

**TOUGH2 –
Modellrechnungen zum
Umströmungsverhalten
von Streckenverschlüssen
in einem salinaren
Endlager**

TOUGH2 – Modellrechnungen zum Umströmungsverhalten von Streckenverschlüssen in einem salinaren Endlager

Gerd Frieling
Guido Bracke

April 2014

Anmerkung:

Dieser Bericht wurde im Rahmen des FE-Vorhabens 3610 R 03230 mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) erstellt.

Die Arbeiten wurden von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Die hierin geäußerten Meinungen müssen nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

GRS - 320
ISBN 978-3-939355-99-1

Deskriptoren:

Salinares Endlager, Streckenverschluss, TOUGH2-Modellierung, Umströmungsverhalten, Zweiphasenfluss

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	1
1.2	Programmbeschreibung TOUGH2.....	2
2	Modellannahmen	5
2.1	Modellgitter.....	5
2.1.1	Das TOUGH2-Modellgitter	7
2.1.2	Modellgitter für Vergleichsrechnungen.....	9
2.1.2.1	Rechteckiges Gittermodell	10
2.1.2.2	Kreisförmiges Gittermodell	10
2.1.2.3	Vereinfachtes Gittermodell	11
2.2	Modellierte Prozesse.....	11
2.2.1	Phasen und Komponenten.....	11
2.2.2	Konvergenz	12
2.2.3	Zweiphasenfluss	16
2.2.4	Viskositätskorrektur	17
2.3	Materialgebiete und Eingabeparameter	17
2.3.1	Sorelbeton.....	17
2.3.2	Salzgrusversatz.....	19
2.3.3	Gestörte Zone	21
2.3.3.1	Auflockerungszone.....	21
2.3.3.2	Kontaktzone	24
2.3.3.3	Annahmen für die gestörte Zone.....	25
2.3.4	Annahmen für die zusätzlichen Gittermodelle.....	27
2.3.5	Randbedingungen.....	27
2.4	Tabellarische Zusammenfassung	29

3	Definition der Rechenfälle	31
3.1	Basisfall	31
3.2	Gestörte Zone	31
3.3	Kapillardruck	32
3.4	Residuale Laugensättigung	32
3.5	Kompaktion	33
3.6	Zusätzliche Gittermodelle	33
3.7	Tabelle der Rechenfälle	34
4	Auswertung und Ergebnisse.....	35
4.1	Auswertung Basisfall (THMC 1)	37
4.1.1	Kompaktion	37
4.1.2	Druckverlauf	38
4.1.3	Sättigungsverlauf und Laugenfluss	40
4.2	Gestörte Zone (THMC 2 und THMC 3)	45
4.3	Kapillardruck (THMC 4 – 10).....	48
4.3.1	Kapillardruck im Salzgrus und der gestörten Zone (THMC 5 – 7).....	48
4.3.2	Kapillardruck im Sorelbeton (THMC 8 – 10).....	55
4.4	Residuale Laugensättigung (THMC 11 – 14).....	61
4.5	Kompaktion (THMC 15 – 18)	65
4.5.1	Flüssigkeitssättigung und Laugenfluss	67
4.6	Zusätzliche Gittergeometrien (THMC 19 – 21).....	72
4.6.1	Streckenkerne	73
4.6.2	Kontaktzone	75
4.6.3	Auflockerungszone.....	77
4.6.4	Laugenfluss zwischen den Schichten	78
4.6.5	Summierte Laugenmengen	80

5	Zusammenfassung	83
5.1	Summierte Laugenmengen	83
5.2	Laugendurchbruch und -fluss.....	85
5.3	Gestörte Zone	88
5.4	Kapillardruck	88
5.5	Residuale Laugensättigung.....	89
5.6	Kompaktion	89
5.7	Zusätzliche Gittergeometrien	90
6	Schlussfolgerungen.....	91
7	Ausblick	93
	Literaturverzeichnis	95
	Abbildungsverzeichnis.....	99
	Tabellenverzeichnis	103
A	Konvergenzparameter	105

1 Einleitung

Der Bau, Betrieb und Verschluss eines Endlagers für radioaktive Abfälle wird in verschiedene Zeitphasen eingeteilt. Die Endlagererstellung und die Einlagerung der Abfallgebinde werden als Betriebsphase bezeichnet. Der Zeitraum für die Errichtung der Strecken- und Schachtverschlüsse zur Abdichtung des Endlagers ist die Verschlussphase. Anschließend folgt die Nachbetriebsphase, die in eine Übergangs- und Langzeitphase unterteilt wird. In der Übergangsphase sollen technische Barrieren, wie Schacht- oder Streckenverschlüsse, den Flüssigkeitszutritt in das Endlager oder in laugengefährdete Einlagerungsbereiche verhindern bzw. verlangsamen. Die Integrität dieser Barrieren ist nur für einen begrenzten Zeitraum ausgelegt, da sie im Laufe der Zeit alterieren und damit ihre Integrität verlieren können. In der Langzeitphase soll deshalb die geologische Barriere (z. B. Steinsalz) mit kompaktiertem Salzgrusversatz den Einschluss für lange Zeiträume bis zu 1 Mio. Jahre gewährleisten.

1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Aufgrund der Druckentlastung im Konturbereich einer aufgefahrenen, unverfüllten Strecke bildet sich in der Betriebsphase eine Auflockerungszone im anstehenden Steinsalz mit streckenparallelen Klüften. Die hydraulische Fluiddurchlässigkeit kann in den Klüften, im Vergleich zu ungestörtem Steinsalz, stark erhöht sein. Zudem ist eine Kontaktzone/-fuge zwischen dem Baustoff des Streckenverschlusses und dem anstehenden Steinsalz vorhanden, in der die Durchlässigkeit ebenfalls erhöht sein kann. Diese Umläufigkeiten können die Barrierewirkung eines Streckenverschlusses beeinträchtigen und bei einem möglichen Laugenzutritt in der Übergangsphase zu sicherheitstechnischen Problemen führen. Die integrale Durchlässigkeit eines Streckenverschlusses ergibt sich aus dem Zusammenspiel der materialspezifischen hydraulischen Durchlässigkeit des Baustoffes und der Kontakt- und Auflockerungszone.

Ziel dieser Arbeit ist die Charakterisierung des Umströmungsverhaltens eines Streckenverschlusses in einem fiktiven Endlagerbergwerk im Wirtsgestein Salz. Dazu wird die Existenz von Laugen / Lösungen während der Übergangsphase postuliert. Die Modellierung soll den Einfluss der Auflockerungszone auf die Barriere-Wirkung des Verbundsystems Streckenverschluss-Steinsalz, besonders in der frühen Nachverschlussphase aufzeigen, sowie den Laugenfluss im Zusammenhang mit der Kompaktion der Auflockerungszone berücksichtigen. Die Modellierung trägt so zum Prozessverständnis

des hydraulischen Verhaltens der Auflockerungs- und Kontaktzone bei, die auf einen nicht kompaktierbaren Streckenverschluss aufläuft.

Der Zeitraum der Übergangsphase dauert so lange, bis der Salzgrusversatz soweit kompaktiert ist, dass ein advektiver Fluidfluss (Gas und Flüssigkeit) durch den Porenraum nicht mehr möglich ist. Dies kann schon nach mehreren hundert Jahren je nach Feuchtegehalt und Temperatur im Endlager der Fall sein. Der Zeitraum der Übergangsphase kann deshalb nicht scharf von der Langzeitphase abgegrenzt werden und ist ein fließender Übergang von bis zu mehreren 10.000 Jahren. Für die Modellrechnungen wird ein Zeitraum von 50.000 Jahren nach Endlagerverschluss angenommen, da dies der derzeitigen Auslegung der Schacht- und Streckenverschlüsse entspricht.

Die deterministischen Modellrechnungen werden mit dem numerischen Simulator TOUGH2 durchgeführt. Durch das Variieren der Eingabeparameter, z. B. für den Zweiphasenfluss, der Kompaktion und die Permeabilität wird die Sensitivität der Parameter auf den Laugenfluss untersucht. Am Ende des Streckenverschlusses wird der Laugendurchfluss bzw. der Zeitpunkt des Laugendurchbruchs ermittelt. Eine Validierung bzw. Kalibrierung des Modells ist mit der gegenwärtigen Datenlage nicht möglich.

1.2 Programmbeschreibung TOUGH2

Die GRS berechnet Zweiphasenströmungen in porösen Medien mit dem Programm TOUGH2 (**T**ransport of **U**nsaturated **G**roundwater and **H**eat). TOUGH2 ist ein numerischer Simulator und wurde von K. Pruess am Lawrence Berkeley Laboratory in den USA entwickelt /PRU 99/. Mit TOUGH2 kann der Wärmetransport, der Multikomponentenfluss und mehrphasige Fluide in ein-, zwei- und dreidimensionalen, anisotropen, porösen und klüftigen Materialien simuliert werden. In TOUGH2 werden die Massenerhaltungssätze für alle zu transportierenden Komponenten gekoppelt und implizit gelöst /PRU 99/. Die aktuelle Programmversion 2.0 berechnet Lösungs- und Ausfällungseffekte, mehrphasige Diffusion, Dispersion und thermische Effekte. Um die Modellierung zusätzlicher Komponenten und Phasen realisieren zu können wird das TOUGH2 Kernprogramm mit unterschiedlichen Modulen kompiliert. Diese Module werden EOS-Module (**E**quation of **S**tate) genannt.

Um Prozesse, wie den Gaseindringdruck und Wechselwirkungen zwischen der flüssigen und gasförmigen Phase zu simulieren, wird in TOUGH2 zweiphasig gerechnet. Für

die Modellierung der Zweiphasigen-Strömungsprozesse benötigt TOUGH2 relative Permeabilitäten und Kapillardrücke. Für die Modellierung dieser Effekte stellt TOUGH2 eine Reihe von Funktionen zur Verfügung. Für die Modellierungen in diesem Bericht werden die relativen Permeabilitäten mit der Corey-Funktion simuliert /COR 54/, /PRU 99/. Kapillardrücke werden mit dem Van-Genuchten-Ansatz simuliert /GEN 80/, /PRU 99/. Eine detaillierte Beschreibung der Parameter findet sich im TOUGH2 Handbuch /PRU 99/ und in den Berichten /FRI 13/, /NAV 12/.

2 Modellannahmen

2.1 Modellgitter

Der für das TOUGH2-Modellgitter verwendete konstruktive Entwurf des Streckenverschlusses, sowie die Materialspezifikationen der Verschlussmaterialien, werden aus den Berichten /MÜL 11a/, /MÜL 12a/ entnommen. Die Abb. 2.1 zeigt einen beispielhaften Streckenverschluss in einem Salzstock. Der Streckenverschluss besteht aus zwei Dichtelementen (jeweils 50 m Länge) die an ihren Enden jeweils durch Widerlager (jeweils 15,2 m Länge) eingespannt werden. Die Widerlager sind nötig um den Quelldruck beim Aushärten des Sorelbetons in das anstehende Steinsalz abzuleiten und bei möglichen Laugenzutritten dem hydrostatischen Druck entgegenzuwirken. Zudem befinden sich zwischen den Dichtelementen und den Widerlagern noch 75 cm dicke Schallungsmauern, die den Sorelbeton beim Bau der Dichtelemente einschließen sollen.

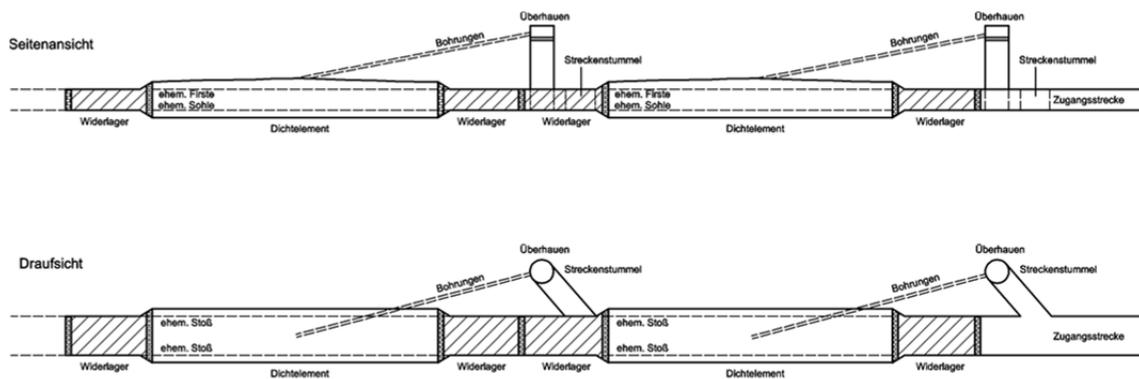


Abb. 2.1 Beispiel eines konstruktiven Entwurfes eines Streckenverschlusses im Steinsalz /MÜL 11a/

Das Einfüllen des Sorelbetons für das Dichtelement erfolgt über Firstbohrungen. Dazu werden zwei Bohrungen gestoßen, eine Bohrung dient als planmäßige Verfüllbohrung und eine Bohrung als Entlüftungs- bzw. Reservebohrung, um einen unterbrechungsfreien Verfüllprozess sicherzustellen. Die Firste des Dichtelementes werden so nachgeschnitten, dass der firsthöchste Punkt in der Mitte der Kammer im Bereich der Bohrung liegt. Somit kann der Sorelbeton allseitig abfließen. Die Abb. 2.2 zeigt den Querschnitt der Richtstrecke vor und hinter dem Streckenverschluss.

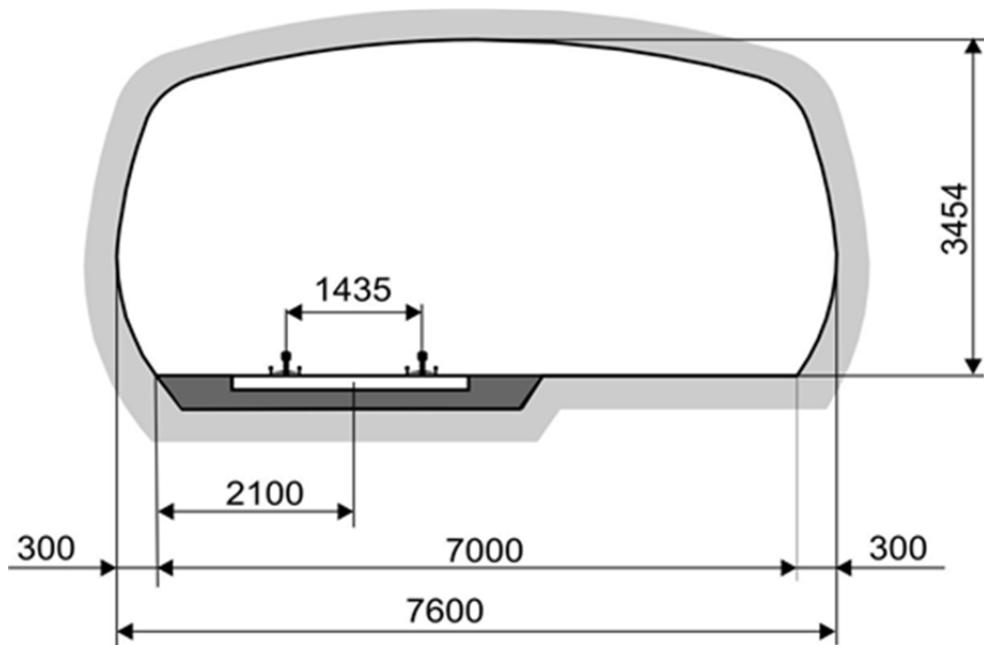


Abb. 2.2 Streckenquerschnitt einer Richtstrecke /BOL 11/

Die Kontur der Richtstrecke verläuft ellipsenförmig. Für das TOUGH2-Modellgitter wird ein rechteckiger Querschnitt angenommen. Die Querschnittsfläche wird aus /MÜL 11a/ entnommen. Die Abmessungen des Querschnitts der mit Salzgrus versetzten Strecke, des Dichtelementes und des Widerlagers, sind in der Tab. 2.1 aufgelistet.

Tab. 2.1 Abmessungen der Querschnitte nach /MÜL 11a/

	Strecke	Dichtelement	Widerlager
Querschnitt [m ²]	24	44	24

Die Auflockerungszone wird vor dem Verschluss des Endlagers im Bereich der Dichtelemente um einen Meter nachgeschnitten, um den bestmöglichen Anschluss des Damms an das Gebirge zu gewährleisten. Laut /MÜL 11a/ verbleibt eine restliche Auflockerungszone von 7 cm um die Streckenkantur. Für die TOUGH2-Modellierungen wird ein Wert von 20 cm angenommen, um Unsicherheiten abzudecken. Im Bereich der Widerlager wird die Auflockerungszone nur beraubt. Somit ist die Mächtigkeit der Auflockerungszone im Bereich des Hauptdamms deutlich geringer als um die Widerlager und die mit Salzgrus versetzten Streckenbereiche. Da der Konturbereich um die Streckenverschlüsse die Durchlässigkeit bestimmt, wird die Auflockerungszone um die Widerlager nicht berücksichtigt und die Mächtigkeit der Auflockerungszone entspricht

dem nachgeschnittenen Bereich. Im TOUGH2-Modellgitter wird ein einheitlicher Querschnitt für alle Streckenabschnitte angenommen.

2.1.1 Das TOUGH2-Modellgitter

Das TOUGH2-Modellgitter wird mit dem Programm FLAC3D erstellt. Das Gitter ist in verschiedene Materialgebiete unterteilt, denen spezifische Materialeigenschaften zugeordnet werden können. Das Gittermodell besteht aus einer Strecke mit einem rechteckigen Querschnitt, mit einer Gesamtlänge von 170,8 m, ohne die Randbedingungen (Abb. 2.3). Die beiden Dichtelemente (Damm) sind jeweils 50 m lang. Ein Widerlager (WDL) ist 15,2 m lang. In der Mitte befinden sich zwei Widerlager. Die geringe Mächtigkeit der Schalungsmauern wird vernachlässigt. An den Streckenenden befindet sich jeweils ein Element, das als Druck-Randbedingung (Randbedingung A und B) fungiert. Zwischen dem Streckenverschluss und der Randbedingung B befindet sich ein mit Salzgrus verfüllter 10 m langer Streckenabschnitt.

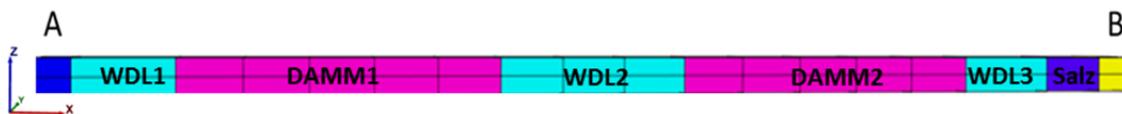


Abb. 2.3 TOUGH2-Gittermodell des Streckenverschlusses

Die Auflockerungszone ist ausgeblendet. Die Farben kennzeichnen die unterschiedlichen Materialgebiete im Streckenkern. Die Buchstaben A und B kennzeichnen zum besseren Verständnis die beiden Randbedingungen. Die unterschiedlichen Farben repräsentieren die verschiedenen Materialgebiete: dunkelblau (Randbedingung A), hellblau (erstes Widerlager, „WDL1“), rosa (erstes Dichtelement, „DAMM1“), mittleres Widerlager („WDL2“), zweites Dichtelement („DAMM2“), drittes Widerlager („WDL3“), lila (mit Salzgrus versetzte Strecke, „Salz“) und zuletzt in gelb die Randbedingung B.

Da der tatsächliche Streckenquerschnitt ellipsenförmig ist (Abb. 2.2) werden die Längen und Breiten des rechteckigen Querschnitts des Modells entsprechend angepasst, um die richtige Querschnittsfläche zu erhalten. Der Querschnitt des Streckenverschlusses wird in /MÜL 11a/ mit 44 m^2 angegeben. Da in axialer Richtung in TOUGH2 nur ein einheitlicher Querschnitt modelliert werden kann, wird der Querschnitt der Strecke einheitlich auf den Querschnitt des Dichtelementes festgelegt. Zu diesem Querschnitt, der als Streckenkern bezeichnet wird, kommt noch eine 20 cm mächtige Auflockerungszone und eine 5 cm mächtige Kontaktzone hinzu. Die Kontaktzone (Zone mit erhöhter Durchlässigkeit im Kontaktbereich zwischen dem Streckenverschluss und

dem anstehenden Steinsalz) und die Auflockerungszone im anstehenden Steinsalz, werden im Streckenmodell zu einem Materialgebiet zusammengefasst und wird im Folgenden „gestörte Zone“ (GZ) genannt. Somit beträgt die Mächtigkeit der gestörten Zone 25 cm (Abb. 2.4).

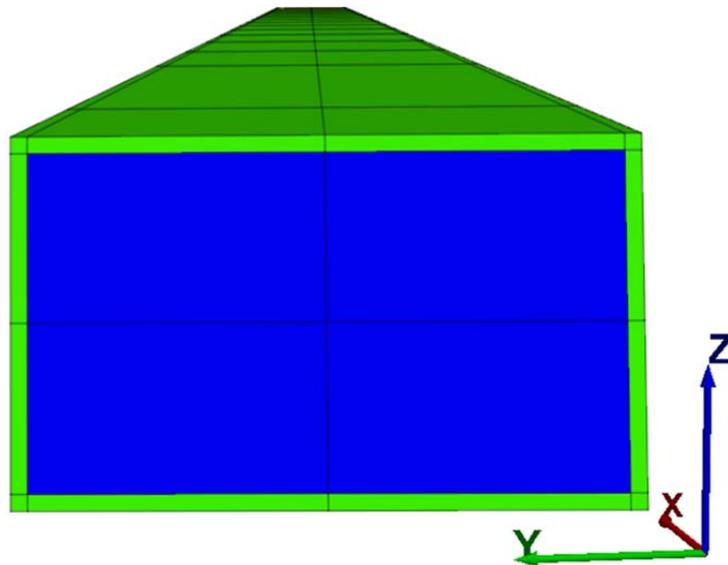


Abb. 2.4 Querschnitt des Modellgitters

Das blaue Materialgebiet kennzeichnet den Streckenkerne. Der Streckenkerne wird umgeben von der grünen gestörten Zone. Die gleiche Querschnittsgeometrie gilt für alle Streckenelemente in x-Richtung.

Die Abmessungen des Streckenquerschnitts für das TOUGH2-Basis-Gittermodell sind in der Tab. 2.2 aufgelistet.

Tab. 2.2 Abmessungen des Streckenquerschnittes für das TOUGH2-Basis-Gittermodell

Parameter	Abmessungen
Breite [m]	8,8 (+0,5 m GZ*)
Höhe [m]	5 (+0,5 m GZ)
Querschnitt [m ²]	44 (+7,15 m ² GZ)

*(GZ = gestörte Zone = Kontakt- und Auflockerungszone)

An den beiden Streckenenden befinden sich jeweils Druckrandbedingungen (Abb. 2.3). Dadurch wird ein Druckpotential innerhalb der Strecke erzeugt. Die Randbedingung A wird direkt an das erste Widerlager vor dem Streckenverschluss gesetzt. Das anste-

hende Fluid an der Randbedingung A ist eine gesättigte NaCl-Lauge. Die Randbedingung B ist mit Luft unter Atmosphärendruck gesättigt.

2.1.2 Modellgitter für Vergleichsrechnungen

Um einen möglichen Einfluss der Gittergeometrie bzw. die Unterteilung der gestörten Zone in Auflockerungs- und Kontaktzone auf den Laugenfluss zu identifizieren, werden drei weitere Gittergeometrien erstellt. Zunächst wird ein Gittermodell erstellt in dem die gestörte Zone in die Auflockerungs- und Kontaktzone unterteilt wird. Dies erfolgte für einen rechteckigen und zudem für einen kreisförmigen Streckenquerschnitt. Zudem wird ein vereinfachtes Gittermodell erstellt, in dem eine einheitliche integrale Permeabilität über den gesamten Streckenquerschnitt angenommen wird. Der Streckenquerschnitt im vereinfachten Modell ist somit nicht unterteilt. Die Rechenergebnisse der Vergleichsmodelle werden mit denen des Basisfalls verglichen. Die Eingabeparameter und Abmessungen der einzelnen Materialgebiete sind in der Tab. 2.3 und Tab. 2.8 zusammengefasst.

Tab. 2.3 Querschnittsflächen der einzelnen Materialgebiete für die unterschiedlichen Gittermodelle

Die summierten Querschnittsflächen der Vergleichsmodelle sowie die Längen der Elemente in x-Richtung sind identisch zu denen des Basismodells.

Modellgitter	Auflockerungszone [m ²]	Kontaktzone [m ²]	Streckenkerneln [m ²]
Rechteckiger Streckenquerschnitt mit Kontakt- und Auflockerungszone	5,76	1,39	44
Kreisförmiger Streckenquerschnitt mit getrennter Auflockerungs- und Kontaktzone	5,76	1,39	44
Vereinfachter Streckenquerschnitt	-	-	51,15

2.1.2.1 Rechteckiges Gittermodell

Um den Einfluss einer getrennten Auflockerungs- und Kontaktzone auf den Laugendurchfluss zu untersuchen, wird die gestörte Zone in diesem Modellgitter in eine Auflockerungs- und Kontaktzone unterteilt (Abb. 2.5).

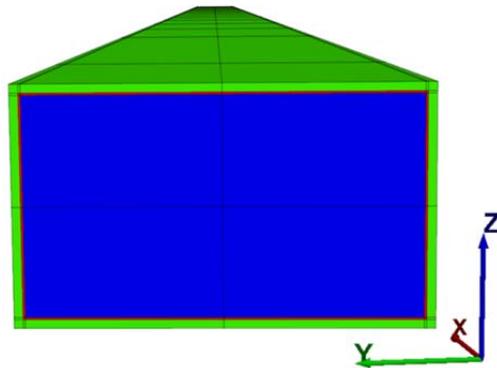


Abb. 2.5 Gittermodell mit einem rechteckigen Querschnitt

Der Streckenkern (blau) wird von einer Kontaktzone (rot) und einer Auflockerungszone (grün) umgeben.

2.1.2.2 Kreisförmiges Gittermodell

In diesem Gittermodell wird für einen kreisförmigen Querschnitt eine getrennte Auflockerungs- und Kontaktzone (Abb. 2.6) modelliert.

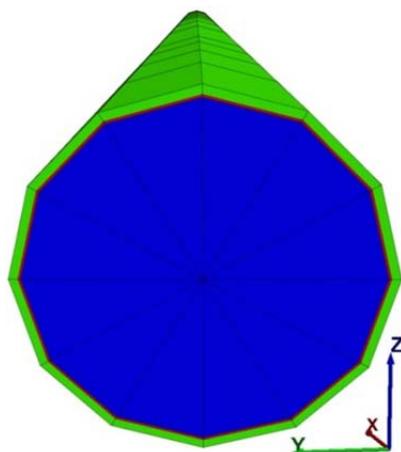


Abb. 2.6 Gittermodell mit einem kreisförmigen Querschnitt

Der in blau dargestellte Streckenkern ist von einer Kontaktzone (rot) und einer Auflockerungszone (grün) umgeben.

2.1.2.3 Vereinfachtes Gittermodell

Bei dem vereinfachten Gittermodell wird der Querschnitt nicht weiter unterteilt. Es wurde eine integrale Permeabilität aus den drei Materialgebieten Sorelbeton, Kontakt- und Auflockerungszone errechnet. Die Rechnungen mit diesem Querschnitt sollen den Einfluss einer integralen Permeabilität auf den Laugenfluss aufzeigen (Abb. 2.7). Die Untersuchungen sollen Aussagen darüber machen, ob und inwieweit das Prozessverständnis auch durch vereinfachte Querschnitte mit integralen Werten erreicht werden kann, anstatt aufwendige Gittermodelle zu verwenden, die einen Mehraufwand bei der Erstellung und Auswertung aber auch in Hinsicht auf die Rechenzeit bedeuten.

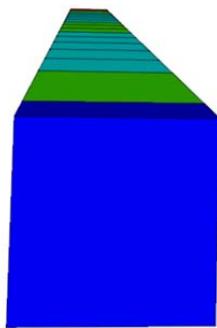


Abb. 2.7 Integraler Querschnitt, in dem die Auflockerungs-, Kontaktzone und der Streckenkern zusammengefasst werden

2.2 Modellierte Prozesse

Mit TOUGH2 kann eine Vielzahl von thermo-hydraulischen Prozessen modelliert werden. Je mehr Prozesse berücksichtigt werden, desto aufwendiger und langwieriger werden die Rechnungen. Die Modellierungen in diesem Bericht berücksichtigen keine thermischen Effekte, keine Diffusion, keine Lösungs-, Ausfällungs- und Adsorptionseffekte und keine Dispersion. Im Folgenden werden die modellierten Prozesse beschrieben.

2.2.1 Phasen und Komponenten

TOUGH2 simuliert den advektiven Transport verschiedener Phasen (i. d. R. Flüssigkeits- und Gasphase). Die Phasen bestehen aus Komponenten, die vom advektiven

Phasenstrom mitgetragen werden. Komponenten können durch Prozesse wie Kondensation, Evaporation oder Entgasung von der einen in die andere Phase wechseln.

Das verwendete EOS-Modul definiert welche Phasen und Komponenten vorliegen und gemäß welchen thermodynamischen Prozessen sich die Komponenten auf die Phasen verteilen. Die Modellrechnungen werden mit dem EOS7-Modul durchgeführt. Das EOS7-Modul definiert die Phasen flüssig und gasförmig sowie die Komponenten Luft, Wasser und Lauge. Zudem wird in EOS7 über den Kapillardruck und relative Permeabilitäten der Zweiphasenfluss berücksichtigt (siehe auch /PRU 99/).

2.2.2 Konvergenz

Aufgrund des Gebirgsdruckes und des visko-plastischen Verhaltens des Steinsalzes verschließen sich aufgefahrene Hohlräume in einem Salzbergwerk wieder. Nach dem Stand von Wissenschaft und Technik zur Endlagerung, werden die Hohlräume mit art-eigenem Salzgrusversatz verfüllt. Zunächst findet der Kompaktionsprozess bzw. die Porenraumreduktion im Salzgrusversatz hauptsächlich durch eine mechanische Zerstörung der Salzkörner statt. Dadurch verkleinert sich sukzessiv der Porenraum im Salzgrusversatz. Unterhalb eines gewissen Porenraumanteils wird dieser Porenraum nur noch durch „plastisches Fließen“ des Salzgruses verkleinert. Der Kompaktionsprozess ist im Wesentlichen abhängig von /KRÖ 09/:

- der mineralogischen Zusammensetzung des Salzes,
- dem überlagernden Gebirgsdruck,
- der Feuchtigkeit und der Temperatur des Salzgrusversatzes,
- dem Fluiddruck im Porenraum.

Mit der Zeit baut sich im Salzgrus ein Stützdruck (Gegendruck) auf, der dem Gebirgsdruck entgegenwirkt. Wenn der Stützdruck eine gewisse Größenordnung erreicht hat, wirkt er auf das anstehende Steinsalz der Streckenkontur ein und die gestörte Zone beginnt zu verheilen. Der Verlauf der Kompaktion der gestörten Zone wird signifikant vom Aufbau des Stützdruckes bzw. der Kompaktion des Salzgrusversatzes geprägt. Der Aufbau des Stützdruckes ist abhängig vom initialen Hohlraumvolumen im Salzgrusversatz. Durch Sackung des Salzgrusversatzes nach dessen Einbringung in die Strecken kann ein Firstspalt entstehen. Durch eine angepasste Einbringtechnik des Salz-

grusversatzes sollten solche Hohlräume gering gehalten werden. Es ist zu erwarten, dass sich der Stützdruck an den Stößen und der Sohle aufgrund des formschlüssigen Anschlusses des Salzgruses an diesen Stellen schneller aufbaut. Dadurch ist die Kompaktion der gestörten Zone direkt an die Kompaktion des Salzgrusversatzes gekoppelt und müssen in Abhängigkeit voneinander betrachtet werden. TOUGH2 berücksichtigt diese Kopplung nicht. Somit besteht bei dem Prozess weiterer F & E Bedarf.

Der Streckenverschluss mit den Widerlagern und dem Damm aus Sorelbeton ist nicht kompaktierbar. Deshalb steht hier der Stützdruck sofort nach dem Auflaufen des Gebirges auf den Sorelbeton an. Somit verheilt die Kontakt- und Auflockerungszone um die Streckenverschlüsse schneller als bei den mit Salzgrusversatz verfüllten Strecken.

Mit dem Standardprogramm TOUGH2 ist eine Abbildung der Konvergenz nicht möglich. Deshalb wurde von der GRS auf der Basis der Module EOS7 und EOS7R eine von /NAV 12/ modifizierte Konvergenzfunktion des von Stelle /STE 85/ vorgestellten Ansatzes in den TOUGH2-Code implementiert. Die Modifikationen des Stelle-Ansatzes betreffen vor allem die Einführung einer Zeitabhängigkeit sowie die Stützwirkung des Versatzes. Die von Stelle entwickelte Konvergenzfunktion beschreibt eine Kraftkopplung zwischen Gebirge und Versatz, wobei angenommen wird, dass die Grubenraumkonvergenz den Porenraum im Versatz vermindert. Die Verringerung des Hohlraumes wird durch eine veränderliche Konvergenzrate K beschrieben (Gleichung (2.1)). Es gilt die Annahme, dass die Konvergenzrate unverfüllter Hohlräume im Laufe der Zeit einem konstanten Wert K_{ref} entgegen strebt /STE 85/. Diese stationäre Konvergenzrate wird „Referenzkonvergenzrate“ genannt, und sie gilt für einen bestimmten Referenzdruck und eine bestimmte Referenztemperatur. Die anfängliche Abweichung der tatsächlichen Konvergenzrate von der Referenzkonvergenzrate sowie die Wirkung der Verfüllung und abweichender Drücke und Temperaturen wird durch verschiedene Faktoren berücksichtigt:

$$K = K_{ref} \cdot f_{loc} \cdot f_t \cdot f_p \cdot f_\phi \cdot f_T \quad (2.1)$$

K = Konvergenzrate [1/s]

K_{ref} = Stationäre Konvergenzrate eines unverfüllten Hohlraumes unter Referenzbedingungen

f_{loc} = Korrekturfaktor

f_t = Korrekturterm der zeitabhängigen Abweichung von der stationären Konvergenzrate

f_p = Einfluss eines vom Referenzdruck abweichenden Fluiddrucks

f_ϕ = Einfluss der Stützwirkung des Versatzes mit der Porosität ϕ

f_T = Einfluss einer von der Referenztemperatur abweichenden Temperatur

Der Faktor f_{loc} (Gleichung (2.1)) ist ein Korrekturfaktor mit dem die Kompaktionsrate auf lokale Faktoren in Endlagern (Teufenabhängigkeit, Materialabhängigkeit) korrigiert werden kann. /LAR 13/ verwendete den Parameter f_{loc} um Kompaktionsraten anzupassen. Grundlage für die Parameterermittlung waren Ergebnisse aus Rechnungen mit „Code_Bright“ zum Kompaktionsverhalten unterschiedlicher Salzgrusversätze bei verschiedenen Temperatureinwirkungen auf die Strecken eines Endlagers im Rahmen der Bewertung der Integrität geotechnischer Barrieren /MÜL 12b/. /LAR 13/ approximiert für verschiedene Simulationszeiträume das f_{loc} bis zum Erreichen von 5 % Porosität für trockenen und feuchten Salzgrus unter Atmosphärendruck an die Code_Bright Rechnungen. Somit wird der Faktor f_{loc} als Korrekturfaktor verwendet. Der 5 %-Wert der Porosität wurde zum Anfitten gewählt, weil die Porositätsabnahme bei Kompaktion (siehe /LAR 13/) in diesem Bereich noch gut darstellbar ist, während er bei kleineren Porositäten langsam abfällt. Die entsprechenden Werte für f_{loc} sind in der Tab. 2.4 angegeben.

Tab. 2.4 Faktor f_{loc} zum Erreichen der gegebenen Zeitpunkte mit der Referenzkonvergenzrate $0,01 \text{ a}^{-1}$ /LAR 13/

Zeitpunkte t' bis zum Erreichen von $\phi(t=t') = 5 \%$	f_{loc} für feuchten Versatz ($g_2 = 10.000$)
100 a	0,48
200 a	0,24
500 a	0,096
800 a	0,06
1000 a	0,048

Das Kompaktionsverhalten von Steinsalz wird signifikant durch den Feuchtegehalt beeinflusst. Der Einfluss der Feuchte auf den Kompaktionsprozess wird im Faktor f_ϕ (Gleichung (2.1)) durch den Parameter g_2 berücksichtigt (siehe /RÜB 10/). Für trockenen Salzgrus wird $g_2 = 100$ und für feuchten Salzgrus $g_2 = 10.000$ gesetzt.

