweiphasenfluss in einem salinaren Endlager“ erzielt wurden. Weitere Ergebnisse sind in /HOT 16a/, /HOT 16b/, /NAV 16a/, /NAV 16b/ und /SEH 16/ zu finden. Ein kurzer Überblick über das gesamte Vorhaben ist im Abschlussbericht /KOC 16/ zu finden.

#### **4.3 Dank**

An dieser Stelle sei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des BMUB, des BfS sowie der Unterauftragnehmer des BfS für die Beantwortung zahlreicher Fragen zum ERAM und zur Datenbasis, für die Erlaubnis der Nutzung der Software ERAM SIS/HIS im Rahmen dieses Vorhabens sowie für die fruchtbaren Diskussion auf den Workshops und Fachsitzungen herzlich gedankt. Dank geht ebenfalls an alle Kolleginnen und Kollegen der GRS für die sehr gute Zusammenarbeit.

## Literaturverzeichnis

- /BEC 09/ Becker, D.-A., Buhmann, D., Mönig, J., Noseck, U., Rübél, A., Spiessl, S.: Sicherheitsanalyse für das verfüllte und verschlossene Endlager mit dem Programmpaket EMOS, GRS-A-3454: Braunschweig, 27. März 2009.
- /BEU 08/ Beuth, T., Baltés, B., Keller, S., Kienzler, B., Krone, J., Mönig, J., Navarro, M., Preuss, J., Röhlig, K.-J., Schäfer, S., Weber, J.R., Wollrath, J.: Position of the Working Group on „Scenario Development“. Handling of human intrusion into a repository for radioactive waste in deep geological formations, Working Group on „Scenario Development“, atw, LIII, 8/9, S. 538–540, 2008.
- /BFS 05/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle – Wirtsgesteine im Vergleich. Synthesebericht des Bundesamtes für Strahlenschutz, 189 S.: Salzgitter, 4. November 2005.
- /BOL 11/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M.: Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, 187 S., ISBN 978-3-939355-48-9: Köln, 2011.
- /BOL 12/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomaske, B., Bracke, G., Kilger, R.: Endlagerauslegung und -optimierung. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Bericht zum Arbeitspaket 6, GRS-281, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 285 S.: Köln, 2012.
- /COR 54/ Corey, A.T.: The Interrelation Between Gas and Oil Relative Permeabilities, Producers Monthly, Bd. 19, S. 38–41, 1954.
- /DAR 56/ Darcy, H.: Les Fontaines Publiques de la ville de Dijon, Dalmont: Paris, 1856.

- /DBE 14/ DBE: Hohlrauminformationssystem für das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben. Arbeitsstand 2014, Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), 2014.
- /ESK 13/ Entsorgungskommission (ESK): Langzeitsicherheitsnachweis für das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM), 2013.
- /FIS 13/ Fischer-Appelt, K., Baltes, B., Buhmann, D., Larue, J., Mönig, J.: Synthesebericht für die VSG. Bericht zum Arbeitspaket 13. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-290, 424 S., ISBN 978-3-939355-66-3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2013.
- /FRI 16/ Frieling, G., Kock, I.: Modellkonzepte, Prozesse und Rechenfälle für das Vorhaben ZIESEL. Synthesebericht Teil 2/2, GRS-397, ISBN 978-3-944161-78-5, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, 2016.
- /GEN 80/ van Genuchten, M.T.: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Science Society of America Journal, Bd. 44, Nr. 5, S. 892–898, DOI 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x, 1980.
- /HEL 97/ Helmig, R.: Mulziphase Flow and Transport Processes in the Subsurface. A Contribution to the Modeling of Hydrsystems, Environmental Engineering, ISBN 3-540-62703-0, Springer: Berlin, Heidelberg, 1997.
- /HOF 92/ Hofer, E., Krzykacz, B.: Bewertung von statistischen Methoden für Untersuchungen zur Langzeitsicherheit von Endlagern., GRS- A 1882, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, 1992.
- /HOT 16a/ Hotzel, S., Eckel, J., Fischer, H., Navarro, M.: Test Handbook for the Code TOUGH2-GRS, GRS-402, ISBN 978-3-944161-83-9, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, 2016.

- /HOT 16b/ Hotzel, S., Navarro, M., Seher, H.: QS-Handbuch für den Programmcode TOUGH2-GRS, GRS-401, ISBN 978-3-944161-82-2, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, 2016.
- /JAV 01/ Javeri, V.: Dreidimensionale Analysen zum Nuklidtransport bei salzanteilabhängiger Adsorption in einem porösen Medium mit dem Rechenprogramm TOUGH2, Hrsg.: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-2864, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2001.
- /JAV 02/ Javeri, V.: Analysen zum Nuklidtransport bei variabler Salinität und nichtlinearer Adsorption in der stark heterogenen Geosphäre der Gorlebener Rinne, Hrsg.: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3038, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2002.
- /JAV 04/ Javeri, V.: Dreidimensionale Analysen zum gekoppelten Gas-, Wärme- und Nuklidtransport in einem Endlager im Steinsalz, Hrsg.: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3191, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2004.
- /JAV 06a/ Javeri, V.: Three dimensional analyses of combined gas and nuclide transport in a repository considering coupled hydro-mechanical processes, TOUGH Symposium 2006, Technical Program and Abstracts, S. 46, TOUGH Symposium 2006: Berkley, May 15-17, 2006.
- /JAV 06b/ Javeri, V.: Three dimensional analyses of coupled gas, heat and nuclide transport in a repository including rock salt convergence, TOUGH Symposium 2006, Technical Program and Abstracts, S. 80, TOUGH Symposium 2006: Berkley, May 15-17, 2006.
- /JAV 95/ Javeri, V.: Orientierende Analysen zum Nuklidtransport durch Naturkonvektion; Gesteinskonvergenz und Dispersion in porösen Medien mit dem Rechenprogramm TOUGH2., Hrsg.: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-2240: Köln, 1995.

- /JAV 96/ Javeri, V.: Orientierende Analysen zum Gas- und Nuklidtransport in einem Endlager im Salinar, Hrsg.: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-2389, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 1996.
- /KLO 15/ Kloos, M.: SUSANA Version 4.0. User's Guide and Tutorial, GRS - P - 5, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, 2015.
- /KOC 12/ Kock, I., Eickemeier, R., Frieling, G., Heusermann, S., Knauth, M., Minkley, W., Navarro, M., Nipp, H.-K., Vogel, P.: Integritätsanalyse der geologischen Barriere. Bericht zum Arbeitspaket 9.1, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-286, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 301 S., ISBN 978-3-939355-62-5: Köln, 2012.
- /KOC 14/ Kock, I., Hotzel, S.: Probabilistische Analysen zum Zweiphasenfluss in einem salinaren Endlager, GRS-325, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-944161-05-1: Köln, 2014.
- /KOC 16/ Kock, I., Navarro, M., Frieling, G., Hotzel, S., Seher, H., Fischer, H., Eckel, J., Weyand, T., Lambers, L.: Zweiphasenfluss in einem salinaren Endlager am Beispiel des ERAM. Abschlussbericht, GRS-444, ISBN 978-3-946607-26-7, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, 2016.
- /KRÖ 09/ Kröhn, K.P., Stührenberg, D., Herklotz, M., Heemann, U., Lerch, C., Xie, M.: Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz in einem HAW-Endlager - Phase 1, GRS-254, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 266 S., ISBN 978-3-939355-29-8, 2009.
- /LAR 13/ Larue, J., Baltes, B., Fischer, H., Frieling, G., Kock, I., Navarro, M., Seher, H.: Radiologische Konsequenzenanalyse. Bericht zum Arbeitspaket 10, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-289, 267 S., ISBN 978-3-939355-65-6, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2013.

- /MAN 95/ Manai, T.: EVEGAS European validation exercise of GAS migration models through geological media (Phase 1), Nuclear Science and Technology, Hrsg.: European Commission (EC), EUR 16639 EN, 62 S.: Brüssel, 1995.
- /NAV 11/ Navarro, M., Seher, H.: Nicht-kartesische Gitter für TOUGH2, GRS-A-3593, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2011.
- /NAV 13a/ Navarro, M.: Die vereinfachte Berechnung der Konvergenzrate salzgrusverfüllter Hohlräume im Steinsalz, GRS-307, 47 S., ISBN 978-3-939355-86-1, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2013.
- /NAV 13b/ Navarro, M.: Handbuch zum Code TOUGH2-GRS.00a. Erweiterungen des Codes TOUGH2 zur Simulation von Strömungs- und Transportprozessen in Endlagern, GRS-310, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-939355-89-2: Köln, 2013.
- /NAV 16a/ Navarro, M., Eckel, J.: TOUGH2-GRS Version 01 User Manual, GRS-403, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, ISBN 978-3-944161-84-6, 2016.
- /NAV 16b/ Navarro, M., Fischer, H., Seher, H., Weyand, T.: Ansätze zur Simulation der Zweiphasenströmung in salinaren Endlagern mit dem Code TOUGH2-GRS. Bericht im Vorhaben ZIESEL (Zweiphasenfluss in einem salinaren Endlager am Beispiel des ERAM), GRS-398, ISBN 978-3-944161-79-2, 2016.
- /NIE 09/ Niemeyer, M., Resele, G., Wilhelm, S., Holocher, J., Poppei, J., Schwarz, R.: Endlager Morsleben - Sicherheitsanalyse für das verfüllte und verschlossene Endlager mit dem Programm PROSA., Colenco Bericht 4651/200, AF-Colenco AG, März 2009.
- /PRU 99/ Pruess, K., Oldenburg, C., Moridis, G.: TOUGH2 User's Guide, Version 2.0, LBNL-43134, 198 S., Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL): Berkeley, California, USA, 1. November 1999, revised September 2012.

- /RES 09/ Resele, G., Ranft, M., Wollrath, J.: Endlager Morsleben - Nachweis der radiologischen Langzeitsicherheit für das verschlossene und verfüllte Endlager: eine Übersicht, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Salzgitter, 30. Juni 2009, erreichbar unter [http://www.endlager-morsleben.de/SharedDocs/Downloads/Morsleben/DE/planfeststellungsverfahren/905-00-V02.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.endlager-morsleben.de/SharedDocs/Downloads/Morsleben/DE/planfeststellungsverfahren/905-00-V02.pdf?__blob=publicationFile&v=2).
- /SEH 16/ Seher, H., Navarro, M.: SITA, version 0.1.a. A simulation and code testing assistant for TOUGH2 and MARNIE, GRS-400, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, ISBN 978-3-944161-81-5: Köln, 2016.
- /ZER 09/ ZERNA Ingenieure: Endlager Morsleben - Dokumentation der Datenbasis. Dokumentation der Datenbasis in den Berichten: GRS-A-3454 Endlager Morsleben – Sicherheitsanalyse für das verfüllte und verschlossene Endlager mit dem Programmpaket EMOS und Colenco-Bericht 4651/200 Endlager Morsleben – Sicherheitsanalyse für das verfüllte und verschlossene Endlager mit dem Programm PROSA, Hrsg.: Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), PSP-Nr.: 9M 213 400-21, ZERNA: Bochum, 26. Februar 2009.

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Modellgitter für das Basismodell, Aufsicht.....	7
Abb. 1.2	Gittermodell für das Basismodell, Seitenansicht ohne sonstige Restgruben, Nordfeld, Zentralteil und Mischungsbereich Marie .....	8
Abb. 1.3	Modellgitter für das erweiterte Modell, Aufsicht.....	9
Abb. 1.4	Modellgitter für das erweiterte Modell, Seitenansicht Ost - West.....	10
Abb. 1.5	Modellgitter für das erweiterte Modell, Seitenansicht Nord - Süd .....	11
Abb. 1.6	Perspektivansicht des komplexen Modellgitters .....	12
Abb. 1.7	Aufsicht auf die Grube Bartensleben in Nord-Süd Richtung. Der ELB Nordfeld sowie die Grube Marie sind ausgeblendet.....	13
Abb. 2.1	Kammerstruktur des ERAM (Grube Bartensleben). Einlagerungsbereiche (ELB) sind in rot gekennzeichnet (3D Darstellung aus /DBE 14/) .....	16
Abb. 2.2	Schema: Vom Szenario zum Rechenfall.....	26
Abb. 3.1	Druckentwicklung im Mischungsbereich Bartensleben.....	28
Abb. 3.2	Gasstrom in das bzw. aus dem ERAM.....	29
Abb. 3.3	Druckentwicklung im ERAM für unterschiedliche Modellbereiche .....	30
Abb. 3.4	Gasstrom in und aus dem MB Bartensleben.....	31
Abb. 3.5	<sup>14</sup> C-Aktivitätsstrom aus dem ERAM .....	32
Abb. 3.6	Aktivitätsstrom von <sup>14</sup> C in den Mischungsbereich.....	33
Abb. 3.7	Transportpfad von <sup>14</sup> C zum Zeitpunkt 5 a.....	34
Abb. 3.8	Aktivitätsstrom von <sup>14</sup> C in den MB Bartensleben (aus dem Zentralteil).....	35
Abb. 3.9	Aktivität von <sup>14</sup> C in Teilbereichen des ERAM .....	36
Abb. 3.10	<sup>14</sup> C-Konzentration in Teilbereichen des ERAM.....	36
Abb. 3.11	Druck und Gasstrom im Südfeld zum Zeitpunkt: a) 10 a und b) 10.000 a .....	38

Abb. 3.12	Radionuklidkonzentration ( $^{14}\text{C}$ ) im Südfeld zum Zeitpunkt a) 10 a und b) 10.000 a .....	38
Abb. 3.13	Druckentwicklung im ERAM für unterschiedliche Modellbereiche .....	41
Abb. 3.14	Druckentwicklung im ERAM für unterschiedliche Modellbereiche .....	42
Abb. 3.15	Maximaldrücke aller Rechenfälle (Basismodell, „trockene Grube“) .....	43
Abb. 3.16	Zeitpunkt des Gasaustritts für alle Rechenfälle (Basismodell, „trockene Grube“) .....	44
Abb. 3.17	Druckentwicklung im ERAM für unterschiedliche Modellbereiche .....	45
Abb. 3.18	Flüssigkeitssättigung der repräsentativen Abdichtung zum West-/Südfeld .....	46
Abb. 3.19	Druckentwicklung im ERAM für unterschiedliche Modellbereiche .....	48
Abb. 3.20	Gasstrom in und aus dem MB Bartensleben.....	48
Abb. 3.21	Gasstrom aus dem ERAM .....	49
Abb. 3.22	Aktivitätsstrom von $^{14}\text{C}$ in den Mischungsbereich Bartensleben.....	50
Abb. 3.23	$^{14}\text{C}$ -Ausstrom aus dem ERAM (Modellrand MB Bartensleben).....	51
Abb. 3.24	Maximaler $^{14}\text{C}$ -Austrag aller Rechenfälle aus dem ERAM (Basismodell, „trockene Grube“) .....	52
Abb. 3.25	Einstrom von Lösung in das ERAM.....	54
Abb. 3.26	Druckentwicklung im Mischungsbereich Bartensleben.....	55
Abb. 3.27	Einstrom von Gas in das ERAM.....	56
Abb. 3.28	Korrosionsgrad der Südabdichtung.....	57
Abb. 3.29	Flüssigkeitssättigung und Volumenstrom in das Südfeld hinein und innerhalb des West-/Südfelds zum Zeitpunkt a) 25.000 a und b) 35.000 a .....	58
Abb. 3.30	Flüssigkeitssättigung und Volumenstrom in das Südfeld zum Zeitpunkt a) 45.000 a und b) 100.000 a .....	59
Abb. 3.31	Druckentwicklung im ERAM für unterschiedliche Modellbereiche .....	60
Abb. 3.32	Flüssigkeitsstrom in und aus dem MB Bartensleben.....	62
Abb. 3.33	Gasstrom in und aus dem MB Bartensleben .....	63

Abb. 3.34	Aktivität von $^{14}\text{C}$ in Teilbereichen des ERAM .....	64
Abb. 3.35	$^{14}\text{C}$ -Konzentration (in der Gasphase) in Teilbereichen des ERAM .....	65
Abb. 3.36	$^{14}\text{C}$ -Ausstrom aus dem ERAM .....	66
Abb. 3.37	Aktivitätsausstrom gelöster Radionuklide aus dem ERAM .....	67
Abb. 3.38	$^{59}\text{Ni}$ -Konzentration (in der liq. Phase) im Südfeld nach a) 10.000 a und b) 35.000 a .....	68
Abb. 3.39	$^{14}\text{C}$ -Konzentration (in der gas. Phase) im Südfeld nach a) 10.000 a und b) 35.000 a .....	68
Abb. 3.40	Zeitpunkt der vollständigen Korrosion der repräsentativen Abdichtung zum West-/Südfeld (Basismodell, „mit relevantem Lösungszutritt“) .....	71
Abb. 3.41	Korrosionsgrad der Südabdichtung .....	73
Abb. 3.42	Flüssigkeitssättigung und Volumenstrom in das Südfeld bzw. innerhalb des West-/Südfelds zum Zeitpunkt a) 250 a und b) 500 a .....	74
Abb. 3.43	Flüssigkeitssättigung und Volumenstrom in das Südfeld bzw. innerhalb des West-/Südfelds zum Zeitpunkt a) 2.500 a und b) 15.000 a .....	74
Abb. 3.44	Druckentwicklung im ERAM für unterschiedliche Modellbereiche .....	76
Abb. 3.45	Einstrom von Lösung in das ERAM .....	77
Abb. 3.46	Flüssigkeitsstrom in und aus dem MB Bartensleben .....	78
Abb. 3.47	Flüssigkeitssättigung und Volumenstrom in das Südfeld und Westfeld zum Zeitpunkt a) 35.000 a und b) 1.000.000 a .....	79
Abb. 3.48	Flüssigkeitsstrom in und aus dem Westfeld. ....	79
Abb. 3.49	Einstrom von Lösung in das ERAM .....	80
Abb. 3.50	Flüssigkeitssättigung und Volumenstrom in das Südfeld und Westfeld zum Zeitpunkt a) 35.000 a und b) 1.000.000 a .....	81
Abb. 3.51	Entwicklung des Gasdrucks im Südfeld auf der Höhe des Großbohrlochs. ....	82
Abb. 3.52	Maximaler $^{14}\text{C}$ -Austrag für alle Rechenfälle (Basismodell, „mit relevantem Lösungszutritt“) .....	83

Abb. 3.53	Maximaler <sup>59</sup> Ni-Austrag für alle Rechenfälle (Basismodell, „mit relevantem Lösungszutritt“)	84
Abb. 3.54	<sup>59</sup> Ni-Ausstrom aus dem ERAM für die Rechenfälle GP 2.4 und HP 6.0	86
Abb. 3.55	Druckentwicklung im Mischungsbereich Bartensleben	88
Abb. 3.56	Gasstrom in das bzw. aus dem ERAM	89
Abb. 3.57	Druckentwicklung im ERAM für unterschiedliche Modellbereiche	90
Abb. 3.58	Druck und Gasstrom zwischen den Mischungsbereichen zum Zeitpunkt 100 a	91
Abb. 3.59	Gasstrom in und aus dem MB Bartensleben	91
Abb. 3.60	<sup>14</sup> C-Aktivitätsstrom aus dem ERAM	92
Abb. 3.61	Aktivitätsstrom von <sup>14</sup> C in den Mischungsbereich Bartensleben	93
Abb. 3.62	Flüssigkeitssättigung der repräsentativen Abdichtung zum West-/Südfeld	94
Abb. 3.63	<sup>14</sup> C-Konzentration in den nicht abgedichteten Bereichen zum Zeitpunkt a) 10 a und b) 10.000 a	95
Abb. 3.64	Maximaler <sup>14</sup> C-Austrag aller Rechenfälle aus dem ERAM (erweitertes Modell, „trockene Grube“)	98
Abb. 3.65	Druckentwicklung im ERAM für unterschiedliche Modellbereiche	99
Abb. 3.66	Ausstrom von <sup>14</sup> C aus den jeweils ausgefallenen Abdichtungen zum Südfeld	100
Abb. 3.67	Aktivitätsstrom von <sup>14</sup> C in den MB Bartensleben	101
Abb. 3.68	Aktivitätsstrom von <sup>14</sup> C in den MB Bartensleben	101
Abb. 3.69	Einstrom von Lösung in das ERAM	103
Abb. 3.70	Druckentwicklung im Mischungsbereich Bartensleben	104
Abb. 3.71	Korrosionsgrad der Südabdichtung 4. Sohle	105
Abb. 3.72	Korrosionsgrad der Südabdichtung a) 2. Sohle und b) 3. Sohle	105
Abb. 3.73	Flüssigkeitssättigung im Südfeld und Westfeld zum Zeitpunkt a) 35.000 a und b) 550.000 a	106

Abb. 3.74	Druckentwicklung im Südfeld (Teufe 1. Sohle bzw. Großbohrloch) für das Basis- und das erweiterte Modell .....	107
Abb. 3.75	Porositätsentwicklung des Südfelds für das Basis- und das erweiterte Modell.....	108
Abb. 3.76	Flüssigkeitsstrom in und aus dem MB Bartensleben.....	109
Abb. 3.77	Gasstrom in und aus dem MB Bartensleben.....	110
Abb. 3.78	<sup>14</sup> C-Ausstrom aus dem ERAM .....	111
Abb. 3.79	Aktivitätsausstrom gelöster Radionuklide aus dem ERAM .....	112
Abb. 3.80	Zeitpunkt der vollständigen Korrosion der Abdichtung auf der 4. Sohle zum West-/Südfeld .....	116
Abb. 3.81	Zeitpunkt des Gasdurchbruchs durch die Abdichtung auf der 1. Sohle zum West-/Südfeld .....	117
Abb. 3.82	Maximaler <sup>14</sup> C-Austrag aller Rechenfälle (erweitertes Modell, „mit relevantem Lösungszutritt“) .....	119
Abb. 3.83	Maximaler <sup>59</sup> Ni-Austrag aller Rechenfälle (erweitertes Modell, „mit relevantem Lösungszutritt“) .....	120
Abb. 3.84	Vergleich des Druckaufbaus im Südfeld auf Höhe der 1. Sohle .....	121
Abb. 3.85	Druckentwicklung im ERAM für unterschiedliche Modellbereiche .....	123
Abb. 3.86	Messpunkte für Druckkurven in der Umgebung a) der Ränder RAAB und RAMB und b) des Randes RASH und des Großbohrlochs.....	124
Abb. 3.87	Gasstrom in das bzw. aus dem ERAM.....	125
Abb. 3.88	Gasstrom in und aus der Grube Marie .....	126
Abb. 3.89	Gasstrom aus dem Westfeld über das Großbohrloch in das Südfeld .....	127
Abb. 3.90	Gas- und Flüssigkeitsstrom durch die Abdichtung 17 .....	128
Abb. 3.91	Sättigungsentwicklung der Abdichtungen zwischen Zentralteil und Südfeld sowie Zentralteil und Ostfeld.....	129
Abb. 3.92	Gasstrom durch die Abdichtungen zwischen Zentralteil und Südfeld .....	130
Abb. 3.93	Flüssigkeitsstrom in bzw. aus der Abdichtung 11.....	131
Abb. 3.94	Sättigungsentwicklung der Abdichtung 11 .....	132
Abb. 3.95	Kapillardruckentwicklung in der Abdichtung 11 .....	132

Abb. 3.96	Druck im Südfeld .....	133
Abb. 3.97	Messpunkte für Druckkurven in der Umgebung des nördlichen Teils des Südfelds.....	133
Abb. 3.98	Gasstrom durch die Abdichtungen 11 und 12 sowie durch das Wetterrolloch zwischen Südfeld (links) und Zentralteil (rechts) zum Zeitpunkt 200.000 a .....	135
Abb. 3.99	<sup>14</sup> C-Aktivitätsstrom aus dem ERAM .....	136
Abb. 3.100	Maximaler <sup>14</sup> C-Austrag aller Rechenfälle aus dem ERAM über den Rand RAMB (komplexes Modell, „trockene Grube“) .....	139
Abb. 3.101	<sup>14</sup> C-Konzentration im Südfeld und Zentralteil für den a) Bezugsfall und b) Rechenfall HP 7.20.....	140
Abb. 3.102	<sup>14</sup> C-Konzentration im Südfeld und Zentralteil für den Rechenfall a) HP 1.12 und b) HP 7.28.....	141
Abb. 3.103	Maximaler <sup>14</sup> C-Austrag aller Rechenfälle aus dem ERAM über den Rand RAAB (komplexes Modell, „trockene Grube“).....	142
Abb. 3.104	Einstrom von Lösung in das ERAM.....	145
Abb. 3.105	Gasstrom aus dem ERAM .....	146
Abb. 3.106	Korrosionsgrad der Abdichtung 11 (4. Sohle, nördliche Verbindung) .....	147
Abb. 3.107	Druckentwicklung im ERAM für unterschiedliche Modellbereiche .....	148
Abb. 3.108	Prozesse im Bereich der Ränder RAAB und RAMB zum Zeitpunkt 7.500 a: a) Flüssigkeitssättigung; b) Gas- und Flüssigkeitsstrom sowie Log <sub>10</sub> der Permeabilität.....	150
Abb. 3.109	Prozesse in der Umgebung der Ränder RAAB und RAMB zum Zeitpunkt 10.000 a: a) Flüssigkeitssättigung; b) Gas- und Flüssigkeitsstrom sowie Log <sub>10</sub> der Permeabilität .....	151
Abb. 3.110	Prozesse in der Umgebung der Ränder RAAB und RAMB zum Zeitpunkt 15.000 a: a) Flüssigkeitssättigung; b) Gas- und Flüssigkeitsstrom sowie Log <sub>10</sub> der Permeabilität .....	152
Abb. 3.111	Prozesse in der Umgebung der Ränder RAAB und RAMB zum Zeitpunkt 35.000 a: a) Flüssigkeitssättigung; b) Gas- und Flüssigkeitsstrom sowie Log <sub>10</sub> der Permeabilität .....	154
Abb. 3.112	<sup>14</sup> C-Aktivitätsstrom aus dem ERAM über die Randelemente RAAB und RAMB .....	155

Abb. 3.113	Aktivitätsstrom gelöster Radionuklide aus dem ERAM über den Rand RAMB .....	156
Abb. 3.114	Aktivitätsstrom gelöster Radionuklide aus dem ERAM über den Rand RAAB.....	157
Abb. 3.115	Maximaler <sup>14</sup> C-Austrag aller Rechenfälle aus dem ERAM über den Rand RAMB (komplexes Modell, „mit relevantem Lösungszutritt“).....	160
Abb. 3.116	Maximaler <sup>14</sup> C-Austrag aller Rechenfälle aus dem ERAM über den Rand RAAB (komplexes Modell, „mit relevantem Lösungszutritt“) .....	161
Abb. 3.117	Zeitpunkt der Korrosion der Abdichtung (bzw. des letzten korrodierten Gitterelementes der Abdichtung).....	163
Abb. 3.118	Druckentwicklung im ERAM für unterschiedliche Modellbereiche .....	164
Abb. 3.119	Vergleich des Gasausstroms über das Randelement RAAB für unterschiedliche Rechenfälle .....	166
Abb. 3.120	Vergleich des <sup>14</sup> C-Aktivitätsstroms über das Randelement RAAB für unterschiedliche Rechenfälle .....	166
Abb. 3.121	<sup>14</sup> C-Konzentration in der Umgebung des Randelementes RAAB für den a) Bezugsfall sowie b) Rechenfall HP 4.4 zum Zeitpunkt 15.000 a .....	167
Abb. 3.122	Maximaler <sup>59</sup> Ni-Austrag über den Rand RAMB für alle Rechenfälle (komplexes Modell, „mit relevantem Lösungszutritt“) .....	168
Abb. 3.123	Maximaler <sup>59</sup> Ni-Austrag über den Rand RAAB für alle Rechenfälle (komplexes Modell, „mit relevantem Lösungszutritt“) .....	169



## A Anhang A

### A.1 Benchmark Volumen und Gasbildung

Zwei Rechenfälle konnten dazu genutzt werden eine Überprüfung der im Modellgitter genutzten Volumina („nutzbares Volumen“, siehe /FRI 16/) und eines Gasbildungsprozesses (Gasbildung Fall B (EMOS), implementiert im Modell nach /FRI 16/) durchzuführen. Diese Überprüfung spielt für das Systemverständnis nur eine untergeordnete Rolle, zeigt aber die prinzipielle Vergleichbarkeit der vorliegenden Berechnungen mit den existierenden Berechnungen auf.

