

Die numerische Simulation des Solprozesses— Erfahrungen und Möglichkeiten

J. Hieblinger und W. Kleinitz

*KBB Kavernen Bau- und Betriebsgesellschaft mbH,
D-3 Hannover 1, Rathenaustr. 13/14,
Federal Republic of Germany*

ZUSAMMENFASSUNG

Vier Jahre Anwendung eines dreidimensionalen numerischen Simulationsmodells für Planung und Kontrolle des Solprozesses bei der Herstellung von Salzkavernen haben eine Vielzahl von Erfahrungen gebracht, die eine Beurteilung über Modellqualität und Einsatzmöglichkeiten zulassen.

Anhand von verschiedensten Beispielen werden Vergleiche zwischen Modellrechnungen und tatsächlichem Solverlauf, d.h. Konfiguration, Konzentration und Solzeiten, demonstriert. Die hierbei erzielte Übereinstimmung beweist die Fähigkeit des Modells, jeden beliebigen Solprozeß exakt wiederzugeben. Die vom Modell gelieferten Massenfluß- und Konzentrationsverteilungen an jedem Punkt der Kaverne geben Einblick in Logik und Gesetzmäßigkeit des Solprozesses. Hierdurch wird erstmals eine bisher abstrakte "Wissenschaft" anschaulich.

Praktische Erfahrungen geben einen Überblick über die Anwendbarkeit und Grenzen des Modells. Bei der Kavernengestaltung im Hinblick auf Standsicherheit und Speichergutumschlag hat sich das Modell als unumgängliches Planungs und Kontrollinstrument erwiesen. Maximalvolumina, reduzierte Solzeiten und Meßprogramme konnten damit erzielt werden. Dies war und ist von besonderer Bedeutung für den wirtschaftlichen Bau und Betrieb von Kavernenspeichern.

EINLEITUNG

Das Prinzip der Gewinnung von NaCl, KCl und anderer löslicher Salzkomponten durch Auflösen in der Lagerstätte wird seit Jahrtausenden angewendet. Seit Beginn der 50-Jahre dieses Jahrhunderts findet diese "Soltechnik" auch Anwendung zur Schaffung von Hohlräumen im Salzgestein, um Produkte wie Rohöl, Erdgas, Raffinerieerzeugnisse, Druckluft und Industrieabfälle zu speichern bzw. zu deponieren. Kavernengrößen von 500 000 bis nahezu 2 Mill. m³ pro Kaverne für die Lagerung von Öl und Volumina von rund 400 000 m³ für die Speicherung von Hochdruckgas sind gegenwärtig Stand der Technik und werden in zahlreichen Projekten realisiert.

Obwohl die Schaffung von Hohlräumen im Salzgestein durch den sogenannten Solprozess, d.h. das planmäßige Auflösen von Salz durch Frischwasserinjektion, zu den wirtschaftlichsten Methoden der Hohlraumgewinnung

zählt, sind bei Großprojekten hohe Aufwendungen an Investitionen und Betriebskosten erforderlich. Beide zusammen können bis zu einigen hundert Millionen DM pro Projekt betragen. Gelingt es durch Planungsmodelle Einsparungen—and mögen sie auch nur im Prozentbereich liegen—zu erzielen, so ist deren Einsatz nicht nur gerechtfertigt, sondern geradezu erforderlich.

ANFORDERUNGEN AN DAS MODELL

Die Parameter, die bei der Realisierung eines Kavernenprojektes in die Optimierung der kostengünstigsten Verfahrensweise eingehen, sind im Wesentlichen: 1) Verwendungszweck der Kavernen, 2) Größe der Kavernen, 3) Verfügbarkeit an Frischwasser und Solebeseitigung, 4) Ein- und Auslagerungsraten, 5) zeitabhängiger Speicher- oder Lagerbedarf und 6) Umschlaghäufigkeit des Speicher- oder Deponiegutes. Diese Parameter beeinflussen die

Hohlraumgestalt, das Solverfahren, den Zeitbedarf etc. Zusätzlich müssen die natürlichen Gegebenheiten der Salzlagerstätte, die Salzzusammensetzung, die Forderung nach deren volkswirtschaftlicher Nutzung und die Stabilitätskriterien der Kavernen berücksichtigt werden.

Zwei wesentliche, von uns entwickelte Verfahren, nämlich 1) Kernuntersuchungen und 2) Spezialauswertung der geophysikalischen Bohrlochmessungen liefern die die Salzbeschaffenheit beschreibenden Daten. (Hentschel, J. und Kleinitz, W.: "Aufbau der Salzgesteine des Salzstockes Etzel, abgeleitet aus Kernuntersuchungen und Loginterpretation" Kali und Steinsalz 307 (1976) I sowie Compendium der DGMK Haupttagung 75/76). Die Kernuntersuchungen werden im Labor mit Hilfe des sogenannten "Solsimulators" am gewonnenen Kernmaterial in dichtem Abstand durchgeführt.

Man erhält für jede Probe 1) die Auflösungsgeschwindigkeit des Salzgesteins, 2) dessen chem. Zusammensetzung, und 3) Anteil und Art unlöslicher Bestandteile sowie deren Dichte in situ und die Schüttdichte. Die Ermittlung letztgenannter Werte ist wichtig, weil während des Solvorganges Feststoffe aus dem Salzverband gelöst werden und unter Volumenzuwachs am Kavernenboden sedimentieren. Daraus ergibt sich eine Verringerung des Kavernennutzvolumens.

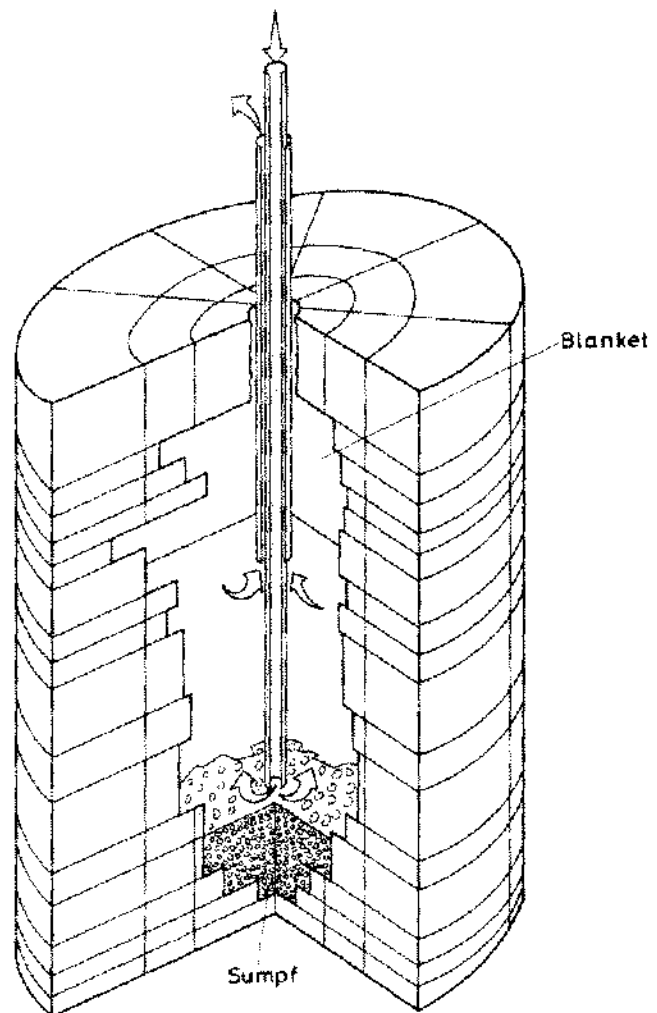
Aus der chemischen Zusammensetzung läßt sich der mineralogische Aufbau des Salzgesteins ermitteln, der die Auflösungsgeschwindigkeit wesentlich bestimmt.

Zu hohe Kosten lassen es nicht zu, den gesamten durchteuften Salzbereich zu kernen bzw. sämtliche Kerne im Solsimulator zu untersuchen. Geophysikalische Bohrlochmessungen, die durch Korrelation mit den Solsimulatorergebnissen geeicht werden, lassen jedoch eine Interpretation der Salzparameter über die gesamte Strecke zu. Liegen diese Daten vor, kann für die Ausgangsparameter unter Berücksichtigung von Stabilitäts- und Wirtschaftlichkeitskriterien 1) eine optimale Kavernenform, 2) ein optimales Solprogramm, und 3) damit konform gehend eine optimale Gestaltung der oberirdischen und unterirdischen Anlagen ermittelt werden.

Die komplizierten Systeme von Differentialgleichungen, die den Solprozeß beschreiben, lassen sich auf rationelle Weise nur mit digitalen Rechnern lösen. Dazu ist ein Rechenmodell erforderlich, das 1) die Auswirkung von Halokinese und Tektonik (geol. Parameter) auf die Hohlraumkonfiguration, 2) die Fließdaten, 3) die Strömungs- und Konzentrationsverteilung innerhalb der Kaverne, 4) Feststoffgehalt, und 5) Abhängigkeit der Solrohrabsetzteufen etc. naturgetreu beschreiben kann.

In Vergangenheit und Gegenwart wurden verschiedene Versuche unternommen, ein derartiges Modell zu erstellen (Pottier, M.M. and Estere, B.M.: "Simulation of Cavity Creation by Numerical Method", 4th Salt Symposium

Houston 1973. Saherian, A. and Patio, H.L.: "A Numerical Model for Development of Solution Mined Cavities", Symposium at Louisiana State University, 1976). Nach unserer Kenntnis ist bei all diesen Modellen nachteilig, daß 1) zwar die Solkonzentration als Funktion der Zeit, nicht aber als Funktion des Ortes innerhalb der Kaverne beschrieben wird und 2) ein Teil der Hohlraumbildung schon erfolgt sein muß, um mit diesen Ausgangsdaten in die Zukunft extrapolieren zu können. Bei der Erstellung eines Modells im Jahre 1973 waren wir davon ausgegangen, daß ein Simulationsmodell als Planungshilfsmittel nur dann sinnvoll ist, wenn das Modell in der Lage ist, für jede beliebige 1) Salzzusammensetzung, 2) Injektionsrate, 3) Strangabsetzteufe, und 4) und jedes Solverfahren, vom Zeitpunkt Null an 1) Kavernenkonfiguration, 2) Hohlraumvolumen und 3) Hohlraumzuwachs in Abhängigkeit von der Zeit zu berechnen.



Figur 1. Schema des Blocksystems.

MODELLAUFBAU

Für die Modellrealisierung nutzen wir die zu diesem Zeitpunkt bereits weit fortgeschrittene Technik der numerischen Simulation des Zweiphasenflusses in Kohlenwasserstofflagerstätten. Wie bei solchen Modellen üblich, werden innerhalb eines Blocksystems (Fig. 1) die Lösungsvorgänge bei der Kavernenherstellung durch ein System von Differenzenquotientengleichungen beschrieben. Näheres hierzu kann früheren Veröffentlichungen entnommen werden (Meister, Hieblinger, Kleinitz, v. Hantelmann, Nolen: "Numerical Simulation of the Solution Mining Process", SPE 4850, 1974, sowie Compendium der DGMK—Haupttagung 1974). Das von uns entwickelte Modell ist in der Lage, bei Eingabe beliebiger Solparameter in ein Blocksystem, wie 1) Salzzusammensetzung, 2) Feststoffgehalt des Salzgesteins, 3) Frischwasserinjektionsraten, 4) Absetzteufen der Solrohre, 5) Solververfahren—direkt oder indirekt, 6) Teufe des Blanketspiegels, und 7) Öleinlagerungsraten während des Solens, jeden beliebigen Betriebszustand nachzuvollziehen.

Dateneingabe. Das in Figur 1 dargestellte Blocksystem erlaubt bis zu 50 Unterteilungen in vertikaler Richtung, maximal 10 in horizontaler (radialer) Richtung und bis zu 4 Winkelschnitte. Insgesamt können bis zu 600 Blockelemente genutzt werden. Für jedes Blockelement wird definiert: 1) Anteil der löslichen Salzkomponenten (ein oder mehrere Salze), 2) Anteil der unlöslichen Salzkomponenten, und 3) zusätzliche Lösungsgeschwindigkeiten (um etwa das Einfallen der Schichten darzustellen). Darüber hinaus wird das Bohrloch mit Teufe, Durchmesser und Neigung eingegeben. Hiermit sind die Salzdaten festgelegt.

Die Eingabe der Soldaten erfolgt nach dem in Figur 2 dargestellten Schema. Zu einem bestimmten Zeitpunkt Null (Solbeginn) werden Blanketteufe, Frischwassereintritts- und Soleaustrittsstelle, Frischwasserkonzentration und Solrate definiert. Für jeden beliebigen, dem Solbeginn folgenden Zeitpunkt, wird nun die Hohlräumentwicklung berechnet. Solraten, Blanketteufe und Absetzteufen der Solrohre können zu jedem gewünschten Zeitpunkt verändert werden. Stillstände werden etwa mit der Solrate Null behandelt. Wie dem Beispiel in Figur 2 zu entnehmen ist, wird vom Solbeginn bis zum 130. Tag Frischwasser mit einer Rate von $6\,960\text{ m}^3/\text{Tag}$ im Vertikalblock 32 injiziert, die dabei verdrängte Sole tritt in Block 27 aus. Dies entspricht dem direkten Solververfahren. Daß hierbei nach einer gewissen Zeit die Frischwassereintrittsstelle innerhalb der am Boden sedimentierten unlöslichen Feststoffe liegt, wird vom Programm durch geeignete Gleichungssysteme berücksichtigt.

Ausgeschlossen ist, daß beim indirekten Solprozeß die Soleproduktionsstelle im Feststoffsumpf liegt. Die Berechnung wird dann unterbrochen. In dem aufgeführten Beispiel wird vom 130. bis zum 650. Tag indirekt gesolt. Die

Frischwassereintrittsstelle liegt während der einzelnen Zeitintervalle im Block 8, 15 bzw. 22 und damit oberhalb der Soleproduktionsstelle (Block 24). Vom Solende (650. Tag) bis zum Beginn der Rohölbefüllung (950. Tag) ist Stillstand (Solrate = 0). Dann wird Rohöl mit einer Rate von $7\,200\text{ m}^3/\text{Tag}$ bis zum 1015. Tag eingelagert, die anschließende Auslagerung mit der gleichen Ölrates ($-7\,200\text{ m}^3/\text{Tag}$) erfordert das Einpressen von $7\,500\text{ m}^3$ Frischwasser pro Tag, verursacht durch das zusätzliche Lösen von Salzgestein. Ein- und Auslagerung entsprechen einem Rohölumschlag.

