

KfK 3411
Oktober 1982

Untersuchungen zur Ausbildung von Laugezuflußwegen im Steinsalz

B. Kienzler, E. Korthaus
Institut für Nukleare Entsorgungstechnik

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Institut für Nukleare Entsorgungstechnik

KfK 3411

Untersuchungen zur Ausbildung von Laugezuflußwegen im Steinsalz

B. Kienzler, E. Korthaus

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird die ergänzte und erweiterte Version eines in den USA entwickelten Modells vorgestellt, mit dem der zeitliche Verlauf der Aufweitung einer Kluft im Steinsalz durch Salzauflösung beim Wasserzufluß berechnet werden kann. Die Rechenergebnisse werden anhand von Laborexperimenten und gemessenen Daten beim Vollaufen des Salzbergwerks Ronnenberg verifiziert. Es zeigt sich jeweils eine gute Übereinstimmung von Rechnung und Experiment.

Anwendungsrechnungen werden für ein mögliches Vollaufen eines HAW-Bohrlochs und eines Endlagerbergwerks mit unterschiedlichen Randbedingungen durchgeführt. Die resultierenden Enddurchmesser der Kluft (Spalt) hängen wesentlich vom zufließenden Volumen ab. Unter den getroffenen Annahmen können HAW-Bohrlöcher innerhalb von einigen Stunden, Bergwerke innerhalb von Jahren vollaufen.

Bei diesen Berechnungen wurden nur Lösevorgänge berücksichtigt. Entgegenwirkende Effekte wie Hohlraumkonvergenz und Einfluß von $MgCl_2$ -haltigen Laugen auf die Steinsalzauflösung wurden bisher nicht betrachtet. Deshalb sind die Ergebnisse nicht direkt für Sicherheitsanalysen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in realen Salzstöcken übertragbar.

Analysis of the Growth of Brine Flow Pathes in Rock Salt

In this paper a complemented and extended version of a mathematical model is presented, which was developed in the USA, to calculate the course of the enlargement of a fissure in rock salt by solution during water inflow. The calculated results are verified by laboratory experiments and measured values obtained after drowning of the Ronnenberg salt mine. In both cases a good agreement between calculations and experimental data was achieved.

Application of the model to possible drowning of a HLW borehole and a mine were performed with different boundary conditions. The resulting diameter of a fissure is dependent on the inflowing volume of water. With the assumptions mentioned, HLW boreholes are drowned within a few hours, mines within a few years.

In these calculations only dissolution processes were considered. Opposite effects like closure of fissures or the influence of $MgCl_2$ containing brines on the dissolution of rock salt have not been considered up to now. Thus, the results cannot be transferred directly to the safety analysis of ultimate radioactive wastes disposal in real salt domes.

Gliederung

	Seite
Zusammenfassung	
1. Einleitung	1
2. Rechenmethode	3
3. Experimentelle Überprüfung des Rechenverfahrens	8
3.1 Versuchsaufbau	8
3.2 Ergebnisse und Diskussion der Laborexperimente	9
4. Vergleich der Rechnungen mit in situ gemessenen Daten	12
5. Anwendung von "SALT" auf enge Spalte bzw. Klüfte in einer Endlagerformation	14
5.1 Rechnungen zum Vollaufen eines HAW-Bohrloches	14
5.2 Rechnungen zum Vollaufen eines Salzbergwerkes	17
6. Diskussion der Anwendungsrechnungen	21
7. Anhang A	24
Anhang B	25
8. Literatur	29
Tabellen	
Abbildungen	

1. Einleitung

Im Rahmen der Sicherheitsanalyse eines Endlagers für radioaktive Abfälle in einem Salzbergwerk muß die Barrierenwirkung der Salzformation untersucht werden. Die Barrierenwirkung kann durch das Vorhandensein von Rissen bzw. Klüften durch die Formation beeinträchtigt werden. Derartige Risse könnten sowohl ursprünglich vorhanden sein, aber auch durch das Auffahren der untertägigen Hohlräume bzw. Schächte entstehen. Ebenso ist es denkbar, daß durch die mit der Einlagerung von HAW verbundenen Aufheizvorgänge in Zusammenwirken mit Inhomogenitäten im Salzgestein Risse entstehen.

Die Querschnitte von derartigen Rissen können sich in Abhängigkeit von der Zeit verändern. Hierbei spielen sowohl gebirgsmechanische als auch Lösevorgänge eine Rolle. Letzere führen zur Vergrößerung der Querschnittsfläche der Risse und es besteht die Möglichkeit, daß Wasser bzw. Salzlauge längs eines Risses bis zu den Abfällen eindringt. Damit würde der Riß zum potentiellen Transportpfad zwischen den eingelagerten Abfällen und grundwasserführenden Schichten.

Zur Abschätzung der freigesetzten Aktivität aus dem Endlager ist es daher notwendig, den aus einem ursprünglich vorhandenen Riß entstehenden Querschnitt zu kennen.

Im folgenden wird ein mathematisches Modell vorgestellt, mit dessen Hilfe die zeitliche Änderung eines Risses im Steinsalz infolge von Salzauflösung berechnet werden kann. Dazu wurde ein ursprünglich in den USA entwickeltes Modell /1/ ergänzt und erweitert, so daß Druck-, Temperatur- und Konzentrationsabhängigkeiten untersucht werden können.

Die Ergebnisse der Rechnungen konnten anhand von Laborexperimenten sowie durch Nachrechnung des Vollaufens eines Salzbergwerkes verifiziert werden. Sowohl im Labor als auch bei dem in Kap. 4 beschriebenen Vollaufen des Salzbergwerkes erfolgte die Aufweitung des Zuflußweges ausschließ-

lich durch Auflösung von Steinsalz. Andere Einflüsse wie das Vorhandensein von anderen Salzarten oder der Rißvergrößerung entgegenwirkende gebirgsmechanische Vorgänge traten hierbei nicht auf.

Abschließend wird der Formalismus auf 2 Beispiele angewandt:

- Laugezutritt in eine HAW-Lagerbohrung
- Großräumiger Wasser- bzw. Laugezufluß in ein Endlagerbergwerk.

Hinsichtlich der Schlußfolgerungen aus den Ergebnissen muß betont werden, daß in den Rechnungen lediglich Lösevorgänge berücksichtigt werden. Der Einfluß von mechanischen Vorgängen sowie der Einfluß von z.B. Carnallitauflösung wurden nicht betrachtet. Infolgedessen können diese Ergebnisse nicht direkt für Sicherheitsanalysen verwendet werden.

2. Rechenmethode

Zur Berechnung der Vergrößerung einer Kluft durch Lösevorgänge beim Zufluß von Wasser wird davon ausgegangen, daß das Wasser senkrecht durch die Kluft fließt. Der im folgenden benutzte Formalismus ist bei Snow und Chang (1975) /1/ beschrieben und soll hier nur kurz charakterisiert werden. Da dieser Formalismus die vorliegende Problematik nicht vollständig beschreibt, sind einige Modifikationen notwendig.

Der von Snow und Chang entwickelte Formalismus dient dem Zweck, das Wachstum und die Form eines Hohlraumes im Salz als Funktion der Zeit bei Wasser- bzw. Laugendurchfluß abzuschätzen. Hierzu ist es notwendig, die Flußrate und die Salzkonzentration der Lösung im Hohlraum zu berechnen. Es wird dabei angenommen, daß Lösevorgänge in einer dünnen Grenzschicht längs der Wand des Hohlraumes stattfinden. Die Aufkonzentrierung der Flüssigkeit im Innern des Hohlraumes erfolgt durch Ablösen von Wirbeln aus dieser Grenzschicht.

Zur Ableitung des Formalismus werden die Löslichkeit des Steinsalzes, das Salzmassen-Gleichgewicht im Hohlraum und die Kontinuitätsgleichung benötigt.

Die Löslichkeit des Steinsalzes wird nach folgender Gleichung (1) beschrieben:

$$\text{mit: } \frac{dm}{dt} = \beta F (c_{\max} - c) \quad (1)$$

$\frac{dm}{dt}$	pro Zeiteinheit gelöste Salzmenge
β	spezifische Lösegeschwindigkeit von Kochsalz
F	Kontaktfläche zwischen Salz und Lösungsmittel
c_{\max}	maximale Kochsalzkonzentration in der Lösung
c	Konzentration

Das Salzmassen-Gleichgewicht beinhaltet die Anreicherung von Salz in einem Volumenelement des Hohlraumes als Summe von Salzzufuhr aus benachbarten Volumenelementen sowie der Zufuhr durch Lösen von Kochsalz, abzüglich des Abtransportes von Salz in benachbarte Volumenelemente. Die Anwendung der Kontinuitätsgleichung setzt voraus, daß der gesamte Hohlraum mit Wasser bzw. Lauge gefüllt ist ⁺). In diesem Fall kann die zeitliche Änderung der Masse eines jeden Volumenelementes berechnet werden.

Aus diesen drei Gleichungen wird nach der Methode finiter Differenzen ein Computer-Code ("SALT") entwickelt, welcher nach dem Iterationsverfahren bezüglich des Massenzuflusses explizit die Form des Hohlraumes, die Salzkonzentration in den Volumenelementen und die Massenflußrate in Abhängigkeit von der Zeit bestimmt. In der ursprünglichen Version des Rechenprogramms von Snow und Chang werden vier Parameter benötigt, die die Dicke und Länge der Grenzschicht bestimmen. Zusätzlich wird die spezifische Lösegeschwindigkeit von Kochsalz durch einen Parameter festgelegt. Durch Anpassung der Rechenergebnisse an gemessene Formänderungen von Hohlräumen im Salz werden die Parameter ermittelt. Die maximale Wasserzuflußrate in dem Hohlraum wird als Konstante angegeben. Der zeitliche Verlauf der interessierenden Größen, wie z.B. die Form des Hohlraumes, die Konzentration und die Dichte der Lauge, werden durch numerische Integration der zeitlichen Änderung der betrachteten Größe über die Zeit ermittelt. Die Ergebnisse des Rechenprogramms hängen nicht von der Länge des Integrationsintervalls (Δt) ab, wenn dieses kleiner als die Verweildauer der Lauge in einem Volumenelement des Hohlraumes ist.

Bei der abgeänderten Version des Rechenprogramms "SALT", die im folgenden benutzt wird, bleibt der Formalismus zur Berechnung der zeitlichen Konzentrationsänderung und des Massenflusses im wesentlichen unverän-

⁺) Bei sehr großem Durchmesser ($2r$) des Zuflußweges, d.h. für $r \gg \sqrt{R/\pi v}$ (R : Zuflußrate, v : Geschwindigkeit) muß bei der Aufstellung der Kontinuitätsgleichung ein inneres Luftvolumen berücksichtigt werden.

dert. Er wird nur insoweit modifiziert, daß der Zufluß von beliebig konzentrierten Salzlaugen berücksichtigt werden kann. Die spezifische Lösegeschwindigkeit von Kochsalz, die in der ursprünglichen Version als anzupassender Parameter auftrat, wird durch eine mathematische Beschreibung des Stoffübergangs ersetzt. Nach der Literatur (siehe Tab. 1) ist die spezifische Lösegeschwindigkeit von Kochsalz von der Strömungsgeschwindigkeit des Lösungsmittels abhängig. Außerdem gibt es Unterschiede, je nach dem, ob die Strömung parallel zu einer Salzoberfläche verläuft oder senkrecht auf diese auftrifft. Da in der Literatur keine spezifischen Lösegeschwindigkeiten für Kochsalz bei paralleler Strömung im Geschwindigkeitsbereich zwischen 90 und 500 cm/sec genannt werden, wird für diesen Bereich eine lineare Interpolation vorgenommen. Aus dem gleichen Grund wird zur Berechnung der Lösegeschwindigkeit bei senkrechter Strömung die eigentlich nur im Geschwindigkeitsbereich von 5 - 90 cm/sec gültige Formel auf den Bereich von 0 - 500 cm/sec ausgedehnt. Liegt die Strömungsgeschwindigkeit über 500 cm/sec, sind die Lösegeschwindigkeiten bei paralleler und senkrechter Strömung gleich und bleiben konstant.

Für die Berechnung der spezifischen Lösegeschwindigkeit wird die Geschwindigkeit des zufließenden Wassers bzw. Lauge in eine senkrechte und eine parallele Komponente zum anstehenden Salz zerlegt, für jede Komponente die Lösungsgeschwindigkeit β berechnet und mit der Summe der Lösegeschwindigkeiten weiter gearbeitet.

Während in der ursprünglichen Version des Programms "SALT" die Geschwindigkeit der Lauge außer zur Festlegung des Zeitintervalls keine Bedeutung hatte, geht in der überarbeiteten Version die Geschwindigkeit wesentlich in den Lösungsvorgang ein. Die Geschwindigkeit wird nach der Bernoullischen Gleichung berechnet (siehe Anhang). In jedem Volumenelement hängt die Geschwindigkeit von der Querschnittsfläche des Volumenelementes ab. Die Verminderung der Strömungsgeschwindigkeit durch Reibungseffekte wird in Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl der Strömung berechnet (siehe Anhang A).

Der unbefriedigende Zustand, die Grenzschicht, in der die Salzlösung stattfindet, mit 4 Parametern anpassen zu müssen, wird derart geändert, daß die Grenzschicht entsprechend der Theorie der Stoffübertragung durch stationäre Diffusion an strömende Flüssigkeiten beschrieben wird /5/. Aus dieser Theorie ergibt sich die Grenzschichtdicke aus der dimensionslosen Sherwoodzahl Sh:

$$\text{Sh} = \frac{L}{\epsilon} = \frac{L \beta}{D} \quad (2)$$

- L : charakteristische Länge
- ϵ : Grenzschichtdicke
- D : Diffusionskonstante

Das pro Zeiteinheit durch die Grenzschicht strömende Volumen \dot{V} beträgt

$$\dot{V} = 2 \pi R \epsilon \bar{v} \quad (3)$$

- R : Radius
- \bar{v} : mittlere Strömungsgeschwindigkeit

Wird diese Beziehung (3) in die von Snow und Chang benutzte Gleichung zur Beschreibung der Salzlösung in der Grenzschicht eingeführt, lassen sich die Terme, die diese Schicht beschreiben, als Funktionen der Stoffübergangszahl (Lösungsgeschwindigkeit), der Diffusionskonstante und der Strömungsgeschwindigkeit beschreiben. Es bleibt lediglich ein anzupassender Parameter übrig, der die Mittelung über die Strömungsgeschwindigkeit in der Grenzschicht beinhaltet.

$$a = \frac{1}{\epsilon} \int_0^\epsilon \frac{v(x)}{v_0} dx \quad (4)$$

v_0 : Geschwindigkeit im Zentrum des Zuflußweges.

Nimmt man für die Geschwindigkeit v in der Grenzschicht einen linearen Verlauf an, gilt $a = 0,5$.