Grundlage dieser Rechenfälle ist der Bezugsfall für das Basismodell wie er in /FRI 16/ beschrieben ist. Diese Rechenfälle sind in /FRI 16/ unter dem Begriff „Grenzfälle“ aufgeführt und unterscheiden sich wie folgt vom Bezugsfall:

Das Endlager wird als geschlossenes System betrachtet, der Modellrand ist vollständig undurchlässig. Für die betroffene Stoffmenge bei der Gasproduktion wird die Gesamtmenge zugrunde gelegt und nicht von einem Anteil der betroffenen Stoffmenge von weniger als 100 % ausgegangen. Außerdem wird für den Konvergenzansatz der höhere Gebirgsdruck der 4. Sohle verwendet, dieser beträgt  $1,09 \cdot 10^{07}$  Pa.

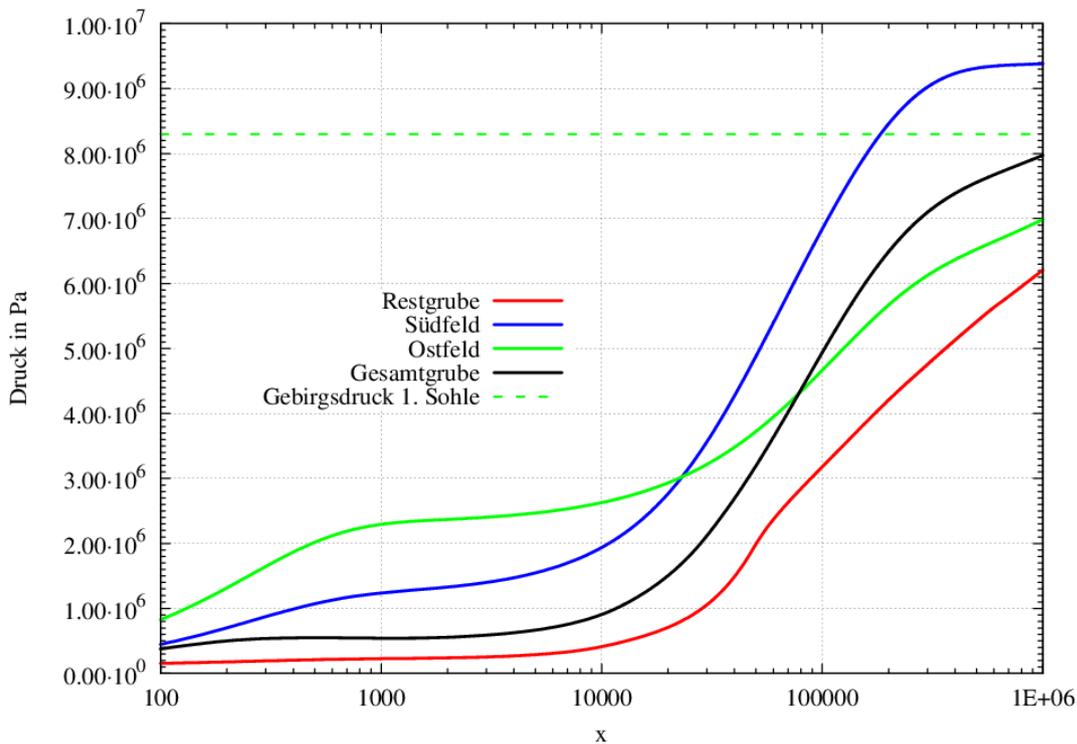
Es werden zwei unterschiedliche Fälle betrachtet:

- vollständig undurchlässige Abdichtungen (Grenzfall 1) und
- vollständig durchlässige Abdichtungen (Grenzfall 2).

Ziel ist es sowohl den maximalen Druckaufbau in den abgedichteten Bereichen (Grenzfall 1) als auch den maximalen Druckaufbau in der Gesamtgrube (Grenzfall 2) zu berechnen.

Die Resultate beider Grenzfälle sind in Abb. A 1 dargestellt. Der Druckaufbau in der Restgrube, im Südfeld und im Ostfeld entsteht für Grenzfall 1, wenn alle Abdichtungen vollständig undurchlässig sind. Der maximale Druck von 9,4 MPa wird im Südfeld erreicht. Wenn die Abdichtungen vollständig undurchlässig sind, ist der resultierende Druck in der Restgrube mit nur 6 MPa niedrig. Für den Fall, dass alle Abdichtungen vollständig durchlässig sind (Grenzfall 2), herrscht in der gesamten Grube der gleiche Druck. Dieser beträgt nach 1.000.000 a ca. 8 MPa

Diese Ergebnisse ähneln den Ergebnissen zum Druckaufbau für die Systementwicklung „trockene Grube“ wie sie in /BEC 09/ dargestellt sind sehr stark. Man kann deshalb davon ausgehen, dass in den vorliegenden Berechnungen die Volumina der Grube und auch der Prozess der Gasbildung, entsprechend /BEC 09/ in das Modellgitter implementiert wurden. Somit ist eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse im Prinzip vorhanden.



**Abb. A.1** Druckaufbau für die Grenzfälle 1 und 2

Restgrube, Südfeld, Ostfeld: Resultate Grenzfall 1; Gesamtgrube: Resultat Grenzfall 2

## A.2 Verwendete Einheiten und Methodik und Folgen der Darstellung von Volumina unter Normalbedingungen

Wie in Kap. 3 erwähnt werden Volumina unter Normalbedingungen angegeben. Die Ausgabe der Ergebnisse von TOUGH2 berücksichtigt dies in der Regel nicht. Dort werden üblicherweise Ströme oder Flüsse als Massenflüsse in SI-Einheiten, also in kg/s angegeben. Für eine volumenbezogene Darstellung muss deshalb eine Umrechnung erfolgen. Die Umrechnung hier erfolgt ohne Berücksichtigung von Wasserdampf in der Gasphase. Da sich der Druck im Endlager erhöht und die Berechnungen isotherm erfolgen kann dies an dieser Stelle so durchgeführt werden.

### A.2.1 Volumenstrom

Die Umrechnung eines Massenstroms  $f$  von kg/s zu m<sup>3</sup>/a unter Normalbedingungen erfolgt nach:

$$\begin{cases} f * \frac{R_S * T_{Norm} * \frac{1}{p_{Norm}}}{60 * 60 * 24 * 365,25} \text{ für die Gasphase} \\ f * \frac{\rho_{liq}}{60 * 60 * 24 * 365,25} \text{ für die liq. Phase} \end{cases} \quad (A2.1)$$

Dabei ist  $R_S$  die spezifische Gaskonstante von Luft ( $287,058 \frac{J}{kg \cdot K}$ ),  $T_{Norm} = 273,15 K$   
 $p_{Norm} = 101325 Pa$ . Die Dichte der Lösung  $\rho_{liq}$  wird im Vorhaben als konstant  $1.292 \text{ kg/m}^3$  angenommen.

### A.2.2 Aktivitätsstrom

Die Umrechnung eines Massenstroms  $f$  eines Radionuklides  $Rn$  in einer Phase von kg/s zu Bq/a erfolgt nach:

$$f * \frac{\frac{\ln(2) * N_A}{M_{Rn} * t_{\frac{1}{2}, Rn}}}{60 * 60 * 24 * 365,25} \quad (A2.2)$$

Dabei sind  $N_A$  die Avogadro-Konstante,  $M_{Rn}$  das Molgewicht des Nuklids in kg/mol und  $t_{\frac{1}{2}, Rn}$  die Halbwertszeit des Radionuklids in Sekunden.

### A.2.3 Aktivitätskonzentration

Die Berechnung bzw. Umrechnung der in TOUGH2 ausgegebenen Konzentration für Radionuklide kann auf zahlreiche unterschiedliche Weisen erfolgen. Die ausgegebene Konzentration bezieht sich auf Massen, d. h. ursprünglich wird Radionuklidmasse pro Phasenmasse (kg/kg) für beide Phasen ausgegeben. Ziel war es diese Konzentration auf ein Volumen zu beziehen. Obwohl alle Volumina im Modell invariante Größen sind, ist eine Konzentrationsangabe die sich darauf (z. B. in m<sup>3</sup>) bezieht oftmals leichter für den Leser zu erfassen. Es kommen verschiedene Bezugsvolumina in Frage, z. B. das nutzbare Volumen oder das Volumen der Phase. Diese Volumina sind im Berechnungszeitraum deutlichen Veränderungen unterlegen, z. B. wird das nutzbare Volumen durch Konvergenz reduziert und das Volumen der Gasphase ändert sich mit dem

Druck im Endlager. Deshalb wird in diesem Bericht das Volumen stets für Normalbedingungen angegeben, dies sind:  $T = 273,15 \text{ K}$  und  $p = 101325 \text{ Pa}$ .

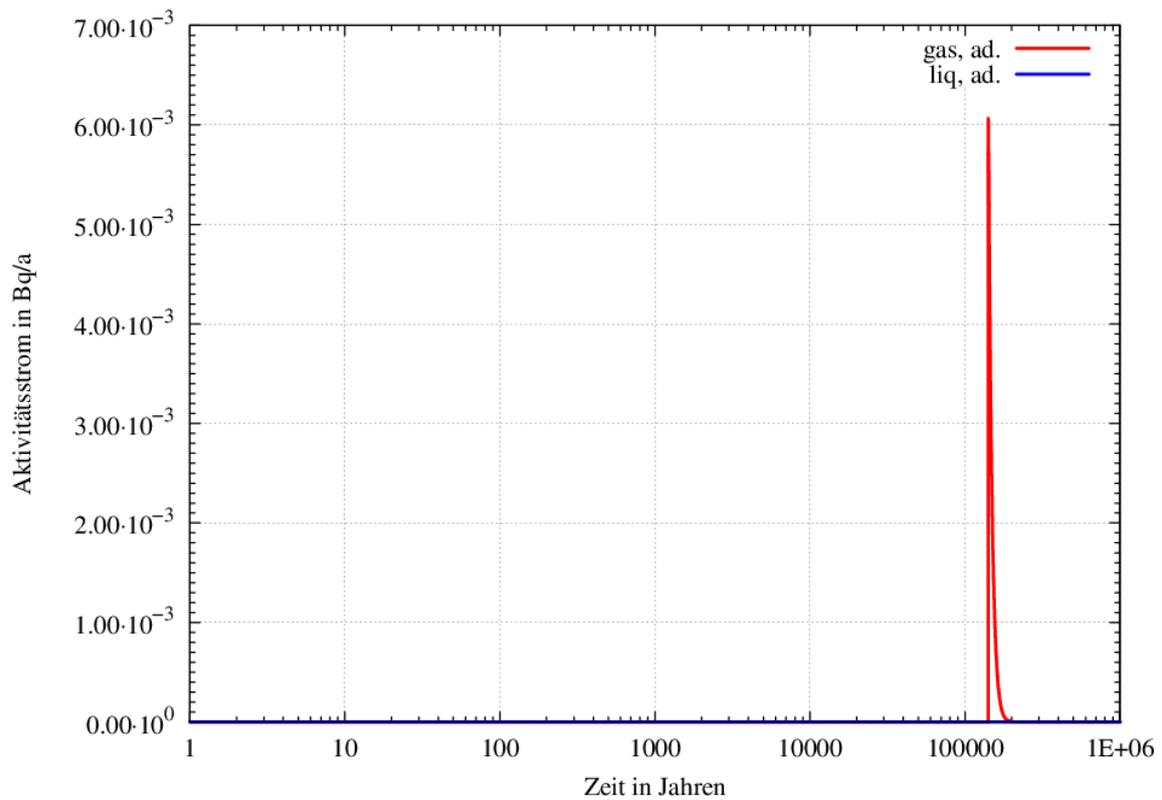
Die Umrechnung eine Konzentration  $\gamma$  eines Radionuklides  $Rn$  in einer Phase von  $\text{kg/kg}$  zu  $\text{Bq/a}$  erfolgt nach:

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma * \frac{\frac{\ln(2) * N_A}{M_{Rn} * t_{\frac{1}{2},Rn}}}{R_S * T_{Norm} * \frac{1}{p_{Norm}}} \quad \text{für die Gasphase} \\ \gamma * \frac{\frac{\ln(2) * N_A}{M_{Rn} * t_{\frac{1}{2},Rn}}}{\rho_{liq}} \quad \text{für die liq.Phase} \end{array} \right. \quad (\text{A2.3})$$

Dabei sind  $N_A$  die Avogadro-Konstante,  $M_{Rn}$  das Molgewicht des Nuklids in  $\text{kg/mol}$  und  $t_{\frac{1}{2},Rn}$  die Halbwertszeit des Radionuklids in Sekunden.  $R_S$  ist die spezifische Gaskonstante von Luft ( $287,058 \frac{\text{J}}{\text{kg} * \text{K}}$ ),  $T_{Norm} = 273,15 \text{ K}$   $p_{Norm} = 101325 \text{ Pa}$ . Die Dichte der Lösung  $\rho_{liq}$  wird im Vorhaben als konstant  $1.292 \text{ kg/m}^3$  angenommen.

Zu beachten ist, dass durch die Verwendung dieser Art von Konzentration der Eindruck einer geringeren Aktivität erweckt werden kann da im Endlager der Druck in der Regel höher und das Volumen deshalb kleiner als unter Normalbedingungen ist: Zum Beispiel sind  $1 \cdot 10^6 \text{ Bq/m}^3$  bei Normalbedingungen  $2,96 \cdot 10^7 \text{ Bq/m}^3$  bei  $3 \text{ MPa}$  im Endlager. Die tatsächliche Aktivität ist natürlich die gleiche, nur das Bezugsvolumen ändert sich.

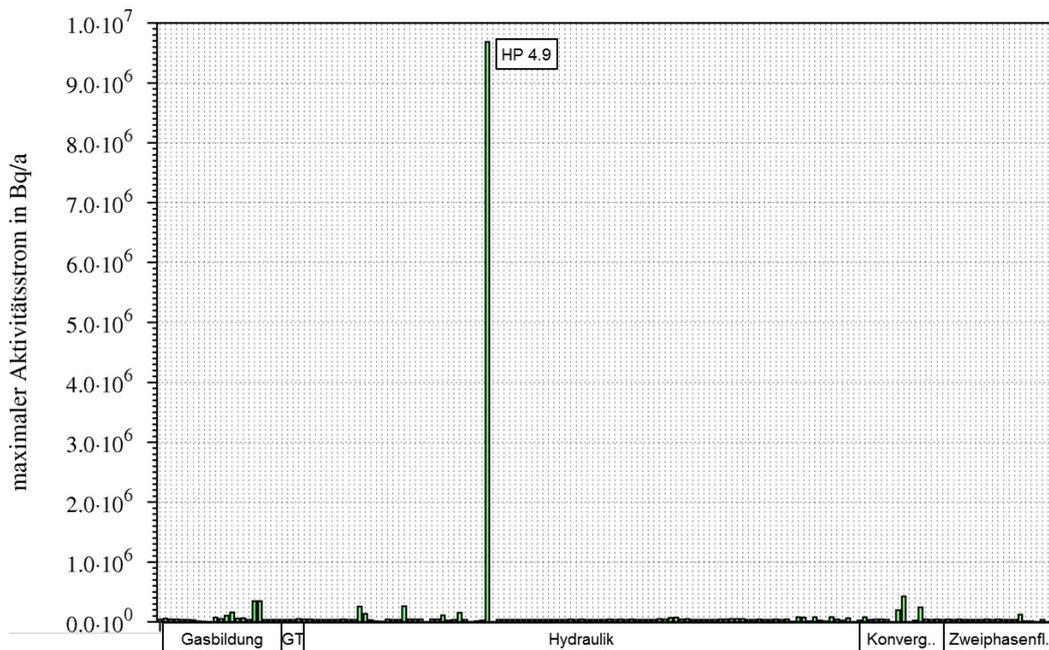
### A.3 Ergänzungsabbildungen Basismodell, Bezugsfall „trockene Grube“



**Abb. A.2**  $^{14}\text{C}$ -Ausstrom, advektiv

In Abb. A 2 zu sehen ist ergänzend der berechnete advektive Austrag, der mehrere Größenordnungen  $< 1$  Bq/a liegt und damit definitionsgemäß als Null-Austrag in Kap. 3.1.1 steht.

#### A.4 Ergänzungsabbildungen komplexes Modell



**Abb. A.3** Maximaler  $^{14}\text{C}$ -Austrag aller Rechenfälle aus dem ERAM (komplexes Modell, Rand RAMB, „mit relevantem Lösungszutritt“)

Im Histogramm entspräche der 1. Balken dem Bezugsfall mit einem Wert von ca. 1.000 Bq/a; unten angegeben ist die Kategorie, die aussagt welche Art von Parameter geändert wurde, für das komplexe Modell hinzugekommen ist die Kategorie „GT“ in welcher die interne Struktur des Gitters geändert wurde. Das Ergebnis für den Rechenfall HP 4.9 ist hier dargestellt.

## **A.5 Nicht beendete Rechenfälle**

In der Tab. A 1 sind die Rechenfälle aufgeführt welche die Simulationszeit von 1 Mio. Jahren nicht erreicht haben bzw. abgebrochen wurden. Anhand der Rechenfall Bezeichnung TR (für „trockene Grube“) oder FE (für „mit relevantem Lösungszutritt“) kann nach den jeweiligen Szenarien unterschieden werden.

Die Ursachen dafür, dass ein Rechenfall nicht die maximale Simulationszeit erreicht sind unterschiedlich. Im Allgemeinen sind die Zeitschrittweiten aus verschiedenen Ursachen so klein, dass auch nach einer maximalen Rechenzeit von 1200 Stunden (50 Tagen) diese Zeitspanne nicht erreicht wurde. Für manche Rechenfälle war dies bereits vorher bekannt, beispielsweise ist den Materialgebieten der unten stehenden „HP-2.3“ Rechenfällen eine so hohe Permeabilität zugewiesen worden, dass kleine Zeitschrittweiten absehbar waren.

Andere Ursachen sind schwieriger zu finden, ein Abbruchkriterium ist beispielsweise wenn nach 25 Reduktionen der Löser im Rechenprogramm keine Lösung der Gleichungen findet.

Eine Auswertung kann mit diesen Rechnungen im Prinzip trotzdem durchgeführt werden. Der zur Interpretation notwendige Output wird regelmäßig geschrieben. Gerade für einfache Vergleiche, etwa des  $^{14}\text{C}$ -Austrags, bedeutet dies, dass die Rechnungen nicht verworfen werden müssen.

**Tab. A.1** Rechenfälle, welche nicht 1.000.000 a Simulationszeit erreicht haben für alle drei Modelle

<b>Rechenfallbezeichnung</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Simulationszeit</b>
<b>Basismodell</b>		
FE1-HP1.9	Initiale Flüssigkeitssättigung der Abdichtung: 60 %	23.485
FE1-HP2.3	Permeabilität im Grubengebäude: $1 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$	200.000
<b>Erweitertes Modell</b>		
TR2-HP2.3	Permeabilität im Grubengebäude: $1 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$	293.184
FE2-HP1.3	Initiale Permeabilität im der Abdichtung: $6,7 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	189.218
FE2-HP2.3	Permeabilität im Grubengebäude: $1 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$	140.000
FE2-HP4.7	Rand Marie ist aktiv, Abdichtungen ungesättigt	500
FE2-HP4.8	Beide Randbedingungen geöffnet, Abdichtungen ungesättigt	500
FE2-ZP1.0	Kein Kapillardruck in den Abdichtungen	500.000
<b>Komplexes Modell</b>		
TR3-HP2.3	Permeabilität im Grubengebäude: $1 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$	30.434
FE3-HP1.0	Initiale Permeabilität in der Abdichtung: $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$	292.341
FE3-HP1.3	Initiale Permeabilität in der Abdichtung: $6,7 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	253.871
FE3-HP1.6	Initiale Permeabilität in der Abdichtung: $1 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$	782.014
FE3-HP2.3	Permeabilität im Grubengebäude: $1 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$	11.068
FE3-HP7.28	unentdeckte Wegsamkeiten sind alle aktiv	482.337
FE3-HP11.1	Alle Wegsamkeiten erhalten eine Permeabilität von $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$	941.199
FE3-ZP1.3	Residuale Gassättigung beträgt 1 %	41.897

## B Anhang B: Probabilistische Analysen

### B.1 Allgemeine Vorgehensweise

Ziel der probabilistischen Analysen ist eine Unsicherheits- und Sensitivitätsaussage in Bezug auf Zweiphasenflussparameter und Permeabilitäten im komplexen Gittermodell. Die Variation der Zweiphasenflussparameter (für Strecken und Abdichtungen), der intrinsischen Permeabilitäten für Schweben sowie der intrinsischen Permeabilitäten für vertikale Verbindungen (Rolllöcher, Gesenke vertikale Bohrungen, aber keine Schweben) erfolgt dabei in drei voneinander unabhängigen Analysen.

Die Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen werden mit dem Programm SUSA (Software für Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen /KLO 15/) durchgeführt. Die allgemeinen Schritte zur Durchführung solcher Analysen sind in /HOF 92/ beschrieben. Eine zusammenfassende Darstellung von typischen Ergebnisaussagen bei Unsicherheitsanalysen sowie die Beschreibung einiger ausgewählter Sensitivitätsmaße findet sich in /KOC 14/.

Für die stochastische Generierung von Parameterwerten wird das SRS-Verfahren (engl. „Simple Random Sampling“) angewendet. Die Stärke des SRS-Verfahrens besteht darin, dass genau bekannt ist, welche Art von Unsicherheits- und Sensitivitätsaussagen gemacht werden können /HOF 92/.

Als Indikator für die Reaktion des Systems auf die Parametervariationen wird der maximale Aktivitätsstrom von  $^{14}\text{C}$  und  $^{59}\text{Ni}$  verwendet, der entweder am Rand des Abbaus 1a (Randelement RAMB) oder am Rand der Abbaustrecke 5 (Randelement RAAB) gemessen wird.  $^{14}\text{C}$  ist in den vorliegenden Analysen aufgrund seiner Halbwertszeit das einzige flüchtige Radionuklid von Relevanz.  $^{59}\text{Ni}$  dient als Indikator für alle in der flüssigen Phase gelösten Radionuklide (die in der vorliegenden Untersuchung alle die gleiche Gaslöslichkeit und Diffusionskoeffizienten aufweisen). Gleichzeitig zeigen auch die deterministischen Analysen, dass  $^{59}\text{Ni}$  (und auch  $^{99}\text{Tc}$ ) die größte Bedeutung für den Radionuklidaustrag aus dem Endlager haben.

Die verwendeten Sensitivitätsmaße sind in Tab. B.1 aufgelistet. Eine Erläuterung der verschiedenen Maße findet sich in /KOC 14/.

**Tab. B.1** Übersicht der verwendeten Sensitivitätsmaße

Gruppe	Verwendete Methode zur Bestimmung der Korrelationsmatrix	Art des Korrelationskoeffizienten und Bestimmtheitsmaß	Abk. für das Sensitivitätsmaß	Wertebereich
Natürliche lineare Korrelationen (messen Grad einer linearen Beziehung)	Produkt-Moment-Korrelation oder Pearson-Korrelation („Pearson’s (rho) Correlation Coefficient“)	Ordinary Partial Standardized partial regression	OCC PCC SCC	-1 bis 1
		$R^2$		0 bis 1
Ordinal invariante (Rangbasierte) Korrelationen (messen Grad einer monotonen Beziehung)	Quadrantkorrelation („Quadrant Measure“)	Ordinary Partial Standardized partial regression	OQM PQM SQM	-1 bis 1
		$R^2$		0 bis 1
	Kendalls Rangkorrelation („Kendall’s (tau) Correlation“)	Ordinary Partial Standardized partial regression	OKC PKC SKC	-1 bis 1
		$R^2$		0 bis 1
	Spearman’s Rangkorrelation („Spearman’s (rho) Correlation“)	Ordinary Partial Standardized partial regression	OSC PSC SSC	-1 bis 1
		$R^2$		0 bis 1
Varianzbasierte Sensitivitätsmaße (messen Grad einer (beliebigen) funktionalen Abhängigkeit)	Korrelationsverhältnis („Correlation Ratio“)		CR	0 bis 1
	Rang-Korrelationsverhältnis („Correlation Ratio on Ranks“)		CRR	bis 1

Für die Unsicherheitsanalysen werden statistische Aussagen darüber gemacht, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass der Ergebniswert einen bestimmten Wert unterschreitet. Die Unsicherheitsanalyse wird mittels der einseitigen oberen ( $\beta$ ,  $\gamma$ )-Toleranzgrenze für unterschiedliche Werte von  $\beta$  und  $\gamma$  durchgeführt. In der Regel erniedrigt sich mit ansteigender Aussagesicherheit der Prozentsatz der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ergebnisstichprobe. Wenn umgekehrt eine hohe Aussagesicherheit Ziel einer Fragestellung ist, gilt diese hohe Aussagesicherheit nur für einen niedrigeren Prozentsatz der Wahrscheinlichkeitsverteilung.