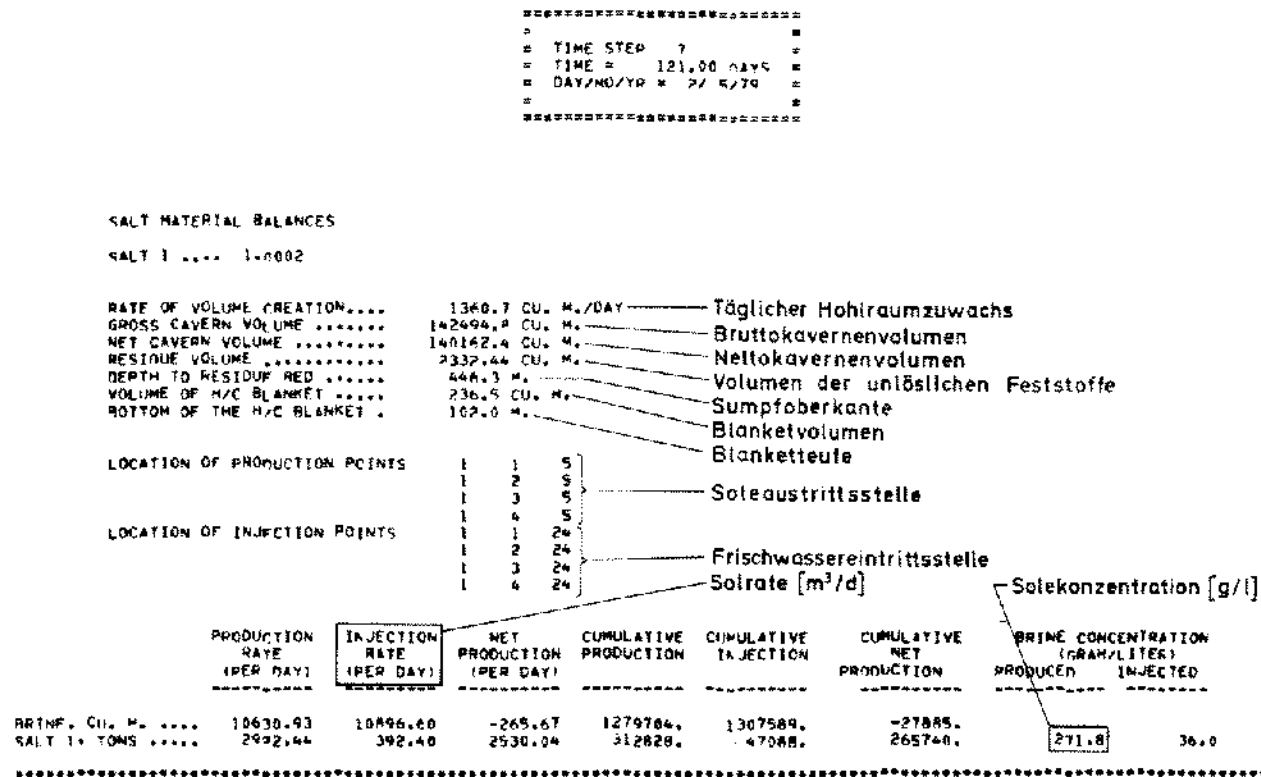
Ölbewegungen können generell auf vielfache Art gehandhabt werden. So erlaubt die Eingabe die Definition 1) einer bestimmten Spiegelteufe, 2) eines in Abhängigkeit von der Teufe zulässigen Durchmessers (oder Fläche), bei dessen Erreichen automatisch Rohöl nachgeschoben wird (Fig. 2), und 3) einer bestimmten Ölinjektions- bzw. Auslagerungsrate. All diese Parameter können während der einmaligen Berechnung eines Kavernenlebens (vom Solbeginn bis zum x-maligen Produktenumschlag) beliebig variiert bzw. verknüpft werden. Somit kann jeder in der Praxis vorkommende Betriebszustand dem Programm eingegeben werden.

Datenausgabe. Die Berechnung des Hohlraumwachstums erfolgt in Zeitintervallen. Die jeweilige Zeitschrittlänge kann von Bruchteilen eines Tages bis zu einigen zig-Tagen variieren. Für jeden gewünschten Zeitpunkt können alle Sol- und Hohlraumdaten ausgegeben werden. Figur 3 zeigt eine derartige Programmausgabe. Hierin erscheinen 1) der tägliche Hohlraumzuwachs, 2) Brutto- u. Nettokavernenvolumen, 3) Volumen der unlöslichen, am Boden sedimentierten Feststoffe, 4) Sumpfoberkante, 5) Blanketvolumen u. Blanketteufe, 6) Frischwasser- und Solerate, und 7) Solekonzentration. Für die gesamte Soldauer kann somit die Entwicklung der Kaverne genau verfolgt werden. Figur 4 zeigt dies am Beispiel der Solekonzentration für eine 3-stufig indirekt gesolte Kaverne.

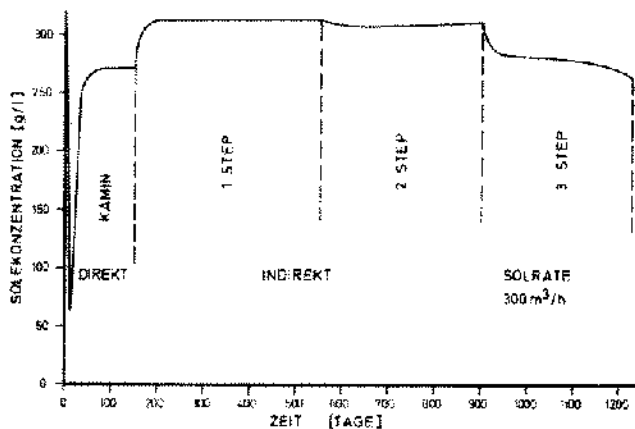
Zusätzlich kann zu jedem beliebigen Zeitpunkt der Massenstrom (Größe und Richtung) und die Solekonzentration an jedem Punkt in der Kaverne ausgedruckt werden. Die Form der Kaverne wird ebenfalls vom Rechner dargestellt. In Figur 5 sind die Kavernenform, der mit Blanket abgedeckte Kavernenbereich sowie der mit Feststoffen verfüllte untere Kavernenteil erkennbar. Werden die Konfigurationsbilder für verschiedene Zeitpunkte erstellt, kann das Wachsen der Kavernengestalt über die gesamte Soldauer verfolgt werden.

ERFAHRUNGEN

Die Arbeit mit dem neuen Simulationsmodell begann bereits in der letzten Phase der Programmentwicklung 1973. Daß dieses Modell in der Lage ist, jeden beliebigen Solprozeß zu beschreiben, wurde insbesondere bei der Be-



Figur 3. Beispiel für Programmausgabe zum 121. Tag seit Solbeginn.



Figur 4. Errechnete Solekonzentration über die Gesamtsolzeit.

rechnung der Konzentrationsverhältnisse innerhalb der Kaverne deutlich. Figur 6 zeigt diese für den direkten Solprozeß bei einer Gaskaverne. Hiermit eröffneten sich völlig neue Gesichtspunkte für die Kavernenplanung und Solprozeßsteuerung, insbesondere auch bei Anwendung des indirekten Solens (Fig. 7).

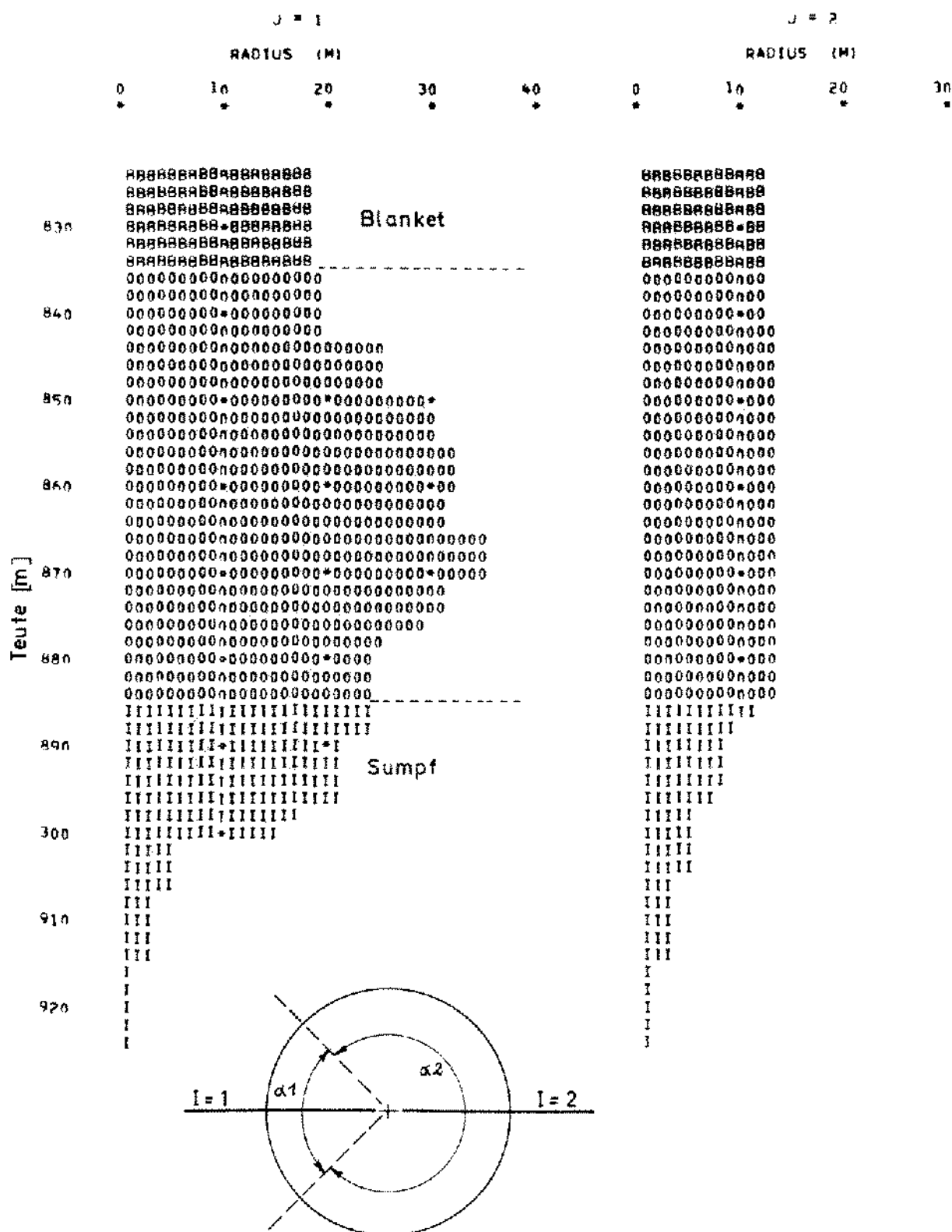
War bisher die Kavernenentwicklung gleichsam "schwarze Wissenschaft", bei der man auf vielfältige Mutmaßungen angewiesen war, so wurden hier plötzlich natürliche Vorgänge verständlich. Es zeigt sich deutlich,

daß das injizierte Frischwasser unmittelbar neben dem Injektionsstrang aufsteigt und erst mit zunehmendem Abstand von der Injektionsstelle Diffusionsreaktionen eingeht.

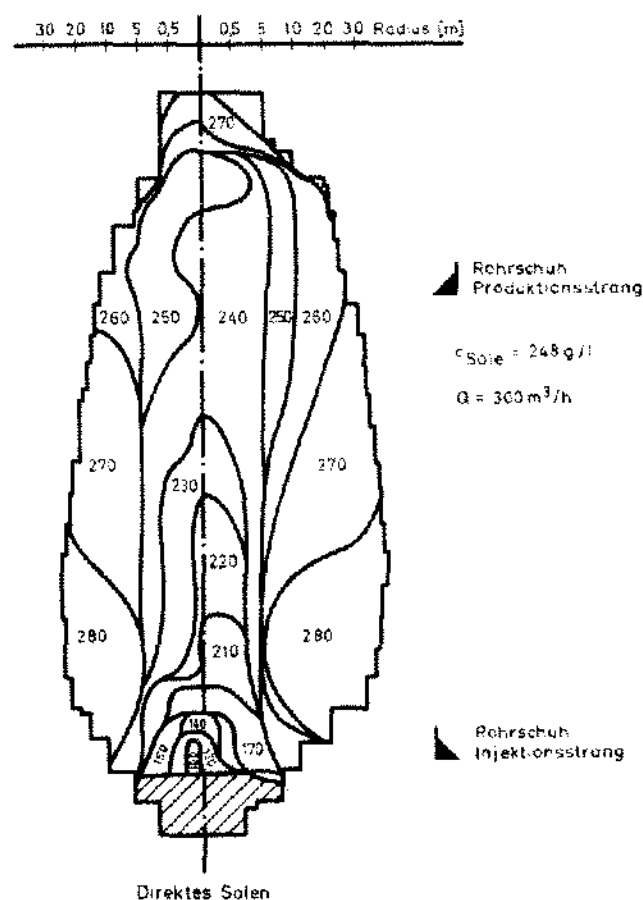
Seitdem wurde das Simulationsmodell bei vielen Kavernenprojekten eingesetzt. Das in Figur 8 dargestellte Beispiel zeigt die Vorausberechnung einer Kavernenentwicklung und die dazugehörige nachfolgende echometrische Vermessung. Der Bereich inhomogen Salzaufbaues im oberen Kavernenbereich war zum Zeitpunkt der Simulation nur aus Kernanalysen und Loginterpretation bekannt. Dennoch zeigte das praktische Vermessungsergebnis sehr gute Übereinstimmung mit der Simulationsrechnung.

