

FREIBERGER  
FORSCHUNGSHEFTE

**A 111**

BERGBAU

OSKAR NIEMCZYK

**Der derzeitige Stand der Gebirgsschlagforschung**

TILO DÖRING

**Modellvorstellungen zur Deutung von Senkungs-  
und Druckerscheinungen beim StREBBAU  
in flacher Lagerung**



FFH  
A111  
b

ADEMI E · V E R L A G B E R L I N

1959



XVI

1142

A 111

b

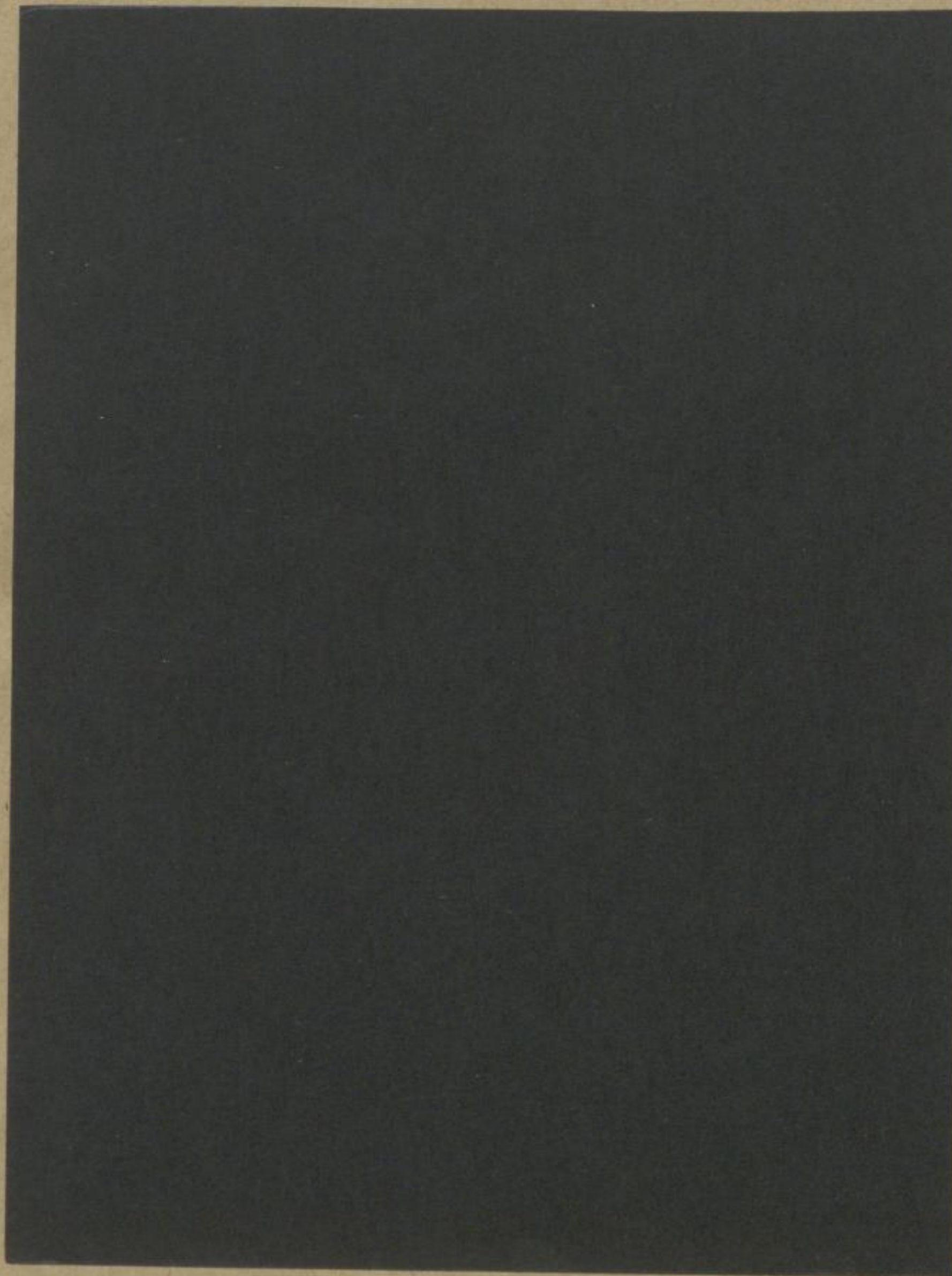




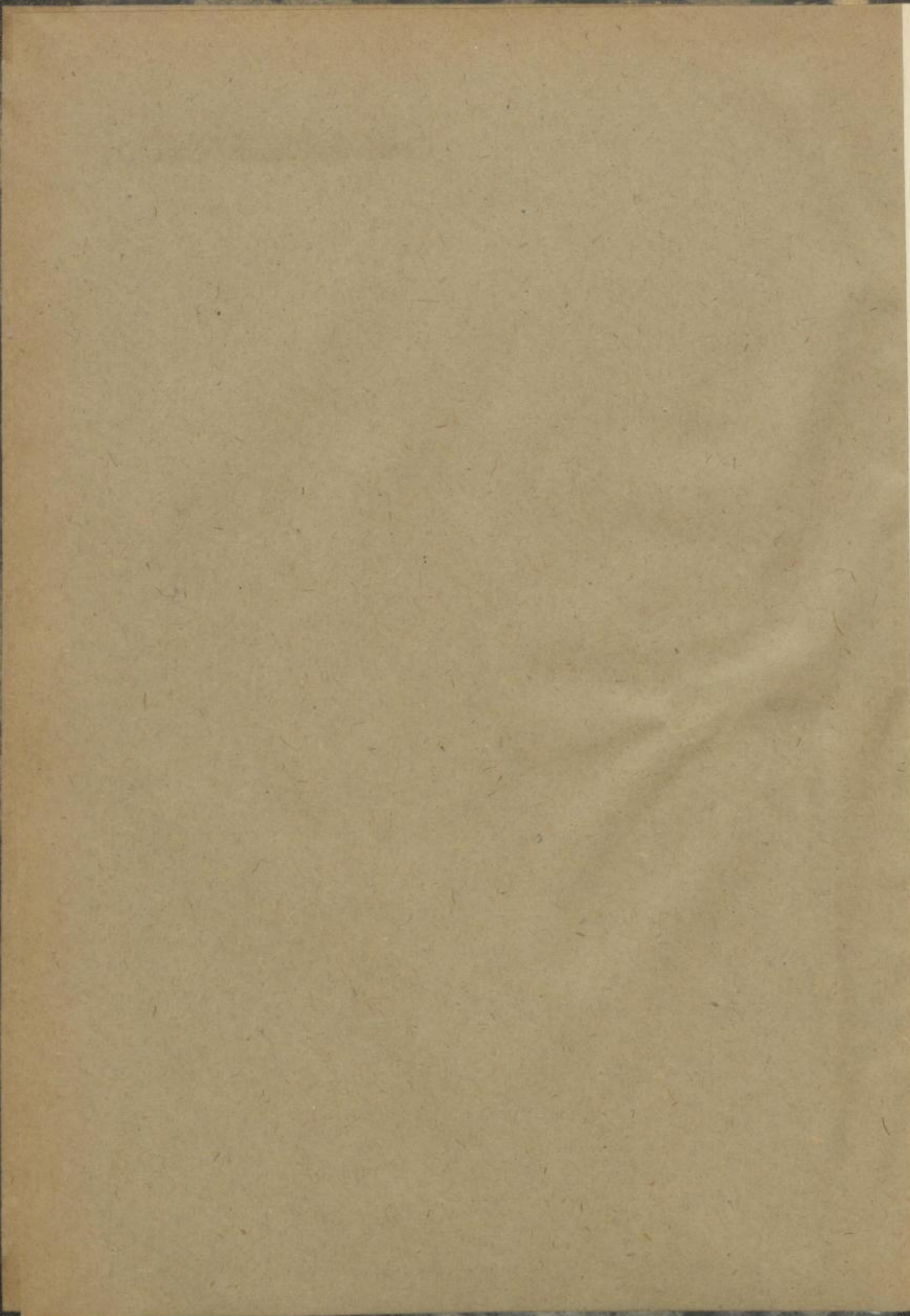
TU BERGAKADEMIE FREIBERG



XVI 1142 . A111B b









FREIBERGER FORSCHUNGSHEFTE

A 111

Der Gesteinbau der Gebirgsflaechen

von Dr. phil. G. H. H. H.

Verlagsgesellschaft mbH, Leipzig

1911

Preis 1,50 M.