## B.2 Untersuchte Systeme

Die probabilistischen Analysen für die Zweiphasenflussparameter legen die Bezugsfälle „trockene Grube“ und „feuchte Grube“ zu Grunde. Hier werden für jeden der beiden Bezugsfälle 100 Modellläufe („Realisationen“) durchgeführt.

Die Modellläufe für die Schweben und für die vertikalen Verbindungen werden nur auf das Szenario mit Lösungszutritt angewandt und basieren auf einer abgewandelten Form des Bezugsfalls „mit relevantem Lösungszutritt“, der im Folgenden „Variante des Bezugsfalls „mit relevantem Lösungszutritt“ genannt werden soll. Die Strecken sind in diesem Fall zu 99 % mit Salzbeton verfüllt und die Strecken weisen eine Permeabilität von  $1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  auf. Für diese Rechenfälle wurden wiederum 100 Modellläufe durchgeführt (siehe Kap. B.6). Ziel war hier eine orientierende Analyse und keine vollständige Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse, da die Anzahl der Rechnungen im Verhältnis zur Anzahl der variierten Parameter zu gering für verlässliche Aussagen ist.

## B.3 Variierte Parameter und betrachtete Gebiete

Tab. B.2 zeigt die Liste der Parameter für die Variation der Zweiphasenflussparameter. Die Unsicherheitsbetrachtung erfolgt nur für die Strecken und Abdichtungen, weil diese die wichtigsten Verbindungen für den Radionuklid-Transport zwischen den Modellbereichen darstellen (siehe /FRI 16/).

Die Variation der relativen Permeabilitäten erfolgt über eine Variation der residualen Gassättigung  $S_{gr}$  in den Abdichtungen und Strecken, wobei allen Abdichtungen und Strecken der gleiche Wert zugewiesen wird.

Die Variation der Kapillardruckfunktion nach van Genuchten erfolgt über die Parameter  $\lambda$ ,  $p_0$  und  $S_{gr}$ . Dabei wird der Parameter  $\lambda$  für alle Abdichtungen und Strecken gleich gesetzt, während der Parameter  $p_0$  für Abdichtungen und Strecken durch zwei unabhängige Variationsparameter erfasst wird (einen für die Abdichtungen und einer für die Strecken). Alle in Tab. B.2 gelisteten Parameter werden als unkorreliert angenommen.

**Tab. B.2** Zweiphasenflussparameter, für die Zufallsstichproben erzeugt wurden

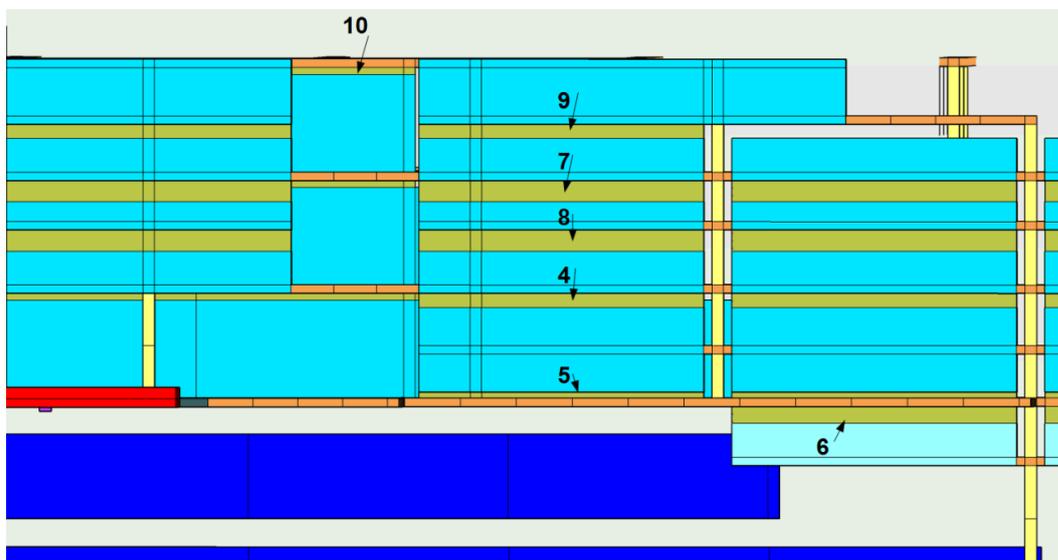
Nummer	Parameter	Angewendet für folgende Objekte (gleicher Wert im gesamten Gebiet)
1	Residuale Gassättigung der relativen Permeabilitätsfunktion $S_{gr}$	Abdichtungen und Strecken
2	Korngrößenverteilung $\lambda$	Abdichtungen und Strecken
3	Van-Genuchten Parameter $p_0$	Abdichtungen
4	Van-Genuchten Parameter $p_0$	Strecken

Unabhängige Sensitivitätsanalysen erfolgen für die intrinsische Permeabilität von Schweben sowie für die intrinsische Permeabilität der vertikalen Verbindungen.

In Tab. B.3 sind die Schweben aufgeführt, für deren Permeabilität Zufallsstichproben generiert wurden. Alle Schweben, die sich auf der gleichen Sohle befinden, werden gleich parametrisiert. Im komplexen Modell werden im Zentralteil keine Zwischensohlen angenommen, somit befinden sich die Schweben hier zwischen der 1. und 2. Sohle, der 2. und 3. Sohle und der 3. und 4. Sohle. Im Südfeld werden jedoch Zwischensohlen angenommen, deshalb ist das Schweben-System hier komplexer (siehe Abb. B.1). In der Abb. B.1 sind die Positionen der Schweben im Südfeld dargestellt, für deren Permeabilität Zufallsstichproben erstellt wurden. Die Nummern entsprechen der Beschreibung in Tab. B.3.

**Tab. B.3** Schweben, deren Permeabilität stochastisch generiert wurde

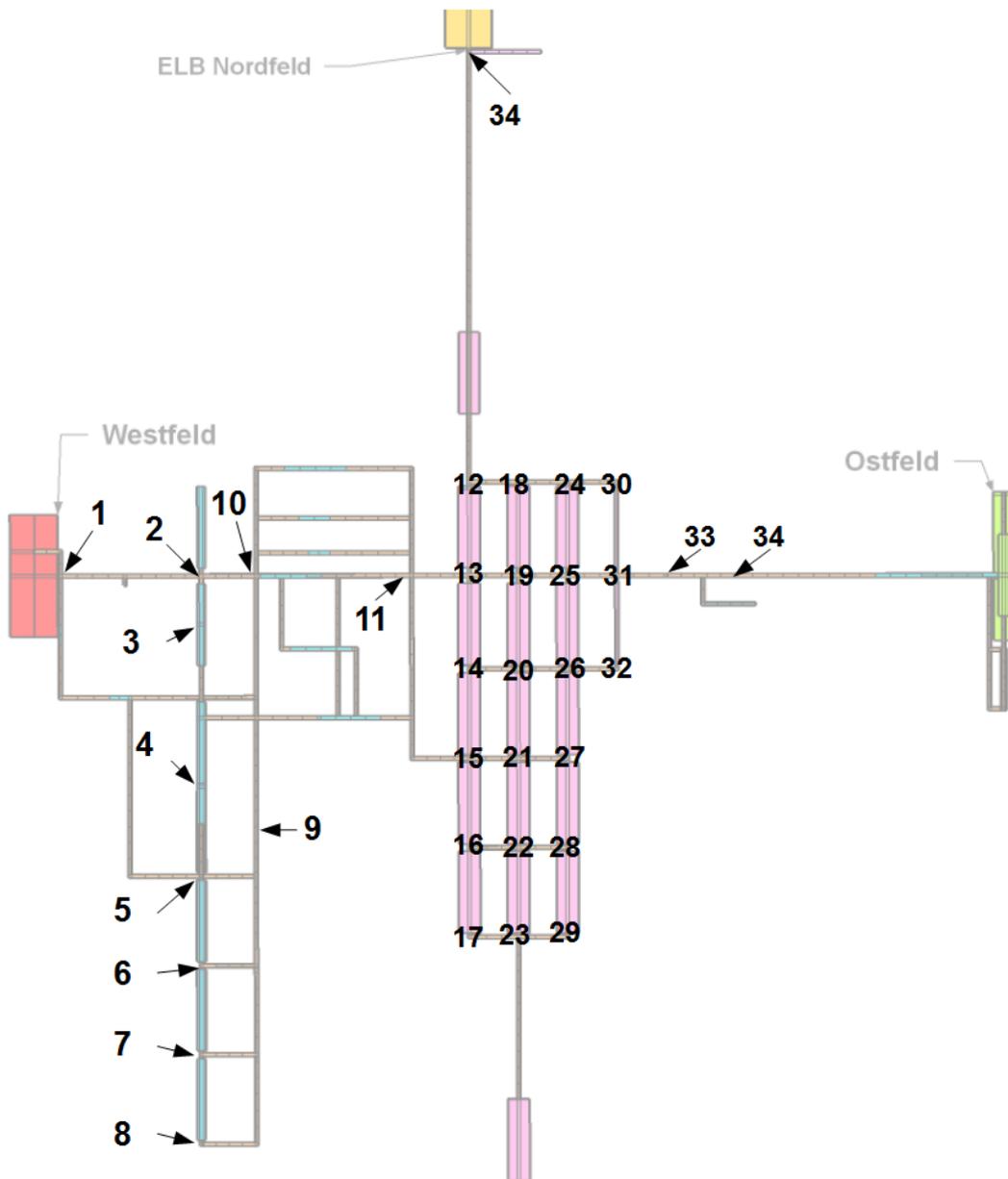
Nummer	Grubenfeld	Lokation im Grubenfeld
1	Zentralteil	Zwischen der 1. und 2. Sohle
2	Zentralteil	Zwischen der 2. und 3. Sohle
3	Zentralteil	Zwischen der 3. und 4. Sohle
4	Südfeld	Schweben zwischen der 3. Sohle und den darunter liegenden Kammern
5	Südfeld	Schweben zwischen der 4. Sohle und den darüber liegenden Kammern
6	Südfeld	Schweben zwischen der 4. Sohle und den Abfallkammern
7	Südfeld	Schweben zwischen der 1. Sohle und Kammern die sich zwischen der 2. und 3. Sohle befinden
8	Südfeld	Schweben zwischen Kammern, die sich zwischen der 2. und 3. Sohle befinden und Kammern auf der dritten Sohle
9	Südfeld	Schweben zwischen Kammern der 1. Sohle und der 2. Sohle
10	Südfeld	Schweben zwischen der ersten Sohle und den darunter liegenden Kalilagerkammern



**Abb. B.1** Darstellung der Positionen der Schweben im Südfeld (Blick nach Osten), für die Beschreibung der Nummern siehe Tab. B.3

In der Abb. B.2 sind die Lokalitäten der vertikalen Verbindungen aufgeführt, für die Zufallsstichproben der Permeabilität im Rahmen der probabilistischen Analysen erzeugt wurden. An jeder Lokation können sich in unterschiedlicher Teufenlage mehrere vertikale Verbindungen befinden. An jeder Lokation werden alle untereinander liegenden

vertikalen Verbindungen von der 1. bis zur 4. bzw. im Südfeld am Südgesenk von der 1. bis zur 7. Sohle gleich parametrisiert.



**Abb. B.2** Darstellung der Positionen der vertikalen Verbindungen im Südfeld und Zentralteil (Blick nach Norden)

#### **B.4 Verteilungsfunktionen und Parameterbandbreiten**

Tab. B.4 zeigt die in den Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen gewählten Verteilungsfunktionen und Bandbreiten der Parameter. Alle aufgeführten Parameter werden als unkorreliert betrachtet. In Ermangelung verlässlicher Daten wird für Drücke und

Permeabilitäten eine log-uniforme Verteilung angenommen (uniforme Verteilung der logarithmierten Werte) und für die restlichen Parameter eine uniforme Verteilung.

**Tab. B.4** Bandbreiten und Verteilungsfunktionen zum Erzeugen der Stichproben

Parameter	Einheit	Bandbreite	Verteilung	Referenzwert
<b>Zweiphasenflussparameter</b>				
Residuale Gassättigung $S_{gr}$ der relativen Permeabilität für Abdichtungen und Strecken	-	0,005 - 0,2	Uniform	0,02
Korngrößenverteilung $\lambda$ der Kapillardruckfunktion für Abdichtungen und Strecken	-	0,2 - 0,8	Uniform	0,3
Parameter $p_0$ der Kapillardruckfunktion für Abdichtungen	Pa	$1,3 \cdot 10^{06} - 1,3 \cdot 10^{08}$	Log-Uniform	$1,3 \cdot 10^{07}$
Parameter $p_0$ der Kapillardruckfunktion für Strecken	Pa	$1,3 \cdot 10^{03} - 1,3 \cdot 10^{06}$	Log-Uniform	0
<b>Permeabilität der Schweben und vertikalen Verbindungen</b>				
Permeabilität Schweben	m <sup>2</sup>	$1 \cdot 10^{-14} - 1 \cdot 10^{-18}$	Log-Uniform	$1 \cdot 10^{-16}$
Permeabilität der vertikalen Verbindungen	m <sup>2</sup>	$1 \cdot 10^{-14} - 1 \cdot 10^{-18}$	Log-Uniform	$1 \cdot 10^{-17}$

Die große Bandbreite der Schwebenpermeabilität erklärt sich aus dem örtlich sehr variablen Auflockerungszustand der Schweben.

Die im Modell als Homogenbereiche ausgewiesenen Strecken können in der Realität einen Firstspalt besitzen. Dieser ist in die Parametrierung der Strecken eingeflossen. Da bei Existenz eines Firstspalts das hydraulische System der Strecken durch den Firstspalt mit seinen hohen Permeabilitäten und vernachlässigbaren Kapillardrücken bestimmt wird, werden die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Kapillardruck-Parameters  $p_0$  für die Strecken bewusst kleiner gewählt als für die Abdichtungen.

Die vertikalen Verbindungen (Rolllöcher, Gesenke vertikale Bohrungen) werden zum Teil mit Salzbeton verfüllt. Die Qualität bzw. der Grad der Verfüllung ist mit großen Ungewissheiten behaftet. Deshalb wird wie für die Permeabilität der Schweben eine große Bandbreite angesetzt.

## **B.5 Ergebnisse zur Variation der Zweiphasenflussparameter**

### **B.5.1 Systementwicklung „trockene Grube“**

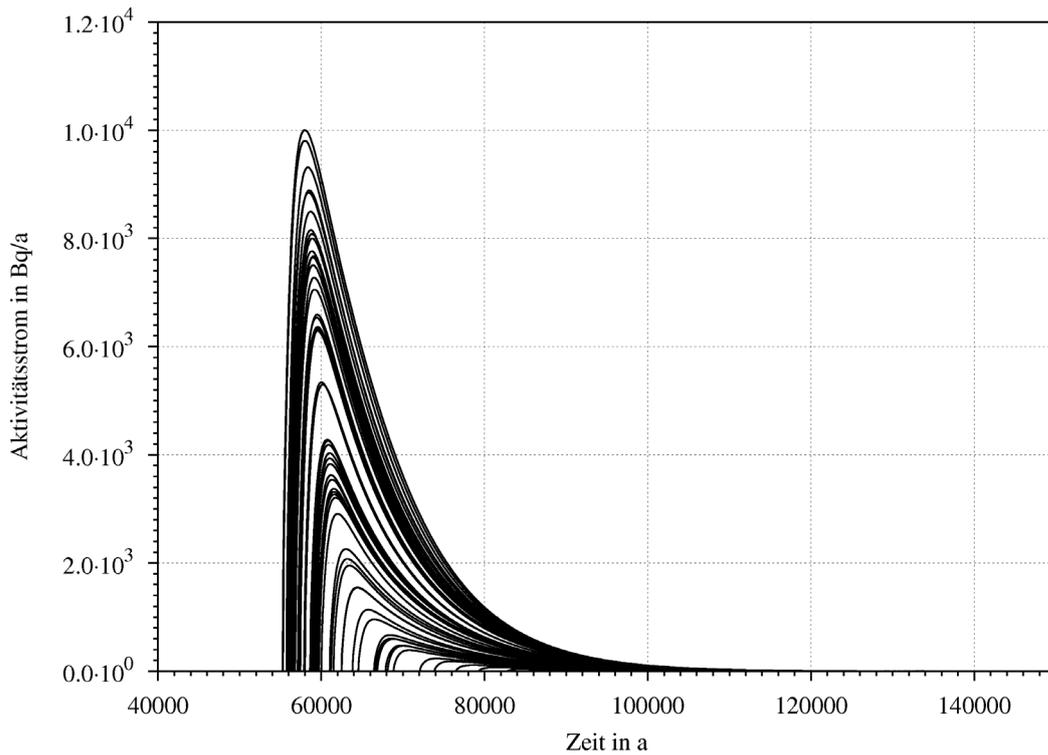
Für die Erstellung der probabilistischen Rechenfälle wird hier das Modell des Bezugsfalls „trockene Grube“ für das komplexe Modell verwendet. Für diesen Bezugsfall gibt es keinen <sup>59</sup>Ni-Austrag über den Rand Abbau 1a und den Rand Abbaustrecke 5.

#### **B.5.1.1 <sup>14</sup>C-Aktivitätsstrom über den Rand Abbau 1a**

Für einen Stichprobenumfang von 100 Modellläufen liegen mindestens 95 % der Wahrscheinlichkeitsverteilung mit einer Aussagesicherheit von 99 % unterhalb eines <sup>14</sup>C-Aktivitätsstromes von 10.000 Bq/a.

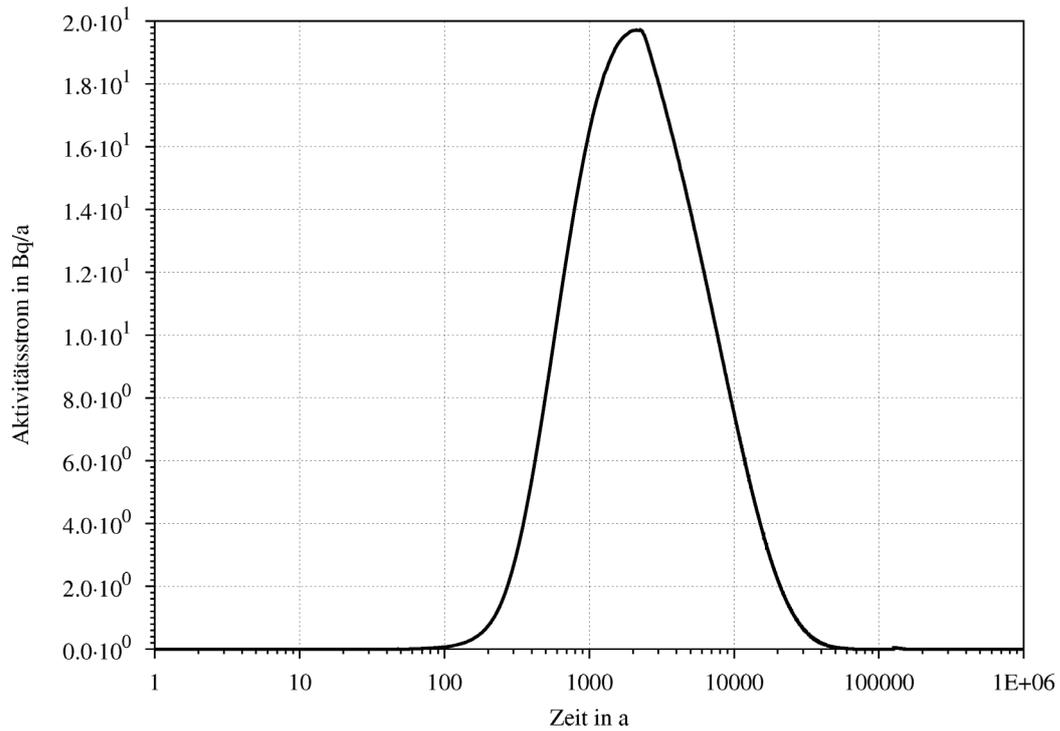
Abb. B.3 zeigt die unterschiedlichen Zeitverläufe des <sup>14</sup>C-Aktivitätsstromes über den Rand Abbau 1a für alle Rechnungen. Es zeigt sich, dass im Gegensatz zum Bezugsfall ein advektiver <sup>14</sup>C-Aktivitätsstrom über den Rand Abbau 1a stattfindet. Der diffusive Austrag davor ist so gering, dass er nicht in der Abbildung erkennbar ist. Der höchste maximale <sup>14</sup>C-Aktivitätsstrom beträgt 10.002 Bq/a und der geringste maximale <sup>14</sup>C-Aktivitätsstrom beträgt ca. 20 Bq/a (entspricht dem Bezugsfall).

Der früheste maximale <sup>14</sup>C-Aktivitätsstrom, findet bei einem Rechenfall bei 1.859 Jahren (ca. 20 Bq/a) statt. Der späteste maximale <sup>14</sup>C-Aktivitätsstrom findet bei einem Rechenfall mit ca. 87.463 Jahren (ca. 27,5 Bq/a) statt. In der Abb. B.3 ist zu erkennen, dass ein advektiver Austrag erst nach 50.000 Jahren auftritt. Frühere Aktivitätsströme (vor 50.000 Jahren) sind auf einen diffusiven Austrag zurückzuführen.



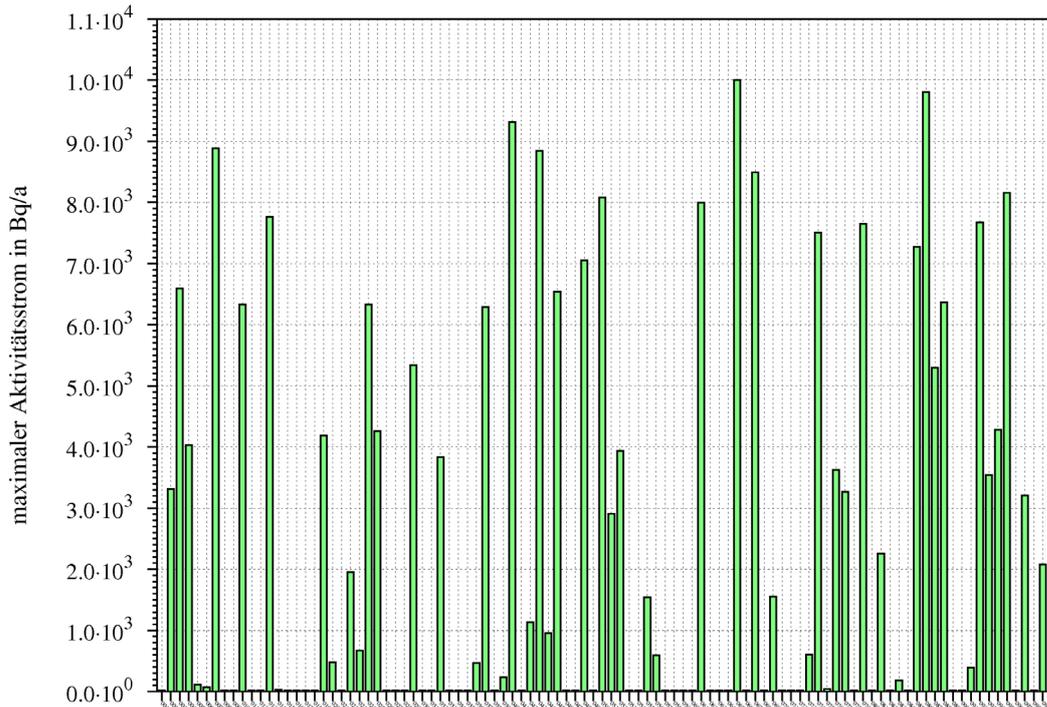
**Abb. B.3** Zeitverläufe des <sup>14</sup>C-Aktivitätsstromes über den Rand Abbau 1a (Randelement RAMB)

Zum Vergleich zeigt die Abb. B.4 den zeitlichen Verlauf des <sup>14</sup>C-Aktivitätsstromes des Bezugsfalles „trockene Grube“ über den Rand Abbau 1a. Hier findet nur ein geringer diffusiver <sup>14</sup>C-Aktivitätsstrom von maximal ca. 20 Bq/a bei 2.250 Jahren statt. Ein advektiver Transport von <sup>14</sup>C findet nicht statt.



**Abb. B.4** Zeitlicher Verlauf des <sup>14</sup>C-Aktivitätsstromes des Bezugsfalles „trockene Grube“ über den Rand Abbau 1a (Randelement RAMB)

In der Abb. B.5 ist die Streuung der Ergebnisstichprobe dargestellt. Es zeigt sich eine breite Streuung des maximalen Aktivitätsstromes für die unterschiedlichen Rechenfälle.



**Abb. B.5** Maximaler  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom für die einzelnen Rechenfälle über den Rand Abbau 1a (Randelement RAMB)

In Tab. B.5 sind die errechneten Sensitivitätsmaße (STM) für die variierten Zweiphasenflussparameter zusammengefasst. Das jeweilige STM macht Aussagen darüber, wie sensitiv der  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom über den Rand Abbau 1a auf Änderungen des jeweiligen Parameters reagiert. Die STM für die unterschiedlichen Parameter sind in absteigender Reihenfolge von links nach rechts für das jeweilige STM angegeben. Die Rangfolge gibt an, um welchen Parameter es sich handelt.

Die berechneten Bestimmtheitsmaße  $R^2$  beziehen sich jeweils auf die gesamte Korrelationsmatrix einer jeweiligen Methode (z. B. Pearson-Korrelation) und zeigen mittlere (0,423 für Kendalls STM) bis hohe Werte (0,848 für Spearmans STM) an. Dies bedeutet, dass zu mindestens für die Spearman Methode ein relativ hoher Anteil der Varianz der Ergebnisstichprobe erklärt werden kann.