Als neuer Parameter tritt in der jetzigen Version des Programms die maximale Zuflußrate auf. Aus der maximalen Zuflußrate und dem verfügbaren Gesamtvolumen, das volllaufen kann, ergibt sich die Zuflußzeit.

Ein Nachteil der 1. Version des Programms "SALT" besteht darin, daß die maximale Kochsalzkonzentration in der Lösung konstant bleibt und keine Änderung der Maximallöslichkeit aufgrund von Temperaturunterschieden berücksichtigt werden kann. Bei engen Kluftdurchmessern liegt die Strömungsgeschwindigkeit des durchfließenden Wassers bzw. Lauge so niedrig, daß man davon ausgehen kann, daß das Wasser die Temperatur der Umgebung annimmt. Entsprechend dem Temperaturgradient erwärmt sich das Wasser mit zunehmender Tiefe (siehe Anhang). Die Löslichkeit von Kochsalz in Wasser nimmt dabei geringfügig zu. In Abb. 1 ist die Löslichkeit von Kochsalz in Wasser als Funktion der Temperatur aufgetragen.

Bei größeren Klüften wird mit Hilfe eines Unterprogrammes die Temperaturzunahme der Lauge beim Durchfließen eines Volumenelementes berechnet /5/ und daraus die maximale Löslichkeit vom Kochsalz bestimmt. Die hierzu erforderlichen Daten, wie z.B. die Viskosität, die Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärme, wurden aus Gmelin /6/ übernommen.

Die Grenze der Anwendbarkeit dieses Modells ist bei Anfangsdurchmessern erreicht, die im Bereich der Grenzschichtdicke liegen. Die nach Gleichung (2) berechnete Grenzschichtdicke hängt von der Strömungsgeschwindigkeit und somit vom Durchmesser des Zuflußweges ab. Die Grenzschichtdicke beträgt bei 0,1 mm Kluftdurchmesser 0,03 mm ($T = 50^{\circ}\text{C}$, $p = 100$ bar, Länge: 10 m), d.h. ca. 80% der Querschnittfläche des Zuflußweges entfallen auf die Grenzschicht. Deshalb können mit dem Rechenprogramm "SALT" nur Zuflußwege berechnet werden, deren Anfangsdurchmesser mindestens 0,1 mm betragen; Kapillareffekte bewirken bei den hier angenommenen Drücken keine Änderung der Laugenströmung.

3. Experimentelle Überprüfung des Rechenverfahrens

3.1 Versuchsaufbau

Zur Überprüfung der Ergebnisse des Rechenprogramms "SALT" wurden Experimente im Labormaßstab durchgeführt. Das Ziel der Experimente war, den zeitlichen Verlauf der Durchmesserzunahme einer Bohrung im Steinsalz sowie die zeitliche Änderung der Salzkonzentration der aus der Bohrung ausfließenden Lauge zu bestimmen. Hierzu wurde der in Abb. 2 dargestellte Versuchsaufbau gewählt:

Aus einem Reservoir fließt Wasser bzw. Lauge in einen Zwischenbehälter, dessen Flüssigkeitsspiegel mit Hilfe eines Schwimmers und eines Ventils auf konstanter Höhe gehalten wird. Senkrecht unter dem Zwischenbehälter ist der Salzblock mit der Bohrung angeordnet. Mit Hilfe einer Klappe im Zwischenbehälter wird der Versuch gestartet und beendet. In bestimmten Zeitintervallen nach Beginn des Durchflusses wird die integrale zugeflossene Flüssigkeitsmenge gemessen und zur Feststellung der Salzkonzentration eine Probe der zufließenden Flüssigkeit genommen.

Die Flüssigkeitssäule bewirkt einen konstanten Druck, der bei der Berechnung der Fließgeschwindigkeit der Flüssigkeit in der Bohrung berücksichtigt werden muß.

Aus dieser Art von Experimenten läßt sich der Durchmesser d des Zuflusses als Funktion der Zeit nicht direkt bestimmen. Deshalb wird als Maß für den Durchmesser die Zuflußrate benutzt. Diese hängt sehr stark vom Durchmesser ab. Bei laminarem Fließen ist die Zuflußrate proportional d^4 . Die Zuflußrate ergibt sich durch zeitliche Differentiation der gemessenen Flüssigkeitsvolumina.

Nach Beendigung des Versuchs wird der Zuflußweg mit einer erhärtenden Masse ausgegossen, das noch vorhandene Salz abgelöst. Der Abguß des Durchflußweges kann dann auf der gesamten Länge vermessen, die Oberflächenstruktur untersucht werden.

Tabelle 2 gibt Auskunft über die durchgeführten Experimente und die jeweiligen charakteristischen Parameter. Es liegen Messungen für verschiedene Anfangsdurchmesser der Bohrung, Länge des Salzblocks und Konzentration der zufließenden Lauge vor.

3.2 Ergebnisse und Diskussion der Laborexperimente

Anhand einiger Abbildungen soll der Vergleich zwischen den experimentellen und numerisch ermittelten Ergebnissen erläutert werden. Abbildung 3 zeigt den Verlauf der Durchflußrate als Funktion der Zeit. Wie oben erwähnt, dient die Durchflußrate als Maß für den nicht direkt meßbaren Durchmesser der Bohrung. Der Anfangsdurchmesser dieser Bohrung betrug 5 mm bei einer Länge von 100 mm. Innerhalb von 10 min vergrößerte sich dieser Durchmesser auf 43 mm bei einem durchgeflossenen Volumen von 645 Liter Leitungswasser. Der durch die Wassersäule bewirkte Flüssigkeitsdruck betrug ca. 0,025 bar. Die Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung ist gut.

Abbildung 4 zeigt ebenfalls die Durchflußrate als Funktion der Zeit für zwei Versuche (Nr. 3, 4 siehe Tab. 2) mit kleinerem Anfangsdurchmesser. Hierbei zeigt sich, daß bei identischen Versuchen unterschiedliche Ergebnisse zustande kamen. Der Grund hierfür könnte in undefinierten Eigenschaften (z.B. Auflockerung) der Salzblöcke zu finden sein.

Während der Versuch 3 stark von den berechneten Werten abweicht, stimmen die in Versuch 4 gemessenen Durchflußraten bis ca. 80 sec mit der Rechnung überein. Zwischen 80 und 90 sec nach Beginn des Versuches zeigen die gemessenen Raten einen Sprung. Für Zeiten über 80 sec liegen die Meßwerte um ca. 50% über den gerechneten. Dieser Sprung deutet sich auch in Abb. 5 an, in der die zum Versuch Nr. 4 ermittelten Salzkonzentrationen als Funktion der Zeit dargestellt sind. Im Bereich von ca. 80 sec liegt der gemessene Konzentrationswert über dem berechneten. Obwohl diese Abweichung nicht signifikant ist, stellt sie doch ein Indiz zur Erklärung des Sprungs bei 80 sec dar: Man kann vermuten, daß die Vergrößerung des Durchflußweges hier nicht allein durch gleichmäßige Lösungsvorgänge ge-

schieht, sondern daß infolge der Störung der Kristallstruktur durch das Bohren auch mechanische Effekte zur Vergrößerung des Durchmessers beitragen. Bei größeren Anfangsdurchmessern sind solche Beiträge weniger auffällig. In Abb. 6 erkennt man deutlich die Rauigkeit der ursprünglich glatten Bohrungen. Die rauhe Oberfläche des Zuflußweges bleibt auch bei extremer Durchmessergrößerung erhalten. Dies zeigt sich z.B. bei Versuch Nr. 2, bei dem eine Durchmessergrößerung um einen Faktor 14 beobachtet wurde.

Während für die Versuche 1 - 4 Leitungswasser durch die Bohrung zufließt, wurde für die folgenden Experimente NaCl-Lösung unterschiedlicher Konzentration benutzt. Das hierzu notwendige Kochsalz wurde vom Salzbergwerk Asse bezogen. Auf der Oberfläche der damit hergestellten Salzlösung zeigte sich eine braune blasige nicht identifizierbare Schicht. Es wurde versucht, diese Schicht von der Lauge abzutrennen. Abbildung 7 zeigt die gemessenen und berechneten Durchflußraten für die Versuche 5 und 6 bei einer NaCl-Konzentration von ca. 9,5 Gew.-%. Während beide Versuche übereinstimmende Durchflußraten zeigen, weichen diese um einen Faktor 2 von den berechneten Werten ab. Diese Abweichung wird auf die Verunreinigung der zufließenden Lösung zurückgeführt.

Gegenüber der starken Abweichung zwischen Rechnung und Experiment bei den Versuchen Nr. 5 und 6 stimmen bei den Versuchen mit hochkonzentrierter Salzlauge (Nr. 6 und 7) die gemessenen und berechneten Daten gut überein. Bei Versuch Nr. 7 wurde wie Abb. 8 zeigt bei der Rechnung die Konzentration der zufließenden Lösung innerhalb des Meßfehlers des NaCl-Gehaltes variiert. Wie nach Gleichung (1) zu erwarten, wird das Ergebnis dadurch stark beeinflusst. So bewirkt eine Änderung der Anfangskonzentration um 0,5 - 0,8 Gew.-% eine Zu- bzw. Abnahme der berechneten Durchflußrate um einen Faktor 2. Es zeigt sich auch, daß bei den Experimenten mit hohen Konzentrationen die Salzlösung in der Bohrung nicht wesentlich durch Verunreinigungen beeinflusst wird.

Bei allen Versuchen zeigt sich, wie anhand der Durchflußraten zu erwarten ist, eine gute Übereinstimmung zwischen den berechneten Durchmessern der Zuflußwege und den mit Hilfe der Abgüsse nach Beendigung der Versuche gemessenen Werten.

Infolge der guten Übereinstimmung zwischen den experimentell gewonnenen Daten und den Rechnungen kann davon ausgegangen werden, daß das Rechenprogramm "SALT" für Zuflüsse durch enge "Klüfte" und bei unterschiedlich konzentrierten Salzlaugen bei realen Systemen anwendbar ist.

Leider konnte mit diesem einfachen Versuchsaufbau der Zufluß durch Mikrorisse mit Temperaturgradienten nicht untersucht werden.

Bei der hier beschriebenen Versuchsdurchführung waren mehrere Fehlerquellen vorhanden, die den Meßfehler der Durchflußrate in Abhängigkeit von der Versuchszeit beeinflussen.

Folgende systematische Fehler können auftreten:

- Verunreinigung der zufließenden Lauge.
- Verunreinigung im Salzblock und dadurch hervorgerufene Änderung der Lösungskinetik.

Während die Verunreinigung der zufließenden Lauge bei den Versuchen Nr. 5 und 6 auffällig war und deshalb zur Erklärung der Abweichung zwischen Messung und Rechnung herangezogen wird, ist die andere Fehlerquelle von untergeordneter Bedeutung. So betrug der unlösbare Feststoffanteil in den benutzten Salzblöcken zwischen 0,26 und 0,9 Gew.-%.

Statistische Fehler können bei der Zeit-, Volumen- und Konzentrationsmessung auftreten. Der Analysefehler bei der Salzkonzentration wurde mit ± 10% angegeben.

Der Fehler bei der Zeitmessung beträgt ca. ± 2 sec, der Fehler der Volumenmessung je nach verwendetem Meßzylinder zwischen ± 10 ml und ± 2 l. Mit Hilfe der Fehlerfortplanzung berechnet sich aus den Fehlern in der Zeit- und Volumenmessung ein maximaler Fehler von etwa $\pm 10\%$ bei den Durchflußraten. Dieser Fehler ist in den Abbildungen als Fehlerbalken aufgetragen.

4. Vergleich der Rechnungen mit in-situ gemessenen Daten

Das beschriebene Rechenprogramm "SALT" soll im folgenden auf einen Er-saufvorgang angewandt werden, für den Meßdaten über Zufluß, Gesamtvolumen, Zeit bis zum Vollaufen, Vergrößerung des Zuflußweges usw. vorliegen.

Im Juni 1975 ereignete sich im Kalibergwerk Ronnenberg der Kali-Chemie AG ein Laugeneinbruch. Zur Vermeidung von Erdsenkungen im Bereich der Einbruchstelle wurden Entlastungsbohrungen von übertage ins Grubengebäude niedergebracht, durch die innerhalb von ca. 48 Stunden ungefähr $4 \cdot 10^6$ m³ Wasser ins Grubengebäude flossen. Durch Auflösung von Salz erweiterte sich die Bohrung EB 2 von 25 cm Durchmesser auf 6 - 7 m. Eine kurze Beschreibung findet sich im Jahresbericht 1975 /7/ der GSF und im Jahresbericht zur Endlagerung radioaktiver Abfälle des Kernforschungszentrums und der GSF /8/ des gleichen Jahres. Abbildung 10 zeigt einen Teil des Zuflußweges der Lauge nach dem Vollaufen des Bergwerks. Dieser Teil verläuft durch reines Steinsalz, er berührt in diesem Bereich keine Carnallitschichten oder sonstige leicht lösliche Salze.

Zur Berechnung dieses Zuflußweges wird die auf 50 m Tiefe vermessene Bohrung im Bereich des Salzgesteins in 10 gleichlange Abschnitte (Volumenelemente) unterteilt. Der Anfangsdurchmesser der Bohrung beträgt 25 cm und die Salzkonzentration der zufließenden Lauge 41,6 g/l. Für jeden dieser 10 Abschnitte werden iterativ die Lösungsvorgänge berechnet. Hierbei wird angenommen, daß die Bohrung in reinem Steinsalz verläuft. Aufgrund der Fallstrecke der zufließenden Lauge von mehreren hundert Metern ergäbe sich eine Zuflußgeschwindigkeit, die über der kritischen Geschwindig-

keit für Kavitation liegt. Deshalb wird für $r > \sqrt{R/\pi v}$ die Zuflußgeschwindigkeit auf diese kritische Geschwindigkeit begrenzt. Diese beträgt für die hier vorliegenden Bedingungen ca. 13,7 m/sec. Die Zuflußrate liegt anfangs bei ca. 0,7 m³/sec. Infolge der Vergrößerung des Zuflußweges steigt die Zuflußrate an, bis sie ihren Maximalwert erreicht hat.

Das Ergebnis der Berechnungen zeigt Abb. 11. In dieser Abbildung ist sowohl der in Ronnenberg gemessene Zuflußweg als auch der berechnete dargestellt. Die dicke durchgezogene Linie mit Punkten gibt den berechneten Verlauf des Zuflußweges wieder. Zum Erreichen einer besseren graphischen Übereinstimmung wurde dieser Weg um einen Winkel von 2,5° um die Symmetrieachse gedreht.

