

Neuere Forschungsergebnisse in der Gebirgsmechanik im Hinblick auf den Abbau von carnallitischen Kaliflößen

F.W. Uhlenbecker

Kali und Salz AG, D-6433 Philippsthal
über Bad Hersfeld

ZUSAMMENFASSUNG

Der Abbau von carnallitischen Lagerstättenbereichen, insbesondere in großen Teufen, verlangt wegen seiner abbaudynamischen Problematik eine Pfeilerdimensionierung, die diesen Umständen gerecht wird. Die Dimensionierung muß praxisnah durchgeführt werden und hat sich ständig der Lagerstättenentwicklung—vor allem den Mächtigkeitsschwankungen—anzupassen.

Um Richtwerte für die Pfeilerdimensionierung ansetzen zu können, wurden grubenpfeilerähnliche Großmodellversuche mit den entsprechenden Salzgesteinen—Hartsalz, Sylvinit, Carnallit—und mit verschiedenen Standzeiten—vom Kurzzeitversuch bis zum Dauerstandsversuch über mehrere 100 Tage—durchgeführt. Spezielle Untersuchungen über die Spannungsverteilung in Stützelementen unter Kurz- und Dauerlast gehen konform mit Erkenntnissen aus der Praxis und bestätigen die Prüftechnik. Die Versuchsanordnungen, Prüftechnik und Ergebnisse werden mitgeteilt.

Die umfangreichen Messungen in der Grube und die Erfahrungen im Abbaugeschehen werden mit den im Labor ermittelten Richtwerten korreliert und für die Pfeilerdimensionierung angesetzt. Die Pfeiler müssen so dimensioniert sein, daß sie neben der Dauerstandfestigkeit auch in der Lage sind, abbaudynamisch bedingte Spannungsspitzen aufzufangen.

Die Forschungsergebnisse und Erfahrungen werden beschrieben.

EINLEITENDER ÜBERBLICK

Im Werra-Kalibergbau der Bundesrepublik Deutschland werden zur Zeit in 600–900 m Teufe die Flöze Hessen und Thüringen nach dem "room and pillar"—Verfahren ohne Einbringen von Versatz abgebaut. Das obere Lager, Flöz Hessen, besteht aus Hartsalz, über dem sich teilweise Carnallit—vorwiegend in den Begleitflözen—befindet. Das untere Lager, Flöz Thüringen, besitzt einen Hartsalzfuß, der von einem Trümmercarnallit wechselnder Mächtigkeit überlagert wird.

Das unmittelbare Hangende der Kaliflöze besteht aus einer 140 bzw. bis 210 m mächtigen Steinsalzschicht (siehe Fig. 1). Oberhalb dieses mächtigen Steinsalzpaketes steht bis zur Steinsalzfolge des Unteren Buntsandsteins ein 110–130 m mächtiges, überwiegend aus tonigen und schluffigen Lagen bestehendes Schichtpaket an, das an der Basis der oberen Hälfte zwischen reineren Tonlagen den 20–25 m mächtigen Plattendolomit enthält.

Die Grubenfelder werden in 600–1200 m Abstand von N-S-streichenden, fiederförmig abgesetzten Basaltgängen

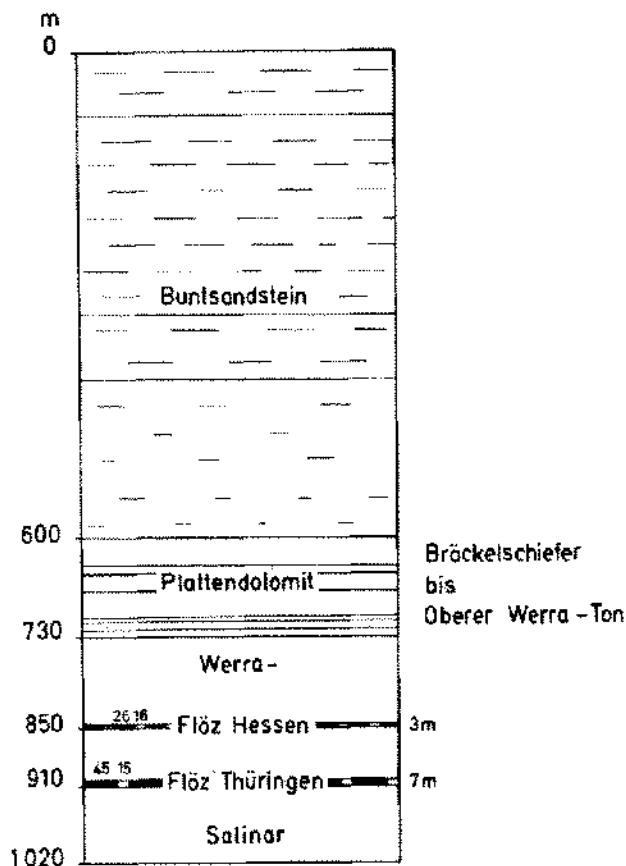
durchzogen (siehe Fig. 2). In diesen Basaltbereichen sind die Kaliflöze überwiegend vertauht. Alle unter Tage angefahrenen Basalte zeigten stets feste Kontakte mit dem Salzgebirge.

Im Werra-Kaligebiet in den Kalibergwerken der Bundesrepublik und der DDR werden beträchtliche Mengen an Carnallit abgebaut. Das Flöz Thüringen stellt eine der größten flachgelagerten und genutzten Carnallit-Lagerstätten der Welt dar.

Der Carnallit ist wegen seiner geomechanischen Eigenschaften beim Abbau nicht leicht zu beherrschen. Deshalb kommt der Dimensionierung der Pfeiler in dieser Lagerstätte eine besonders große Bedeutung zu; denn nur durch ausreichend bemessene und standfeste Pfeiler können Gebirgsschläge verhindert werden.

FESTLEGUNG DER RICHTWERTE FÜR DIE PFEILERDIMENSIONIERUNG

Allgemeine Betrachtung. Der Abbau im Werra-Kaligebiet erfolgt versatzlos unter Stehenlassen von Salz-



Figur 1. Maßstabgerechtes Profil der Werra-Kalilagerstätte, Teufe der Kaliflöze etwa 850 m.

pfeilern, die bei der heutigen Abbautechnik überwiegend quadratisch erstellt werden. Bei der Dimensionierung der Pfeiler gehen wir davon aus, daß die Pfeiler das Deckgebirge in Abhängigkeit von der Teufe und dem Abbauverlust zu tragen haben.

Entsprechend ihrer Belastung geben die Pfeiler nach. Diese Verformung beginnt unmittelbar beim Lösen des anstehenden Minerals. Die untertägige Absenkung wirkt sich im verringerten Maße über Tage aus. Etwa die Hälfte der Absenkung erreicht die Tagesoberfläche innerhalb weniger Wochen oder Monate je nach Abbaukonzentration. Die nachfolgenden Jahresabsenkungsraten betragen 3–5 mm pro Jahr. Die Fig. 3 zeigt das Wandern der Senkungsmulden über Tage in Richtung des Abbaufortschrittes einer Werra-Kaligrube.