Das TOUGH2-Konvergenzmodul hat zwei Anpassungen durch /NAV 12/ erfahren:

1. Die Permeabilität ist eine Funktion der Porosität („Poro-Perm-Beziehung“, Formel (2.2))
2. Der Kapillardruck wird mittels der Leverett-Skalierung angepasst /LEV 41/

Zwischen der effektiven Porosität und der Permeabilität gibt es einen direkten Zusammenhang, der sich durch die so genannte Poro-Perm-Beziehung abbilden lässt /KRÖ 09/, /MÜL 99/, /POP 02/. Für die Poro-Perm-Beziehung werden gemäß der Empfehlung aus /WIE 11/ die mit Lauge gemessenen Parameter für Salzgrus verwendet (vgl. Gleichung (2.2)). Diese Beziehung ergibt niedrigere Permeabilitäten als die Messungen mit Spindelöl. Die niedrigere Permeabilität bei gleicher Porosität bei Anwesenheit von Lauge wird durch Wechselwirkungen zwischen Lösung und Salzgrus erklärt. Es ist anzunehmen, dass solche Wechselwirkungen bereits bei einer Teilsättigung auftreten, allerdings liegen hierzu keine gesicherten Daten vor. Es ist auch zu berücksichtigen, dass für angefeuchteten Versatz die Sättigung mit der Kompaktion steigt. Angesichts der Datenlage wird von /WIE 11/ vorgeschlagen bei angefeuchtetem bzw. (teil-) gesättigtem Salzgrus einen Exponenten $n = 5,15$ zu verwenden.

Folgende Parameter bestimmen die Poro-Perm-Beziehung (Formel (2.2)):

$$K = 2,0E-9 \cdot \phi^n \quad (2.2)$$

K = Permeabilität [m^2]

n = Feuchteexponent

ϕ = Porosität

Die Parameter der Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung unterscheiden sich für verschiedene Porositätsbereiche (Tab. 2.5). Für die Anfangsporosität von 35 % des Salzgrusversatzes errechnet sich eine Permeabilität von $8,97E-12 m^2$. Bei der angestrebten Grenzporosität von 1 % liegt die Permeabilität bei $1,0E-19 m^2$ /WIE 11/. Diese geringe Permeabilität bedeutet, dass im Betrachtungszeitraum von 50.000 Jahren ein advektiver Flüssigkeits- und auch Gastransport möglich ist. Nach /POP 12/ findet aber kein advektiver Flüssigkeits- und Gastransport bei dieser Porosität statt. Für zukünftige Forschungsaktivitäten bleibt die Frage, wie der Gas- und Flüssigkeitstransport bei geringen Porositäten physikalisch/mathematisch korrekt beschrieben werden kann.

Tab. 2.5 Parametrisierung der Porositäts-Permeabilitätsbeziehung /LAR 13/

Porositätsbereich	A [m ²]	n
$0,1 < \phi < 1$	2E-9	5,15
$0,05 < \phi < 0,1$	6,7E-5	9,32
$\phi_{\text{Grenzporosität}} < \phi < 0,05$	4,99E-11	4,61

Durch die Verringerung der Porosität ändert sich nicht nur die Permeabilität, sondern auch der Kapillardruck. Aufgrund der bestehenden Unsicherheiten zu Kapillardrücken bei kleinen Porositäten /WIE 11/, wird die Skalierung für die gestörte Zone und den Salzgrusversatz in den TOUGH2-Modellrechnungen abgeschaltet.

2.2.3 Zweiphasenfluss

Der Zweiphasenfluss wird in TOUGH2 durch das Einführen einer relativen Permeabilität und eines Kapillardruckes berücksichtigt. Für die Modellierung des Zweiphasenflusses in TOUGH2 stehen mehrere Modelle für die relative Permeabilität und den Kapillardruck zur Verfügung. Im Folgenden werden die beiden in der GRS eingesetzten Modelle für die relative Permeabilität und den Kapillardruck näher erläutert.

Relative Permeabilität nach Corey

Am advektiven Fluss können nur die mobilen Phasenanteile teilnehmen. Die immobilen Phasenanteile, die in feinen Poren gebunden sind, reduzieren den Porenraum und somit die Permeabilität. Somit spricht man von einer totalen und einer relativen Permeabilität. Die relative Permeabilität einer Phase wird durch einen dimensionslosen Faktor angegeben, aus dem sich ein mobiler Anteil der jeweiligen Phase berechnet. TOUGH2 bietet verschiedene Funktionen für die relative Permeabilität von Gas und Flüssigkeit an. Für die TOUGH2-Modellierungen der GRS wird die Corey-Funktion verwendet. Eine detaillierte Beschreibung des physikalischen Modells und der benötigten Eingabeparameter geben die Berichte /COR 54/, /PRU 99/ und /FRI 13/.

Kapillardruck nach van-Genuchten

Die Funktion für den Kapillardruck $p_c(S)$ ist eine zweite wichtige Zweiphasenflussbeziehung. Der Kapillardruck ist eine Funktion der Flüssigkeitssättigung. Der Kapillardruck verschwindet, wenn das poröse Medium voll mit Flüssigkeit gesättigt ist. In

TOUGH2 können verschiedenen Typen von Kapillardruckfunktionen („Retentionskurven“) auswählen werden. Für TOUGH2-Modellierungen der GRS wird die van Genuchten Funktion verwendet. Eine detaillierte Beschreibung des physikalischen Modells und der benötigten Eingabeparameter geben die Berichte /GEN 80/, /PRU 99/ und /FRI 13/.

2.2.4 Viskositätskorrektur

Für die Modellrechnungen in diesem Bericht wird eine gesättigte NaCl-Lauge als flüssige Phase angenommen. NaCl-Lauge besitzt eine höhere Viskosität als reines Wasser. Für bestimmte Mengenanteile der Lauge an der flüssigen Phase muss die Viskosität entsprechend angepasst werden. Die Viskositätskorrektur erfolgt mit Standardparametern von TOUGH2 für NaCl (siehe /PRU 99/).

2.3 Materialgebiete und Eingabeparameter

2.3.1 Sorelbeton

Der Streckenverschluss mit den Widerlagern und dem Dichtelement (Strömungsbarriere) wird nach der Materialspezifikation /MÜL 11a/, /MÜL 12a/ ausgelegt. Die Widerlager und die Strömungsbarriere bestehen aus Sorelbeton. Der laterale hydraulische Widerstand wird im Wesentlichen durch jenen des Dichtelements, der Kontaktzone zum Salzgestein und der Auflockerungszone bestimmt. Die Einspannung des Hauptdammes während des Betonierens und in der Nachbetriebsphase stellen beidseitige Widerlager aus Sorelbeton sicher. Die Auflockerungszone wird im Bereich der Kernbarriere zurück geschnitten, im Bereich der Widerlager nicht. Deshalb werden an die Widerlager keine Anforderungen bezüglich der hydraulischen Durchlässigkeit gestellt. Die Materialkennwerte für den Sorelbeton werden folgendermaßen nach /MÜL 12b/ festgelegt:

Permeabilität

Im Rahmen der Erstellung einer Strömungsbarriere in der Schachtanlage Asse II wurden zur Qualitätssicherung baubegleitende Proben erstellt. Labortests zur Lösungspermeabilität dieser Proben ergaben nach 9 bzw. 12 Versuchswiederholungen eine Permeabilität von $5,0E-19 \text{ m}^2$ für den Sorelbeton. Eine geringere Lösungspermeabilität

sollte für den Sorelbeton A1 als Medianwert deshalb nicht angesetzt werden /MÜL 11a/. Für den Basisfall der TOUGH2 Modellrechnungen wird der Wert von $5,0E-19 \text{ m}^2$ übernommen.

Porosität

/MÜL 12a/ gibt einen Porositätsbereich zwischen 16,1 Vol.-% und 23,6 Vol.-% für unverdichteten Sorelbeton an, wobei nicht zwischen effektiver und totaler Porosität unterschieden wurde. Es wird der Mittelwert von 20 % gewählt. Es wird nicht erwartet, dass die Porosität der Dichtelemente eine sensitive Größe ist. Eine Kompression des Sorelbetons wird als vernachlässigbar gering eingestuft, somit ist die Porosität konstant.

Zweiphasenflussparameter

Kapillardruckparameter:

Der Sorelbeton besitzt laut /MÜL 11a/ einen Gaseindringdruck zwischen 0,18 – 0,26 MPa. Für die TOUGH2-Modellierung wird der Mittelwert von 0,22 MPa verwendet. Der Gaseindringdruck wird relevant, wenn der Sorelbeton aufgesättigt ist und Gase vor dem Streckenverschluss anstehen. Der Gaseindringdruck eine wesentliche Größe in der Kapillardruckbeziehung von Van-Genuchten. Folgende Eingabeparameter definieren die Van-Genuchten Funktion:

- Korngrößenverteilung $n = 1,5$ (d. h. $\lambda = 0,333$) /POP 06/
- Residuale Sättigung der flüssigen Phase wird mit 0 angenommen
- Gaseindringdruck $P_0 = 0,22 \text{ MPa}$ /MÜL 11a/
- Obere Kapillardruckgrenze = $1E8 \text{ Pa}$ (Schätzwert)

Relative Permeabilität:

Die relative Permeabilität berechnet sich aus dem residualen Wasser- und Gasanteil des Porenraums. Der residuale Wasseranteil beträgt für Sorelbeton $S_{\text{liq, res}} = 0,8$ /Mül 11b/ und der residuale Gasanteil beträgt $S_{\text{gas, res}} = 0,005$. Aus Mangel an experimentellen Daten wird ein Schätzwert von $S_{\text{gas, res}} = 0,005$ angenommen, um das Umschalten von TOUGH2 in den einphasigen Zustand zu verhindern, da dies zu numerischen Problemen führen kann. Der Wert wird so klein gewählt, damit er für den

Laugenfluss nicht sensitiv ist. Es wird auf die relative Permeabilitätsfunktion nach Corey zurückgegriffen. Folgende Eingabeparameter definieren die Corey Funktion:

- $S_{\text{liq, res}} = 0,8$
- $S_{\text{gas, res}} = 0,005$

Sättigung

Laut /Mül 11b/ wurden für den Sorelbeton A1 Anfangsporenraumsättigungen von 80 % (0,80) abgeschätzt. Diese Feuchtigkeit ist aber laut /Mül 11b/ nicht mobil, weil sie physikalisch oder chemisch gebunden ist. Für die Modellrechnungen ist die residuale Laugensättigung $S_{\text{liq, res}}$ so eingestellt, dass die initial enthaltene Laugenmenge von 80 % immobil ist. Somit stehen nur 20 % des Porenraums für einen Fluidfluss zur Verfügung.

2.3.2 Salzgrusversatz

Die Strecken hinter dem Streckenverschluss (Einlagerungsseite) werden mit Salzgrusversatz verfüllt. Im Bereich der Richtstrecken und der Streckenverschlüsse wird der Salzgrus mit 0,6 Gew.-% MgCl_2 -Lauge angefeuchtet. Ein Feuchtigkeitsanteil erhöht die Konvergenzrate im Salzgrus /WIE 11/.

Permeabilität

Aus der Poro-Perm-Beziehung (Kap. 2.2.2) ergibt sich bei einer Anfangsporosität des Salzgrusversatzes von 35 % eine Anfangspermeabilität von $8,97\text{E}-12 \text{ m}^2$. Bei 1 % Endporosität errechnet sich eine Permeabilität von $1,0\text{E}-19 \text{ m}^2$.

Porosität

Laut /WIE 11/ kann eine Anfangsporosität für salzgrusversetzte Strecken von 0,35 (initial) angenommen werden. Eine mögliche Inhomogenität durch Setzung des Salzgruses und ein daraus resultierender Firstspalt werden vernachlässigt.

Zweiphasenflussparameter

Kapillardruck:

Salzgrusversatz ist ein Medium mit geringen Kapillareffekten. Durch die geringen Kapillareffekte ist nur ein sehr geringer prozentualer Fluidanteil im Salzgrus immobil. Im Folgenden sind die im TOUGH2-Modell verwendeten Kapillardruck-Parameter (abgeleitet nach /KRÖ 09/) aufgeführt:

- $\lambda = 0,73$
- Residuale Sättigung der flüssigen Phase wird mit 0 angenommen
- $P_0 = 5 \text{ kPa}$
- obere Kapillardruckgrenze = $1E8 \text{ Pa}$ (Schätzwert)

Relative Permeabilität:

Die relative Permeabilität berechnet sich aus dem residualen Wasser- und Gasanteil des verkleinerten Porenraums. Die residuale Flüssigkeitssättigung nimmt bei Abnahme des Porenvolumens als Folge der Kompaktion des Versatzes zu. Im TOUGH2-Modell ist die residuale Gassättigung für alle Porositätsbereiche konstant, da TOUGH2 diesen Effekt nicht berücksichtigt. Aufgrund der Unsicherheiten zu Zweiphasenflussparametern und der geringen Kapillareffekte von Salzgrus werden residuale Flüssigkeitssättigungen von 0,001 und residuale Gassättigungen von 0,005 angenommen. Es wird auf die relative Permeabilitätsfunktion nach Corey zurückgegriffen. Folgende Parameter definieren die Funktion:

- $S_{\text{liq, res}} = 0,001$
- $S_{\text{gas, res}} = 0,005$

Sättigung

Der Feuchtegehalt des Salzgrusversatzes beträgt 0,6 Gew.-% MgCl_2 -Lösung /WIE 11/. Dies entspricht einem Wasseranteil von 0,018 im Porenraum. Dieser Wasseranteil errechnet sich aus der folgenden Beziehung:

$$S_{initial} = \frac{\rho_{salt}}{\rho_{MgCl_2}} \cdot \frac{1 - \Phi}{\Phi} \cdot X_{MgCl_2} \quad (2.3)$$

ρ_{MgCl_2} = Dichte der Magnesiumchlorid Lösung von 1330 kg/m³

ρ_{salt} = Dichte Steinsalz von 2160 kg/m³

Φ = Porosität des Salzgrusversatzes von 0,35

X_{MgCl_2} = 0,6 Gew.-% MgCl₂-Lauge

Der initiale Wassergehalt bzw. die Sättigung bezieht sich immer auf den Porenraum und muss somit auf die unterschiedlichen Porositäten z. B. der Auflockerungs- und Kontaktzone umgerechnet werden.

Kompaktion

Der Salzgrusversatz zwischen dem Streckenverschluss und der Randbedingung B kompaktiert. Es wird ein f_{loc} von 0,095 für den Salzgrusversatz und die gestörte Zone angenommen (siehe Kap. 2.2.2). Dies entspricht feucht-warmen Bedingungen im Bereich der Streckenverschlüsse. Eine Tabelle der Parameter für die Kompaktion befindet sich im Anhang A.

2.3.3 Gestörte Zone

Die Auflockerungs- und Kontaktzonen werden zu einem Materialgebiet zusammengefasst und im weiteren Verlauf als **gestörte Zone** bezeichnet. Im Folgenden werden die Annahmen dazu erläutert.

2.3.3.1 Auflockerungszone

Im Konturbereich eines aufgefahrenen Hohlraumes im Salzgestein wird das Gestein aufgrund der Spannungsentlastung mechanisch geschädigt. Dadurch entsteht eine Auflockerungszone mit geringerer Festigkeit und einer erhöhten Permeabilität. Die Schädigung des Salzgesteines tritt nach der Überschreitung der so genannten Dilatanzgrenze auf /HÄF 01/. Nach /HÄF 01/ ist Dilatanz die grundlegende Eigenschaft eines körnigen, granularen Materials sein Volumen unter der Einwirkung von Scherkräften durch Auflockerung zu vergrößern.

Ein weiterer Prozess der zu Wegsamkeiten im Konturbereich einer aufgefahrenen Strecke führt ist die fluiddruck-getriebene Generierung von hydraulischen Fließwegen, wenn Fluiddrücke größer als die minimale Hauptspannung auftreten. Dadurch wird das Salzgestein praktisch aufgebrochen /POP 11/.

Die Reichweite der Auflockerungszone in das Gebirge ist stark begrenzt und liegt im Dezimeter- bis Meterbereich /MÜL 12b/. Die größte Spannungsentlastung tritt in radialer Richtung auf, deshalb entstehen laterale Klüfte die eine erhöhte Permeabilität in axialer Richtung induzieren. Für die TOUGH2-Modellrechnungen wird eine homogene Permeabilität in alle drei Achsenrichtungen angenommen. In dem Rechenfall THMC 3 werden unterschiedliche Permeabilitäten in axialer und radialer Richtung angenommen (Tab. 3.1).

Entscheidend für die räumliche und hydraulische Ausbildung der Auflockerungszone sind die geologisch-petrographischen Bedingungen, die Teufenlage und insbesondere die Art und Weise der Auffahrung (Streckengeometrie). Zudem spielt der zeitliche Faktor in der Entwicklung der Auflockerungszone eine große Rolle /HÄF 01/. Je länger eine Strecke offen steht und kein Stützdruck dem Gebirgsdruck entgegenwirkt, desto weiter kann sich eine Auflockerungszone in das Gebirge ausbilden. Im Folgenden sind verschiedene Arbeiten zur Erforschung der Auflockerungszone aufgeführt.

In dem Projekt-ALOHA /WIE 98/ wurden In-situ-Messungen in einem untertägigen Versuchsfeld auf der 875 m-Sohle des Forschungsbergwerkes Asse durchgeführt. Die Messungen bestanden aus Gas- und Flüssigkeitsinjektionstests sowie geoelektrischen Messungen. Die Ausdehnung der Auflockerungszone konnte anhand der Gasinjektionstests mit 1,5 m unter der Sohle und mit < 1 m im Stoß bestimmt werden. Die Flüssigkeitsinjektionstests bestätigten die Ergebnisse für die Messungen in der Sohle. Die Permeabilität der Auflockerungszone lag im Tiefenbereich von 0,8 m bis 1,5 m bei $1,0E-17$ m². Für die anderen Bereiche konnten keine reproduzierbaren Daten gewonnen werden.

In dem Projekt-ALOHA2 /WIE 04/ wurden die Untersuchungen des ALOHA-Projektes fortgesetzt. /WIE 04/ gibt die Ausdehnung der Auflockerungszone mit bis zu 1,5 m in der Sohle und bis zu 0,5 m in den Stößen bzw. der Firste an. Die Permeabilität kann nahe der Hohlraumoberfläche Werte von $1,0E-16$ m² bis $1,0E-15$ m² erreichen (Abb. 2.8). Mit zunehmender Entfernung von der Hohlraumkontur nimmt die hydraulische Durchlässigkeit ab bis wieder die Permeabilität von ungestörtem Steinsalz von etwa

1,0E-21 m² erreicht wird. Daraus resultierend wird eine integrale Porosität über den Fließquerschnitt angenommen. Im Forschungsbergwerk Asse wurde an einem 40 Jahre alten Pfeiler zwischen zwei großen Kammern ein ausgedehnter Bereich erhöhter Permeabilität (bis zu 4 m) festgestellt.

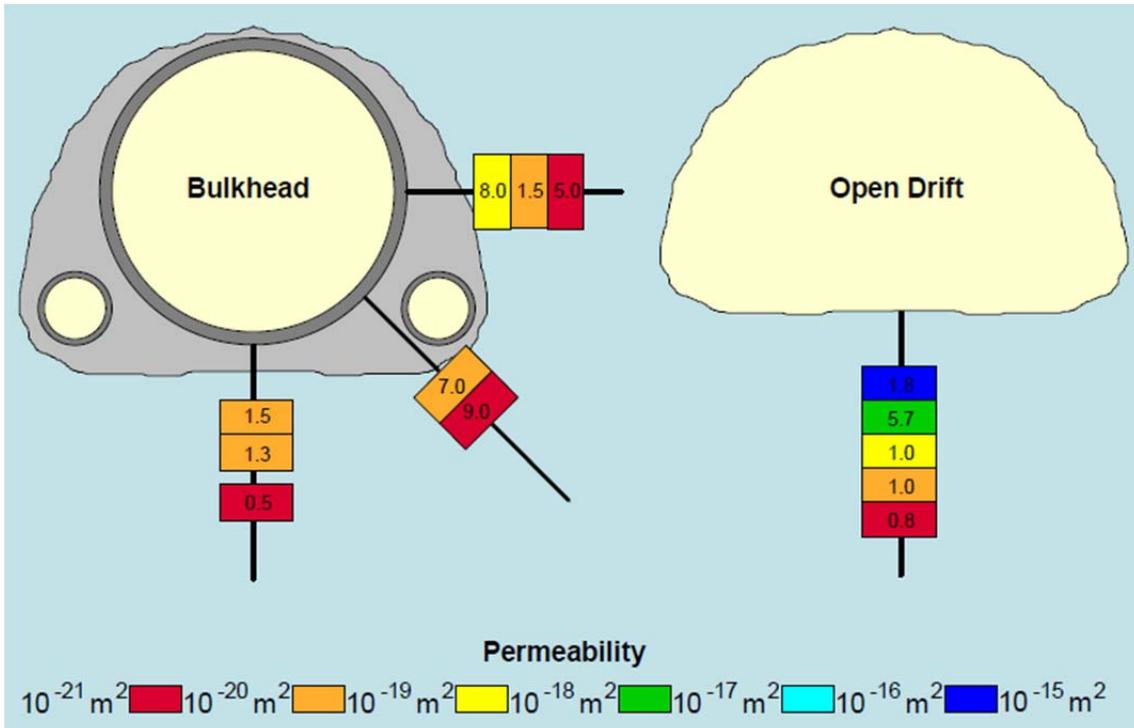


Abb. 2.8 Gemessene Permeabilitäten in der Auflockerungszone um eine offene Strecke (open drift) und einer Strecke mit Stahlausbau (bulkhead)

Die Farben der Rechtecke entsprechen der Größenordnung der Permeabilität, die Zahlenwerte in den Rechtecken dem Multiplikator /WIE 04/.

Im ERAM (Morsleben) wurde die Mächtigkeit der Auflockerungszone für eine frisch aufgefahren und nachgeschnittene Strecke bestimmt. Es zeigte sich, dass ab einem Prüfraumabstand von 7 cm von der Streckenkontur die Permeabilität von ungestörtem Steinsalz vorhanden war, d. h. 1,0E-22 m².

Im entlasteten Konturbereich liegt gemäß Abb. 2.9 die Permeabilität bei Annahme einer Differenzspannung von $\Delta p = 0$ unterhalb von 5,0E-18 m². Der Bereich bis etwa 0,5 – 1 cm Teufe wird der Kontaktzone zugeordnet /MÜL 11a/.

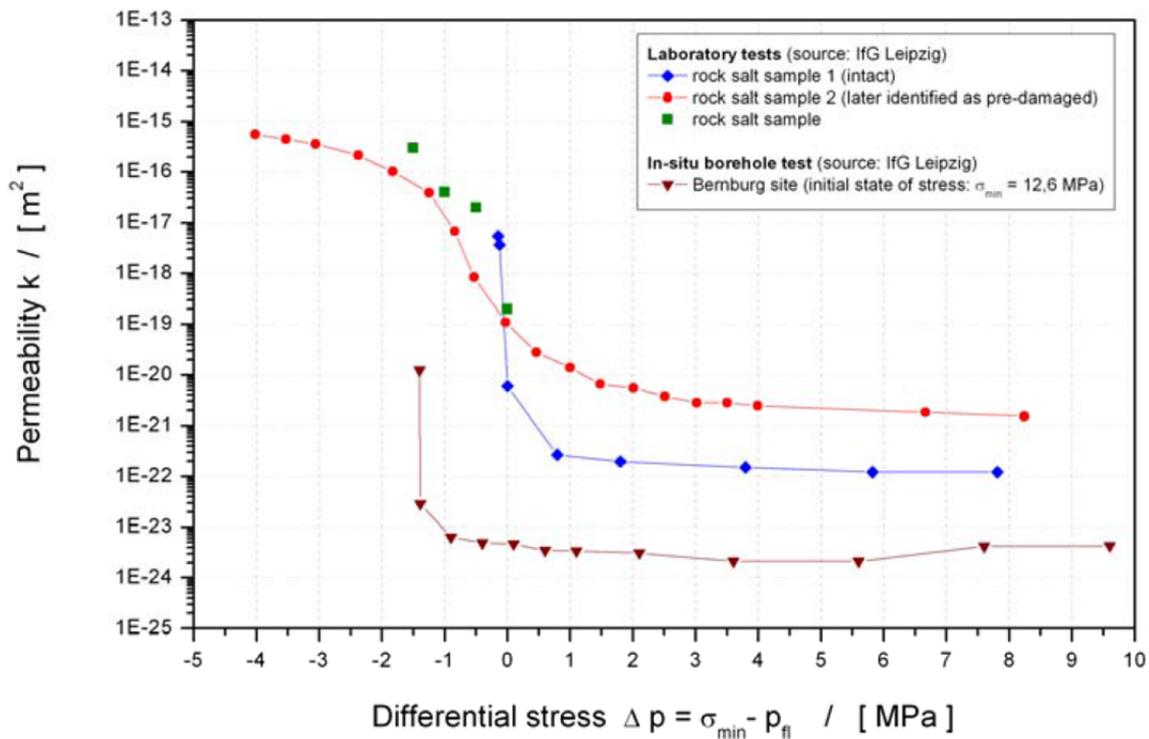


Abb. 2.9 Abnahme der Permeabilität im Konturbereich einer aufgefahrenen Strecke aufgrund der Druckentlastung /MÜL 11a/

2.3.3.2 Kontaktzone

Die Kontaktzone beschreibt den direkten Kontaktbereich zwischen dem Dammbauwerk und dem anstehenden Steinsalz mit Auflockerungszone und ist ein Bereich erhöhter Permeabilität. Zum einen ist das Steinsalz im direkten Konturbereich aufgrund der mechanischen Beanspruchung während der Streckenauffahrung stärker gestört. Zum anderen ist der Kontaktbereich zwischen dem Dammbauwerk und dem Gestein nicht immer formschlüssig und kann zu höheren Permeabilitäten führen. Diese Kontaktzone wird vermutlich relativ schnell nach Auflaufen des Salzgesteins auf den Streckenverschluss und dem Aufbau eines Stützdruckes geschlossen.

Die Kontaktzone ist demnach sehr klein ausgebildet. Laut /MÜL 11a/ wurde im Zusammenhang mit der Qualitätssicherung von Strömungsbarrieren die Dicke dieser Zone zwischen 5 mm und 10 mm bestimmt. In einem Ausnahmefall (an einem geomechanisch stark beanspruchten in situ Standort) wurde sie zu 45 mm bestimmt. Die ermittelten effektiven Lösungspermeabilitäten der Kontaktzonen lagen bei $1,0\text{E-}15 \text{ m}^2$ und $6,8\text{E-}16 \text{ m}^2$.

Obwohl nur sehr wenige Werte vorliegen, erscheint die Wahl einer Lösungspermeabilität von $1,0E-15 \text{ m}^2$ für die Kontaktzone derzeit eine angemessene Schätzung /MÜL 11a/.

2.3.3.3 Annahmen für die gestörte Zone

Für die Auflockerungszone wird eine mittlere initiale Permeabilität von $5,0E-18 \text{ m}^2$ /RAU 03/ (siehe Kap. 2.3.3) angenommen. Um Unsicherheiten abzudecken wird für die Auflockerungszone eine Mächtigkeit von 0,2 m im Modellgitter angenommen. Für die Zweiphasenflussparameter der Auflockerungszone besteht Forschungsbedarf. Die Stoff-Parameter für Salzgrus werden deshalb auch für die Auflockerungszone verwendet. Alle weiteren Unsicherheiten werden durch die Annahmen für die Kontaktzone abgedeckt /MAU 03/.

Für die Kontaktzone wird eine Permeabilität von $1,0E-15 \text{ m}^2$ angenommen (Kap. 2.3.3.2). Laut /MÜL 11a/ ist die Kontaktzone 1 cm mächtig. Da auch hier Unsicherheiten bestehen (Firstspalt), wird eine Mächtigkeit von 5 cm gewählt.

Die Auflockerungs- und Kontaktzonen werden zu einem Materialgebiet zusammengefasst und im weiteren Verlauf als **gestörte Zone** bezeichnet. Die integrale Permeabilität der gestörten Zone berechnet sich aus der Auflockerungs- und Kontaktzone und wird nachfolgend aus der Formel 2.4 berechnet (siehe Tab. 2.6).

$$\frac{\sum ki \cdot Ai}{\sum Ai} \quad (2.4)$$

ki = Permeabilität der verschiedenen Materialgebiete [m^2]

Ai = Querschnittsfläche der Materialgebiete [m^2]

Tab. 2.6 Integrale Permeabilität aus Kontakt- und Auflockerungszone für das Basismodell

Parameter	Wert
Permeabilität Auflockerungszone [m ²]	5,0E-18
Permeabilität Kontaktzone [m ²]	1,0E-15
Querschnitt Auflockerungszone [m ²]	5,76
Querschnitt Kontaktzone [m ²]	1,39
$\sum A_i$	7,15
$A_i \cdot k_i$ (Auflockerungszone)	4,49E-17
$A_i \cdot k_i$ (Kontaktzone)	1,39E-15
$\sum A_i \cdot k_i$	1,43E-15
integrale Permeabilität [m ²]	2,0E-16
Porosität aus der Poro-Perm-Beziehung	0,0436

Kompaktion

Aus der gerundeten integralen Permeabilität von 2,0E-16 m² errechnet sich aus der Poro-Perm-Beziehung (Kap. 2.2.2) eine Porosität von 4,36 % für die gestörte Zone. Die Kompaktionsgeschwindigkeit wird durch den f_{loc} Parameter bestimmt. Für den Basisfall wird ein mittlerer f_{loc} von 0,096 angenommen (siehe Kap. 2.2.2).

Ein weiterer Eingabeparameter für das Konvergenzmodul ist der Gebirgsdruck. Für die Modellrechnungen wird für eine postulierte Tiefe von 870 m Teufe und einer durchschnittlichen Dichte von 2.160 kg/m³ für das darüber liegende Gebirge ein lithostatischer Druck von 18,8 MPa errechnet. Sonstige Parameter insbesondere die des Zweiphasenflusses werden vom Steinsalz übernommen. Sie sind in den vorherigen Kapiteln beschrieben.

Im Normalfall ist zu erwarten, dass sich die Kontaktzone nach Erreichen des Stützdruckes, besonders im Bereich des Streckenverschlusses, relativ schnell schließt. Hier baut sich schnell ein Stützdruck auf, da der Sorelbeton als nicht kompaktierbar angenommen wird. Die Auflockerungszone wird vermutlich etwas langsamer verschlossen. Für das Basismodell werden die gleichen Kompaktionsparameter für die gestörte Zone und für den Salzgrusversatz angenommen. Eine Tabelle der Kompaktionsparameter befindet sich im Anhang A.

2.3.4 Annahmen für die zusätzlichen Gittermodelle

Die im Kapitel 2.1.2 beschriebenen Gittermodelle werden für Vergleichsrechnungen verwendet. Für die Materialgebiete gelten die gleichen hydraulischen Parameter wie für den Basisfall. Der wesentliche Unterschied der zusätzlichen Gittermodelle der Rechenfälle THMC 19 (viereckiger Querschnitt) und THMC 20 (kreisförmiger Querschnitt) zum Basisfall liegt in der getrennten Betrachtung der Kontakt- und Auflockerungszone. Hier werden die ermittelten Werte für die Permeabilität aus den Kapiteln 2.3.3 und 2.3.3.2 direkt verwendet. Die Porositäten errechnen sich aus der Poro-Perm-Beziehung (Tab. 2.8).

Für den Rechenfall THMC 21 (vereinfachtes Modell) wird eine integrale Permeabilität aus dem Streckenkern, der Kontakt- und Auflockerungszone errechnet. Unter der Anwendung des Verfahrens aus dem Kapitel 2.3.3.3 errechnet sich eine integrale Permeabilität von $2,85E-17 \text{ m}^2$. Die Porosität des Sorelbetons ist der dominierende Faktor für den Rechenfall THMC 21, aufgrund der großen Fläche im Modellquerschnitt, deshalb wird der Wert von 20 % für den gesamten Querschnitt übernommen (Tab. 2.8).

2.3.5 Randbedingungen

Die Simulationen verwenden die Dirichlet-Randbedingung. Die Dirichlet-Randbedingung implementiert einen festen Wert für Druck, Fluidsättigung und Temperatur an den Elementen an beiden Streckenenden.

Randbedingung A:

Die Annahme, dass der Infrastrukturbereich vor dem Streckenverschluss (Randbedingung A) in der Übergangsphase (< 50.000 Jahren) vollständig mit Lösung gesättigt ist, gilt als sehr unwahrscheinlich, da von einem Versagen der Schachtverschlüsse vor diesem Zeitraum nicht auszugehen ist. Die Annahme dient zum reinen Prozessverständnis des Auffüll- und Durchflussverhaltens eines Streckenverschlusses mit einer gestörten Zone.

Folgende Annahmen gelten für die Randbedingung A:

- gesättigte NaCl-Lösung
- hydrostatischer Druck von $1,0E7$ Pa
- Initiale Temperatur von 40 °C
- Porosität des Schotters vor dem Streckenverschluss beträgt 38 % /MÜL 12a/
- Die Permeabilität des Schotters beträgt $1,0E-8$ m² /MÜL 12a/

Der hydrostatische Druck von $1,0E7$ Pa der Randbedingung A errechnet sich aus einer postulierten Tiefe des Endlagers von 870 m und einer durchgehenden Wassersäule mit einer Dichte von 1.200 kg/m³ (NaCl gesättigt). Der Wert ist gerundet.

Randbedingung B:

Die Randbedingung B befindet sich auf der Einlagerungsseite des Endlagers. Für die Randbedingung B gelten folgende Annahmen:

- Die initiale Porosität des Salzgrusversatzes hinter dem Streckenverschluss beträgt 5 %.
- Der Porenraum ist mit Gas (Luft) gefüllt
- Atmosphärendruck von $1,0E5$ Pa
- Initiale Temperatur von 40 °C
- Nach der Poro-Perm-Beziehung (Kap. 2.2.2) ergibt sich bei einer Porosität von 5 % eine Permeabilität von $4,0E-16$ m².

Die Veränderung der Porosität und der Permeabilität aufgrund der Kompaktion durch Konvergenz und der Gasbildung im Endlager wird in den Modellrechnungen für die Randbedingung B in der Übergangsphase nicht betrachtet.

Flüssigphase

Es wird von gesättigter NaCl-Lösung für die Berechnungen ausgegangen.

Laugendichte = 1.185,1 kg/m³ unter den initialen Bedingungen von $P_0 = 1$ bar, $T_0 = 25$ °C, entsprechend einer Salzkonzentration von 24,98 Gew.-%, oder 5,06 molar NaCl /PRU 99/.

2.4 Tabellarische Zusammenfassung

Tab. 2.7 Parameter für den Basisfall

Parameter	Sorel-beton	Salzgrus-versatz	Gestörte Zone	Rand A	Rand B
Initialer Druck [Pa]	1,0E5	1,0E5	1,0E5	1,0E5	1,0E5
Initiale Temperatur [°C]	40	40	40	40	40
Initialer Laugenanteil	0,80	0,018	0,018	0,999	0,001
Initiale Permeabilität [m ²]	5,0E-19	8,97E-12	2,01E-16	1,0E-08	4,0E-16
Initiale Porosität	0,2	0,35	0,0436	0,38	0,05
Residuale Gassättigung	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Residuale Flüssigkeitssättigung	0,8	0,001	0,001	0,001	0,001
Lambda	0,33	0,73	0,73	0,73	0,73
Gaseindringdruck [Pa]	220.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Kompaktion	Nein	$f_{loc} = 0,096$ $G_2 = 10.000$	$f_{loc} = 0,096$ $G_2 = 10.000$	Nein	Nein

Tab. 2.8 Parameter der Gittermodelle für Vergleichsrechnungen (Beschreibung siehe Kap. 2.3.4)

Modellgitter	Auflockerungszone		Kontaktzone		Streckenkerne	
	Permeabilität [m ²]	Porosität [-]	Permeabilität [m ²]	Porosität [-]	Permeabilität [m ²]	Porosität [-]
Rechteckiger Querschnitt	5,0E-18	0,0233	1,0E-15	0,0597	5,0E-19	0,2
Kreisförmiger Querschnitt	5,0E-18	0,0233	1,0E-15	0,0597	5,0E-19	0,2
Vereinfachter Querschnitt					2,85E-17	0,2

3 Definition der Rechenfälle

Die Rechenfälle werden zur besseren Übersicht in Abhängigkeit vom Materialgebiet oder veränderter Parameter (gestörte Zone, Zweiphasenflussparameter, Fluidsättigungen usw.) in einzelne Themenkomplexe gruppiert (siehe Tab. 3.1). Die Rechenfälle erhalten die Bezeichnung THMC sowie eine laufende Nummer. THMC ist die Abkürzung für thermo, hydraulische, mechanische und chemische Prozesse, wobei für diesen Bericht nur hydraulische und mechanische Prozesse betrachtet wurden.

3.1 Basisfall

Der Basisfall **THMC 1** soll den wahrscheinlichen Zustand des Streckenverschlusses in der Nachverschlussphase des Endlagers darstellen. Der Basisfall entspricht den Annahmen aus dem Kapitel 2.3 bzw. der Tab. 2.7. In den weiteren Rechenfällen wird jeweils ein Parameter verändert, damit der direkte Einfluss auf den Laugenfluss erkennbar wird.

3.2 Gestörte Zone

Um den generellen Einfluss der gestörten Zone auf den Laugenfluss aufzuzeigen, wird im Rechenfall **THMC 2** die Permeabilität der gestörten Zone auf null gesetzt. Somit wird nur der Streckenkern durchströmt. So kann ein Einfluss der gestörten Zone und des Streckenkernes auf den Laugenfluss aufgezeigt werden.