Der wesentlichste Parameter zur Berechnung des Zuflußweges ist die über die Zuflußrate berechnete Zuflußzeit. Im vorliegenden Fall wurde als Parameter die Zuflußrate von 28 m³/sec angesetzt. Infolge der hohen Strömungsgeschwindigkeit ist die spezifische Lösegeschwindigkeit des Kochsalzes sowohl bei senkrechter als auch bei paralleler Anströmung gleich. Deshalb wäre zu erwarten, daß sich ein zylindrischer Zuflußweg ausbildet. Berücksichtigt man jedoch, daß die Zuflußrate, nachdem das Grubengebäude nahezu vollgelaufen ist, stark abnimmt, ergibt sich eine wesentlich längere Verweildauer des Wassers in dem Zuflußweg. Aus diesem Grund wird im oberen Bereich des Weges mehr Salz gelöst, da durch das zufließende Wasser hier die geringere Salzkonzentration vorliegt. In Abb. 11 ist dies der Bereich von ca. 30 - 42 m auf der Tiefenskala.

Im Bereich von 42 - 50 m auf der Tiefenskala erfaßt das Programm "SALT" die eintretenden Vorgänge nicht. Die Form des Zuflußweges läßt sich hier nicht durch Lösung von NaCl erklären, sondern nur durch mechanische Lockerung und Nachbrechen des Salzgesteins.

Insgesamt kann gesagt werden, daß das Programm "SALT" die Zuflußvorgänge, die im Salzbergwerk Ronnenberg auftraten, gut beschreibt. Hierbei zeigt sich, daß der Parameter, der die Grenzschicht beschreibt, kaum

einen Einfluß auf die Form des Zuflußweges hat. Dieses läßt sich aufgrund der großen Zuflußgeschwindigkeit und -rate erklären. Die Strömung ist stark turbulent ($Re > 10^7$) und die Verweilzeit des Wassers im betrachteten Teil des Zuflußweges ist relativ kurz ($\sim 3,7$ sec), so daß in der Grenzschicht kein wesentlicher Anstieg der Salzkonzentration auftritt. Deshalb wird die Form und die Größe des Zuflußweges im wesentlichen durch die Zeitdauer, in der Wasser zufließt, bestimmt.

5. Anwendung von "SALT" auf enge Spalte bzw. Klüfte in einer Endlagerformation

Im folgenden Kapitel werden mit dem Programm "SALT" Anwendungsrechnungen für Zuflüsse in ein HAW-Bohrloch bzw. in ein Salzbergwerk durchgeführt. Die in beiden Fällen potentiell möglichen Wasserwegsamkeiten sind flächenhafte Risse bzw. Spalte. Über deren mögliche Ausdehnung ist jedoch nichts bekannt. Sie können aber anhand von zylindrischen Zuflußwegen näherungsweise beschrieben werden.

Einflüsse von Carnallitlauge auf die Lösevorgänge werden nicht betrachtet.

5.1 Rechnungen zum Vollaufen eines HAW-Bohrloches

Nach dem Konzept der PTB ist vorgesehen, die hochaktiven Abfallblöcke in 300 m tiefe Bohrblöcher einzulagern /9/. Die Bohrlöcher werden durch Stopfen gegen das Bergwerk verschlossen. Infolge thermomechanischer Vorgänge, insbesondere bei Inhomogenitäten des Steinsalzes, ist es denkbar, daß Auflockerungen zwischen Salzgestein und Stopfenmaterial bzw. in der Umgebung des Stopfens entstehen. Würde ein Wasser- bzw. Laugezufluß in das Bergwerk erfolgen, könnte durch einen so entstandenen Spalt Lauge in ein HAWBohrloch eindringen. Aufgrund des Temperaturgradienten in Richtung der Abfallblöcke können Lösevorgänge auch bei Zufluß von gesättigter Lauge auftreten.

Folgende Modellannahmen werden für die Berechnung des Zuflußweges getroffen:

- Der Wasserzufluß erfolgt 10 Jahre nach der Befüllung eines HAW-Bohrloches. In dieser Zeit hat sich nahezu der maximale Temperaturgradient im Bereich der Abfälle eingestellt, mit einem Temperaturunterschied zwischen der Strecke und dem Salz am oberen Ende des HAW-Kokillenstapels von 60°C.
- Entsprechend der Sohlentemperatur nach 10 Jahren beträgt die Temperatur der zufließenden Lauge ca. 50°C, die Lauge ist mit NaCl gesättigt (26,5 Gew.-).
- Der hydrostatische Druck beträgt 100 bar.
- Die Kluft (Riß) verläuft direkt von der Strecke in das Bohrloch mit einem Anfangsdurchmesser von 0,01 cm.

Das verfügbare Restvolumen in einem HAW-Bohrloch 10 a nach der Einlagerung hängt vom Anfangsringspalt zwischen Bohrlochwand und Kokillenstapel und der Wärmeleistung der Abfälle ab. Bei einem Ringspalt von 3 cm und den für Gorleben geplanten Wärmeleistungen ist nach etwa 10 a das Salz auf die Kokillenoberflächen abgelaufen /10/. Es bleibt lediglich das Restvolumen zwischen den Kokillen (ca. 0,3 m³). Beträgt der ursprüngliche Ringspalt 5 cm, ergibt sich bei den gleichen Wärmeleistungen nach 10 a ein Restvolumen von ca. 3 m³ im Bohrloch /10/.

Unter den genannten Annahmen berechnet sich mit dem Programm "SALT" folgendes Zeitverhalten für das in das Bohrloch geflossene Laugenvolumen und den Durchmesser des Zuflußweges:

Nach 64 Minuten ist der Durchmesser des Zuflußweges von 0,1 mm auf 6 mm angewachsen, wobei 0,3 m³ Lauge in das Restvolumen des HAW-Bohrlochs eingeflossen sind. Nach 87 Minuten beträgt der Durchmesser 1 cm bei 1 m³ zugeflossener Salzlauge. Knapp 2 Stunden nach Beginn des Zuflusses (116 Minuten) sind 3 m³ Lauge im HAW-Bohrloch. Es zeigt sich, daß bei Zunahme

der eingeflossenen Laugmengen um einen Faktor 10 (von $0,3 \text{ m}^3$ auf 3 m^3) der Durchmesser des sich ausbildenden Zuflußweges nur um einen Faktor 2 wächst (von 6 mm auf 11 mm).

Ist die Wärmeleistung der Abfälle geringer, so daß 10 a nach dem Ende der Einlagerung die Temperaturdifferenz zwischen der Strecke und dem Kokillenstapel nur 30°C beträgt, verläuft die Konvergenz wesentlich langsamer. Der Ringspalt ist in diesem Fall nach 10 Jahren nur wenig kleiner als bei der Einlagerung.

Berechnet man für diesen Fall den Zufluß, wobei außer der Temperatur die gleichen Annahmen wie vorher getroffen werden, ergibt sich, daß der Durchflußweg nach ca. einer Stunde erst um den Faktor 2,4 vergrößert ist. Nach 90 Minuten ist der Durchmesser des Zuflußweges von 0,015 cm auf 0,1 cm angewachsen, das zugeflossene Laugenvolumen beträgt 2 Liter. Danach steigt die Zuflußrate stark an. Nach ca. 158 Minuten sind 300 Liter und nach ca. 184 Minuten sind 1 m^3 zugeflossen. Die Enddurchmesser betragen nach 158 Minuten 0,6 cm, nach 184 Minuten 0,8 cm.

Zur Abschätzung der Auswirkung eines flächenhaften Risses auf den Laugen-zufluß in ein HAW-Bohrloch wird angenommen, daß ein Riß ursprünglich 0,1 mm breit, 100 mm lang ist und direkt in das Restvolumen des Bohrlochs führt. Dieser Riß läßt sich durch 10^4 zylindrische Zuflußwege mit je 0,1 mm Durchmesser annähern. Durch die Lösevorgänge beim Laugen-zufluß vergrößert sich die Rißbreite und somit ändert sich die Zahl der zur Rißcharakterisierung erforderlichen zylindrischen Kanäle mit dem der Rißbreite entsprechenden Durchmesser. Der zeitliche Verlauf der Rißvergrößerung ändert sich gegenüber dem oben berechneten Verlauf für einen einzelnen Zuflußweg nicht, die Zuflußrate nimmt jedoch proportional zur Zahl der angenommenen Kanäle zu.

Im Falle der hohen Temperaturdifferenz zwischen Streckensohle und dem Salz im Bereich des oberen Teil des Kokillenstapels ($T = 60^\circ\text{C}$) verbreitert sich der Riß innerhalb von 34 Minuten von 0,1 mm auf 2,8 mm. Bis zu dieser Zeit sind bereits ca. $0,5 \text{ m}^3$ Lauge in das HAW-Bohrloch zugeflossen. Nach 45 Minuten beträgt die Rißbreite 4 mm, das zugeflossene Laugenvolumen beläuft sich auf ca. $1,9 \text{ m}^3$.

Beim Laugenzufluß längs eines geringeren Temperaturgradienten geht auch der Zufluß durch einen Riß langsamer. Bis 45 Minuten sind ca. 16 Liter Lauge in das HAW-Bohrloch geflossen, die Rißbreite beträgt zu diesem Zeitpunkt ca. 0,17 mm. Nach 92 Minuten ist der Durchmesser auf 1 mm angewachsen, wobei bis zu diesem Zeitpunkt 0,3 m³ Lauge zugeflossen sind.

Als Ergebnis dieser Betrachtungen kann festgehalten werden, daß die entstehenden Rißbreiten vom Restvolumen im HAW-Bohrloch abhängen. Durch einen flächenhaften Riß, der als Folge von vielen zylindrischen Zuflußwegen angenähert werden kann, fließt pro Zeiteinheit mehr Lauge als durch einen einzigen zylindrischen Zuflußweg, deshalb dauert der Vollaufvorgang bei einem einzelnen Kanal länger. Die Querschnittfläche eines flächenhaften Risses ist jedoch größer als beim zylindrischen Kanal. Beim Zufluß von 0,3 m³ Lauge ergibt sich eine Querschnittfläche von 28 mm² im Falle eines einzelnen zylindrischen Zuflußweges und eine Fläche von 100 mm² bei einem 10 cm langen Riß.

5.2 Rechnungen zum Vollaufen eines Salzbergwerkes

Im folgenden wird das Programm "SALT" auf enge Klüfte bzw. Spalte angewandt, die infolge bergbaulicher Arbeiten oder auch durch Aufheizung des Gebirges bei Inhomogenitäten der Salzformation denkbar sind. Bei den Rechnungen werden wieder nur Lösevorgänge betrachtet, Einflüsse durch Konvergenz und unterschiedliche Salzsichten bleiben unberücksichtigt.

Folgende Modellannahmen werden getroffen:

- Die Kluft verläuft senkrecht durch reines Steinsalz (500 m tief).
- Anstelle der flächenhaften Kluft wird ein kreisförmiger Querschnitt untersucht.
- Es fließt eine nahezu konzentrierte Kochsalzlauge zu (26,3% NaCl, T = 20°C)

- Der hydrostatische Druck wird konstant angenommen (30 bar), die Zuflußrate ist durch Druck und Durchmesser des Zuflußweges bestimmt.
- Der Temperaturgradient beträgt $0,03^{\circ}\text{C}/\text{m}$.

Die Rechnungen werden zur Einsparung von Rechenkosten nicht "in einem Stück", wie z.B. im Falle der HAW-Bohrlöcher, durchgeführt, sondern für verschiedene Anfangsradien wurden je 50.000 Zeitschritte gerechnet und die dann erhaltene zeitliche Änderung des Radius ($\frac{dr}{dt}$) über dem Radius aufgetragen. Die Berechnung der Zeitdauer, die erforderlich ist, um durch Lösevorgänge den Zuflußweg vom Anfangsradius r_a auf den Endradius r_e zu vergrößern, ergibt sich formal aus

$$\frac{dr}{dt} = f(r) \quad (5)$$

Wenn $f(r)$ als integrierbare Funktion dargestellt werden kann, gilt

$$t = \int_{r_a}^{r_e} \frac{dr}{f(r)}$$

wobei t die gesuchte Zeitdauer ist.

Die Ergebnisse der Rechnungen sind in Tab 2 bzw. Abb. 12 dargestellt. In Tab. 2 bedeutet $\frac{dr}{dt}$ die zeitliche Änderung des Radius infolge der Lösevorgänge, Re die Reynolds-Zahl, Q die Zuflußrate.

Für Anfangsradien $< 0,075$ cm kann der Zufluß von Süßwasser nicht berechnet werden, da hierzu eine äußerst feine Diskretisierung des Zuflußweges erforderlich wäre und somit die Rechenkosten sehr hoch lägen. Für größere Durchmesser ist die Fließgeschwindigkeit im Zuflußweg hinreichend groß, so daß die sich einstellenden Konzentrationsgradienten mit einer relativ groben Diskretisierung erfaßt werden können.

Der Kurvenverlauf in Abb. 12 läßt sich stückweise durch Exponentialfunktionen beschreiben. Die Bereiche, in denen die berechneten $\frac{dr}{dt}$ -Werte durch exponentielle Abhängigkeiten vom Radius angepaßt werden können, sind mit der Reynolds-Zahl der zufließenden Lauge ($Re = r \rho v / \eta$)

ρ : Dichte, v : Strömungsgeschwindigkeit, η : Viskosität) korreliert. Die funktionalen Zusammenhänge $\frac{dr}{dt} = f(r)$ sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Mit den Gleichungen der Tab. 3 ergeben sich nach Gleichung (6) folgende Zeiten für die Vergrößerung eines Zuflußweges.

Zeitdauer für die Vergrößerung des Zuflußweges

Konzentration der zufließenden Lauge	Anfangsradius r_a [cm]	Endradius r_e [cm]	Zeitdauer [d]
C = 26,3%	0,005	0,075	1030
	0,075	1,0	15,5
	1,0	5,0	3,19
C = 0	0,075	1,5	8,95
	1,5	6,0	0,033 = 47 min
	6,0	13,1	25 min

Für den Fall mit C = 0 wurde die Vergrößerung des Zuflußweges zwischen $r_a = 6$ cm und $r_e = 13,1$ cm direkt berechnet. Die hierbei berechnete Zeitdauer stimmt mit der in der Tabelle genannten exakt überein.

Legt man wegen der guten Wärmeleitfähigkeit des Steinsalzes einen geringeren geothermischen Temperaturgradient zugrunde (z.B. $0,02^{\circ}\text{C}/\text{m}$), ergibt sich wie erwartet, daß die Vergrößerung des Zuflußweges langsamer abläuft.

Der funktionale Zusammenhang $\frac{dr}{dt} = f(r)$ läßt sich ebenfalls als Exponentialfunktion darstellen (Tab. 4). Mit der dort angegebenen Beziehung berechnet sich nach Gleichung (6) eine Zeitdauer von 3032 Tagen für die Vergrößerung des Durchmessers des Zuflußweges von $0,01$ cm auf $0,15$ cm (Faktor 15). Erst für Durchmesser ≥ 1 cm verliert der geothermische Gradient seinen Einfluß auf die Lösevorgänge, da die Strömungsgeschwindigkeit bei den hier gewählten Bedingungen so hoch wird, daß die zufließende Lauge sich innerhalb der Verweilzeit nicht im Zuflußweg mit NaCl sättigt.