Zur Biegesteifigkeit der Hangendschichten ist festzustellen, daß aufgrund von markscheiderischen Messungen in der Bundesrepublik nachgewiesen werden konnte, daß das Gebirge auf jede Abbaueinwirkung schnell reagiert und somit die früher angenommene relativ hohe Biegesteifigkeit nicht besitzt.

Zusätzlich zu den normalen statischen Belastungen durch das Deckgebirge treten beim Abbau Zusatzbelastungen in

den Pfeilern auf, die unter besonderen Bedingungen dynamisch wirken können. Bei normalem Abbau setzen diese Zusatzbelastungen vornehmlich in der Abbaukante und beim Durchfahren bzw. Unterfahren von Restpfeilern ein.

Zu dem Thema der Pfeilerdimensionierung einige grundsätzliche Feststellungen, die für den Salzbergbau in bezug auf die Übertragbarkeit von im Labor ermittelten Festigkeitswerten auf die Pfeiler in der Grube aufgrund unserer Erfahrungen absolute Gültigkeit haben. Hier zwei Beispiele:

So zeigt der Carnallit im Vergleich zum Hartsalz und zum Steinsalz sowohl im Laborversuch als auch in der Grube ein völlig anderes Festigkeitsverhalten und ein gefährliches, bei den anderen Salzarten nicht zu beobachtendes sprödebruchartiges Reagieren auf plötzliche Belastungsänderungen.

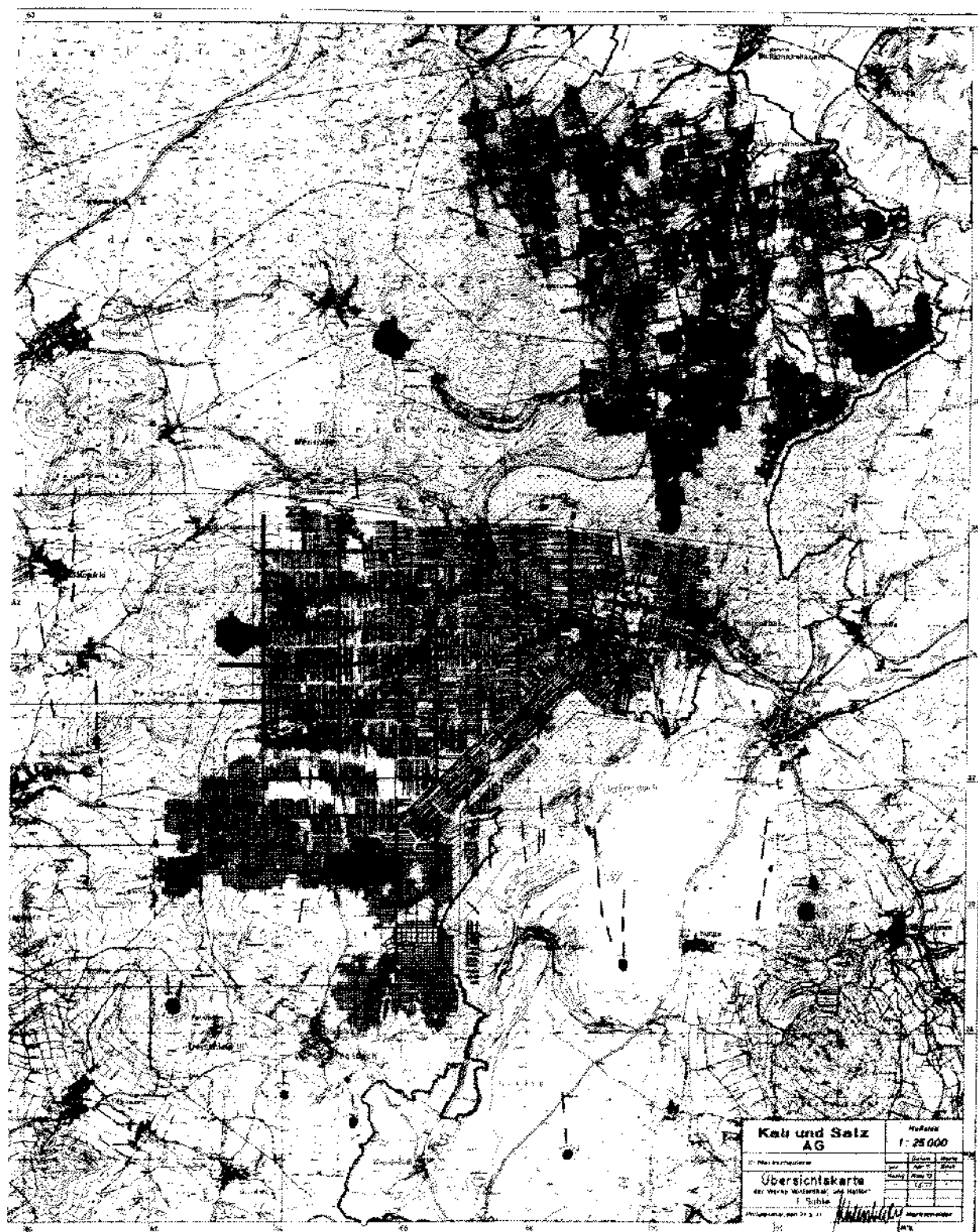
Der Einfluß des Schlankheitsgrades, d.h. des Verhältnisses der Pfeilerhöhe zur Pfeilerbreite, auf die Festigkeit verhält sich in der Grube ähnlich wie an Modellen im Labor ermittelt. Mit abnehmendem Schlankheitsgrad, d.h. mit zunehmender Plattigkeit, steigt die Tragfähigkeit der Pfeiler in der Grube ebenso wie die der Modelle im Labor überproportional an.

Somit können aus Laborversuchen Richtwerte über die Festigkeit von Salzpfeilern abgeleitet werden, die bei der praktischen Dimensionierung der Grubenbaue wertvolle Hilfe leisten. Es muß jedoch herausgestellt werden, daß die Bestätigung der richtigen Grubenpfeilerdimensionierung nicht an Hand der Laborergebnisse vollzogen werden kann. Dieser Beweis kann vielmehr nur in der Grube, d.h. im Abbaufeld, selbst geführt werden.