In der Realität ist die Permeabilität der gestörten Zone in x- und y-z-Richtung unterschiedlich. In x-Richtung (axial) besitzt die gestörte Zone aufgrund der achsenparallelen Klüftung eine höhere Permeabilität als in y-z-Richtung (radial). Daher wird erwartet, dass die Flüssigkeitsmenge am Ende der Strecke gegenüber einer isotropen Permeabilität in x-y-z-Richtung erhöht ist bzw. der Durchbruch früher stattfindet, da das Fluid in der gestörten Zone radial in geringerem Maß gepuffert werden kann. Im Rechenfall **THMC 3** wird für die Flussrichtung in x-Richtung abdeckend die initiale Durchlässigkeit der Kontaktzone mit $1,0E-15 \text{ m}^2$ angenommen und für die radiale y-z-Richtung die Durchlässigkeit von aufgelockertem Steinsalz von $2,01E-16 \text{ m}^2$ beibehalten (Tab. 3.1).

3.3 Kapillardruck

Der Zweiphasenfluss wird in TOUGH2 über die relative Permeabilität und den Kapillardruck simuliert. Der Kapillardruck übt eine Sogwirkung auf Flüssigkeiten im ungesättigten Porenraum aus und beeinflusst somit den Laugenfluss. Der Kapillardruck steht im direkten Zusammenhang mit dem Gaseindringdruck, welcher in die Formel zur Berechnung des Kapillardruckes eingeht. Der eigentliche Gaseindringdruck wird erst wirksam, wenn der Porenraum im Sorelbeton mit Flüssigkeit gesättigt ist und sich ein Gasdruck vor dem Streckenverschluss aufbaut. Der Gaseindringdruck ist der Gasdruck ab dem die Flüssigkeit aus dem Porenraum verdrängt werden kann und sich ein zusammenhängender Fließpfad für das Gas einstellt. Deshalb wird die Variation der Kapillardrücke im Salzgrusversatz, der gestörten Zone und im Sorelbeton über eine Veränderung der Gaseindringdrücke erreicht (siehe /FRI 13/). Für den Rechenfall **THMC 4** wird der Kapillardruck in allen Materialien vollständig abgeschaltet. Für die Rechenfälle **THMC 5 – 7** wird der Gaseindringdruck im Salzgrusversatz und der gestörten Zone jeweils auf 10 kPa, 100 kPa und 1.000 kPa gesetzt. Vom Rechenfall **THMC 8 – 10** werden die Gaseindringdrücke im Sorelbeton in Stufen von 0,1 0,5 und 1 MPa erhöht (Tab. 3.1).

3.4 Residuale Laugensättigung

Die Gaseindringdrücke sind für alle Rechenfälle auf die Standardwerte des Basisfalles THMC 1 eingestellt und betragen im Salz 5 kPa und im Sorelbeton 220 kPa. Die residualen Gassättigungen werden nicht verändert.

In den Rechenfällen **THMC 11** und **12** ist die residuale Laugensättigung im Salzgrus sowie in der gestörten Zone um eine Größenordnung auf 0,01 % (0,0001) verringert (THMC 11) und um zwei Größenordnungen auf 10 % (0,1) erhöht (THMC 12).

Im Basisfall ist der Porenraum im Sorelbeton zu 80 % (0,8) mit Lauge gefüllt. Diese Lauge wird als immobil angenommen /Mül 11b/. Die residuale Laugensättigung im Sorelbeton ist um eine Größenordnung auf 8 % (0,08) (**THMC 13**) bzw. zwei Größenordnungen auf 0,8 % (0,008) (**THMC 14**) verringert (Tab. 3.1).

3.5 Kompaktion

Zur Einschätzung der Kompaktion auf den Laugenfluss durch den Streckenverschluss werden die entsprechenden Parameter variiert. Für den Rechenfall **THMC 15** ist die Kompaktion in allen Materialien ausgeschaltet. Für den Rechenfall **THMC 16** ist die Kompaktion nur in der gestörten Zone abgestellt und der Salzgrusversatz kompaktiert. In dem Rechenfall **THMC 17** wird das f_{loc} in der gestörten Zone und dem Salzgrusversatz auf den Wert 0,48 (5 % Porosität bei 100 Jahren) und im Rechenfall **THMC 18** auf 0,048 (5 % bei 1.000 Jahren) eingestellt (Tab. 2.4).

3.6 Zusätzliche Gittermodelle

Der mögliche Einfluss der Gittergeometrie auf den Laugenfluss wird in den Rechenfällen **THMC 19 – 21** mit drei weiteren Gittergeometrien untersucht:

- Rechenfall THMC 19, ein rechteckiges Gittermodell mit getrennter Auflockerungs- und Kontaktzone,
- Rechenfall THMC 20, ein kreisförmiges Gittermodell mit getrennter Auflockerungs- und Kontaktzone und
- Rechenfall THMC 21, ein vereinfachtes Gittermodell dessen Querschnitt nicht weiter unterteilt wird (THMC 21).

Die Gittermodelle der Rechenfälle THMC 19 und 20 berücksichtigen die im Kap. 2.3 aufgeführte Permeabilität und Porosität für die Auflockerungs- und Kontaktzone. Das Gittermodell THMC 21 entspricht einem vereinfachten Modell, da der Streckenquerschnitt nur aus einem Element besteht. Die Durchlässigkeit ergibt sich als integraler Wert aus der Auflockerungs-, Kontaktzone und dem Streckenkern. Es wird die Porosität von Sorelbeton für den gesamten Querschnitt angenommen. Zudem entspricht die residuale Flüssigkeitssättigung des gesamten Querschnittes der des Sorelbetons. Alle sonstigen Eingabeparameter werden vom Basismodell übernommen. Anhand des Vergleichs der Gittermodelle soll untersucht werden, ob auch mit einem stark vereinfachten Gittermodell ein Durchfluss aussagekräftig abgebildet werden kann, bzw. wie hoch der Unterschied zu den aufwendigeren Modellen ist (Tab. 3.1).

3.7 Tabelle der Rechenfälle

Tab. 3.1 Rechenfälle

Die Farben kennzeichnen unterschiedliche Themenkomplexe.

	Rechenfall	Beschreibung
	THMC 1	Basisfall
Gestörte Zone	THMC 2	Permeabilität und Porosität der gestörten Zone ist null
	THMC 3	Permeabilität für die x-Richtung der gestörten Zone auf $1,0E-15 \text{ m}^2$ gesetzt. y-z-Richtung behält die Permeabilität von $2,01E-16 \text{ m}^2$
Kapillardruck	THMC 4	Kapillardruck in allen Materialien wird ausgeschaltet
	THMC 5	Gaseindringdruck im Salz wird auf 10 kPa erhöht
	THMC 6	Gaseindringdruck im Salz wird auf 100 kPa erhöht
	THMC 7	Gaseindringdruck im Salz wird auf 1.000 kPa erhöht
	THMC 8	Gaseindringdruck im Sorelbeton wird auf 0,1 Mpa verringert
	THMC 9	Gaseindringdruck im Sorelbeton wird auf 0,5 Mpa erhöht
	THMC 10	Gaseindringdruck im Sorelbeton wird auf 1 Mpa erhöht
Residuale Fluidsättigung	THMC 11	Die residuale Flüssigkeitssättigung im Salzgrus sowie in der gestörten Zone wird um eine Größenordnung auf 0,01 % erhöht
	THMC 12	Die residuale Flüssigkeitssättigung im Salzgrus sowie in der gestörten Zone wird um zwei Größenordnungen auf 10 % erhöht
	THMC 13	Die residuale Flüssigkeitssättigung im Sorelbeton wird um den Faktor 10 auf 8 % verringert
	THMC 14	Die residuale Flüssigkeitssättigung im Sorelbeton wird um den Faktor 100 auf 0,8 % verringert
Kompaktion	THMC 15	Kompaktion in allen Materialien ausgeschaltet
	THMC 16	Keine Kompaktion in der gestörten Zone nur im Salzgrusversatz
	THMC 17	$f_{loc} = 0,48$ im Salzgrusversatz und der gestörten Zone
	THMC 18	$f_{loc} = 0,048$ im Salzgrusversatz und der gestörten Zone
Zusätzliche Gittermodelle	THMC 19	Rechteckiges Gittermodell mit getrennter Auflockerungs- und Kontaktzone
	THMC 20	Kreisförmiges Gittermodell mit getrennter Auflockerungs- und Kontaktzone
	THMC 21	Vereinfachtes Gittermodell mit einer integralen Permeabilität über den gesamten Querschnitt

4 Auswertung und Ergebnisse

Es wurden mehrere Rechenfälle mit Veränderung eines Parameters erstellt (Tab. 3.1), um den Einfluss der Parameter auf den Fließprozess um und durch den Streckenverschluss zu untersuchen. Als Indikator dienen die durchflossene Laugenmasse, sowie der Zeitpunkt des Laugendurchbruchs und der Laugenfluss nach 50.000 Jahren im Vergleich zum Basisfall.

An fünf Punkten (A – E) (Abb. 4.1) entlang der Modellstrecke werden Daten (Laugenfluss, Sättigung, Druck usw.) aus den Elementen aufgezeichnet. Die Punkte A bis C dienen zur Plausibilitätsprüfung in Bezug auf den Massenfluss durch die einzelnen Querschnittselemente. Die eigentliche Auswertung erfolgt am Streckenabschnitt D. TOUGH2 schreibt zwei Arten von Daten in separate Ausgabedateien:

- Zustandsvariablen (s.g. Primärvariablen) für die einzelnen Elemente (z. B. Druck und Fluidsättigung) für die Punkte A – E
- Fluidflüsse (Gas- und Flüssigphase) zwischen zwei Elementen (Fluss A – D)

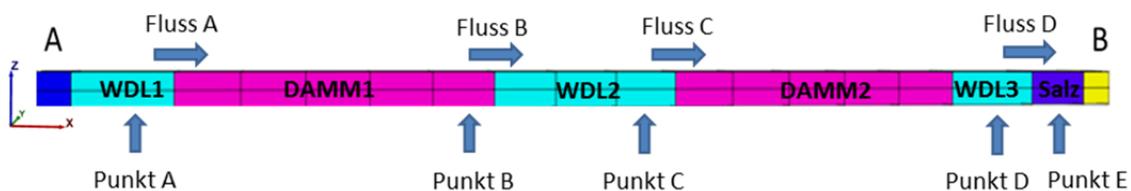


Abb. 4.1 Messpunkte im Streckenverlauf, für den Laugenfluss (Fluss A – E) und die Zustandsvariablen (Punkt A – E)

Besonderes Augenmerk bei der Auswertung wird auf den Flüssigkeitsaustausch zwischen dem Streckenkern und der gestörten Zone gelegt. Der Austausch von Fluiden wird signifikant durch die Gittergeometrie beeinflusst. Elemente die mit großen Kontaktflächen untereinander verbunden sind, weisen den größten relativen Fluidaustausch untereinander auf. Ein weiterer Faktor, der den Fluidfluss beeinflusst, ist der Querschnitt der Elemente, da dieser direkt in die Flussgleichungen eingeht.

Da der Fluidfluss durch den Streckenquerschnitt (Abb. 4.2) in y-z-Richtung symmetrisch ist, werden die Daten der Rechnungen nur für die Elemente 1 bis 8 herausgeschrieben (siehe Abb. 4.2). Dies reduziert die Anzahl an auszuwertenden Elementen.

Die Benennung der Elemente erfolgt nach der Position im Streckenverlauf und der Position im Querschnitt, z. B. wird das Element 6 am Streckenabschnitt D als „D.6“ bezeichnet.

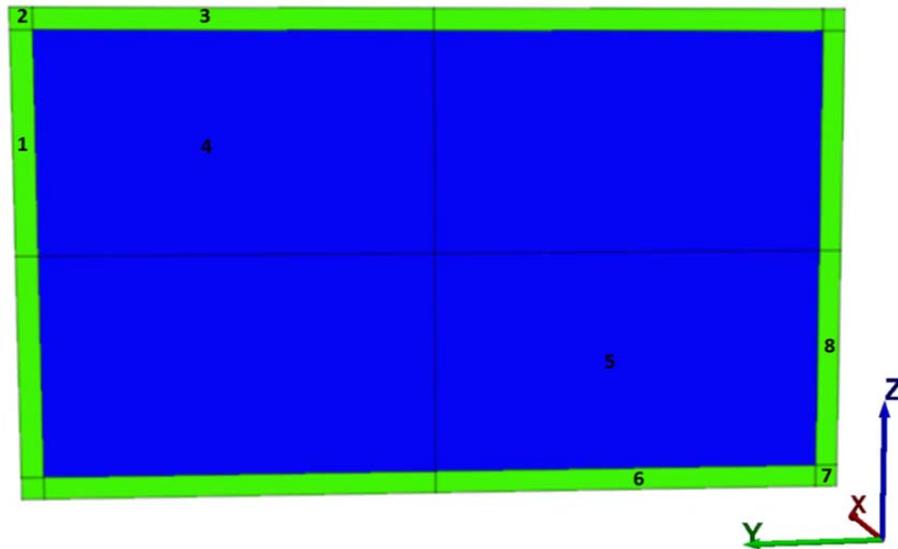


Abb. 4.2 Messpunkte im Querschnitt der Modellstrecke

Aufgrund der Symmetrie des Fluidflusses in y-z-Richtung können die Rechenergebnisse auf die benachbarten Elemente gespiegelt werden.

Die Auswertung der Rechenergebnisse erfolgt durch:

- Vergleich der Querschnittselemente, jeweils für einen Rechenfall (Prozessverständnis)
- Vergleich der einzelnen Rechenfälle untereinander (Einfluss der Parametervariation)

Der Vergleich der Elemente in einem Rechenfall ist nur zum Prozessverständnis geeignet (z. B. Sättigungs- oder Druckverlauf in der Strecke). Es wird im Wesentlichen der Basisfall durch dieses Verfahren ausgewertet. Die Auswertung der Rechenfälle erfolgt in drei Schritten.

- Auswertung des Laugenflusses des Basisfalls
- Auswertung der Rechenfälle innerhalb der Themenkomplexe
- Vergleich aller Rechenfälle, um auch die einzelnen Themenkomplexe untereinander vergleichen zu können.

4.1 Auswertung Basisfall (THMC 1)

Zunächst wird der Basisfall ausgewertet um ein Prozessverständnis zur Kompaktion, dem Druckverlauf, dem Sättigungsprozess und der Laugenflüsse durch den Streckenverschluss zu erhalten.

4.1.1 Kompaktion

Ein wichtiger Parameter, der den Laugenfluss beeinflusst, ist die Kompaktion der gestörten Zone und des Salzgrusversatzes hinter dem Streckenverschluss. Die Kompaktion kann über die Abnahme der Porosität eingeschätzt werden. Der Kompaktionsprozess reduziert den Porenraum in der gestörten Zone (Messpunkte B.6 – E.6) bei einem f_{loc} von 0,096 in 100 Jahren von 4,36 % Porosität auf die Grenzporosität von 1 %. Im Salzgrusversatz (Messpunkt E.5) reduziert sich der Porenraum in 1.000 Jahren von 35 % auf die angenommene Restporosität von einem Prozent (Abb. 4.3).

Im Messpunkt A.6 (gestörte Zone am ersten Widerlager) verringert sich die Porosität wesentlich langsamer als in den anderen Messpunkten. Erst nach ca. 2.000 Jahren stellt sich eine Restporosität von einem Prozent ein (Abb. 4.3). Dies liegt daran, dass der Porenraum im Messpunkt A.6 mit Lauge gesättigt ist bevor der Kompaktionsprozess beendet ist. Zudem steht am ersten Widerlager ein hydrostatischer Druck von 10 MPa an, der dem anstehenden lithostatischen Druck von 18,8 MPa entgegenwirkt. Dies deckt sich auch mit den Aussagen von /POP 12/:

Ausgehend von der vorliegenden experimentellen Datenbasis wird eingeschätzt, dass infolge der Überlagerung beanspruchungs-dominierter und zeitabhängiger Kompaktionsprozesse auch bei Erreichen eines isostatischen Belastungszustandes die Versatzkompaktion nicht zum Stillstand kommt, sondern innerhalb eines Zeitraumes von weniger als tausend Jahren über Kriechen zu einer vollständigen Kompaktion von Salzgrus bis zu einer Porosität von Null führt (d. h. summarisch von 1 ± 1 % mit Einschluss vorhandener Fluide).

Bereits im Messpunkt B.6 hat sich der Fluiddruck soweit verringert, dass der Kompaktionsprozess ohne Verzögerung stattfindet und nach 100 Jahren die Restporosität erreicht hat (Abb. 4.3).

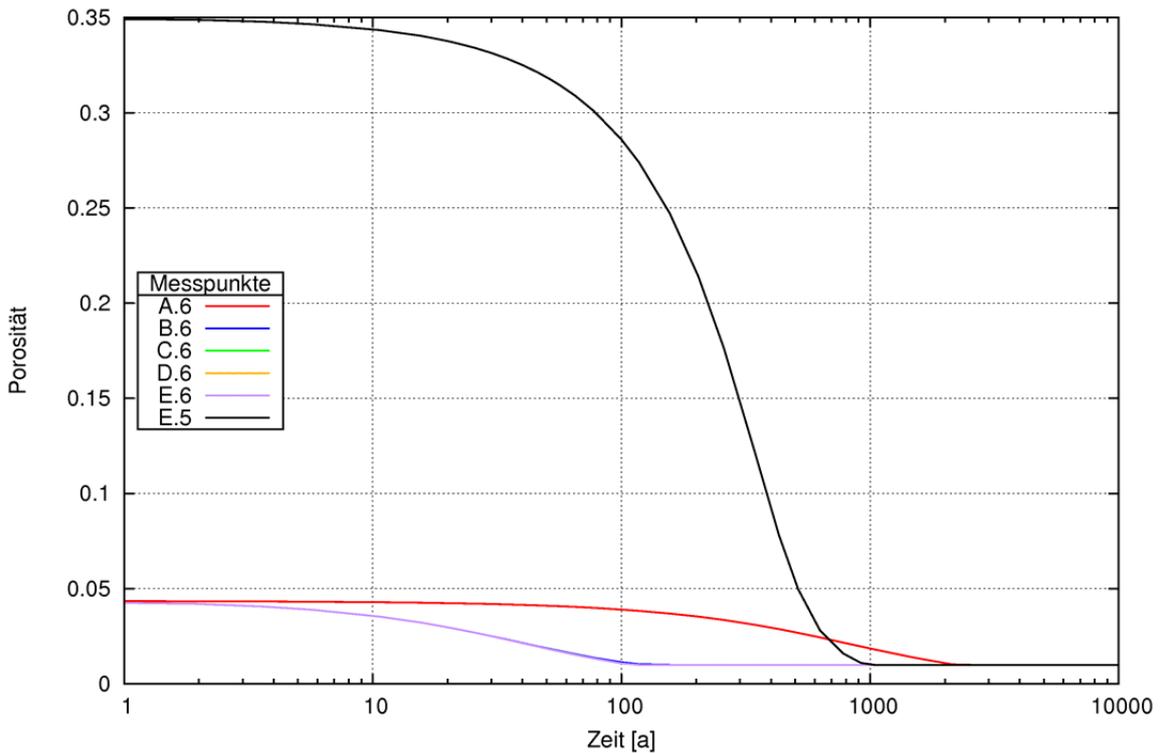


Abb. 4.3 Porositätsverlauf in der gestörten Zone (A.6 – E.6) und im Salzgrusversatz (E.5) (siehe Abb. 4.1)

Die Porositätsverläufe für die Messpunkte B.6 – E.6 sind identisch und überlagern sich.

Es ist zu beachten, dass für die TOUGH2-Modellrechnungen immer ein konvektiver Laugenfluss stattfinden kann, der zu einem Druckausgleich zwischen den Elementen führt. /POP 12/ weist allerdings darauf hin, dass unterhalb einer bestimmten Porosität die vorhandenen Fluide im Porenraum eingeschlossen werden, da die einzelnen Poren untereinander nicht mehr miteinander verbunden sind. Dann ist kein advektiver Fluidfluss mehr möglich. Bei welcher Porosität dies der Fall ist, ist noch F & E.

4.1.2 Druckverlauf

Der hydrostatische Druck am Streckenschluss nimmt vom Messpunkt A.5 bis zum Messpunkt E.5 bzw. vom Messpunkt A.6 bis E.6 (gestörte Zone) (siehe Abb. 4.1) sukzessiv von $1E7$ Pa auf $1E6$ Pa ab (Abb. 4.4). Im Messpunkt B.5 (Sorelbeton) sind Schwankungen des Druckes aufgrund der Kompaktion der gestörten Zone zwischen 100 und 1.000 Jahren erkennbar (Abb. 4.4). Zum Zeitpunkt des Laugendurchbruchs in den Messpunkten C.5 bis E.5 (Sorelbeton) ist die Kompaktion in der gestörten Zone

bzw. im Salzgrusversatz nahezu (Ausnahme Streckenquerschnitt C) abgeschlossen. Deshalb ist der Einfluss der Kompaktion auf den Druck nicht mehr erkennbar.

Der Einfluss der Porositätsabnahme durch die Kompaktion auf den Druckverlauf zeigt sich insbesondere in den Messpunkten A.6 und B.6 (Abb. 4.4). Durch die schnelle Aufsättigung des Porenraumes in der gestörten Zone direkt hinter der Randbedingung A steht hier bereits nach 50 Jahren der hydrostatische Druck von $1E7$ Pa an. Dieser verlangsamt den Kompaktionsprozess und führt zu einem Anstieg des Druckes im Messpunkt A.6 auf bis zu 16 MPa. Nach ca. 2.000 Jahren ist der Kompaktionsprozess im Messpunkt A.6 beendet und es stellt sich der hydrostatische Druck der Randbedingung von $1E7$ Pa ein. In den folgenden Messpunkten B.6 bis E.6 ist der hydrostatische Druck so gering, dass keine Verlangsamung des Kompaktionsprozesses und damit auch keine signifikante Beeinflussung des Druckverlaufes induziert wird.

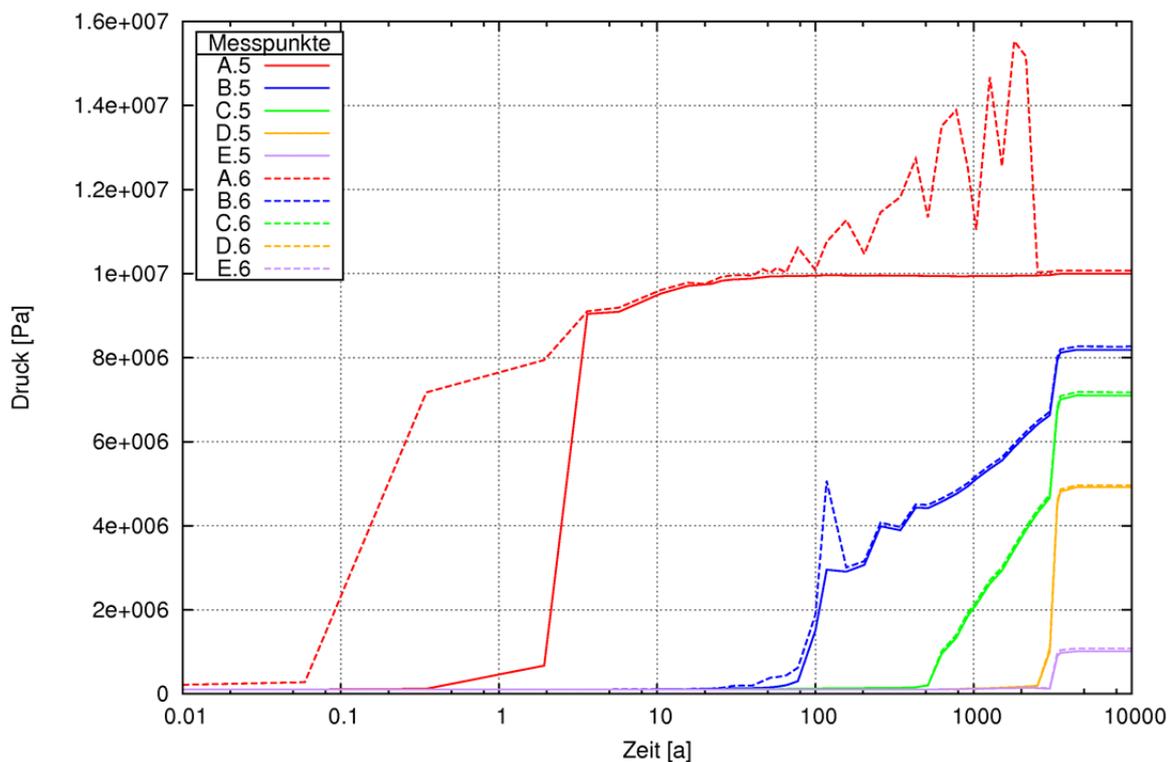


Abb. 4.4 Druckverlauf für die Messpunkte A.5 – E.5 im Sorelbeton (durchgezogene Linie) und für die Messpunkte A.6 – E.6 (gestrichelte Linien) in der gestörten Zone

Die Messpunkte gleicher Streckenabschnitte A – E sind in gleicher Farbe dargestellt (siehe Abb. 4.1).

Die Abb. 4.5 zeigt den Druckverlauf der einzelnen Messpunkte D.1 bis D.8 während des Sättigungsvorgangs des Streckenabschnitts D. Wie zu erwarten, zeigt sich der gravitative Einfluss in einem geringen Unterschied des Druckverlaufs nach der vollständigen Sättigung an den einzelnen Messpunkten. Die Messpunkte D.2 und D.3 weisen einen geringeren hydrostatischen Druck auf als die Messpunkte D.6 und D.7, da sie sich am höchsten Punkt im Modellgitter befinden.

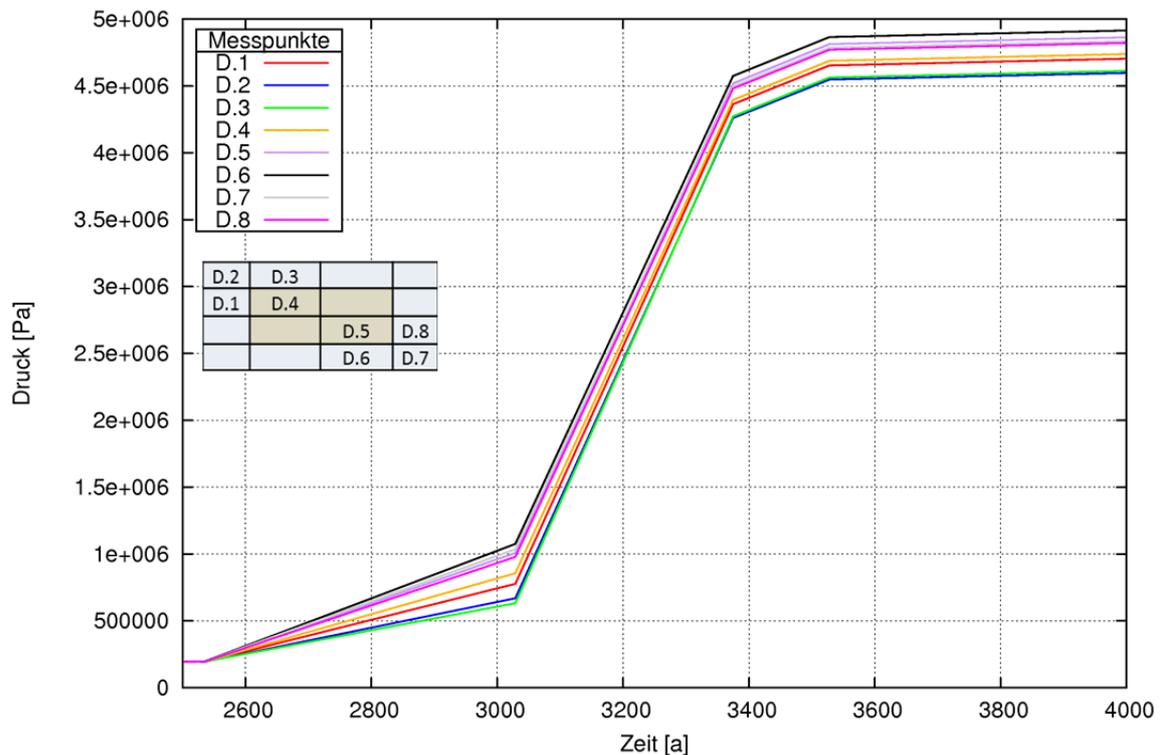


Abb. 4.5 Druckverlauf in den acht Messpunkten D.1 – D.8 (Streckenabschnitt D)

4.1.3 Sättigungsverlauf und Laugenfluss

Die Flüsse von der Randbedingung A zur Randbedingung B oder vom Streckenkern in die gestörte Zone sind in den Abbildungen immer positiv, Flüsse in umgekehrter Richtung sind negativ. Der merkbliche Anstieg der Laugensättigung im Porenraum wird als Laugendurchbruch bezeichnet.

Die Strecke sättigt sich vom Streckenabschnitt A bis zum Streckenabschnitt E sukzessiv mit Lauge auf (Abb. 4.6). Es zeigt sich in den Streckenabschnitten A und B, dass zu Beginn der Kompaktion der Laugenfluss in der gestörten Zone dem Laugenfluss im Sorelbeton vorausseilt. Bereits ab dem Streckenabschnitt C gleichen sich die Laugen-

durchbruchzeiten für beide Materialschichten an. In den Messpunkten C.6 bis E.6 ist eine zunehmende Sättigung des Porenraumes bis 100 Jahre zu erkennen, obwohl der Laugendurchbruch z. B. für den Messpunkt C.6 erst 300 Jahre später stattfindet (Abb. 4.6). Im Porenraum befindet sich eine initiale Feuchtigkeit. Durch den Kompaktionsprozess verringert sich der Porenraum und damit erhöht sich zwangsläufig der Sättigungsgrad im Porenraum.

Im Streckenabschnitt E ist der scheinbar frühere Laugendurchbruch im Gegensatz zum Streckenabschnitt D auf die Kompaktion und die dadurch induzierte Erhöhung der Laugensättigung im Porenraum zurückzuführen, deshalb fließt schon vor dem Laugendurchbruch Flüssigkeit aus dem Salzgrusversatz in die gestörte Zone (Abb. 4.6).

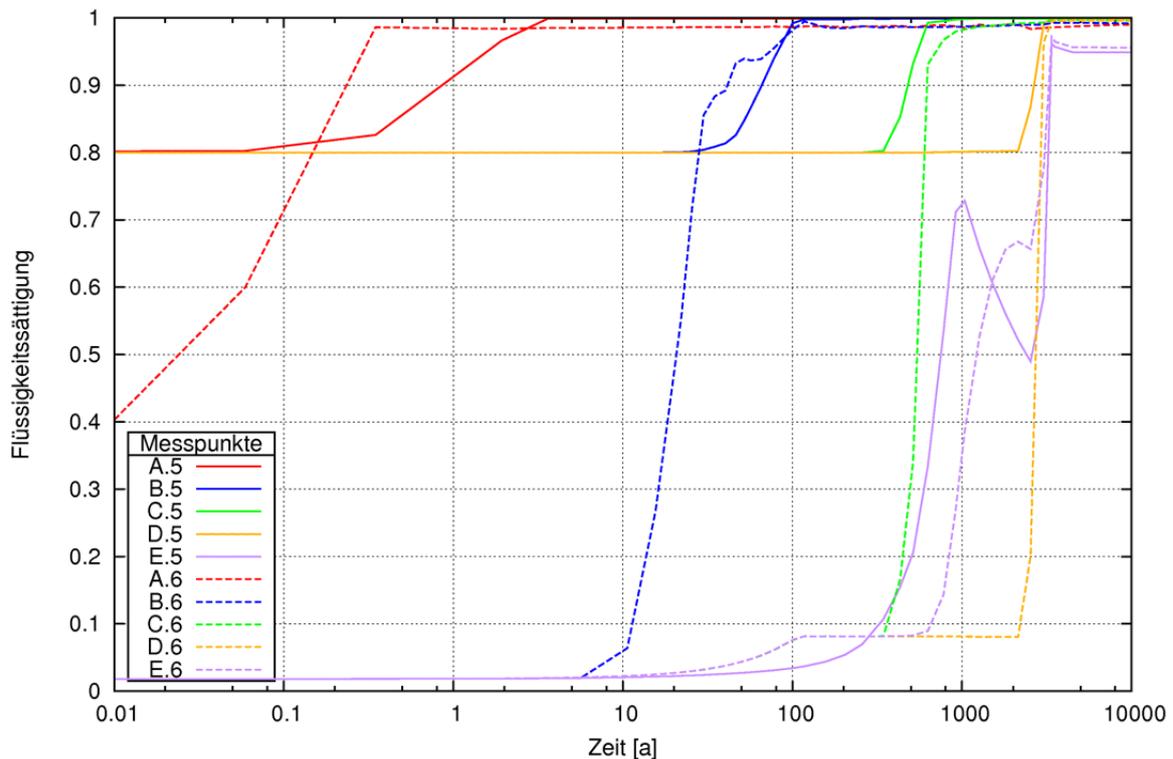


Abb. 4.6 Flüssigkeitssättigung für die Messpunkte A.5 – E.5 im Sorelbeton und für die Messpunkte A.6 – E.6 (gestrichelte Linien) in der gestörten Zone

Die Messpunkte gleicher Streckenabschnitte A – E sind gleicher Farbe dargestellt (siehe Abb. 4.1).

Die Elemente im Streckenabschnitt D werden im Basisfall nach ca. 2.100 Jahren mit Lauge gesättigt (Abb. 4.7). Die leicht unterschiedlichen Sättigungsverläufe werden durch den Einfluss der Schwerkraft aufgrund der unterschiedlichen Lage der Elemente im Modellgitter hervorgerufen.

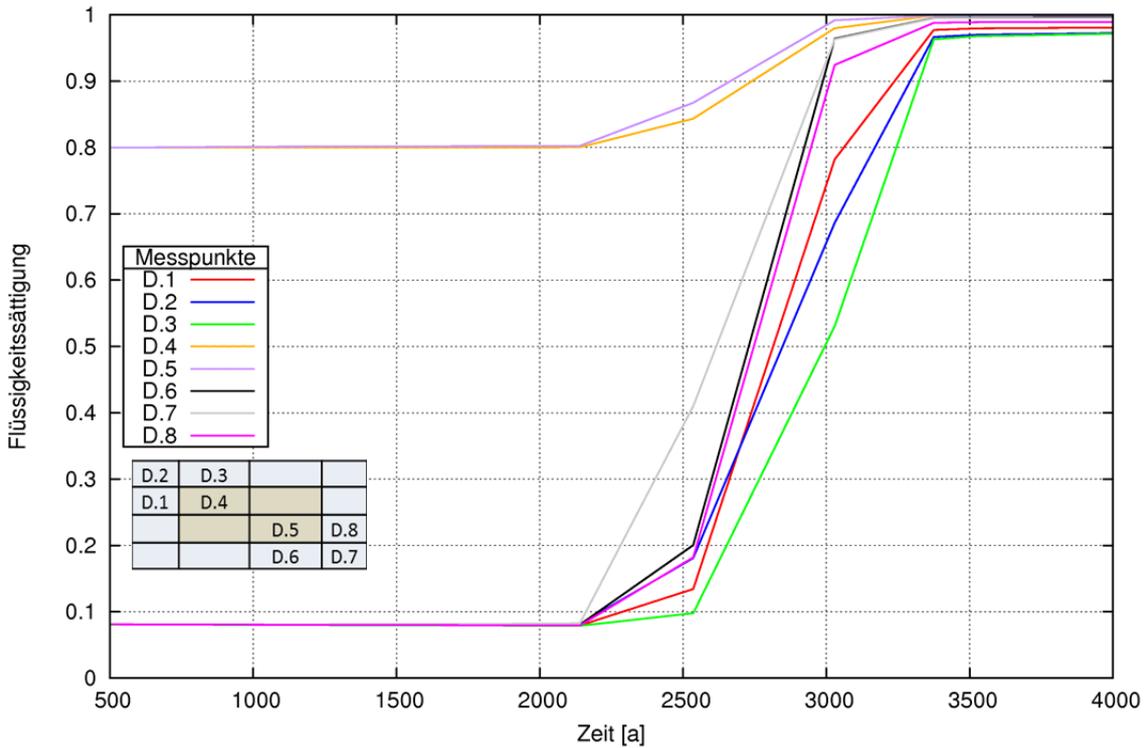


Abb. 4.7 Flüssigkeitssättigung in den Messpunkten D.1 bis D.8 (Streckenabschnitt D)

Nach ca. 2.500 Jahren stellt sich in allen Elementen des Streckenabschnitts D ein merklicher Laugenfluss ein (Abb. 4.8). Dies ist auch in Abb. 4.7 an einem Anstieg der Sättigung mit der Zeit erkennbar. Der gesamte Porenraum ist nach ca. 3.000 Jahren mit Lauge gesättigt. Dies ist in Abb. 4.8 anhand eines konstanten Laugenflusses erkennbar. Es zeigt sich, jeweils für die gestörte Zone und für den Streckenkern, dass die unteren Elemente die größeren Durchflussmengen aufweisen. Dies liegt an dem früheren Laugendurchbruch in den unteren Elementen, da sich die Laugenfront beim Aufsättigungsvorgang aufgrund der Gravitation wie ein Keil durch die Strecke bewegt. Nach ca. 3.500 Jahren stellt sich der maximale Laugenfluss in den Messpunkten D.4 und D.5 von $1,55E-7$ kg/s (Sorelbeton) und $2,4E-8$ kg/s (gestörte Zone) ein (Abb. 4.8).