Die Entwicklung von Solkonzepten für jede Kaverne vor Solbeginn ist mittlerweile üblich. Hierbei werden 1) die Solstrangabsetzteufen, 2) die Solstufen, 3) die Zeitpunkte echometrischer Vermessungen und des Umsetzens der Rohrstränge und 4) sowie die dabei entstehende Kavernenform ermittelt. Figur 9 zeigt ein derartiges Solkonzept für eine Gaskaverne mit direkt gesolter Sumpfkaverne und anschließendem indirekten Solen. Die Übereinstimmung zwischen Planung und Praxis ist hierbei nahezu perfekt.

Wie exakt das Modell die Wirklichkeit beschrieben kann, ist der Figur 10 zu entnehmen. Bei dem hier angeführten Beispiel war es darum gegangen, die günstigste Absetzteufe des Frischwasserinjektionsstranges für den über einer Sumpfkaverne anzulegenden Kamin zu finden. Die



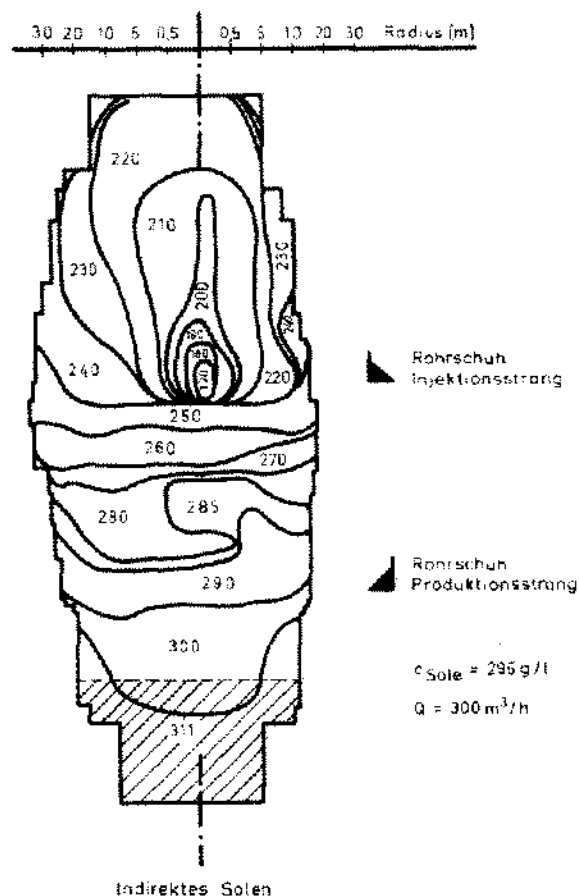
Figur 5. Computerbild der Kavernenkonfiguration.



Figur 6. Konzentrationsverteilung bei direktem Solprozeß.

Rohrstrangpositionierung ist in einem derartigen Fall normalerweise kritisch. Wird das Frischwasser zu tief in der Sumpfkaverne injiziert, führt dies zu möglicherweise unzulässigen Kavernendurchmessern. Zu hohes Absetzen kann Verlust der Sumpfkaverne, Verengungen und technische Schwierigkeiten in sich bergen. Die Vorausberechnung ergab als günstigste Strangabsetzteufe die Positionierung in einem Meter Abstand über dem Dach der Sumpfkavernen. Die in diesem Bereich entstehenden "Ohren" waren zwar vom Modell vorausgesagt worden, ob sie allerdings in der Praxis eintreffen würden, wurde allgemein mit Skepsis betrachtet. Die anschließende echometrische Vermessung bewies nicht nur die Richtigkeit der Vorausberechnung, sondern auch die Genauigkeit des Modells.

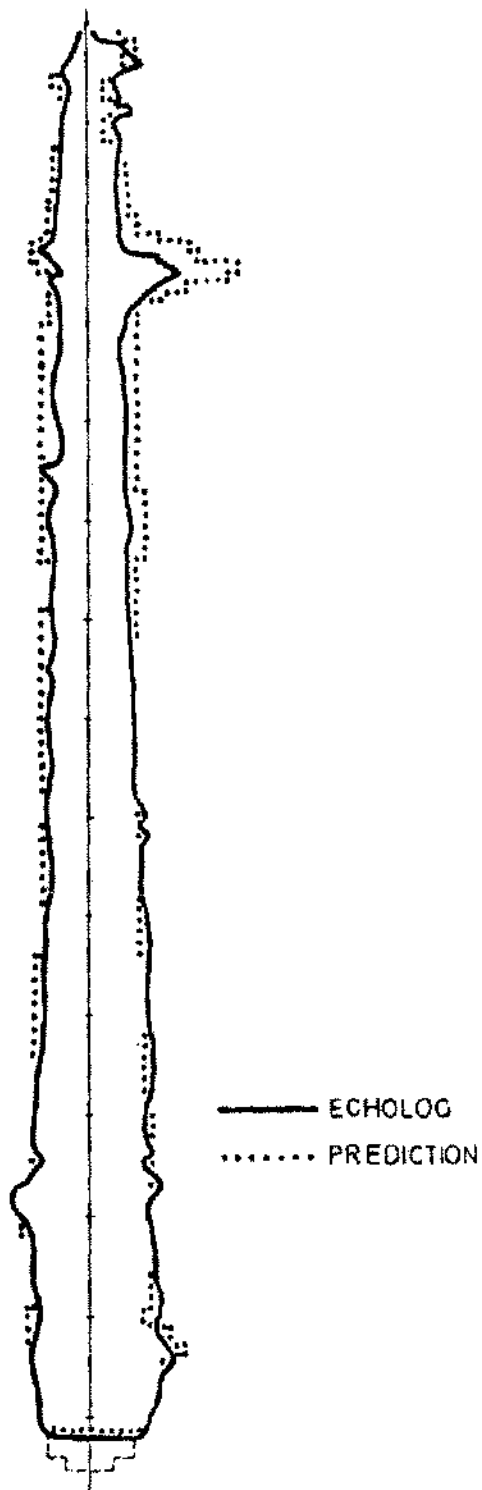
Wie Figur 11 zeigt, kann das Modell komplizierte geologische Bedingungen exakt beschreiben. Naturgemäß setzen derartige Berechnungen jedoch die Definition von Salzinhomogenitäten im bohrlochfernen Bereich voraus. Bisher gibt es keine Methode, die diese hinreichend genau feststellen könnten. Es ist daher verständlich, daß die Ermittlung einer inhomogenen Kavernenform nur so gut sein kann, wie es die geologischen Eingabedaten sind. Bei dem in Figur 11 dargestellten praktischen Vermessungsergebnis



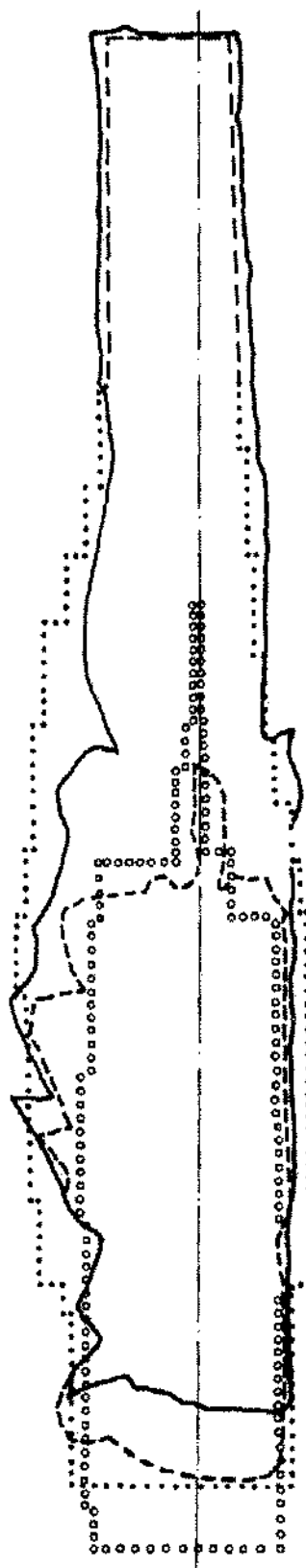
Figur 7. Konzentrationsverteilung bei indirektem Solen.

war die geologische Situation im oberen Kavernenbereich richtig "vorausgeahnt" worden, dementsprechend gut war daher die Voraussage. Da im Salzgebirge Überraschungen hinsichtlich der Geologie jedoch nicht auszuschließen sind, hätte das Ergebnis auch völlig anders lauten können. Dies war bei der Vorausberechnung des darunterliegenden Kavernenbereichs erfolgt. Aus Kernen und Logs waren zwar die Zonen der carnallitführenden Schichten bekannt, deren Einfallen und Faltung im Bohrlochsfernen konnte jedoch nur aus orientierten Kernen extrapoliert werden. Diese Mutmaßungen wurden dem Modell als Salzdaten eingegeben, eine Prediction wurde damit getätigt. Da sich die geologischen Annahmen nicht bestätigten, konnte natürlich auch die Vorausberechnung nicht mit der tatsächlichen Kavernenform übereinstimmen.

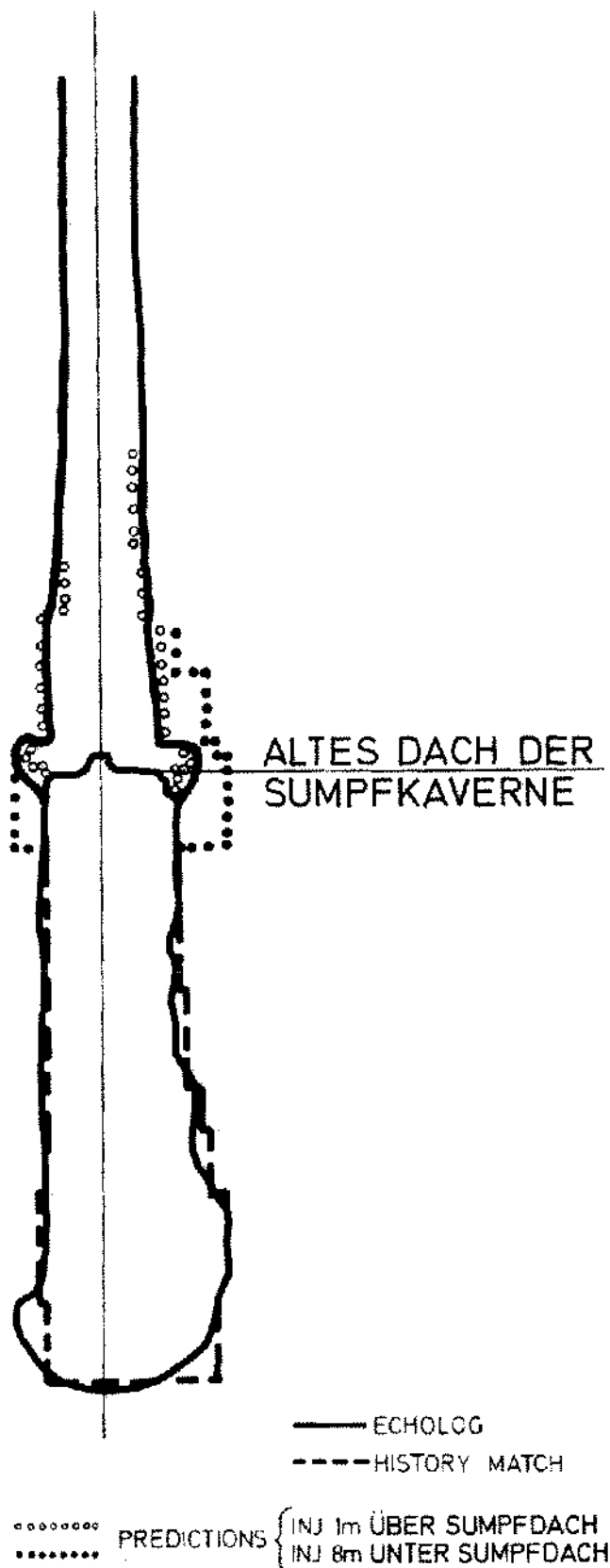
Die Solvergangenheit wurde deshalb nach Vorliegen der 1. echometrischen Vermessungen mit Variation der Salzeigenschaften nachgerechnet, bis die Übereinstimmung der Konfiguration auch den tatsächlichen Carnallitverlauf ergab. Die Prediction im oberen Kavernenbereich und deren gute Übereinstimmung mit der Praxis waren demnach ein Resultat der aus der Solvergangenheit gewonnenen Erfahrungen und der darauf aufbauenden "Vorausahnung". Wie



Figur 8. Vorausberechnete und gemessene Form einer Ölkaverne.



Figur 9. Vorausberechnete und gemessene Form einer Gaskaverne.



Figur 10. Beispiel für Auflösungsvermögen des Modells.