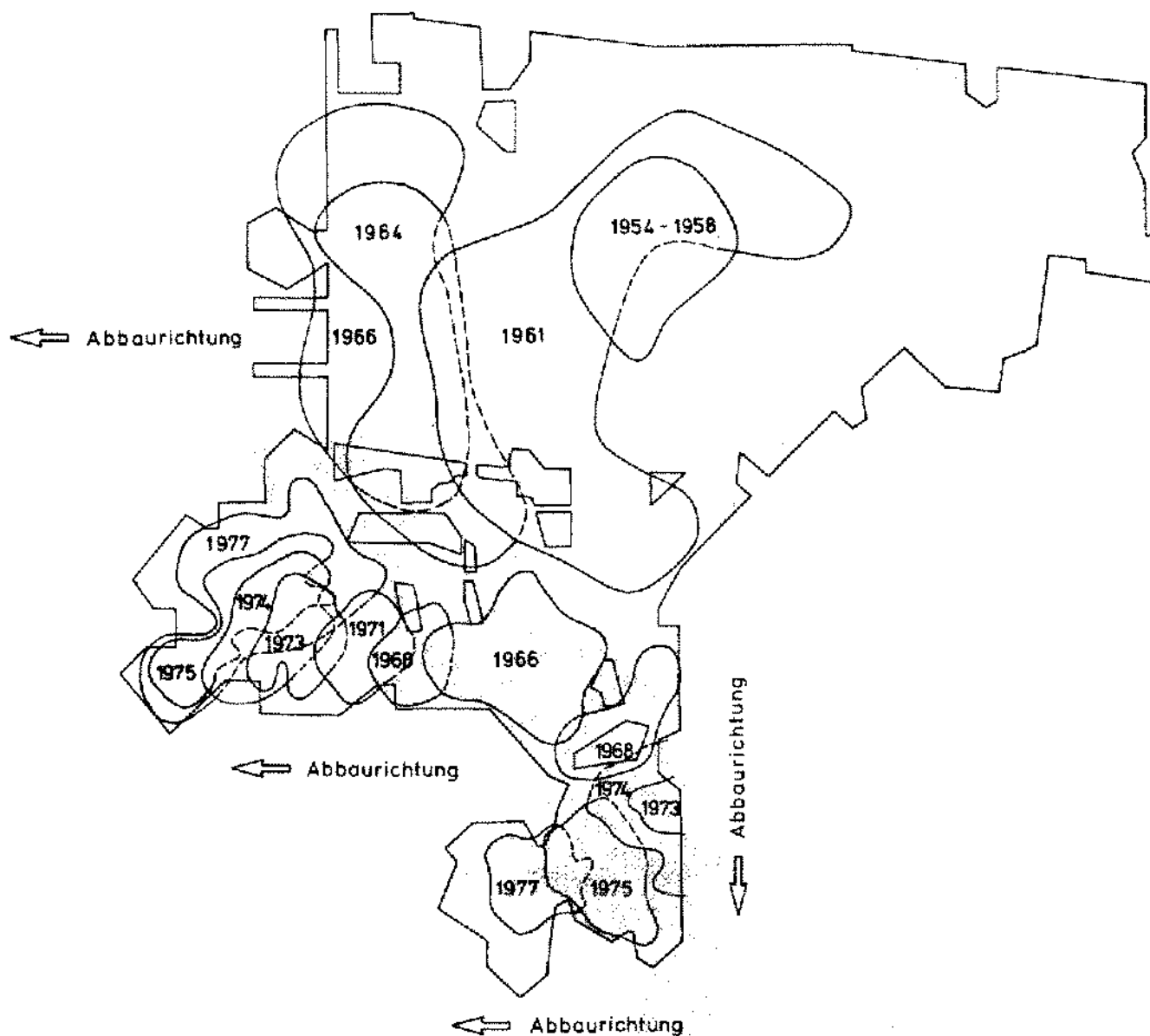
Bergmännische Erfahrungen vor Ort, umfangreiche Messungen an über 4000 Meßpunkten in den Werra-Gruben der Bundesrepublik über und unter Tage, kombiniert mit punktuell angesetzten Meßverfahren modernster Technik, vermitteln uns ein umfassendes Urteil über die Sicherheit der Grubengebäude. Dabei steht die Schwierigkeit der Standfestigkeitsbeurteilung des Carnallits im Vordergrund.

Als Beispiel für die vielen Meßwerte zeigt die Fig. 4 den Verlauf von Pfeilerkonvergenzen in Abhängigkeit von der Zeit in verschiedenen Teufen und die Fig. 5 die entsprechenden Konvergenzgeschwindigkeiten.

Die bereits erwähnten Zusatzbelastungen der Grubenpfeiler, die sich aus der Abbausituation ergeben und modelltechnisch nicht exakt erfaßt werden können, das rheologische Verhalten des Pfeilermaterials sowie die immer erforderliche Vorsicht bei der Übertragung von Laborversuchen auf Grubenverhältnisse müssen bei der Dimensionierung durch entsprechende Sicherheitsaufschläge berücksichtigt werden. Dieser Sicherheitswert liegt bei den Werra-Kaliwerken der Bundesrepublik heute in Carnallit-Abbaufeldern größerer Mächtigkeiten höher als 3, d.h., die Ist-Belastung der Pfeiler aufgrund der Überdeckung und des Abbauverlustes darf höchstens 1/3 der im Labor an



Figur 2. Basalte mit Grubenbauen der 1. Sohle der Kaliwerke Hattorf und Wintershall.



Figur 3. Das Wandern der Senkungsmulden über Tage in Richtung des Abbaufortschrittes.

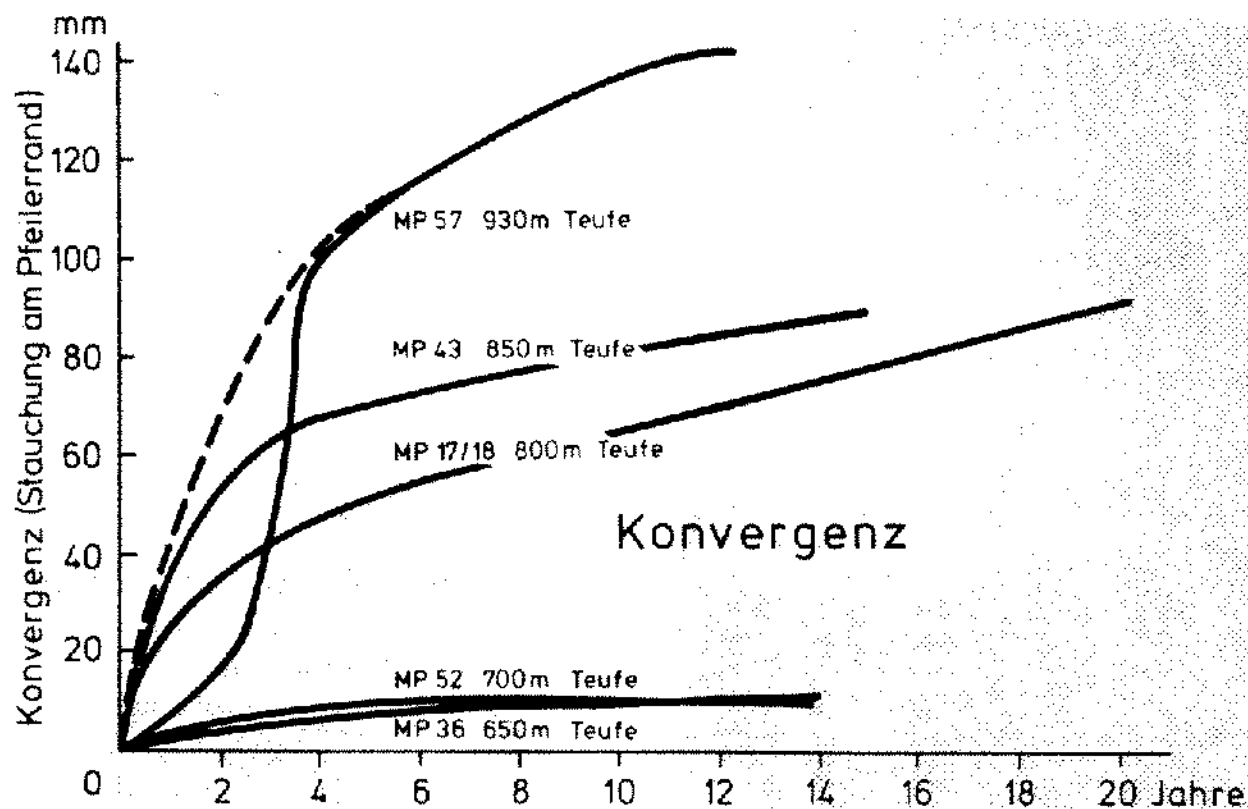
Pfeilergroßmodellen gleichen Schlankheitsgrades ermittelten Bruchfestigkeit betragen.