1911







# FREIBERGER FORSCHUNGSHEFTE

Herausgegeben vom Rektor der Bergakademie Freiberg

A 111

BERGBAU

**Der derzeitige Stand der Gebirgsschlagforschung**

Von OSKAR NIEMCZYK

**Modellvorstellungen zur Deutung von Senkungs-  
und Druckerscheinungen beim Strebbau  
in flacher Lagerung**

Von TILO DÖRING



A k a d e m i e - V e r l a g · B e r l i n

Freib. Forsch.-H.	A 111	S. 1—104	64 Bilder	1 Tab.	Berlin, Februar 1959
-------------------	-------	----------	-----------	--------	----------------------





XV 7142 (A 777) b

80

0

„Freiberger Forschungshefte“, Schriftenreihe für alle Gebiete der Montanwissenschaften. Herausgeber: Der Rektor der Bergakademie Freiberg, Prof. Dr.-Ing. H. Härtig. — Chefredakteur: Dipl.-Ing. R. Wendler, Freiberg, Klubhaus der Bergakademie, Aug.-Bebel-Str. 5 (Fernruf 2497). — Verlag: Akademie-Verlag, GmbH, Berlin W 8, Mohrenstr. 39 (Fernruf 200386), Postscheckkonto 35021. — Die Freiberger Forschungshefte erscheinen in zwangloser Folge in den Reihen A, B, C und D. Ausführliches Verzeichnis aller lieferbaren Hefte von der Redaktion der Bergakademie oder dem Akademie-Verlag. — Preis dieses Heftes: 8,50 DM. Bestell- und Verlags-Nr. 2062/216/A 111. — Vertrieb: Für das Gebiet der Deutschen Demokratischen Republik durch den Buchhandel; für das Gebiet der Deutschen Bundesrepublik durch die Buchhandlung Kunst und Wissen, Inhaber Erich Bieber, Stuttgart S, Wilhelmstraße 4—6; für das gesamte Ausland über den Buchhandel bei der Deutschen Buch-Export und -Import GmbH, Leipzig C 1, Leninstraße 16.

Satz und Druck: Druckwerkstätten Stollberg VOB, Stollberg (Erzgeb.), August-Bebel-Str. 16 - VOB UNION - III 6/50 1 359 (1163). — Veröffentlicht unter der Lizenz-Nr. 202 · 100/600/59 des Ministeriums für Kultur, HV Verlagswesen, der Deutschen Demokratischen Republik. — Printed in Germany. Alle Rechte vorbehalten.

(59.651)



## I N H A L T

OSKAR NIEMCZYK

Der derzeitige Stand der Gebirgsschlagforschung . . . . 7

TILO DÖRING

Modellvorstellungen zur Deutung von Senkungs- und Druck-  
erscheinungen beim Strebbau in flacher Lagerung . . . . 35



1774

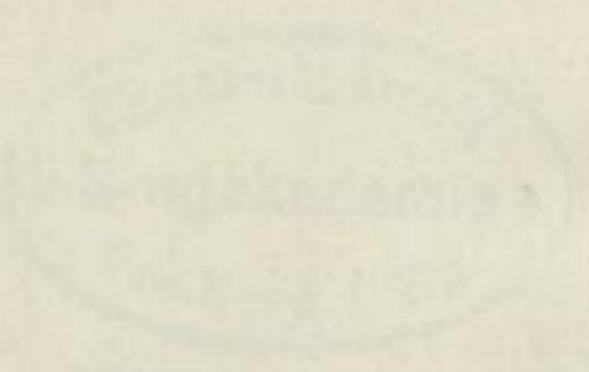
1774

1774

1774

1774

1774



1774

1774

1774

1774



Der derzeitige Stand  
der Gebirgsschlagforschung

Von OSKAR NIEMCZYK

(Vortrag, gehalten anlässlich eines markscheiderischen Kolloquiums am 14. Februar 1958 in Freiberg)





## I N H A L T

Einleitung . . . . .	9
Markscheiderische Feinmessungen zur Beurteilung von Gebirgsdruckauswirkungen . . . . .	10
Untersuchungsverfahren und ihre Bedeutung für die Gebirgsschlagbekämpfung . . . . .	13
Die geologische Aufnahme . . . . .	14
Gesteinsmechanische Untersuchungen . . . . .	15
Elektrische Fernmeßgeräte . . . . .	15
Markscheiderische Meßverfahren . . . . .	18
Erkenntnisse . . . . .	21
Gebirgsschlag im Nachbarfeld Concordia . . . . .	27
Literatur . . . . .	30
Diskussion . . . . .	30



## EINLEITUNG

Wenn wir 40 Jahre zurückblicken, begegnen uns im deutschen Steinkohlenbergbau erstmalig im Ruhrbezirk im Jahre 1916, sodann in Oberschlesien ab 1919 die ersten schweren Gebirgsschläge. Sie waren und sind begleitet von den uns heute geläufigen Erscheinungen, also dem plötzlichen, gewaltsamen Hochpuffen des Liegenden, dem schlagartigen Zusammendrücken der Grubenbaue, weitreichenden Erschütterungen über Tage, und nicht zuletzt sind sie mitunter verbunden mit dem Verlust von Menschenleben. SPACKELER hat damals Erhebungen über das Auftreten von Gebirgsschlägen im Ausland angestellt und in Indien, Süd-Afrika [1], Nordamerika, Frankreich und anderen Ländern in allen Bergbausparten gleichartige Erscheinungen und Katastrophen bestätigt gefunden.

Irgendwelche Anhaltspunkte für etwaige Abwehrmaßnahmen gegen Gebirgsschläge hat damals das Ausland nicht geben können, zumal da u. a. JARLIER den Gebirgsschlägen im Fuveau-Becken in Südfrankreich ausschließlich tektonischen Ursprung beimaß. Wir fingen deshalb mit der dem Deutschen eigenen Gründlichkeit an, selbst nach Bekämpfungsmaßnahmen bzw. nach einem „Allheilmittel“ zu suchen, nachdem die Gebirgsschläge — besonders im ober-schlesischen Nord- und Zentral-Revier — an Zahl und Stärke überhandnahmen, als die Unfallziffer wuchs und die Vernichtung ausgedehnter Grubenräume zu einer Stilllegung ganzer Baufelder führte.

Im Jahre 1924 rief man vom Grubensicherheitsamt Berlin aus am Oberbergamt Breslau den Ausschuß „zur Klärung der Ursachen der im ober-schlesischen Bergbau auftretenden Gebirgsschläge“ ins Leben, scherzhaft „Wackelkommission“ genannt, an dessen Arbeiten ich als Sachberater öfters teilnahm. Dieser Ausschuß gab im Jahre 1932 in der Zeitschrift für das Berg-, Hütten- und Salinenwesen „Richtlinien zur Bekämpfung und Verhütung von Gebirgsschlägen“ heraus; sie beruhen auf rein empirischer Grundlage und sind später in Verfolg planmäßig angelegter markscheiderischer abbaudynamischer Feinmessungen von mir ergänzt, erweitert und in der bekannten Gebirgsschlag-systematik [2] zusammengefaßt worden.

Gebirgsschläge treten auf

a) innerhalb ein und desselben Flözes:

1. infolge zu starker Durchörterung von Feldesteilen mit Strecken, Fall 1;
2. wenn der Ablauf der einer Abbau- oder Strebfront vorauswandernden Druckzone gehemmt wird, z. B. beim Abbau von Kohleninseln bestimmter Form und Größe, Fall 2;
3. als Zonen erhöhten Druckes, die jeder fortschreitenden oder gestundeten Abbau- oder Strebfront vorgelagert sind, Fall 3;



- b) in Form wechselseitiger Beeinflussung zweier oder mehrerer Flöze:
1. als Folge der Druckwirkung im Vortrieb befindlicher oder gestundeter Abbaufrenten, im folgenden auch als „Abbaukantenwirkung“ bezeichnet, Fall 4;
  2. in Flözteilen, unter oder über denen in liegenden oder hangenden Kohlenbänken Restpfeiler anstehen, im folgenden als „Restpfeilerwirkung“ bezeichnet, Fall 5.

Diese Systematik ist auch heute noch in allen Punkten gültig, und ich werde später an dem Beispiel eines erst vor Jahresfrist auf einer Ruhrzeche erfolgten Gebirgsschlages zeigen, daß man bei Beachtung der Gebirgsschlagsystematik diesen Schlag hätte vermeiden können.

#### MARKSCHEIDERISCHE FEINMESSUNGEN ZUR BEURTEILUNG VON GEBIRGSDRUCKAUSWIRKUNGEN

SPACKELER [3] hat damals auf Grund makroskopischer Befunde in den Strecken und Abbaubetrieben in der Zeitschrift „Glückauf“ eine ganze Aufsatzfolge herausgebracht und im Anschluß an die Gedanken von WEBER Mittel und Wege zur Verhütung von Gebirgsschlägen angegeben. Neben der Erarbeitung wertvoller praktischer Erfahrungen wurden aber auch markscheiderische Feinmessungen zur Beurteilung von Gebirgsdruckauswirkungen herangezogen. Mit der Durchführung solcher Messungen begann im Jahre 1930 Markscheider HOFFMANN [4] anfangs mit noch nicht allzu hohen Genauigkeitsansprüchen. WEISZNER [5] setzte 1932 die Arbeiten fort mit erheblich höheren Genauigkeiten. Er führte an Festpunkten, die in der Firste und in der Sohle im Nebengestein vermarktet waren, kurzfristige, absolute Messungen durch. Kurzfristig hießen sie, weil sie während der Schicht mehrfach wiederholt wurden und sich höchstens über ein bis zwei Wochen erstreckten. Absolut waren die Messungen, weil sie immer an unveränderliche feste Punkte angeschlossen werden müssen und daher lage- und höhenmäßig jede Veränderung der Beobachtungspunkte in Strecke und Streb anzeigen. Im Gegensatz hierzu standen Relativmessungen, die ohne Lage- und Höhenanschluß stattfanden und deshalb nicht zu größerer Bedeutung gelangten.