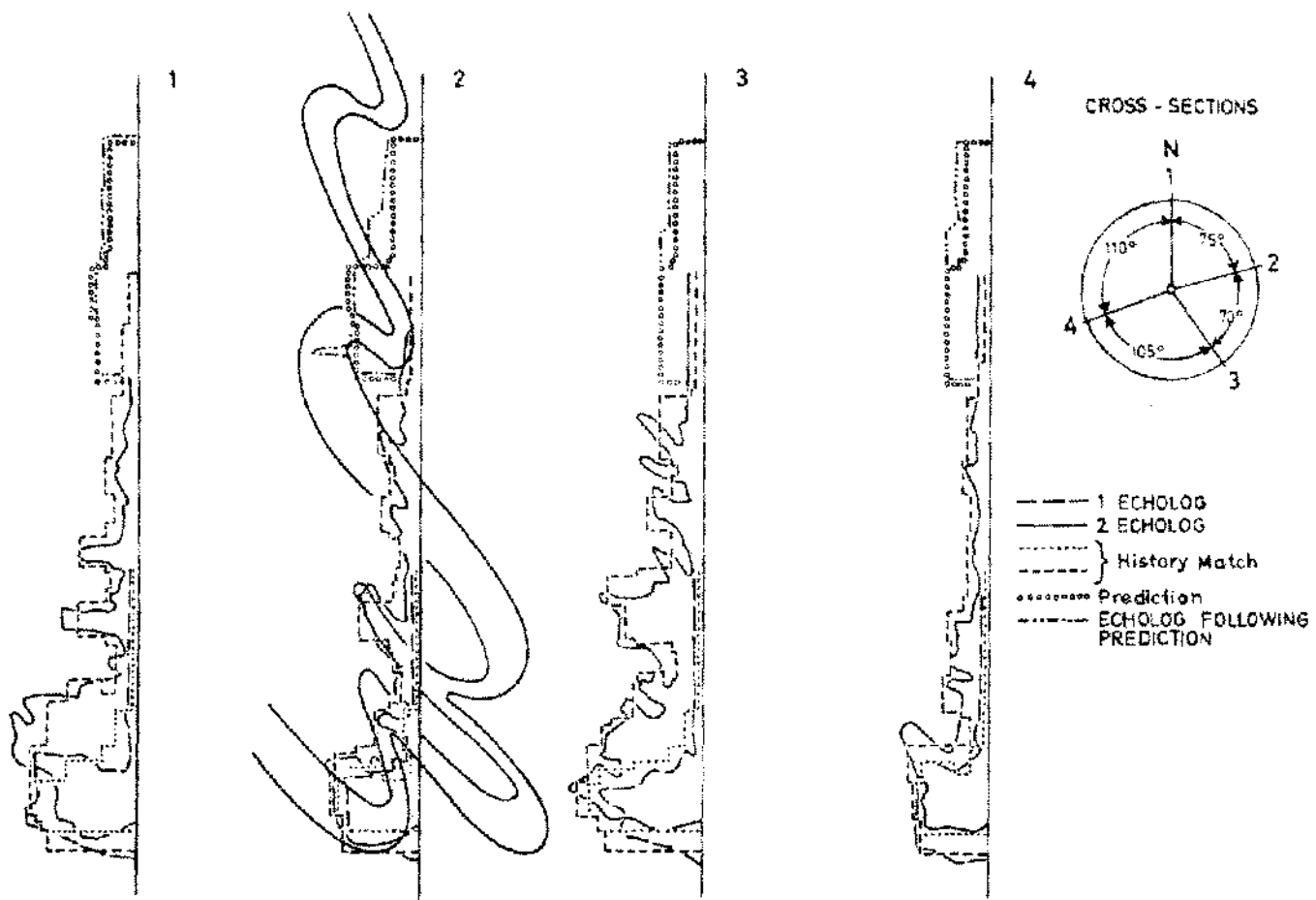
dieses Beispiel zeigt, ist die Anwendbarkeit des Simulationsmodells bei komplizierten geologischen Verhältnissen wegen der ungenauen Eingabedaten begrenzt, die Ergebnisse können aber trotzdem wertvolle Entscheidungshilfen geben.

Beiden Beispielen (Fig. 10 und Fig. 11) kann entnommen werden, daß aufbauend auf den Ergebnissen teilgeloster Kavernen Vorausberechnungen über das weitere Solverhalten durchgeführt werden können. Dies geschieht durch Nachrechnung der Solvergangenheit (History Match), wobei die Felddaten wie Solraten, Frischwasserkonzentration und Rohrteufenveränderungen eingegeben werden und durch Variation der Salzparameter, falls dies erforderlich ist, die Konfiguration möglichst genau nachvollzogen wird. Liegt volumetrische und konfigurielle Übereinstimmung vor, kann die Solzukunft simuliert werden. Diese Möglichkeit der Simulation wird genutzt, wenn geologische oder technische Gründe zu einer Änderung des ursprünglichen Solkonzeptes zwingen. Über die Anzahl der für eine Nachrechnung der Solvergangenheit erforderlichen History-Runs hatten wir in den Anfängen der Solsimulation berichtet, daß bis zu 20 Computerruns durchgeführt wurden, um konfigurielle Übereinstimmung zu erzielen. Man war damals davon ausgegangen, daß selbst die kleinsten Finger im Kavernenbild von der Simulation erfaßt werden müssen. Mit der bis heute gewonnenen Erfahrung ist die Anzahl der für ein genaues History Match erforderlichen Computerberechnungen auf ein bis maximal drei Runs reduziert worden. Damit können selbst komplizierte geologische Bedingungen simuliert werden.

Änderungen eines ursprünglichen Solkonzeptes in der eben beschriebenen Weise werden allerdings selten durchgeführt. Normalerweise wird an einem einmal aufgestellten Konzept, das hinsichtlich gebirgsmechanischen und technischen Gegebenheiten optimiert wurde, festgehalten. Viel größere Bedeutung kommt daher der Simulation bei Vorplanung und Planung von Kavernenprojekten zu.

Mit dem Wissen, ein die natürlichen Vorgänge exakt beschreibendes Modell zu besitzen, konnte man sich neuen Soltechnologien zuwenden, konnte man die verschiedensten Solvarianten auf dem Computer durchspielen, um dann die technische und wirtschaftlich optimale Lösung in der Praxis anzuwenden.

Eine der ersten Untersuchungen auf diesem Gebiet galt dem Umschlagverhalten von Ölkavernen bei der Ölverdrängung durch Frischwasser. Nach den gebirgsmechanischen Stabilitätsbedingungen ergeben sich für Ölkavernen annähernd zylindrische Grenzen. Ist die Kaverne für mehrmaligen Produktumschlag vorgesehen, muß die Kavernenkonfiguration auch nach dem letzten Umschlag innerhalb der gebirgsmechanisch zulässigen Grenzen liegen. Berechnungen mit dem Simulationsmodell ergaben, daß vor allem im unteren Kavernendrittel während der einzelnen Umschlagsphasen die größte Durchmesserzunahme auftritt



Figur 11. History Match und Prediction bei inhomogenem Salzaufbau.

(Fig. 12). Die Kaverne muß daher nach Ende der Solphase eine nach unten verjüngende Form, die sogenannte Blumentopfform, erhalten (Fig. 13). Die Ergebnisse echometrischer Vermessungen nach erfolgtem Rohölumschlag bestätigten die Rechenergebnisse (Fig. 14).

Um die für ein günstiges Umschlagverhalten benötigte Blumentopfform zu erreichen, wurden vielfältige Berechnungen durchgeführt. Es zeigte sich, daß sowohl im direkten als auch im indirekten Solverfahren diese Form erzielt werden kann. Dem indirekten Solen war jedoch aufgrund wesentlicher Vorteile der Vorzug zu geben.

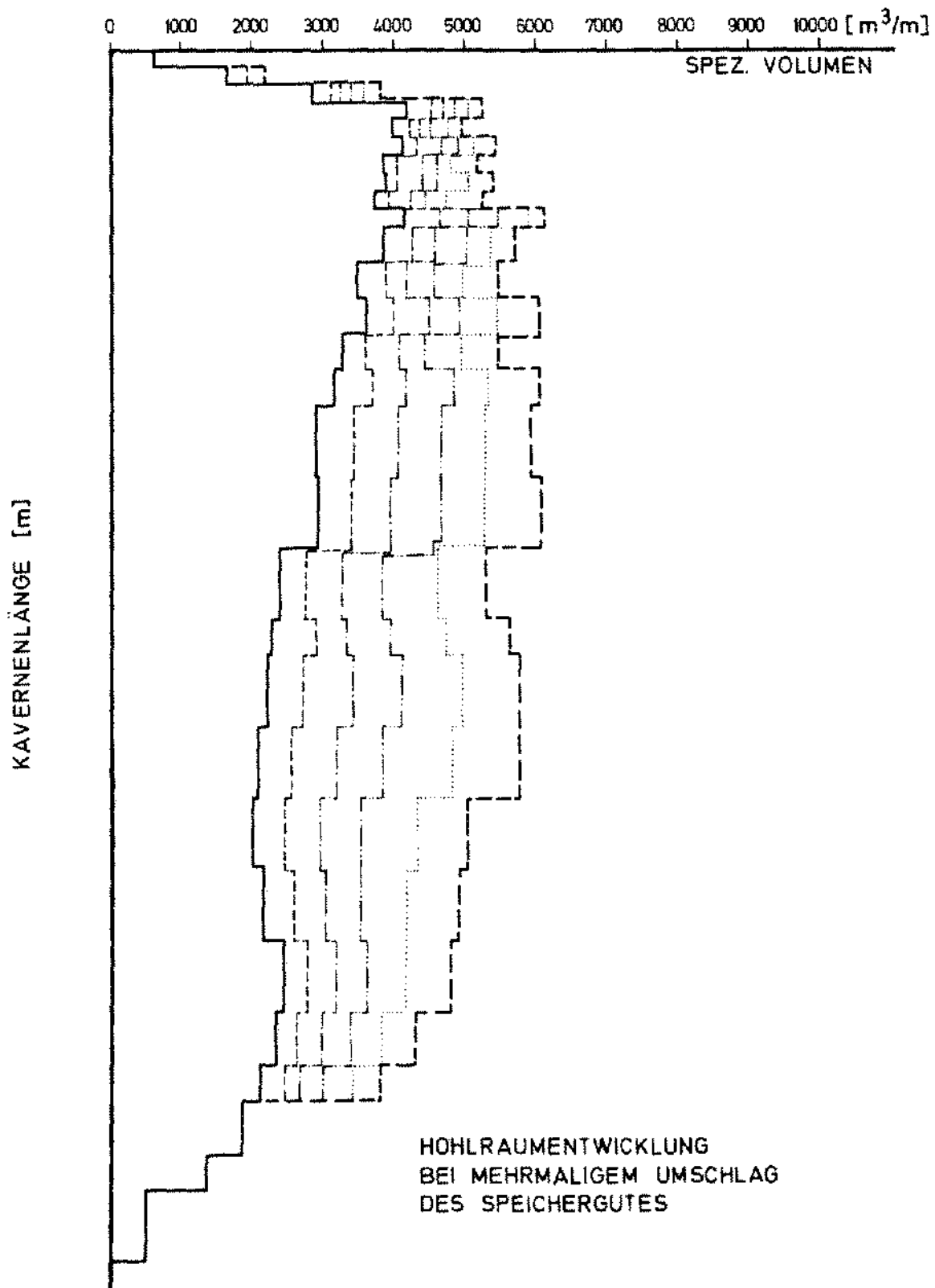
Dieses Verfahren, bei dem Frischwasser im oberen Kavernenbereich eingepumpt und die Sole im Kavernentiefsten abgezogen wird, war zwar von jeher bekannt, konnte jedoch wegen unkontrollierbarer Durchmesserzunahme oberhalb der Frischwasserinjektionsstelle kaum angewendet werden.

Erst die Anwendung unseres Rechenmodells für ein derartiges Solverfahren machte es möglich, das Verhalten der Hohlraumentwicklung beim indirekten Solprozeß genau vorzuberechnen. Da für jede Kavernenform, ob für kurze Gaskavernen oder lange Ölkaverne, zu jedem belie-

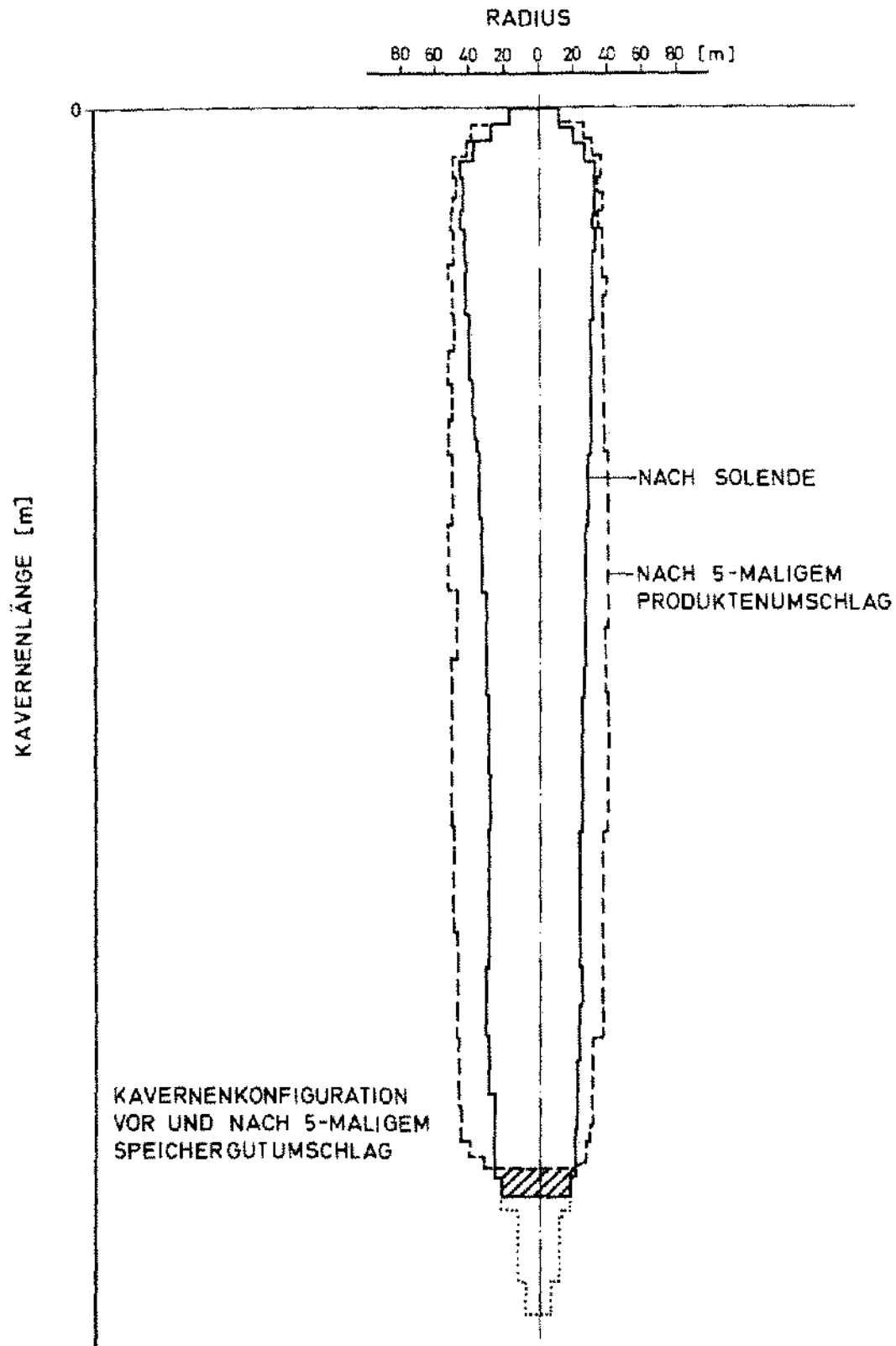
bigen Zeitpunkt die Kavernenform bestimmt werden kann, war die Anwendung dieses Solverfahrens großtechnisch möglich und brachte die erwarteten Einsparungen von 10–20% der Solzeit, da Sättigung der Sole erreicht werden konnte. Dies bedeutet Einsparungen an Betriebskosten mit nahezu gleichem Prozentsatz. Es ist daher verständlich, daß bei all unseren Kavernenprojekten dieses Verfahren zum Einsatz kommt.