Die STM variieren absolut zwischen 0,039 und 0,743. Für alle STM wird der Parameter 2 ( $\lambda$  der van-Genuchten-Funktion) als der am besten mit der Ergebnisstichprobe korrelierter Parameter ermittelt. Für die linearen Korrelationsmaße der Pearson-Korrelation folgen an zweiter Stelle der Rangfolge der Parameter  $p_0$  der Strecken und danach derjenige der Abdichtungen und zuletzt die residuale Gassättigung der Stre-

cken und Abdichtungen. Die STM-Werte für den Parameter  $p_0$  sind für die Abdichtungen und Strecken vergleichbar.

Für alle anderen Korrelations-Methoden folgen in der Rangfolge an zweiter Stelle der Parameter  $p_0$  der Abdichtungen, danach derjenige der Strecken und an letzter Stelle die residuale Gassättigung der Strecken und Abdichtungen.

**Tab. B.5** Sensitivitätsmaße für die verschiedenen Parameter für den maximalen  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom über den Rand Abbau 1a

Die Parameternummern entsprechen denen in Tab. B.2. Die Rangfolge der Parameter ergibt sich aus der Sortierung der absoluten Sensitivitätsmaße.

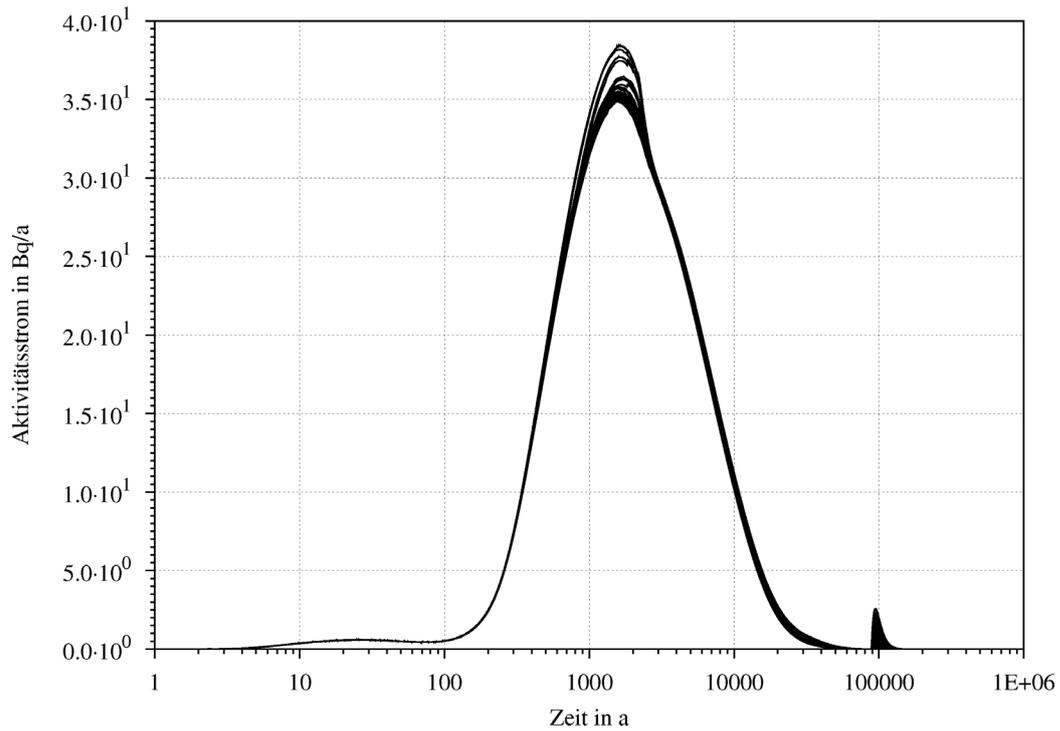
Sensitivitätsmaß	Sensitivitätsmaße der Parameter-Rangfolge				Parameter-Rangfolge	R <sup>2</sup>
OCC	-0,554	0,366	-0,218	0,072	2-4-3-1	0,603
PCC	-0,711	0,573	-0,503	-0,161	2-4-3-1	
SCC	-0,659	0,448	-0,376	-0,105	2-4-3-1	
OQM	-0,480	-0,360	0,120	-0,080	2-3-4-1	0,436
PQM	-0,571	-0,470	0,233	-0,201	2-3-4-1	
SQM	-0,531	-0,405	0,186	-0,161	2-3-4-1	
OKC	-0,508	-0,262	0,254	0,039	2-3-4-1	0,423
PKC	-0,568	-0,388	0,349	-0,066	2-3-4-1	
SKC	-0,528	-0,322	0,286	-0,051	2-3-4-1	
OSC	-0,674	-0,384	0,355	0,049	2-3-4-1	0,848
PSC	-0,881	-0,795	0,743	-0,351	2-3-4-1	
SSC	-0,738	-0,520	0,447	-0,151	2-3-4-1	
CR	0,643	0,418	0,393	0,195	2-3-4-1	
CRR	0,704	0,504	0,408	0,226	2-3-4-1	

### B.5.1.2 $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom Aktivitätsstrom aus der Abbaustrecke 5

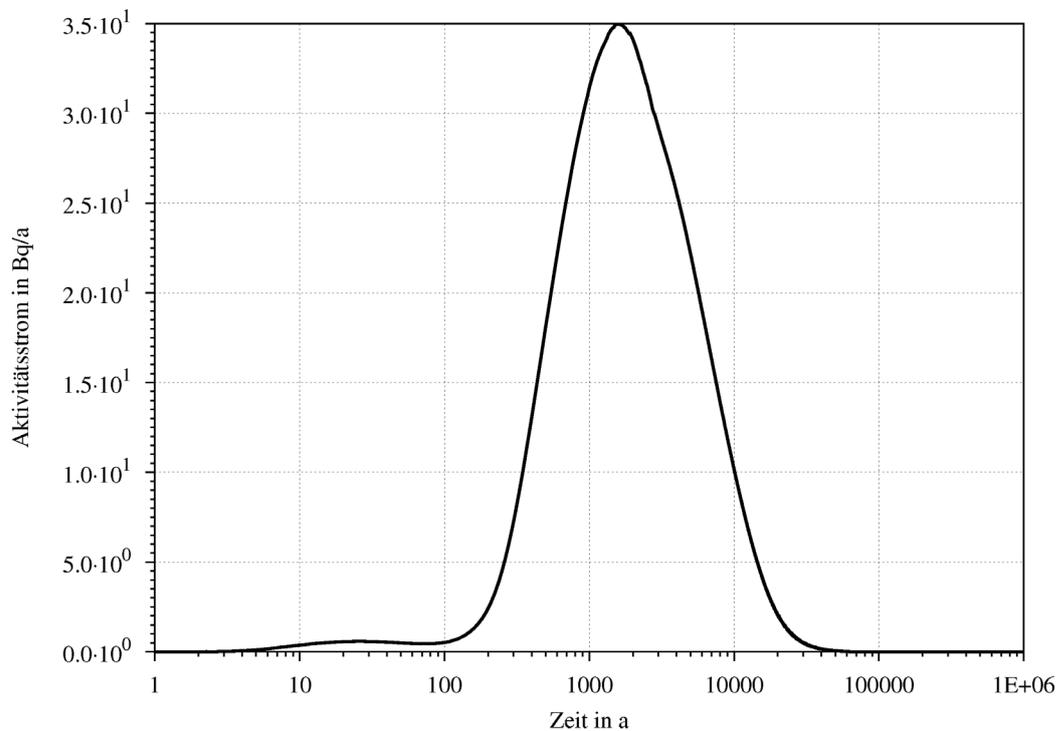
Für einen Stichprobenumfang von 100 Modellläufen liegen mindestens 95 % der Wahrscheinlichkeitsverteilung mit einer Aussagesicherheit von 99 % unterhalb eines  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstromes von 38,4 Bq/a.

Die Abb. B.6 zeigt die unterschiedlichen Zeitverläufe des  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstromes über den Rand Abbau 1a für alle Rechnungen. Der geringe und frühe  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom ist

auf einen diffusiven Transport zurückzuführen. Die zeitlichen Verläufe des  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstromes sind ähnlich zu dem zeitlichen Verlauf im Bezugsfall „trockene Grube“ (Abb. B.7), der einen maximalen Aktivitätsstrom von 35 Bq/a bei ca. 1.600 Jahren zeigt.

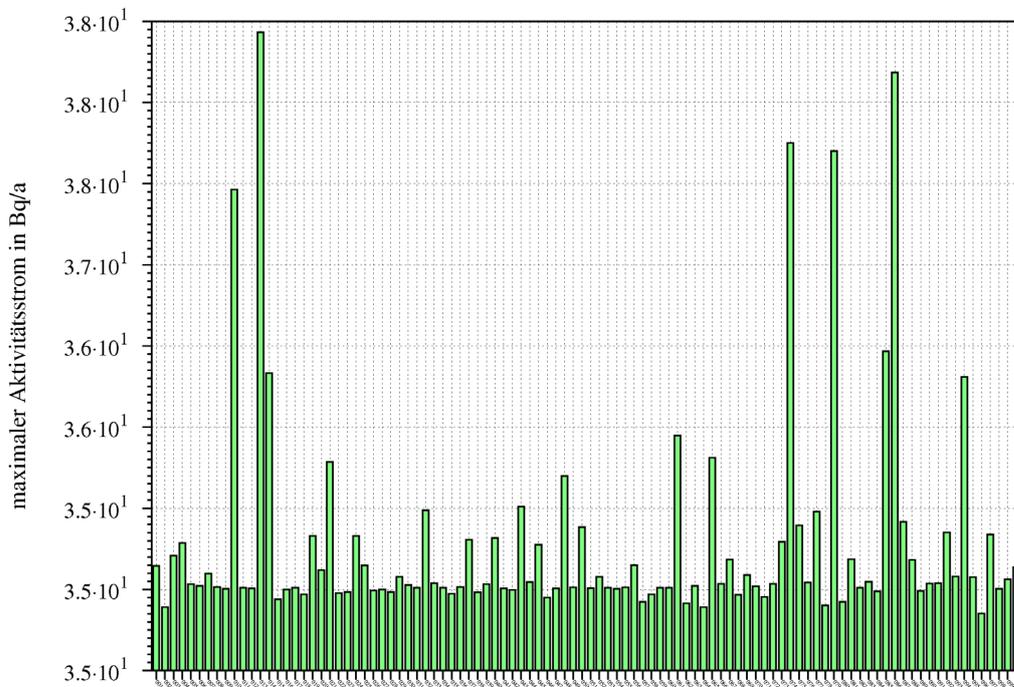


**Abb. B.6** Zeitverlauf des  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstromes der unterschiedlichen Rechnungen über den Rand Abbaustrecke 5 (Randelement RAAB)



**Abb. B.7** Zeitlicher  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom des Bezugsfalles „trockene Grube“ über den Rand Abbaustrecke 5 (Randelement RAAB)

In der Abb. B.8 ist die Streuung der Ergebnisstichprobe dargestellt. Es zeigt sich eine geringe Streuung des maximalen Aktivitätsstromes für die unterschiedlichen Rechenfälle um einen Mittelwert von 35 Bq/a (entspricht dem Bezugsfall) mit einer Standardabweichung von 0,676 Bq/a.



**Abb. B.8** Maximaler  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom für die einzelnen Rechenfälle über den Rand Abbaustrecke 5 (Randelement RAAB)

In der Tab. B.6 sind die errechneten Sensitivitätsmaße (STM) für die variierten Zweiphasenflussparameter zusammengefasst. Die STM für die unterschiedlichen Parameter sind in absteigender Reihenfolge von links nach rechts für das jeweilige STM angegeben.

Die berechneten Bestimmtheitsmaße  $R^2$  zeigen geringe (0,206 für Kendalls STM) bis mittlere Werte (0,472 für Spearmans STM) an. Dies bedeutet, dass nur ein relativ geringer Anteil der Varianz der Ergebnisstichprobe erklärt werden kann.

Die STM variieren zwischen 0,006 und 0,749. Für alle STM wird wieder der Parameter 2 (Parameter  $\lambda$  der Van-Genuchten Funktion) als der am stärksten mit der Ergebnisstichprobe korrelierter Parameter ermittelt.

Für die meisten STM folgen in der Rangfolge an zweiter Stelle das  $p_0$  für die Abdichtungen, danach das  $p_0$  für die Strecken und an letzter Stelle die residuale Gassättigung. Einziger Unterschied sind die varianzbasierten STM, bei denen die letzten beiden Parameter im Gegensatz zu den anderen vertauscht sind.

**Tab. B.6** Sensitivitätsmaße für die verschiedenen Parameter für den maximalen  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom über den Rand Abbaustrecke 5

Die Parameternummern entsprechen denen in Tab. B.2. Die Rangfolge der Parameter ergibt sich aus der Sortierung der absoluten Sensitivitätsmaße

Sensitivitätsmaß	Sensitivitätsmaße der Parameter-Rangfolge				Parameter-Rangfolge	R <sup>2</sup>
OCC	-0,420	0,177	0,156	-0,136	2-4-1-3	0,272
PCC	-0,466	-0,255	0,245	0,050	2-3-4-1	
SCC	-0,465	-0,231	0,219	0,044	2-3-4-1	
OQM	-0,566	-0,222	0,101	0,081	2-3-4-1	0,404
PQM	-0,598	-0,339	0,140	-0,007	2-3-4-1	
SQM	-0,585	-0,282	0,113	-0,006	2-3-4-1	
OKC	-0,376	-0,200	0,105	0,067	2-3-4-1	0,206
PKC	-0,396	-0,253	0,135	0,011	2-3-4-1	
SKC	-0,387	-0,235	0,123	0,010	2-3-4-1	
OSC	-0,561	-0,289	0,157	0,108	2-3-4-1	0,472
PSC	-0,627	-0,454	0,266	-0,033	2-3-4-1	
SSC	-0,595	-0,376	0,207	-0,024	2-3-4-1	
CR	0,524	0,276	0,264	0,257	2-3-1-4	
CRR	0,749	0,394	0,304	0,222	2-3-1-4	

## B.5.2 Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“

Für die Erstellung der probabilistischen Rechenfälle wird hier das Modell des Bezugsfalls „mit relevantem Lösungszutritt“ für das komplexe Modell verwendet.

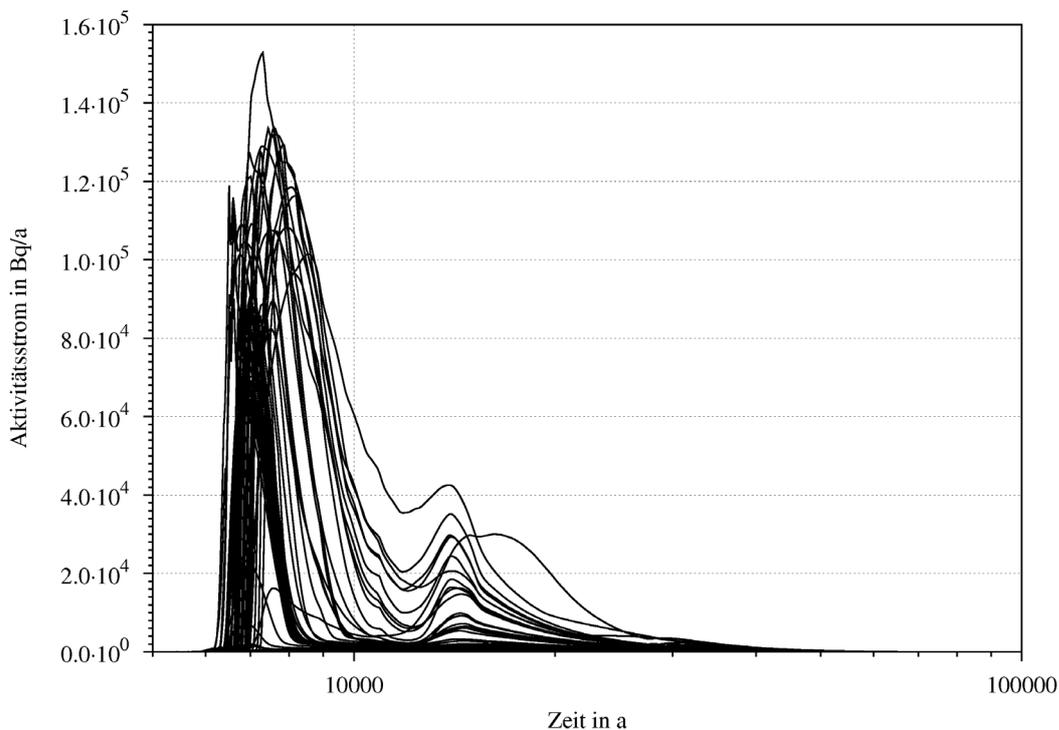
### B.5.2.1 $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom über den Rand Abbau 1a

Für einen Stichprobenumfang von 100 Modellläufen liegen mindestens 95 % der Wahrscheinlichkeitsverteilung mit einer Aussagesicherheit von 99 % unterhalb eines

$^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstromes von 152.800 Bq/a. Die gleiche Aussage gilt für einen  $^{59}\text{Ni}$ -Aktivitätsstrom von 180 Bq/a.

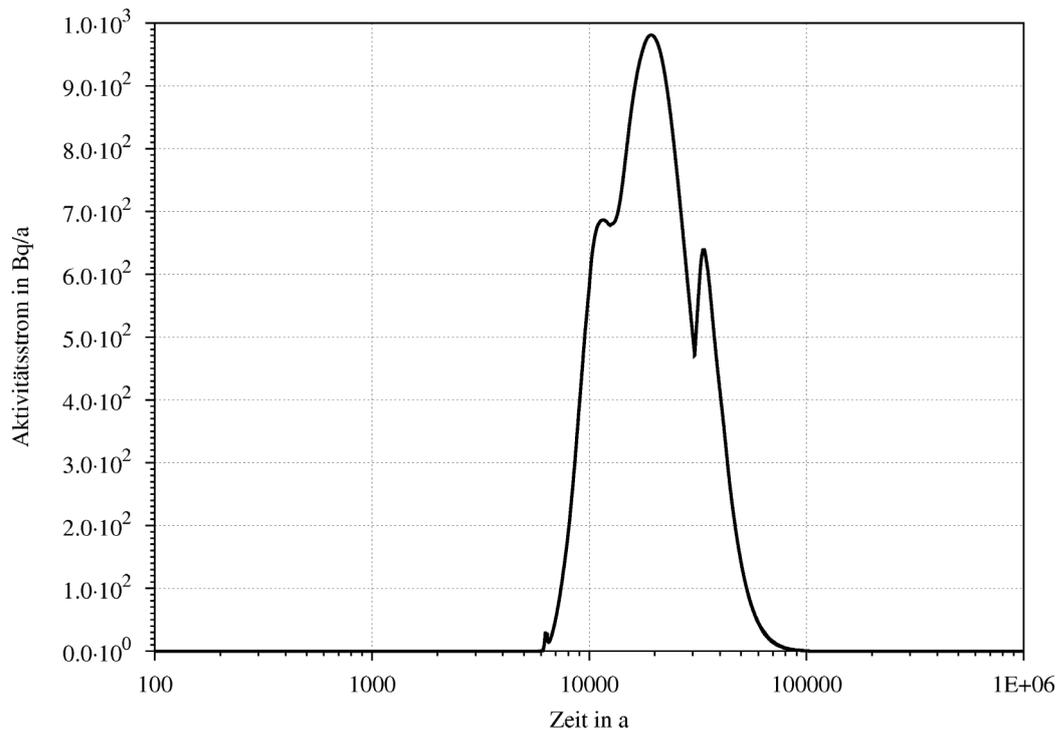
Die Abb. B.9 zeigt die unterschiedlichen Zeitverläufe des  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstromes über den Rand Abbau 1a für alle Rechenfälle. Anders als für die trockenen probabilistischen Rechnungen gibt es vor dem advektiven  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom keinen diffusiven Austrag.

Der maximale  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom bei ca. 18.000 Jahren liegt bei vielen Rechenfällen unter 1000 Bq/a. Die höchsten  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsströme von 23.350 Bq/a bis 152.800 Bq/a finden in einem Zeitraum von ca. 6.500 Jahren und 8.500 Jahren statt.



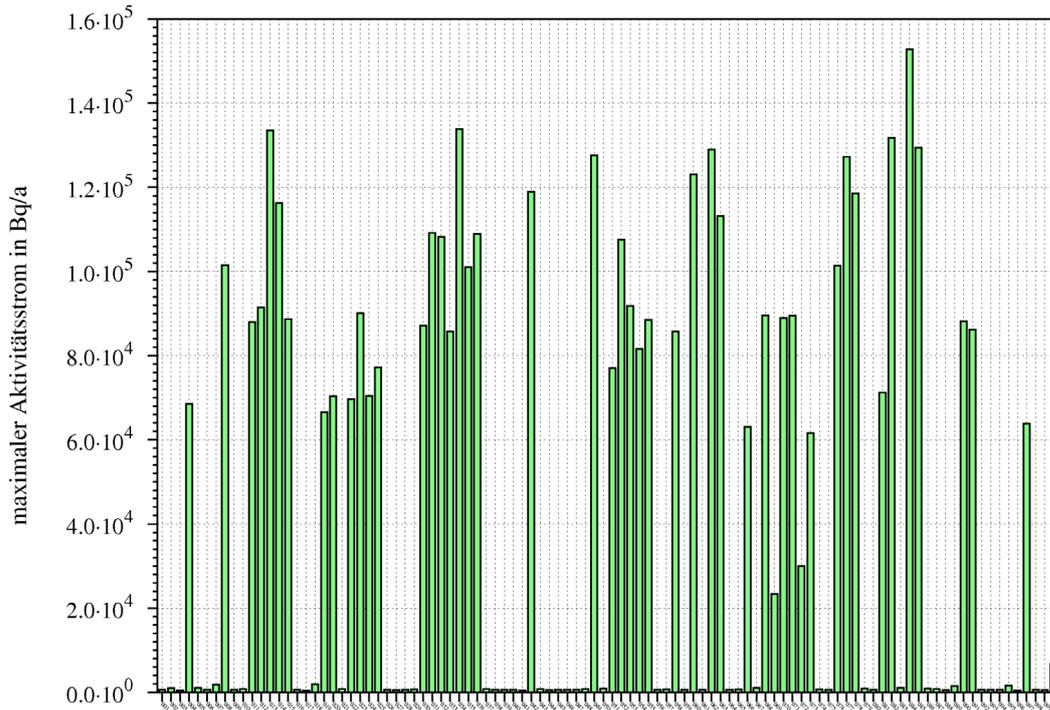
**Abb. B.9** Zeitverlauf des  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstromes der unterschiedlichen Rechenfälle über den Rand Abbau 1a (Randelement RAMB)

Die Abb. B.10 zeigt den  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom für den Bezugsfall „mit relevantem Lösungszutritt“ über den Rand Abbau 1a. Der Zeitpunkt des maximalen  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstromes von 980 Bq/a des Bezugsfalles bei ca. 19.000 Jahren, entspricht in etwa den probabilistischen Rechenfällen, deren maximaler  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom bei ca. 18.000 Jahren liegt.



**Abb. B.10** Zeitlicher  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom des Bezugsfalles „mit relevantem Lösungszutritt“ über den Rand Abbau 1a (Randelement RAMB)

Aus Abb. B.11 wird die Streuung der Ergebnisstichprobe ersichtlich. Es zeigt sich eine breite Streuung des maximalen Aktivitätsstromes für die unterschiedlichen Rechenfälle. Hier wird noch einmal die Ausbildung zweier separater zeitlicher Aktivitätsbereiche für die Aktivitätsmaxima ( $< 1.000$  und  $> 23.350$  Bq/a) deutlich.



**Abb. B.11** Maximaler  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom für die einzelnen Rechenfälle über den Rand Abbau 1a (Randelement RAMB)

In der Tab. B.7 sind die errechneten Sensitivitätsmaße (STM) für die Zweiphasenflussparameter in Bezug auf die Ergebnisstichprobe des maximalen  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstromes zusammengefasst.

Die berechneten Bestimmtheitsmaße  $R^2$  zeigen geringe (0,14 für Kendalls STM) bis mittlere Werte (0,66 für Blomqvist STM) an. Dies bedeutet, dass nur ein geringer bis mittlerer Anteil der Varianz der Ergebnisstichprobe erklärt werden kann.

Die STM variieren absolut zwischen 0,002 und 0,8. Für alle STM wird der Parameter 4 ( $p_0$  der Strecken) als der am besten mit der Ergebnisstichprobe korrelierte Parameter ermittelt.

**Tab. B.7** Sensitivitätsmaße für die verschiedenen Parameter für den maximalen <sup>14</sup>C-Aktivitätsstrom über den Rand Abbau 1a (Randelement RAMB)

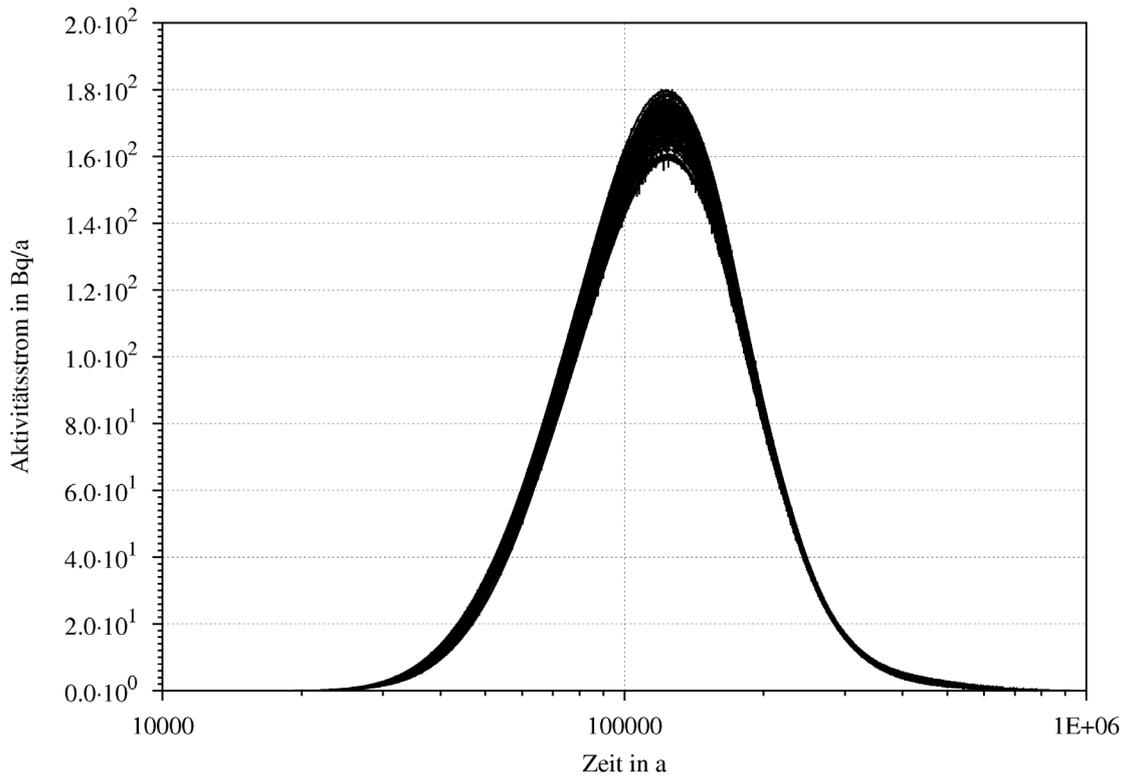
Die Parameternummern entsprechen denen in Tab. B.2. Die Rangfolge der Parameter ergibt sich aus der Sortierung der absoluten Sensitivitätsmaße.