Vom Jahre 1936 an führte ich langfristige, absolute Messungen ein, die sich auf mehrere Monate bis zu einem Jahr Dauer erstreckten. Dem Abbaufortschritt entsprechend, sind die Messungen nur alle zwei bis drei Wochen wiederholt worden. Die Messungen wurden systematisch ausgebaut und rationalisiert, d. h., man vermied allmählich die zeitraubenden Polygonmessungen, bei denen sich die Winkel wegen der Zentrierfehler nur mit  $\pm 3''$  bis  $5''$  Genauigkeit messen ließen. An die Stelle der krummlinigen Anschlüsse traten lange Förder- oder Wetterwege, die sich beim Strebbau, z. B. im Ruhrbezirk, mehrere 100 m lang nach der Stunde auffahren ließen. Dafür wurden die Längenmessungen genauer.

Aber man erkannte Ende der 30er, Anfang der 40er Jahre, daß die markscheiderischen Feinmessungen immer nur das Bewegungsbild im Streb- oder



Streckenraum erfaßten und höchstens bis zu 1 m Tiefe ins liegende oder hangende Nebengestein eindringen, so daß immer nur in der entspannten Zone, die sich um Abbauhohlräume bildet, gemessen wurde. Außerdem konnten wir ja immer nur Senkungen und Hebungen, also Konvergenzen in offenen Strecken, sodann Längungen und Kürzungen der Festpunktlinien unter Tage messen. Wir blieben also stets an der Außenhaut der Hohlräume hängen und wußten so gut wie nichts über das Verhalten der höheren Hangend-, der tieferen Liegend-Schichten und der Kohle im Vorfeld des Strebs; und ebensowenig war uns über die Dichte und Zusammendrückbarkeit des Versatzes etwas bekannt, da wir ja nicht im Versatz selbst messen konnten. Das allerwichtigste aber war, daß wir die Größenordnung des Druckes in  $\text{kg/cm}^2$  nicht kannten, der vor der Strebfront auf der Kohle des Vorfeldes lastet, daß wir ferner nicht wußten, wie die Druckverteilung im Streb unter normalen Verhältnissen aussah, und bei welchem Zusatzdruck in  $\text{kg/cm}^2$  Gefahrenmomente unter anomalen Verhältnissen zu erwarten waren.

Es hat nie an Forschern gefehlt, die die Gebirgsschlaggefahr mit Einsatz eines einzigen Beobachtungsverfahrens voraussagen zu können glaubten. So haben die Amerikaner zuerst mit Schallgeschwindigkeitsmessungen, später mit der Aufnahme natürlicher Gebirgsgeräusche, subaudible noises (unhörbare Geräusche), auf mikroseismischer Grundlage versucht, Voraussagen für den Eintritt von Gebirgsschlägen zu machen. Die Versuche schlugen fehl. Berichtet hat hierüber MAINZER [6]. In seiner Schlußbetrachtung schlägt MAINZER vor, die festgestellten Mikroseismen in Beziehung zum vorhandenen Energieinhalt zu setzen. Von der Energie soll dann über den Weg der Kraft auf diese selbst und die Druckwirkung geschlossen werden.

Diesen Weg scheint neuerdings Dr. KVAPIL [7] beschreiten zu wollen. In seiner Arbeit „Neue Ansichten in der Theorie des Gebirgsdrucks und der Gebirgsschläge“ geht KVAPIL davon aus, daß die im Gestein auftretenden, über der Elastizitätsgrenze liegenden Spannungen die Potentialenergie in andere Energien, z. B. in Wärme, in elektrische oder Strahlungs-Energie umwandeln. Er definiert den Gebirgsschlag wie folgt: „Es kommt zu Gebirgsschlägen dann, wenn sich infolge von Spannungsanreicherungen unter Tage die angereicherte Potentialenergie plötzlich in Arbeit umwandelt, sobald die Spannungen über der Elastizitätsgrenze des Gesteins liegen“. In dieser Arbeit wird betont, daß sich die bisherigen Gebirgsschlagforschungen „im Bereich der Folgen des Gebirgsdrucks“ abspielen. KVAPIL will die Ursachen des Gebirgsdrucks, nicht die Folgen messen, und zwar nicht etwa mit den bisher von uns verwendeten Instrumenten und Geräten. Seine geplante Instrumententechnik gibt er allerdings nicht an, sondern beschränkt sich in dem 132 Seiten umfassenden Büchlein auf Versuche mit Gipsmodellen und auf spannungsoptische Untersuchungen, deren Heranziehung ja auch für uns nichts Neues bedeutet und deren Anwendungsgrenzen wir zur Genüge kennen.

Hier empfiehlt sich der Hinweis darauf, daß wir die Ursachen der Gebirgsschläge bereits gut kennen. Man wird immer vom Eingriff des Bergmanns in



den Gebirgskörper ausgehen müssen, um die Voranzeigen der schädlichen Gebirgsdruckauswirkungen, ihr Anwachsen im Bereich der beanspruchten Gesteinsschichten und deren Verhalten kennenzulernen. KVAPIL kündigt am Schluß des Büchleins eine größere Arbeit auf dem Gebiete der Elastizität und Festigkeit der Gesteine an. Wir glauben, daß er sich manches sparen kann, wenn er die ausgezeichnete Dissertation von EVERLING [8] gründlich studiert, die im Rahmen der Forschungsgemeinschaft Neumühl am Aachener Lehrstuhl für Markscheidewesen im Jahre 1957 entstanden ist.

Schon eingangs wurde von der Suche nach einem „Allheilmittel“ gegen Gebirgsschläge gesprochen. Dieses Allheilmittel ist bis heute nicht gefunden worden, und es wird meiner Überzeugung nach auch nicht gefunden werden. Aber man ist heute in der Lage, die Ursachen der Gebirgsschläge besser zu erkennen und die Abwehrmittel wirksamer zu gestalten. Wenn dem Thema dieser Arbeit zufolge dem neuesten oder derzeitigen Stand der Gebirgsschlagforschung die „Ergebnisse der Arbeiten der Forschungsgemeinschaft Neumühl“ gleichgesetzt werden, so könnte angenommen werden, Altbekanntes werde vorgetragen. Aber wer hat mit Bewußtsein und klarem Überblick über das von der Forschungsgemeinschaft Erreichte in Zeitschriften, Vortragsveröffentlichungen und Dissertationen die 455 Druckseiten gelesen, die diesen Stoff in den Jahren 1956 und 1957 behandeln? Die Vorträge der hauptsächlichsten Mitarbeiter der Forschungsgemeinschaft Neumühl — ich nenne sie alphabetisch geordnet — EVERLING, GRÄBSCH und HOFFMANN, JACOBI, JANSSEN und NIEMCZYK fanden am 17. Oktober 1956 statt. Inzwischen wurden einige der gewonnenen Erkenntnisse über den Druck auf Flöz und Versatz, über Gesetzmäßigkeiten in den Ergebnissen der Versatzdruckmessung und über die Brucherscheinungen in dem durch Abbau beanspruchten Gebirgskörper erweitert. Über das letztgenannte Thema hat Dr. O. JACOBI berichtet [9]. Wenn wir die Dinge genau nehmen, müssen wir uns sogar der Äußerung des Vorsitzenden der Forschungsgemeinschaft Neumühl, Oberbergamtsdirektor SANDERS, anschließen, die dieser anlässlich der letzten Tagung des Ausschusses für Gebirgsdruckforschung in Essen am 13. 12. 1957 getan hat, wonach „die Gesamtauswertung aller Neumühler Messungen noch einige Zeit in Anspruch nehmen werde“.

Wir müssen nun versuchen, in das Riesenmosaik der Forschungsarbeiten auf Neumühl ein System hineinzubringen, um möglichst das herauszuschälen, was für die Gebirgsschlagforschung von Bedeutung ist. Das ist nicht ganz einfach, denn im Grunde genommen, tragen feinstratigraphische und kleintektonische Aufnahmen, ferner technisch-mechanische Messungen an Versuchs- und Probekörpern, sodann elektromechanische Feinmessungen in Bohrlöchern, im Gestein und im Versatz ebenso zur Lösung der anfallenden Gebirgsschlagprobleme bei wie die markscheiderischen Meßverfahren sowie die markscheiderischen Ankermessungen zur Feststellung von Aufblätterungen und Verdichtungen in den hangenden Schichten.

Es wird zweckmäßig sein, den Wert der einzelnen Untersuchungsverfahren und ihre Bedeutung für die Gebirgsschlagbekämpfung kurz zu erläutern.