Neben der vorher erwähnten Solzeiteinsparung von bis zu 20% kommt dem indirekten Solen noch ein weiterer wesentlicher Vorteil zu, nämlich die Möglichkeit, bereits frühzeitig noch während des Solens Produkte zu speichern. Hierbei wird die Tatsache ausgenutzt, daß oberhalb der Frischwasserinjektionsstelle beim indirekten Solen der Großteil des Hohlraums geschaffen wird.

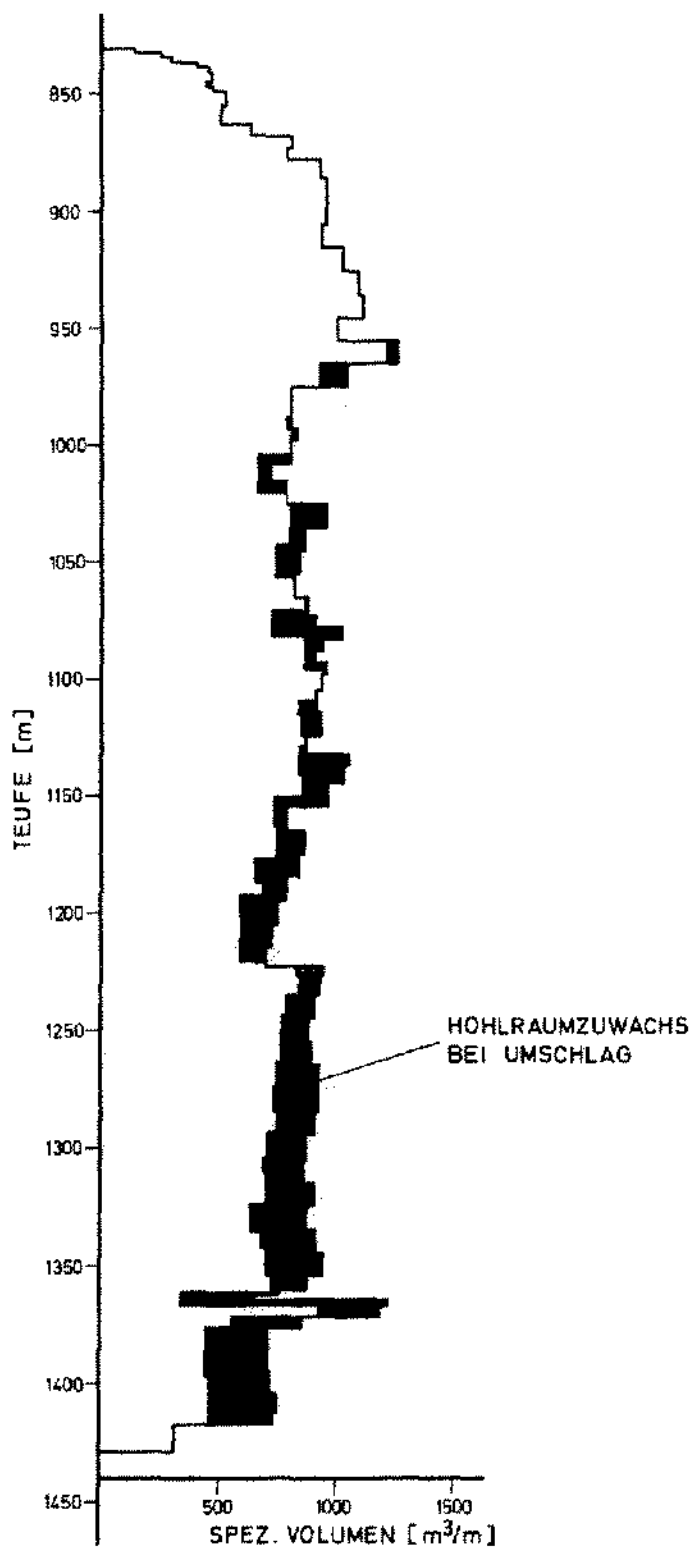
Solstrangabsetzteufen und Solzeiten werden dabei so optimiert, daß mit minimalem technischen Aufwand und minimalen Kosten noch während des Solens Produkte möglichst frühzeitig in der Kaverne gespeichert werden können. Figur 15 zeigt ein derartiges Solkonzept, das bei einem Großprojekt angewendet wurde. Hierbei wird im obersten



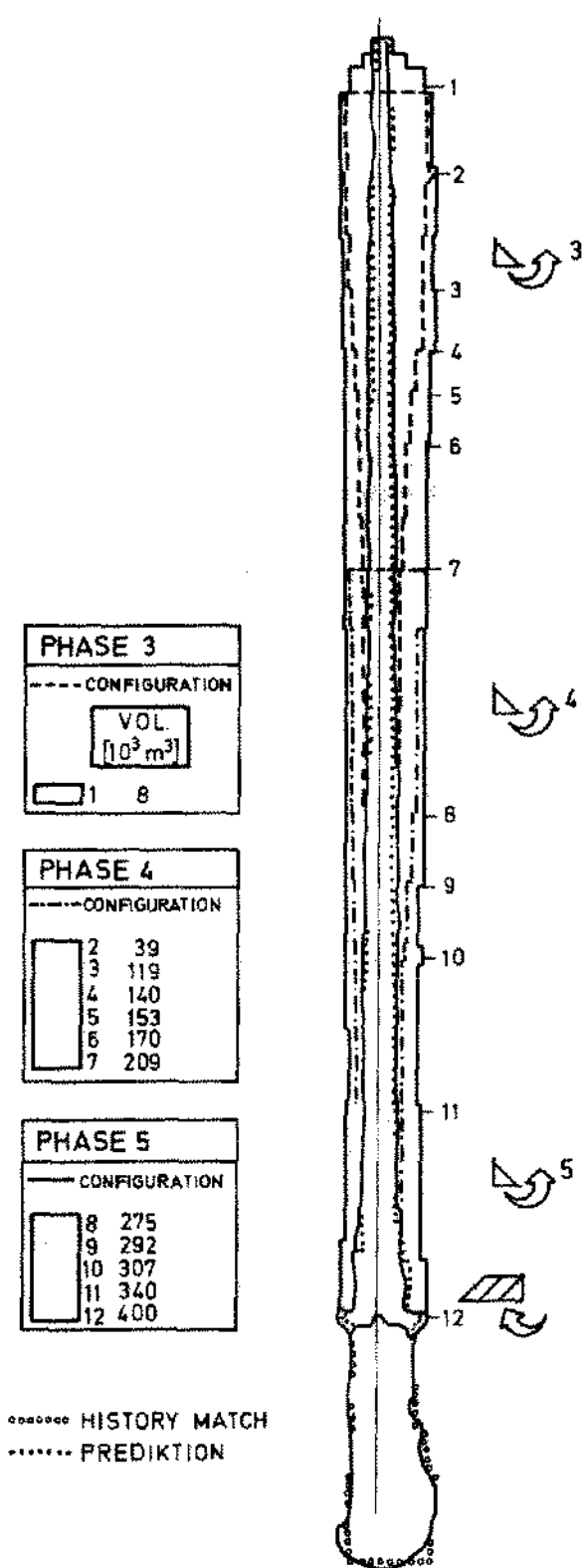
Figur 12. Hohlraumentwicklung bei mehrmaligem Umschlag des Speichergutes-spez. Volumendarstellung.



Figur 13. Computerbild einer Kaverne vor und nach 5-maligem Speichergutumschlag.



Figur 14. Gemessene Hohlraumentwicklung bei Speichergutumschlag-spez. Volumendarstellung.



Figur 15. Solkonzept für die Herstellung einer Ölkaverne.

Kavernenbereich (Fig. 16) nach Fertigstellung des Kamins mit dem indirekten Solen begonnen, gleichzeitig wird in gewissen Intervallen bereits Rohöl eingepumpt. Dies führt zur Ausbildung einer gebirgsmechanisch günstigen Dachform. Hat dieser indirekt gesolte Bereich den gewünschten Durchmesser erreicht, wird er mit Rohöl abgedeckt. In mehreren Solstufen wird im darunterliegenden Kavernenbereich der Hohlraum ebenfalls "indirekt" entwickelt, wobei wiederum Öl nachgeschoben wird. Dies führt dazu, daß 1) bereits ab Hälfte der Kavernenentwicklung größere Rohölmengen eingelagert werden können, und 2) eine gebirgsmechanisch günstige Form jederzeit erreicht werden kann.

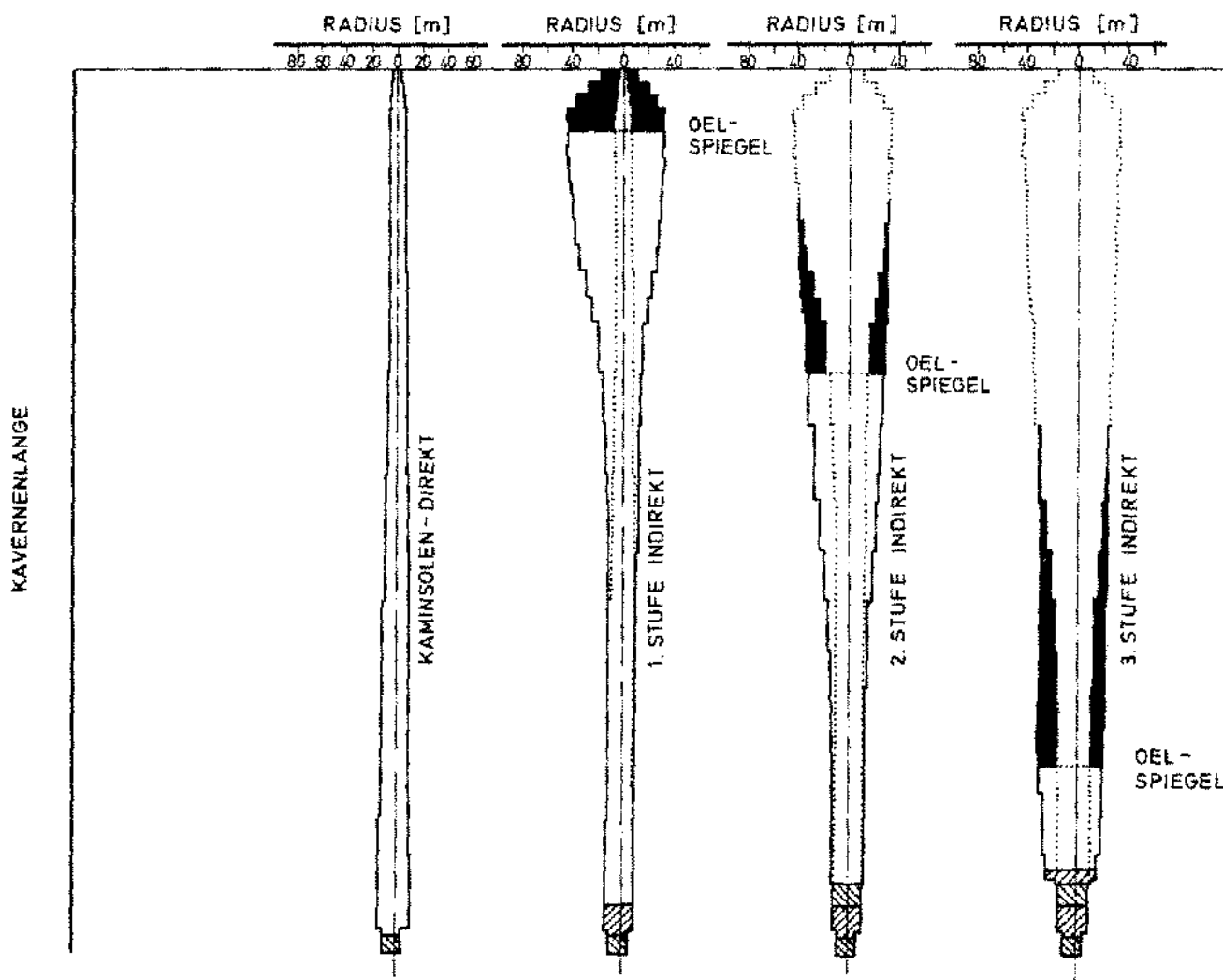
Diese Möglichkeit der frühzeitigen Speicherung läßt eine Einkaufspraxis des Betreibers zu, bei der er günstige Marktsituationen bei Produkt und Fracht ausnutzen kann. Voraussetzung ist allerdings, daß Hohlraumgestalt und einpumpbare Rohölmengen (dies können auch andere flüssige

Kohlenwasserstoffprodukte sein) zu jedem Zeitpunkt bekannt sind.

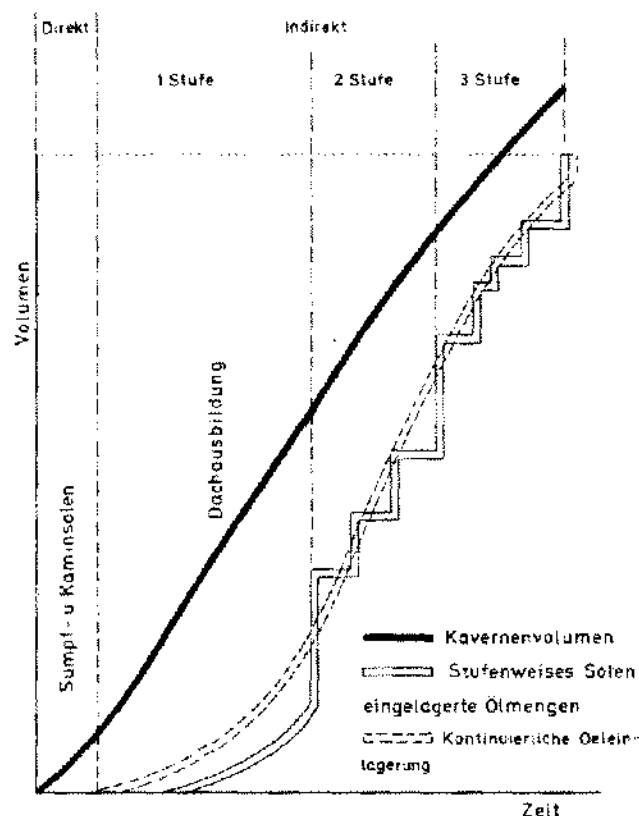
Figur 17 zeigt eine graphische Darstellung des in zeitlicher Abfolge zunehmenden Hohlraumvolumens und die bei einem bestimmten Kavernenvolumen einlagerbaren bzw. zur Formsteuerung erforderlichen Rohölmengen.