Sensitivitätsmaß	Sensitivitätsmaße der Parameter-Rangfolge				Parameter-Rangfolge	R <sup>2</sup>
OCC	-0,527	0,147	-0,122	-0,002	4-2-1-3	0,31581
PCC	-0,541	0,213	0,087	-0,032	4-2-3-1	
SCC	-0,541	0,186	0,074	-0,027	4-2-3-1	
OQM	-0,800	-0,320	-0,120	0,120	4-1-3-2	0,66213
PQM	-0,787	-0,200	0,116	-0,013	4-1-2-3	
SQM	-0,767	-0,124	0,069	-0,008	4-1-2-3	
OKC	-0,352	-0,161	-0,004	0,003	4-1-2-3	0,14051
PKC	-0,342	-0,132	0,040	-0,021	4-1-3-2	
SKC	-0,342	-0,125	0,038	-0,020	4-1-3-2	
OSC	-0,610	-0,247	-0,008	0,008	4-1-2-3	0,40118
PSC	-0,601	-0,175	0,122	-0,044	4-1-3-2	
SSC	-0,599	-0,142	0,097	-0,035	4-1-3-2	
CR	0,786	0,394	0,271	0,231	4-2-3-1	
CRR	0,771	0,409	0,321	0,245	4-2-1-3	

### B.5.2.2 <sup>59</sup>Ni-Aktivitätsstrom über den Rand Abbau 1a

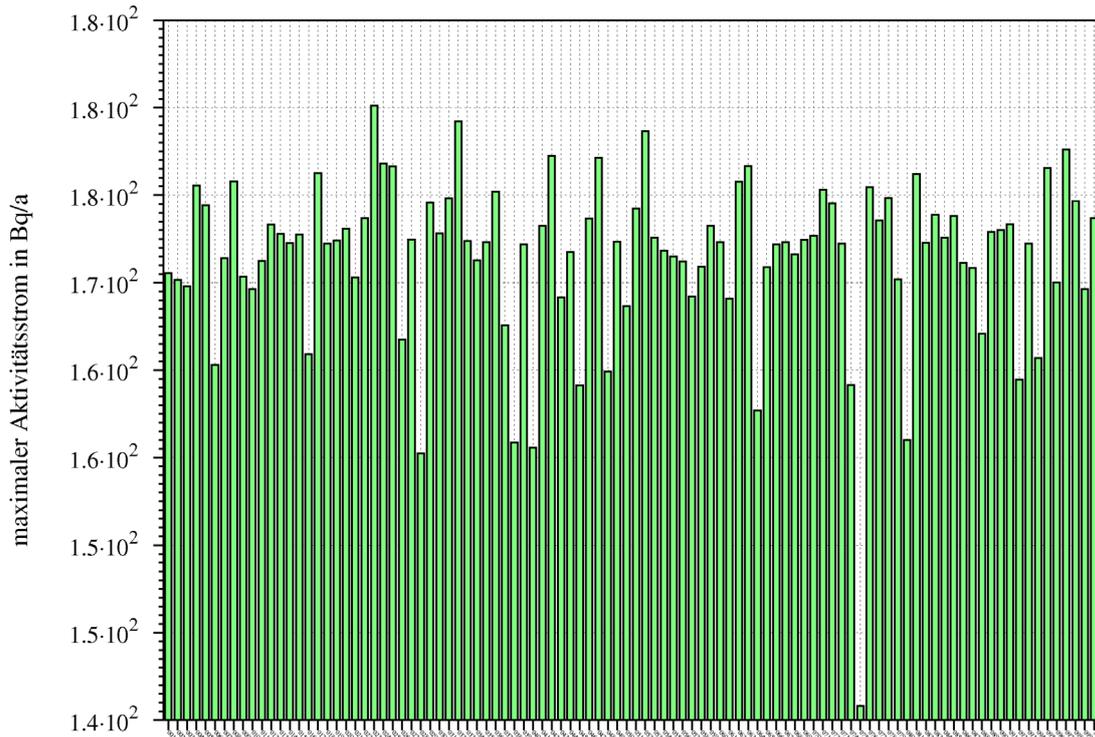
Die Abb. B.12 zeigt die unterschiedlichen Zeitverläufe des <sup>59</sup>Ni-Aktivitätsstromes über den Rand Abbau 1a für alle Rechenfälle. Es findet ein maximaler <sup>59</sup>Ni-Aktivitätsstrom von im Mittel 170 Bq/a zwischen 98.900 und 128.300 Jahren statt. Sowohl das zeitliche Auftreten sowie die Höhe des maximalen <sup>59</sup>Ni-Aktivitätsstromes variieren nur sehr wenig zwischen den unterschiedlichen Rechenfällen.

Der zeitliche Verlauf des <sup>59</sup>Ni-Aktivitätsstromes für den Bezugsfall unterscheidet sich nicht wesentlich von dem der unterschiedlichen probabilistischen Rechenfälle und wird hier nicht extra aufgeführt. Er weist einen maximalen <sup>59</sup>Ni-Aktivitätsstrom von 170 Bq/a bei ca. 123.500 Jahren auf. Dies entspricht im Mittel dem der unterschiedlichen probabilistischen Rechenfälle sowohl was die Höhe des maximalen <sup>59</sup>Ni-Aktivitätsstromes sowie den Zeitpunkt des Auftretens betrifft.



**Abb. B.12** Zeitverlauf des <sup>59</sup>Ni-Aktivitätsstromes der unterschiedlichen Rechenfälle über den Rand Abbau 1a (Randelement RAMB)

In Abb. B.13 ist die Streuung der Ergebnisstichprobe erkennen. Hier wird nochmal die geringe Streuung des maximalen Aktivitätsstromes für die probabilistischen Rechenfälle um einen Mittelwert von 170 Bq/a deutlich.



**Abb. B.13** Maximaler  $^{59}\text{Ni}$ -Aktivitätsstrom für die einzelnen Rechenfälle über den Rand Abbau 1a (Randelement RAMB)

In der Tab. B.8 sind die errechneten Sensitivitätsmaße (STM) für die verschiedenen variierten Zweiphasenflussparameter in Bezug auf die Ergebnisstichprobe des maximalen  $^{59}\text{Ni}$ -Aktivitätsstromes zusammengefasst.

Die berechneten Bestimmtheitsmaße  $R^2$  zeigen geringe (0,22 für Kendalls-Korrelation) bis mittlere Werte (0,59 für Pearson-Korrelation) an. Dies bedeutet, dass nur ein geringer bis mittlerer Anteil der Varianz der Ergebnisstichprobe erklärt werden kann.

Die STM variieren absolut zwischen 0,001 und 0,725. Für die linearen STM der Pearson-Korrelation wird der Parameter 4 ( $p_0$  der Strecken) als der am besten mit der Ergebnisstichprobe korrelierte Parameter ermittelt. Für die rangbasierten STM wird der Parameter 1 (residuale Gassättigung) als der am stärksten mit der Ergebnisstichprobe korrelierte Parameter ermittelt.

**Tab. B.8** Sensitivitätsmaße für die verschiedenen Parameter für den maximalen <sup>59</sup>Ni-Aktivitätsstrom über den Rand Abbau 1a (Randelement RAMB)

Die Parameternummern entsprechen denen in Tab. B.2. Die Rangfolge der Parameter ergibt sich aus der Sortierung der absoluten Sensitivitätsmaße

Sensitivitätsmaß	Sensitivitätsmaße der Parameter-Rangfolge				Parameter-Rangfolge	R <sup>2</sup>
OCC	-0,653	-0,467	-0,122	0,003	4-1-3-2	0,59462
PCC	-0,677	-0,536	-0,166	-0,068	4-1-3-2	
SCC	-0,594	-0,414	-0,110	-0,045	4-1-3-2	
OQM	-0,440	-0,400	-0,080	0,040	1-4-3-2	0,28655
PQM	-0,386	-0,337	-0,037	-0,001	1-4-2-3	
SQM	-0,370	-0,312	-0,032	-0,001	1-4-2-3	
OKC	-0,400	-0,288	-0,047	0,025	1-4-3-2	0,22142
PKC	-0,387	-0,264	-0,026	-0,023	1-4-3-2	
SKC	-0,375	-0,244	-0,023	-0,020	1-4-3-2	
OSC	-0,581	-0,459	-0,073	0,040	1-4-3-2	0,46806
PSC	-0,570	-0,432	-0,072	-0,026	1-4-2-3	
SSC	-0,522	-0,360	-0,054	-0,019	1-4-2-3	
CR	0,725	0,557	0,290	0,201	4-1-2-3	
CRR	0,659	0,649	0,216	0,203	1-4-3-2	

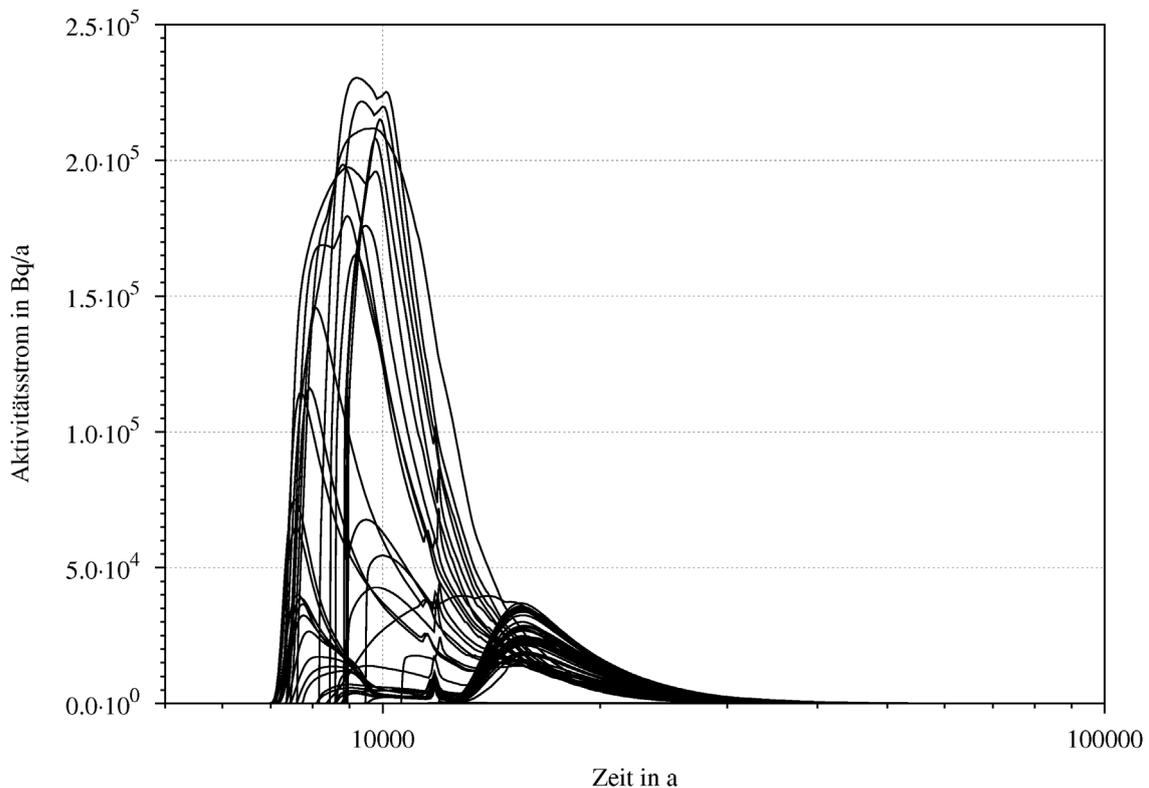
### B.5.2.3 <sup>14</sup>C-Aktivitätsstrom über die Abbaustrecke 5

Für einen Stichprobenumfang von 100 Modellläufen liegen mindestens 95 % der Wahrscheinlichkeitsverteilung mit einer Aussagesicherheit von 99 % unterhalb eines <sup>14</sup>C-Aktivitätsstromes von 230.370 Bq/a. Die gleiche Aussage gilt auch für einen <sup>59</sup>Ni-Aktivitätsstrom von 2,32 Bq/a.

Die Abb. B.14 zeigt die unterschiedlichen Zeitverläufe des <sup>14</sup>C-Aktivitätsstromes über den Rand Abbaustrecke 5 für alle Rechnungen. Dabei zeigen sich zwei Häufungszeiten für die <sup>14</sup>C-Aktivitätsströme, eine zwischen 7.500 Jahren und 10.000 Jahren (36.500 Bq/a bis 230.000 Bq/a) und eine andere zwischen 12.000 Jahren und 16.000 Jahren (15.000 Bq/a bis 39.600 Bq/a auf).

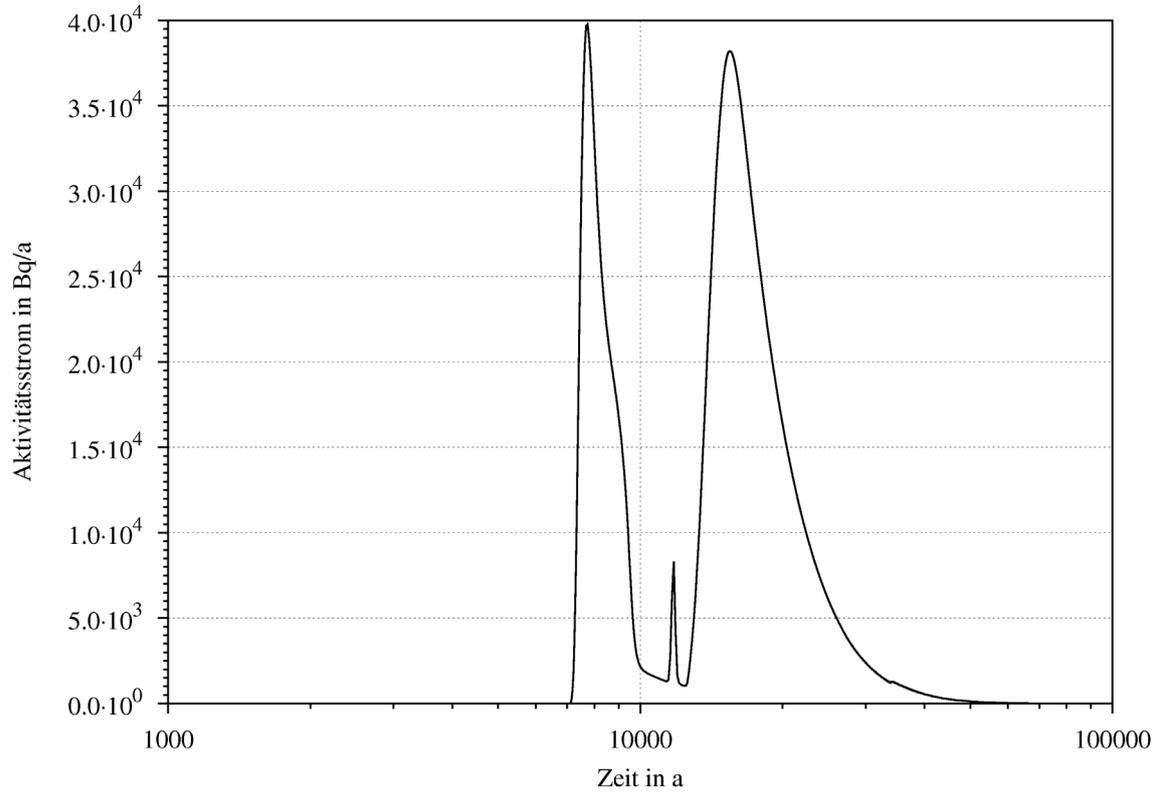
Die Abb. B.14 zeigt die unterschiedlichen Zeitverläufe des <sup>14</sup>C-Aktivitätsstromes über den Rand Abbaustrecke 5 für alle Rechnungen. Von 7.500 – 10.000 Jahren treten die

höchsten  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsströme von 36.500 Bq/a bis 230.000 Bq/a auf. Danach gibt es einen zweiten zeitlichen Cluster an Austragsmaxima. In der Zeit zwischen 12.000 und 16.000 Jahren treten mittlere  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsströme von 15.000 Bq/a bis 39.600 Bq/a auf. Zwischen 13.000 – 27.600 Jahren treten die geringsten  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsströme von 7.0 Bq/a bis 260 Bq/a auf.



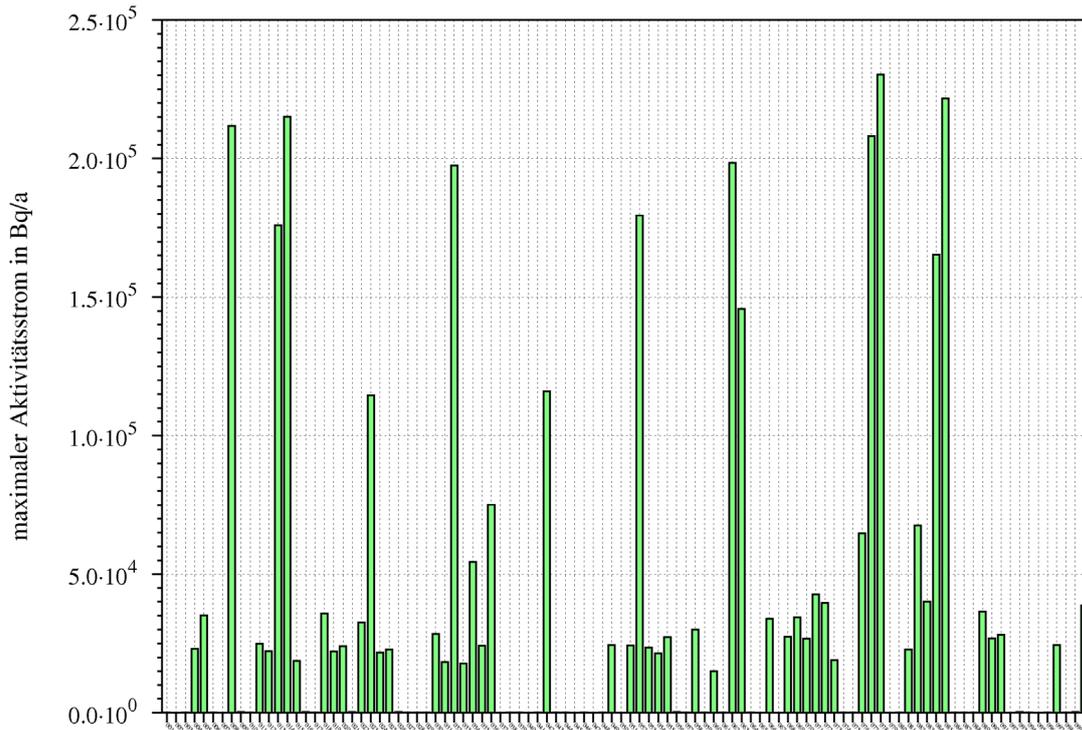
**Abb. B.14** Zeitverlauf des  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstromes der probabilistischen Rechenfälle über den Rand Abbaustrecke 5 (Randelement RAAB)

In der Abb. B.15 ist der zeitliche Verlauf des  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstromes für den Bezugsfall „mit relevantem Lösungszutritt“ über den Rand Abbaustrecke 5 gezeigt. Es zeigen sich zwei Austragsmaxima, zum einen bei 7.700 Jahren von 40.000 Bq/a, zum anderen bei 15.500 Jahren von 38.000 Bq/a.



**Abb. B.15** Zeitlicher Verlauf des  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstromes des Bezugsfalles „mit relevantem Lösungszutritt“ über den Rand Abbaustrecke 5 (Randelement RAAB)

In der Abb. B.16 ist die Streuung der Ergebnisstichprobe dargestellt. Es zeigt sich eine breite Streuung des maximalen  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstromes für die unterschiedlichen Rechenfälle.



**Abb. B.16** Maximaler  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom für die einzelnen Rechenfälle über den Rand Abbaustrecke 5 (Randelement RAAB)

In der Tab. B.9 sind die errechneten Sensitivitätsmaße (STM) für die variierten Zweiphasenflussparameter in Bezug auf die Ergebnisstichprobe des maximalen  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstromes zusammengefasst.

Die berechneten Bestimmtheitsmaße  $R^2$  zeigen geringe (0,158 für Pearson-Korrelation) bis mittlere/hohe Werte (0,69 für Blomqvist-Korrelation) an.

Für alle STM wird der Parameter 4 ( $p_0$  der Strecken) als der am besten mit der Ergebnisstichprobe korrelierte Parameter ermittelt, danach folgt an zweiter Stelle die residuale Gassättigung.

**Tab. B.9** Sensitivitätsmaße für die verschiedenen Parameter für den maximalen <sup>14</sup>C-Aktivitätsstrom über den Rand Abbaustrecke 5 (Randelement RAAB)

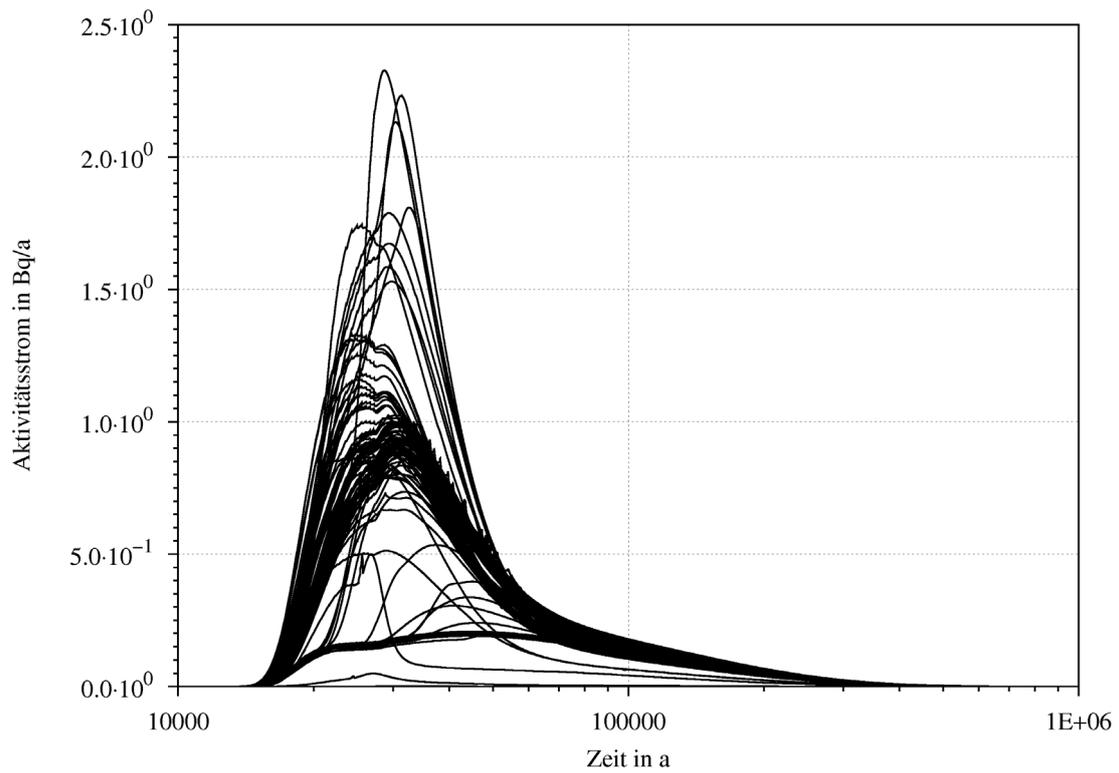
Die Parameternummern entsprechen denen in Tab. B.2. Die Rangfolge der Parameter ergibt sich aus der Sortierung der absoluten Sensitivitätsmaße

Sensitivitätsmaß	Sensitivitätsmaße der Parameter-Rangfolge				Parameter-Rangfolge	R <sup>2</sup>
OCC	-0,312	-0,210	0,145	-0,088	4-1-3-2	0,15876
PCC	-0,308	-0,184	0,153	-0,077	4-1-3-2	
SCC	-0,301	-0,176	0,146	-0,073	4-1-3-2	
OQM	-0,800	-0,400	-0,040	0,040	4-1-3-2	0,69227
PQM	-0,796	-0,370	0,135	-0,037	4-1-3-2	
SQM	-0,754	-0,231	0,077	-0,021	4-1-3-2	
OKC	-0,429	-0,243	0,122	-0,006	4-1-2-3	0,23414
PKC	-0,422	-0,206	0,112	0,048	4-1-2-3	
SKC	-0,412	-0,186	0,099	0,042	4-1-2-3	
OSC	-0,664	-0,328	0,171	0,000	4-1-2-3	0,51189
PSC	-0,666	-0,251	0,190	0,157	4-1-2-3	
SSC	-0,643	-0,187	0,137	0,113	4-1-2-3	
CR	0,626	0,341	0,259	0,243	4-1-2-3	
CRR	0,757	0,437	0,358	0,205	4-1-2-3	

#### B.5.2.4 <sup>59</sup>Ni-Aktivitätsstrom über die Abbaustrecke 5

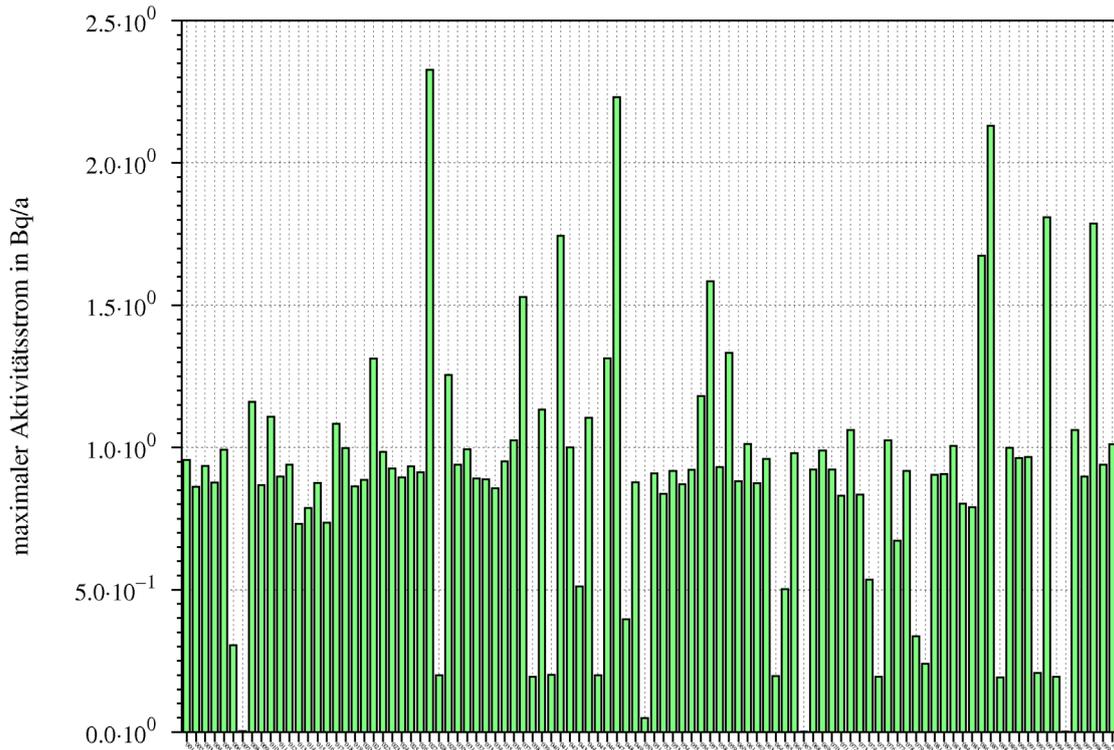
Die Abb. B.17 zeigt die unterschiedlichen Zeitverläufe des <sup>59</sup>Ni-Aktivitätsstromes über den Rand Abbaustrecke 5 für alle Rechenfälle. Der maximale <sup>59</sup>Ni-Aktivitätsstrom variiert von 0,001 Bq/a bis 2,3 Bq/a. Die Austragsmaxima gruppieren sich um den Zeitpunkt 31.800 Jahre. Die Höhe des maximalen <sup>59</sup>Ni-Aktivitätsstromes ist vernachlässigbar gering.