## UNTERSUCHUNGSVERFAHREN UND IHRE BEDEUTUNG FÜR DIE GEBIRGSSCHLAGBEKÄMPFUNG

Bild 1 zeigt das Untersuchungsfeld Neumühl, in dem das Flöz Girondelle von 1952 bis Januar 1956, also vier Jahre lang, abgebaut wurde. Der Inhalt beträgt 1 Mill. t Fettkohle. Die Mittelstrecke ist rund 800 m lang und vorweg aufgefahren worden, damit Beobachtungen vor der Strebfront stattfinden konnten. Nördlich und südlich stehen zwei Strebfelder im Verhieb mit geradem Abbaufortschritt, der 1,5 m täglich beträgt. Der Abbau erfolgt mit Blasversatz; da das Flöz Girondelle 1,3 m mächtig ist und  $a = 0,5$  gesetzt werden kann, so ist  $s = 0,65$  m; weil aber eine Vollfläche nicht erreicht wird bei 800 m Teufe, beträgt  $s$  nur 0,53 m. Das Einfallen ist schwach mit 3 bis 5° nach Süden gerichtet. Die Mittelstrecke wurde unter der Schleuse des Rhein-Herne-Kanals angelegt, die gleichmäßig abgesenkt wird. Nach erfolgtem Abbau der zweiten und dritten Bauhöhe wurden anschließend die erste und danach die vierte Bauhöhe abgebaut. Die schwarzen kleinen Kreise bezeichnen elektrische Konvergenzgeber, die kleinen weißen Kreise elektrische Versatzdruckdosen, die Doppelkreise lotrechte oder schräge Kernbohrungen von ca. 30 m Höhe oder Tiefe. Im ganzen sind rund 20 Bohrlöcher im Untersuchungsfeld Neumühl und im Nachbarfeld Concordia gestoßen worden. Die großen Kreise bezeichnen die Hauptmeßorte in der dritten und vierten Bauhöhe, in denen elektrische Geber horizontal und schräg, in der Kohle waagrecht, im Nebengestein schräg eingebaut waren. Der Meßraum, in dem die elektrischen Geber-Ergebnisse aufgenommen und registriert werden, ist am Beginn der Mittelstrecke eingebaut. Zum elektrischen Meßverfahren sei folgendes bemerkt.

Das angewandte Verfahren ist das МАИНАК-Dehnungssaiten-Verfahren. Jede in einem Geber auftretende, noch so kleine Längenänderung wird auf eine dünne Stahlsaite übertragen, die sich durch einen magnetischen Impuls in Schwingungen versetzen läßt, deren Frequenz sich mit der Längung ändert. Die Schwingungen der Saite erzeugen in einem Elektromagneten eine elektrische

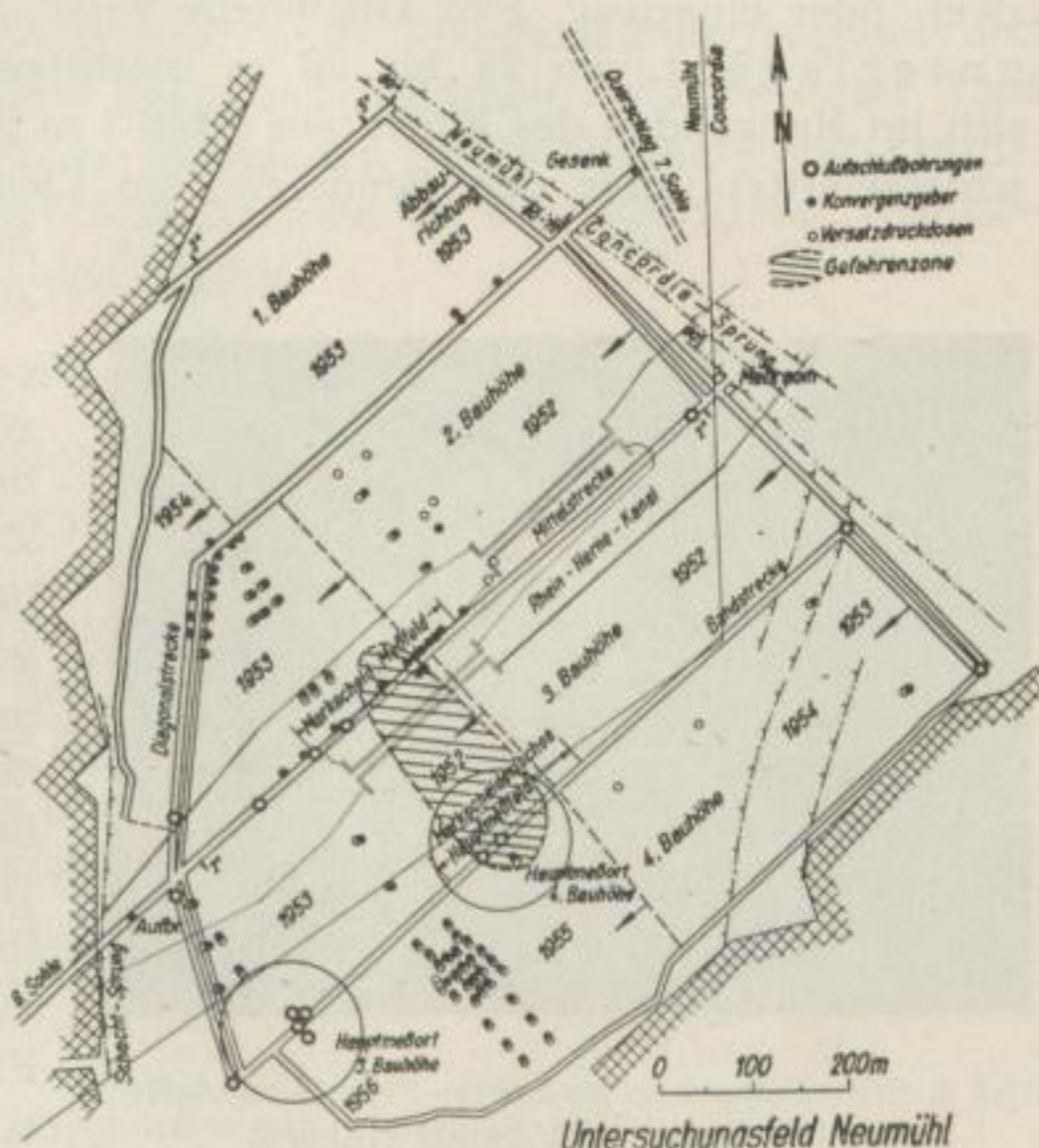


Bild 1. Abbau des Flözes Girondelle  
im Untersuchungsfeld Neumühl



Schwingung gleicher Frequenz, die durch ein beliebig langes Kabel zum Empfangsgerät im Meßraum geleitet wird. Dort wird die Schwingung mittels einer abstimmbaren Vergleichssaite (BRAUNsche Röhre) als Skalenwert abgelesen.

Man mißt in Größenordnungen von 1/100 bis 1/10 000 mm und mit Einschaltung einer Feder von 1/1000 bis 3 mm. Im letzteren Fall erzeugt die Längung oder Verkürzung der Feder eine Kraft, die von einem Zug- oder Druckkraftgeber in  $\text{kg/cm}^2$  gemessen wird.

Die markscheiderischen Meßfelder sind im Bild 1 ebenfalls besonders kenntlich gemacht. Die Bohrkern wurden sowohl geophysikalisch wie geologisch-petrologisch und abschließend gesteinsmechanisch in der Forschungsstelle Sterkrade der Gutehoffnungshütte AG untersucht, teils im triaxialen Gerät, teils zwei- oder einachsigen Flöz Girondelle wird im Untersuchungsfeld über- und unterlagert von 24 bis 28 m mächtigem Arkosesandstein, doch schiebt sich im Hangenden des Flözes ein 0 bis 3 m mächtiges Schieferthon- bzw. Sand-schiefermittel unter den Sandstein, im Liegenden ein etwa 1 m mächtiger Schieferthonpacken über den Sandstein.



Bild 2. Schieferpacken zwischen Flöz Girondelle und der hangenden Sandsteinbank

Bild 2 zeigt in der bereits erwähnten Mittelstrecke das aus gebändertem Schieferthon bestehende Zwischenmittel. Es versteht sich daher, daß das Flöz als gebirgsschlaggefährlich angesprochen wurde, zumal da sich im Nachbarfeld Concordia in dem mit Blindortversatz gebauten Feld in den Jahren 1949 bis 1951 einige Gebirgsschläge mit tödlichen Unfällen ereignet hatten. Einflüsse höher oder tiefer liegender Flöze auf das Untersuchungsfeld scheiden aus.

### Die geologische Aufnahme

Daß ein von einer mächtigen (etwa ab 10 bis 12 m Stärke) Sandsteinschicht über- und unterlagertes Flöz — man kann auch sagen, über- oder unterlagertes Flöz — gebirgsschlaggefährdet ist, wird allgemein unterstellt. Aber schon hier müssen wir uns fragen, um welchen Sandstein, petrologisch und tektonisch gesehen, es sich handelt. Aus diesem Grunde ist eine sehr sorgfältige Gebirgsaufnahme aller offenen Streckenstöße, des Hangenden und Liegenden, von Anfang an notwendig. Hat der Markscheider keine Zeit für derartige Aufnahmen, bei denen es auf Körnung, Textur, auf massige, grobbankige, dünnbankige und plattige Ausbildung des Sandsteins, auf Schräg- und Kreuzschichtung, auf Einlagerungen von Schieferthonen, Kohlenschmitzen usw., auf die Trennflächen im Gebirgskörper als Schichtflächen, Risse, Klüfte, Störungen und



noch auf vieles andere ankommt, so muß der Fachgeologe die Arbeit tun. Die geologischen Arbeiten wurden von Professor HAHNE und Dr. HÜNERMANN [10] ausgeführt.