Für die anderen Elemente dauert der Sättigungsvorgang je nach Lage im Modellgitter zwischen 3.000 und 3.500 Jahre. Der Laugenfluss ist im Sorelbeton nach der Kompaktion größer als in der gestörten Zone. Da der Sorelbeton nicht kompaktiert behält er seine Permeabilität von $5,0E-19$ m² bei. Die Permeabilität der gestörten Zone und des Salzgrusversatzes wird durch die Poro-Perm-Beziehung angepasst. Bei einer Porosität von 1 % errechnet sich daraus eine Permeabilität von $1,0E-19$ m².

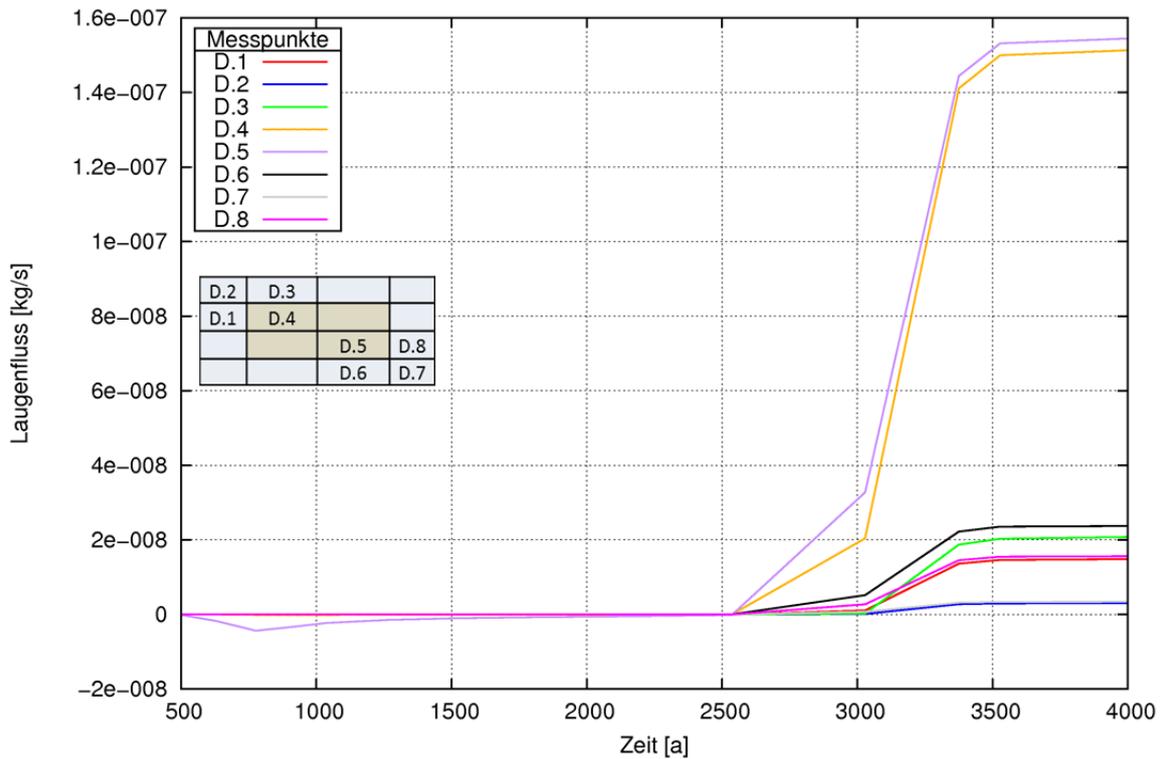


Abb. 4.8 Laugenfluss durch die Messpunkte D.1 bis D.8 (Streckenabschnitt D)

Die Aufsättigung der gestörten Zone mit Lauge erfolgt hauptsächlich durch Zuflüsse aus dem Sorelbeton, der den höheren Laugenfluss hat (Abb. 4.8). Die Abb. 4.9 zeigt den Laugenfluss vom Streckenkern in die gestörte Zone. Es ist weiter zu erkennen, dass – vermutlich aufgrund der Schwerkraft – der Laugenfluss vom Element D.5 zu D.6 nach 3.500 Jahren am höchsten ist.

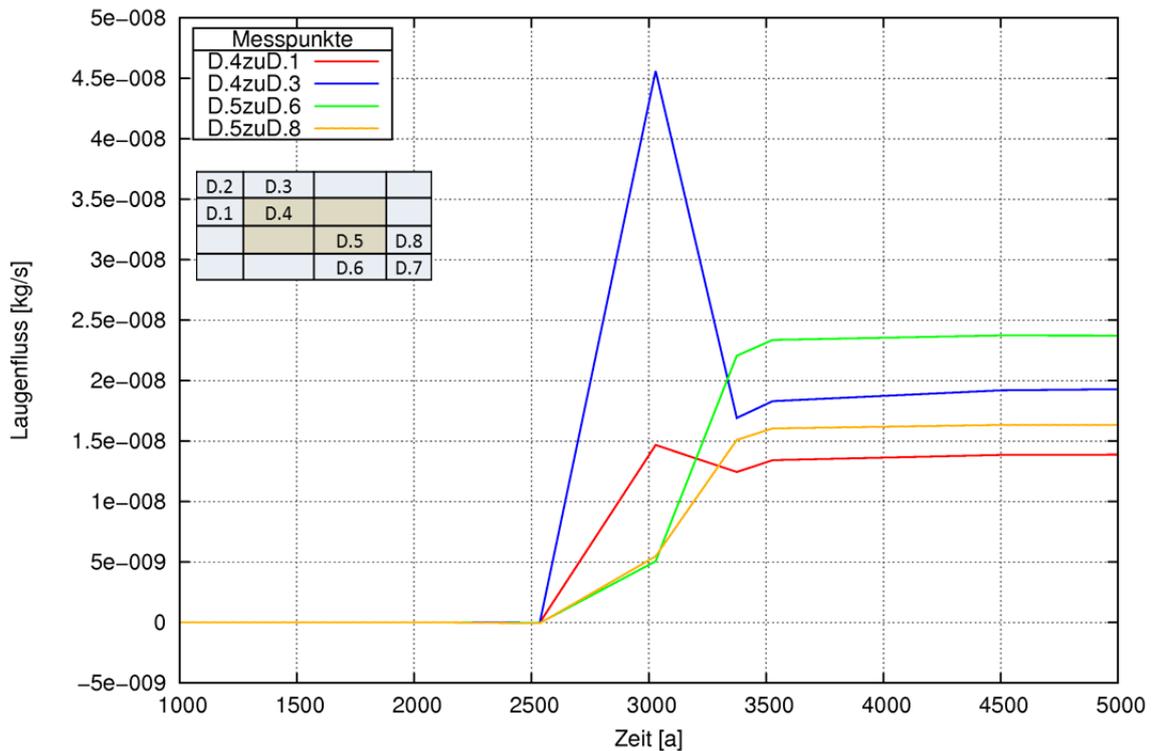


Abb. 4.9 Laugenfluss zwischen dem Streckenkern (Messpunkte D.4, D.5) und der gestörten Zone (Messpunkte D.1, D.3, D.6 und D.8) im Streckenabschnitt D
Positive Werte bedeuten einen Fluss vom Streckenkern in die gestörte Zone.

Die Tab. 4.1 zeigt die summierten Laugenmengen, die nach 50.000 a durch die einzelnen Messpunkte vom Streckenabschnitt D zu E geflossen sind (links absolute Werte, rechts relative Werte in %). Die Elemente des Streckenkerns (Sorelbeton) sind blau und die Elemente der gestörten Zone sind rot gekennzeichnet. Insgesamt sind im Basisfall nach 50.000 Jahren 1.155.272 kg Lauge durch den Streckenabschnitt D geflossen. Der größte Anteil der Lauge (911.848 kg bzw. 79 %) ist über den Streckenkern geflossen.

Tab. 4.1 Schematische Darstellung der Elemente des Streckenquerschnittes D und deren durchflossene Laugenmasse nach 50.000 Jahren in kg

Die linke Tabelle zeigt die summierten Laugenmassen für alle Elemente im Streckenquerschnitt. In der rechten Tabelle sind die prozentualen Anteile der einzelnen Elemente am gesamten Laugendurchfluss dargestellt.

4.572	31.023	31.023	4.572	0,40	2,69	2,69	0,40
22.594	225.641	225.641	22.594	1,96	19,53	19,53	1,96
23.195	230.283	230.283	23.195	2,01	19,93	19,93	2,01
4.929	35.399	35.399	4.929	0,43	3,06	3,06	0,43

Die Abb. 4.10 zeigt den Flüssigkeitsaustausch zwischen dem Streckenkern und der gestörten Zone für den Streckenabschnitt D. Insgesamt fließen 218.128 kg Lauge vom Streckenkern in die gestörte Zone. Dies sind 24 % bezogen auf den gesamten Abfluss aus dem Streckenkern von 911.848 kg im Streckenabschnitt D.

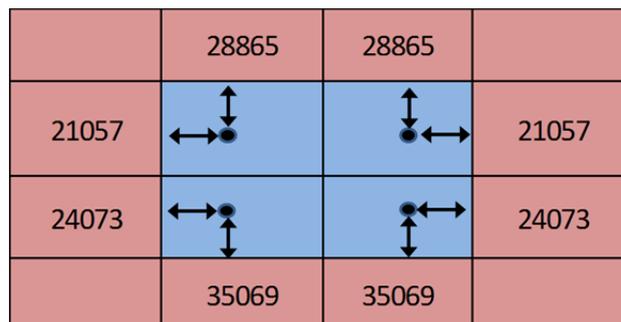


Abb. 4.10 Flüssigkeitsaustausch zwischen der gestörten Zone und dem Streckenkern

4.2 Gestörte Zone (THMC 2 und THMC 3)

Im Rechenfall THMC 2 sind die Porosität und die Permeabilität der gestörten Zone null, somit fließt Lauge nur durch den Streckenkern (Sorelbeton). Im Rechenfall THMC 3 wird eine unterschiedliche Permeabilität in x- bzw. y-z-Richtung angenommen.

Der Zeitpunkt des Laugendurchbruchs zwischen dem Sorelbeton und der gestörten Zone ist im Streckenabschnitt D für die Rechenfälle THMC 1 und 3 identisch (Abb. 4.11). Durch den Flüssigkeitsaustausch sättigen sich die unterschiedlichen Schichten

gegenseitig auf. Somit ist der Laugendurchbruch in den unterschiedlichen Materialien identisch. Der Zeitpunkt des Sättigungsbeginns mit Lauge im Messpunkt D.5 ist für den Rechenfall THMC 3 und den Basisfall identisch. Der Laugendurchbruch im Messpunkt D.5 für den Rechenfall THMC 2 findet ca. 800 Jahre später als im Basisfall statt (Abb. 4.11). Besonders im Bereich direkt hinter der Randbedingung A wird der Laugenfluss vor dem Erreichen der Grenzporosität durch die höhere Permeabilität in der gestörten Zone im Gegensatz zum Sorelbeton dominiert. Es wird vermutet, dass durch das Fehlen der gestörten Zone im Rechenfall THMC 2 der Laugenfluss verlangsamt wird und dadurch der Laugendurchbruch später stattfindet.

Für die gestörte Zone ist der Laugenfluss im Messpunkt D.6 für den Rechenfall THMC 2 verständlicherweise null (Abb. 4.11 und Abb. 4.12). Der Laugendurchbruch des Rechenfalls THMC 3 ist im Messpunkt D.6 identisch zu dem des Basisfalls. Der Anstieg der Flüssigkeitssättigung im Porenraum bis 100 Jahren wird durch die Kompaktion hervorgerufen.

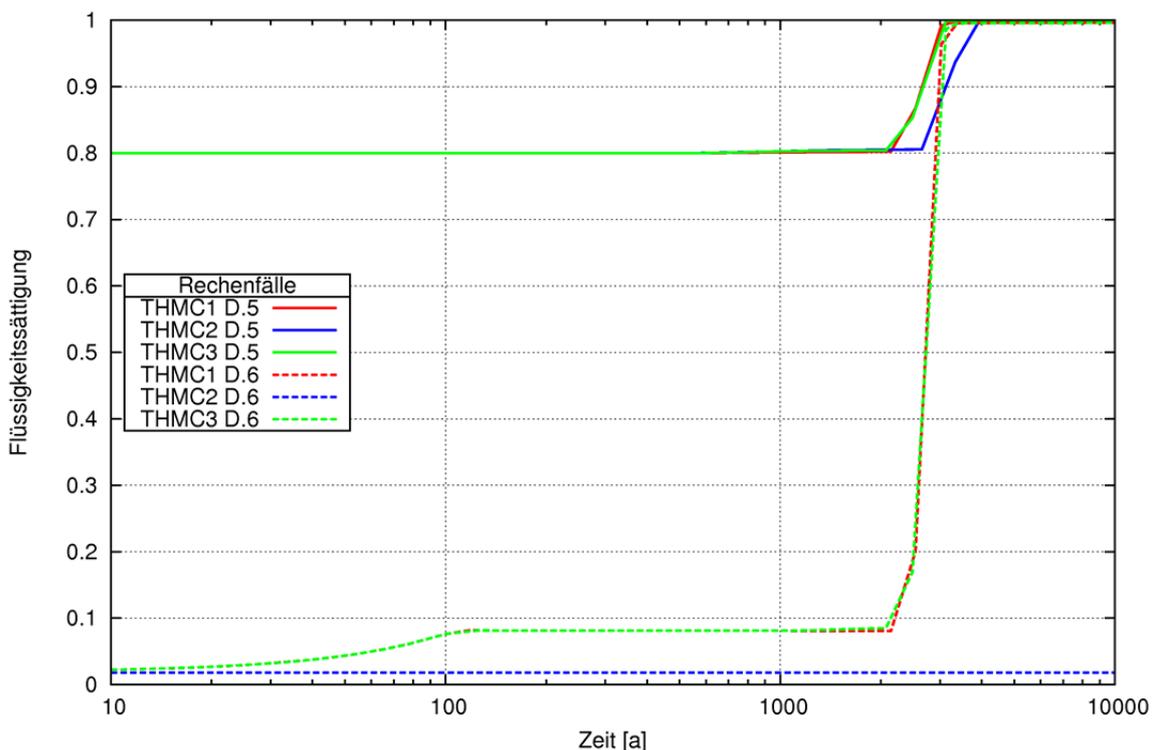


Abb. 4.11 Flüssigkeitssättigung im Messpunkt D.5 (durchgezogene Linie) und D.6 (gestrichelte Linie) für die Rechenfälle THMC 1, THMC 2 und THMC 3

Der Streckenkern und die gestörte Zone werden für den jeweiligen Rechenfall in der gleichen Farbe dargestellt.

Der Laugenfluss für den Rechenfall THMC 2 beginnt im Messpunkt D.5 bei ca. 3.300 Jahren und erreicht nach 5.000 Jahren einen Wert von $1,72E-7$ kg/s (Abb. 4.12).

Der Laugenfluss im Messpunkt D.5 ($1,55E-7$ kg/s) und D.6 ($2,4E-8$ kg/s), des Rechenfalles THMC 3 der sich nach ca. 3.500 Jahren einstellt, unterscheidet sich nicht vom Basisfall. Es zeigt sich nur ein kleiner, jedoch vernachlässigbarer Unterschied in der Einstromphase (Abb. 4.12).

Alle Rechenfälle zeigen zwischen 500 und 1.500 Jahren im Messpunkt D.5 einen negativen Laugenfluss von der gestörten Zone in den Sorelbeton. Dies ist zudem durch die geringe Erhöhung der Sättigung im Sorelbeton vor dem Laugendurchbruch zu erkennen (Abb. 4.11).

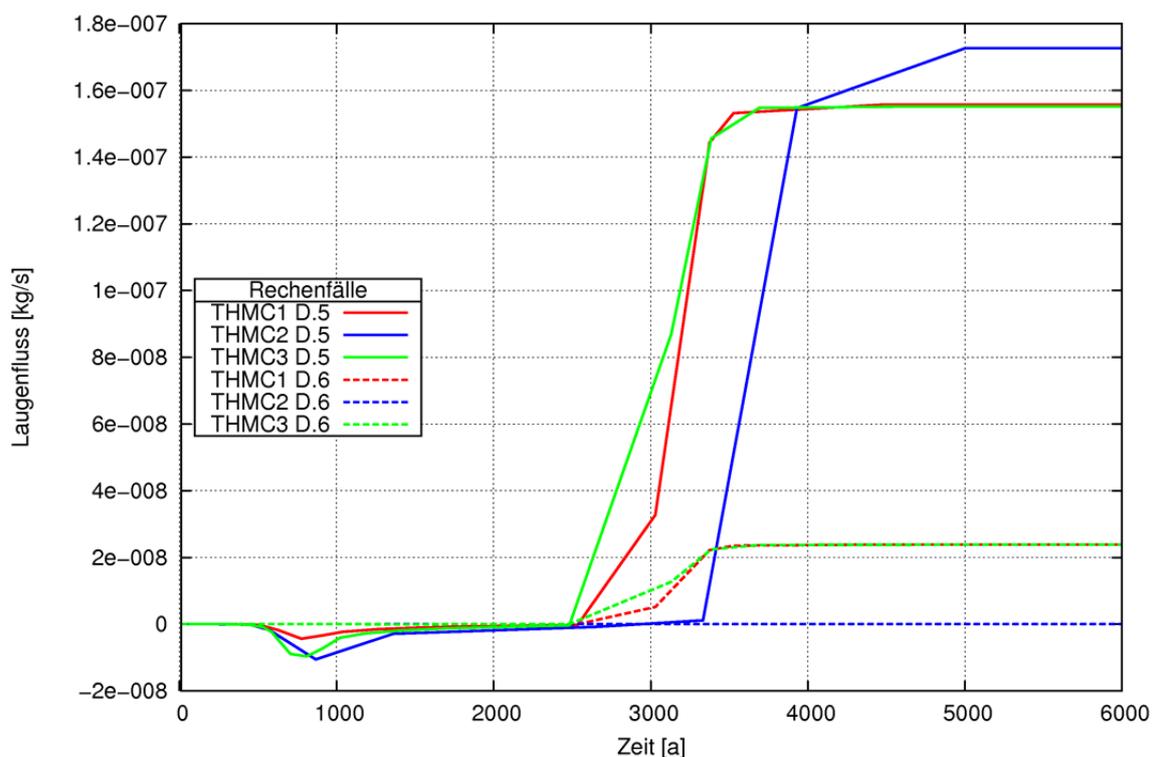


Abb. 4.12 Laugenfluss im Messpunkt D.5 (durchgezogene Linie) und D.6 (gestrichelte Linie) für die Rechenfälle THMC 1, THMC 2 und THMC 3.

Der Streckenkern und die gestörte Zone werden für den jeweiligen Rechenfall in der gleichen Farbe dargestellt.

Es zeigt sich, dass die initial höhere Durchlässigkeit in axialer Richtung der gestörten Zone für den Rechenfall THMC 3 keinen signifikanten Einfluss auf die Summe der durchflossenen Laugenmasse im Vergleich zum Basisfall hat. Die initiale Permeabilität

ist deshalb bei der Annahme einer relativ schnellen Konvergenz der gestörten Zone für längere Zeiträume nicht sensitiv auf den Laugenfluss. Die summierten Laugenmengen für den Rechenfall THMC 3 im Streckenkern und der gestörten Zone im Streckenabschnitt D, entsprechen nach 50.000 Jahren denen des Basisfalls (Tab. 4.2).

Die durchgeflossene Laugenmasse für den Rechenfall THMC 2 ist im Vergleich zum Basisfall aufgrund des kleineren Streckenquerschnittes (Fehlen der gestörten Zone) insgesamt geringer (Tab. 4.2).

Tab. 4.2 Durchflossene Laugenmasse am Streckenabschnitt D nach 50.000 Jahren

Rechenfall	gestörte Zone [kg]	Sorelbeton [kg]	Summe [kg]	Anteil am Basisfall [%]
THMC 1	243.424	911.848	1.155.272	100
THMC 2	0	999.482	999.482	86,5
THMC 3	243.278	911.238	1.154.516	99,0

4.3 Kapillardruck (THMC 4 – 10)

4.3.1 Kapillardruck im Salzgrus und der gestörten Zone (THMC 5 – 7)

In diesem Kapitel werden die Rechenfälle betrachtet in denen der Kapillardruck nur im Salzgrusversatz und der gestörten Zone variiert wird (THMC 5 – 7). Zum Vergleich werden zudem der Basisfall (THMC 1) und der Rechenfall THMC 4 (Kapillardruck ausgeschaltet) in den Abbildungen abgebildet. Für den Sorelbeton wurden die Kapillardruckparameter für die Rechenfälle THMC 5 – 7 vom Basisfall übernommen und nicht verändert. Die Veränderung des Kapillardruckes erfolgte durch die Änderung des Gas-eindringdruckes (siehe Kap. 3.3).

Die Abb. 4.13 zeigt den Kapillardruck im Messpunkt E.5 (Salzgrusversatz) für die Rechenfälle THMC 1, 4, 5, 6 und 7 und zusätzlich im Messpunkt E.6 (gestörte Zone) für die Rechenfälle THMC 6 und 7. Der Rechenfall THMC 7 weist im Messpunkt E.5 anfänglich den größten Kapillardruck mit fast $4,5E6$ Pa auf. Geringer ist der Kapillardruck im Messpunkt E.5 für den Rechenfall THMC 6 mit nahezu 500.000 Pa. Zum Vergleich beträgt der Kapillardruck des Messpunktes D.5 (Sorelbeton) 220.000 Pa (nicht gezeigt). Nach vollständiger Sättigung des Porenraums mit Lauge (siehe Abb. 4.13) sinkt

der Kapillardruck erwartungsgemäß gegen null. Nur im Rechenfall THMC 7 sättigt sich der Porenraum im Messpunkt E.5 nicht vollständig mit Lauge (Abb. 4.14), deshalb bleibt ein Kapillardruck von $1E6$ Pa bestehen (Abb. 4.13). Es ist naheliegend, dass der Kapillardruck der Randbedingung B den Laugenfluss so beeinflusst, dass sich der Porenraum nicht vollständig auf sättigen kann. Der Beginn der Kompaktion im Salzgrusversatz (Messpunkt E.5) des Rechenfalls THMC 7 ist auch im Kapillardruckverlauf des Messpunktes E.6 in der gestörten Zone erkennbar (Abb. 4.13). Da Lauge aus dem Salzgrusversatz in die gestörte Zone fließt, reduziert sich auch hier der Kapillardruck vor dem eigentlichen Laugendurchbruch.

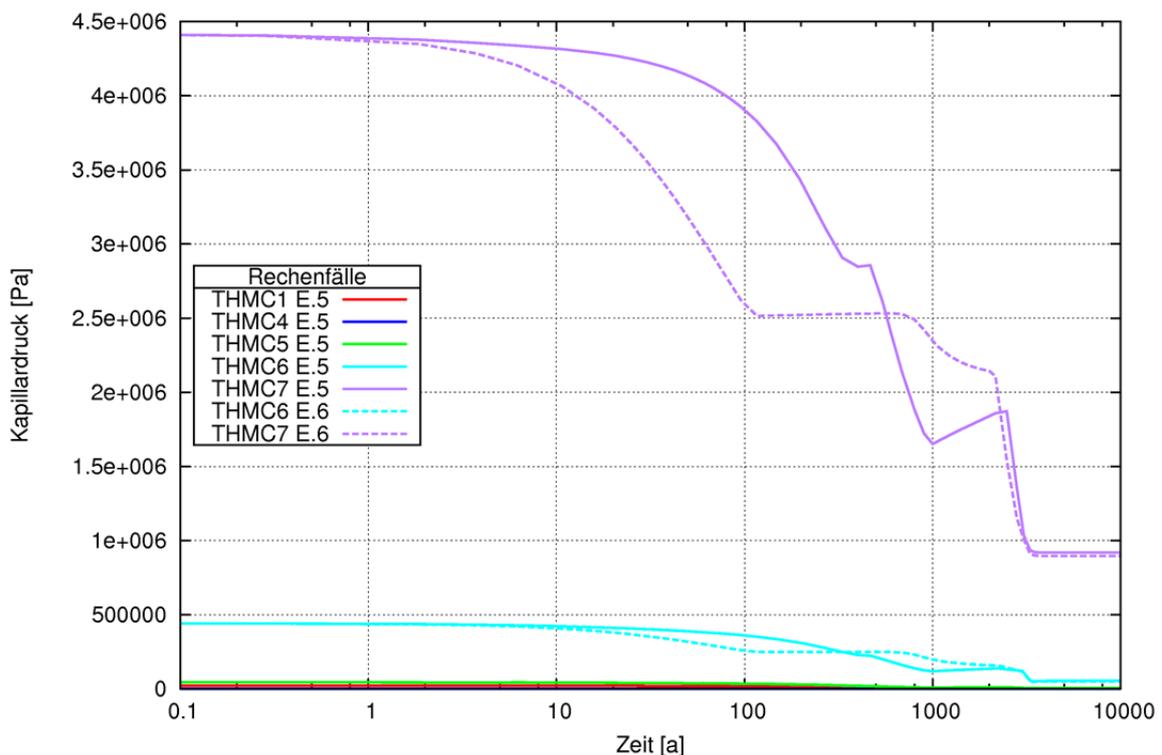


Abb. 4.13 Kapillardruckverlauf für die Rechenfälle THMC 1, 4 und 5 – 7 im Messpunkt E.5 (Salzgrus) und für die Rechenfälle THMC 6 und 7 im Messpunkt E.6 (gestörte Zone)

Der Messpunkt E.6 ist für die Rechenfälle THMC 6 und 7 in einer gestrichelten Linie dargestellt.

Zunächst führt die Kompaktion zum Anstieg der Sättigung des Porenraums im Messpunkt E.5 (Salzgrusversatz) bis ca. 1.000 Jahre (Abb. 4.14). Dann ist der Kompaktionsprozess abgeschlossen und es fließt Lauge aus dem Porenraum des Salzgrusversatzes in die gestörte Zone und die Randbedingung B ab. Somit flacht der Kurvenverlauf der Porenraumsättigung bis zum Laugendurchbruch nach 2.500 Jahren

etwas ab. Dies ist auch in der gestörten Zone erkennbar (Abb. 4.15). Man erkennt mit zunehmendem Kapillardruck, dass zwischen 1.000 und 2.500 Jahren unterschiedliche Sättigungsverläufe in den Rechenfällen auftreten (Abb. 4.14). Dies kann durch die unterschiedlich starken Kapillardrücke und der damit unterschiedlich starken „Sogwirkung“ zur Randbedingung B hin erklärt werden. Ab 2.500 Jahren steigt die Sättigung wieder an. Eine vollständige Sättigung des Porenraums im Messpunkt E.6 wird aufgrund des Laugenflusses zur Randbedingung B nicht erreicht. Dieser Laugenfluss ist im Rechenfall THMC 7 aufgrund des größten Kapillardruckes am größten. Der Unterschiedliche Verlauf der Laugensättigung in den einzelnen Rechenfällen ist auch in der gestörten Zone (Abb. 4.15) erkennbar. Je höher der Kapillardruckunterschied ist, desto höher ist auch der Laugenfluss in die Randbedingung B.

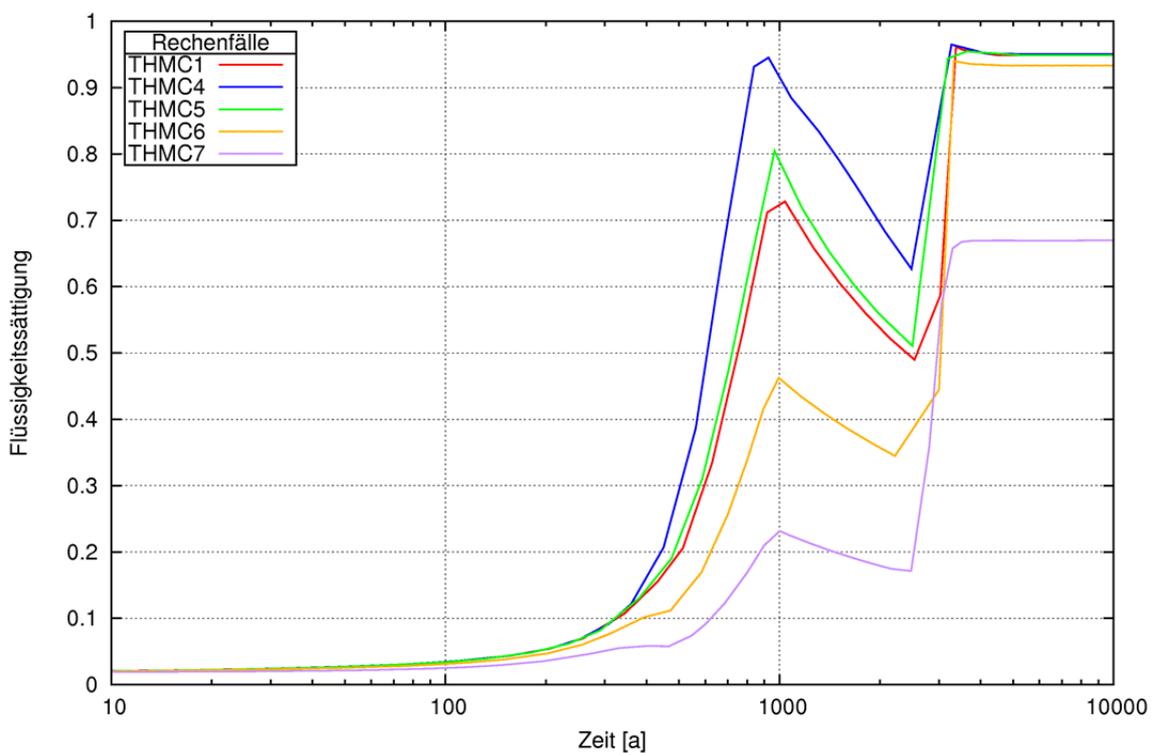


Abb. 4.14 Flüssigkeitssättigung für die Rechenfälle THMC 1, 4 und 5 – 7 im Messpunkt E.5 (Salzgrusversatz)

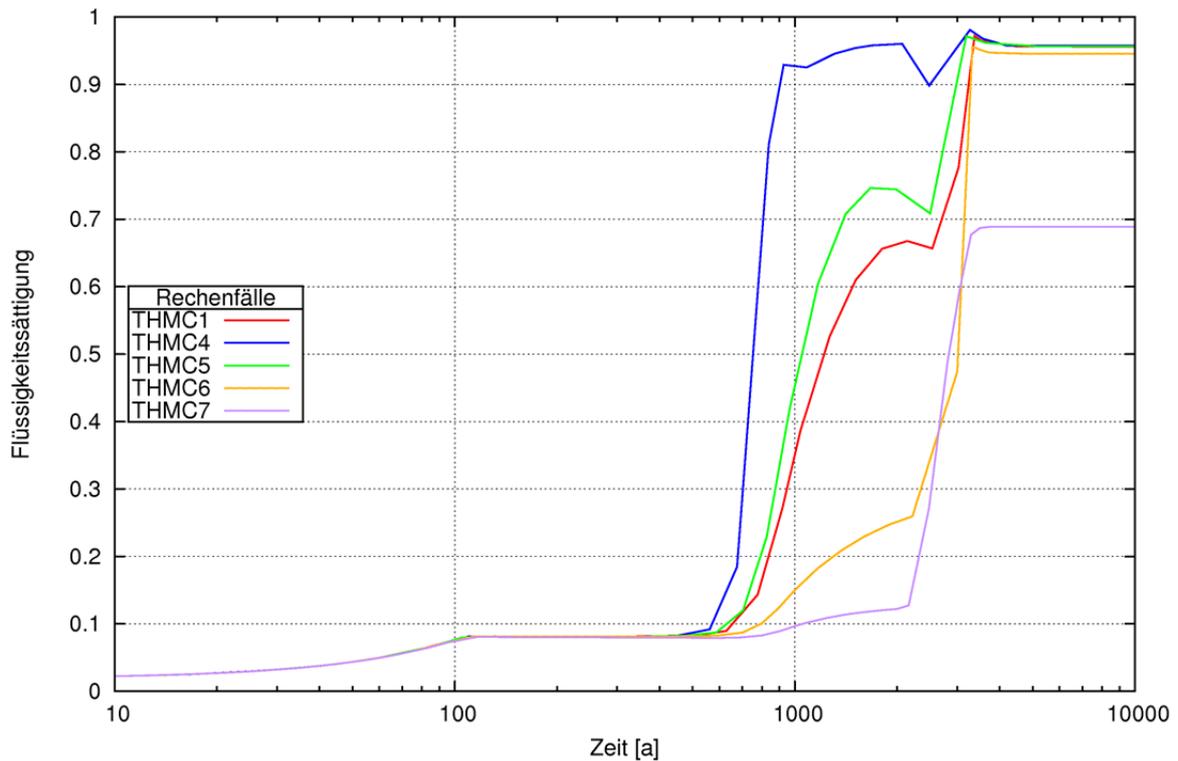


Abb. 4.15 Flüssigkeitssättigung für die Rechenfälle THMC 1, 4 und 5 – 7 im Messpunkt E.6 (gestörte Zone)

Die Abb. 4.16 und Abb. 4.17 zeigen die Aufsättigung mit Lauge für die Messpunkte D.5 und D.6 der Rechenfälle THMC 1 und THMC 4 – 7. Die Rechenfälle mit den höchsten Kapillardrücken (THMC 6 und 7) zeigen eine schnellere Aufsättigung des Porenraums mit Lauge. Für die Rechenfälle mit geringerem Kapillardruck (THMC 4 und 5) ist die Aufsättigung langsamer. Der Unterschied in der Aufsättigungsrate ist im Sorelbeton (Abb. 4.16) gegenüber der gestörten Zone geringer (Abb. 4.17).

Der Beginn des Laugenflusses im Streckenabschnitt D für die verschiedenen Rechenfälle ist besonders im Sorelbeton (Messpunkt D.5) nicht eindeutig. Wider Erwarten sättigen sich die Rechenfälle mit den größten Kapillardrücken nicht bei allen Rechenfällen als erstes in den Messpunkten D.5 und D.6 auf (Abb. 4.16 und Abb. 4.17).

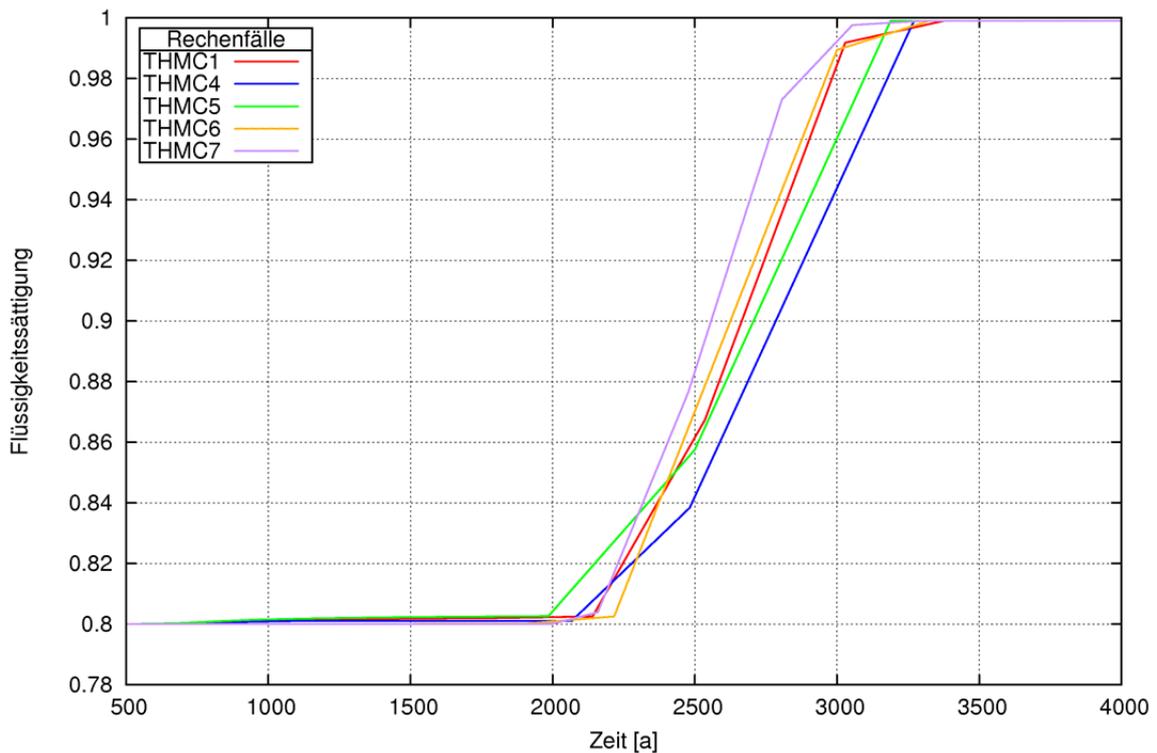


Abb. 4.16 Flüssigkeitssättigung im Messpunkt D.5 (Sorelbeton) für die Rechenfälle THMC 1 und THMC 4 – 7

Der Porenraum in der gestörten Zone (Messpunkt D.6) sättigt sich im Rechenfall THMC 4 (Kapillardruck abgeschaltet) bereits nach 800 Jahren auf (Abb. 4.17). Diese frühe Aufsättigung ist auf einen Laugenzufluss aus dem Salzgrusversatz zurückzuführen, da die Feuchtigkeit im Sorelbeton nicht mobil ist. Der eigentliche Laugendurchbruch findet für den Rechenfall THMC 4 im Messpunkt D.6 erst nach ca. 2.100 Jahren statt (Abb. 4.17). Der Laugendurchbruch für den Rechenfall THMC 7 findet im Messpunkt D.6 aufgrund des hohen Kapillardruckes ca. 500 Jahre früher statt.