Der zeitliche Verlauf des <sup>59</sup>Ni-Aktivitätsstromes für den Bezugsfall unterscheidet sich nicht wesentlich von dem der probabilistischen Rechenfälle und wird hier nicht extra aufgeführt. Der Bezugsfall weist einen maximalen <sup>59</sup>Ni-Aktivitätsstrom von 1 Bq/a bei ca. 33.900 Jahren auf.



**Abb. B.17** Zeitverlauf des  $^{59}\text{Ni}$ -Aktivitätsstromes der alternativen Zeitverläufe über den Rand Abbaustrecke 5 (Randelement RAAB)

In der Abb. B.18 ist die Streuung der Ergebnisstichprobe dargestellt. Hier wird nochmal die geringe Streuung des maximalen  $^{59}\text{Ni}$ -Aktivitätsstromes für die unterschiedlichen Rechenfälle um einen Mittelwert von 0,9 Bq/a deutlich.



**Abb. B.18** Maximaler <sup>59</sup>Ni-Aktivitätsstrom für die einzelnen Rechenfälle über den Rand Abbaustrecke 5 (Randelement RAAB)

Aufgrund der geringen Streuung ist eine Sensitivitätsanalyse für den <sup>59</sup>Ni-Aktivitätsstrom über den Rand Abbaustrecke 5 nicht sinnvoll. Dies zeigt sich auch an den berechneten Bestimmtheitsmaßen  $R^2$ . Diese zeigen sehr geringe (0,09) bis geringe Werte von 0,34 an (Tab. B.10). Dies bedeutet, dass die Varianz der Ergebnisstichprobe nicht aussagekräftig erklärt werden kann.

**Tab. B.10** Sensitivitätsmaße für die verschiedenen Parameter für den maximalen <sup>59</sup>Ni-Aktivitätsstrom über den Rand Abbaustrecke 5 (Randelement RAAB)

Die Parameternummern entsprechen denen in Tab. B.2. Die Rangfolge der Parameter ergibt sich aus der Sortierung der absoluten Sensitivitätsmaße.

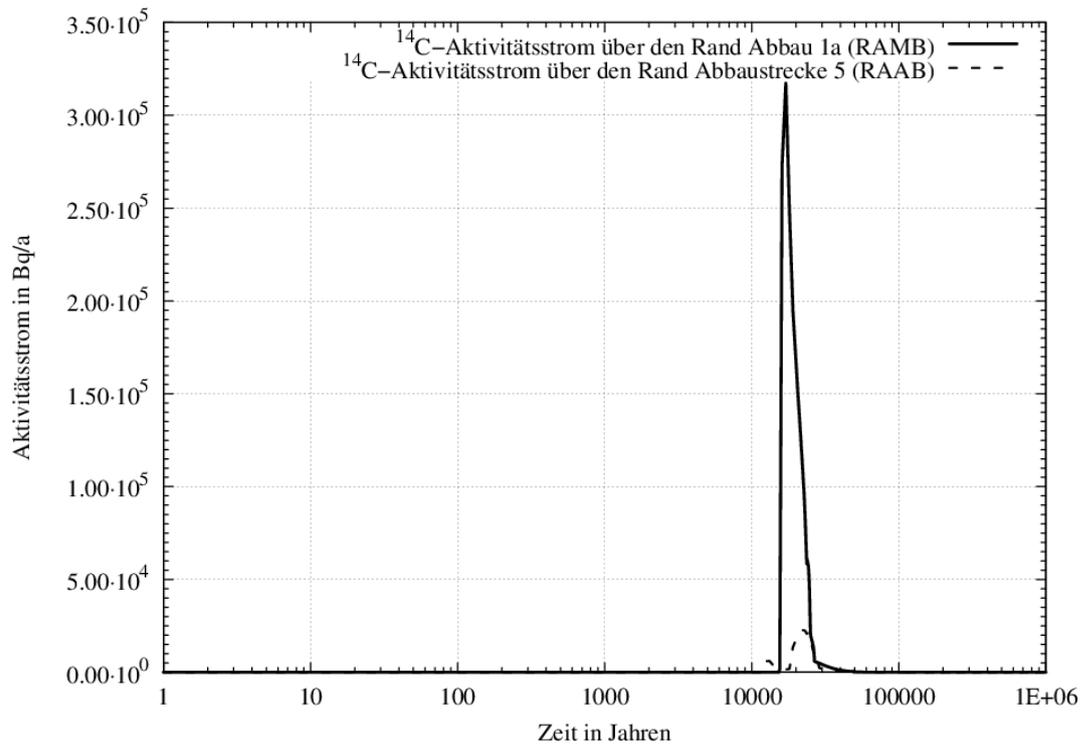
Sensitivitätsmaß	Sensitivitätsmaße der Parameter-Rangfolge				Parameter-Rangfolge	$R^2$
OCC	-0,513	0,241	-0,137	-0,081	4-2-3-1	0,33862
PCC	-0,537	0,301	-0,054	0,018	4-2-3-1	
SCC	-0,526	0,266	-0,045	0,015	4-2-3-1	
OQM	-0,400	0,200	-0,080	0,040	1-2-3-4	0,20006
PQM	-0,400	0,158	0,150	-0,042	1-4-2-3	

Sensitivitätsmaß	Sensitivitätsmaße der Parameter-Rangfolge				Parameter-Rangfolge	R <sup>2</sup>
SQM	-0,409	0,148	0,137	-0,038	1-4-2-3	
OKC	0,213	-0,208	-0,107	-0,100	2-1-4-3	0,093254
PKC	0,192	-0,183	-0,085	-0,078	2-1-3-4	
SKC	0,187	-0,179	-0,082	-0,076	2-1-3-4	
OSC	0,308	-0,272	-0,225	-0,157	2-1-4-3	0,1883
PSC	0,275	-0,208	-0,176	-0,115	2-1-4-3	
SSC	0,262	-0,198	-0,166	-0,106	2-1-4-3	
CR	0,787	0,357	0,346	0,273	4-1-2-3	
CRR	0,774	0,427	0,400	0,341	4-2-1-3	

## B.6 Ergebnisse zur Variation der Permeabilitäten

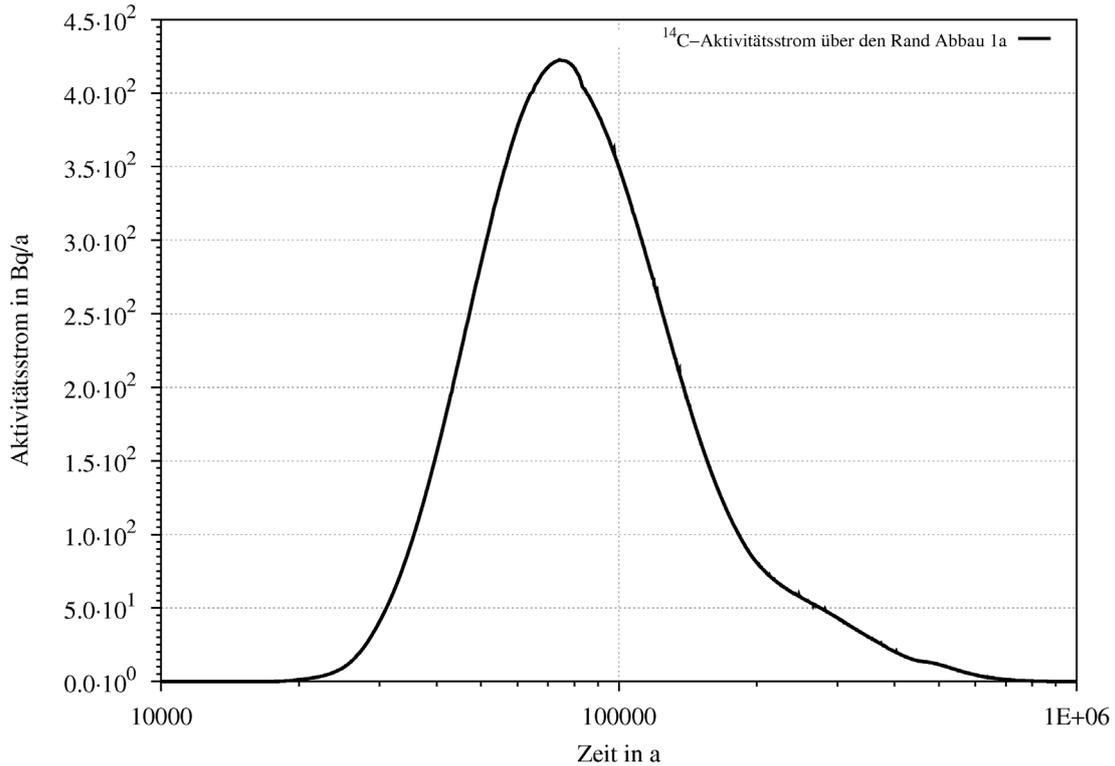
Wie in Kap. B.2 beschrieben wird nur das Szenario mit Lösungszutritt betrachtet. Ausgangspunkt ist eine Variation des Bezugsfalls „mit relevantem Lösungszutritt“, bei der die Strecken zu 99 % mit Salzbeton verfüllt sind und die Strecken eine Permeabilität von  $1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  aufweisen.

Die Abb. B.19 zeigt den zeitlichen Verlauf des <sup>14</sup>C-Aktivitätsstromes der Variante des Bezugsfalles „mit relevantem Lösungszutritt“ über den Rand Abbau 1a und Abbaustrecke 5. Am Rand Abbau 1a tritt der maximale <sup>14</sup>C-Aktivitätsstrom bei 17.000 Jahren mit einem <sup>14</sup>C-Aktivitätsstrom von 317.300 Bq/a auf. Am Rand Abbaustrecke 5 liegt der maximale <sup>14</sup>C-Aktivitätsstrom bei 22.500 Jahren und besitzt eine Größe von 22.700 Bq/a.



**Abb. B.19** Zeitlicher Verlauf des  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom in der Variante des Bezugsfalles „mit relevantem Lösungszutritt“ über den Rand Abbau 1a und Abbaustrecke 5

Der  $^{59}\text{Ni}$ -Aktivitätsstrom über den Rand Abbau 1a ist in Abb. B.20 zu sehen. Der Maximalwert von  $423 \text{ Bq/a}$  tritt hier bei  $74.000$  auf Jahren auf. Der  $^{59}\text{Ni}$ -Aktivitätsstrom über den Rand Abbaustrecke 5 ist vernachlässigbar gering.



**Abb. B.20** Zeitlicher Verlauf des  $^{59}\text{Ni}$ -Aktivitätsstroms des Bezugsrechenfalls über den Rand Abbau 1a

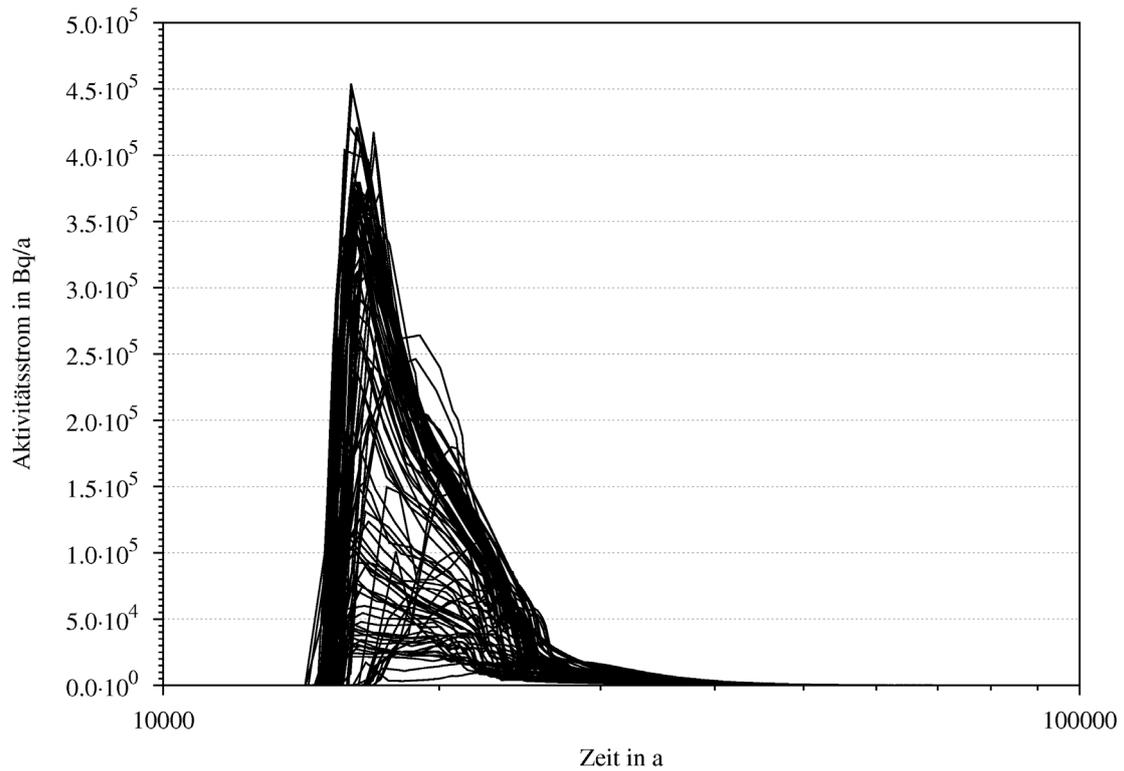
Kleine Ausreißer in der Kurve siehe Fußnote 3 auf Seite 156

## B.6.1 Variation der Schwebenpermeabilität

### B.6.1.1 $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom über den Rand Abbau 1a

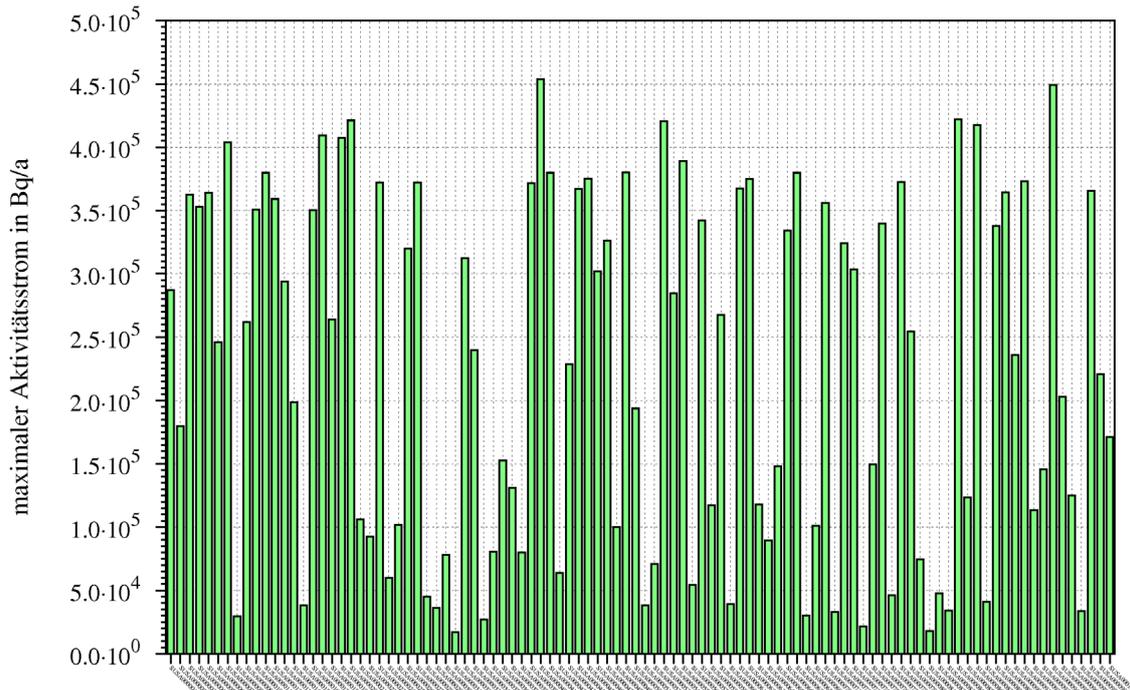
Für einen Stichprobenumfang von 100 Modellläufen liegen mindestens 95 % der Wahrscheinlichkeitsverteilung mit einer Aussagesicherheit von 99 % unterhalb eines  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstromes von 453.900 Bq/a. Die gleiche Aussage gilt für einen  $^{59}\text{Ni}$ -Aktivitätsstrom von 570 Bq/a.

Die Abb. B.21 zeigt den  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom über den Rand Abbau 1a für die erzeugte Stichprobe der Schwebenpermeabilitäten. Der maximale  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom liegt bei den verschiedenen Rechenfällen zwischen 16.943 Bq/a und 453.900 Bq/a in einem Zeitraum zwischen 15.750 Jahren und 28.000 Jahren.



**Abb. B.21** Unterschiedliche Zeitverläufe (Schweben) des  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstromes über den Rand Abbau 1a

In der Abb. B.22 sind die maximalen Aktivitätsströme dargestellt. Es zeigt sich eine breite Variabilität des maximalen Aktivitätsstromes, die keine Häufungen erkennen lässt.



**Abb. B.22** Maximaler  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom für die einzelnen Rechenfälle (Schweben) über den Rand Abbau 1a

In der Tab. B.11 sind die errechneten Sensitivitätsmaße (STM) für die verschiedenen Schweben (siehe Tab. B.3) in Bezug auf die Ergebnisstichprobe des maximalen  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstromes zusammengefasst.

Die STM variieren zwischen 0 und 0,715. Für alle STM wird die Schweben 2 (im Zentralteil zwischen der 2. und 3. Sohle) als die am besten mit der Ergebnisstichprobe korreliert ermittelt. Die berechneten Bestimmtheitsmaße  $R^2$  zeigen jedoch nur geringe (0,14 für Pearson-Korrelation) bis mittlere Werte (0,52 für Spearman-Korrelation) an. Dies bedeutet, dass nur ein geringer bis mittlerer Anteil der Varianz der Ergebnisstichprobe erklärt werden kann.

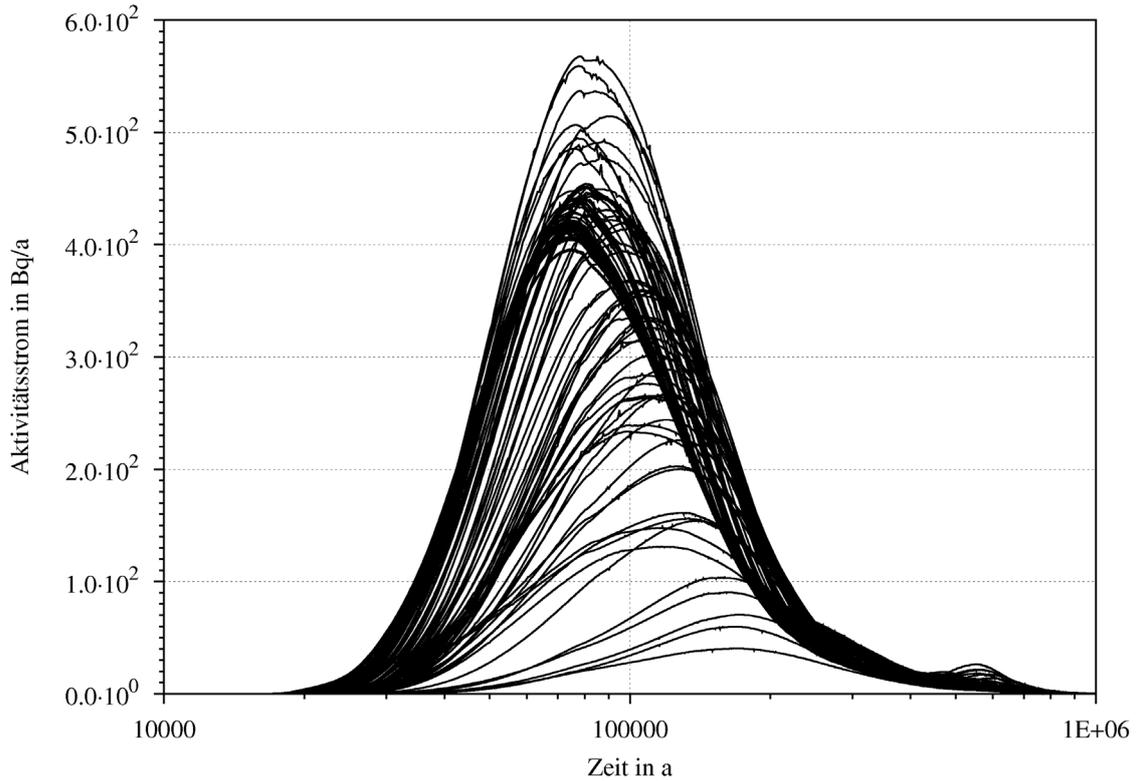
**Tab. B.11** Sensitivitätsmaße für die verschiedenen Parameter für den maximalen <sup>14</sup>C-Aktivitätsstrom über den Rand Abbau 1a

Die Parameternummern entsprechen denen in Tab. B.2. Die Rangfolge der Parameter ergibt sich aus der Sortierung der absoluten Sensitivitätsmaße.

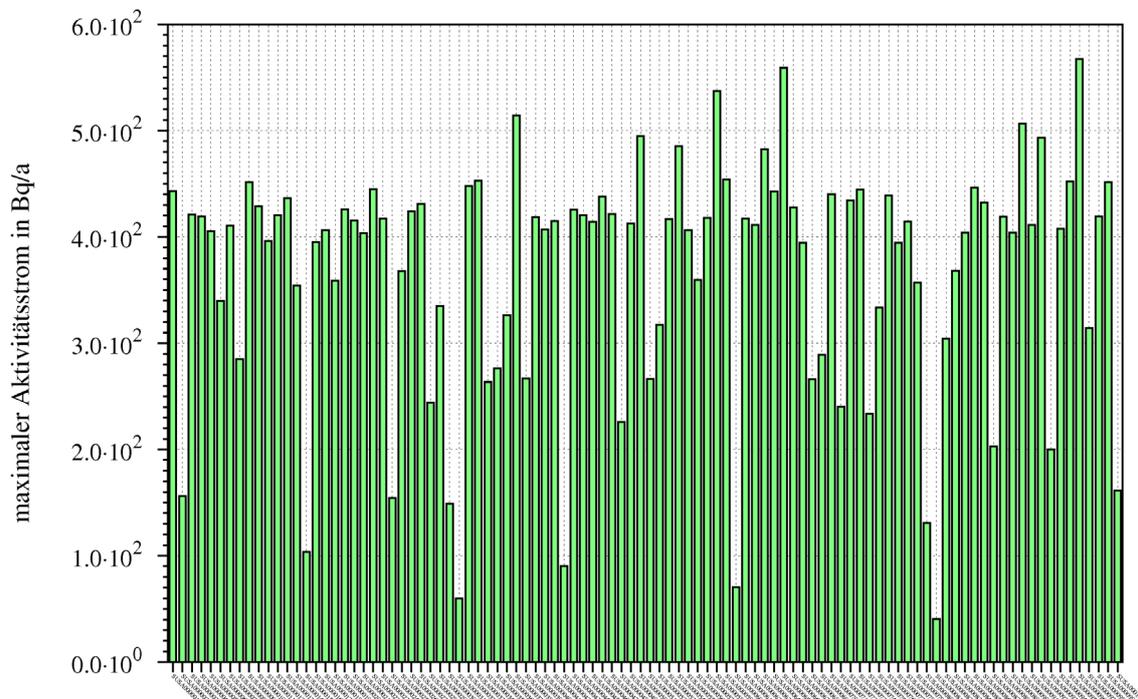
Sensitivitätsmaß	Sensitivitätsmaße der Parameter-Rangfolge										Parameter-Rangfolge	R <sup>2</sup>
OCC	0,21	0,15	0,13	-0,13	-0,11	-0,10	-0,06	-0,05	-0,04	-0,004	2-10-1-9-4-5-7-6-8-3	0,13584
PCC	0,21	0,18	-0,17	0,16	-0,12	-0,08	-0,07	0,03	0,01	-0,004	2-1-9-10-5-4-7-3-8-6	
SCC	0,20	-0,17	0,17	0,16	-0,12	-0,08	-0,07	0,03	0,01	-0,003	2-9-1-10-5-4-7-3-8-6	
OQM	0,36	0,20	-0,16	0,12	0,12	0,08	-0,08	-0,08	0,04	0,000	2-4-9-3-6-1-8-7-5-10	0,23805
PQM	0,39	0,20	-0,16	0,14	0,11	0,09	0,07	-0,04	-0,04	-0,009	2-4-9-6-3-5-1-8-7-10	
SQM	0,38	0,19	-0,14	0,13	0,10	0,08	0,06	-0,04	-0,03	-0,008	2-4-9-6-3-5-1-8-7-10	
OKC	0,43	0,17	-0,16	0,15	0,10	-0,08	-0,06	-0,05	0,04	0,031	2-1-9-3-4-7-5-8-6-10	0,27866
PKC	0,46	0,20	0,20	-0,12	0,07	0,05	-0,03	-0,03	0,02	0,008	2-3-1-9-6-4-7-5-10-8	
SKC	0,45	0,18	0,18	-0,10	0,06	0,05	-0,03	-0,03	0,02	0,007	2-3-1-9-6-4-7-5-10-8	
OSC	0,57	-0,24	0,23	0,21	0,12	-0,11	-0,08	-0,07	0,06	0,050	2-9-1-3-4-7-5-8-10-6	0,5256
PSC	0,66	0,37	0,34	0,13	-0,13	0,08	0,07	-0,02	-0,02	0,004	2-3-1-6-9-8-10-5-7-4	
SSC	0,65	0,30	0,27	-0,10	0,10	0,06	0,05	-0,02	-0,01	0,003	2-3-1-9-6-8-10-5-7-4	
CR	0,70	0,48	0,41	0,41	0,38	0,37	0,28	0,26	0,26	0,239	2-3-1-4-8-9-5-7-10-6	
CRR	0,71	0,45	0,41	0,40	0,38	0,37	0,29	0,28	0,24	0,230	2-3-4-1-8-9-5-7-10-6	

### **B.6.1.2 <sup>59</sup>Ni-Aktivitätsstrom über den Rand Abbau 1a**

Wie Abb. B.23 zeigt, liegen die maximalen <sup>59</sup>Ni-Aktivitätsströme zwischen 40 Bq/a bis 570 Bq/a in einem Zeitraum zwischen 72.900 und 172.700 Jahren. Abb. B.24 zeigt die maximalen <sup>59</sup>Ni-Aktivitätsströme im Säulendiagramm.