Die Abb. 12 und 13 zeigen die Endphase des Laugenzuflusses in ein Salzbergwerk. Nach 1037 Tagen ist der Durchmesser von $0,01$ cm auf $0,5$ cm angewachsen (bei Temperaturgradient $0,03^{\circ}\text{C}/\text{m}$). Zu diesem Zeitpunkt sind insgesamt 10 m³ Lauge in das Bergwerk zugeflossen. Innerhalb eines Tages vergrößert sich der Zuflußweg auf 50 cm Durchmesser, wobei die Zuflußrate auf ca. $8,7$ m³/sec ansteigt. An diesem Tag fließen ca. 11.000 m³ Lauge in das Bergwerk. Je nach verfügbarem Restvolumen kann mehr Lauge zufließen und der Durchmesser des Zuflußweges weiter anwachsen. Im realen Fall dürfte dann jedoch die Ergiebigkeit der wasserführenden Schichten eine Grenze für eine weitere Zunahme der Zuflußrate bilden.

Werden die Rechnungen für die Anfangsphase mit den geringeren Temperaturgradienten durchgeführt, so verschiebt sich der Zeitmaßstab in Abb. 12 und 13 auf ca. 3054 Tage. Die Kurvenverläufe für die Durchmessergrößerung und für die zugeflossene Lauge in der Endphase ändern sich dagegen nicht.

Der Einfluß eines ausgedehnten Risses auf das Vollaufen eines Salzbergwerkes kann ähnlich wie beim Vollaufen eines HAW-Bohrloches untersucht werden. Der Riß wird für den großräumigen Fall mit 1 m Länge und $0,1$ mm

Breite angenommen, d.h. er kann anfangs durch 10^4 zylindrische Zuflußwege mit 0,1 mm Durchmesser angenähert werden. Beim Vollaufen eines ganzen Bergwerkes steht jedoch ein größeres Restvolumen für die zufließende Lauge zur Verfügung, infolgedessen wirkt sich die anfänglich um einen Faktor 10^4 größere Zuflußrate weniger aus als beim Vollaufen eines HAW-Bohrloches.

Nach c. 1000 Tagen ist der 1 m lange Riß auf eine Breite von 0,5 mm angewachsen (Temperaturgradient $0,03^\circ\text{C}/\text{m}$). Bis zu diesem Zeitpunkt sind ca. 500 m^3 Lauge in das Bergwerk geflossen. Innerhalb von 37 Tagen vergrößert sich die Rißbreite auf ca. 6 mm, wobei insgesamt 4000 m^3 Lauge in das Bergwerk fließen. In einem weiteren Tag ist das Bergwerk vollgelaufen. Die Dauer des Vollaufens ist also bei einem ausgedehnten Riß nahezu die gleiche wie bei einem zylindrischen Zuflußweg.

6. Diskussion der Anwendungsrechnungen

Wie bereits mehrfach erwähnt, wurde in den vorhergehenden Kapiteln ein mathematischer Formalismus vorgestellt, der ermöglicht, die zeitliche Änderung von Laugenzuflußwegen im Steinsalz, die Fließgeschwindigkeit der Lauge, die Salzkonzentration und die Zuflußrate zu berechnen. Bei diesem Formalismus werden nur Lösevorgänge in einem zylindrischen Zuflußweg berücksichtigt.

Im folgenden werden die in dem Programm "SALT" getroffenen Näherungen untersucht und ihre Auswirkungen auf die Rechenergebnisse diskutiert.

Bei allen durchgeführten Rechnungen wurde die Lösegeschwindigkeit unabhängig von der Temperatur angenommen. Im Allgemeinen nimmt jedoch die Lösegeschwindigkeit mit der Temperatur zu.

Diese Temperaturabhängigkeit braucht bei den Zuflußrechnungen in ein HAW-Bohrloch nicht berücksichtigt werden, da die konservative Modellannahme getroffen wird, daß sich in jedem Inkrement des Zuflußweges die der jeweiligen Laugentemperatur entsprechende Salzkonzentration in der zuflie-

ßenden Lauge einstellt. Die Temperaturzunahme der Lauge hängt von der Zuflußgeschwindigkeit und somit vom Durchmesser des Zuflußweges ab.

Beim Vollaufen eines Salzbergwerkes beträgt der Temperaturunterschied nur 15°C bzw. 10°C. Deshalb kann auch bei dieser Rechnung eine Temperaturabhängigkeit der Lösegeschwindigkeit unberücksichtigt bleiben.

Eine weitere Vereinfachung in "SALT" besteht in der Annahme, daß nur NaCl-Lösungen berücksichtigt werden. Prinzipiell ließen sich auch Zuflüsse von gesättigten Carnallitlauge betrachten. Nimmt man an, daß sich die Carnallitlauge bei 25°C mit 4 Mol $MgCl_2/kg$ Wasser und 0,49 Mol NaCl/kg Wasser aufsättigt und dann durch reines Steinsalz in Richtung eines Temperaturgradienten fließt, kann sich bei Erwärmung auf 60°C bzw. 100°C zusätzlich 13 g NaCl/kg bzw. 30 g NaCl/kg Wasser lösen /14/.

Aufgrund dieser weiteren Salzauflösung kann auch bei Zufluß von gesättigter Carnallitlösung eine Vergrößerung eines Laugezuflußweges stattfinden.

Aus den hier vorgestellten Ergebnissen können folgende Schlußfolgerungen gezogen werden:

- Der resultierende Enddurchmesser eines Zuflußweges in ein HAW-Bohrloch hängt vom verfügbaren Restvolumen ab. Allerdings wächst der Durchmesser des Zuflußweges nicht proportional mit dem Restvolumen, sondern vergrößert sich z.B. bei einem 10fachen Restvolumen der Durchmesser um den Faktor 2.
- Beim Zufluß in ein HAW-Bohrloch sind die Lösevorgänge schnell im Vergleich zur Konvergenz. Die Rate, mit der sich der Zuflußweg durch Lösevorgänge vergrößert, liegt nach den Daten /10/ um mehr als 4 Größenordnungen über der Konvergenzgeschwindigkeit.

- Die Unterschiede in der Entwicklung des Zuflußweges sowie der Dauer des Vollaufens bei einem zylindrischen Anfangszuflußweg gegenüber einer ausgedehnten Kluft sind unerheblich.
- Beim Vollaufen eines Bergwerkes sind die Zufluß- und Salzlöseraten in der Anfangsphase äußerst gering. Bis zum Auftreten nennenswerter Zuflüsse können Jahre vergehen, in denen konkurrierende gebirgsmechanische Effekte wirksam werden können.
- Das Rechenprogramm "SALT" kann in der vorliegenden Form für Anfangsdurchmesser $\geq 0,1$ mm angewandt werden.
- Zur Durchführung von Sicherheitsanalysen ist es daher notwendig, die Möglichkeiten zur Entstehung und das Konvergenzverhalten von Rissen und Klüften im Salzgestein besonders in Temperaturgradienten und bei Inhomogenitäten des Salzes genau zu untersuchen.

Anhang A: Benutzte Reibungsbeiwerte λ
(Literatur: /11/)

Für hydrodynamische "glatte" Durchflußwege mit

$$K < 30 d Re^{-7/8}$$

K : Wanderhebung

d : Durchmesser

Re : Reynoldzahl

gilt:

Für $0 \leq Re \leq 1200$ (laminarer Bereich):

$$\lambda = 32/Re,$$

für $1200 \leq Re \leq 5 \cdot 10^4$ gilt die Formel nach Blasius:

$$\lambda = 0,316/Re^{0,25}$$

für $5 \cdot 10^4 \leq Re \leq 1 \cdot 10^6$ gilt die Formel nach Herrmann:

$$\lambda = 0,0054 + 0,396/Re^{0,25}$$

für $1 \cdot 10^6 \leq Re \leq 10^8$ gilt die Formel nach Nikuradse:

$$\lambda = 0,032 + 0,221/Re^{0,237}.$$

Im "rauhem" Durchflußweg gilt für den laminaren Bereich:

$$\lambda = 32/Re,$$

für $1200 \leq Re \leq 1 \cdot 10^6$ gilt die Formel nach Hopf

$$\lambda = 10^{-2} (10/d)^{0,314}$$

für $Re \leq 1 \cdot 10^6$ gilt

$$\lambda (2 \cdot \log (d/K) + 1,138)^{-2}$$

Anhang B

Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit und der Erwärmung eines Volumenelementes.

Nach der Bernoullischen Gleichung (z.B. /12/) gilt für den Druck in einem senkrechten Rohr mit einer inkompressiblen Flüssigkeit bei der Anfangsgeschwindigkeit $v_0 = 0$:

$$p_1 = \frac{v^2}{2} \rho + p_2 + g \rho \left(h + \lambda \frac{h v^2}{2 d g} \right) \quad (1)$$

- p_1, p_2 : statischer Druck
 g : Fallbeschleunigung
 ρ : Dichte
 h : Rohrlänge
 λ : Reibungsbeiwert
 d : Durchmesser
 v : Strömungsgeschwindigkeit

Der Reibungswert λ hängt von der Reynolds-Zahl der Strömung ab, die Rauigkeit des Zuflusses kann berücksichtigt werden (Anhang A).

Die Strömungsgeschwindigkeit ergibt sich durch Auflösen der Gleichung (1) zu

$$v^2 = \frac{\Delta p + g \rho h}{\left(1 + \lambda \frac{h}{d}\right) \rho / 2} \quad (2)$$

Betrachtet man laminare Strömungen und vernachlässigt den Term $g \rho h$, ergibt sich mit

$$\lambda = \frac{32}{Re} = \frac{32 \eta}{r \rho v}$$

η : Viskosität r : Radius

die Hagen-Poiseuille Gleichung

$$v = \frac{\Delta p r^2}{8 \eta h} \quad (3)$$

für $0,027 h \gg d$.

Ist der Druckunterschied gegenüber $g h$ vernachlässigbar, gilt

$$v^2 = 2 \cdot g \cdot h \quad (4)$$

für $\lambda \frac{h}{d} \ll 1$.

Bei der Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit nach (2) wird die Kontinuitätsgleichung in jedem Teilstück des Zuflusses berücksichtigt.

Bei Strömung in einem nicht gefüllten Rohr, d.h. bei Erreichen der maximalen Zuflußrate, wird die Kavitationsgeschwindigkeit als Maximalgeschwindigkeit betrachtet. Nach /12/ beträgt diese beim Fließen einer Flüssigkeit zwischen den Punkten 1 und h:

$$v_{\text{krit}}^2 = \frac{2g l}{1+\xi} \left[1 + \frac{p_B - p_D}{g \rho l} - \frac{h}{l} \right] \quad (5)$$

Darin ist p_B der barometrische Druck und p_D der Dampfdruck der Flüssigkeit (an der Stelle h). ξ ist der Widerstandbeiwert.

Unter der Randbedingung, daß Kavitation für $h = l$ eintritt, ergibt sich die kritische Geschwindigkeit zu

$$v_{\text{krit}}^2 = 2 \frac{p_B - p_D}{(1 + \lambda \frac{l}{d}) \rho} \quad (6)$$

In Gleichung (5) wird der barometrische Druck $p_B = 10^5$ Pa, der Dampfdruck des Wassers bei 40°C $p_D = 7400$ Pa gesetzt.

Erwärmung eines Flüssigkeitsvolumens

Nach der Theorie der Wärmeübertragung durch stationäre Wärmeleitung an laminar strömende Flüssigkeiten (z.B. /5, 13/ erwärmt sich eine Flüssigkeit der Temperatur T_1 beim Durchfließen eines Rohres der Länge x mit der konstanten Temperatur T_0 nach folgender Beziehung

$$\frac{T_2 - T_0}{T_1 - T_0} = \exp \left(\frac{2\alpha \Delta x}{\rho c v d} \right) \quad (7)$$

- T_2 : Austrittstemperatur
 c : spezifische Wärme
 α : Wärmeübergangskoeffizient

Nach der Definition ist

$$\frac{\alpha d}{\kappa} = Nu$$

κ : Wärmeleitfähigkeit

Nu : Nußelt-Zahl

Die minimalen und maximalen Nußelt-Zahlen bei laminarer Rohrströmung ergeben sich aus

$$Nu_{\min} = 3 \sqrt{3.65^3 + 1.61^3 Pe \frac{d}{\Delta x}}$$

(8)

$$Nu_{\max} = \sqrt{5.78^2 + \frac{4}{\pi} Pe \frac{d}{\Delta x}}$$

mit Pe : Peclet-Zahl

$$Pe = \frac{v d}{\kappa}$$

Literatur

- /1/ Snow, R.H.; Chang, D.S. (1975)
Prediction of cavity growth by solution of salt around
bore holes
ORNL/SUB - 4005/1
- /2/ Franke, H. (1972)
Betrachtungen zu Havariestituationen bei der Lagerung
radioaktiver Abfälle in einem Salzbergwerk
SZS Nr. 138, S. 31
- /3/ Pfeifer, P. (1970)
Untersuchungen zur Auflösung von natürlichen Salzgesteinen
Bergakademie 22, S. 219
- /4/ Karsten, O. (1954)
Lösungsgeschwindigkeit von NaCl, KCl und Kieserit in
Wasser und wäßrigen Lösungen
Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie 276, S. 247
- /5/ Schlünder, E.-U. (1972)
Einführung in die Wärme- und Stoffübertragung
Vieweg Verlag, Braunschweig
- /6/ Gmelin (1951)
Handbuch der anorganischen Chemie "Natrium" System Nr. 21
Verlag Chemie Weinheim, Berlin
- /7/ Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH
Jahresbericht 1975
Kurzfassung, S. 204

- /8/ Endlagerung radioaktiver Abfälle (1976)
Jahresbericht 1975
GSF T 60
KfK 2309
- /9/ Röthemeyer, H. (1979)
Site investigations and conceptual design for the mined
repository in the German nuclear "Entsorgungszentrum"
IAEA-SM-243/48
- /10/ Pudewills, A. (1981)
persönliche Mitteilung
- /11/ Sass, F.; Bouché, Ch.; Leitner, A. (1961)
Dubbels Taschenbuch für den Maschinenbau
Springer Verlag, Berlin
- /12/ Albring, W. (1978),
Angewandte Strömungslehre Akademie Verlag, Berlin
- /13/ VDI Wärmeatlas (1977)
VDI-Verlag, Düsseldorf
- /14/ Jenks, G.H. (1980)
Review of information on the radiation chemistry of materials
around waste canisters in salt and assessment of the need for
additional experimental information
ORNL-5607

Tabelle 1: Berechnung der Lösegeschwindigkeit β in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit v