Zur Verwirklichung eines derartigen Konzeptes müssen 1) den gebirgsmechanisch günstigsten Formen, 2) dem geringsten technischen Aufwand, und 3) Öleinkauf und Öleinspeicherung optimal Rechnung getragen werden. Planung und Kenntnis über den jeweiligen Zustand der Kaverne können nur mit Hilfe des Simulationsmodells erreicht werden.

Für das erwähnte Großprojekt mit insgesamt 33 Kavernen wurde daher bereits im Planungsstadium für jede Kaverne ein individuelles Solkonzept erarbeitet. Figur 18 zeigt den Vergleich zwischen ursprünglich geplanter und tatsächlich erreichter Kavernenform. Die Übereinstimmung



Figur 16. Solen mit gleichzeitiger Öleinlagerung-Herstellungsphasen.



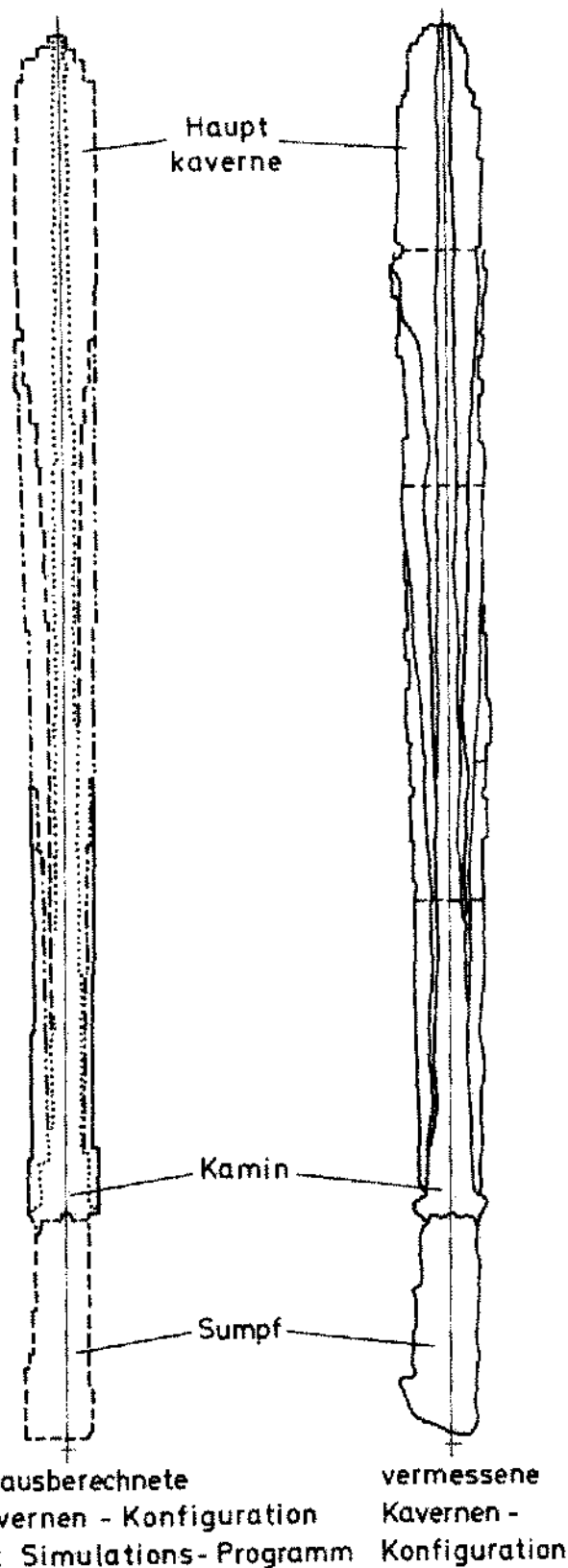
Figur 17. Volumenentwicklung über die Solzeit.

ist nahezu vollständig. Daß hierbei auch das Rohölnachpumpen während des laufenden Solbetriebes genau nach Plan verlief, wird aus Figur 19 ersichtlich.

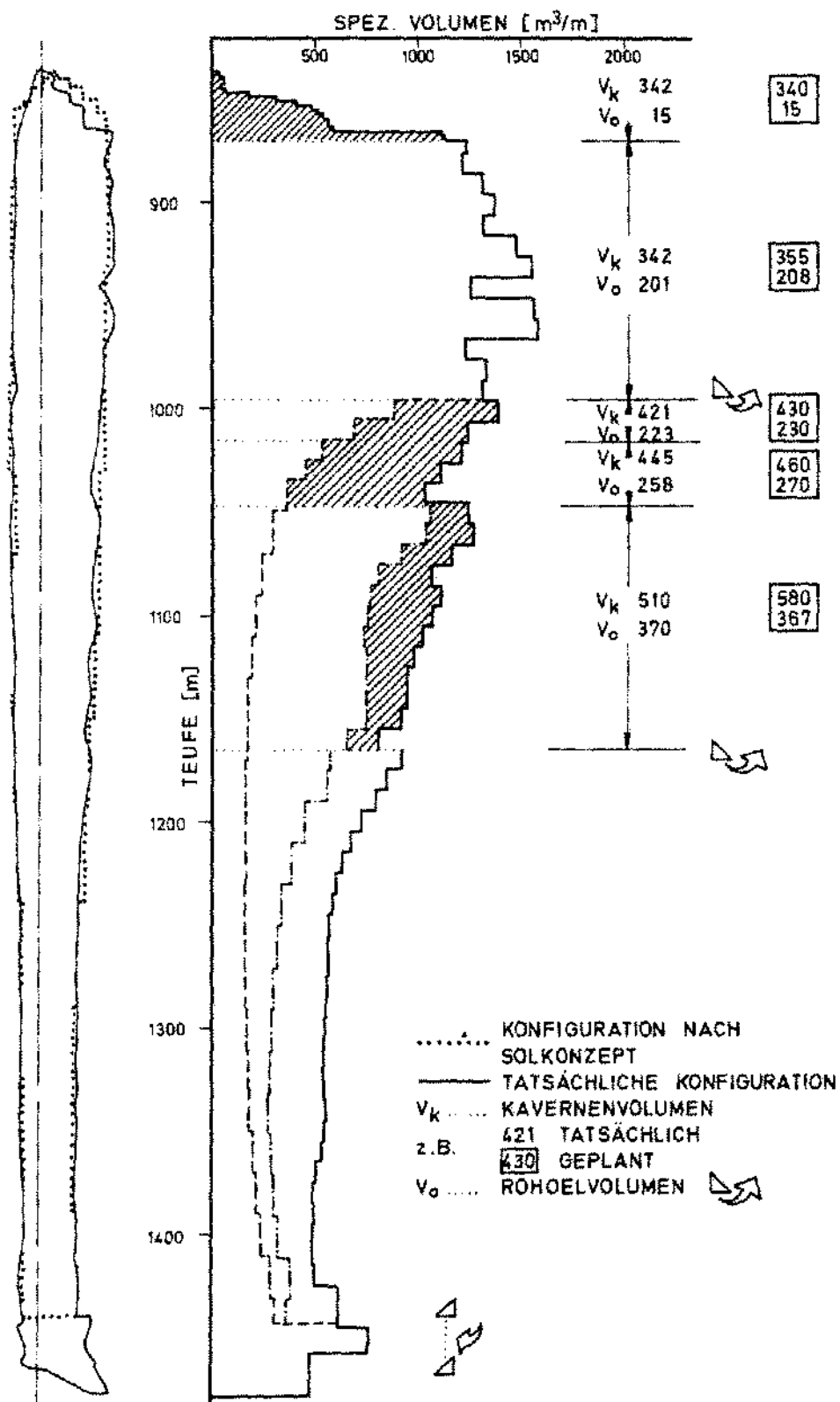
Das für eine Kaverne desselben Projektes errechnete Solkonzept, das aufgrund vermuteter Carnalliteinschlaltungen im Salz eine andere Formgebung verlangte, entsprach ebenfalls der Realität (Fig. 20). Zwar wurden die durch die Salzinhomogenität verursachten Unregelmäßigkeiten in der Kavernenform (im Bild unteres Kavernendrittel) von der Rechnung nicht erfaßt, da ohne Kenntnis über deren Lage keine Eingabemöglichkeit im Programm bestand, dennoch blieb die Kaverne innerhalb der vorgegebenen Grenzkurve, so daß einem mehrmaligen Produktumschlag nichts im Wege steht.

Natürlich wird es während eines mehrjährigen Betriebes auch erforderlich, dieses vorgegebene Konzept in einigen Fällen zu ändern, sei es, daß die Öleinkaufspolitik geändert wird oder daß technische und geologische Umstände dazu zwingen. Da es das Simulationsmodell ermöglicht, über ein History Match die Solvergangenheit nachzuvollziehen und für die Zukunft ein geändertes Konzept vorzuberechnen, kann der Solprozeß in den jeweiligen Kavernen wiederum optimal den gegebenen Umständen angepaßt werden.

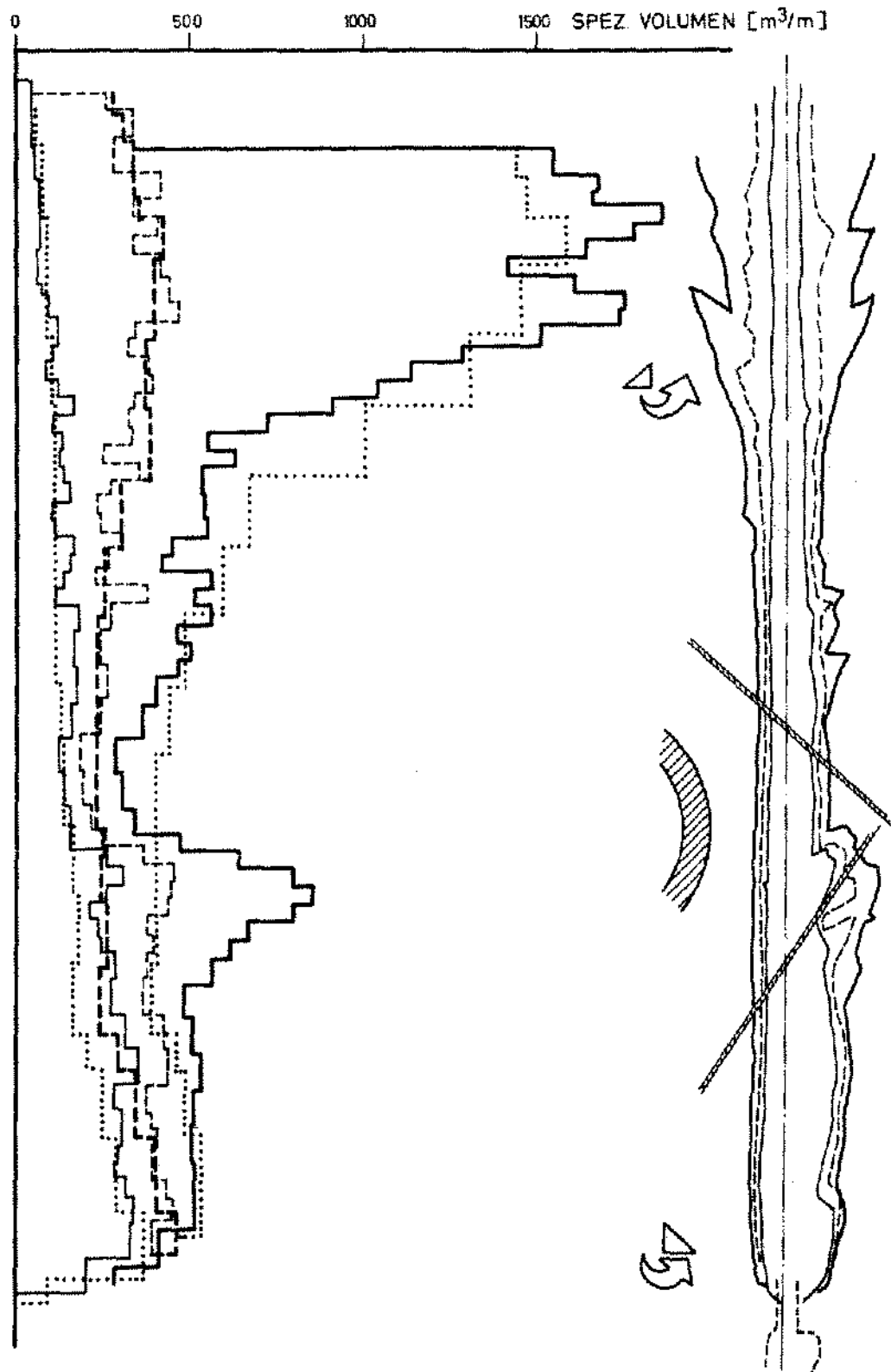
Bei einem Projekt vorgenannter Größe mit einer Vielzahl von gleichzeitig gesolten Kavernen und den für jede



Figur 18. Vergleich der geplanten mit der tatsächlichen Kavernenkonfiguration.



Figur 19. Vergleich der geplanten mit der tatsächlichen Kavernenkonfiguration.