**Abb. B.23** Unterschiedliche Zeitverläufe des  $^{59}\text{Ni}$ -Aktivitätsstroms über den Rand Abbau 1a bei Variation der Schwebenpermeabilität



**Abb. B.24** Maximaler  $^{59}\text{Ni}$ -Aktivitätsstrom für die einzelnen Rechenfälle über den Rand Abbau 1a bei Variation der Schwebenpermeabilität

In Tab. B.12 sind die errechneten Sensitivitätsmaße (STM) für die verschiedenen Schweben in Bezug auf die Ergebnistichprobe des maximalen  $^{59}\text{Ni}$ -Aktivitätsstromes zusammengefasst. Die berechneten Bestimmtheitsmaße  $R^2$  zeigen nur geringe Werte von 0,11 (Blomqvist -Korrelation) bis 0,29 (Spearman-Korrelation) an, so dass die ermittelten Rangfolgen nicht weiter interpretiert werden.

**Tab. B.12** Sensitivitätsmaße für die verschiedenen Parameter für den maximalen <sup>59</sup>Ni-Aktivitätsstrom über den Rand Abbau 1a

Die Parameternummern entsprechen denen in Tab. B.2. Die Rangfolge der Parameter ergibt sich aus der Sortierung der absoluten Sensitivitätsmaße.

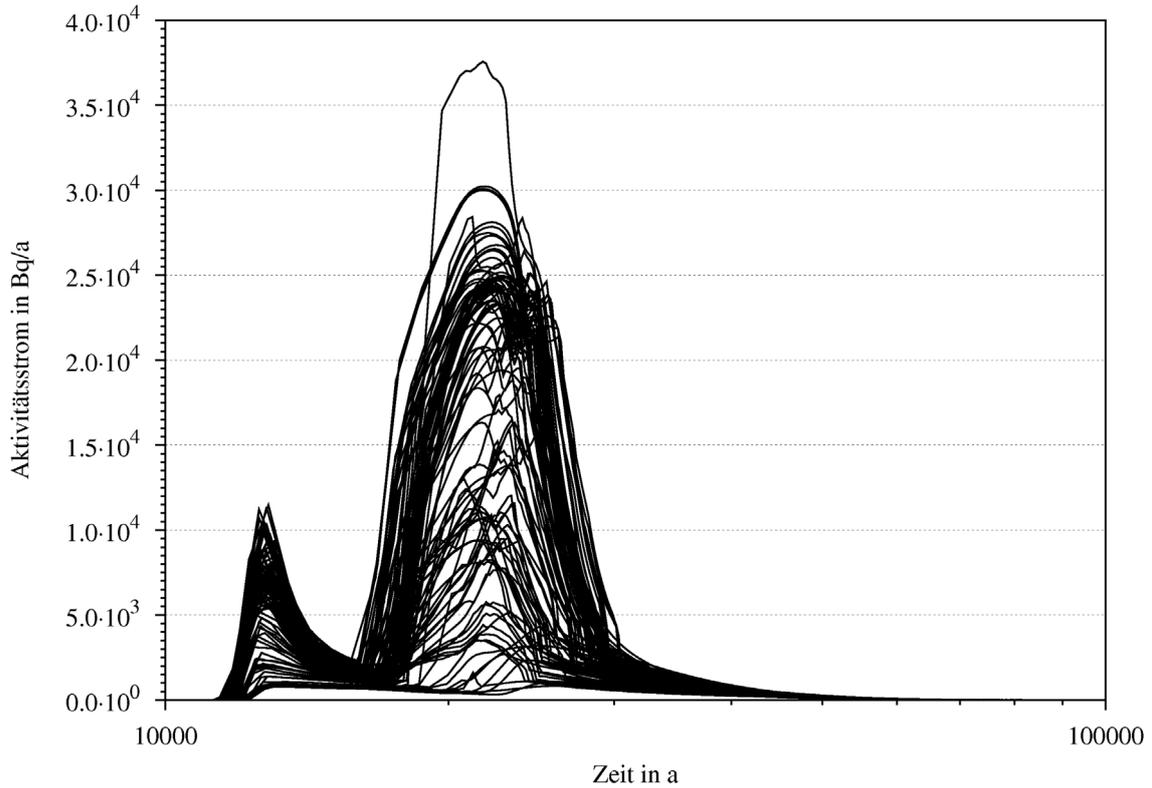
Sensitivitätsmaß	Sensitivitätsmaße der Parameter-Rangfolge										Parameter-Rangfolge	R <sup>2</sup>
OCC	-0,21	-0,19	0,18	0,10	0,10	0,05	0,02	0,01	-0,005	-0,003	5-9-1-10-2-3-8-6-4-7	0,16069
PCC	-0,25	0,24	-0,23	0,12	0,11	0,07	0,05	0,04	-0,039	-0,003	9-1-5-10-2-8-3-6-7-4	
SCC	-0,25	0,23	-0,23	0,12	0,11	0,07	0,05	0,04	-0,037	-0,002	9-1-5-10-2-8-3-6-7-4	
OQM	0,20	0,12	-0,12	0,12	0,08	0,08	-0,04	-0,04	-0,040	0,000	2-1-9-7-3-10-5-6-4-8	0,10672
PQM	0,24	0,14	0,11	0,10	0,10	0,09	-0,09	-0,07	-0,035	-0,004	2-1-7-3-10-8-9-4-6-5	
SQM	0,24	0,13	0,11	0,10	0,10	0,09	-0,09	-0,07	-0,035	-0,004	2-1-7-10-3-8-9-4-6-5	
OKC	0,22	0,20	-0,14	-0,07	0,07	-0,05	-0,03	0,02	-0,019	0,018	2-1-9-5-8-4-6-7-3-10	0,12543
PKC	0,24	0,22	0,11	-0,10	-0,10	-0,06	0,03	0,03	0,019	-0,002	2-1-8-9-4-5-7-10-3-6	
SKC	0,24	0,22	0,10	-0,09	-0,09	-0,06	0,03	0,02	0,019	-0,002	2-1-8-9-4-5-7-10-3-6	
OSC	0,32	0,30	-0,22	-0,11	0,11	-0,05	-0,05	0,04	-0,028	0,026	2-1-9-5-8-6-4-7-3-10	0,28911
PSC	0,38	0,37	0,22	-0,18	-0,11	0,09	-0,09	0,07	0,051	0,002	2-1-8-4-9-3-5-10-7-6	
SSC	0,37	0,36	0,21	-0,16	-0,10	0,09	-0,08	0,06	0,045	0,002	2-1-8-4-9-3-5-10-7-6	
CR	0,74	0,55	0,39	0,37	0,36	0,28	0,27	0,22	0,205	0,170	1-2-9-5-8-3-10-4-7-6	
CRR	0,58	0,54	0,39	0,37	0,35	0,27	0,26	0,24	0,223	0,214	1-2-5-8-9-7-10-6-4-3	

### **B.6.1.3 $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom über den Rand Abbaustrecke 5**

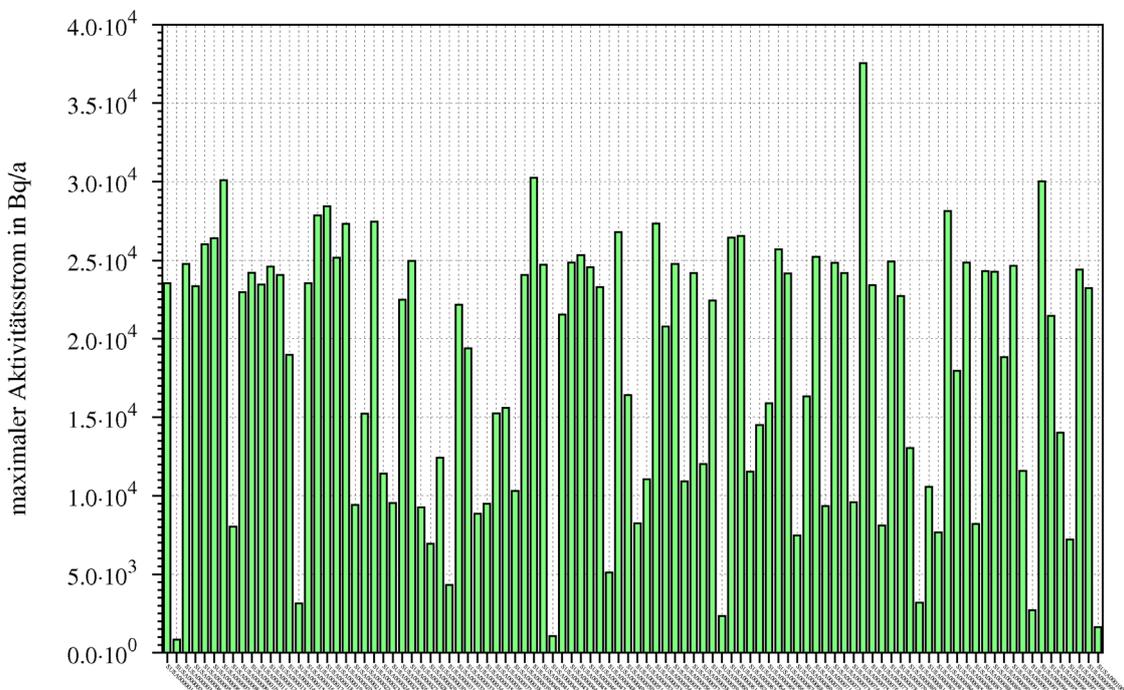
Für einen Stichprobenumfang von 100 Modellläufen liegen mindestens 95 % der Wahrscheinlichkeitsverteilung mit einer Aussagesicherheit von 99 % unterhalb eines  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstromes von 37.600 Bq/a.

Die Abb. B.25 zeigt die  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsströme über den Rand Abbaustrecke 5 für die erzeugten Rechenfälle, die zwei Maxima anzeigen, bei ca. 13.000 Jahren und bei ca. 23.000 Jahren. Die  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsströme variieren insgesamt zwischen 835 Bq/a bis 37.600 Bq/a.

In der Abb. B.26 ist die Streuung der Ergebnisstichprobe für die Maxima der zweiten Austragsmaxima (siehe Abb. B.25) dargestellt.



**Abb. B.25** Unterschiedliche Zeitverläufe des  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstroms über den Rand Abbaustrecke 5 bei Variation der Schwebenpermeabilität



**Abb. B.26** Maximaler  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom für die einzelnen Rechenfälle über den Rand Abbaustrecke 5 bei Variation der Schwebenpermeabilität

In der Tab. B.13 sind die errechneten Sensitivitätsmaße (STM) für die Permeabilität der verschiedenen Schweben in Bezug auf die Ergebnisstichprobe des maximalen  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstromes zusammengefasst.

Die berechneten Bestimmtheitsmaße  $R^2$  zeigen geringe Werte von 0,09 (Pearson - Korrelation) bis 0,41 (Spearman-Korrelation) an. Dies bedeutet, dass nur ein geringer Anteil der Varianz der Ergebnisstichprobe erklärt werden kann. Tendenziell zeigt sich jedoch Schweben 2 als am stärksten mit der Ergebnisstichprobe korreliert.

**Tab. B.13** Sensitivitätsmaße für die verschiedenen Parameter für den maximalen <sup>14</sup>C-Aktivitätsstrom über den Rand Abbaustrecke 5

Die Parameternummern entsprechen denen in Tab. B.2. Die Rangfolge der Parameter ergibt sich aus der Sortierung der absoluten Sensitivitätsmaße.

Sensitivitätsmaß	Sensitivitätsmaße der Parameter-Rangfolge										Parameter-Rangfolge	R <sup>2</sup>
OCC	0,168	0,119	-0,109	0,095	-0,094	0,074	-0,069	-0,068	-0,019	-0,004	10-1-4-2-9-3-5-6-8-7	0,096645
PCC	0,193	0,157	0,124	-0,100	-0,091	0,086	-0,078	-0,062	0,044	-0,016	10-1-3-9-4-2-5-6-8-7	
SCC	0,196	0,155	0,124	-0,100	-0,089	0,086	-0,077	-0,062	0,044	-0,016	10-1-3-9-4-2-5-6-8-7	
OQM	0,320	0,200	0,200	-0,120	0,120	-0,080	-0,080	0,040	0,000	0,000	2-4-3-9-6-8-7-1-5-10	0,21414
PQM	0,345	0,199	0,195	0,137	-0,101	0,054	-0,041	-0,029	0,020	-0,009	2-4-3-6-9-5-8-7-1-10	
SQM	0,335	0,187	0,184	0,127	-0,095	0,049	-0,039	-0,027	0,018	-0,009	2-4-3-6-9-5-8-7-1-10	
OKC	0,294	0,217	0,167	-0,139	-0,062	0,050	0,037	-0,013	0,013	-0,006	2-3-1-9-8-4-6-7-10-5	0,19163
PKC	0,343	0,248	0,185	-0,077	0,050	0,025	0,019	0,005	-0,004	0,000	2-3-1-9-6-7-5-10-8-4	
SKC	0,336	0,239	0,175	-0,072	0,046	0,023	0,017	0,005	-0,004	0,000	2-3-1-9-6-7-5-10-8-4	
OSC	0,420	0,301	0,234	-0,209	-0,103	0,065	0,064	0,014	-0,013	-0,008	2-3-1-9-8-6-4-10-7-5	0,41123
PSC	0,549	0,405	0,311	0,112	0,092	-0,068	-0,058	0,051	0,042	0,008	2-3-1-6-7-9-4-5-8-10	
SSC	0,533	0,377	0,274	0,090	0,074	-0,057	-0,047	0,040	0,036	0,007	2-3-1-6-7-9-4-5-8-10	
CR	0,624	0,557	0,473	0,381	0,349	0,344	0,323	0,251	0,199	0,194	1-2-3-8-9-4-10-6-5-7	
CRR	0,568	0,549	0,456	0,374	0,358	0,355	0,312	0,272	0,184	0,181	2-1-3-8-9-4-10-6-7-5	

#### **B.6.1.4 $^{59}\text{Ni}$ -Aktivitätsstrom über den Rand Abbaustrecke 5**

Der  $^{59}\text{Ni}$ -Aktivitätsstrom über den Rand Abbaustrecke 5 ist so gering (0,7 Bq/a), dass er vernachlässigt werden kann. Deswegen wird für die Abbaustrecke 5 keine Sensitivitätsanalyse für den  $^{59}\text{Ni}$ -Aktivitätsstrom durchgeführt.

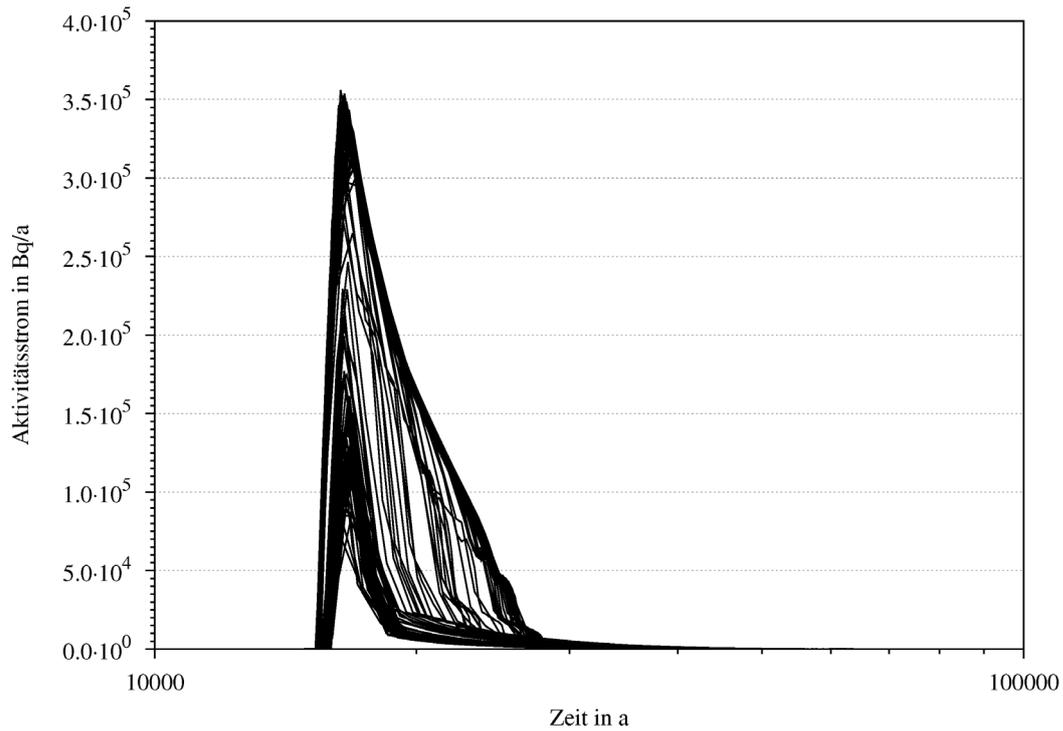
#### **B.6.2 Variation der Permeabilität der vertikalen Verbindungen**

Als Grundlage der probabilistischen Rechenfälle für die vertikalen Verbindungen gelten die gleichen Annahmen wie für die Schweben (siehe Kap.B.6). Die  $^{59}\text{Ni}$ -Aktivitätsströme ist so gering, dass auf eine Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse für  $^{59}\text{Ni}$  verzichtet wird. Im Folgenden wird nur der Einfluss der Variation der Permeabilität der vertikalen Verbindungen auf den  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom untersucht.

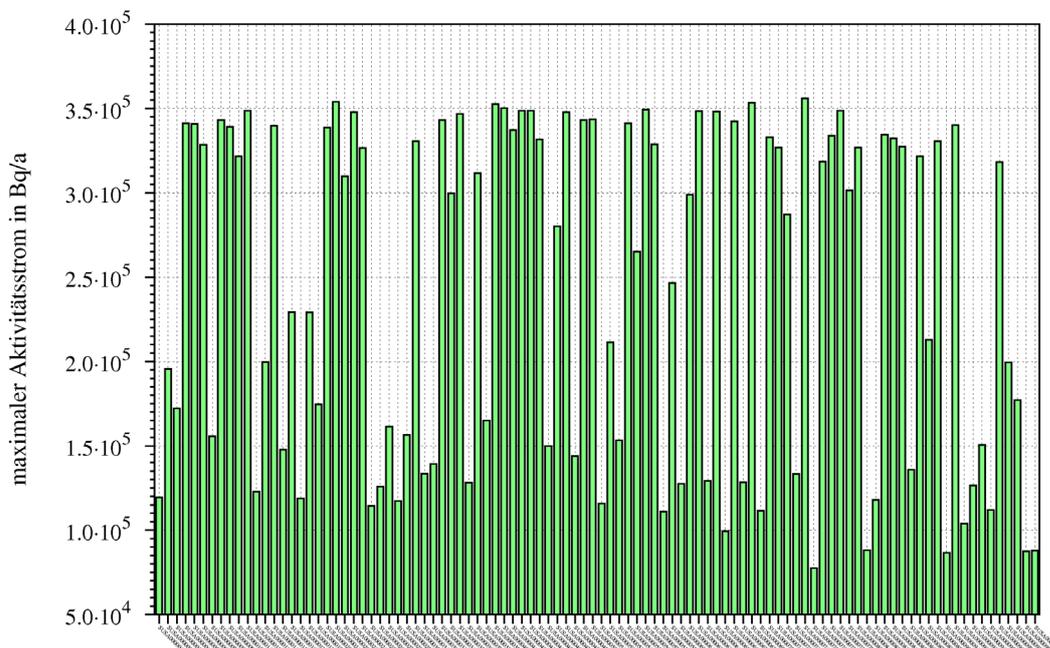
#### **$^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom über den Rand Abbau 1a**

Für einen Stichprobenumfang von 100 Modellläufen liegen mindestens 95 % der Wahrscheinlichkeitsverteilung mit einer Aussagesicherheit von 99 % unterhalb eines  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstromes von 356.000 Bq/a.

Abb. B.27 zeigt die  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsströme über den Rand Abbau 1a. Die Maxima des  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstromes variieren zwischen 77.400 Bq/a und 356.000 Bq/a in einem Zeitraum zwischen 16.200 Jahren und 17.000 Jahren (Mittelwert: 16.600 Jahre). Abb. B.28 zeigt eine breite Streuung des maximalen Aktivitätsstromes an.



**Abb. B.27** Zeitverläufe des  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstromes der probabilistischen Rechnungen (vertikale Verbindungen) über den Rand Abbau 1a



**Abb. B.28** Maximaler  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom für die einzelnen Rechenfälle (vertikale Verbindungen) über den Rand Abbau 1a

In der Tab. B.14 sind die errechneten Sensitivitätsmaße (STM) für die Permeabilitäten der 34 vertikalen Verbindungen (siehe Abb. B.2) zusammengefasst. Die berechneten

Bestimmtheitsmaße  $R^2$  zeigen geringe bis hohe Werte von 0,39 für Kendall-Korrelation) bis 1 für Blomqvist-Korrelation) an. Dies bedeutet, dass ein geringer bis hoher Anteil der Varianz der Ergebnisstichprobe erklärt werden kann.

Die STM variieren absolut zwischen 0 und 1. Für alle STM wird die Permeabilität der vertikalen Verbindung 34 (zwischen dem Nordfeld und dem Rand Abbaustrecke 5) als die am besten mit der Ergebnisstichprobe korreliert ermittelt. Die Positionen in der Rangfolge ab der Position 2 wechseln sich für die unterschiedlichen Methoden ab.

Tendenziell steigt die Korrelation der Ergebnisstichprobe mit der Nummer der vertikalen Verbindung. Die Permeabilitäten der vertikalen Verbindungen aus dem Südfeld sind sehr schlecht mit der Ergebnisstichprobe korreliert. Für die STM der vertikalen Verbindungen im Bereich des Randes Abbau 1a ist kein klarer Trend in der Rangfolge der unterschiedlichen Korrelationsmaße zu erkennen.

**Tab. B.14** Sensitivitätsmaße für die verschiedenen Parameter für den maximalen <sup>14</sup>C-Aktivitätsstrom über den Rand Abbau 1a

Die Parameternummern entsprechen denen in Tab. B.2. Die Rangfolge der Parameter ergibt sich aus der Sortierung der absoluten Sensitivitätsmaße.