Strömung	Geschwindigkeit (cm/sec)	β in ($\frac{\text{cm}}{\text{sec}}$)	Literatur
senkrecht	0 - 5	wie für $5 \leq v \leq 90$ cm/sec	
	5 - 90	$\beta = 3.015 * 10^{-3} * v^{0.4}$	Franke (1975) /2/
	> 500	$\beta = 3.5 * 10^{-2}$	Franke (1975) /2/
parallel	0 - 20	$\beta = (9.35 + 0.174 * v) * 10^{-4}$	Pfeifer (1970) /3/
	20 - 90	$\beta = (14.42 + 1.55 * v) * 10^{-4}$	Pfeifer (1970) /3/
	90 - 500	$\beta = 1.25 * 10^{-2} + 5.49 * 10^{-5} * (v - 90)$	lineare Interpolation
	> 500	$\beta = 3.5 * 10^{-2}$	Karsten (1954) /4/

Tabelle 2: Durchgeführte Laborexperimente zur Überprüfung des Rechenprogramms "Salt"

Nr.	Länge [cm]	Anfangs- durchmesser [mm]	Salzkonzentra- tion des zuflie- ßenden Wassers [Gew.-%]	Druck [bar]	Meßzeit [min]	Enddurch- messer [mm]	Durchgeflossenes Volumen [l]
1	100	5	0	0,025	10	43,6	645,0
2	100	5	0	0,025	17	70,0	1270,0
3	12	2	0	0,045	2	17,5	13,7
4	12	2	0	0,045	2	13,3	9,0
5	21	5	9,5	0,047	10,0	33,0	283,0
6	21	5	9,5	0,047	9,5	29,0	242,0
7	25	5	25,0	0,053	10,0	7,3	33,8
8	26	4	25,0	0,054	42,0	18,5	456,0

Tabelle 3: Rechenergebnisse zum Modellfall
"Vollaufen eines Salzbergwerkes"

Radius / cm /	dr/dt für c = 26,3 / cm/sec /	dr/dt für c = 0 / cm/sec /	Re	Q / l/sec /
0,005	0,28 E - 10	-	0,33	0,44 E - 7
0,01	0,22 E - 9	-	-	0,71 E - 6
0,025	0,35 E - 8	-	42,1	0,28 E - 4
0,05	0,28 E - 7	-	-	0,45 E - 3
0,075	0,94 E - 7	-	1137	0,0022
0,082	-	0,113 E - 6	-	-
0,1	0,12 E - 6	0,158 E - 6	1422	0,0038
0,2	0,38 E - 6	0,66 E - 6	4700	0,0246
0,3	0,72 E - 6	-	9400	0,075
0,33	-	0,204 E - 5	-	0,080
0,5	0,99 E - 6	-	22000	0,298
0,6	-	0,259 E - 4	-	0,40
0,75	0,21 E - 5	-	45000	0,890
0,825	-	0,449 E - 4	-	0,85
1,0	0,44 E - 5	0,127 E - 3	73000	1,930
1,5	-	0,410 E - 3	-	4,68
2,0	0,144 E - 4	-	2,3 E5	12,0
3,0	0,21 E - 4	0,196 E - 2	4,5 E5	36,0
4,0	-	0,274 E - 2	-	70,0
5,0	0,27 E - 4	-	1,0 E6	139,0
6,0	-	0,395 E - 2	-	186,0
8,6	-	0,473 E - 2	-	492
10,0	0,314 E - 4	0,497 E - 2	2,7 E6	815
13,1	-	0,526 E - 2	4,1 E6	1670
20,0	0,330 E - 4	-	9,2 E6	4900

Tabelle 4: Funktionaler Zusammenhang zwischen dr/dt und r beim Modellfall "Zufluß in ein Salzbergwerk"

Parameter	r_{\min}	r_{\max}	Re	$y = \frac{dr}{dt} = f(r)$	
H = 500 m	0,005 cm	0,075 cm	< 1200	$y = 2,24 \cdot 10^{-4} \cdot r^{3,0}$	laminar
$\Delta p = 30$ b	0,075 cm	1,0 cm	< $1 \cdot 10^5$	$y = 3,531 \cdot 10^{-6} \cdot r^{1,427}$	Übergangs- bereich
c = 26,3 %					
$\frac{dT}{dH} = 0,03^\circ/\text{m}$	1,0 cm > 5,0 cm	5,0 cm	< $1 \cdot 10^6$ > $1 \cdot 10^6$	$y = 5,231 \cdot 10^{-6} \cdot r^{1,139}$	turbulent
H = 500 m	0,075 cm	1,5 cm	$1200 \leq \text{Re} \leq 10^5$	$y = 9,60 \cdot 10^{-5} \cdot r^{2,915}$	Übergangsbereich
$\Delta p = 30$ b	1,5 cm	6,0 cm	< $1 \cdot 10^6$	$y = 2,43 \cdot 10^{-4} \cdot r^{1,669}$	
c = 0	6,0 cm		> $1 \cdot 10^6$	$y = 2,07 \cdot 10^{-3} \cdot r^{0,372}$	
$\frac{dT}{dH} = 0,03^\circ/\text{m}$					
$\frac{dT}{dH} = 0,02^\circ/\text{m}$	0,005 cm	0,075 cm	< 1200	$y = 7,07 \cdot 10^{-5} \cdot r^{2,985}$	laminar

- c = Konzentration
H = Länge der Klufft
 Δp = Druckdifferenz

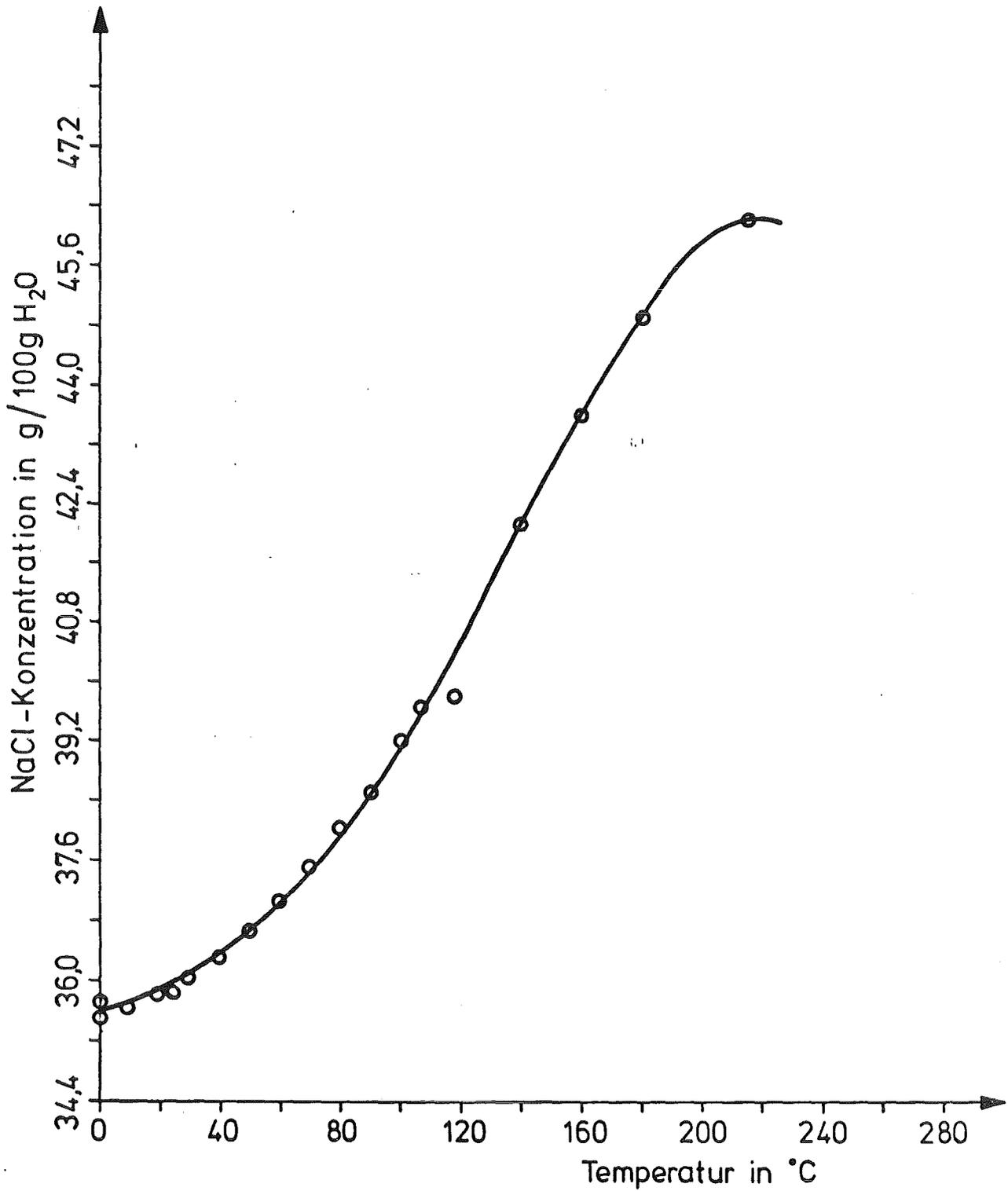


Abb. 1: Löslichkeit von Kochsalz als Funktion der Temperatur
(an Literaturdaten angepaßtes Polynom)

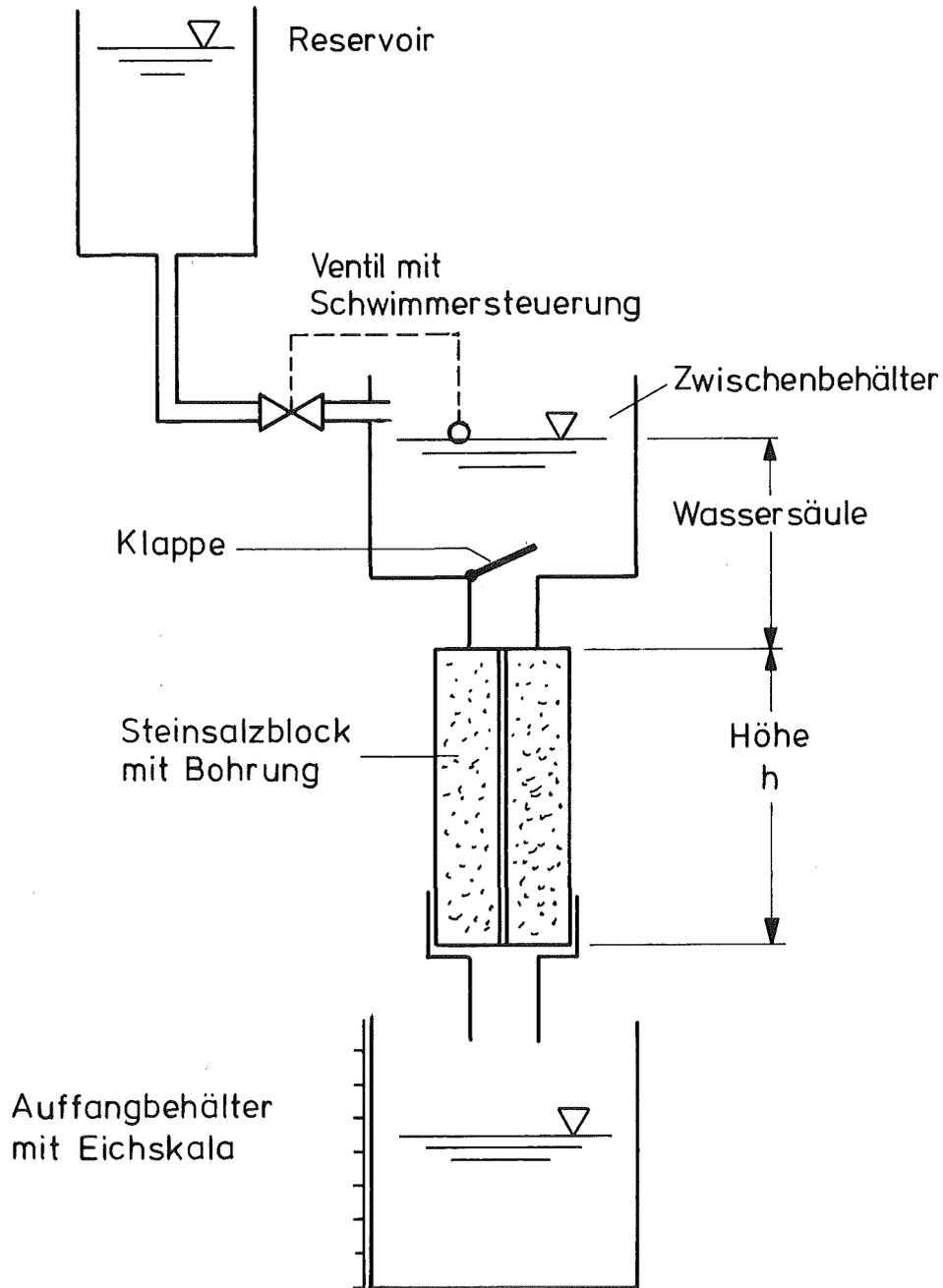


Abb. 2: Versuchsaufbau für die Laborexperimente zur Messung der Durchmesserergrößerung einer Bohrung in Steinsalz durch Lösevorgänge