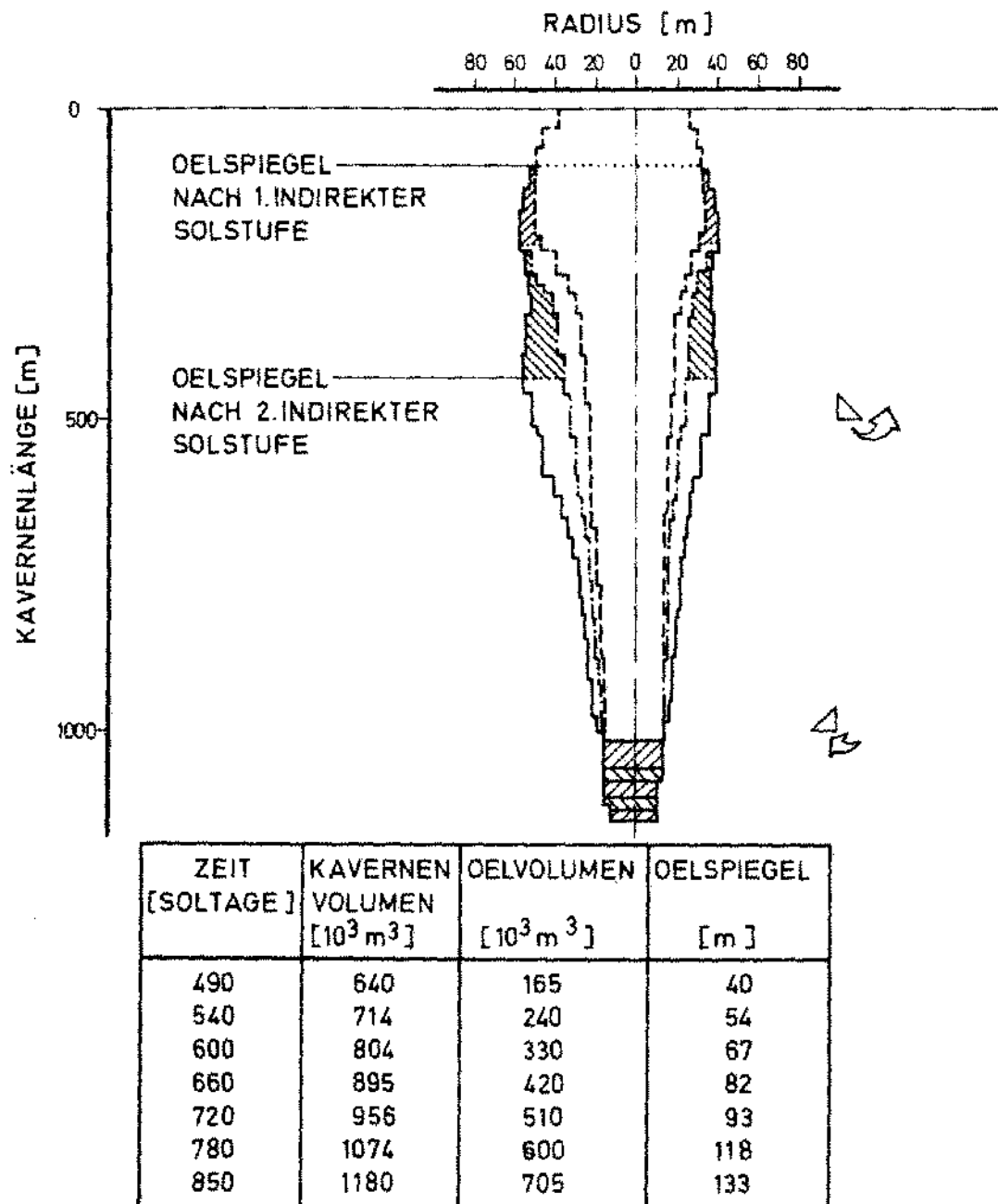


Figur 20. Vergleich der geplanten mit der tatsächlichen Kavernenkonfiguration.

Kaverne individuell einzupumpenden Rohölmengen ist eine genaue Einlagerungsplanung, die Tankerankünfte, Rohölbedarf etc. umschließt, erforderlich. Dies zeigt deutlich, daß ein derartiges Verfahren ohne die aus dem Modell gewonnene Kenntnis über den jeweiligen Kavernenzustand nicht durchführbar wäre.

MÖGLICHKEITEN DER PROGRAMMANWENDUNG

Die mit dem Modell berechenbaren Solfälle erlauben auch noch andere Anwendungsmöglichkeiten, als sie bisher beschrieben wurden. Figur 21 zeigt als Beispiel ein Pla-



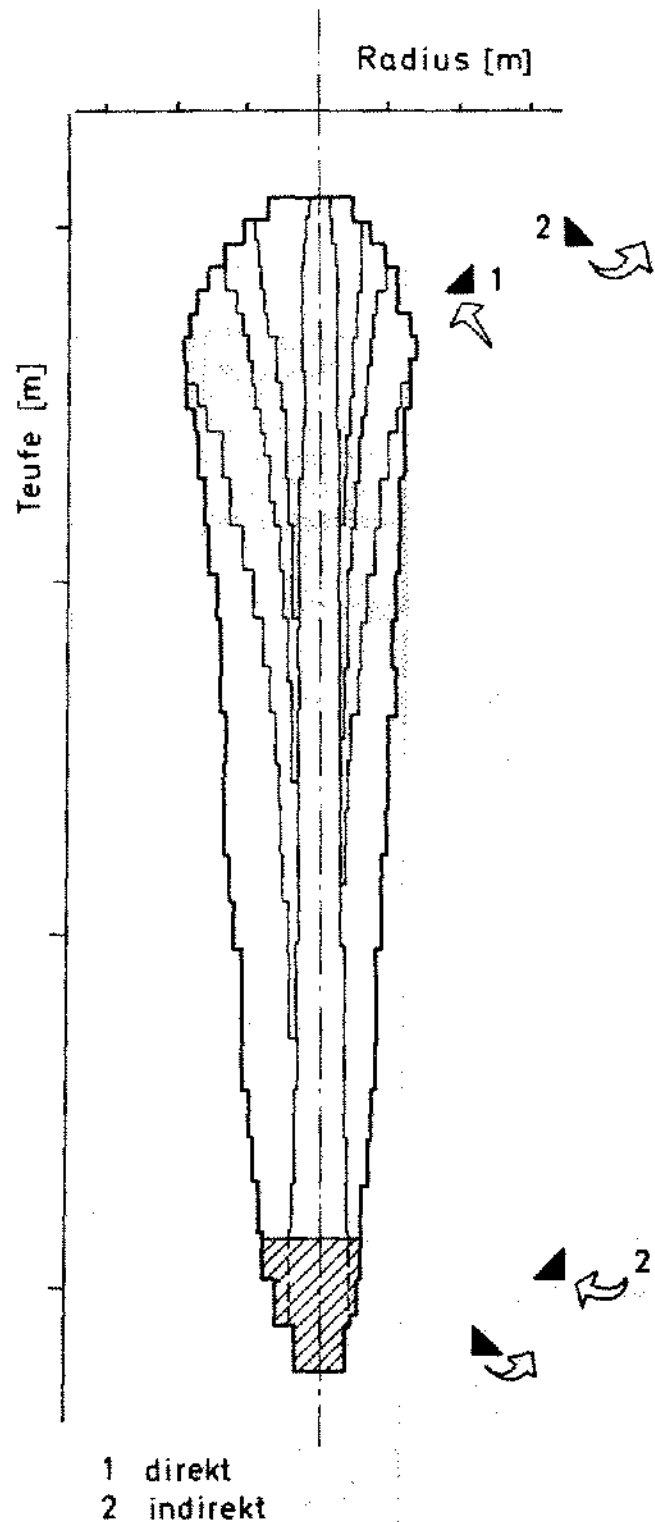
Figur 21. Konzept für indirektes Solen mit kontinuierlicher Rohöleinlagerung.

nungskonzept für das Solen mit kontinuierlicher Öleinlagerung. Die sich bei diesem Verfahren entwickelnde Kavernenform ist wesentlich davon abhängig, wann mit der kontinuierlichen Öleinlagerung begonnen wird und welche Öleinpumprate gewählt wird. Ist z.B. der Einlagerungsbeginn sehr spät und die Nachpumprate gering, wird die Kaverne im oberen Bereich sehr groß werden. Im umgekehrten Fall würden, sieht man von der Vielzahl der Variationsmöglichkeiten ab, die größten Durchmesser im unteren Kavernenbereich entstehen.

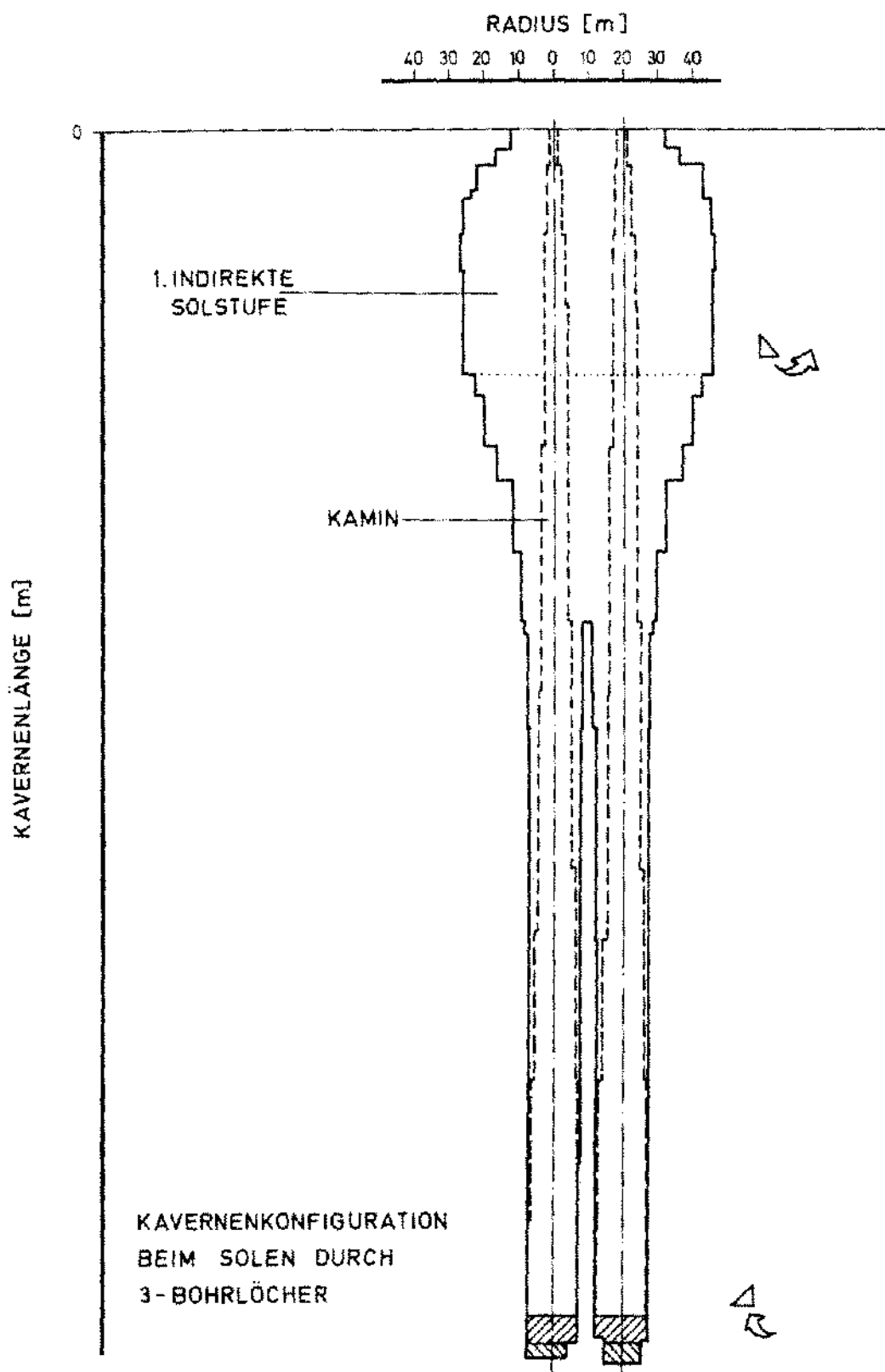
Die Möglichkeit, jeden beliebigen Solprozeß rechnerisch darstellen zu können, läßt auch—zumindest theoretisch vorstellbar—das Solen durch Öl zu. Figur 22 zeigt ein derartiges Verfahren, bei dem Frischwasser immer am Kavernentop in das Blanket bzw. eingelagerte Rohöl injiziert wird. Das Frischwasser fällt durch das Rohöl und löst maximal am Kontakt Rohöl—Sole. Durch gleichzeitiges Nachpumpen von Rohöl wird die Kavernenkonfiguration gesteuert. Auf diese Weise kann frühzeitig eingelagert werden. Dieses Verfahren wurde allerdings bisher noch nicht in der Praxis angewendet. Es ist auch noch zu klären, inwieweit Emulsionsbildung dieses Verfahren zuläßt.

Ein neues Verfahren, das demnächst in großem Stil zur Anwendung kommen wird, wurde ebenfalls auf dem Rechner geplant. Es beinhaltet das Solen von mehreren Bohrlöchern aus, wobei die Einzelkavernen nach einer gewissen Zeit zusammenwachsen. Dieses Verfahren erlaubt sehr hohe Solraten ohne die sonst üblichen geringen Konzentrationen in der Anfangsphase des Solens (Fig. 23).