### Gesteinsmechanische Untersuchungen

Über die von der Forschungsgemeinschaft Neumühl angewandten gesteinsmechanischen Untersuchungsverfahren kann ich nur ganz kurz berichten. Wesentlich ist, daß es EVERLING in der Forschungsstelle Sterkrade gelang, die Anwendung der Elastizitätstheorie auf feste Karbongesteine, und zwar einmal für alle quantitativen Druckmessungen in unverritzten Karbongesteinen und in der Kohle, zum zweiten zur Auswertung von Bohrlochverformungsmessungen, sicherzustellen. Zu diesem Zweck bestimmte er die Größen „Elastizitätsmodul“, „Poissonzahl“, „Elastizitätsgrenze“ und „Bruchspannungszustand und -winkel“ unter solchen dreiachsigen Spannungszuständen, wie sie unter Tage auftreten können. Das Ergebnis dieser Messungen führte erstmalig zur Ermittlung des Gesteinsdruckes in  $\text{kg/cm}^2$ . Wir kommen bei Behandlung der Gebirgsschlagfrage auf praktische Wertzahlen zurück.

### Elektrische Fernmeßgeräte

Die Einführung der von der MAIHAK AG in Hamburg gebauten elektrischen Fernmeßgeräte ist noch sehr jungen Datums. Die Firma hat für die Arbeiten der Forschungsgemeinschaft Neumühl die ursprünglich für die Ermittlung von Betonspannungen und des Bodendrucks beim Talsperrenbau dienenden Geräte umgebaut und auf Anregungen der Sachbearbeiter Dr. JACOBI und Dipl.-Ing. BRÄNDLE für die Aufgaben der Gebirgsdruckforschung brauchbar gestaltet. Über die Einrichtungen selbst in ihren vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten kann die Abhandlung von JACOBI und BRÄNDLE im „Glückauf“ 1956, Heft 13/14, nachgelesen werden. Die nächsten Bilder zeigen einige von der Forschungsgemeinschaft selbst entwickelte Geber, auf deren Wirkungsweise bereits hingewiesen wurde.

#### *Hangendgeber*

Zwei Anker werden mit 90 cm Abstand 1 bis 8 m tief im Hangenden befestigt (Bild 3).

Die Änderungen der waagerechten Entfernung der beiden Ankerköpfe werden über ein Parallelogrammgestänge mit einem MAIHAKgeber gemessen. Die Anker sind durch eine Traverse miteinander verbunden.

Zwei Formen von Hangendgebern werden in den Bildern 4 und 5 gezeigt.

#### *Druckdose mit Konvergenzgeber im Versatz*

Die Versatzdruckdosen geben Aufschluß über die zunehmende Belastung des Blasversatzes mit zunehmendem Abstand vom Strebstoß (Bild 6).

Eine Drucksetzungskurve des Versatzes wird in Bild 7 gezeigt. Die Ordinate gibt den Druck in  $\text{kg/cm}^2$  an, die Abszisse den Grad der Zusammendrückung in cm.



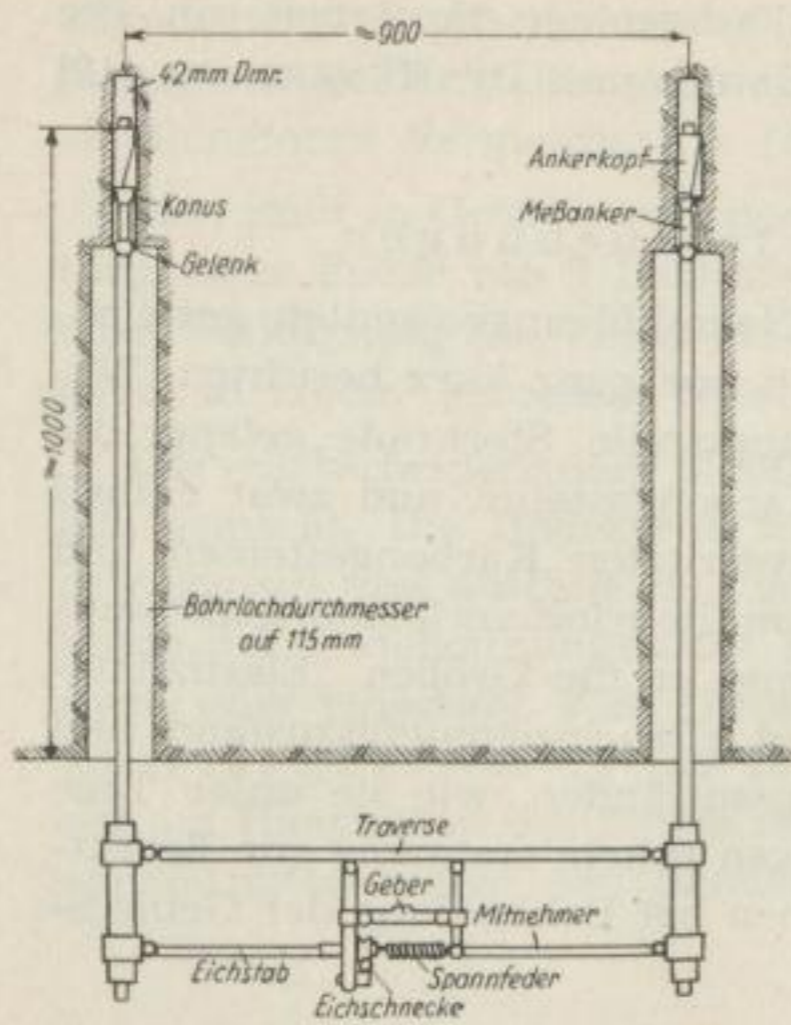


Bild 3. Prinzip der Wirkungsweise eines Hangendgebers (nach O. JACOBI)

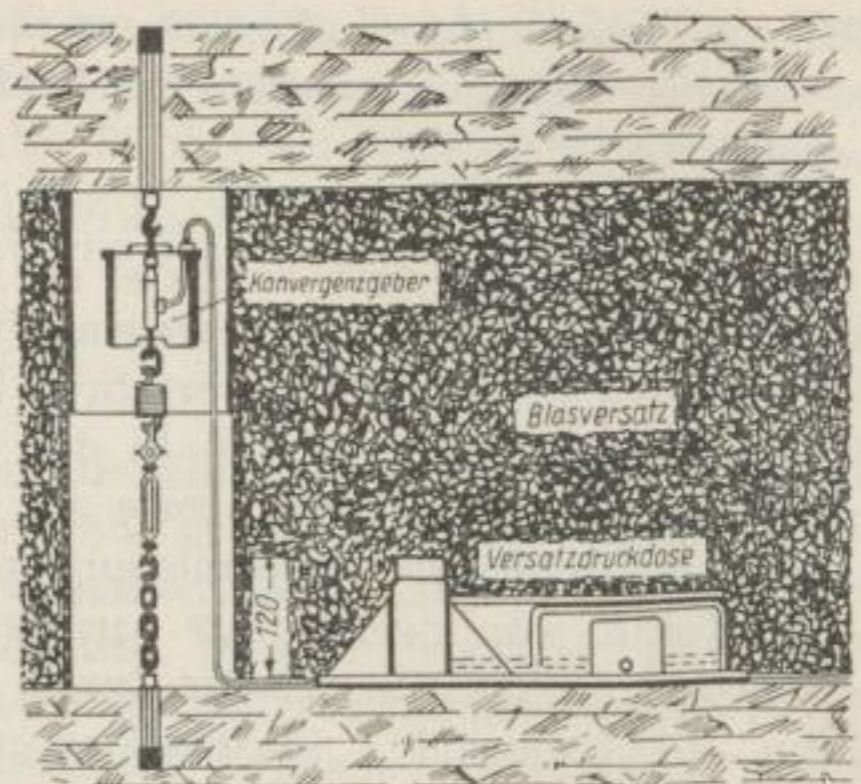


Bild 6. Prinzip der Wirkungsweise von Druckdose und Konvergenzgeber im Versatz (nach O. JACOBI)