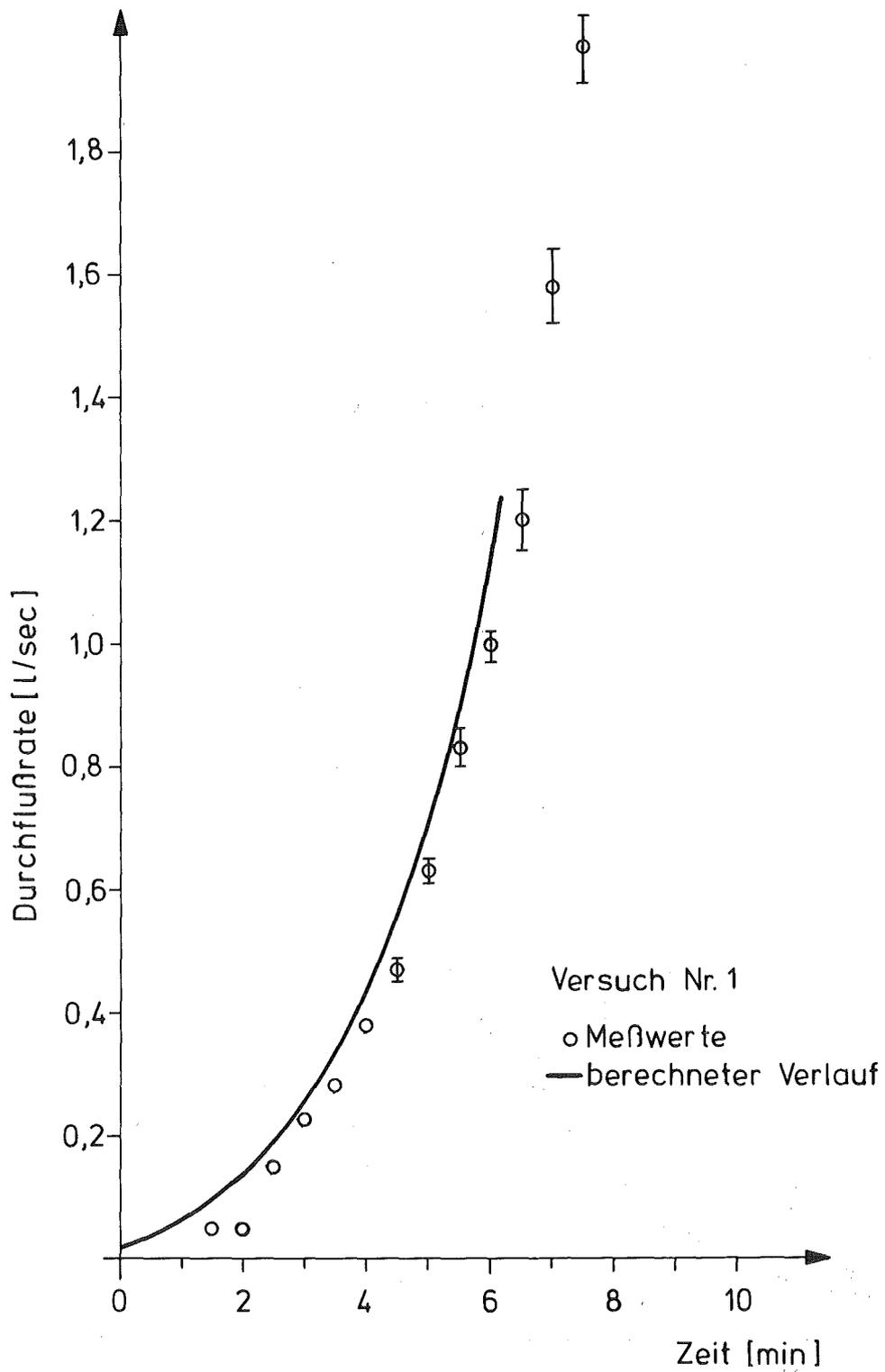


Abb. 3: Durchflußrate als Funktion der Zeit
Versuch Nr. 1, Leitungswasser
Anfangsdurchmesser: 5 mm

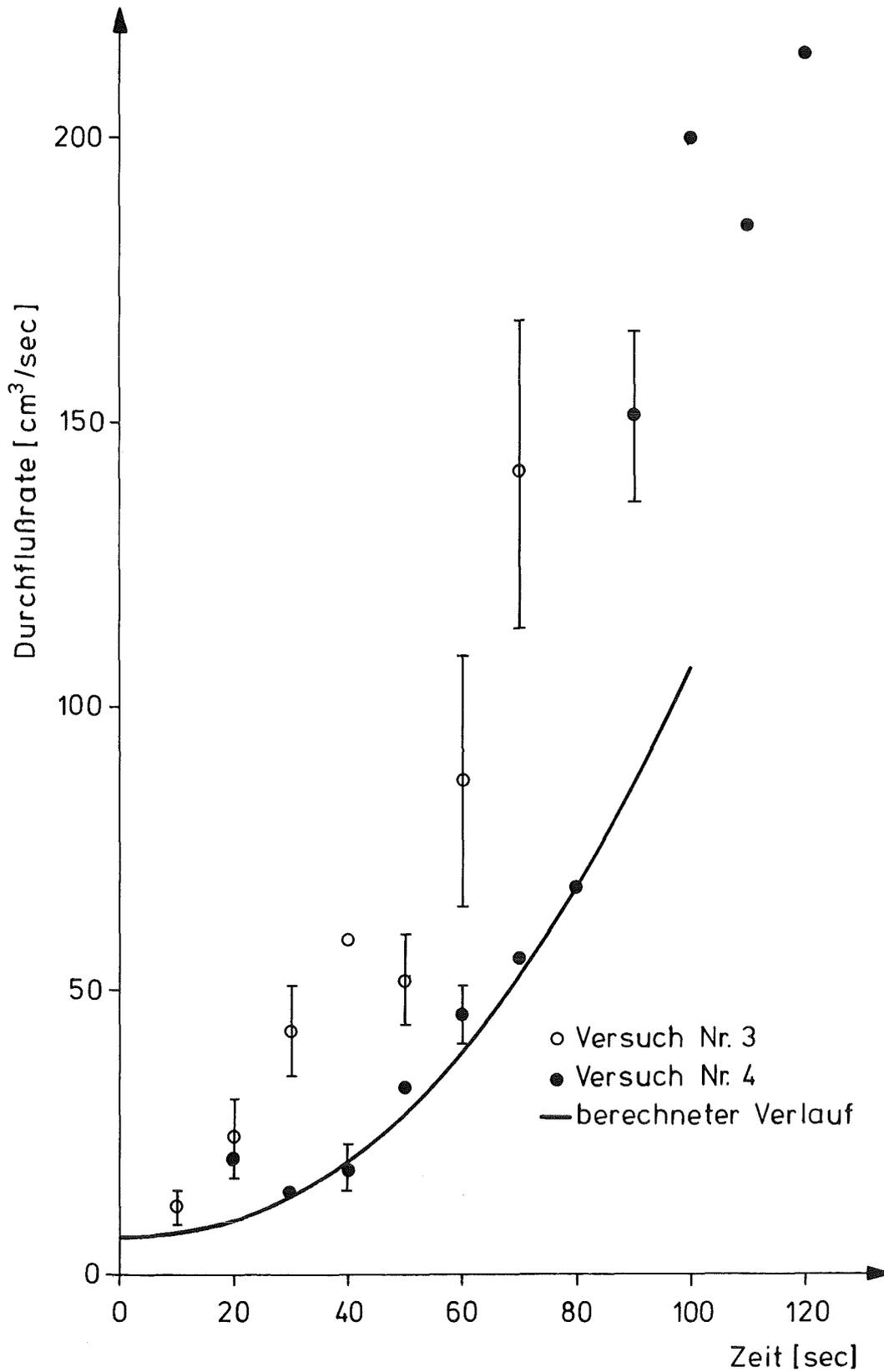


Abb. 4: Durchflußrate als Funktion der Zeit
Versuche 3, 4; Leitungswasser
Anfangsdurchmesser: 2 mm

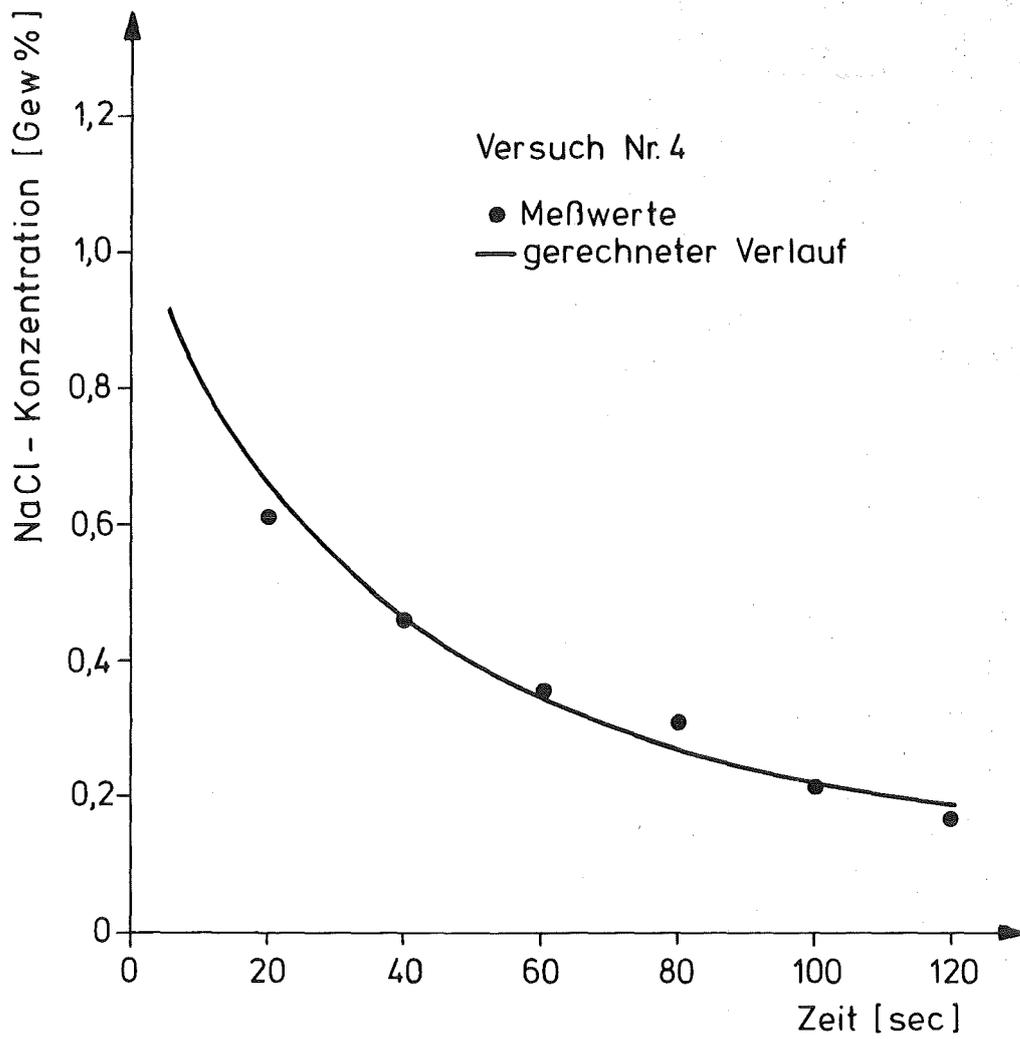


Abb. 5: Salzkonzentration in derausgeflossenen Lauge als Funktion der Zeit

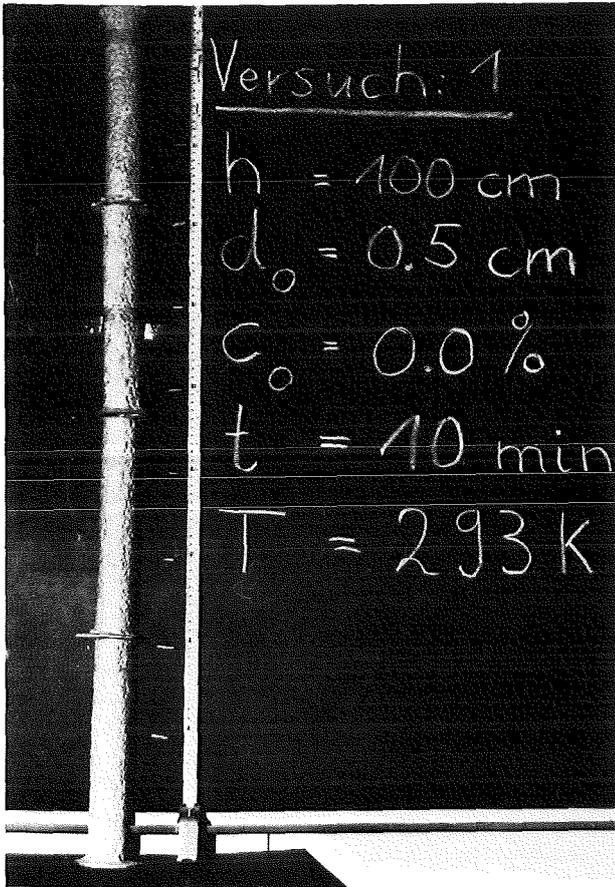
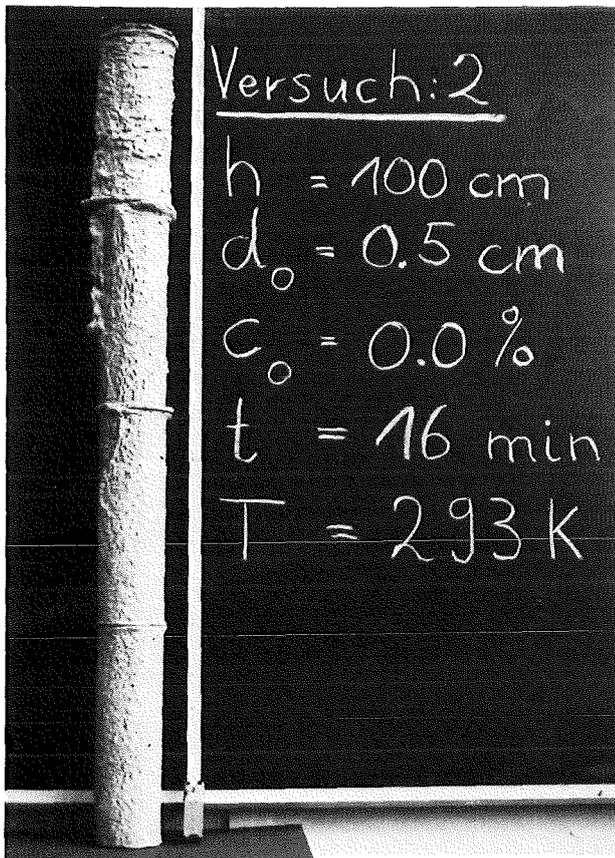


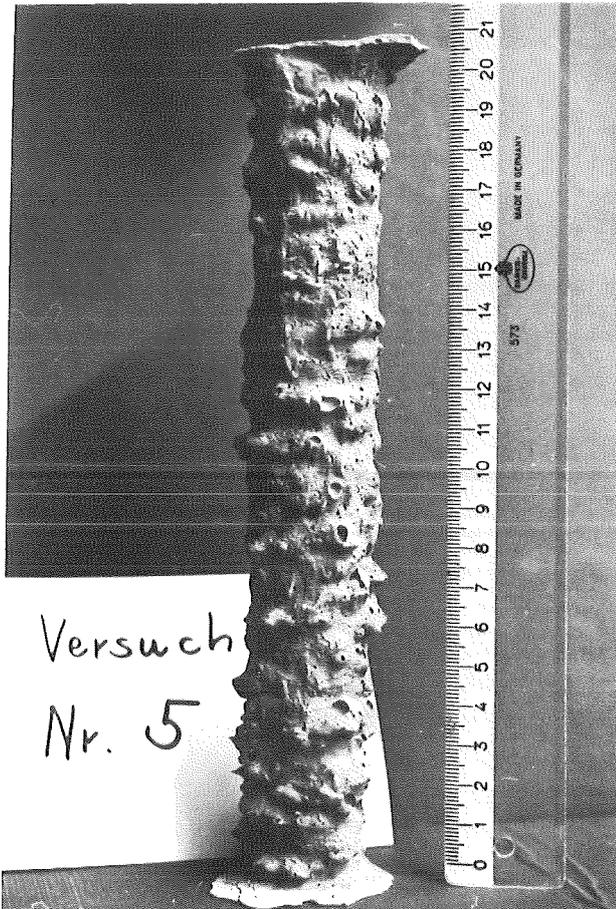
Abb. 6:

Form der bei den Experimenten entstehenden Zuflußwegen

a) Versuch Nr. 1



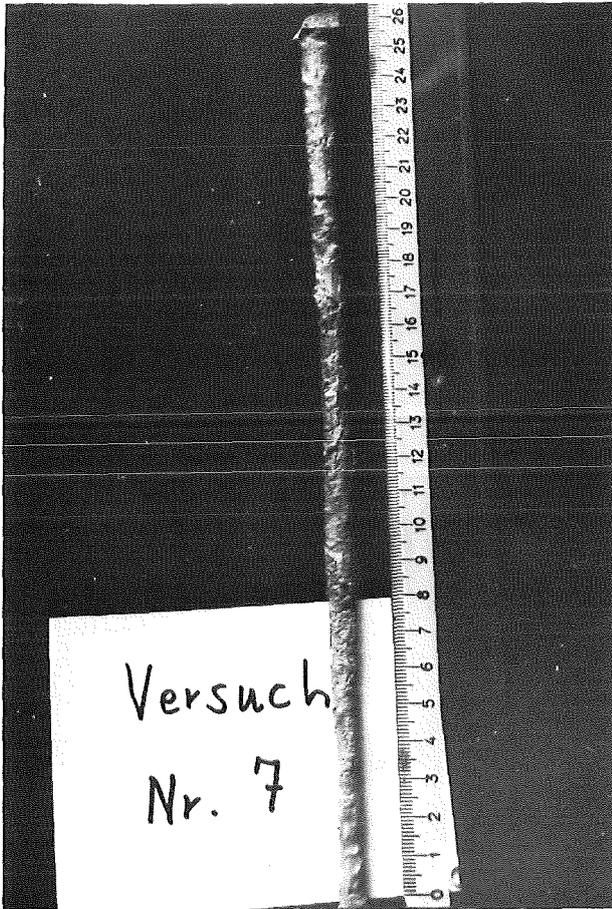
b) Versuch Nr. 2



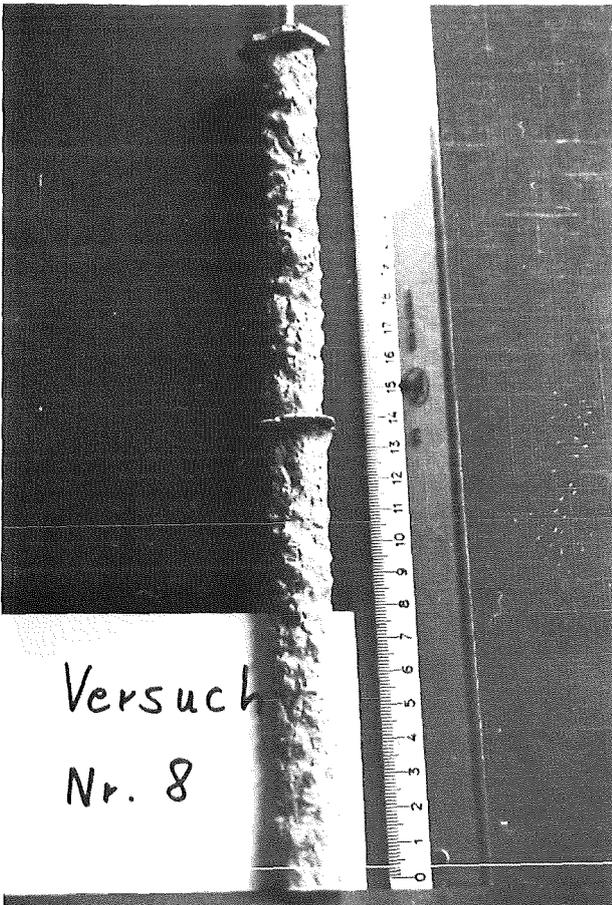
c) Versuch Nr. 5



d) Versuch Nr. 6



e) Versuch Nr. 7



f) Versuch Nr. 8

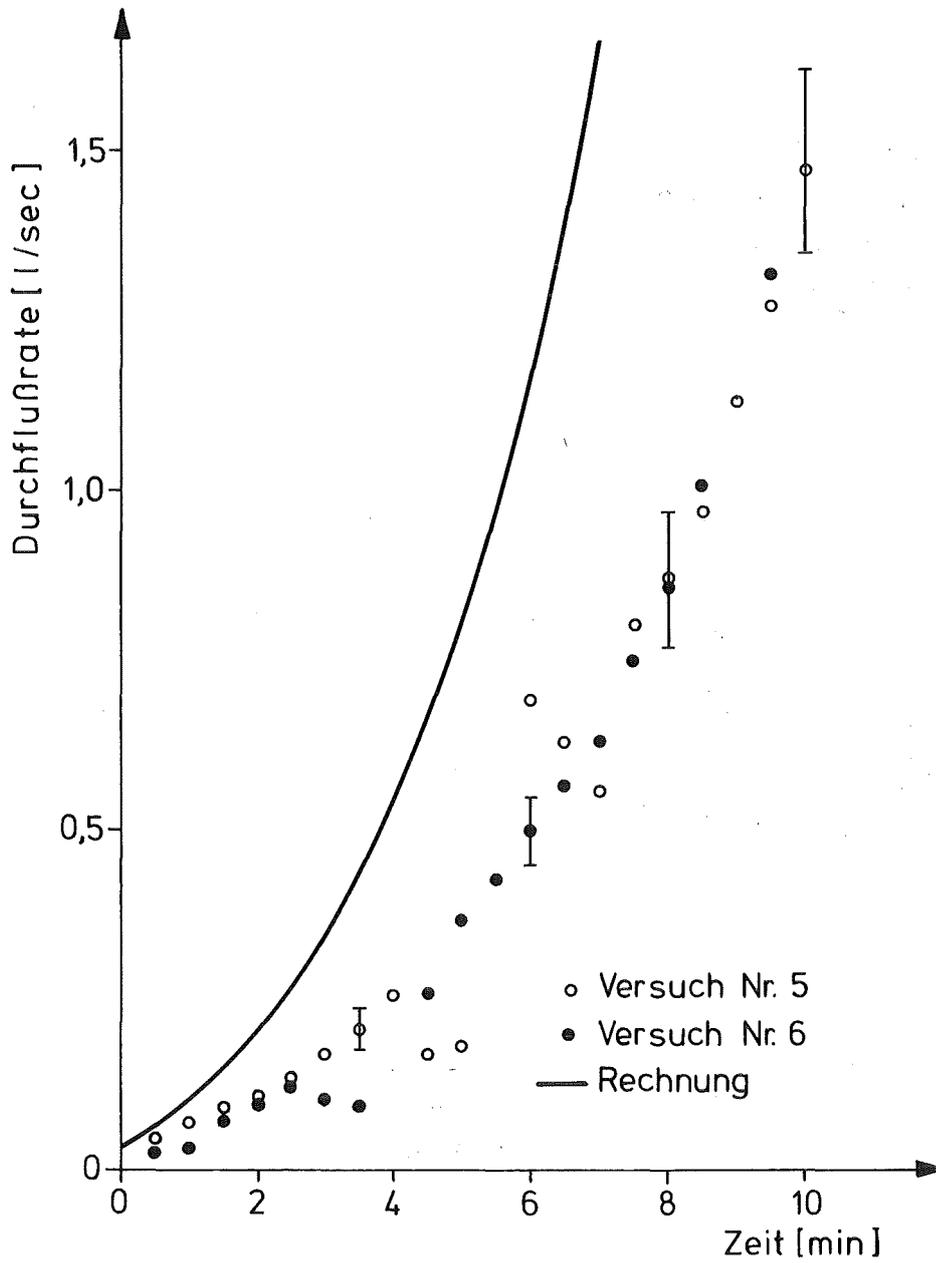


Abb. 7: Durchflußrate als Funktion der Zeit
Versuche Nr. 7, 8; konzentrierte Salzlösung
Anfangsdurchmesser: 5 mm

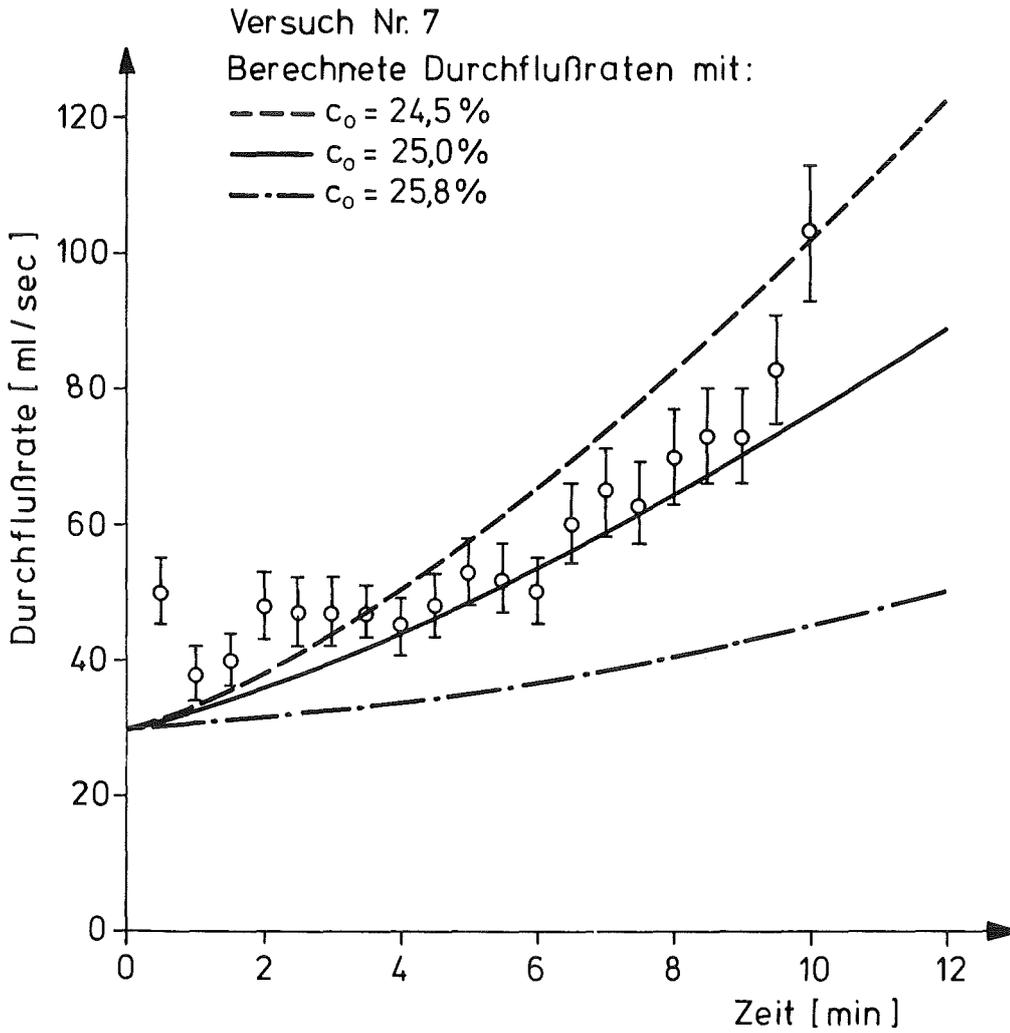


Abb. 8: Durchflußrate als Funktion der Zeit
Versuch Nr. 7; nahezu gesättigte NaCl-Lösung
Parametervariation bezüglich der Konzentration
der zufließenden Salzlösung

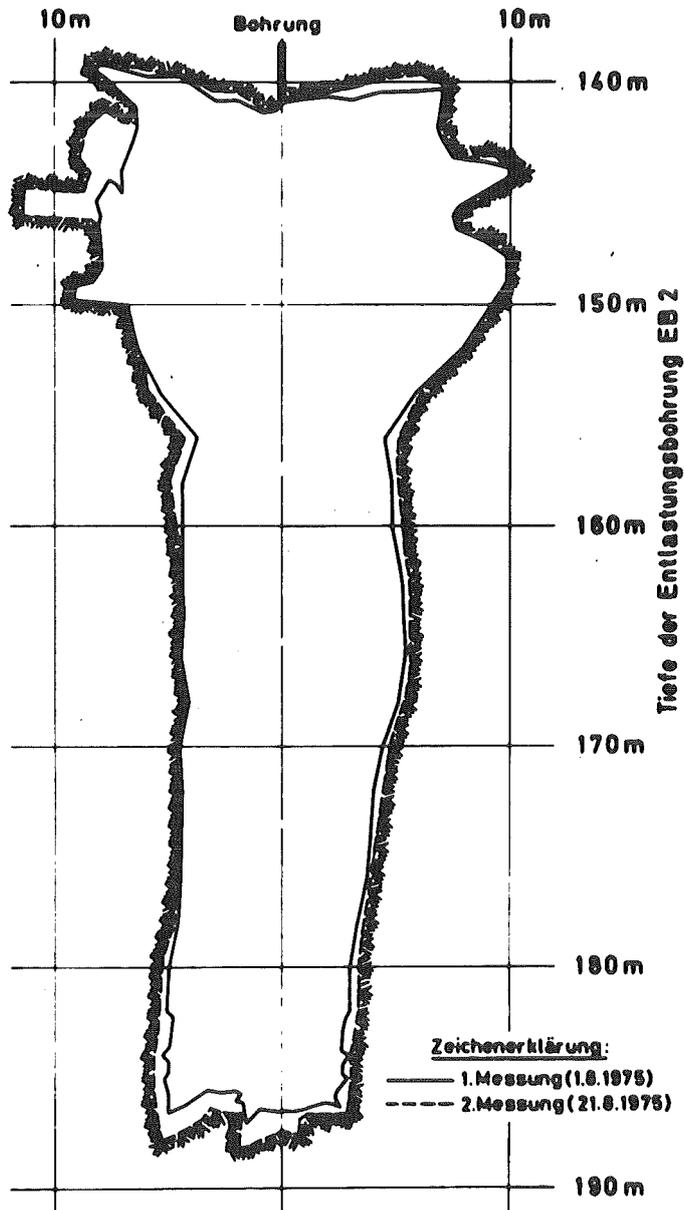


Abb. 9: Echometrisch vermessener Abschnitt des Zuflußweges beim Vollaufen des Salzbergwerkes Ronnenberg Entlastungsbohrung EB 2; Anfangsdurchmesser: 25 cm