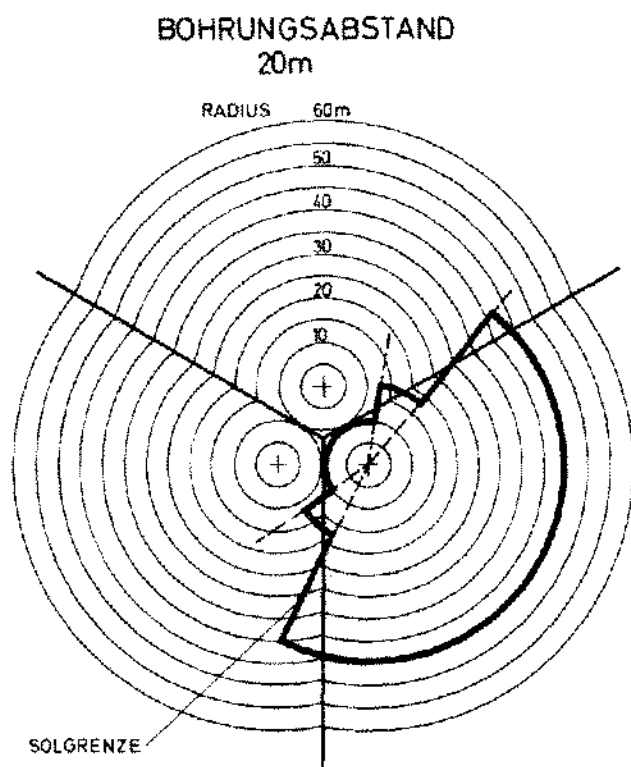
Um dieses Verfahren simulieren zu können, wurden gewisse Vereinfachungen getroffen, da in einem radialen Modell das Solen von mehreren Quellen aus eine drastische Erhöhung der Blockanzahl, und damit konform gehend, der Rechenzeit bedeutet hätte. Das in Figur 24 dargestellte Schema zeigt die horizontale Blockeinteilung, die z.B. für das Solen durch 3 Bohrlöcher benötigt wird. Je nach Anzahl der Bohrungen werden die Schnittgrenzen definiert. Gerechnet wird hierbei nur ein Drittel der Kaverne, das an den Schnittstellen zum übrigen Kavernenteil begrenzt wird. Erreicht die Kaverne diese Schnittgrenze, d.h. bei gleichem Solfortschritt in allen drei Löchern entspricht dies dem Zusammenwachsen der Einzelkavernen, ist nur noch das Solen an der unbegrenzten Kavernenwandung möglich. Bei dem mit dieser Vereinfachung erzielten Rechenergebnis können in sehr homogenem Salzgebirge alle 3 Kavernenteile als symmetrisch angesehen werden. Ist z.B. das Einfallen der Salzschichten sehr steil, womit höhere Auflösungsgeschwindigkeiten in Richtung des Einfallens verbunden wären, muß jedes dieser Drittel separat gerechnet werden. Figur 25 zeigt einige dem Vertikalschnitt (Fig. 23) ent-



Figur 22. Solen durch Öl.



Figur 23. Kavernenkonfiguration beim Solen durch 3-Bohrlöcher.



Figur 24. Blockeinteilung mit Schnittgrenzen.

sprechende Horizontalschnitte. Bei diesem modifizierten Rechenfall sind alle Variationsmöglichkeiten, die das Modell für die Ein-Bohrungs-Variante besitzt, wie z.B. das Umschlagen von Produkten (Fig. 26), ebenfalls durchführbar.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Seit unser Simulationsmodell seine Qualifikation in der Praxis bewiesen hat, wurde es zum wichtigsten Instrument bei der Planung und Überwachung in den verschiedensten Phasen der Projektrealisierung. Bereits im Vorplanungsstadium werden mit dem Modell die dem Zweck des Projektes am besten entsprechenden Kavernenformen, Kavernenabstände etc. bestimmt.

Während der Planungsphase, wenn die Kenntnisse aus Bohrungen ausgewertet sind, wird das den geologischen und physikochemischen Gegebenheiten entsprechende optimale Solkonzept erarbeitet.

Im laufenden Betrieb wird bei Abweichungen vom Soll-Zustand bzw. bei sonstigen erforderlichen Änderungen der Solprozeß über Modellrechnung den neuen Gegebenheiten angepaßt. Die mit dem Modell erzielbaren wirt-

schaftlichen Vorteile ergeben sich 1) bei der Auslegung der obertägigen Anlagen, bedingt durch optimale Kavernenabstände, dem Solkonzept entsprechende Leitungs- und Pumpenauslegung, etc., 2) während des Solbetriebes durch Reduzierung der ohne Modellrechnung häufigen Hohlraumvermessungen, und 3) bei Speicherprojekten durch langfristig planbare bzw. kurzfristig umstellbare Einkaufspolitik der Produkteneigner.

Die Vorteile—wie etwa der letztgenannte—sind nicht immer kostenmäßig bewertbar. Einsparungen—wie beim Bau der obertägigen Anlagen oder in der Anzahl der erforderlichen Hohlraumvermessungen—ergeben jedoch Beträge in Millionenhöhe.

Setzt man dagegen die Kosten für die Simulation, die je nach Projektgröße im Bereich der Kosten für eine oder mehrere echometrische Hohlraumvermessungen liegen, so macht dies nur einen Bruchteil der damit erzielbaren Einsparungen aus.

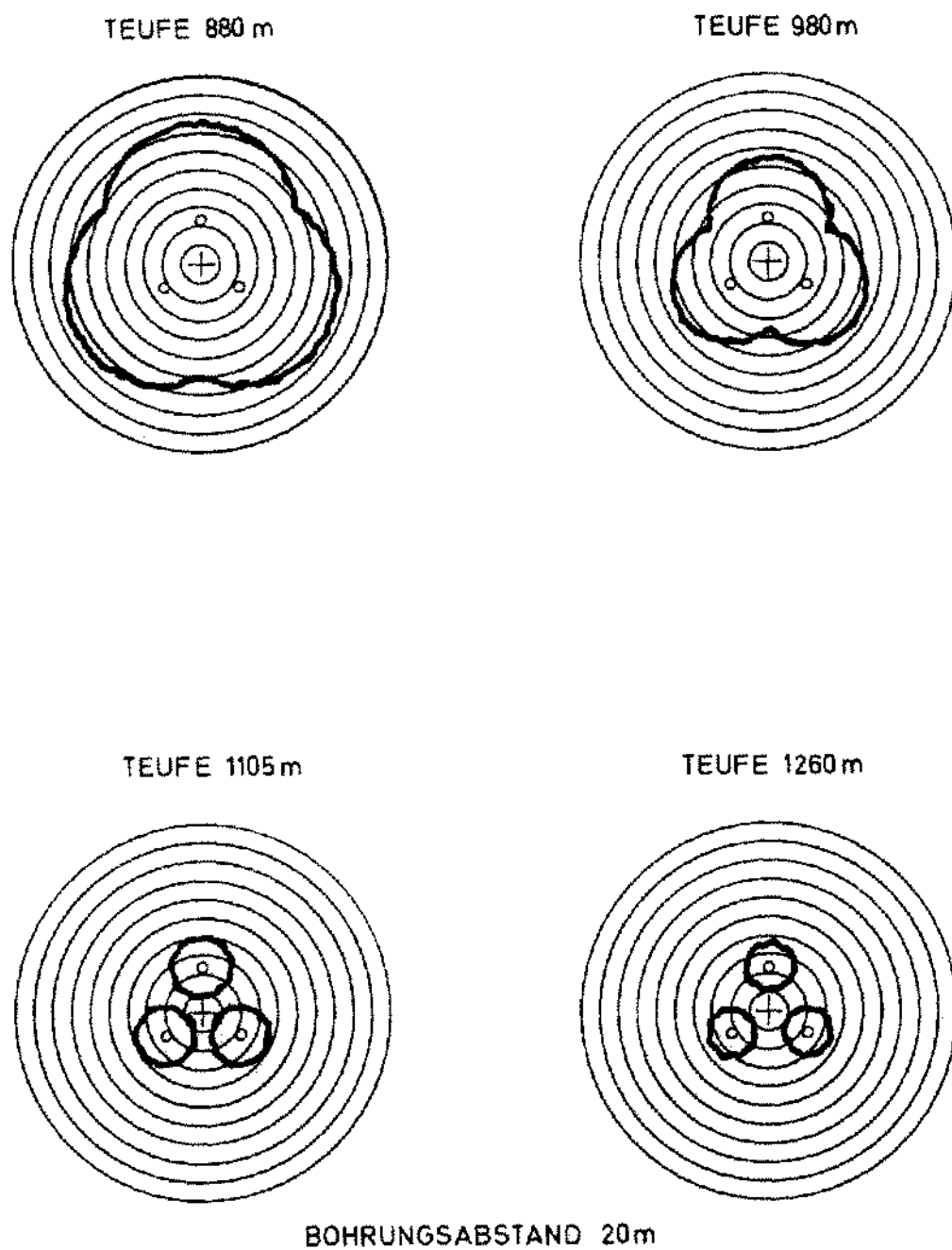
DISKUSSION

Hieblinger:

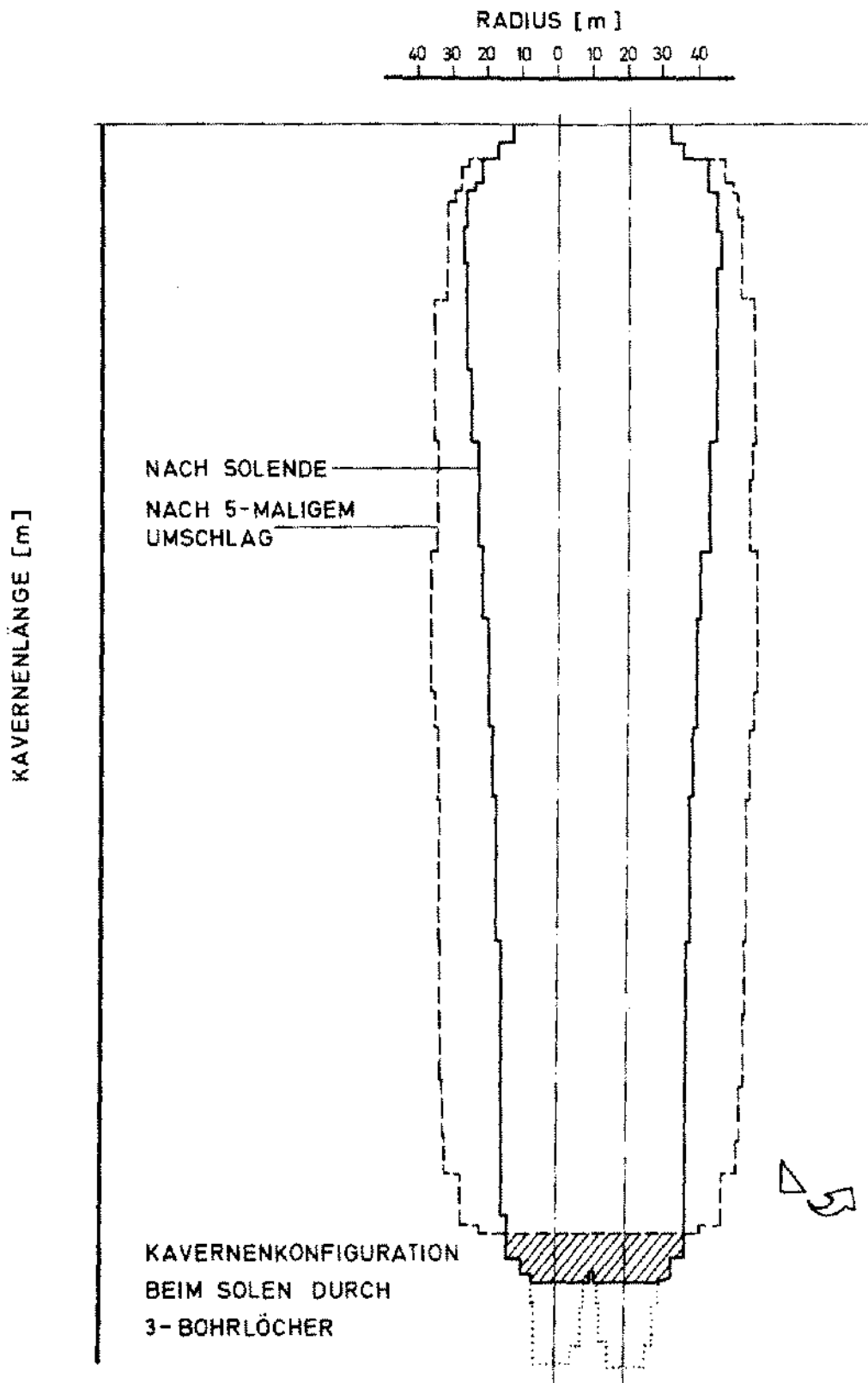
Frage. Während des optimierten Solens können geologische oder technische Besonderheiten ein Abweichen von der geplanten Solung notwendig machen. Ist das Modell so gestaltet, daß durch obertägig zu beschaffende Daten eine Kontrolle, z.B. wöchentlich, möglich ist?

Antwort. Wird eine Kaverne nach dem am Rechner geplanten Konzept gesolt, bedeutet die Übereinstimmung zwischen rechnerischen Soldaten und täglich gewonnenen Betriebswerten, daß die Solung auch der vorausgerechneten Hohlraumentwicklung entspricht. Ist aus technischen Gründen eine Abweichung vom ursprünglichen Konzept erforderlich, können die durch die Änderung hervorgerufenen Auswirkungen ebenfalls vom Modell vorausgerechnet werden. Der Vergleich von Rechen- und Betriebswerten läßt wiederum eine Kontrolle zu. Gerechnet wird also nur vor Solbeginn oder im Falle einer geänderten Konzeption während des laufenden Betriebes. Die bisherige Praxis hat gezeigt, daß bei relativ homogenen Gebirge auch bei sehr hohen Solraten diese indirekte Kontrolle ausreicht, um Hohlraumvergrößerungen von mehreren hunderttausend Kubikmetern ohne dazwischenliegende echometrische Hohlraumkontrollen zu schaffen.

Wird im Verlauf der Solung einer Kaverne eine inhomogene Salzschiebt, z.B. Carnallit, angetroffen, weisen die täglichen Analysenwerte einen allmählichen Anstieg der Kaliumkonzentration aus. Die Lage dieser Schicht wird daraufhin durch eine echometrische Vermessung festgestellt. Durch Eingabe des vermessenen und im dahinterliegenden Salzgebirge vermuteten Verlaufs der Inhomogenitätszone in das Simulationsmodell kann die Solzukunft berechnet werden. Die obertägig gewonnenen Soldaten geben jedoch keine Aussage, ob der angenommene Carnallitverlauf mit dem tatsächlichen übereinstimmt. Eine Kontrolle der Hohlraumentwicklung mit dem Modell ist somit nicht möglich.



Figur 25. Horizontalschnitte einer 3-Bohrloch-Kaverne.



Figur 26. Kavernenkonfiguration nach 5-maligem Produkturnschlag.