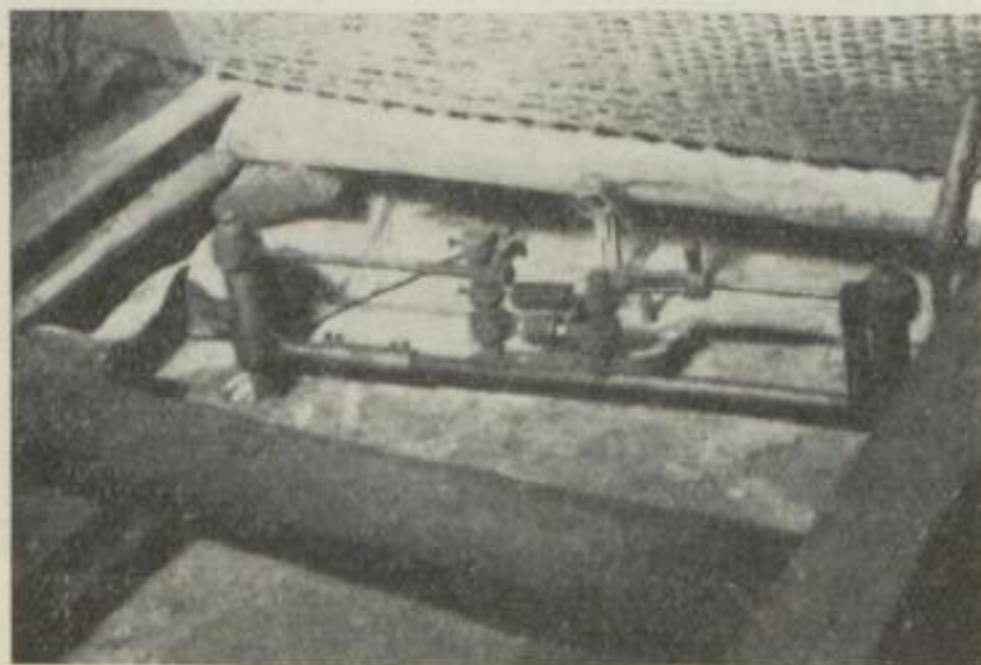


Bild 4. Das Parallelogrammgestänge eines Hangendgebers (nach O. JACOBI)

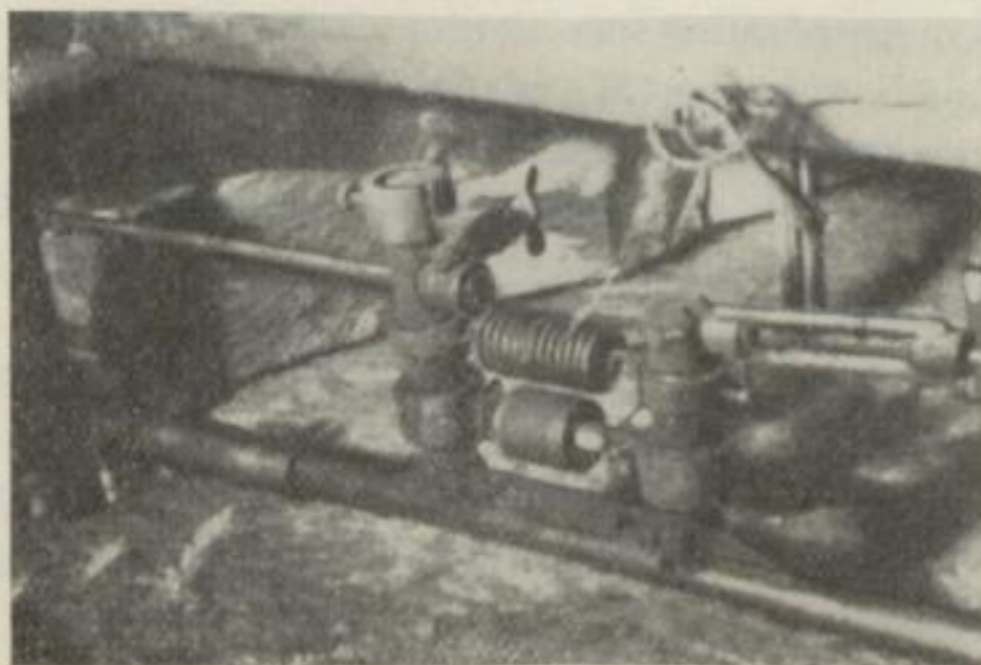


Bild 5. Zug- und Druckkraftgeber eines Hangendgebers (nach O. JACOBI)

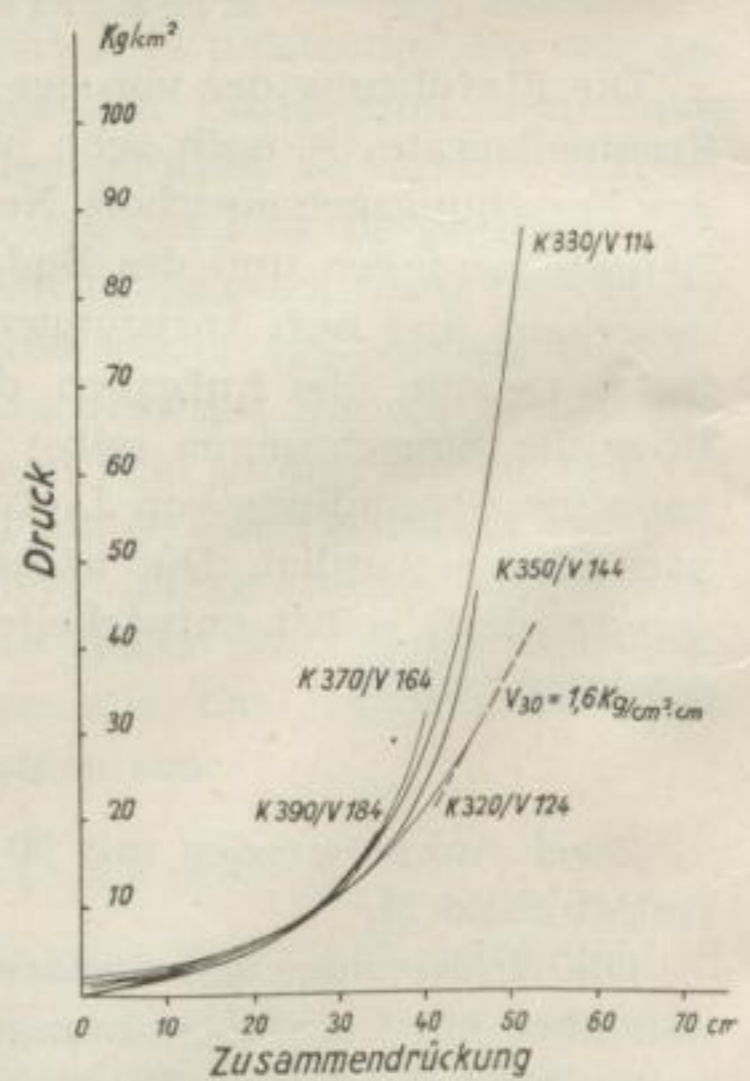


Bild 7. Drucksetzungskurven des Versatzes (nach O. JACOBI)



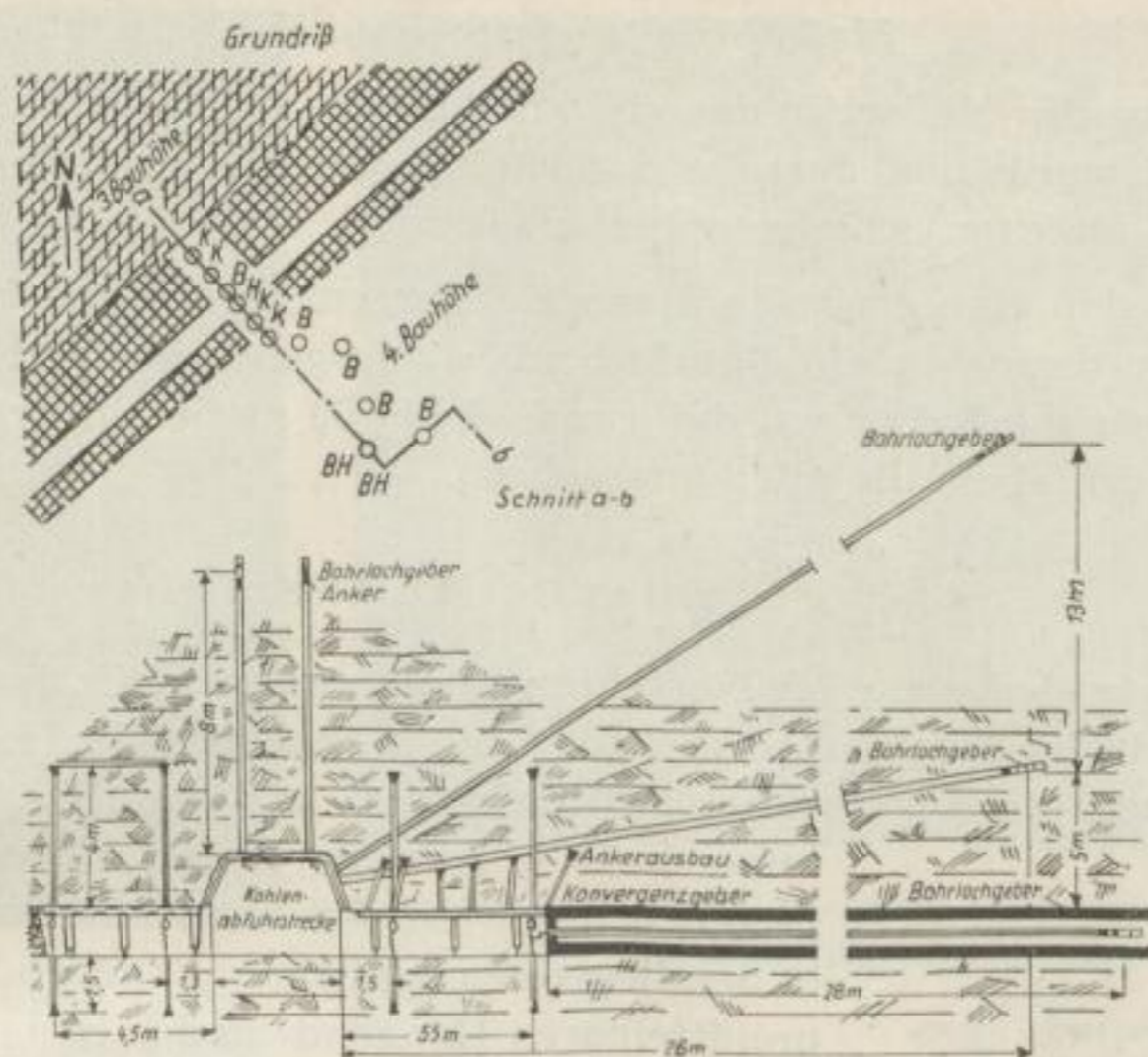


Bild 8. Einrichtung des Meßortes 4. Bauhöhe (nach O. JACOBI)