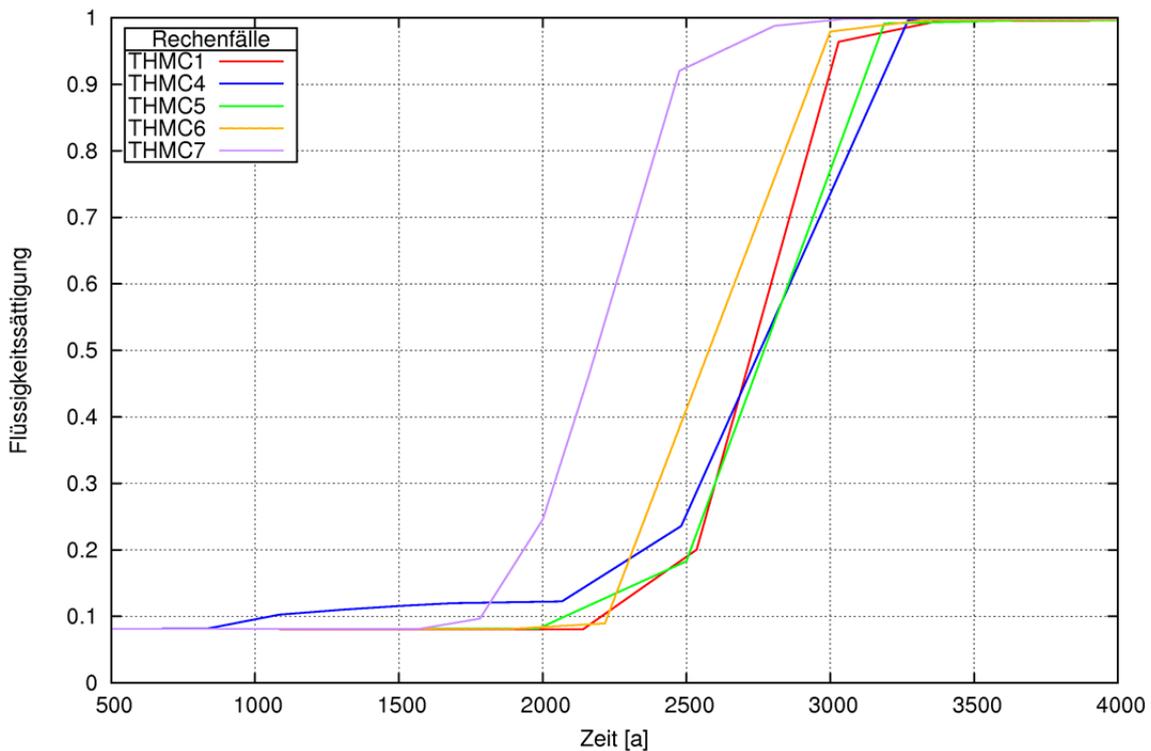


Abb. 4.17 Flüssigkeitssättigung im Messpunkt D.6 (gestörte Zone) für die Rechenfälle THMC 1 und THMC 4 – 7

Die Abb. 4.18 zeigt die Laugenflüsse für den Messpunkt D.5. Der Laugenfluss beginnt für die Rechenfälle THMC 4 und 5 wie für den Basisfall bei 2.500 Jahren. Bei beiden Rechenfällen stellt sich nach 3.500 Jahren ein Laugenfluss von $1,55E-7$ kg/s im Messpunkt D.5 ein. Der Laugenfluss für den Rechenfall THMC 6 beginnt etwas früher bei 2.200 Jahren und erreicht nach ca. 3.500 Jahren einen Wert von $1,62E-7$ kg/s.

Der Laugenfluss im Rechenfall THMC 7 beginnt bei 2.500 Jahren und erreicht nach 3.500 Jahren einen Wert von $1,86E-7$ kg/s (Abb. 4.18). Dies ist vermutlich auf die höhere „Saugspannung“ im Salzgrusversatz hinter dem Widerlager und der Randbedingung B zurückzuführen. Wie schon erwähnt, sättigt sich der Porenraum im Salzgrusversatz im Rechenfall THMC 7 nicht vollständig mit Lauge, so dass ein permanenter Kapillardruck von $1,0E6$ Pa bestehen bleibt.

Der signifikante Knick im Verlauf des Laugenflusses in den Rechenfällen THMC 1 und 6 bei ca. 3.000 Jahren (Abb. 4.18), entspricht dem Zeitpunkt an dem sich der Porenraum vollständig mit Lauge gesättigt hat. Der maximale Laugenfluss stellt sich ein, nachdem die gesamte Strecke bis zur Randbedingung B mit Lauge gefüllt ist.

Der Einfluss der veränderten Kapillardrücke im Salzgrusversatz und der gestörten Zone auf den Laugenfluss im Sorelbeton ist marginal.

Zwischen 500 und 1.000 Jahren findet ein geringer Laugenfluss in den Sorelbeton für die Rechenfälle THMC 1, 4 und 5 statt (Abb. 4.18). Dieser Laugenfluss vor dem eigentlichen Laugendurchbruch entspricht dem Abfluss von Lauge aus dem Salzgrusversatz in den Sorelbeton, aufgrund der Kompaktion. Da dieser Prozess auch im Rechenfall THMC 4 stattfindet, lässt sich schließen, dass dieser Prozess nicht auf dem Einfluss des Kapillardrucks beruht. In den Rechenfällen THMC 6 und 7 ist der Kapillardruck so groß, dass die Lauge bevorzugt in die gestörte Zone bzw. in die Randbedingung B fließt.

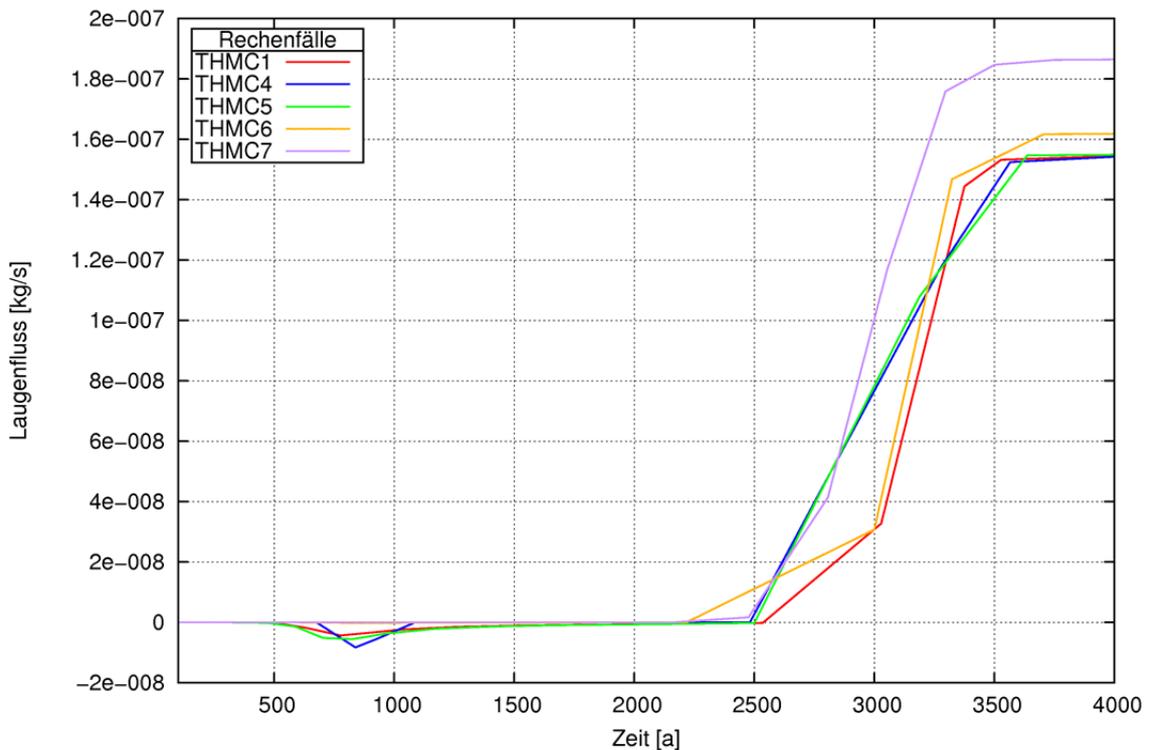


Abb. 4.18 Laugenfluss im Messpunkt D.5 (Sorelbeton) für die Rechenfälle THMC 1 und THMC 4 – 7

In der gestörten Zone (Messpunkt D.6) beginnt der Laugenfluss für den Rechenfall THMC 4 und 5 bei 2.500 Jahren und für den Rechenfall THMC 6 bei 2.200 Jahren (Abb. 4.19). Für diese Rechenfälle stellt sich nach 3.500 Jahren ein Laugenfluss wie im Basisfall von $2,4E-8$ kg/s ein. Der Laugenfluss im Rechenfall THMC 6 liegt mit $2,5E-8$ kg/s nur unwesentlich höher. Für den Rechenfall THMC 7 beginnt der Laugen-

fluss bereits nach 2.000 Jahren und erreicht nach 3.500 Jahren einen maximalen Wert von $2,9E-8$ kg/s (Abb. 4.19).

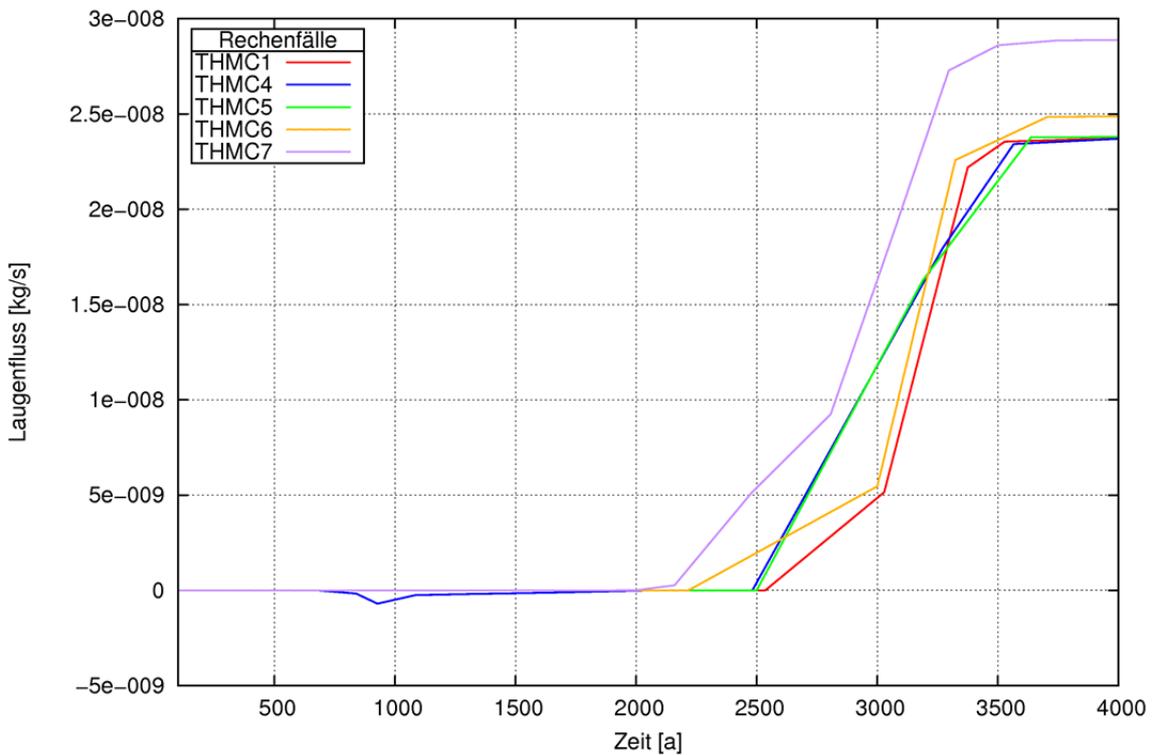


Abb. 4.19 Laugenfluss im Messpunkt D.6 (gestörte Zone) für die Rechenfälle THMC 1 und THMC 4 – 7

4.3.2 Kapillardruck im Sorelbeton (THMC 8 – 10)

Der Kapillardruck im Sorelbeton wird für die Rechenfälle THMC 8 – 10 durch die Änderung des Gaseindringdruckes variiert (siehe Kap. 3.3). Zum Vergleich werden zudem der Basisfall und der Rechenfall THMC 4 in den Abbildungen dargestellt.

Die Abb. 4.20 zeigt den Kapillardruckverlauf für die Rechenfälle THMC 1, 4 und 8 – 10 im Messpunkt D.5. Erwartungsgemäß spiegelt der Kapillardruckverlauf den zeitlichen Aufsättigungsprozess des Sorelbetons wieder (vgl. Abb. 4.20 und Abb. 4.21). Nach vollständiger Sättigung des Porenraums mit Lauge nach ca. 3.500 Jahren nähert sich der Kapillardruck bei allen Rechenfällen null.

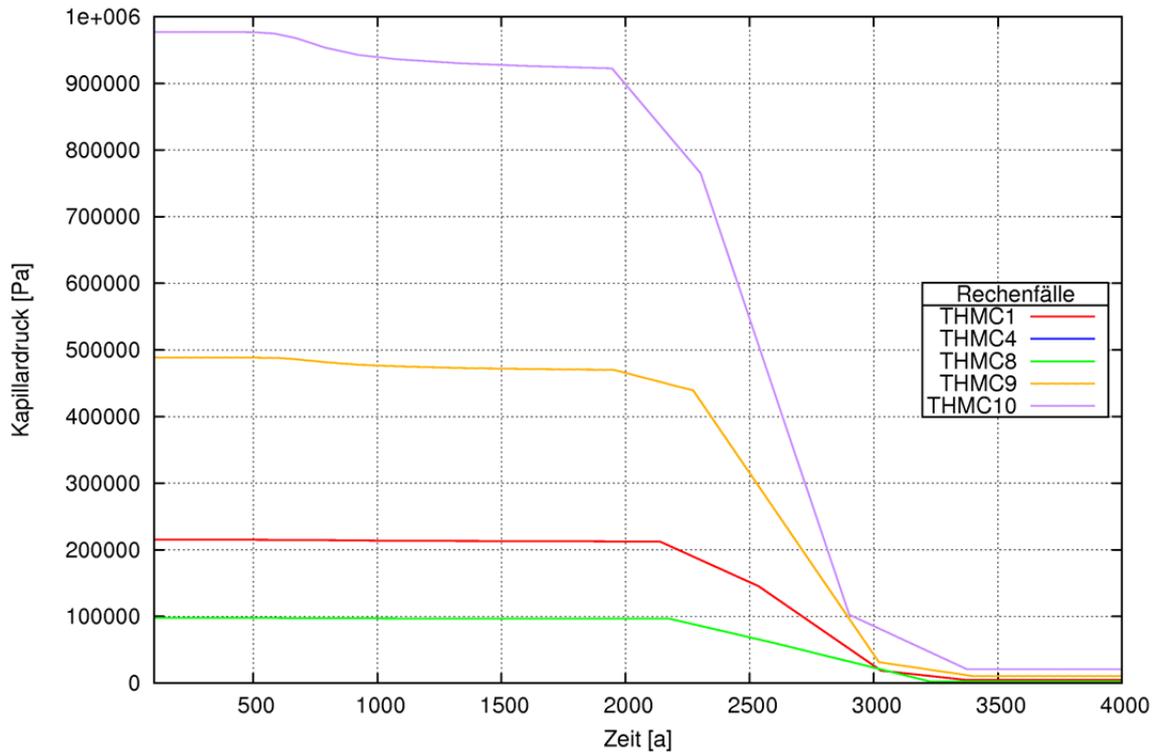


Abb. 4.20 Kapillardruckverlauf für die Rechenfälle THMC 1, 4 und 8 – 10 im Messpunkt D.5 (Sorelbeton)

Die Aufsättigung mit Lauge beginnt im Sorelbeton (Messpunkt D.5) etwas früher als in der gestörten Zone. Es ist wieder die Tendenz erkennbar, dass die Aufsättigung des Porenraumes im Sorelbeton in den Rechenfällen mit den höheren Kapillardrücken am schnellsten erfolgt (Abb. 4.21). Die Rechenfälle mit den höchsten Kapillardrücken THMC 9 und 10 erhalten schon zwischen 500 und 1.000 Jahren einen Flüssigkeitszutritt. Der eigentliche Laugendurchbruch findet wesentlich später statt.

Wie schon im vorherigen Kapitel beschrieben fließt Lauge aufgrund des Kompaktionsprozesses im Salzgrusversatz in den Sorelbeton. Da der Kapillardruck des Sorelbetons in den Rechenfällen THMC 8 – 10 höher ist als in den Rechenfällen THMC 5 – 7, fließt mehr Lauge zu (Abb. 4.21).

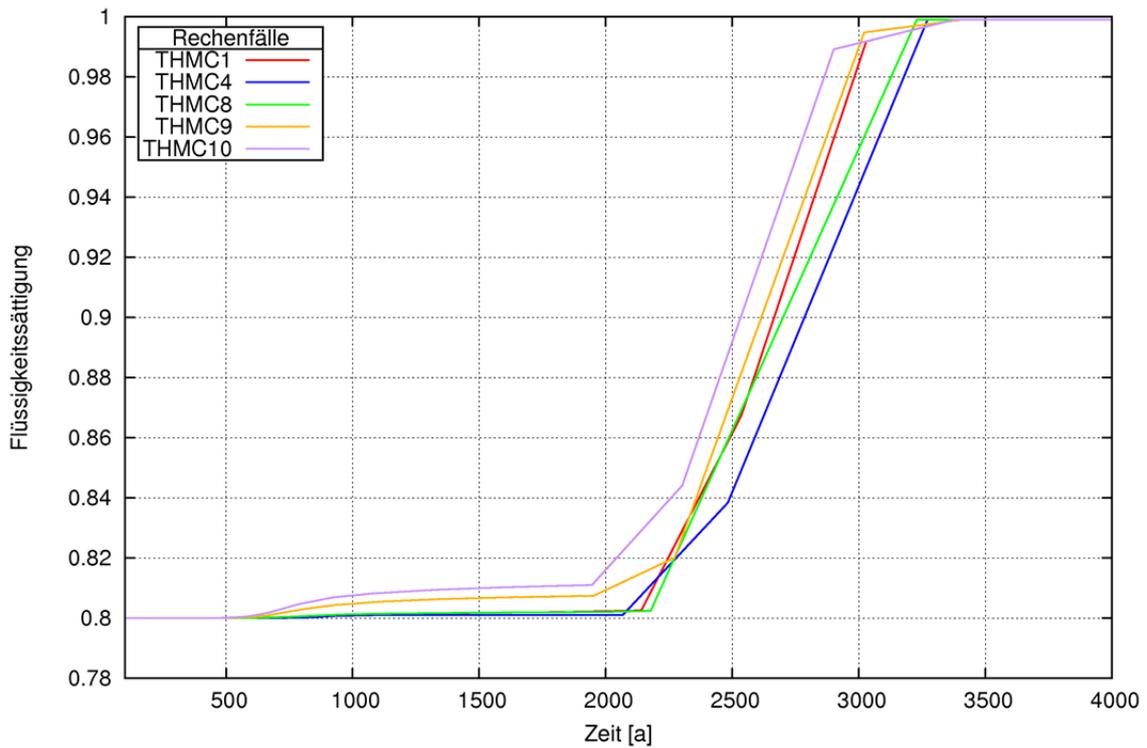


Abb. 4.21 Flüssigkeitssättigung im Messpunkt D.5 (Sorelbeton) für die Rechenfälle THMC 1, THMC 4 und THMC 8 – 10

In der gestörten Zone ist der Einfluss der veränderten Kapillardrücke im Sorelbeton gering. Nur der Rechenfall THMC 4 zeigt schon die im vorherigen Kapitel beschriebene vorzeitige Erhöhung der Laugensättigung vor dem eigentlichen Laugendurchbruch. Ansonsten ist der Sättigungsverlauf ähnlich wie beim Sorelbeton (Abb. 4.22).

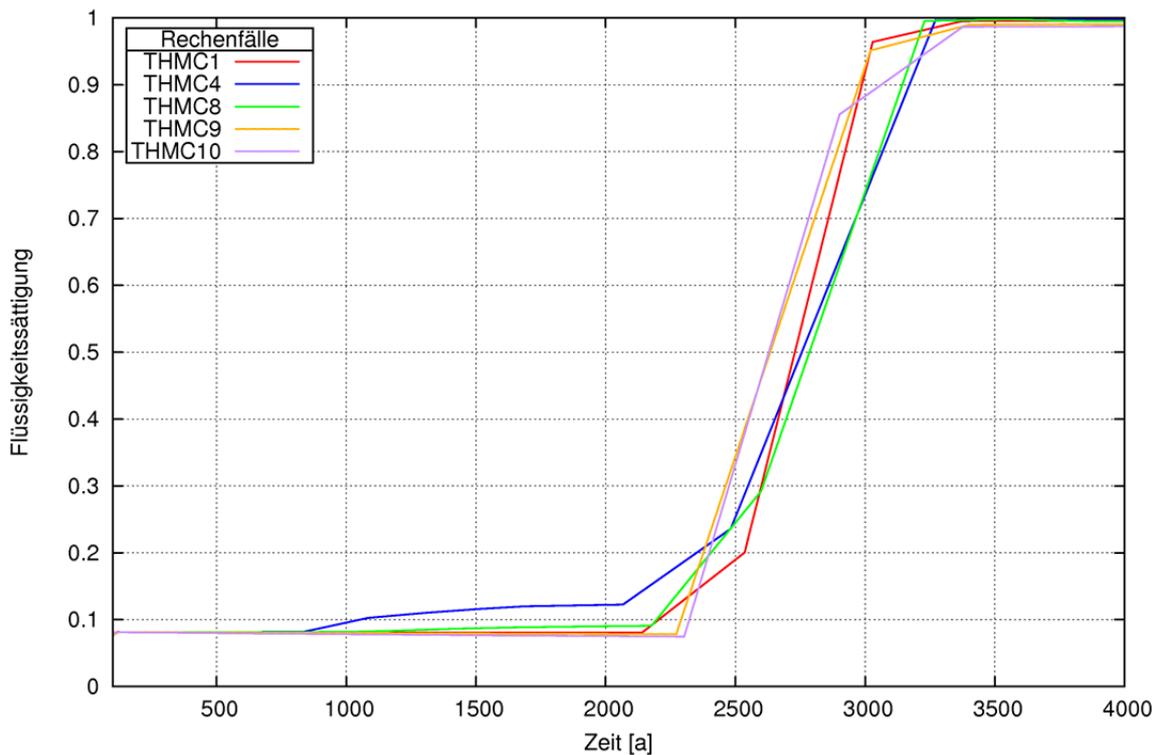


Abb. 4.22 Flüssigkeitssättigung im Messpunkt D.6 (gestörte Zone) für die Rechenfälle THMC 1, 4 und THMC 8 – 10

Im Sorelbeton (Messpunkt D.5) machen sich die hohen Kapillardrücke aus den Rechenfällen THMC 9 und 10 besonders im Laugenfluss zwischen 500 und 1.000 Jahren bemerkbar (Abb. 4.23). Der Laugenfluss in den Sorelbeton ist etwas höher als bei den Rechenfällen THMC 6 und 7 (Abb. 4.18).

Für den Rechenfall THMC 8 beginnt der Laugenfluss nach 2.600 Jahren und erreicht nach 3.500 Jahren den Wert wie im Basisfall THMC 1. Der Laugenfluss im Rechenfall THMC 9 und 10 beginnt im Messpunkt D.5 bei 2.300 Jahren und stellt sich vergleichbar zum Basisfall auf einen Wert von $1,55E-7$ kg/s ein (Abb. 4.23).

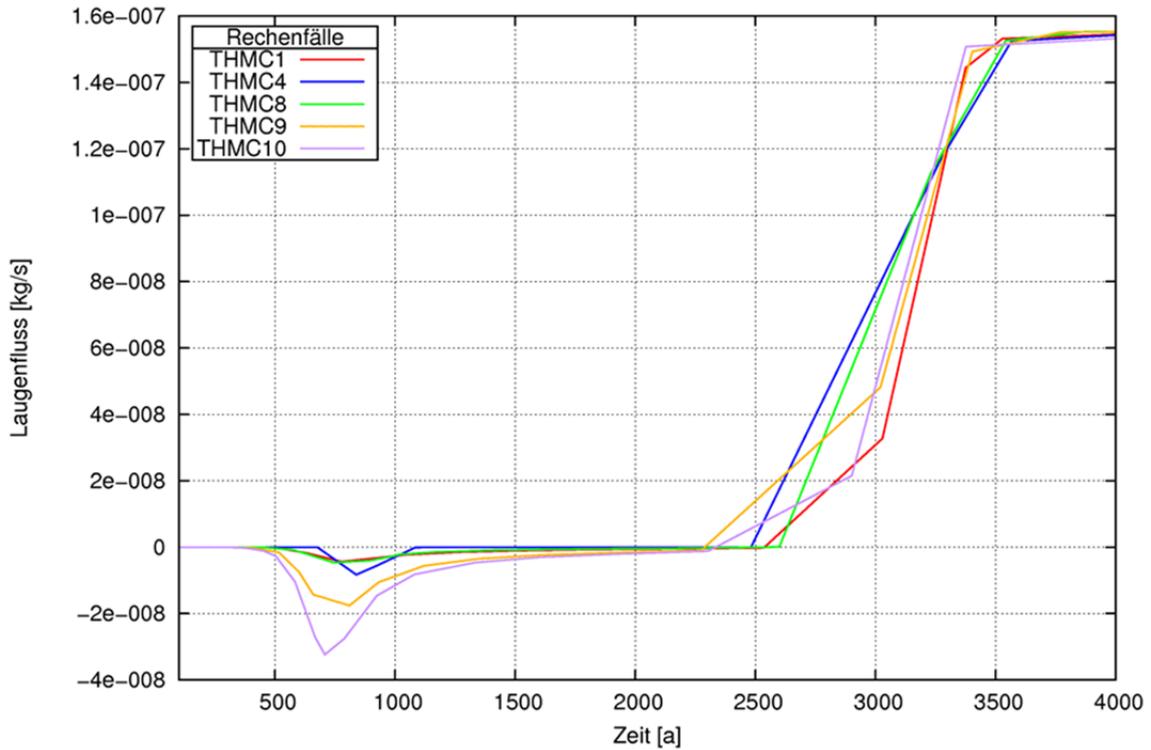


Abb. 4.23 Laugenfluss im Messpunkt D.5 (Sorelbeton) für die Rechenfälle THMC 1, 4 und THMC 8 – 10

Der Beginn des Laugenflusses in der gestörten Zone (Messpunkt D.6) entspricht für die einzelnen Rechenfälle denen des Messpunktes D.5 (Abb. 4.24). Der Einfluss der veränderten Kapillardrücke im Sorelbeton auf die gestörte Zone ist somit vernachlässigbar. Der Laugenfluss, der sich nach 3.500 Jahren im Messpunkt D.6 einstellt, ist im Vergleich zum Basisfall unwesentlich kleiner und beträgt $2,3E-8$ kg/s (Abb. 4.24).

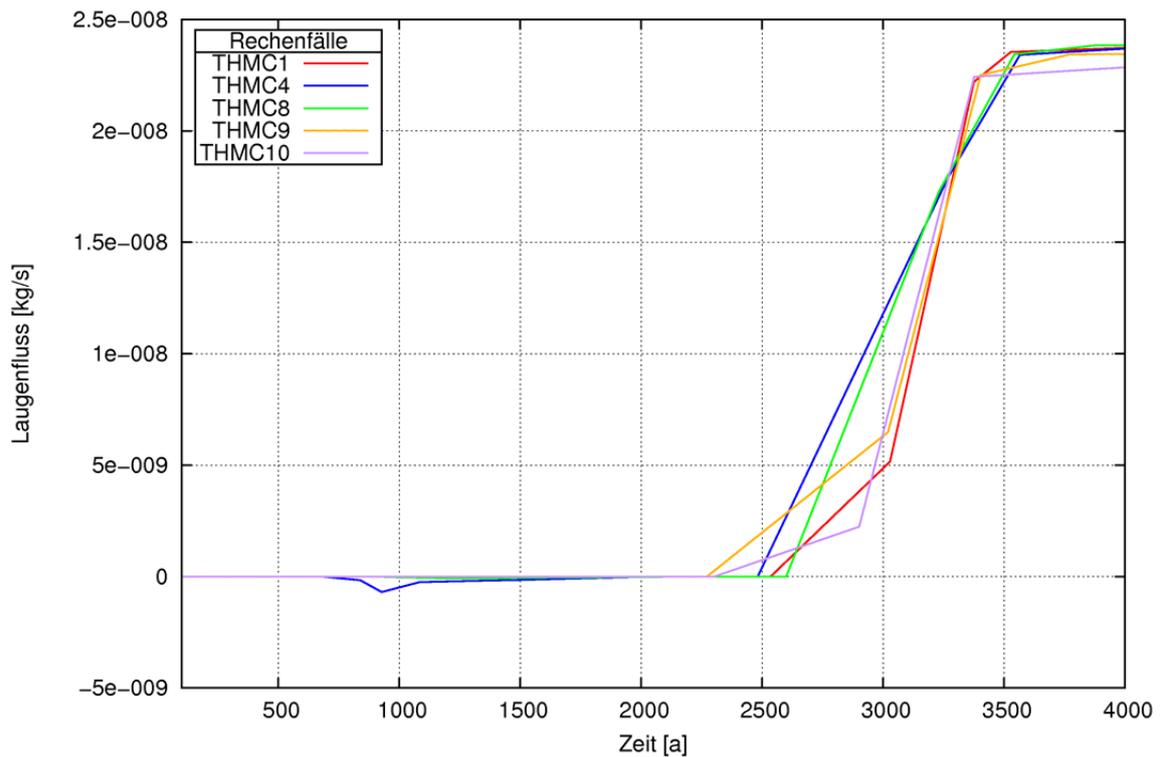


Abb. 4.24 Laugenfluss im Messpunkt D.6 (gestörte Zone) für die Rechenfälle THMC 1, 4 und THMC 8 – 10

Die Tab. 4.3 zeigt den summierten Laugenfluss im Streckenabschnitt D nach 50.000 Jahren. Bei den summierten Laugenmassen im Streckenabschnitt D zeigen sich keine gravierenden Unterschiede bei den einzelnen Rechenfällen mit Ausnahme des Rechenfalls THMC 7 (ca. 20 % höher). Dies ist auf die hohen Kapillardrücke im Salzgrusversatz und insbesondere in der Randbedingung B zurückzuführen, da darin die gleichen Parameter wie für den Salzgrusversatz bzw. die gestörte Zone vorliegen. Dies zeigt, dass die Randbedingung am Ende des Streckenverschlusses eine entscheidende Rolle für den Durchfluss durch den Streckenverschluss spielt. Der Kapillardruck im Sorelbeton ist in Bezug auf die Laugendurchbrüche sowie die durchflossene Laugenmenge durch den Streckenverschluss nicht sensitiv.

Tab. 4.3 Summierter Laugenfluss durch den Streckenabschnitt D nach 50.000 Jahren

Rechenfall	gestörte Zone [kg]	Sorelbeton [kg]	Summe [kg]	Anteil am Basisfall [%]
THMC 1	243.424	911.848	1.155.272	100
THMC 4	243.394	909.832	1.153.226	99,8
THMC 5	244.088	914.032	1.158.120	100,2
THMC 6	255.464	950.454	1.205.918	104,4
THMC 7	304.346	1.088.138	1.392.484	120,5
THMC 8	243.786	911.426	1.155.212	100,0
THMC 9	241.960	910.102	1.152.062	99,7
THMC 10	240.892	908.464	1.149.356	99,5

4.4 Residuale Laugensättigung (THMC 11 – 14)

Die Rechenfälle THMC 11 und 12 übernehmen die residualen Flüssigkeitssättigungen des Basisfalls für den Sorelbeton. Für diese beiden Rechenfälle hat die Änderung der residualen Flüssigkeitssättigungen im Salzgrus keinen Einfluss auf den Laugenfluss im Messpunkt D.5 (Abb. 4.25).

Die Rechenfälle THMC 12 und 13 haben deutlich verringerte residuale Flüssigkeitssättigungen im Sorelbeton. Dadurch verzögert sich der Laugendurchbruch im Messpunkt D.5 erheblich (Abb. 4.25). Erst nach ca. 15.300 Jahren beginnt der Porenraum sich im Rechenfall THMC 13 und nach ca. 14.600 Jahren im Rechenfall THMC 14 aufzusättigen (Abb. 4.25). Somit ist offensichtlich, dass die residualen Flüssigkeitssättigungen bzw. die Auffüllphase des Porenraumes signifikant den Zeitpunkt des Laugendurchbruchs beeinflusst.

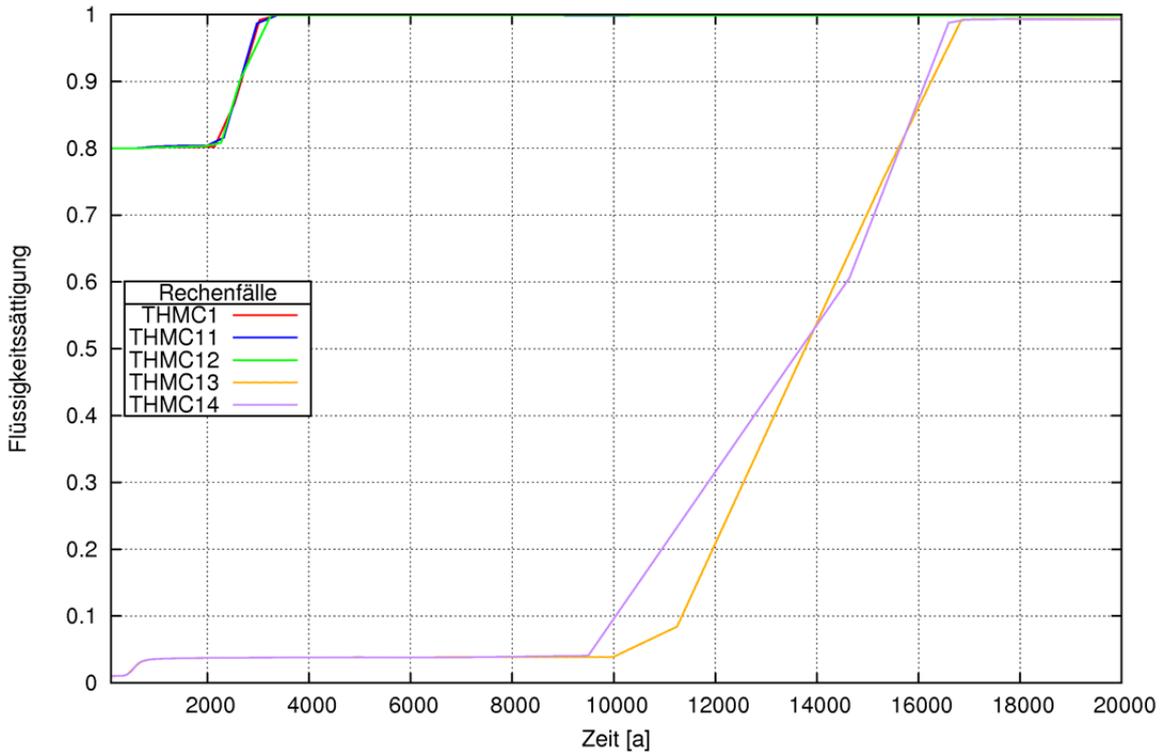


Abb. 4.25 Flüssigkeitssättigung im Messpunkt D.5 (Sorelbeton) für die Rechenfälle THMC 1 und THMC 11 – 14

Auch im Messpunkt D.6 ist für die Rechenfälle THMC 11 und 12 kein wesentlicher Unterschied im Sättigungsverlauf im Vergleich zum Basisfall zu erkennen. Für die Rechenfälle THMC 13 und 14 zeigt sich jedoch im Messpunkt D.6 ein kurzzeitiger Anstieg der Laugensättigung aufgrund der Kompaktion. Danach verringert sich die Laugensättigung wieder. Die Lauge fließt offensichtlich in den Sorelbeton ab, was auch durch den geringen Sättigungsanstieg im Messpunkt D.5 ab 100 Jahren zu erkennen ist (Abb. 4.25).