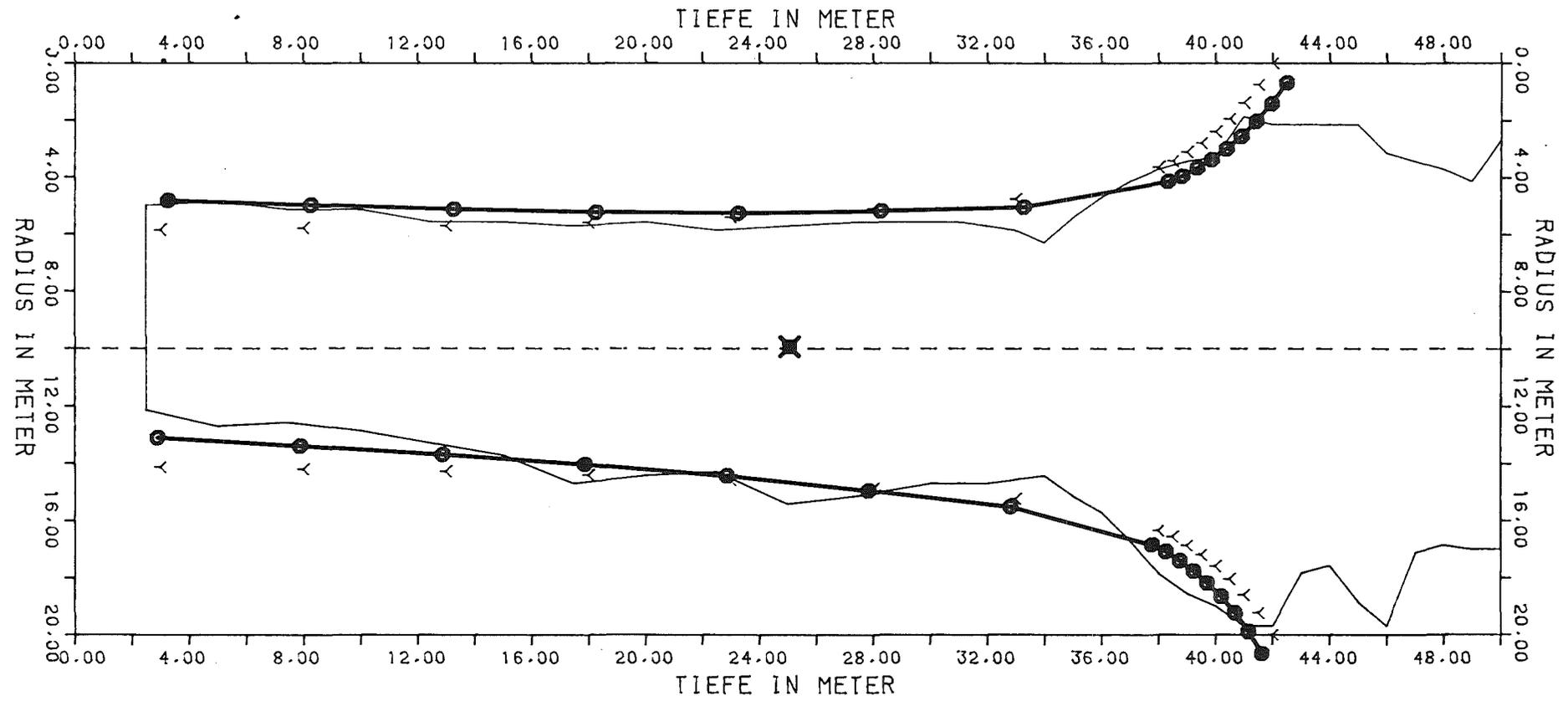


Abb. 10: Nachrechnung des Zuflußweges beim Vollaufen des Salzbergwerkes Ronnenberg

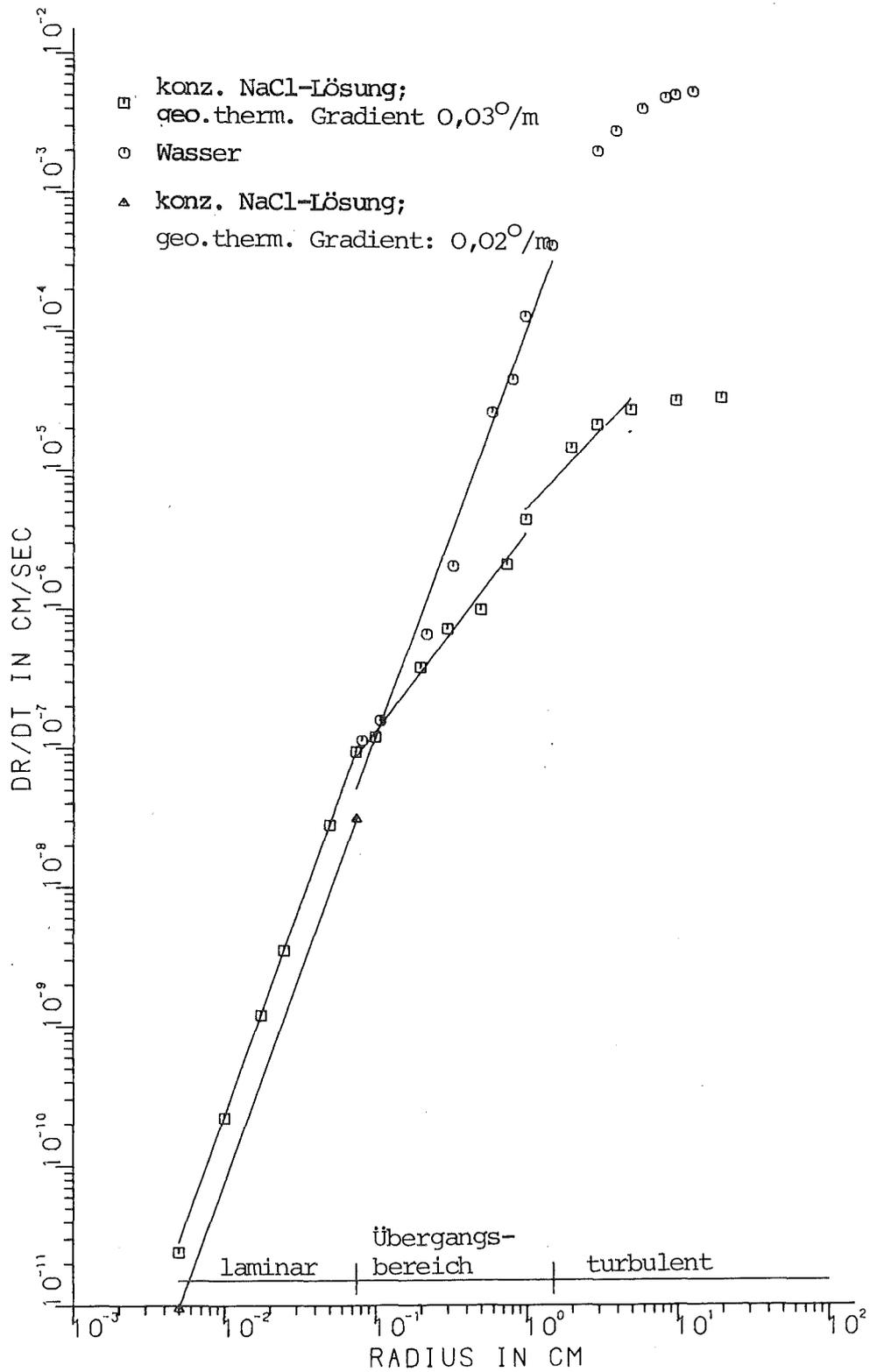


Abb. 11: Berechnete zeitliche Änderung des Radius eines Zuflusses als Funktion des Radius beim Modellfall "Vollaufen eines Salzbergwerkes"

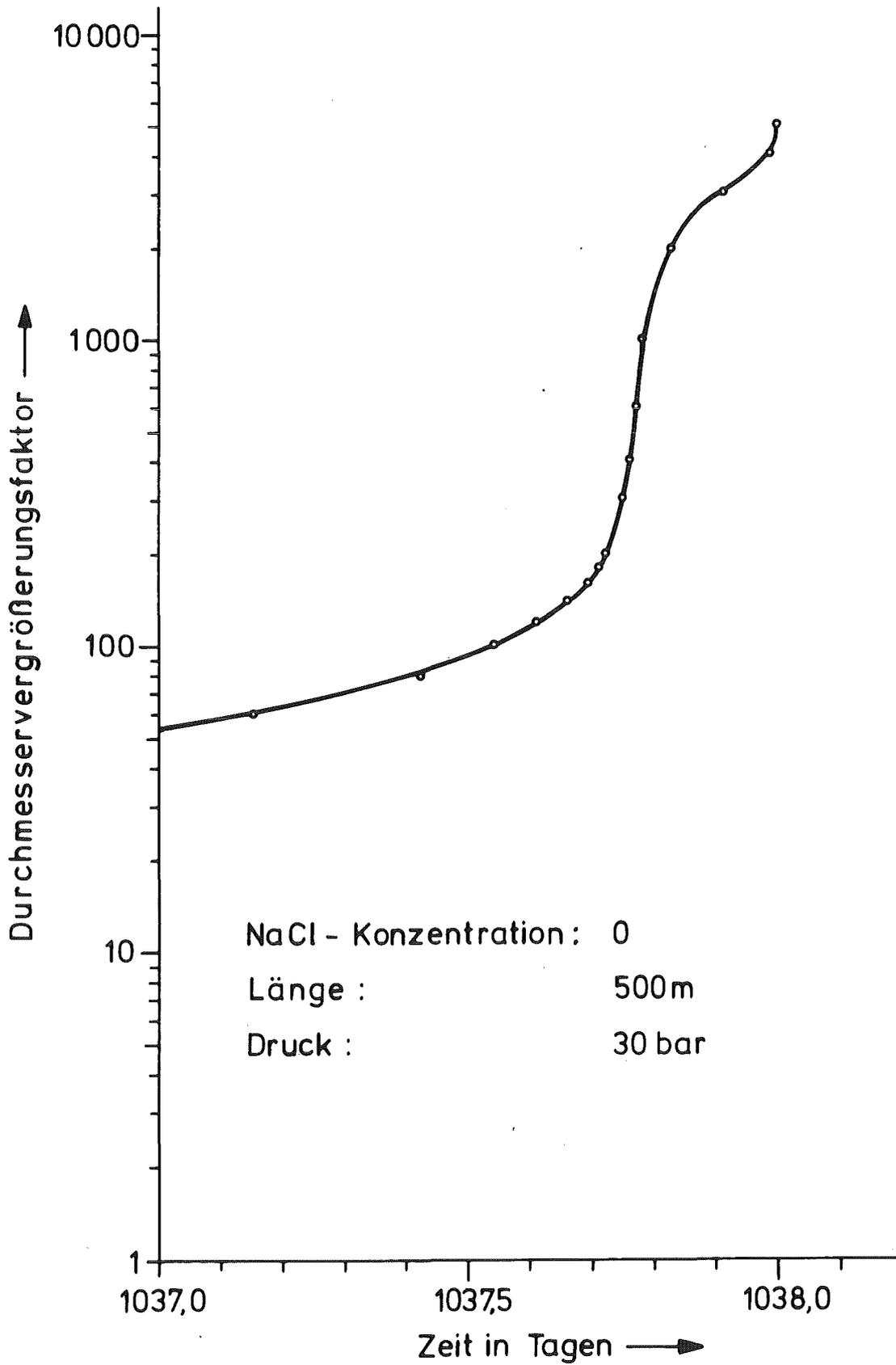


Abb. 12: Berechnete Durchmesservergrößerung eines Zuflußweges in der Endphase beim Vollaufen eines Salzbergwerkes

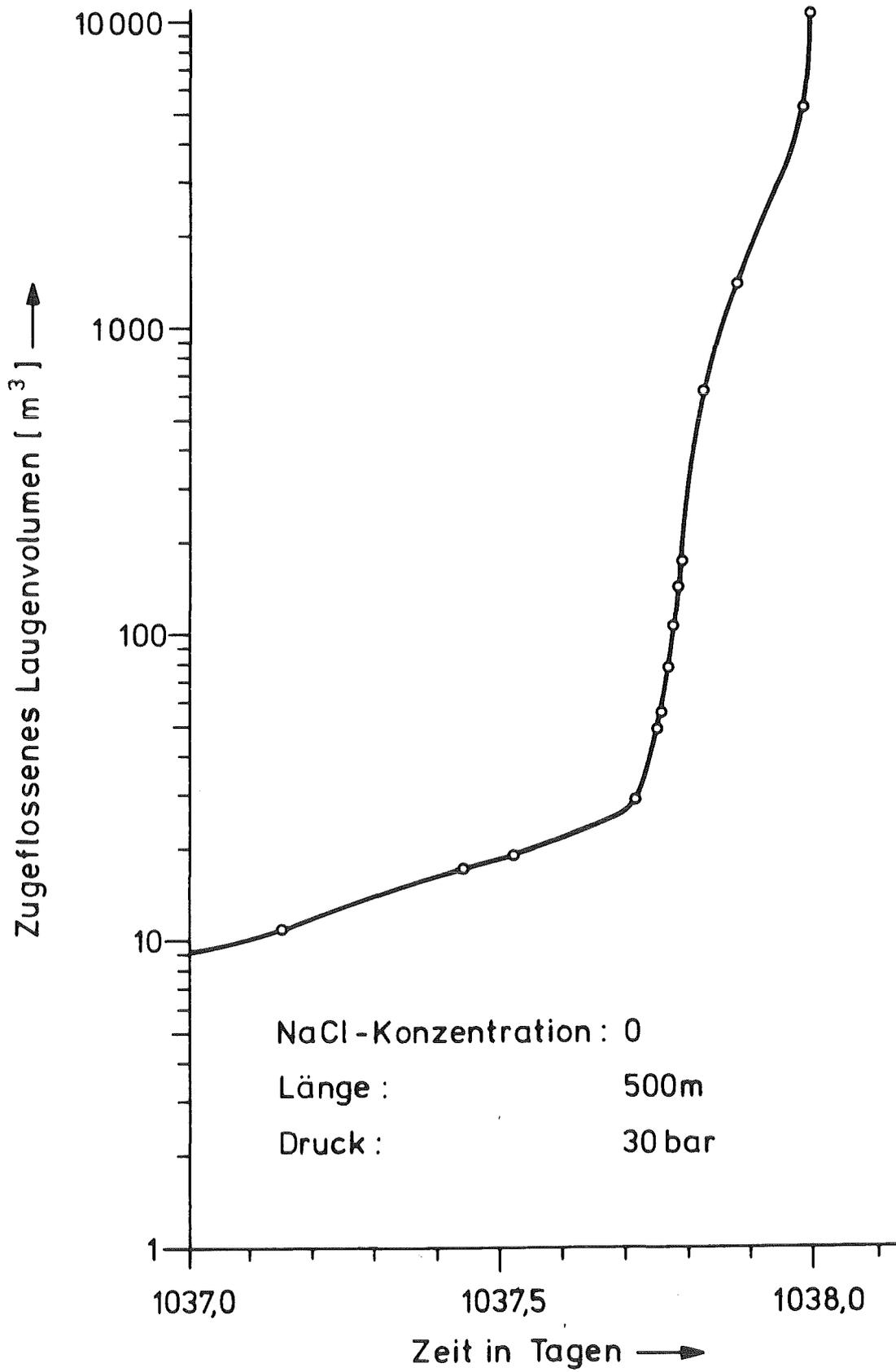


Abb. 13: Integral zugeflossenes Laugenvolumen in der Endphase beim Vollaufen eines Salzbergwerkes