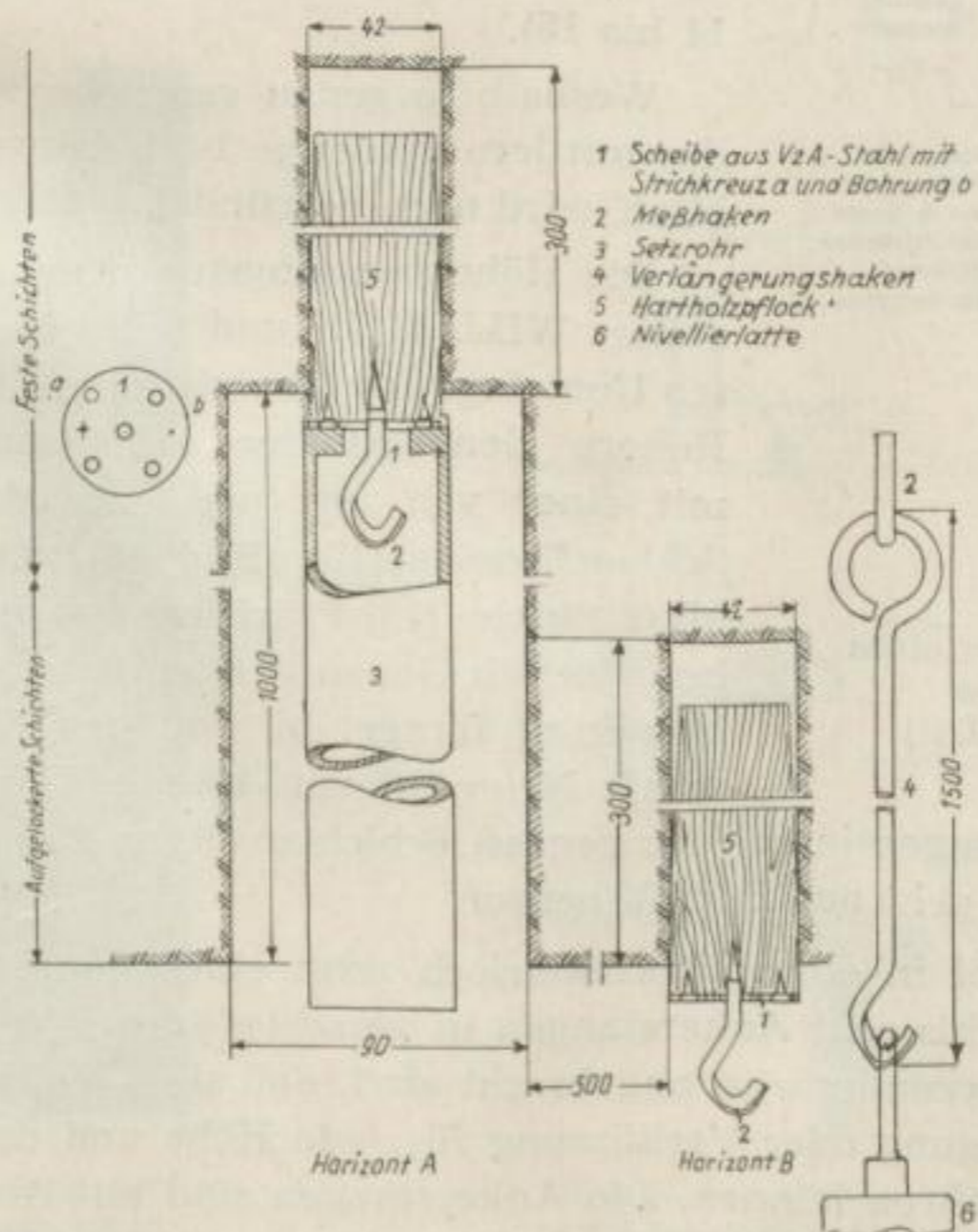


Bild 9. Vermarkung eines Hangendpunktes (nach W. GRÄBSCH)



### Meßabschnitt vierte Bauhöhe

Im Bild 8 ist das Meßort in der vierten Bauhöhe dargestellt, das mit Absicht so eingerichtet wurde, daß dort der Sandstein unmittelbar auf der Kohle auflag, also ohne den üblichen Schiefertonpacken (Bild 1).

Wir sehen, daß eine große Zahl von Konvergenzgebern und Hangendgebern eingebaut war, dazu war ein Bohrloch mit Längsgeber in der Kohle versehen und zwei Schrägbohrlöcher wurden rund 30 bis 50 m tief in den festen Sandstein eingebracht, ebenfalls mit Längsgebern.

### Markscheiderische Meßverfahren

Die markscheiderischen Meßverfahren sind bekannt. Wir haben allerdings die Genauigkeit der Messung sowohl für Längen- als auch für Höhenmessungen gesteigert. Auch die Vermarkung wurde anders gestaltet. Dr. GRÄBSCH [11] setzte in 10 m Abstand je vier Meßpunkte ein, und zwar 1,3 m tief in den hangenden und ebenso tief in den liegenden Sandstein; daneben ließ er je einen unmittelbaren Hangend- und Liegendpunkt anbringen. Dies geht aus den Bildern 9 und 10 hervor.

Auch die Meßeinrichtung war vom Aachener Markscheide-Institut neu gestaltet worden (Bilder 11 bis 15).

Weshalb so genau gemessen werden sollte, daß der mittlere Fehler je 10 m Länge unter  $\pm 0,4$  mm blieb, wird noch begründet.

Die Höhenmessungen wurden mit dem Feinnivellier WILD N III und mit 1,5 m langen, geprüften Untertage-Invarband-Hängelatten durchgeführt. Höhere Genauigkeiten erbringen die Messungen mit einer von uns neu entwickelten Präzisions-Schlauchwaage [12] (Bild 16), die ebenso wie die MEISZERSche [13] Präzisionswaage (Bild 17) im rauen Betrieb Genauigkeiten von 20 bis 30  $\mu$  sichert. Neu kam ferner die von der Forschungsgemeinschaft Neumühl entwickelte Einrichtung für Auf-

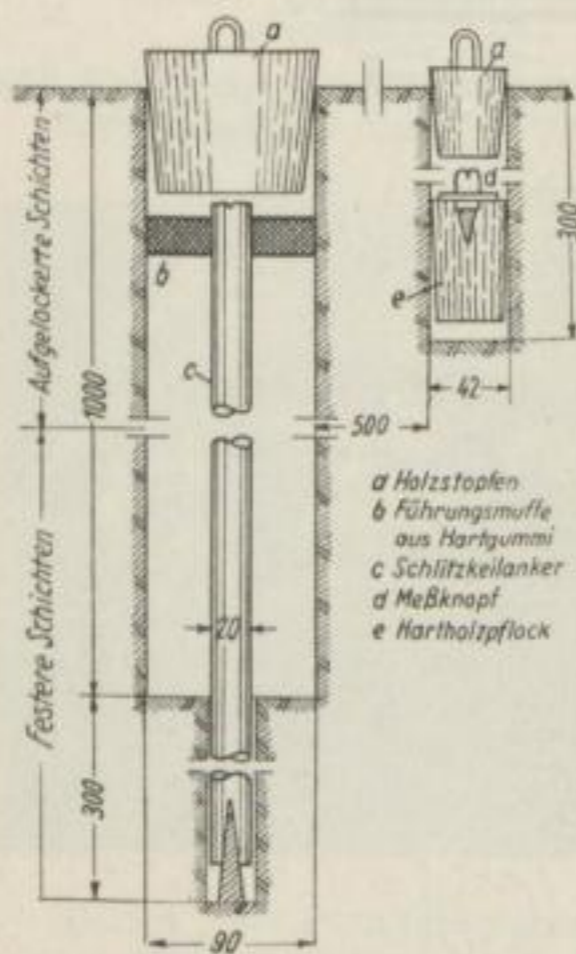


Bild 10. Vermarkung eines Liegendpunktes (nach W. GRÄBSCH)

blättermessungen in den hangenden Schichten bis zu 25 m Höhe hinzu. Das Messungsprinzip geht aus Bild 18 hervor.