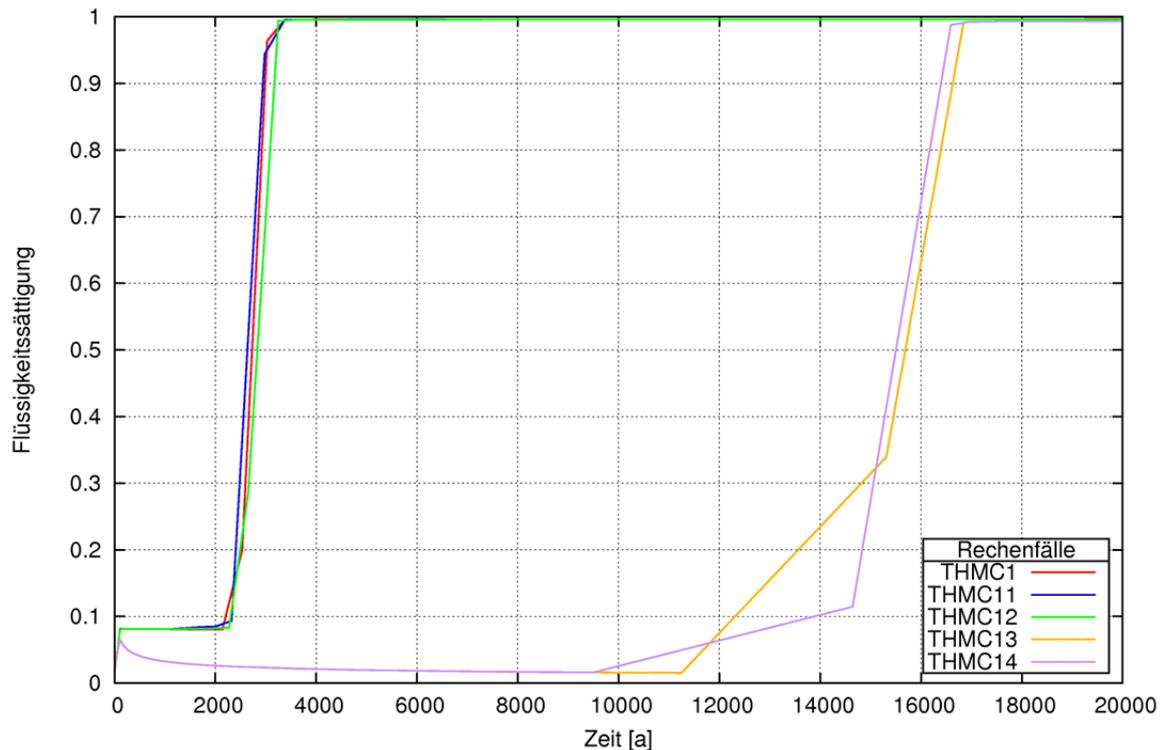


Abb. 4.26 Flüssigkeitssättigung im Messpunkt D.6 (gestörte Zone) für die Rechenfälle THMC 1 und THMC 11 – 14

In den Rechenfällen THMC 11 und 12 steigt der Laugenfluss im Messpunkt D.5 nach ca. 2.300 Jahren (THMC 11) und nach 2.620 Jahren (THMC 12) an. Für beide Rechenfälle stellt sich nach ca. 3.500 Jahren ein Laugenfluss wie im Basisfall von $1,55E-7$ kg/s ein (Abb. 4.27).

Der maximale Laugenfluss stellt sich auch für die Rechenfälle THMC 13 und 14 im Messpunkt D.5 nach ca. 17.000 Jahren auf den gleichen Wert wie im Basisfall von $1,55E-7$ kg/s ein. Der in vorherigen Rechenfällen beschriebene, umgekehrte Laugenfluss zwischen 500 und 1.500 Jahren ist hier um eine Größenordnung größer (Abb. 4.27). Der Kapillardruck als Funktion der Sättigung führt dazu, dass mit der Reduzierung der Porenraumsättigung auch der Kapillardruck steigt. Somit entsteht auch ein höherer Laugenfluss für die Rechenfälle THMC 13 und 14 in den Sorelbeton vor dem eigentlichen Laugendurchbruch.

Der Beginn und die Höhe des Laugenflusses in der gestörten Zone (Messpunkt D.6, Abb. 4.28) entspricht für alle Rechenfälle dem des Sorelbetons (Messpunkt D.5, Abb. 4.27).

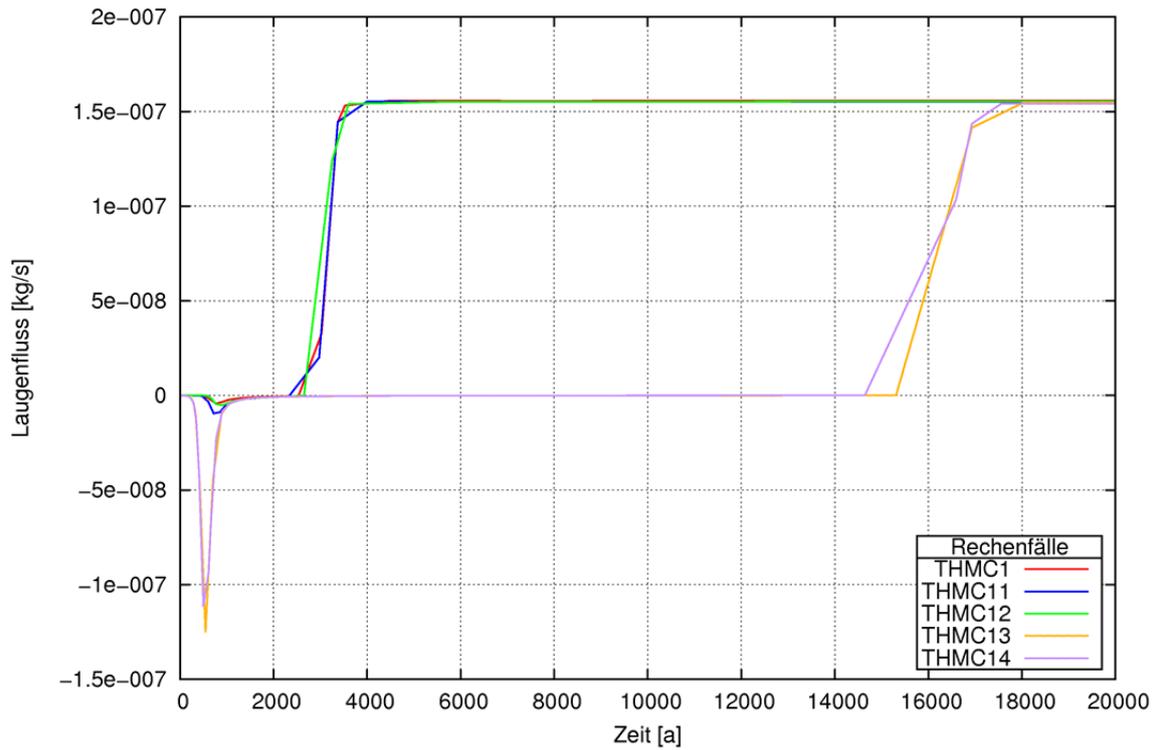


Abb. 4.27 Laugenfluss im Messpunkt D.5 (Sorelbeton) für die Rechenfälle THMC 1 und THMC 11 – 14

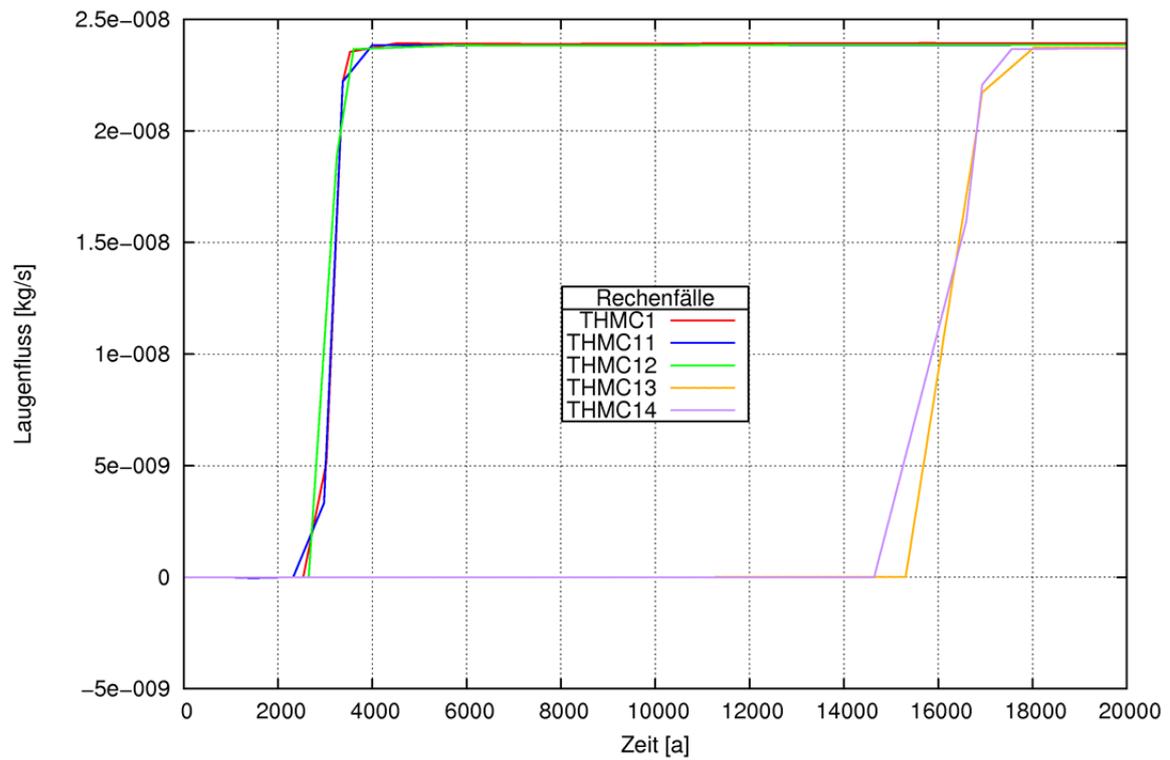


Abb. 4.28 Laugenfluss im Messpunkt D.6 (gestörte Zone) für die Rechenfälle THMC 1 und THMC 11 – 14

Die durchgeflossene Laugenmenge im Streckenabschnitt D nach 50.000 Jahren ist in den Rechenfällen THMC 11 und THMC 12 identisch mit der des Basisfalls (Tab. 4.4). Die Rechenfälle THMC 13 und THMC 14 zeigen dagegen einen um 30 % Prozent geringeren Laugendurchfluss. Hier wird zunächst der Porenraum des Sorelbetons aufgesättigt. Somit verzögert sich der Durchfluss von Lauge. Für längere Zeiträume könnten die durchgeflossenen Laugenmassen größer als bei den Rechenfällen THMC 11 und 12 werden, da der effektive Fließquerschnitt aufgrund der geringeren residualen Sättigung größer ist.

Tab. 4.4 Durchgeflossene Laugenmassen im Streckenabschnitt D nach 50.000 Jahren

Rechenfall	gestörte Zone [kg]	Sorelbeton [kg]	Summe [kg]	Anteil am Basisfall [%]
THMC 1 (Basisfall)	243.424	911.848	1.155.272	100
THMC 11	242.742	908.510	1.151.252	99,7
THMC 12	243.526	910.566	1.154.092	99,9
THMC 13	173.234	642.066	815.300	70,5
THMC 14	174.358	645.202	819.560	70,9

4.5 Kompaktion (THMC 15 – 18)

Im Rechenfall THMC 15 ist für alle Materialien die Kompaktion abgeschaltet. Im Rechenfall THMC 16 wird nur der Salzgrusversatz kompaktiert. Die Rechenfälle THMC 17 und 18 variieren den Parameter „ f_{loc} “ für die kompaktierbaren Materialien.

Die Abb. 4.29 zeigt die Porositätsentwicklung im Messpunkt D.6 (gestörte Zone) für die verschiedenen Rechenfälle. Aufgrund der fehlenden Kompaktion in den Rechenfällen THMC 15 und THMC 16 verändert sich die Porosität in der gestörten Zone nicht. Die Grenzporosität von einem Prozent wird beim Basisfall THMC 1 nach 100 Jahren ($f_{loc} = 0,096$), bei THMC 17 nach 20 Jahren ($f_{loc} = 0,48$) und bei THMC 18 nach 250 Jahren ($f_{loc} = 0,048$) in der gestörten Zone erreicht.

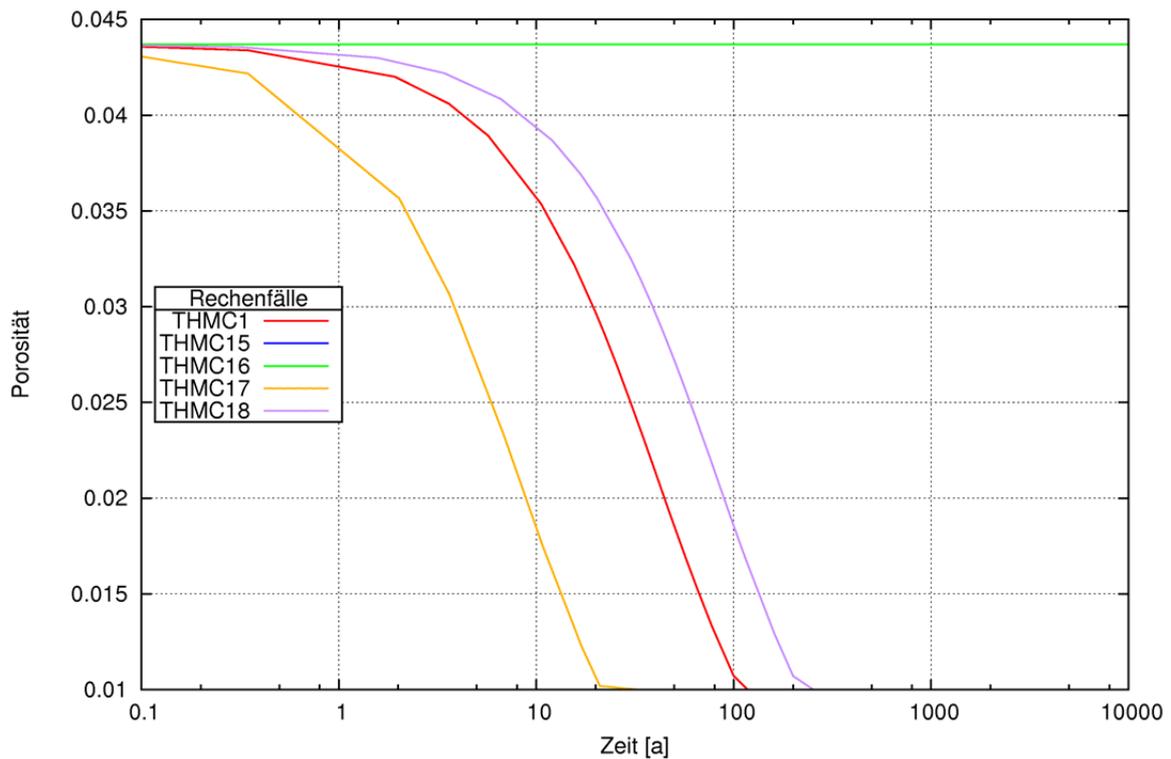


Abb. 4.29 Porositätsentwicklung im Messpunkt D.6 (gestörte Zone) für die Rechenfälle THMC 1 und THMC 15 – 18

Im Salzgrusversatz (Messpunkt E.5) ist die initiale Porosität höher als in der gestörten Zone, deshalb dauert es länger bis die Grenzporosität von 1 % erreicht wird (Abb. 4.30). Die Rechenfälle THMC 1 und 16 weisen die gleiche Porositätsentwicklung für den Salzgrusversatz auf (kongruent), da hier für beide Rechenfälle das gleiche f_{loc} angenommen wird. Sie erreichen die Grenzporosität nach ca. 1.000 Jahren. Die Porosität im Salzgrusversatz bleibt im Rechenfall THMC 15 unverändert bei 35 %. Der Rechenfall THMC 17 erreicht die Grenzporosität nach ca. 200 Jahren und der Rechenfall THMC 18 nach ca. 2.000 Jahren.

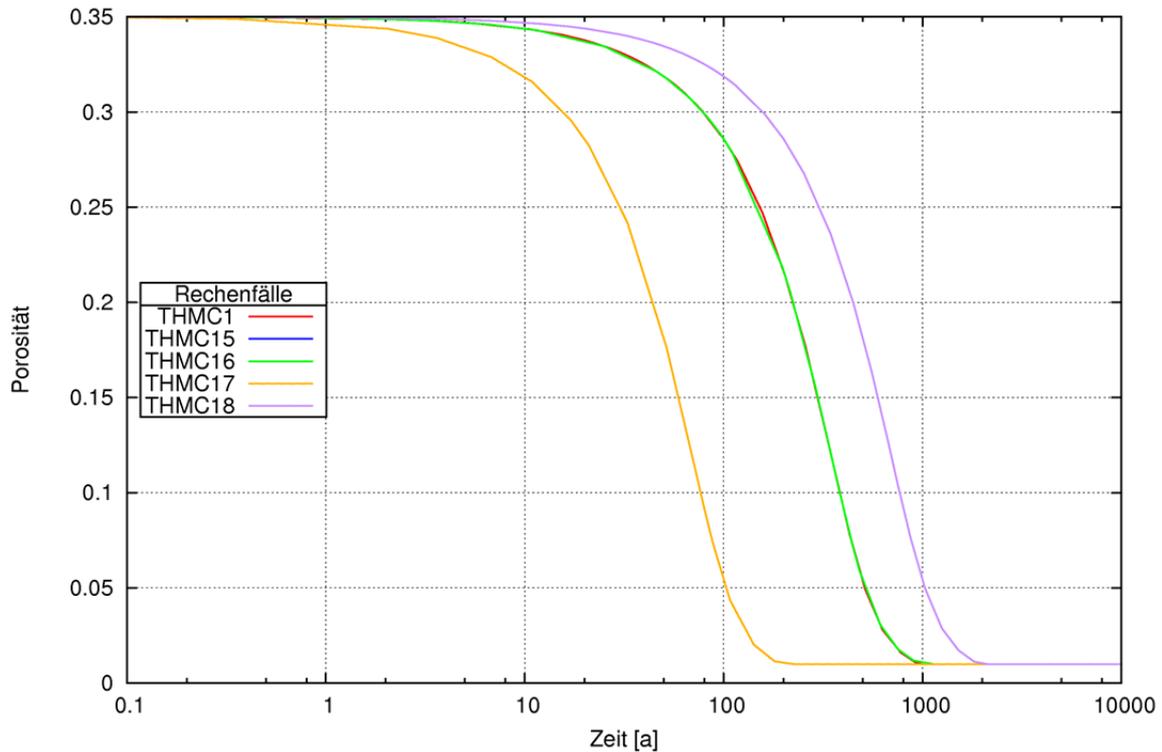


Abb. 4.30 Porositätsentwicklung im Messpunkt E.5 (Salzgrusversatz) für die Rechenfälle THMC 1 und THMC 15 – 18

4.5.1 Flüssigkeitssättigung und Laugenfluss

Da eine Kompaktion in den Rechenfällen THMC 15 und THMC 16 in der gestörten Zone um den Streckenverschluss und den Salzgrusversatz fehlt, steht der Porenraum hier zeitlich uneingeschränkt für den Laugenfluss zur Verfügung. Bereits nach 10 Jahren beginnt sich der Porenraum für diese beiden Rechenfälle im Messpunkt D.6 und D.5 zu sättigen (Abb. 4.31 und Abb. 4.32). Für die Rechenfälle mit Kompaktion ist zunächst im Rechenfall THMC 18 in allen Materialien der Porenraum im Streckenabschnitt D nach ca. 1.500 Jahren mit Lauge aufgesättigt. Dann folgen um jeweils ca. 500 Jahre zeitversetzt die Rechenfälle THMC 1 und 17 (Abb. 4.31 und Abb. 4.32).

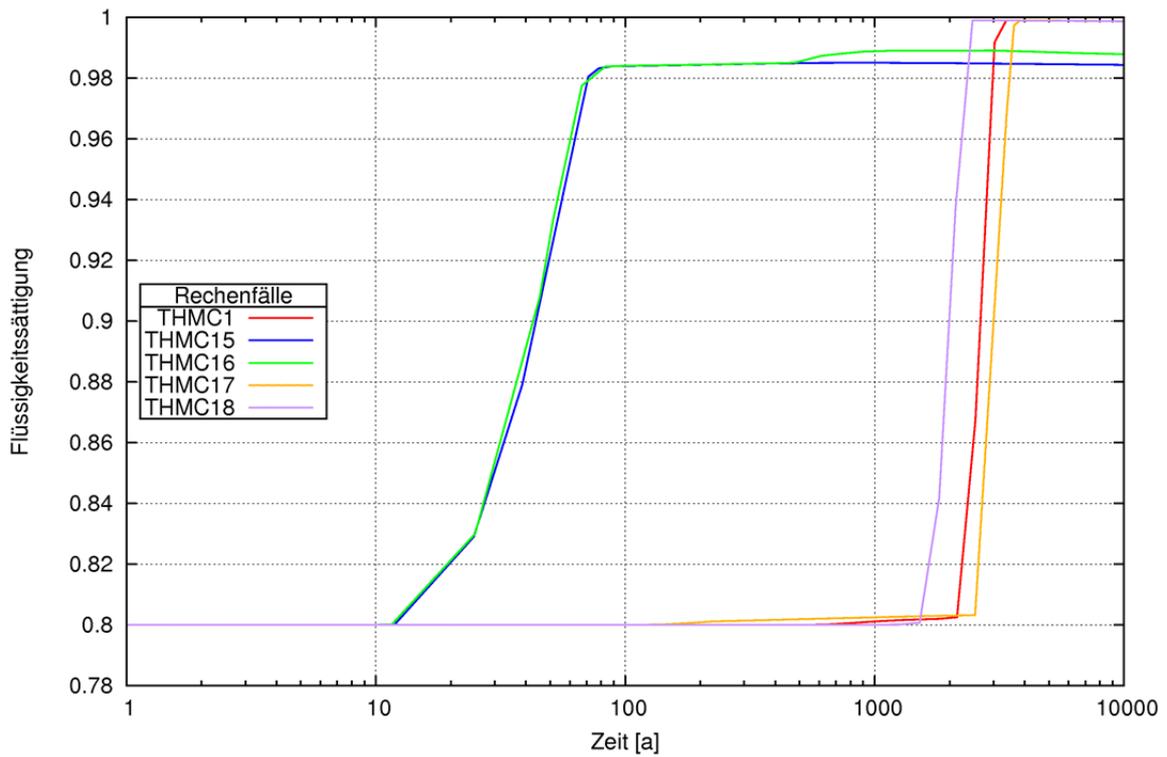


Abb. 4.31 Flüssigkeitssättigung im Messpunkt D.5 (Sorelbeton) für die Rechenfälle THMC 1 und 15 – 18

Die Rechenfälle mit Kompaktion in der gestörten Zone lassen den Kompaktionsprozess an dem zeitlich versetzten Anstieg der relativen Flüssigkeitssättigung im Porenraum erkennen. Die eigentliche Sättigung ist je nach Kompaktionsgeschwindigkeit der Rechenfälle ca. 500 Jahre zeitversetzt (Abb. 4.32).

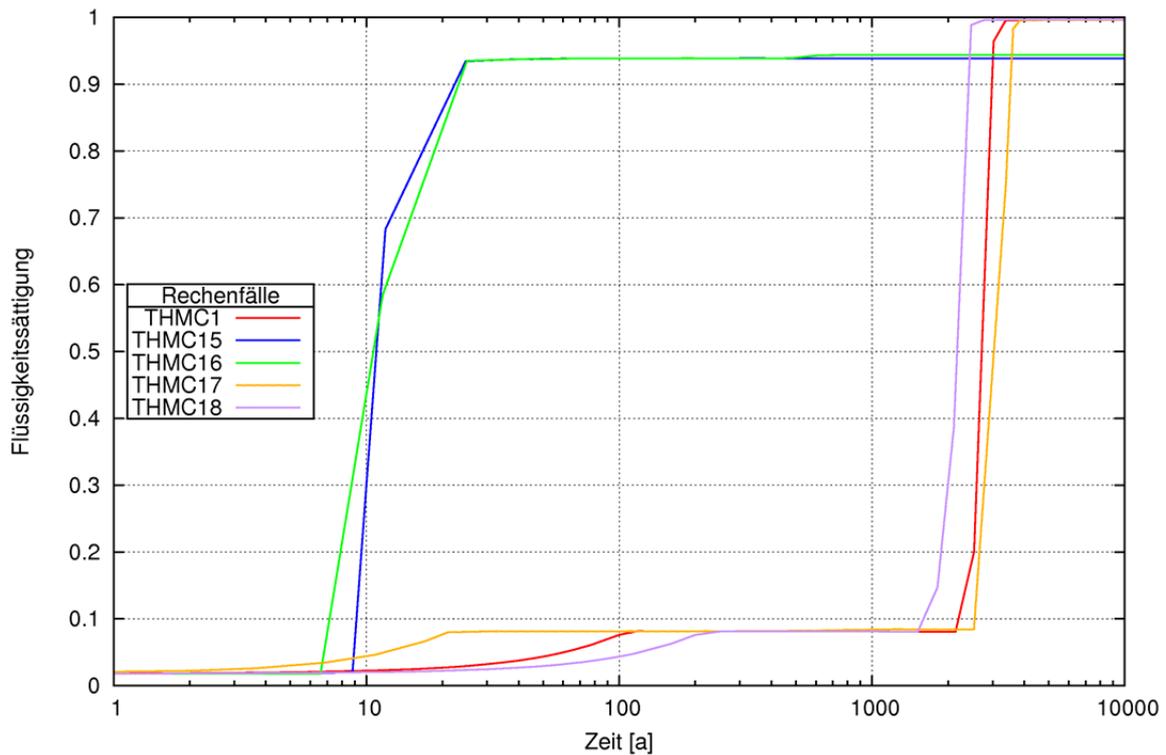


Abb. 4.32 Flüssigkeitssättigung im Messpunkt D.6 (gestörte Zone) für THMC 1 und THMC 15 – 18

Der Laugenfluss im Messpunkt D.5 beginnt nach ca. 40 bzw. 50 Jahren im Rechenfall THMC 15 und 16. Nach 100 Jahren liegt der Laugenfluss für beide Rechenfälle bei $5,8E-7$ kg/s. Nach 700 Jahren fällt der Laugenfluss im Rechenfall THMC 16 auf einen Wert von $3,0E-8$ kg/s ab (Abb. 4.33), da sich der Porenraum im Salzgrus hinter dem Streckenverschluss aufgrund der Kompaktion verringert. Der Laugenfluss im Rechenfall THMC 15 bleibt nach 100 Jahren konstant. Die Rechenfälle THMC 1, 17 und 18 zeigen aufgrund der unterschiedlichen Kompaktionsgeschwindigkeiten einen zeitversetzten Laugendurchbruch und Laugenfluss. Der Laugenfluss beginnt bei 3.400 Jahren im Rechenfall THMC 17 und bei 2.100 Jahren im Rechenfall THMC 18 (Abb. 4.33). Nach ca. 3.500 Jahren stellt sich in beiden Rechenfällen der gleiche Laugenfluss von $1,55E-7$ kg/s wie im Basisfall ein.

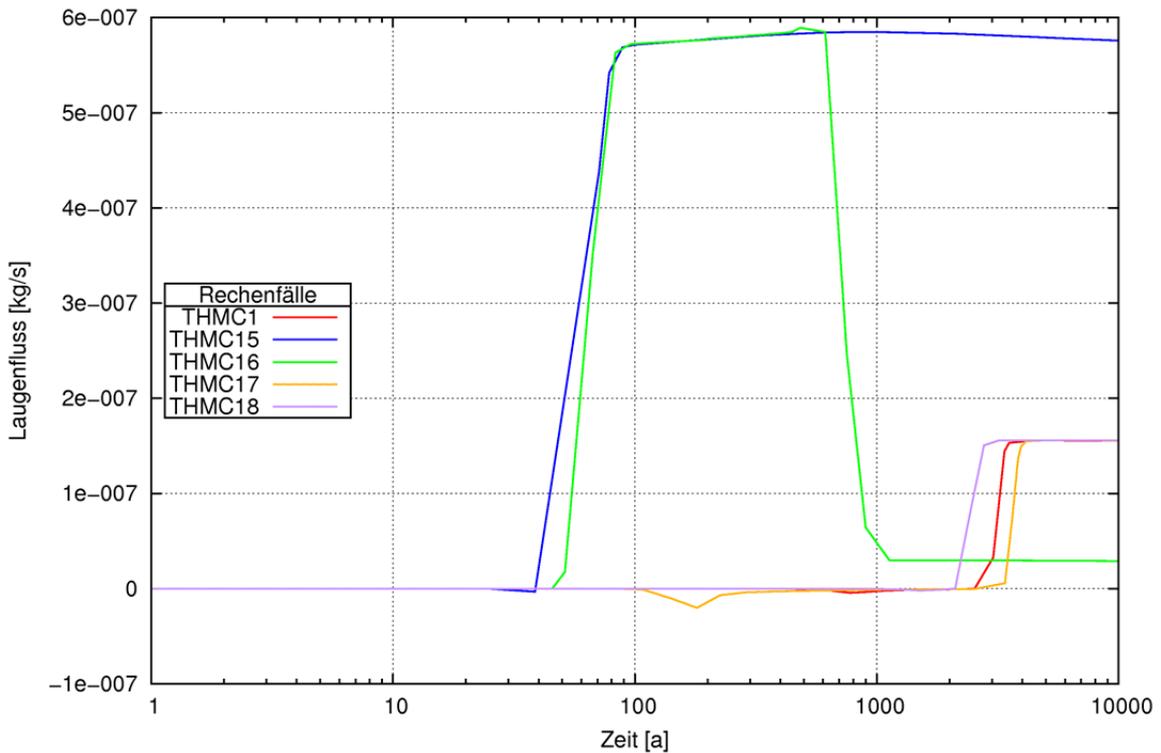


Abb. 4.33 Laugenfluss im Messpunkt D.5 (Sorelbeton) für die Rechenfälle THMC 1 und 15 – 18

Der Laugenfluss beginnt für die Rechenfälle THMC 15 und 16 im Messpunkt D.6 bereits nach 10 Jahren. Für beide Rechenfälle stellt sich nach 100 Jahren ein Laugenfluss von $2,6E-5$ kg/s ein. Aufgrund des großen Unterschieds von 3 Größenordnungen werden diese beiden Rechenfälle nicht in der Abb. 4.34 dargestellt.

Für die Rechenfälle THMC 17 und 18 beginnt der Laugenfluss im Messpunkt D.6 zeitgleich mit dem Laugenfluss im Messpunkt D.5 und erreicht bei beiden Rechenfällen einen Wert von $2,3E-8$ kg/s. Dieser Wert ist nur geringfügig geringer als der des Basisfalls (Abb. 4.34).

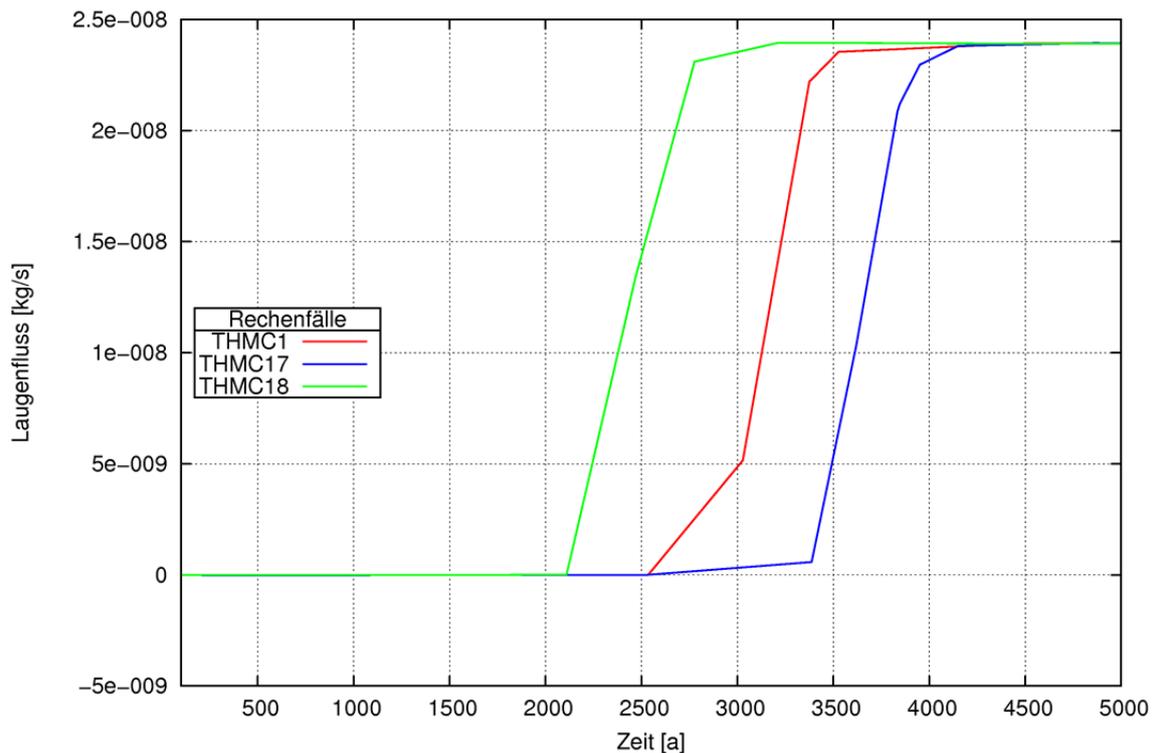


Abb. 4.34 Laugenfluss im Messpunkt D.6 (gestörte Zone) für THMC 1, 17 und 18

Die durchgeflossene Laugenmenge im Streckenabschnitt D ist bei den Rechenfällen THMC 15 und THMC 16 im Vergleich zum Basisfall (THMC 1) ca. 260 fach höher (Tab. 4.5). Eine nicht dargestellte Testrechnung mit eingeschalteter Kompaktion hinter dem Streckenverschluss in der gestörten Zone um den Salzgrusversatz und im Salzgrusversatz, zeigt lediglich das dreifache der durchgeflossenen Laugenmenge im Vergleich zum Basisfall nach 50.000 Jahren. Die Rechenfälle THMC 17 und 18 zeigen keinen signifikanten Unterschied zum Basisfall. Die durchgeflossene Laugenmenge ist für den Rechenfall THMC 17 etwas geringer und für den Rechenfall THMC 18 etwas höher.

Im Wesentlichen beeinflusst die Kompaktion in der Übergangsphase den Zeitpunkt des Laugendurchbruchs, nicht aber die durchgeflossene Laugenmenge nach 50.000 Jahren. Nur im unwahrscheinlichen Fall, dass keine Kompaktion stattfindet, fließen größere Laugenmengen im Vergleich zum Basisfall über den Streckenverschluss. Die Wahl von f_{loc} ist somit nicht sensitiv für die durchgeflossene Laugenmenge für große Zeiträume.

Tab. 4.5 Durchflossene Laugenmengen im Streckenabschnitt D nach 50.000 Jahren

Rechenfall	gestörte Zone [kg]	Sorelbeton [kg]	Summe [kg]	Anteil am Basisfall [%]
THMC 1 Basisfall	243.424	911.848	1.155.272	100
THMC 15	303.983.336	3.686.456	307.669.792	26.631
THMC 16	301.636.724	231.572	301.868.296	26.129
THMC 17	243.002	901.290	1.144.292	99,0
THMC 18	246.194	926.122	1.172.316	101,5

4.6 Zusätzliche Gittergeometrien (THMC 19 – 21)

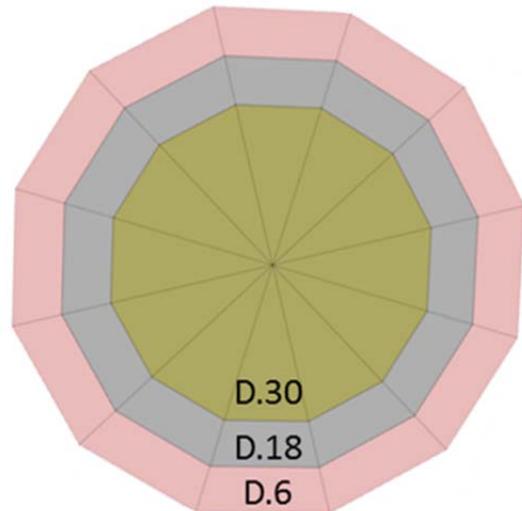
Der Einfluss der Gittergeometrien bzw. die Trennung der gestörten Zone in eine Auflockerungs- und Kontaktzone auf den Laugenfluss wird mit zwei weiteren Modellgittern untersucht (siehe Kap. 2.1.2) und mit dem Basisfall verglichen. Zudem wird der Einfluss eines vereinfachten Modellgitters mit einer integralen Permeabilität auf den Laugenfluss untersucht.

Die Abb. 4.35 zeigt die Messpunkte, die zur Auswertung der Laugenflüsse in den verschiedenen Modellgittern verwendet werden. Der Streckenabschnitt D besteht im Rechenfall THMC 21 aus einem Element, deshalb ist eine Darstellung des Querschnittes für diesen Rechenfall obsolet.