Gesteinsmechanische Untersuchungen. Die Ermittlung der Richtwerte am Modell im Labor erfolgt möglichst praxisbezogen. Es wird versucht, die Belastungssituation der Pfeiler in der Grube soweit wie möglich am Modell nachzubilden. Untersucht wurden Hartsalz-, Carnallit- und zusammengesetzte Hartsalz/Carnallit-Modelle, in der Regel mit einer Grundflächengröße von 30×30 cm, in Einzelfällen bis zu 70×70 cm Grundfläche.

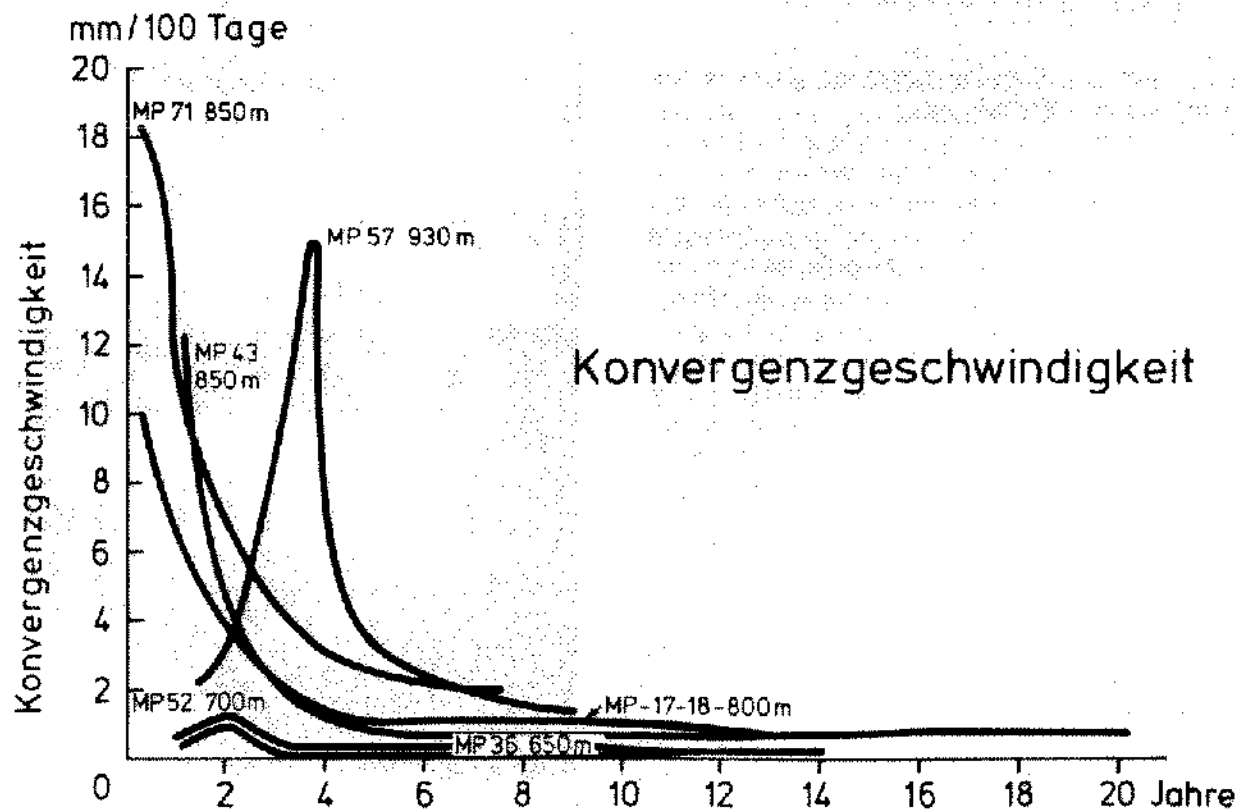
Die Kurzzeitversuche wurden unter 1000-t- bzw. 6000-t-Pressen durchgeführt (siehe Fig. 6). Die Dauerstandsversuche wurden an drei 500-t-Pressen bis zu 300 Tagen getestet. Die Salzblöcke werden grob auf Modellform zuge-

schnitten, auf Rißbildungen durchleuchtet und erst dann auf einer Hobelmaschine mit sehr hoher Genauigkeit endgültig plan bearbeitet.