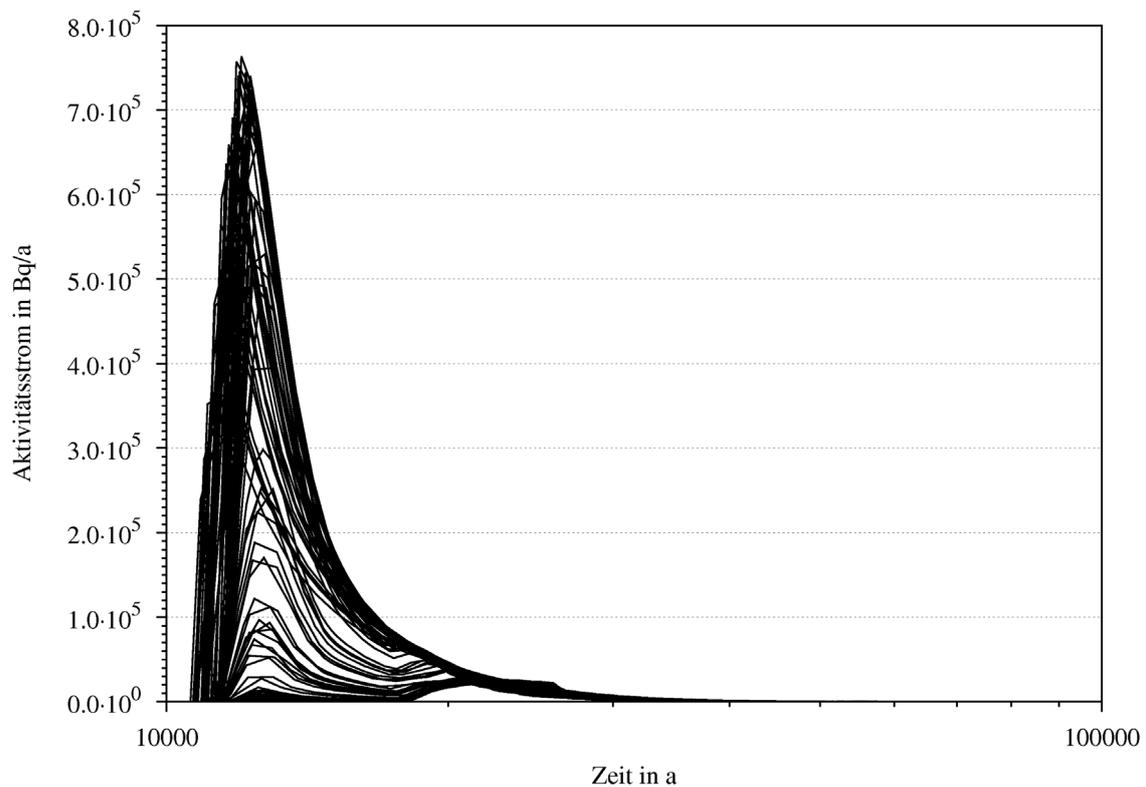
Nummer	OCC	Rangfolge	PCC	Rangfolge	SCC	Rangfolge	OQM	Rangfolge	PQM	Rangfolge	SQM	Rangfolge	OKC	Rangfolge
1	-0.65	34	-0.55	34	-0.57	34	-1	34	-1	34	-1.00E+00	34	-0.59	34
2	-0.22	21	-0.22	21	-0.19	20	-0.2	30	0	33	4.47E-08	6	-0.18	20
3	0.21	19	-0.21	20	-0.18	21	0.2	26	0	32	-4.47E-08	26	0.11	25
4	0.18	24	0.16	18	0.13	18	-0.16	20	0	31	3.73E-08	33	0.10	33
5	0.18	31	-0.14	30	0.12	19	-0.16	24	0	30	2.98E-08	12	0.10	2
6	-0.16	27	0.14	31	-0.12	30	0.12	14	0	29	-2.98E-08	25	-0.09	27
7	-0.16	1	0.14	17	0.12	31	-0.12	32	0	28	-2.61E-08	21	-0.09	21
8	0.15	29	0.14	19	0.11	24	0.12	25	0	27	-2.24E-08	9	0.08	26
9	-0.14	20	0.14	24	0.10	17	0.12	15	0	26	2.05E-08	24	0.08	17
10	0.14	16	-0.13	22	-0.09	22	-0.08	27	0	25	1.86E-08	29	0.07	19
11	0.12	6	-0.11	27	0.09	6	0.08	29	0	24	1.86E-08	30	-0.07	30
12	-0.11	3	0.10	6	-0.08	27	0.08	12	0	23	-1.86E-08	31	0.06	15
13	-0.11	30	0.10	16	0.08	16	0.08	19	0	22	-1.86E-08	18	0.06	29
14	0.11	2	-0.08	5	-0.07	5	-0.08	21	0	21	-1.49E-08	19	0.05	16
15	0.10	25	0.08	25	0.06	13	0.08	2	0	20	-1.49E-08	23	0.05	18
16	0.09	18	0.08	13	0.06	25	0.08	17	0	19	-1.49E-08	5	-0.04	10
17	-0.09	22	-0.08	33	-0.06	2	0.08	9	0	18	-1.49E-08	4	0.04	24
18	0.09	23	-0.07	8	-0.06	8	0.08	33	0	17	-1.49E-08	17	0.04	9
19	-0.08	8	-0.07	2	-0.06	33	0.04	22	0	16	1.49E-08	16	-0.04	1
20	-0.07	5	0.06	28	0.05	11	-0.04	23	0	15	-1.49E-08	32	0.04	6
21	-0.06	11	0.05	11	0.04	28	-0.04	8	0	14	8.38E-09	3	0.03	4
22	0.05	28	0.05	23	0.04	23	0.04	5	0	13	-8.38E-09	28	-0.03	3
23	0.05	33	0.04	7	0.04	7	0.04	6	0	12	-7.45E-09	20	0.03	5
24	-0.04	14	-0.04	12	-0.03	12	-0.04	7	0	11	3.73E-09	11	0.03	8
25	-0.04	7	-0.04	9	-0.03	1	-0.04	28	0	10	3.73E-09	1	-0.03	13
26	0.03	32	-0.04	1	-0.03	9	0	18	0	9	3.73E-09	14	-0.02	14
27	0.03	13	-0.03	29	-0.02	29	0	16	0	8	3.26E-09	8	0.02	28
28	0.03	12	-0.03	15	-0.02	15	0	10	0	7	1.86E-09	13	-0.02	11
29	-0.02	26	-0.01	14	-0.01	14	0	11	0	6	1.86E-09	7	0.02	23
30	-0.02	10	-0.01	26	-0.01	26	0	13	0	5	0.00E+00	10	-0.01	7
31	0.01	17	0.01	10	0.01	10	0	4	0	4	0.00E+00	22	0.01	12
32	0.01	15	-0.01	32	-0.01	32	0	3	0	3	0.00E+00	27	0.00	31
33	-0.01	9	-0.01	3	0.00	3	0	31	0	2	0.00E+00	2	0.00	22
34	0.01	4	0.00	4	0.00	4	0	1	0	1	0.00E+00	15	0.00	32

Nummer	PKC	Rangfolge	SKC	Rangfolge	OSC	Rangfolge	PSC	Rangfolge	SSC	Rangfolge	CR	Rangfolge	CRR	Rangfolge
1	-0.55	34	-0.561	34	-0.803	34	-0.794	34	-0.847	34	0.98	34	0.94	34
2	-0.10	20	-0.085	20	-0.262	20	-0.214	3	-0.143	3	0.45	15	0.47	15
3	0.07	19	0.061	19	0.164	25	0.211	23	0.140	31	0.42	19	0.44	8
4	0.06	25	-0.054	21	0.149	33	0.193	31	0.136	23	0.42	11	0.43	11
5	-0.06	21	0.053	25	-0.148	27	-0.173	14	0.113	19	0.40	8	0.41	19
6	-0.06	30	-0.047	30	-0.140	21	0.172	8	0.108	8	0.39	16	0.38	28
7	0.05	23	0.046	23	0.138	26	0.165	19	-0.107	6	0.38	21	0.37	17
8	-0.05	27	-0.046	27	0.136	2	-0.159	6	-0.105	14	0.38	25	0.37	21
9	-0.05	1	-0.043	1	0.124	17	-0.147	1	-0.095	7	0.36	5	0.36	16
10	-0.05	14	-0.041	14	0.109	19	-0.147	7	-0.089	1	0.35	28	0.36	25
11	-0.05	12	-0.038	12	-0.098	30	-0.133	21	-0.084	29	0.34	17	0.33	29
12	0.04	8	0.037	8	0.091	15	-0.132	12	-0.083	21	0.33	20	0.32	7
13	0.04	5	0.036	5	0.090	29	-0.129	29	-0.083	12	0.32	26	0.32	9
14	0.04	2	0.035	2	0.082	16	0.091	5	0.054	18	0.32	3	0.32	5
15	0.04	18	0.034	18	-0.068	1	0.088	18	0.054	5	0.31	7	0.32	24
16	0.04	4	-0.031	3	0.067	18	-0.085	27	-0.054	27	0.31	29	0.32	20
17	-0.04	3	0.031	4	0.061	9	0.077	17	0.048	17	0.31	24	0.31	13
18	0.03	31	0.029	31	-0.061	10	-0.077	15	-0.047	15	0.31	31	0.30	26
19	0.03	17	0.027	17	-0.058	3	0.070	28	-0.043	26	0.30	13	0.30	3
20	0.03	33	0.026	33	0.056	24	-0.069	26	-0.043	30	0.29	32	0.29	31
21	0.03	28	0.025	28	0.055	6	-0.067	30	0.042	28	0.29	30	0.29	30
22	-0.03	13	-0.021	13	0.054	8	0.065	11	0.040	11	0.28	9	0.27	27
23	0.02	11	0.020	11	0.050	4	-0.061	13	-0.035	13	0.28	27	0.27	33
24	0.02	24	0.018	24	0.043	5	0.049	4	0.029	4	0.28	33	0.26	22
25	0.02	9	0.018	9	-0.040	13	-0.041	2	-0.025	2	0.27	22	0.25	1
26	-0.01	7	-0.012	7	-0.033	14	-0.034	22	-0.020	22	0.25	23	0.25	32
27	0.01	15	0.010	15	0.032	23	0.030	32	0.017	32	0.24	4	0.24	18
28	0.01	26	0.009	26	-0.031	11	0.022	10	0.014	10	0.24	18	0.23	2
29	-0.01	32	-0.009	29	0.025	28	0.021	16	0.014	16	0.23	2	0.23	23
30	-0.01	29	-0.009	32	-0.021	7	0.021	24	0.012	24	0.22	14	0.22	14
31	-0.01	10	-0.004	10	0.012	12	0.017	9	0.010	9	0.21	1	0.22	4
32	0.00	6	-0.003	6	0.010	31	0.011	33	0.006	33	0.20	6	0.21	6
33	0.00	16	-0.001	16	-0.010	22	0.007	20	0.005	20	0.20	10	0.20	12
34	0.00	22	0.000	22	0.000	32	0.007	25	0.004	25	0.19	12	0.18	10

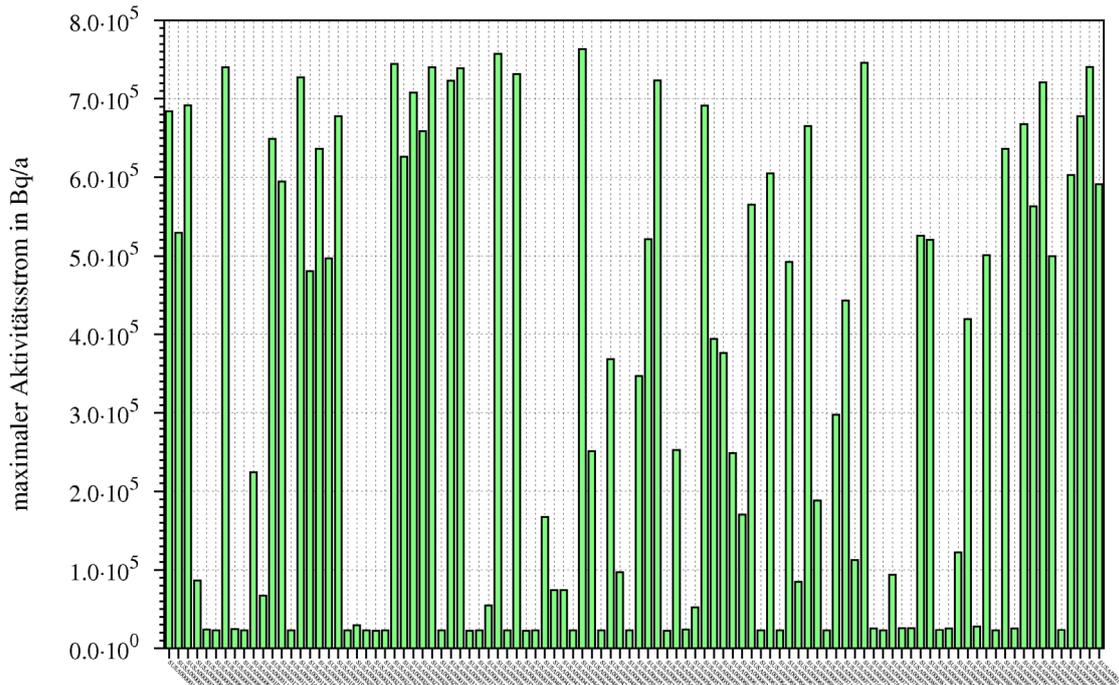
### **<sup>14</sup>C-Aktivitätsstrom über den Rand Abbaustrecke 5**

Für einen Stichprobenumfang von 100 Modellläufen liegen mindestens 95 % der Wahrscheinlichkeitsverteilung mit einer Aussagesicherheit von 99 % unterhalb eines <sup>14</sup>C-Aktivitätsstromes von 763.433 Bq/a.

Die Abb. B.29 zeigt, dass das Hauptmaximum zwischen 11.200 Jahren und 13.000 Jahren auftritt (27.500 bis 763.433 Bq/a). Manche Rechnungen zeigen ein zweites Maximum zwischen 21.890 Jahren und 23.850 Jahren (22.400 Bq/a bis 26.000 Bq/a). Wie Abb. B.30 zeigt, ist die Streuung des maximalen <sup>14</sup>C-Aktivitätsstromes sehr groß. In dem Histogramm werden nochmal die zwei Austragstrends der maximalen Aktivitätsströme deutlich.



**Abb. B.29** <sup>14</sup>C-Aktivitätsströme über den Rand Abbaustrecke 5 bei Variation der Permeabilität der vertikalen Verbindungen



**Abb. B.30** Maximaler  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom für die einzelnen Rechenfälle (vertikale Verbindungen) über den Rand Abbaustrecke 5

In der Tab. B.15 sind die errechneten Sensitivitätsmaße (STM) für die Permeabilitäten der 34 vertikalen Verbindungen zusammengefasst. Die berechneten Bestimmtheitsmaße  $R^2$  zeigen geringe bis hohe Werte von 0,38 für Kendall-Korrelation) bis 1 für Blomqvist-Korrelation) an. Dies bedeutet, dass ein geringer bis hoher Anteil der Varianz der Ergebnisstichprobe erklärt werden kann.

Für alle STM wird die Permeabilität der vertikalen Verbindung 34 (zwischen dem Nordfeld und dem Rand Abbaustrecke 5) als die am besten mit der Ergebnisstichprobe korreliert ermittelt. Für alle anderen vertikalen Verbindungen ist kein klarer Trend in der Rangfolge zu erkennen.

**Tab. B.15** Teil 1/2: Sensitivitätsmaße für die verschiedenen Parameter für den maximalen <sup>14</sup>C-Aktivitätsstrom über den Rand Abbaustrecke 5

Die Parameternummern entsprechen denen in Tab. B.2. Die Rangfolge der Parameter ergibt sich aus der Sortierung der absoluten Sensitivitätsmaße

Nummer	OCC	Rangfolge	PCC	Rangfolge	SCC	Rangfolge	OQM	Rangfolge	PQM	Rangfolge	SQM	Rangfolge	OKC	Rangfolge
1	0.386	34	0.283	34	0.294	34	1	34	1	34	1.00E+00	34	0.578	34
2	-0.243	19	0.244	21	0.244	20	0.2	30	0	33	-4.47E-08	6	0.198	20
3	0.234	20	0.240	20	0.234	21	-0.2	26	0	32	4.47E-08	26	0.088	27
4	0.199	21	0.180	30	-0.176	19	0.16	20	0	31	-3.73E-08	33	-0.085	26
5	-0.177	31	-0.172	18	0.175	30	0.16	24	0	30	-2.98E-08	12	0.077	3
6	-0.149	24	-0.168	19	-0.159	18	-0.12	14	0	29	2.98E-08	25	-0.067	17
7	0.130	27	-0.153	17	-0.133	17	0.12	32	0	28	2.61E-08	21	-0.066	1
8	-0.124	18	0.147	33	-0.132	24	-0.12	25	0	27	2.24E-08	9	-0.062	6
9	0.123	3	-0.144	24	0.128	33	-0.12	15	0	26	-2.05E-08	24	-0.060	25
10	-0.114	16	-0.131	31	-0.127	31	0.08	27	0	25	-1.86E-08	29	0.057	30
11	-0.113	12	0.126	5	0.116	5	-0.08	29	0	24	-1.86E-08	30	-0.057	7
12	0.097	30	0.112	8	-0.107	6	-0.08	12	0	23	1.86E-08	31	0.051	10
13	-0.095	29	0.111	22	0.104	8	-0.08	19	0	22	1.86E-08	18	-0.050	29
14	-0.094	6	-0.108	16	0.103	2	0.08	21	0	21	1.49E-08	19	-0.041	9
15	-0.086	23	-0.108	6	-0.098	16	-0.08	2	0	20	1.49E-08	23	0.038	28
16	0.085	1	0.107	2	0.095	22	-0.08	17	0	19	1.49E-08	5	0.037	24
17	-0.079	25	0.095	27	-0.089	7	-0.08	9	0	18	1.49E-08	4	0.036	21
18	-0.076	13	-0.090	7	0.084	27	-0.08	33	0	17	1.49E-08	17	-0.033	19
19	0.071	33	-0.081	25	-0.073	25	-0.04	22	0	16	-1.49E-08	16	-0.029	31
20	-0.069	17	0.069	29	0.065	29	0.04	23	0	15	1.49E-08	32	0.024	13
21	0.063	22	-0.064	12	-0.058	11	0.04	8	0	14	-8.38E-09	3	-0.024	16
22	0.063	14	-0.062	13	-0.057	13	-0.04	5	0	13	8.38E-09	28	-0.023	2
23	0.060	11	0.062	15	0.056	15	-0.04	6	0	12	7.45E-09	20	-0.021	11
24	0.060	5	-0.058	11	-0.055	12	0.04	7	0	11	-3.73E-09	11	-0.020	4
25	-0.056	2	-0.052	23	-0.050	23	0.04	28	0	10	-3.73E-09	1	0.018	15
26	-0.049	32	0.051	26	0.047	26	0	18	0	9	-3.73E-09	14	0.013	32
27	0.045	10	0.038	10	0.033	10	0	16	0	8	-3.26E-09	8	0.007	8
28	0.044	8	0.035	3	0.033	3	0	10	0	7	-1.86E-09	13	-0.006	18
29	-0.040	4	-0.026	28	0.025	1	0	11	0	6	-1.86E-09	7	0.003	14
30	-0.034	7	0.026	1	-0.023	28	0	13	0	5	0.00E+00	10	0.003	23
31	0.022	15	0.004	9	0.003	9	0	4	0	4	0.00E+00	22	0.001	33
32	0.019	9	-0.004	14	-0.003	14	0	3	0	3	0.00E+00	27	-0.001	12
33	-0.008	28	-0.002	4	-0.002	4	0	31	0	2	0.00E+00	2	0.001	22
34	-0.002	26	0.000	32	0.000	32	0	1	0	1	0.00E+00	15	0.000	5

Nummer	PKC	Rangfolge	SKC	Rangfolge	OSC	Rangfolge	PSC	Rangfolge	SSC	Rangfolge	CR	Rangfolge	CRR	Rangfolge
1	0.56	34	0.568	34	0.808	34	0.85	34	0.913	34	0.98	34	0.96	34
2	0.13	20	0.117	20	0.290	20	0.34	3	0.201	3	0.45	15	0.41	15
3	-0.09	1	-0.080	1	0.134	27	0.28	33	-0.149	1	0.40	16	0.39	19
4	0.09	33	0.074	33	0.129	3	-0.28	1	0.147	33	0.40	19	0.39	16
5	-0.08	11	-0.072	11	-0.115	26	-0.26	11	-0.146	31	0.39	5	0.35	20
6	0.08	3	0.065	3	-0.113	17	-0.23	31	-0.140	11	0.38	21	0.35	25
7	0.07	24	0.056	24	-0.108	1	0.21	14	-0.113	17	0.37	20	0.35	11
8	-0.05	17	0.044	30	-0.099	25	-0.21	17	0.112	6	0.36	11	0.34	5
9	0.05	30	-0.043	17	-0.090	6	0.19	6	0.110	14	0.35	25	0.34	21
10	-0.05	7	-0.043	31	-0.089	7	0.19	15	0.100	15	0.33	33	0.33	30
11	0.05	15	-0.042	7	0.075	30	0.18	2	0.099	2	0.32	8	0.33	3
12	-0.05	31	0.042	15	0.075	10	0.18	24	0.095	24	0.32	17	0.33	8
13	0.05	12	0.041	12	-0.073	29	0.17	26	0.093	26	0.32	22	0.32	28
14	0.04	27	0.037	27	-0.067	9	-0.16	23	-0.089	23	0.31	30	0.32	29
15	0.04	28	0.037	28	0.064	28	0.15	28	0.077	28	0.31	29	0.32	9
16	0.04	14	0.033	14	-0.057	19	0.14	4	0.074	12	0.30	13	0.31	13
17	0.04	13	0.029	13	0.053	24	0.14	12	0.070	4	0.30	28	0.31	22
18	-0.03	9	-0.028	9	-0.047	31	0.11	13	-0.058	18	0.30	3	0.30	6
19	-0.03	23	-0.026	23	0.042	21	-0.11	18	0.057	25	0.29	24	0.30	33
20	-0.03	19	-0.025	19	-0.035	2	0.11	25	-0.057	19	0.28	26	0.29	32
21	0.02	2	0.019	2	-0.031	16	-0.10	19	0.055	13	0.28	31	0.29	4
22	-0.02	18	-0.018	18	0.030	13	-0.10	9	-0.050	21	0.28	4	0.28	7
23	0.02	10	0.016	10	-0.030	11	-0.09	21	-0.049	9	0.27	27	0.27	10
24	-0.01	25	-0.012	25	-0.023	4	-0.08	8	-0.043	8	0.26	9	0.27	24
25	-0.01	29	-0.011	29	0.023	32	0.07	30	0.039	30	0.25	7	0.27	17
26	-0.01	6	-0.009	6	0.018	15	0.06	22	0.035	20	0.25	10	0.26	27
27	0.01	5	0.008	5	0.015	33	-0.06	32	0.033	29	0.25	32	0.25	26
28	-0.01	26	-0.007	26	-0.012	18	0.06	29	0.031	22	0.24	6	0.24	1
29	0.01	4	-0.006	21	-0.011	5	0.06	20	-0.031	32	0.23	23	0.23	23
30	-0.01	21	0.006	4	-0.009	12	0.05	27	0.030	27	0.22	18	0.23	31
31	0.00	22	0.003	22	-0.006	22	0.05	5	0.027	5	0.22	14	0.23	14
32	0.00	16	-0.002	16	0.006	23	0.03	10	0.015	10	0.21	2	0.23	2
33	0.00	32	0.002	32	0.005	8	0.02	7	0.012	7	0.20	12	0.20	18
34	0.00	8	-0.001	8	0.005	14	-0.01	16	-0.007	16	0.19	1	0.19	12

## B.7 Interpretation der Sensitivitätsanalysen

### Variation der Zweiphasenflussparameter („trockene Grube“)

Im Bezugsfall „trockene Grube“ gab es keinen  $^{59}\text{Ni}$ -Austrag. Die  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsströme reagieren – unabhängig von dem betrachteten Rand – am sensitivsten auf den Parameter  $\lambda$  der van-Genuchten-Funktion (der für Strecken und Abdichtungen gleich gesetzt wurde). Allerdings wurden nur für den Austrag über den Rand Abbau 1a hohe Bestimmtheitsmaße ermittelt.

Die hohe Sensitivität des Parameters  $\lambda$  dürfte dessen Einfluss auf die Gasdurchlässigkeit der Abdichtung geschuldet sein. Verminderte Werte von  $\lambda$  vermindern den Gaseindringdruck und erleichtern ein Entweichen von  $^{14}\text{C}$ -haltigem Gas in die Restgrube.

### Variation der Zweiphasenflussparameter („mit relevantem Lösungszutritt“)

Im Bezugsfall „mit relevantem Lösungszutritt“ weist sich beim  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom der Parameter  $p_0$  der Strecken als der am stärksten mit der Ergebnisstichprobe korrelierte Parameter aus (unabhängig von dem Austragsrand). Allerdings ist diese Aussage nur für den  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom über die Abbaustrecke 5 mit hohen Bestimmtheitsmaßen verbunden. Beim Austrag über diesen Rand ist die residuale Gassättigung der relativen Permeabilitätsfunktion der am zweitbesten korrelierte Parameter.

Der große Einfluss des Strecken-Parameters  $p_0$  auf den  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom dürfte dadurch begründet sein, dass niedrige  $p_0$ -Werte die Fähigkeit des Gases erhöhen, Flüssigkeit aus den Poren des Streckenversatzes zu verdrängen.  $^{14}\text{C}$  kann dann leichter ausgetragen werden.

Beim  $^{59}\text{Ni}$ -Aktivitätsstrom ergeben sich keine belastbaren Korrelationen. Der Grund ist, dass die Variabilität des  $^{59}\text{Ni}$ -Aktivitätsstrom sehr gering ist und keiner der veränderten Parameter eine signifikante Auswirkung auf den Ausstrom hat. Es deutet sich schwach an, dass der  $^{59}\text{Ni}$ -Aktivitätsstrom am sensitivsten auf die residuale Gassättigung und den Parameter  $p_0$  der Strecken reagiert. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass eine Vergrößerung der residualen Gassättigung die Mobilität der Flüssigkeit und damit des gelösten  $^{59}\text{Ni}$  erhöht.

### **Variation der Schwebenpermeabilitäten („mit relevantem Lösungszutritt“)**

In Bezug auf den  $^{59}\text{Ni}$ -Austrag sind aufgrund geringer Bestimmtheitsmaße keine belastbaren Sensitivitätsaussagen möglich, auch hier ist die Variabilität des  $^{59}\text{Ni}$ -Aktivitätsstroms gering.

Beim  $^{14}\text{C}$ -Austrag erweist sich die Permeabilität der Schweben 2 im Zentralteil zwischen der 2. und 3. Sohle (siehe Tab. B.3) als am besten mit der Ergebnisstichprobe korreliert. Allerdings liegen hier höchstens mittlere Bestimmtheitsmaße vor.

### **Variation der Permeabilität der vertikalen Verbindungen („mit relevantem Lösungszutritt“)**

Die  $^{59}\text{Ni}$ -Aktivitätsströme waren in allen Rechenfällen so gering, dass auf eine Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse für  $^{59}\text{Ni}$  verzichtet wurde.

Der  $^{14}\text{C}$ -Aktivitätsstrom weist mit hohen Bestimmtheitsmaßen eine starke Korrelation zur Permeabilität der vertikalen Verbindung 34 zwischen dem Nordfeld und dem Rand Abbaustrecke 5 auf (siehe Abb. B.2). Dies gilt sowohl für den Austrag über den Rand Abbau 1a als auch über den Rand Abbaustrecke 5. Dies deckt sich mit der Interpretation der deterministischen Berechnungen in Kap. 3.3.2 und zeigt, dass den Grubenbereichen in der Nähe der Austragsränder eine besondere Bedeutung zukommen kann.

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

Schwertnergasse 1  
**50667 Köln**

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum

**85748 Garching b. München**

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

**10719 Berlin**

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

**38122 Braunschweig**

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

[www.grs.de](http://www.grs.de)

**ISBN 978-3-944161-80-8**