Basisfall (THMC 1)

D.2	D.3		
D.1	D.4		
		D.5	D.8
		D.6	D.7

Rechenfall THMC 20



Rechenfall THMC 19

D.3	D.4	D.5			
D.2	D.12	D.13			
D.1	D.11	D.17			
			D.19	D.16	D.10
			D.14	D.15	D.9
			D.6	D.7	D.8

Abb. 4.35 Streckenquerschnitte der Gittermodelle mit Messpunkte zur Auswertung

Das Basismodell besteht aus einem Streckenkern (Sorelbeton) in braun und einer gestörten Zone in grau. Die Rechenfälle THMC 19 und 20 bestehen aus einem Streckenkern (braun), einer Kontaktzone (grau) und einer Auflockerungszone (rosa). Die Abbildungen sind nicht maßstabsgetreu und sollen nur die Lage der Messpunkte darstellen.

4.6.1 Streckenkern

Der Anstieg der Laugensättigung beginnt bei dem vereinfachten Gittermodell (THMC 21) am frühesten, schon nach 70 Jahren. Im Rechenfall THMC 19 beginnt der Einstrom von Lauge bei ca. 1.100 Jahren und für den Rechenfall THMC 20 bei ca. 1.000 Jahren. Zum Vergleich beginnt der Sättigungsprozess für den Basisfall nach 2.500 Jahren (Abb. 4.36).

Wie auch schon in den vorherigen Kapiteln beschrieben, ist der Anstieg der Sättigung für die Materialgebiete Sorelbeton, Kontaktzone und Auflockerungszone sehr ähnlich, weil diese in vertikaler Richtung direkt miteinander interagieren und eine homogene Durchlässigkeit besitzen. Um den Laugenfluss innerhalb der Schichten besser voneinander zu unterscheiden, müssten unterschiedliche Permeabilitäten in y- und z-Richtung verwendet werden. Es sei nochmal darauf hingewiesen, dass der Sättigungsbeginn nicht dem Laugendurchbruch entspricht. Der Laugendurchbruch ist mit einem merklichen Anstieg des Laugenflusses verbunden.

Der Sättigungsprozess der unterschiedlichen Materialgebiete unterscheidet sich aufgrund der unterschiedlichen Volumina und Querschnitte der verglichenen Gitterelemente, dies beeinflusst insbesondere den Zeitpunkt an dem die Elemente voll gesättigt sind und sich ein merklicher Laugenfluss einstellt, deshalb können die Laugendurchbrüche und die Laugenflüsse für den Sorelbeton aber auch für die Kontakt- und Auflockerungszone nicht miteinander verglichen werden. Sie werden der Vollständigkeit halber trotzdem aufgeführt.

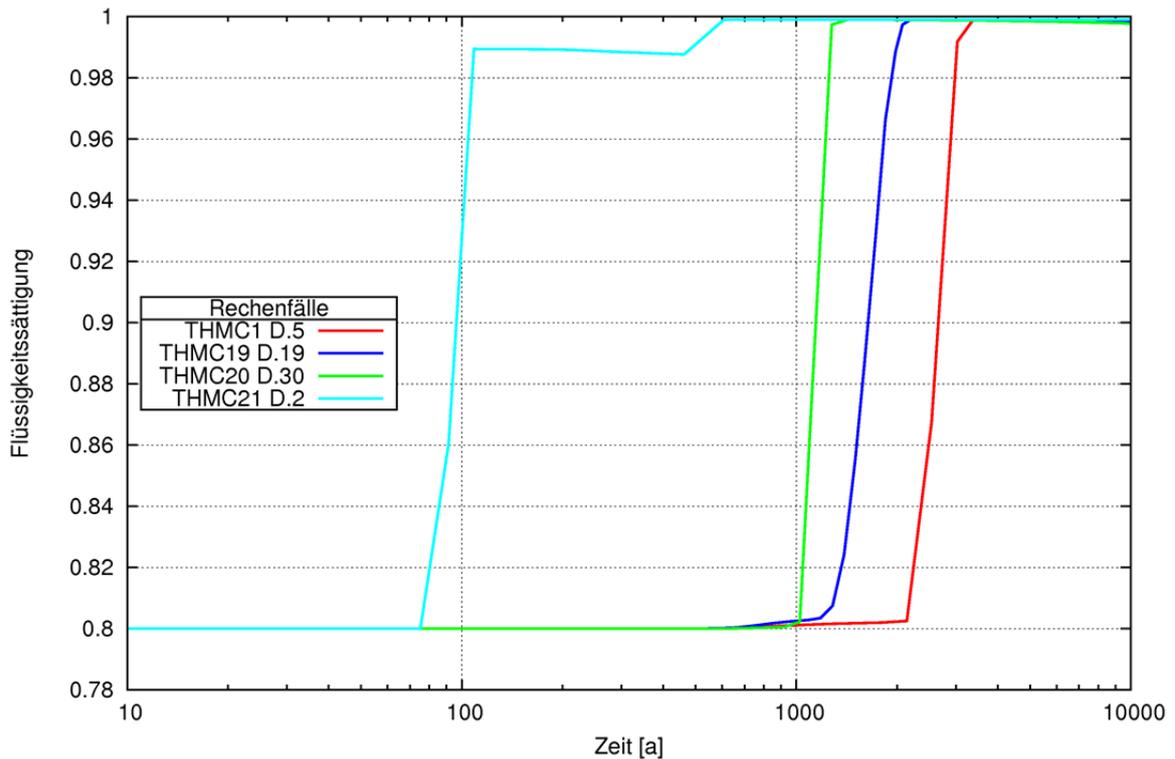


Abb. 4.36 Flüssigkeitssättigung im Sorelbeton für den Basisfall im Messpunkt D.5, den Rechenfall THMC 19 im Messpunkt D.19, den Rechenfall THMC 20 im Messpunkt D.30 und den Rechenfall THMC 21 im Messpunkt D.2

Aufgrund der großen Unterschiede der Rechenfälle THMC 1, 19 und 20 zum Rechenfall THMC 21 wird Letzterer aufgrund der großen Skalenunterschiede nicht in der Abb. 4.37 dargestellt. Der Laugenfluss beginnt nach 100 Jahren im Rechenfall THMC 21 (Messpunkt D.2) und erreicht einen Wert von $1,0E-6$ kg/s. Der maximale Laugenfluss beträgt für den Rechenfall THMC 19 im Messpunkt D.19 $1,5E-7$ kg/s und für den Rechenfall THMC 20 im Messpunkt E.30 $7,0E-8$ kg/s. Der Laugenfluss des Rechenfalls THMC 19 entspricht damit dem des Basisfalls.

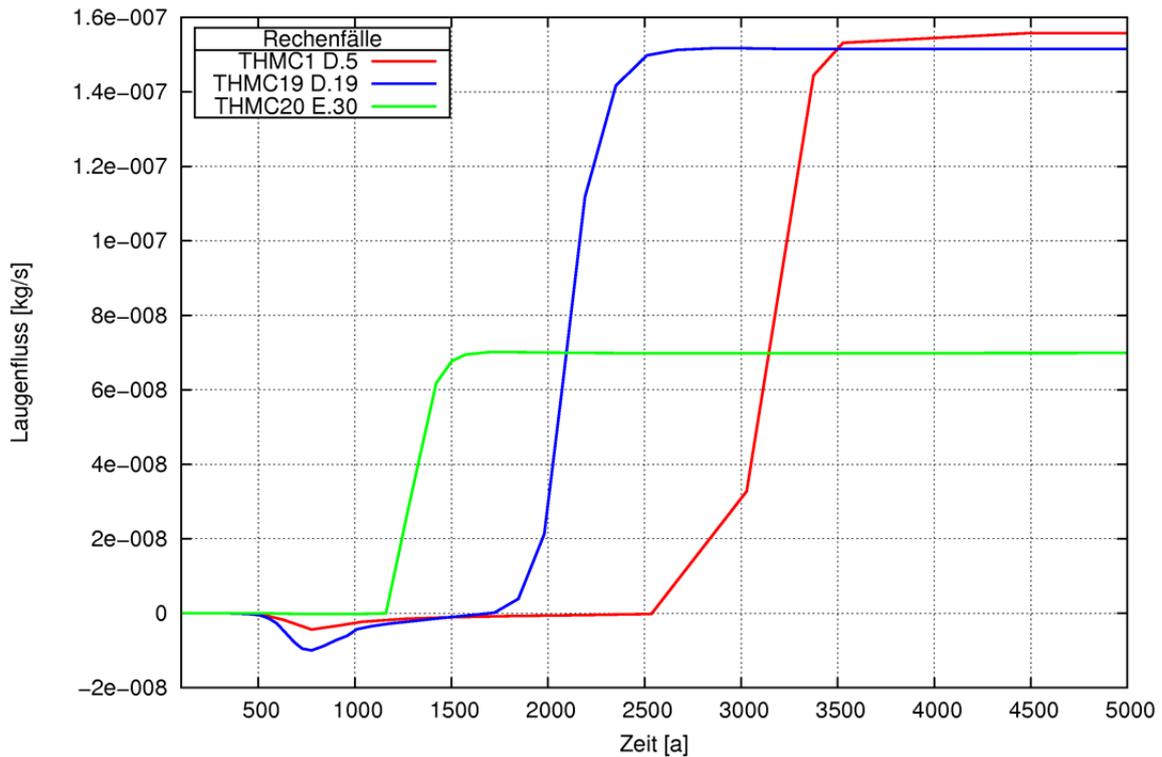


Abb. 4.37 Laugenfluss im Sorelbeton für den Basisfall THMC 1 im Messpunkt D.5, für den Rechenfall THMC 19 im Messpunkt D.19 und den Rechenfall THMC 20 im Messpunkt D.30

4.6.2 Kontaktzone

In der Abb. 4.38 ist ein Anstieg der Laugensättigung zwischen 100 und 1.000 Jahren für die Rechenfälle THMC 19 und 20 in der Kontaktzone erkennbar. Dies ist auf den Anstieg der Laugensättigung im Porenraum aufgrund des Kompaktionsprozesses zurückzuführen. Ein deutlicher Anstieg der Sättigung beginnt bei 1.800 Jahren für den Rechenfall THMC 19 und nach 1.150 Jahren für den Rechenfall THMC 20 (Abb. 4.38).

Der Rechenfall THMC 19 zeigt im Messpunkt D.14 einen Laugenfluss von $7,55E-9$ kg/s für den Rechenfall THMC 20 liegt der Laugenfluss bei $5,5E-9$ kg/s (Messpunkt D.18) (Abb. 4.39).

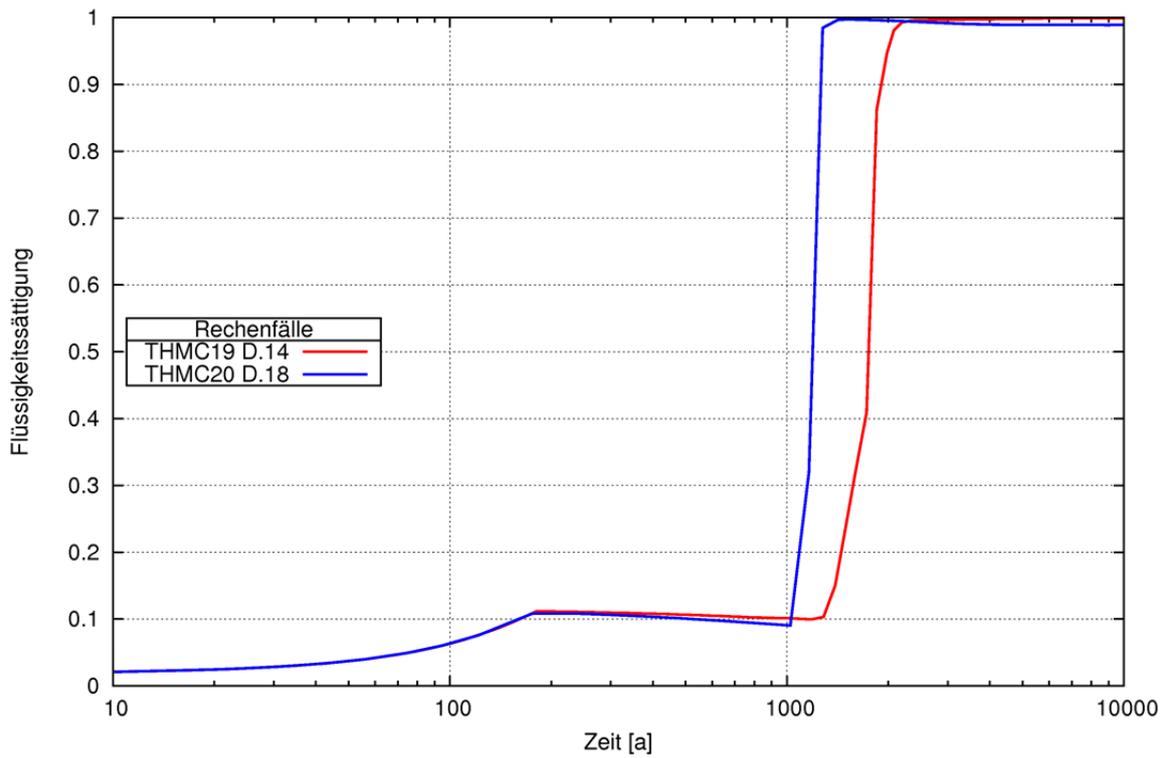


Abb. 4.38 Flüssigkeitssättigung in der Kontaktzone für den Rechenfall THMC 19 im Messpunkt D.14 und den Rechenfall THMC 20 im Messpunkt D.18

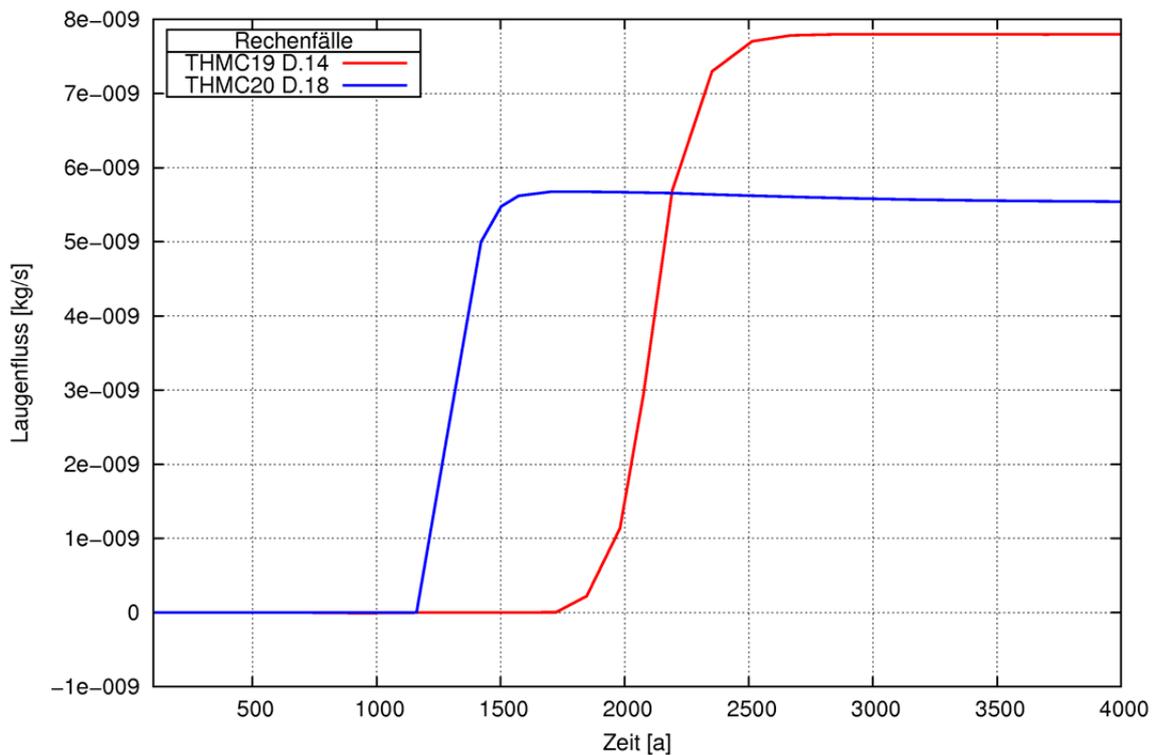


Abb. 4.39 Laugenfluss in der Kontaktzone für den Rechenfall THMC 19 im Messpunkt D.14 und für den Rechenfall THMC 20 im Messpunkt D.18

4.6.3 Auflockerungszone

Die Rechenfälle THMC 19 und 20 zeigen im Messpunkt D.6 einen geringen Anstieg der Porenraumsättigung aufgrund der Kompaktion im Vergleich zum Basisfall. Wahrscheinlich findet hier ein stärkerer Austausch mit der Kontaktzone statt (Abb. 4.40).

Der Laugenfluss für den Rechenfall THMC 19 beträgt nach 2.500 Jahren $2,0E-8$ kg/s und für den Rechenfall THMC 20 beträgt nach 1.500 Jahren der Laugenfluss $1,45E-8$ kg/s (Abb. 4.41).

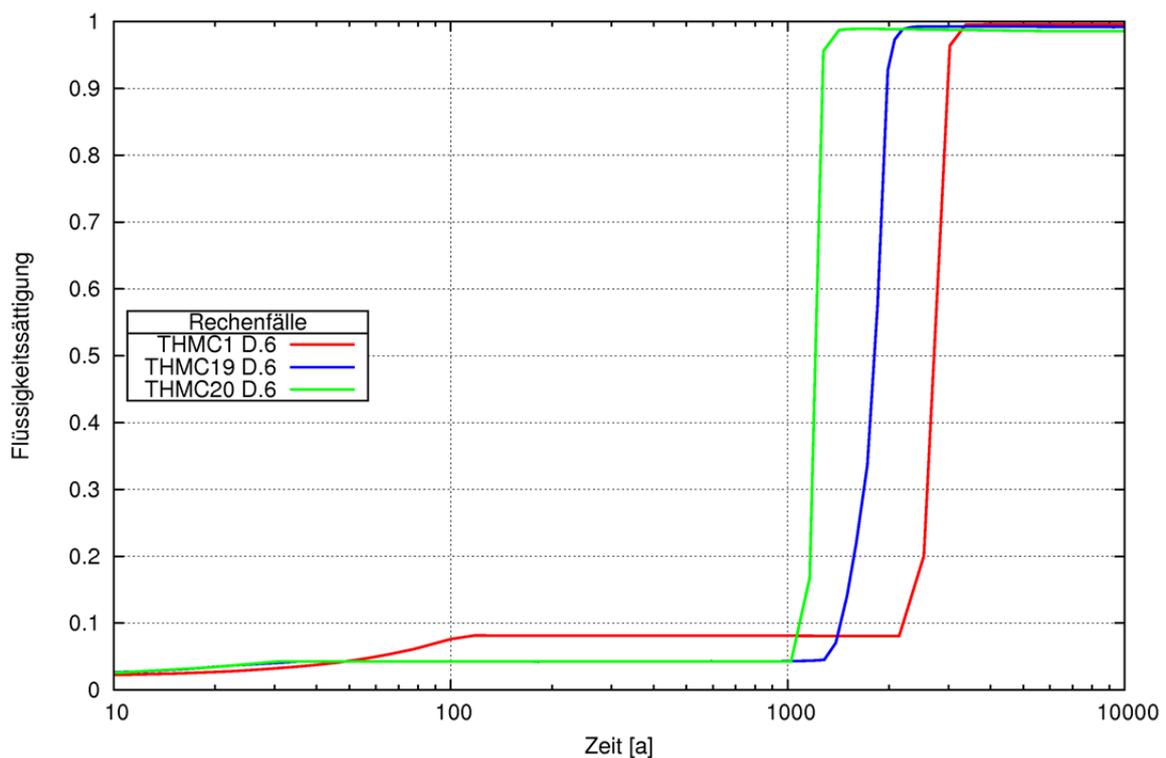


Abb. 4.40 Flüssigkeitssättigung für die Rechenfälle THMC 1, 19 und 20 im Messpunkt D.6 (Auflockerungszone)

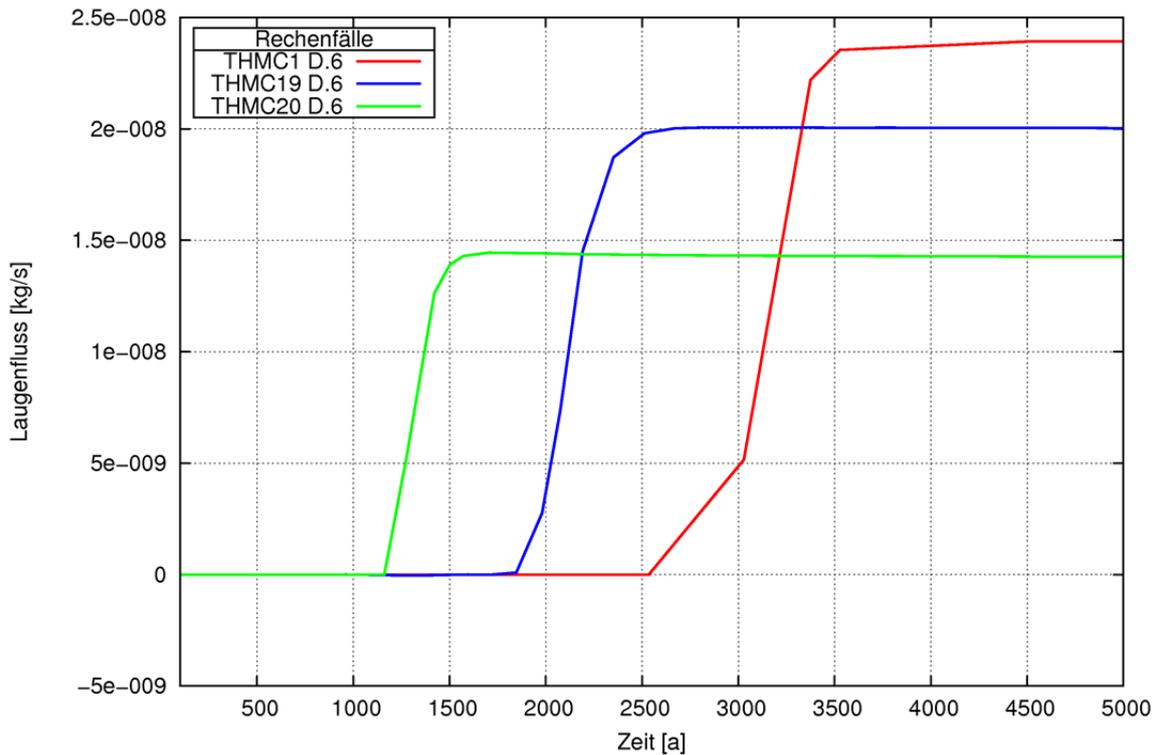


Abb. 4.41 Laugenfluss für die Rechenfälle THMC 1, 19 und 20 im Messpunkt D.6 (Auflockerungszone)

4.6.4 Laugenfluss zwischen den Schichten

Die Abb. 4.42 zeigt den Laugenfluss zwischen den drei Schichten Sorelbeton, Kontakt- und Auflockerungszone. Der Laugenfluss verläuft immer von innen nach außen (positiver Laugenfluss!).

Im Rechenfall THMC 19 beträgt der Laugenfluss zwischen dem Sorelbeton und der Kontaktzone nach ca. 2.500 Jahren $2,77E-8$ kg/s und zwischen der Kontakt- und Auflockerungszone $1,98E-8$ kg/s.

Im Rechenfall THMC 20 beträgt der Laugenfluss zwischen dem Sorelbeton und der Kontaktzone nach 1.500 Jahren $1,74E-8$ kg/s und zwischen der Kontakt- und Auflockerungszone $1,24E-8$ kg/s.

Die Abb. 4.42 zeigt, dass der Laugendurchbruch der einzelnen Schichten innerhalb eines Rechenfalls etwa zum gleichen Zeitpunkt stattfindet. Der Beginn des Laugenflusses ist im Rechenfall THMC 20 um ca. 700 Jahre früher als im Rechenfall THMC 19.

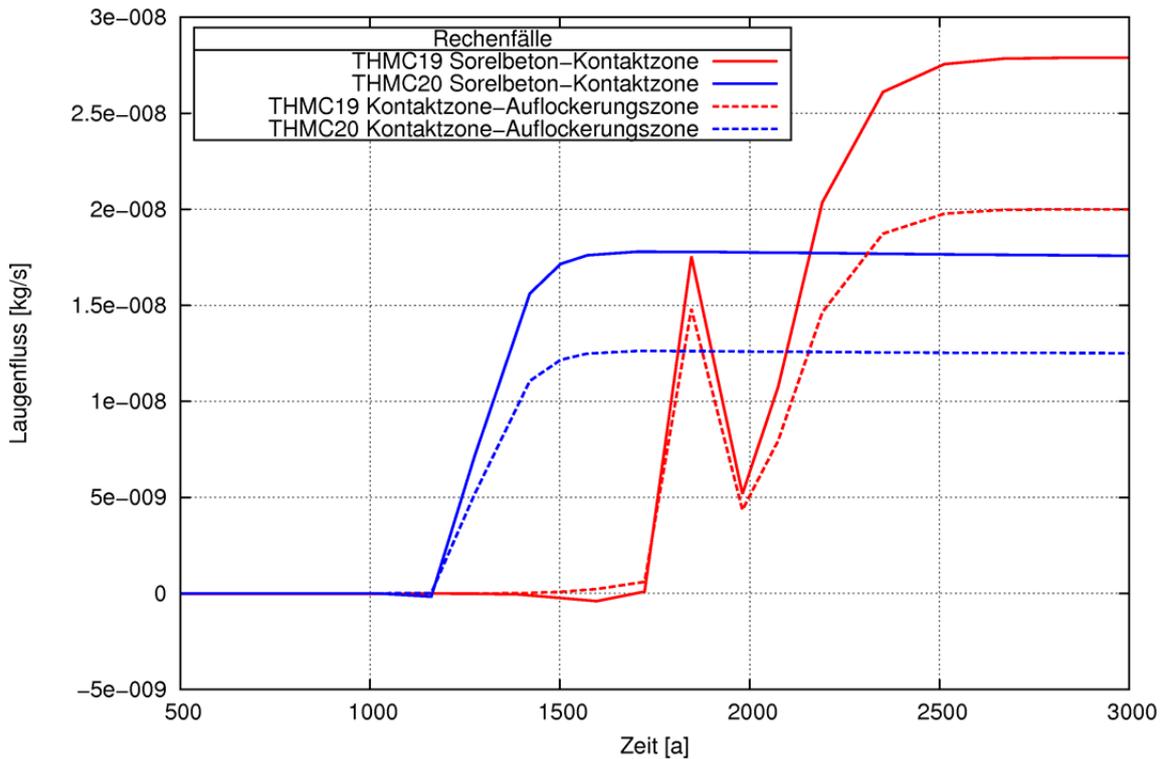


Abb. 4.42 Laugenfluss zwischen dem Streckenkern und der Kontaktzone bzw. der Kontakt- mit der Auflockerungszone im Streckenabschnitt D für die Rechenfälle THMC 19 und 20

Der geringe Unterschied im Laugenfluss zwischen dem Rechenfall THMC 19 und 20 kann durch einen geringen Unterschied der Querschnittsfläche bedingt sein. Die Kreisfläche für den Rechenfall THMC 20 ist nämlich kein perfekter Kreis, sondern ein Vieleck (Abb. 2.6), dadurch kann es zu kleinen Abweichungen von der Fläche des Kreisquerschnittes kommen.

Die ausgetauschte Laugenmasse zwischen den einzelnen Schichten ist für den Rechenfall THMC 19 nach 50.000 Jahren etwas höher im Vergleich zum Rechenfall THMC 20 (Tab. 2.6). Dies liegt an den größeren Kontaktflächen der Elemente zwischen den Schichten im Rechenfall THMC 19 im Gegensatz zum Rechenfall THMC 20. Im Rechenfall THMC 19 beträgt der gesamte Umfang z. B. für die Kontaktfläche Sorelbeton-Kontaktzone 27,6 m und 23,5 m für den Rechenfall THMC 20.

Tab. 4.6 Durchgeflossene Laugenmenge zwischen dem Streckenkern und der Kontaktzone bzw. der Kontakt- mit der Auflockerungszone nach 50.000 Jahren im Streckenabschnitt D

Rechenfall	Kern-Kontaktzone [kg]	Kontakt-/ Auflockerungszone [kg]
THMC 19	259.112	189.142
THMC 20	308.908	219.400

4.6.5 Summierte Laugenmengen

Da die einzelnen Gitterelemente für die Rechenfälle THMC 19, THMC 20 und THMC 21 unterschiedliche Abmessungen und damit Volumina und Querschnitte aufweisen, können der Laugendurchbruch und auch der Laugenfluss nicht sinnvoll miteinander verglichen werden. Das Volumen beeinflusst die Zeitdauer der Aufsättigung mit Lauge und der Querschnitt bestimmt den Durchfluss. Deshalb können zum Vergleich der Rechenfälle THMC 19, 20 und 21 nur die summierten Laugenmassen nach 50.000 Jahren herangezogen werden.

Grundsätzlich liegen die durchgeflossenen Laugenmengen der Rechenfälle THMC 19 (104 %) und 20 (139 %) über dem Basisfall. Da der Laugendurchbruch in allen Schichten für den Rechenfall THMC 20 etwas früher stattfindet, sind die durchgeflossenen Laugenmassen etwas größer als beim Rechenfall THMC 19 (Tab. 4.7). Da die Gesamtquerschnitte der einzelnen Schichten und die hydraulischen Parameter für die Rechenfälle THMC 19 und 20 gleich sind, dürfte dieser Unterschied auf die unterschiedliche Gittergeometrie zurückzuführen sein.

Die Abweichung der durchflossenen Laugenmasse im Streckenabschnitt D zwischen dem rechteckigen Gittermodell (THMC 19) und dem Basisfall ist vernachlässigbar (Tab. 4.7), so dass eine Vereinfachung der Auflockerungs- und Kontaktzone zu einer gestörten Zone als gerechtfertigt erscheint.

Die vereinfachte Gittergeometrie (THMC 21) diene als Vergleichsrechnung, um die Annahme einer integralen Porosität und Laugensättigung auf den Laugenfluss zu untersuchen. Die gesamte über den Streckenabschnitt D geflossene Laugenmasse ist wesentlich höher im Gegensatz zum Basisfall (Tab. 4.7).

Für den Rechenfall THMC 21 wird eine integrale Permeabilität aus den drei Schichten Sorelbeton, Auflockerungs- und Kontaktzone errechnet. Diese integrale Permeabilität ist um mehrere Größenordnungen höher als der Wert des Basisfalls und über den gesamten Modellzeitraum konstant. In der Realität würde die Kompaktion der Auflockerungs- und Kontaktzone die integrale Permeabilität senken. Dadurch wird der Durchfluss überschätzt.

Tab. 4.7 Laugendurchfluss der einzelnen Schichten nach 50.000 Jahren

Rechenfall	Sorelbeton [kg]	Kontaktzone [kg]	Auflockerungszone [kg]	Summe [kg]	Anteil am Basisfall [%]
THMC 1	911.848	243.424		1.155.272	
THMC 19	907.616	78.762	216.026	1.202.404	104,08
THMC 20	1.259.546	100.312	254.724	1.614.582	139,76
THMC 21				2.557.437	221,37

Die Tab. 4.8 zeigt die Verteilung der Laugenmasse bezogen auf die gesamte Laugenmasse des jeweiligen Rechenfalls in Prozent. Der größte Anteil fließt über den Streckenkern und die Auflockerungszone. Über die Kontaktzone fließen 6 – 7 % der Lauge. Die anteilige Laugenmassen der Rechenfälle bezogen auf die einzelnen Schichten unterscheiden sich nur geringfügig.

Tab. 4.8 Anteil der unterschiedlichen Schichten an der durchflossenen Laugenmasse in %

Rechenfall	Kern	Kontakt	Auflockerung	Gesamt
THMC 1	79	21		100
THMC 19	75	7	18	100
THMC 20	78	6	16	100

5 Zusammenfassung

5.1 Summierte Laugenmengen

Die Tab. 5.1 zeigt alle Rechenfälle mit den summierten Laugenmengen, die nach 50.000 Jahren durch den Streckenabschnitt D geflossen sind. Zudem wird der prozentuale Anteil der summierten Laugenmengen für die einzelnen Rechenfälle bezogen auf den Basisfall und der prozentuale Anteil der jeweiligen Schicht (Sorelbeton oder gestörte Zone) bezogen auf den jeweiligen Rechenfall angegeben.

Eine deutliche Abweichung der durchgeflossenen Gesamtlaugenmenge im Vergleich zum Basisfall zeigen die Rechenfälle THMC 2, 7, 13, 14, 15, 16, 20 und 21. Die Abweichungen der anderen Rechenfälle sind im Vergleich zum Basisfall vernachlässigbar.

Bei fast allen Rechenfällen fließen ca. 21 % der gesamten Laugemenge durch die gestörte Zone und 79 % durch den Streckenkern (Sorelbeton). Der Unterschied der Rechenfälle THMC 7 und 20 wird als vernachlässigbar angesehen. Nur der Rechenfall THMC 19 zeigt einen etwas höheren Laugenanteil, der durch die gestörte Zone geflossen ist. Die Rechenfälle THMC 15 und 16 zeigen, dass nahezu die vollständige Laugenmenge durch die gestörte Zone fließt. Bei dem Rechenfall THMC 2 fließt die gesamte Laugenmenge ausschließlich durch den Sorelbeton.

Tab. 5.1 Durchgeflossene Laugenmenge nach 50.000 Jahren (Streckenabschnitt D)

Parameter	Rechenfall	Gesamte Laugenmenge [kg]	Basisfall [%]	gestörte Zone		Sorelbeton	
				[kg]	[%]	[kg]	[%]
	THMC 1	1.155.272	100	243.424	21	911.848	79
Gestörte Zone	THMC 2	999.482	86,5	0	0	999.482	100
	THMC 3	1.154.516	99,9	243.278	21	911.238	79
Kapillardruck	THMC 4	1.153.226	99,8	243.394	21	909.832	79
	THMC 5	1.158.120	100,2	244.088	21	914.032	79
	THMC 6	1.205.918	104,4	255.464	21	950.454	79
	THMC 7	1.392.484	120,5	304.346	22	1.088.138	78
	THMC 8	1.155.212	100,0	243.786	21	911.426	79
	THMC 9	1.152.062	99,7	241.960	21	910.102	79
	THMC 10	1.149.356	99,5	240.892	21	908.464	79
Residuale Fluidsättigung	THMC 11	1.151.252	99,7	242.742	21	908.510	79
	THMC 12	1.154.092	99,9	243.526	21	910.566	79
	THMC 13	815.300	70,6	173.234	21	642.066	79
	THMC 14	819.560	70,9	174.358	21	645.202	79
Kompaktion	THMC 15	307.669.792	266fach	303.983.336	99	3.686.456	1,2
	THMC 16	301.868.296	261fach	301.636.724	100	231.572	0,08
	THMC 17	1.144.292	99,0	243.002	21	901.290	79
	THMC 18	1.172.316	101,5	246.194	21	926.122	79
Zusätzliche Gittermodelle	THMC 19	1.202.404	104,1	294.788	25	907.616	75
	THMC 20	1.614.582	139,8	355.036	22	1.259.546	78
	THMC 21	2.557.437	221,4				

Die Abb. 5.1 zeigt die Laugenmengen ohne die Rechenfälle THMC 15 und 16 zum Vergleich als Säulendiagramm.

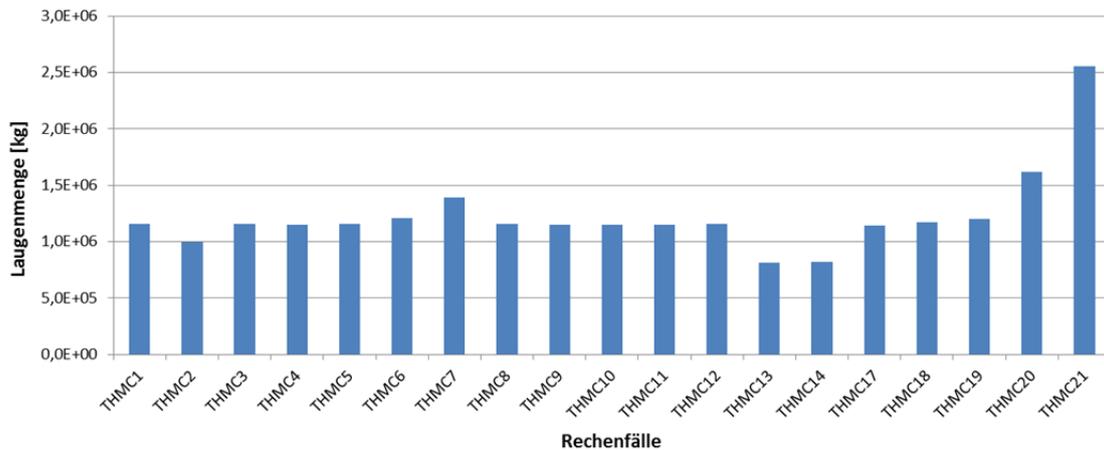


Abb. 5.1 Summierte Laugenmengen im Streckenabschnitt D für die einzelnen Rechenfälle (ohne Rechenfälle THMC 15 und 16)

5.2 Laugendurchbruch und -fluss

In der Tab. 5.2 sind für den Streckenabschnitt D die Zeitpunkte an denen sich ein Laugenfluss in der gestörten Zone (Laugendurchbruch), sowie dem Sorelbeton einstellt, dargestellt. Zudem ist die Größe des Laugenflusses angegeben.