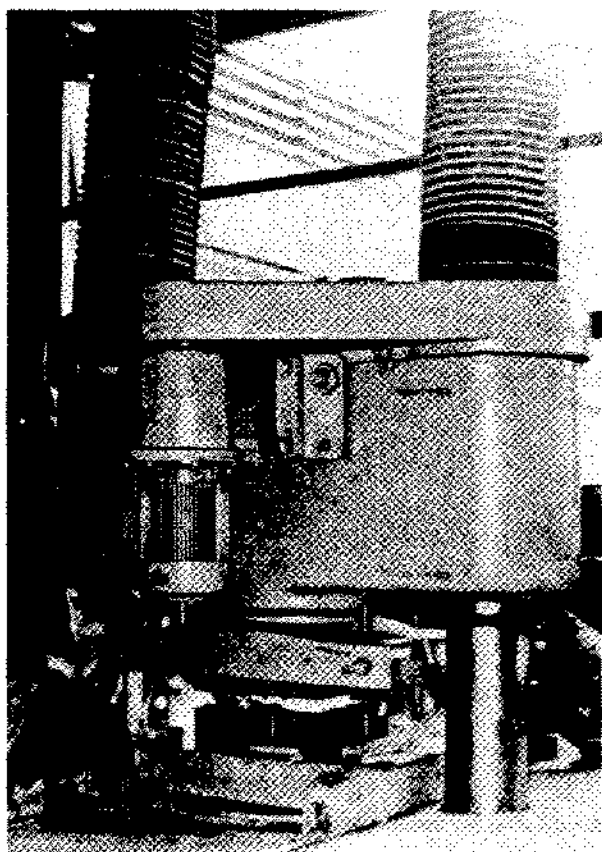
Die Versuchsanordnung beschreibt die Fig. 7. Um die Einspannung und Bauweise der mehrteiligen Pfeilermodelle zu überprüfen, wurden Vorversuche an einem aus einem Stück bestehenden Pfeilermodell, wie in Fig. 7 gegenübergestellt, durchgeführt, um die eventuelle Abnahme der Bruchfestigkeit und die Zunahme der Verformungsbeträge gegenüber dem mehrteiligen Modell mit Steinsalz-Kopf- und -Fußplatte zu testen. Dabei wurden keine nennenswerten Festigkeits- und Verformungsabweichungen zwischen den beiden Modellarten festgestellt. Darauf wurde 1974 in einer Veröffentlichung hingewiesen. Die Fig. 8



Figur 4. Pfeilerkonvergenz in Abhängigkeit von der Zeit in verschiedenen Teufen.



Figur 5. Konvergenzgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit in verschiedenen Teufen.



Figur 6. 1000-t-Press mit Pfeilermodell.

zeigt ein einteiliges Carnallitmodell mit eingespanntem Modellfuß vor dem Versuch.

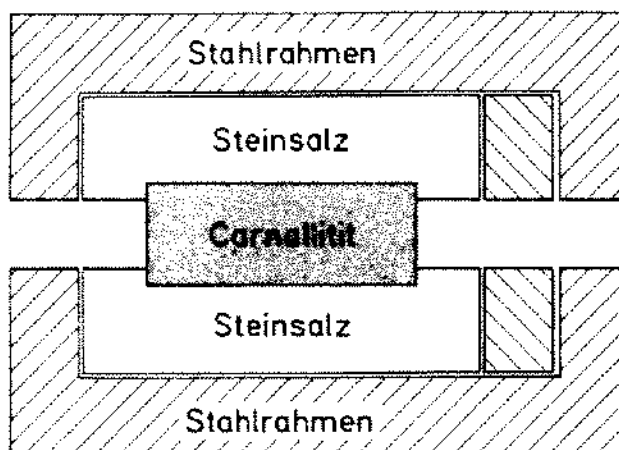
Die Versuchsergebnisse der einzelnen Modellserien werden auf der Fig. 9 dargestellt. Aus den Kurven ist klar zu erkennen, daß Hartsalz die höchste Festigkeit hat und Carnallit die geringste. Die je zur Hälfte aus Carnallit und Hartsalz zusammengesetzten Modelle tendieren mit zunehmender Plattigkeit mehr und mehr zu den Festigkeitswerten des Carnallits.

Generell liegt die Dauerstandsfestigkeit aller Salzgesteine unter den äquivalenten Kurzzeitfestigkeiten. Die Dauerstandsergebnisse sind außerdem abhängig von dem Schlankheitsgrad. Bei den plattigen Modellen liegen die Werte bei etwa 65–75% der Kurzzeitfestigkeit, bei schlankeren Modellen darunter.

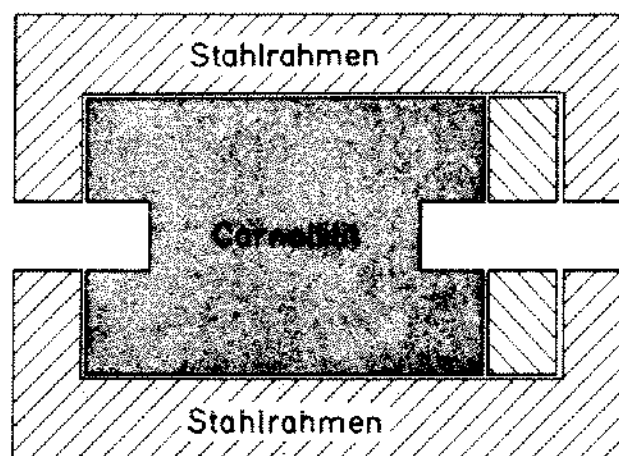
Außerdem wurde mit Hilfe von kleinen Meßelementen—81 Stück auf den Modellquerschnitt verteilt, entsprechend der Fig. 10—die Verteilung der Vertikalspannung in einem Hartsalzpfeilermodell unter Dauerlast bis zu 100 Tagen mit stufenweiser Lasterhöhung von 43 bis 73 MPa ermittelt.

Aus dem Diagramm der Fig. 11 geht hervor, daß bei niedrigen mittleren spezifischen Flächenbelastungen (hier 43 MPa) sich die Spannung ziemlich gleichmäßig über den Pfeiler verteilt, während bei höheren mittleren spezifischen

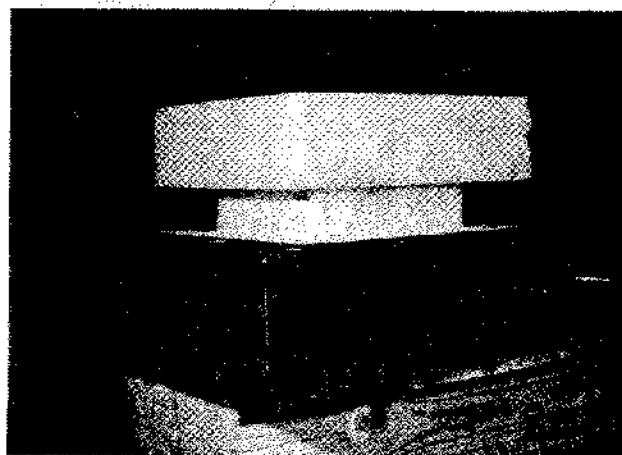
Mehrteiliges Pfeilermodell



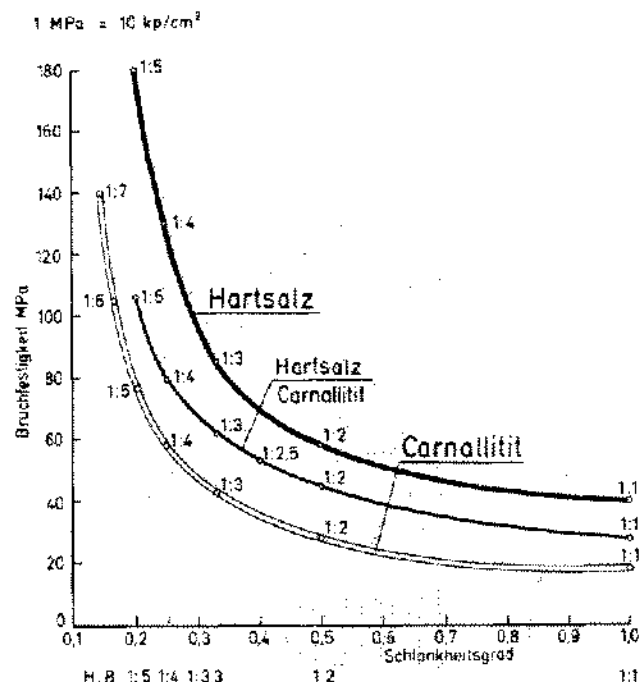
Pfeilermodell aus einem Stück



Figur 7. Die Versuchsanordnung mit mehr- und einteiligem Pfeilermodell.