Der Zeitpunkt des Laugendurchbruchs und die Laugenflüsse sind auch in Abb. 5.2 und Abb. 5.3 gezeigt. Es zeigt sich, dass der Unterschied im Zeitpunkt des Laugendurchbruches zwischen der gestörten Zone (blau) und dem Sorelbeton (rot) bei allen Rechenfällen gering ist. Lediglich für die Rechenfälle THMC 15 und 16 ist in der Abb. 5.2 ein Unterschied des Laugendurchbruches zu erkennen. Dieser Unterschied beträgt aber nur ca. 50 Jahre und kann bei der betrachteten Zeitspanne ebenfalls als vernachlässigbar betrachtet werden.

Tab. 5.2 Zeitpunkt des Laugendurchbruchs und Laugenflüsse für die gestörte Zone und den Sorelbeton

	Rechenfall	Laugendurchbruch Gestörte Zone [a]	Laugenfluss gestörte Zone [kg/s]	Laugendurchbruch Sorelbeton [a]	Laugenfluss Sorelbeton [kg/s]
	THMC 1	2.500	2,4E-8	2.500	1,55E-7
Gestörte Zone	THMC 2	0	0	3.300	1,72E-7
	THMC 3	2.500	2,4E-8	2.500	1,55E-7
Kapillardruck	THMC 4	2.500	2,4E-8	2.500	1,55E-7
	THMC 5	2.500	2,4E-8	2.500	1,55E-7
	THMC 6	2.200	2,5E-8	2.200	1,62E-7
	THMC 7	2.000	2,9E-8	2.500	1,86E-7
	THMC 8	2.600	2,3E-8	2.600	1,55E-7
	THMC 9	2.300	2,3E-8	2.300	1,55E-7
	THMC 10	2.300	2,3E-8	2.300	1,55E-7
Residuale Fluidsättigung	THMC 11	2.300	2,3E-8	2.300	1,55E-7
	THMC 12	2.620	2,3E-8	2.620	1,55E-7
	THMC 13	15.300	2,3E-8	15.300	1,55E-7
	THMC 14	14.600	2,3E-8	14.600	1,55E-7
Kompaktion	THMC 15	10	2,6E-5	40	5,80E-7
	THMC 16	10	2,6E-5	50	3,0E-8
	THMC 17	3.400	2,3E-8	3.400	1,55E-7
	THMC 18	2.100	2,3E-8	2.100	1,55E-7
Zusätzliche Gittermodelle	THMC 19	Aufl. 1.850 Kont.1.800	Aufl. 2,0E-8 Kont.7,55E-9	1.750	1,5E-7
	THMC 20	Aufl. 1.150 Kont. 1.150	Aufl. 1,45E-8 Kont.5,50E-9	1.150	7,0E-8
	THMC 21			100	1,0E-6

Aufl. = Auflockerungszone, Kont. = Kontaktzone

Der Vergleich der Rechenfälle untereinander zeigt, dass die Laugendurchbrüche für die Rechenfälle THMC 13 und 14 wesentlich später und für die Rechenfälle THMC 15, 16 und 21 wesentlich früher als im Basisfall stattfinden. Im Rechenfall THMC 17 findet der Laugendurchbruch etwas später und im Rechenfall THMC 20 etwas früher statt als im Basisfall. Die Laugendurchbrüche sind aufgrund des Fluidaustausches zwischen

den Schichten und der ähnlichen hydraulischen Parameter der gestörten Zone und des Sorelbetons sehr ähnlich.

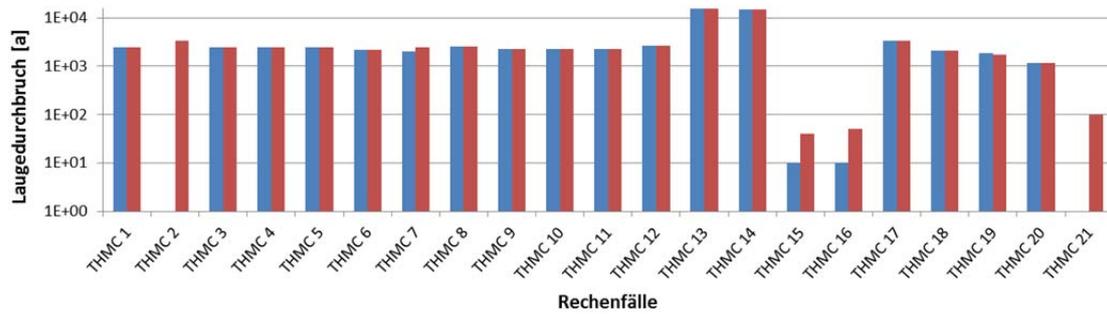


Abb. 5.2 Zeitpunkte des Laugendurchbruchs im Streckenabschnitt D für die einzelnen Rechenfälle in Jahren

Blau (gestörte Zone) und rot der Sorelbeton.

Die Laugenflüsse in der gestörten Zone (blau) und im Sorelbeton (rot) sind für alle Rechenfälle vergleichbar zu denen des Basisfalls (Abb. 5.3). Nur die Rechenfälle THMC 15, 16 und 21 zeigen größere Abweichungen zum Basisfall.

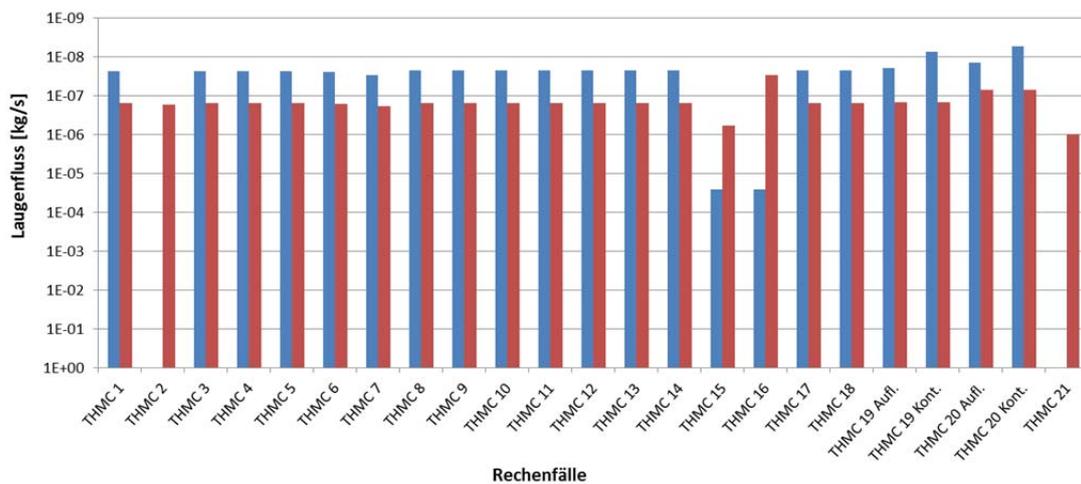


Abb. 5.3 Höhe des Laugenflusses für die einzelnen Rechenfälle im Streckenabschnitt D

Dargestellt sind die gestörte Zone (blau) bzw. der Sorelbeton (rot). THMC 19 Aufl./Kont. bzw. THMC 20 Aufl./Kont. zeigt die Laugenflüsse der Kontakt- und Auflockerungszone (blau) im Vergleich zum Sorelbeton (rot) dargestellt.

5.3 Gestörte Zone

Die Laugenmenge ist im Rechenfall THMC 2 im Vergleich zum Basisfall aufgrund des Fehlens der gestörten Zone (kleinerer Querschnitt) geringer (Tab. 5.1 bzw. Abb. 5.1). Der Laugendurchbruch findet im Sorelbeton ca. 800 Jahre später statt als im Basisfall (Tab. 5.2 bzw. Abb. 5.2). Die initial höhere Permeabilität in axialer Richtung der gestörten Zone für den Rechenfall THMC 3 hat keinen signifikanten Einfluss auf die gesamt durchflossene Laugenmenge im betrachteten Zeitraum im Vergleich zum Basisfall (Tab. 5.1 bzw. Abb. 5.1). Der Laugenfluss entspricht bei allen Rechenfällen dem des Basisfalls (Tab. 5.2 bzw. Abb. 5.3).

Die initiale Permeabilität ist deshalb bei der Annahme einer relativ schnellen Konvergenz der gestörten Zone für längere Zeiträume nicht sensitiv auf die durchflossene Gesamtlaugenmasse.

5.4 Kapillardruck

Die Erhöhung des Kapillardruckes in der gestörten Zone und im Sorelbeton führt zu einem früheren Laugendurchbruch für die Rechenfälle THMC 6 und 7, sowie für die Rechenfälle THMC 8, 9 und 10 (Tab. 5.2 bzw. Abb. 5.2). Zudem erhöht sich der Laugenfluss sowie die durchflossene Laugenmasse für diese Rechenfälle geringfügig (Tab. 5.1 und Tab. 5.2). Dieser etwas höhere Laugenfluss wird durch den Einfluss der Randbedingung B hervorgerufen. Der Kapillardruck der Randbedingung B induziert eine Sogwirkung auf die Lauge. Diese verhindert eine vollständige Sättigung des Salzgrusversatzes mit Lauge, wodurch eine vollständige Laugensättigung des Salzgrusversatzes nicht stattfindet und ein permanenter Kapillardruck bestehen bleibt. Dieser Prozess kann den Laugendurchbruch besonders bei längeren Transportstrecken beeinflussen, da die Flüssigkeit praktisch in die Strecken „gezogen“ wird.

Wahrscheinlich machen sich unterschiedliche Kapillardrücke in Bezug auf den Laugendurchbruch auf längeren Strecken, z. B. der Einstromphase zu Abfallgebinden im inneren eines Endlagers, bemerkbar. Zudem besitzt Salzgrusversatz nur geringe Kapillardrücke, somit sind die hohen Kapillardrücke für den Rechenfall THMC 7 als Annahme zum allgemeinen Prozessverständnis zu verstehen und nicht realistisch.

5.5 Residuale Laugensättigung

Die Veränderung der residualen Fluidsättigungen beeinflusst in den Modellrechnungen indirekt den Laugenfluss. Die initiale Sättigung des Porenraumes beeinflusst den Zeitpunkt der vollständigen Porenraumsättigung aufgrund der Kompaktion bzw. den Zeitpunkt an dem sich ein zusammenhängender Fließpfad für die Flüssigphase ausbildet. Dies ist in der Folge für die Rückhaltung von Gasen oder für geochemische Modellierungen wichtig. Die Rechenfälle THMC 13 und 14 zeigen aufgrund der geringen initialen Laugensättigung des Sorelbetons einen späteren Laugendurchbruch (Tab. 5.2 bzw. Abb. 5.2). In der Folge ist die durchgeflossene Laugenmasse für den betrachteten Zeitraum wesentlich geringer (Tab. 5.1 bzw. Abb. 5.1).

Die residualen aber auch insbesondere die initialen Fluidsättigungen in den Materialien sind für Modellierungen, die eine Übergangsphase untersuchen, ein wichtiger Parameter und deshalb genau zu prüfen.

5.6 Kompaktion

Da in den Rechenfällen THMC 15 und 16 die Kompaktion in der gestörten Zone abgeschaltet ist, findet der Laugendurchbruch im Streckenabschnitt D wesentlich früher statt als für die Rechenfälle THMC 17 und 18 (Tab. 5.2 bzw. Abb. 5.2). Die Verlangsamung (THMC 17) und die Beschleunigung (THMC 18) der Kompaktion führen zu unterschiedlichen Laugendurchbruchszeiten. Der Unterschied der durchgeflossenen Laugenmenge im Vergleich zum Basisfall ist allerdings gering und kann vernachlässigt werden (Tab. 5.1 bzw. Abb. 5.1).

Die Wahl von f_{loc} ist somit nicht sensitiv für die durchgeflossene Laugenmenge. Im Wesentlichen beeinflusst die Kompaktion in der Übergangsphase den zeitlichen Laugendurchbruch, nicht aber die durchgeflossene Laugenmenge nach 50.000 Jahren. Nur wenn der unwahrscheinlichste Fall angenommen wird und keine Kompaktion stattfindet (THMC 15 und 16) fließen größere Laugenmengen im Vergleich zum Basisfall über den Streckenverschluss.

Es sollte versucht werden das Endlager so lange wie möglich „trocken“ zu halten, das heißt einen signifikanten Zufluss von Flüssigkeit zu unterbinden. Denn der Fluidruck im Porenraum kann den Kompaktionsprozess wesentlich verlangsamen. Dies wird ins-

besondere im Streckenabschnitt A erkennbar, wo der Porenraum schnell mit Lauge aufgesättigt wird und sich ein Porendruck aufbaut.

5.7 Zusätzliche Gittergeometrien

Die Wahl des Modellgitters hat einen Einfluss auf den Laugenfluss (THMC 19 – 21, Tab. 5.1). Die Abweichung der durchflossenen Laugenmasse im Streckenabschnitt D zwischen dem rechteckigen Gittermodell (THMC 19) und dem Basisfall (THMC 1) wird als vernachlässigbar angesehen, so dass eine Zusammenfassung der Auflockerungs- und Kontaktzone zu einer gestörten Zone als gerechtfertigt erscheint. Dadurch kann aufgrund der geringeren Elementanzahl Rechenzeit bei der Initiierung der Rechenfälle und bei der Auswertung gespart werden. Durch den Streckenabschnitt D sind im Rechenfall THMC 20 ca. 35 % mehr Lauge geflossen als durch den Rechenfall THMC 19. Dieser Unterschied konnte trotz gleicher Fließquerschnitte und hydraulischer Parameter nicht abschließend geklärt werden.

Die Anwendung einer integralen Permeabilität über den gesamten Querschnitt (THMC 21), führt zu einer nicht vernachlässigbaren Abweichung in der durchflossenen Laugenmasse. Die vereinfachte Gittergeometrie ist deshalb nicht geeignet, da die Kompaktion der gestörten Zone nicht berücksichtigt wird.

Der Einfluss der Diskretisierung des Modellgitters auf THMC-Modellierungen verändert die Orientierung einzelner Elemente zueinander und führt so zur Änderung des Flüssigkeitsaustausches und zu unterschiedlichen Laugenflüssen. Daher ist immer zu prüfen ob einfachere Gittergeometrien ein hinreichendes Ergebnis bei einer hydraulischen Modellierung im Vergleich zu komplizierteren Modellgittern liefern, um zu entscheiden ob die Abweichungen vertretbar sind.

6 Schlussfolgerungen

Aufgrund der Annahmen zur Kompaktion des Salzgrus und der gestörten Zone bleibt der Streckenverschluss bei den für diese Modellierungen zugrunde gelegten hydraulischen Werten der primäre Strömungspfad. Dennoch könnten Unsicherheiten der hydraulischen Kennwerte für beide Materialien (Sorelbeton und Salzgrus) dazu führen, dass das Fließregime verändert ist.

Es ist zu beachten, dass der Porenraum im Sorelbeton und im Salzgrus in den Modellrechnungen immer als vernetzt angenommen wird. In der Realität können die Poren unterhalb einer bestimmten Porosität nicht mehr oder nur noch vereinzelt miteinander verbunden sein. Der advective Laugenfluss ist in diesem Fall stark gehemmt oder sogar unterbunden /POP 12/. Diese so genannte „Grenz-“porosität ab der ein Laugenfluss möglich bzw. darunter nicht mehr möglich ist, kann derzeit nicht quantifiziert werden. Die Modellrechnungen zum Umströmungsverhalten um einen Streckenverschluss überschätzen möglicherweise die durchgeflossenen Laugenmengen.

Der Laugenfluss der Modellrechnungen wird hauptsächlich vom Fließquerschnitt und der Permeabilität/Porosität beeinflusst. Es zeigt sich, dass die Zweiphasenfluss-Parameter und die Wahl von „ f_{loc} “ wenig sensitiv auf den Laugenfluss in der Übergangsphase sind. Residuale Fluidsättigung wirken sich bei hohen Werten aus, da zum einen der Fließquerschnitt verringert wird und zum anderen die Auffüllphase schneller abläuft. Somit ist der Kapillardruck zu Beginn der Rechnung wesentlich geringer.

7 **Ausblick**

Die vorliegenden Modellierungen betrachteten ausschließlich die Strömung um und durch einen Streckenverschluss aus Sorelbeton. Die Prozesse sind vergleichsweise einfach abzubilden, da der Streckenverschluss nicht kompaktiert und ein formschlüssiger Anschluss zwischen Streckenkontur und Sorelbeton ohne Firstspalt vorliegt. Deshalb wirkt ein Stützdruck instantan auf die Kontakt- bzw. Auflockerungszone und leitet den Kompaktionsprozess ein.

Die Beschreibung der Kompaktion der gestörten Zone um eine mit Salzgrus versetzte Strecke ist aufwendiger. Zum Prozessverständnis müsste das Modell zur Abbildung der Auflockerungszone (bzw. gestörten Zone) hierfür numerisch angepasst werden. TOUGH2 berechnet die Materialgebiete im Streckenquerschnitt (Versatz, gestörte Zone) bislang getrennt voneinander. Die angenommenen Parameter und Prozesse der gestörten Zone und der mit Salzgrus versetzten Strecke sind unabhängig voneinander und sind numerisch nicht miteinander gekoppelt. In der Realität ist dies aber der Fall. Der Kompaktionsvorgang in der gestörten Zone beginnt nämlich erst dann wenn ein Stützdruck im Salzgrusversatz aufgebaut ist. Hierfür ist Entwicklungsarbeit erforderlich.

Das Durchströmen des Streckenverschlusses mit Laugen, deren Zusammensetzung zur Reaktion mit dem Sorelbeton führen, kann Lösungs- oder Ausfällungsprozesse von Mineralen hervorrufen. Diese Prozesse können die hydraulischen Parameter des Streckenverschlusses signifikant verändern. Somit ist insbesondere die Betrachtung der Chemie für die Durchströmung eines Streckenverschlusses interessant.

Weitere Modellierungen zum Prozessverständnis erscheinen zur Betrachtung des Gas- transports in Verbindung mit dem Verhalten bei Erreichen des Gaseindringdrucks angebracht, um Parameter für spätere Zweiphasen-Modellierungen in Verbindung mit einem Radionuklidtransport numerisch ausreichend begründen zu können.

Die weiteren Untersuchungen sollten die Verbesserung der numerischen Abbildung der Prozesse und deren Kopplung zur Modellierung evtl. unter Nutzung einer verbesserten Datenlage beinhalten.

Literaturverzeichnis

- /BOL 11/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M.: Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, ISBN 978-3-939355-48-9, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2011.
- /COR 54/ Corey, A.T.: The interrelation between gas and oil relative permeabilities. Producers Monthly, S. 38-41, November 1954.
- /FRI 13/ Frieling, G., Bracke, G.: TOUGH2-Modellierungen - Prä- und Postprozessing. GRS-315, GRS: Köln, Dezember 2013.
- /GEN 80/ Van Genuchten, M.T.: A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Sci. Soc., Vol. 44, S. 892 - 898.
- /HÄF 01/ Häfner, F., Belohlavek, K.-U., Behr, A., Förster, S., Pohl, A.: In-situ-Ermittlung von Strömungskennwerten natürlicher Salzgesteine in Auflockerungszonen gegenüber Gas und Salzlösungen unter den gegebenen Spannungsbedingungen im Gebirge. Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau: Freiberg, April 2001.
- /KRÖ 09/ Kröhn, K.-P., Stührenberg, D., Herklotz, M., Heemann, U., Lerch, C., Xie, M.: Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrusversatz, REPOPERM - Phase 1. Abschlussbericht, GRS-254, ISBN 978-3-939355-29-8, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE TECHNOLOGY GmbH, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, September 2009.
- /LAR 13/ Larue, J., Baltés, 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, ISBN 978-3-939355-65-6, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2013.
- /LEV 41/ Leverett, M.: Capillary Behaviour in porous Media. Petroleum Transactions, Vol. 142, S. 341-358.

- /MAU 03/ Mauke, R., Schmidt, H.: Untersuchung der Kontaktzone am Asse-Vordamm, Darstellung und Bewertung der Ergebnisse, Bundesamt für Strahlenschutz (BFS), DBE TECHNOLOGY GmbH, Vortrag beim 32. Geomechanik-Kolloquium: Leipzig, 2003.
- /MÜL 99/ Müller-Lyda, I., Birthler, H., Fein, E.: Ableitung von Permeabilitäts-Porositätsrelationen für Salzgrus. GRS-148, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, Januar 1999.
- /MÜL 11a/ Müller-Hoeppe, N.: Konstruktiver Entwurf der Streckenverschlüsse – Grundlagen für die hydraulische Auslegung (Variante B1 und A). Arbeitspaket AP 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Entwurf, DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, 2011.
- /Mül 11b/ Müller-Hoeppe, N., Engelhardt, H.J.: Ermittlung der anfänglichen Porenraumsättigung vom Salzbeton Typ Asse und vom Sorelbeton A1 und Ca-Bentonit Typ Salzdetfurth (Arbeitspaket 9.1.2). DBETEC: Peine, Oktober 2011.
- /MÜL 12a/ Müller-Hoeppe, N.: Materialspezifikationen für Filter/Aufsättigungs- und Widerlager/Speicherelemente sowie eines Langzeitdichtelementes für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Arbeitspaket AP 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Entwurf, DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, 26.01.2012.
- /MÜL 12b/ Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.J., Herbert, H.-J., Lerch, C., Linkamp, M., Wieczorek, K., Xie, M.: Integrität geotechnischer Barrieren – Teil 1: Vorbemessung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-287, ISBN: 978-3-939355-63-2, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.

- /NAV 12/ Navarro, M.: Erweiterungen des Codes TOUGH2 zur Simulation von Strömungs- und Transportprozessen in Endlagern, In Vorbereitung. In Vorbereitung als Bericht zum Vorhaben 3609R03210 „Forschung und Entwicklung zum Nachweis der Langzeitsicherheit von tiefen geologischen Endlagern“, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /POP 02/ Popp, T.: Transporteigenschaften von Steinsalz - Modellierung der Permeabilitäts-Porositäts-Beziehung. Meyniana, Vol. 54, S. 113-129, 2002.
- /POP 11/ Popp, T.: Untersuchungen zur Ermittlung der Dilatanzgrenze an Steinsalz aus der Lokation Gorleben. Institut für Gebirgsmechanik (IFG): Leipzig, 2011.
- /POP 12/ Popp, T., Salzer, K., Schulze, O., Stührenberg, D.: Hydro-mechanische Eigenschaften von Salzgrusversatz - Synoptisches Prozessverständnis und Datenbasis. Memorandum, Institut für Gebirgsmechanik (IFG), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Leipzig, 30.05.2012.
- /PRU 99/ Pruess, K., Oldenburg, C., Moridis, G.: TOUGH2 User's Guide, Version 2.0. Paper LBNL-43134, 198 Seiten, LBNL-43134, Lawrence Berkeley National Laboratory: Berkeley, November 1999.
- /RAU 03/ Rauche, H., Sitz, P., Lukas, V., Rumphorst, K., Lippmann, G., Wagner, K., Teichert, T.: Nachweisführung zur Langzeitsicherheit, zur Tragfähigkeit und zur Gebrauchstauglichkeit der Schachtverschlüsse ERA Morsleben. Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben, P 177, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), 2003.
- /RÜB 10/ Rübél, A., Mönig, J.: Prozesse, Modellkonzepte und sicherheitsanalytische Rechnungen für ein Endlager im Salz. 142 Seiten, GRS-A-3521, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 2010.

- /STE 85/ Stelte, N.: Analytische Approximation der Konvergenzrate salzgrusversetzter und unter hydraulischem Druck stehender Hohlräume im Salzgestein. In: Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE). Abschlussbericht, 108-141 Seiten, Technische Universität Berlin: Berlin, Januar 1985.
- /WIE 98/ Wiczorek, K., Zimmer, U.: Untersuchungen zur Auflockerungszone um Hohlräume im Steinsalzgebirge. Vol. GRS - A - 2651, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit: Braunschweig, Oktober 1998.
- /WIE 04/ Wiczorek, K., Schwarzianeck, P.: Untersuchungen zur hydraulisch wirksamen Auflockerungszone um Endlagerbereiche im Salinar in Abhängigkeit vom Hohlraumabstand und Spannungszustand (ALOHA2). GRS-198, GRS-Braunschweig, April 2004.
- /WIE 11/ Wiczorek, K., Lerch, C., Czaikowski, O., Popp, T., Kock, I., Navarro, M.: Zusammenstellung von Stoffparametern für Salzgrus. In: Arbeitspaket AP 9, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS: Köln.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Beispiel eines konstruktiven Entwurfes eines Streckenverschlusses im Steinsalz /MÜL 11a/	5
Abb. 2.2	Streckenquerschnitt einer Richtstrecke /BOL 11/.....	6
Abb. 2.3	TOUGH2-Gittermodell des Streckenverschlusses	7
Abb. 2.4	Querschnitt des Modellgitters.....	8
Abb. 2.5	Gittermodell mit einem rechteckigen Querschnitt.....	10
Abb. 2.6	Gittermodell mit einem kreisförmigen Querschnitt	10
Abb. 2.7	Integraler Querschnitt, in dem die Auflockerungs-, Kontaktzone und der Streckenkern zusammengefasst werden	11
Abb. 2.8	Gemessene Permeabilitäten in der Auflockerungszone um eine offene Strecke (open drift) und einer Strecke mit Stahlausbau (bulkhead).....	23
Abb. 2.9	Abnahme der Permeabilität im Konturbereich einer aufgefahrenen Strecke aufgrund der Druckentlastung /MÜL 11a/	24
Abb. 4.1	Messpunkte im Streckenverlauf, für den Laugenfluss (Fluss A – E) und die Zustandsvariablen (Punkt A – E).....	35
Abb. 4.2	Messpunkte im Querschnitt der Modellstrecke	36
Abb. 4.3	Porositätsverlauf in der gestörten Zone (A.6 – E.6) und im Salzgrusversatz (E.5) (siehe Abb. 4.1).....	38
Abb. 4.4	Druckverlauf für die Messpunkte A.5 – E.5 im Sorelbeton (durchgezogene Linie) und für die Messpunkte A.6 – E.6 (gestrichelte Linien) in der gestörten Zone	39
Abb. 4.5	Druckverlauf in den acht Messpunkten D.1 – D.8 (Streckenabschnitt D) .	40
Abb. 4.6	Flüssigkeitssättigung für die Messpunkte A.5 – E.5 im Sorelbeton und für die Messpunkte A.6 – E.6 (gestrichelte Linien) in der gestörten Zone	41

Abb. 4.7	Flüssigkeitssättigung in den Messpunkten D.1 bis D.8 (Streckenabschnitt D).....	42
Abb. 4.8	Laugenfluss durch die Messpunkte D.1 bis D.8 (Streckenabschnitt D)	43
Abb. 4.9	Laugenfluss zwischen dem Streckenkern (Messpunkte D.4, D.5) und der gestörten Zone (Messpunkte D.1, D.3, D.6 und D.8) im Streckenabschnitt D.....	44
Abb. 4.10	Flüssigkeitsaustausch zwischen der gestörten Zone und dem Streckenkern	45
Abb. 4.11	Flüssigkeitssättigung im Messpunkt D.5 (durchgezogene Linie) und D.6 (gestrichelte Linie) für die Rechenfälle THMC 1, THMC 2 und THMC 3.....	46
Abb. 4.12	Laugenfluss im Messpunkt D.5 (durchgezogene Linie) und D.6 (gestrichelte Linie) für die Rechenfälle THMC 1, THMC 2 und THMC 3...	47
Abb. 4.13	Kapillardruckverlauf für die Rechenfälle THMC 1, 4 und 5 – 7 im Messpunkt E.5 (Salzgrus) und für die Rechenfälle THMC 6 und 7 im Messpunkt E.6 (gestörte Zone).....	49
Abb. 4.14	Flüssigkeitssättigung für die Rechenfälle THMC 1, 4 und 5 – 7 im Mess-punkt E.5 (Salzgrusversatz)	50
Abb. 4.15	Flüssigkeitssättigung für die Rechenfälle THMC 1, 4 und 5 – 7 im Mess-punkt E.6 (gestörte Zone).....	51
Abb. 4.16	Flüssigkeitssättigung im Messpunkt D.5 (Sorelbeton) für die Rechenfälle THMC 1 und THMC 4 – 7.....	52
Abb. 4.17	Flüssigkeitssättigung im Messpunkt D.6 (gestörte Zone) für die Rechenfälle THMC 1 und THMC 4 – 7.....	53
Abb. 4.18	Laugenfluss im Messpunkt D.5 (Sorelbeton) für die Rechenfälle THMC 1 und THMC 4 – 7	54
Abb. 4.19	Laugenfluss im Messpunkt D.6 (gestörte Zone) für die Rechenfälle THMC 1 und THMC 4 – 7	55

Abb. 4.20	Kapillardruckverlauf für die Rechenfälle THMC 1, 4 und 8 – 10 im Messpunkt D.5 (Sorelbeton)	56
Abb. 4.21	Flüssigkeitssättigung im Messpunkt D.5 (Sorelbeton) für die Rechenfälle THMC 1, THMC 4 und THMC 8 – 10	57
Abb. 4.22	Flüssigkeitssättigung im Messpunkt D.6 (gestörte Zone) für die Rechenfälle THMC 1, 4 und THMC 8 – 10.....	58
Abb. 4.23	Laugenfluss im Messpunkt D.5 (Sorelbeton) für die Rechenfälle THMC 1, 4 und THMC 8 – 10	59
Abb. 4.24	Laugenfluss im Messpunkt D.6 (gestörte Zone) für die Rechenfälle THMC 1, 4 und THMC 8 – 10	60
Abb. 4.25	Flüssigkeitssättigung im Messpunkt D.5 (Sorelbeton) für die Rechenfälle THMC 1 und THMC 11 – 14.....	62
Abb. 4.26	Flüssigkeitssättigung im Messpunkt D.6 (gestörte Zone) für die Rechenfälle THMC 1 und THMC 11 – 14.....	63
Abb. 4.27	Laugenfluss im Messpunkt D.5 (Sorelbeton) für die Rechenfälle THMC 1 und THMC 11 – 14	64
Abb. 4.28	Laugenfluss im Messpunkt D.6 (gestörte Zone) für die Rechenfälle THMC 1 und THMC 11 – 14	64
Abb. 4.29	Porositätsentwicklung im Messpunkt D.6 (gestörte Zone) für die Rechenfälle THMC 1 und THMC 15 – 18.....	66
Abb. 4.30	Porositätsentwicklung im Messpunkt E.5 (Salzgrusversatz) für die Rechenfälle THMC 1 und THMC 15 – 18	67
Abb. 4.31	Flüssigkeitssättigung im Messpunkt D.5 (Sorelbeton) für die Rechenfälle THMC 1 und 15 – 18.....	68
Abb. 4.32	Flüssigkeitssättigung im Messpunkt D.6 (gestörte Zone) für THMC 1 und THMC 15 – 18.....	69
Abb. 4.33	Laugenfluss im Messpunkt D.5 (Sorelbeton) für die Rechenfälle THMC 1 und 15 – 18.....	70

Abb. 4.34	Laugenfluss im Messpunkt D.6 (gestörte Zone) für THMC 1, 17 und 18..	71
Abb. 4.35	Streckenquerschnitte der Gittermodelle mit Messpunkte zur Auswertung	73
Abb. 4.36	Flüssigkeitssättigung im Sorelbeton für den Basisfall im Messpunkt D.5, den Rechenfall THMC 19 im Messpunkt D.19, den Rechenfall THMC 20 im Messpunkt D.30 und den Rechenfall THMC 21 im Messpunkt D.2	74
Abb. 4.37	Laugenfluss im Sorelbeton für den Basisfall THMC 1 im Messpunkt D.5, für den Rechenfall THMC 19 im Messpunkt D.19 und den Rechenfall THMC 20 im Messpunkt D.30	75
Abb. 4.38	Flüssigkeitssättigung in der Kontaktzone für den Rechenfall THMC 19 im Messpunkt D.14 und den Rechenfall THMC 20 im Messpunkt D.18 ...	76
Abb. 4.39	Laugenfluss in der Kontaktzone für den Rechenfall THMC 19 im Messpunkt D.14 und für den Rechenfall THMC 20 im Messpunkt D.18...	76
Abb. 4.40	Flüssigkeitssättigung für die Rechenfälle THMC 1, 19 und 20 im Messpunkt D.6 (Auflockerungszone)	77
Abb. 4.41	Laugenfluss für die Rechenfälle THMC 1, 19 und 20 im Messpunkt D.6 (Auflockerungszone)	78
Abb. 4.42	Laugenfluss zwischen dem Streckenkern und der Kontaktzone bzw. der Kontakt- mit der Auflockerungszone im Streckenabschnitt D für die Rechenfälle THMC 19 und 20	79
Abb. 5.1	Summierte Laugenmengen im Streckenabschnitt D für die einzelnen Rechenfälle (ohne Rechenfälle THMC 15 und 16).....	85
Abb. 5.2	Zeitpunkte des Laugendurchbruchs im Streckenabschnitt D für die einzelnen Rechenfälle in Jahren	87
Abb. 5.3	Höhe des Laugenflusses für die einzelnen Rechenfälle im Streckenabschnitt D	87

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Abmessungen der Querschnitte nach /MÜL 11a/	6
Tab. 2.2	Abmessungen des Streckenquerschnittes für das TOUGH2-Basis-Gittermodell	8
Tab. 2.3	Querschnittsflächen der einzelnen Materialgebiete für die unterschiedlichen Gittermodelle	9
Tab. 2.4	Faktor <i>floc</i> zum Erreichen der gegebenen Zeitpunkte mit der Referenzkonvergenzrate $0,01 \text{ a}^{-1}$ /LAR 13/	14
Tab. 2.5	Parametrisierung der Porositäts-Permeabilitätsbeziehung /LAR 13/	16
Tab. 2.6	Integrale Permeabilität aus Kontakt- und Auflockerungszone für das Basismodell	26
Tab. 2.7	Parameter für den Basisfall	29
Tab. 2.8	Parameter der Gittermodelle für Vergleichsrechnungen (Beschreibung siehe Kap. 2.3.4)	29
Tab. 3.1	Rechenfälle	34
Tab. 4.1	Schematische Darstellung der Elemente des Streckenquerschnittes D und deren durchflossene Laugenmasse nach 50.000 Jahren in kg	45
Tab. 4.2	Durchflossene Laugenmasse am Streckenabschnitt D nach 50.000 Jahren	48
Tab. 4.3	Summierter Laugenfluss durch den Streckenabschnitt D nach 50.000 Jahren	61
Tab. 4.4	Durchgeflossene Laugenmassen im Streckenabschnitt D nach 50.000 Jahren	65
Tab. 4.5	Durchflossene Laugenmengen im Streckenabschnitt D nach 50.000 Jahren	72

Tab. 4.6	Durchgeflossene Laugenmenge zwischen dem Streckenkern und der Kontaktzone bzw. der Kontakt- mit der Auflockerungszone nach 50.000 Jahren im Streckenabschnitt D	80
Tab. 4.7	Laugendurchfluss der einzelnen Schichten nach 50.000 Jahren.....	81
Tab. 4.8	Anteil der unterschiedlichen Schichten an der durchflossenen Laugenmasse in %.....	81
Tab. 5.1	Durchgeflossene Laugenmenge nach 50.000 Jahren (Streckenabschnitt D).....	84
Tab. 5.2	Zeitpunkt des Laugendurchbruchs und Laugenflüsse für die gestörte Zone und den Sorelbeton.....	86

A Konvergenzparameter

Tab. A.1 Konvergenzparameter für das Materialgebiet Salzgrusversatz im Programm TOUGH2

Faktor	Beschreibung	Abkürzung	Wert
K_{ref}	Stationäre Konvergenzrate $dV/dt/V$	K_{ref}	3,17E-10
f_{loc}	Eigenschaften des umgebenen Salzgesteins	f_{loc}	Abhängig vom Rechenfall
F_p	ursprünglicher Gebirgsdruck	P_g	1,88E+07
	Exponent für Druckabhängigkeit	M	4,0
F_{phi}	Porosität, bei der der Versatz einen Stützdruck aufbaut	PHIref	0,30
	Parameter	H_1	-2,0
	für den	G_1	-1,0
	Versatzwiderstand	G_2	10.000,0
F_t	Anfängliche Konvergenzrate	Lambda	1,0E-06
	Konvergenzrate zur Zeit $t = 0$	K_0	3,17E-10
F_{temp}	Wichtung der Temperaturterme	A	0,0
	Aktivierungsenergie Term 1	Q_1	0,0
	Aktivierungsenergie Term 2	Q_2	0,0
	Temperatur bei Messung K_{ref}	T_{gref}	40,0
	Restporosität	PHI _{min}	0,01
Porosi- tätsab- hängige Permea- bilität	Setze $k=0$ für $phi = 0$		0,0
	Anzahle der Bereiche ($0 \leq n \leq 3$; 0 = konstant)		3,0
	$PER = A \cdot PHI^B$	A	2,0E-09
		B	5,15
		A	6,7E-05
		B	9,32
		A	4,99E-11
		B	4,61

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

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