Figur 8. Einteiliges Carnallit-Pfeilermodell Modellfuß in Stahlrahmen eingespannt.



Figur 9. Die Druckfestigkeiten der einzelnen Modellserien in Abhängigkeit vom Schlankheitsgrad bzw. -maß.



Figur 10. Versuchsanordnung mit Meßelementen zwischen dem Querschnitt eines Salzmodells.

Flächenbelastungen (hier 73 MPa) im Pfeilerkern vertikale Spannungsanhäufungen von dreifacher Höhe der mittleren spezifischen Flächenbelastung auftreten.

Wie bereits erwähnt, dienen die Werte der Modellbruchfestigkeit, siehe Fig. 12, nur als Richtwerte für die Pfeilerdimensionierung im Werra-Kalibergbau der Bundesrepublik Deutschland. Die Pfeiler im Carnallit z.B. werden so dimensioniert, daß ihre rechnerische Normalbelastung aufgrund der Überdeckung und des Abbauverlustes höchstens $1/3$ der Modellbruchfestigkeit bei gleichem Schlankheitsgrad beträgt, wie dies mit der unteren Kurve in Fig. 12 dargestellt ist.

Durch die Sicherheitszahl 3 wird erreicht, daß die Pfeiler neben der Berücksichtigung des rheologischen Verhaltens auch gegen alle in der Praxis vorkommenden Zusatzbelastungen ausreichende Standfestigkeit aufweisen. Aus diesen Dimensionierungsregeln und den betrieblichen Erfahrungen hinsichtlich der Firstbeherrschung ergeben sich so die in den Gruben einzuhaltenden Pfeiler- und Streckenabmessungen sowie der entsprechende Abbauverlust. Aus bergwirtschaftlichen Gründen ist zwar ein möglichst geringer Abbauverlust anzustreben; zur Vermeidung von Gebirgschlägen mit schwerwiegenden Folgen ist jedoch in allen Zweifelsfällen und insbesondere im Carnallit der Standfestigkeit der Pfeiler gegenüber den Fragen des Abbauverlustes der absolute Vorrang zu geben.

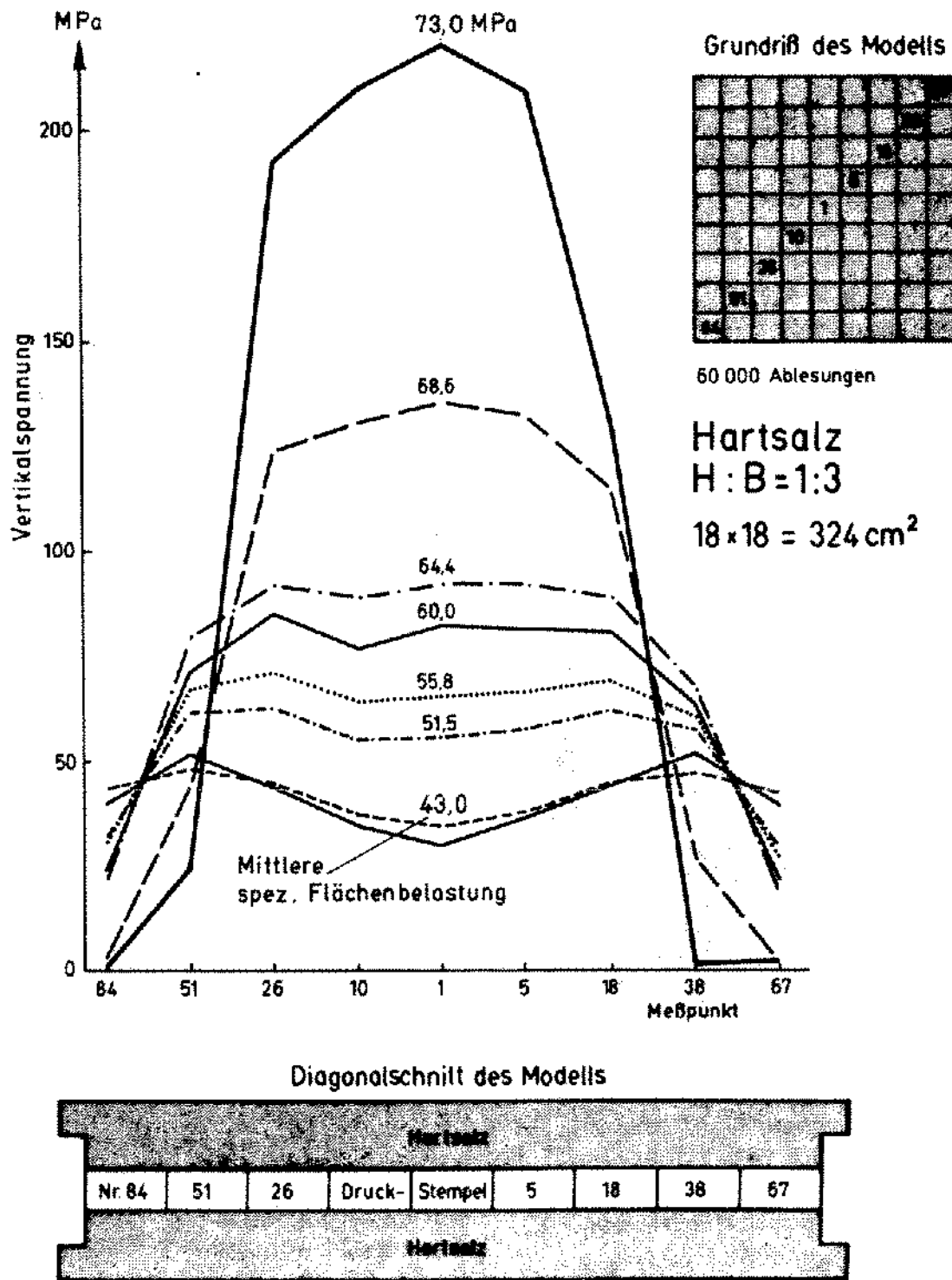
Bergtechnische Erfahrungen beim Abbau von Carnallitmächtigkeiten auf der 2. Sohle. Wie eingangs schon erwähnt, werden in den Werra-Kaliwerken der Bundesrepublik Deutschland seit einiger Zeit große Mengen carnallitischer Rohsalze aus dem Flöz Thüringen abgebaut. Hierbei sind die größten Mächtigkeiten und auch die größten Lagerstättenteufen auf dem Kaliwerk Hattorf anzutreffen. Die beim Abbau gesammelten Erfahrungen haben entscheidenden Einfluß auf die heute in der Bundesrepublik gültigen Dimensionierungsregeln für den Abbau von Carnallit gehabt.

Die Pfeiler in diesem Lagerstättenbereich sind von Anfang an nach den beschriebenen Richtwerten der Modellbruchfestigkeit für Carnallit dimensioniert worden. Die Sicherheitswerte lagen in den 60er Jahren zunächst zwischen 2,5 und 3. Als Pfeilerhöhe wurde das mittlere Maß aller Pfeiler an der Abbaufont zugrunde gelegt. Nach anfänglich relativ gleichmäßigen Carnallitmächtigkeiten setzten an der östlichen Abbaufont im Flöz Thüringen auf der 2. Sohle des Kaliwerkes Hattorf plötzlich höhere Mächtigkeiten ein, denen der Betrieb nicht sofort durch stärkere Dimensionierung folgte. Die geforderte Sicherheitszahl wurde unterschritten, und es kam zu mehreren gebirgschlagähnlichen Pfeilersetzungen.

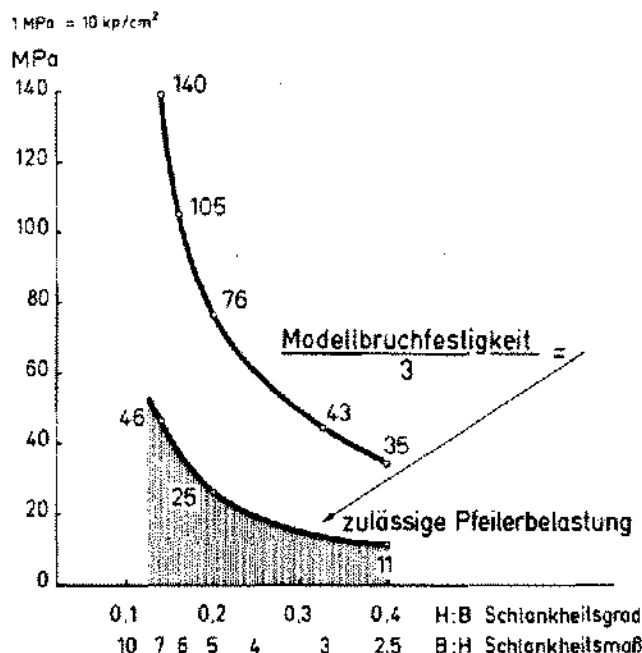
Wie schnell sich die Sicherheitszahl und somit die Standfestigkeitsreserve eines Pfeilers durch eine verhältnismäßig geringe Mächtigkeitschwankung ändern kann, soll mit Fig. 13 erklärt werden. Sie zeigt ein Abbauprofil im Flöz Thüringen des Werkes Hattorf mit den Mächtigkeiten, den Höhe- zu Breitenverhältnissen der Pfeiler und den zugehörigen Sicherheitszahlen "S". Die spezifische Belastung der einheitlich dimensionierten Pfeiler beträgt hier bei einer Teufe von rund 900 m etwa 50 MPa. Unter dieser Profildarstellung ist die in Fig. 9 gezeigte Bruchfestigkeitskurve für Carnallit in Abhängigkeit vom Schlankheitsgrad angegeben.

Bei einer Pfeilerhöhe von 4,00 m und einem H : B-Verhältnis des Pfeilers von 1 : 7,4 errechnet sich im linken Darstellungsbereich eine Sicherheitszahl von 3,1, bezogen auf die entsprechende Modellbruchlast von 156 MPa. Im rechten östlichen Bereich erhöht sich die Mächtigkeit inner-

Versuchsdauer 100 Tage



Figur 11. Diagramm über die vertikale Spannungsverteilung in Abhängigkeit von der Belastungshöhe über die Diagonale des Pfeilerquerschnittes.



Figur 12. Modellbruchfestigkeit von Carnallit (aus Fig. 9) und die zulässige Pfeilerbelastung in Abhängigkeit vom Schlankheitsgrad bzw. -maß.

halb eines Rasters von 4,00 m auf 6,00 m, das H : B-Verhältnis sinkt damit auf 1 : 5, die Bruchfestigkeit der Pfeiler geht auf 76,5 MPa zurück und die Sicherheitszahl beträgt nur noch 1,5. Kommen in derartigen Lagerstättensituationen zu den normalen, statischen Pfeilerbelastungen aus Überdeckung und Abbauverlust noch die zuvor genannten unvermeidbaren, abbaudynamischen Zusatzbelastungen hinzu, so fällt die Sicherheitszahl noch weiter. Gebirgsschlagähnliche Pfeilersetzungen oder sogar Gebirgsschläge sind die Folge.

Dies wurde durch die praktischen Erfahrungen beim Abbau von Carnallit des Flözes Thüringen auf dem Werk Hattorf eindeutig bestätigt. In der Zeit von 1967–1973 ereigneten sich beim Abbau im Trümmern Carnallit auf dem Werk Hattorf insgesamt 6 gebirgsschlagartige Pfeilersetzungen. Vom Umfang her waren diese Pfeilersetzungen sehr unterschiedlich. Alle Ereignisse haben sich als Gebirgsschläge in der Lagerstätte unter Beteiligung der unmittelbar hangenden und liegenden Steinsalzschichten abgespielt und erfolgten an der Abbaufont.

Am 25.2.1969 ereignete sich der stärkste Gebirgsschlag. Betroffen wurden insgesamt 36 Pfeiler auf einer Fläche von 450 × 180 m im östlichen Abbaufeld der 2. Sohle. 26 der Pfeiler standen in einem Raster von 45 × 45 m mit 30 m breiten Pfeilern. Vor Ort waren nach dem Gebirgsschlag die von den Streckenstößen abgeplatzten Salzmenge teil-

weise so erheblich, daß das Haufwerk die Streckenmitte ausfüllte.

Dieser Gebirgsschlag wurde von mehreren Erdbebenstationen registriert; die Magnitude wurde zu 2,4 ermittelt. Auch in diesem Falle lag eine an der gesamten Abbaufont zu verzeichnende Mächtigkeitszunahme vor. Die zulässigen Belastungen, auch der 30 m starken Pfeiler, wurden infolge der plötzlich einsetzenden Mächtigkeitszunahme beträchtlich überschritten. Entsprechend verringerten sich die Sicherheitszahlen.

Vor dem Gebirgsschlag, wie auch bei allen anderen Schlägen, waren keine Anomalien bei den Verformungen festgestellt worden. Nach diesem Gebirgsschlag wurde der Abbauraster auf 60 m vergrößert. Die Pfeiler erhielten 45 m Kantenlänge, die Streckenbreite von 15 m wurde beibehalten. Die Abbauhöhe wurde auf 7 m begrenzt. Der Abbauverlust erhöhte sich von 44 auf 56%. Die normale spezifische Flächenbelastung der Pfeiler wurde dementsprechend von 50 auf 40 MPa verringert.

Der hier geschilderte begrenzte Gebirgsschlag hätte den Zusammenbruch eines größeren Teilfeldes oder des Gesamtfeldes einleiten können. Daß dies nicht erfolgte, ist auf geringe Mächtigkeit und ausreichende Dimensionierung der Pfeiler im rückwärtigen Abbaufeld zurückzuführen.

Aufgrund der geschilderten betrieblichen Erfahrungen ist auf dem Werk Hattorf seit 1974 im Carnallit des Flözes Thüringen nur noch der Raster 60 × 60 m mit 45 m Pfeilerbreite und 15 m Streckenbreite zugelassen worden. Diese Abmessungen dürfen laut Dimensionierungsregeln nur bis zu einer Abbauhöhe von 7 m angewendet werden. Seit Einführung dieser Dimensionierungsregeln haben sich keine gebirgsschlagähnlichen Pfeilersetzungen mehr ereignet.

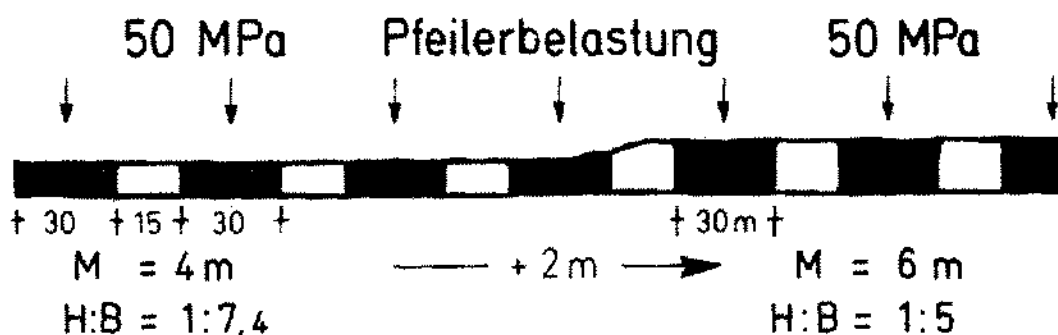
DISKUSSION

Dreyer:

Bemerkung. Bei der dargestellten Verteilung der (Fig. 11) vertikalspannungen in einem stufenweise belasteten Pfeilermodell vermindern sich die Druckwerte am Pfeilerstoß mit der Auflast. Bei der höchsten Belastungsstufe von 72,5 MPa, entsprechend 740 kp/cm², beträgt die Außenhautspannung Null. Dieser Rückgang der Tragfähigkeit an der Außenhaut ist meines Erachtens aufgrund der sich bildenden Risse in diesem Bereich zurückzuführen.

Bei einer Auflast von 42,9 MPa—entsprechend 438 kp/cm², beträgt der im Außenhautbereich gemessene Druckwert etwa 45 MPa. In dieser Größenordnung muß dann die Fließgrenze des zweiachsig beanspruchten Pfeilergesteins liegen. Bei der Höchstbelastung von 72,5 MPa herrscht im Pfeilerinneren offenbar eine entsprechend erhöhte Fließgrenze, wodurch aufgezeigt wird, daß die Fließgrenze nicht nur von der Art des Salzgesteins (Struktur und Mineralbestand) sondern ganz entscheidend auch von der Art der Beanspruchung abhängig ist.

Teufe 900m, Abbauverlust 45% Pfeilerbreite 30×30m

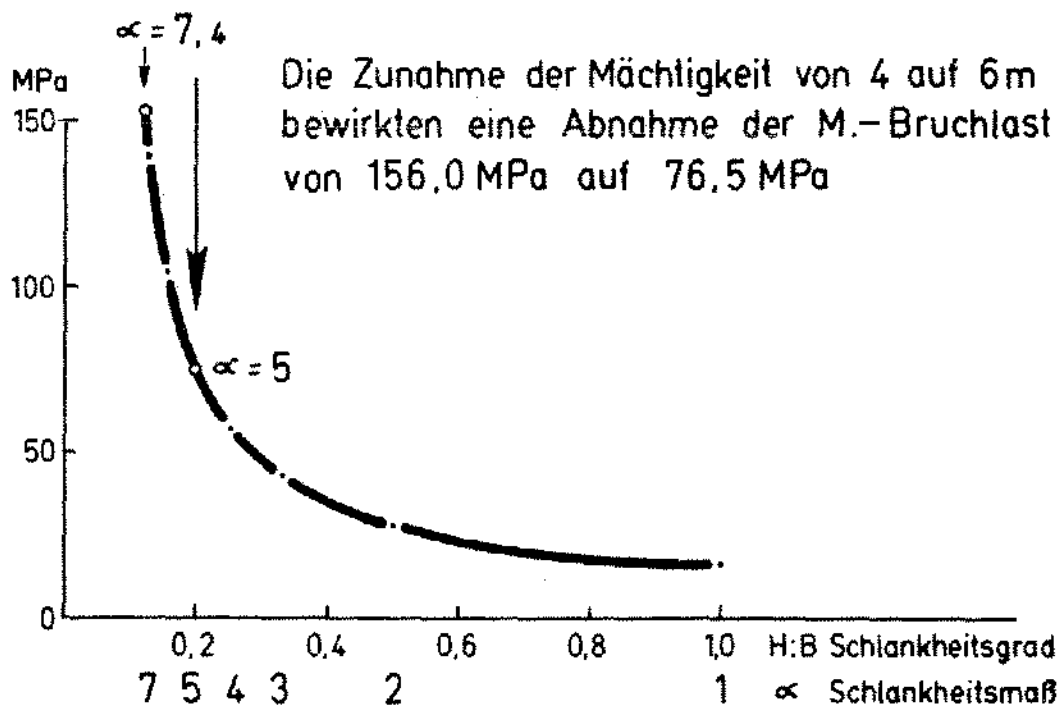


$$\frac{\text{Modellbruchlast}}{\text{Pfeilerbelastung}} = \frac{156,0}{50,0} \text{ MPa}$$

$$„S” = 3,1$$

$$\frac{76,5}{50,0} \text{ MPa}$$

$$„S” = 1,5$$



Figur 13. Ein Abbauprofil im Flöz Thüringen des Kaliwerkes Hattorf.