Ein Ankerkopf in einem Hochbohrloch zeigt eine sinnreiche Konstruktion, derzufolge sechs bis acht Ankerstangen in verschiedenen Höhen von 2,55 m bis 22,9 m über Streckenfirste so angebracht sind, daß sie – vollkommen frei hängend – eine Längung oder Verkürzung für jede Höhe und damit für jede einzelne Schicht erfahren können. Die Ankerstangen sind mit Aufhängehaken und Nivelliermagnet versehen (Bilder 19, 20), so daß mit dem Nivellierinstrument jede Veränderung der Drahtlängen genau festzustellen ist.



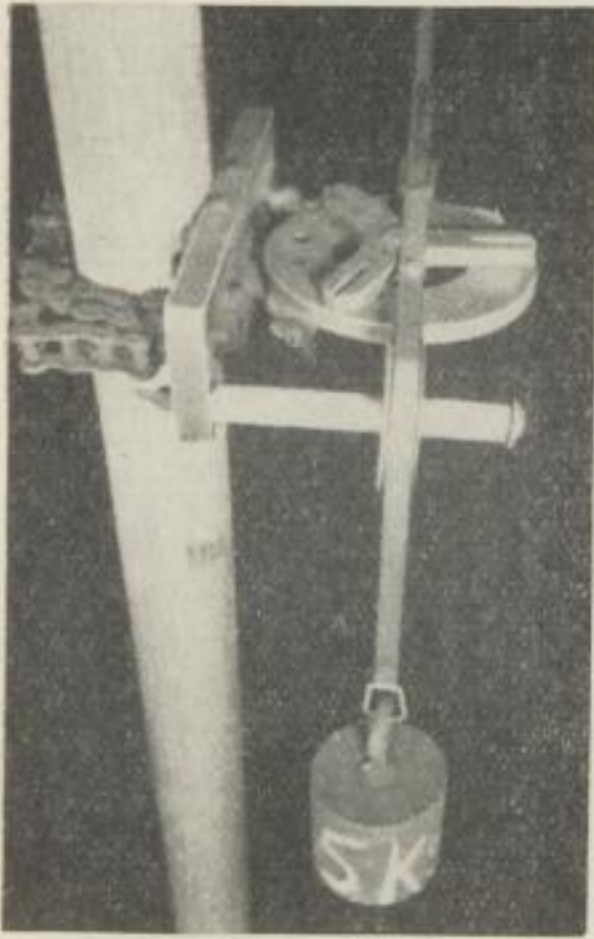


Bild 11. Meßeinrichtung für Präzisions-Längenmessungen. Anfangspunkt (nach W. GRÄBSCH)



Bild 13. Meßeinrichtung in der Bandstrecke (nach W. GRÄBSCH)

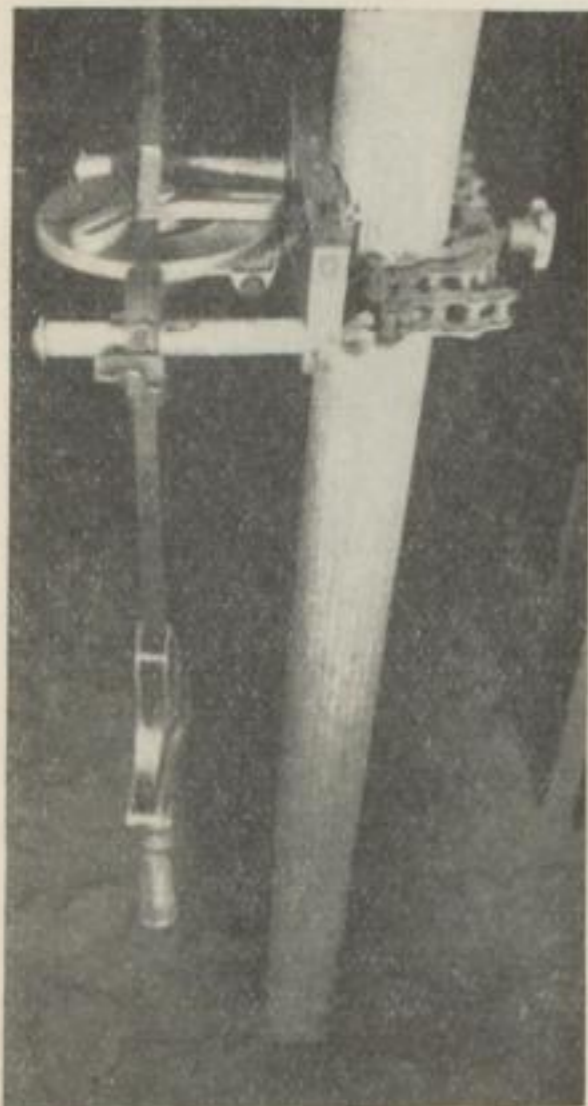


Bild 12. Meßeinrichtung für Präzisions-Längenmessungen. Endpunkt (nach W. GRÄBSCH)

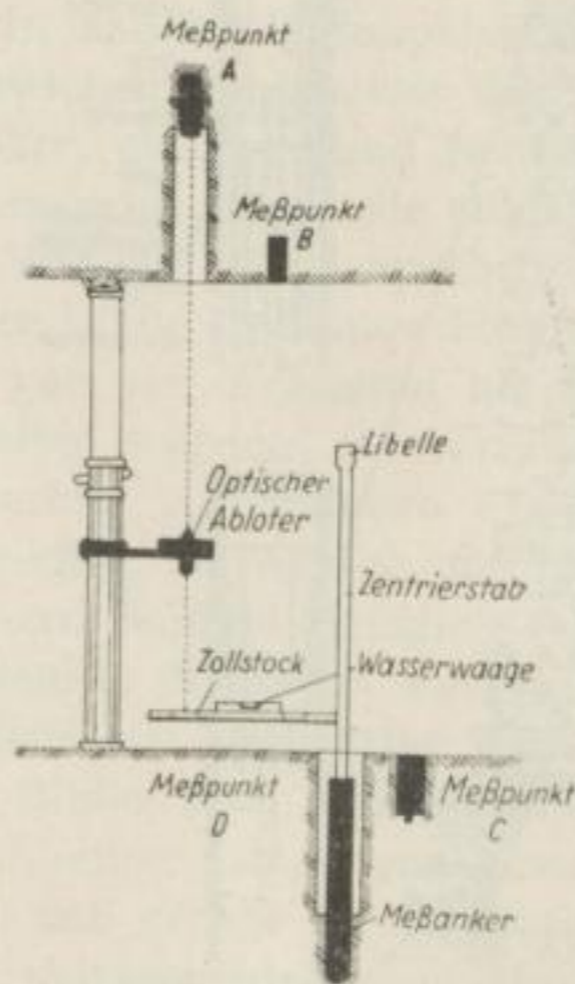


Bild 14. Prinzip der Durchführung einer Längenmessung (nach W. GRÄBSCH)





Bild 15. Einmessung eines Liegendpunktes (nach W. GRÄBSCH)

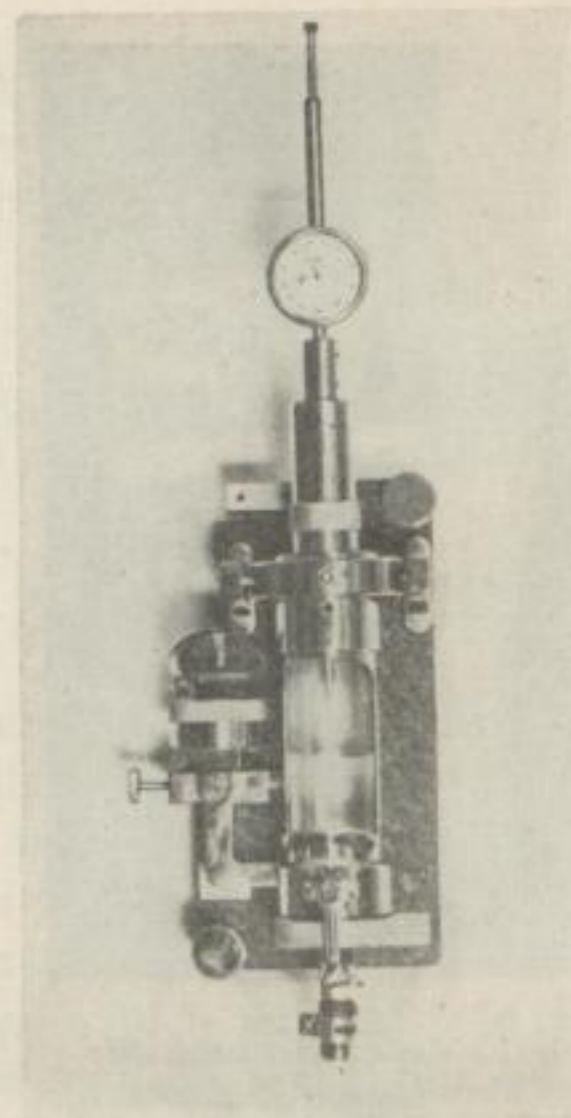


Bild 16 Präzisions-Schlauchwaage nach Professor Dr. NIEMCZYK

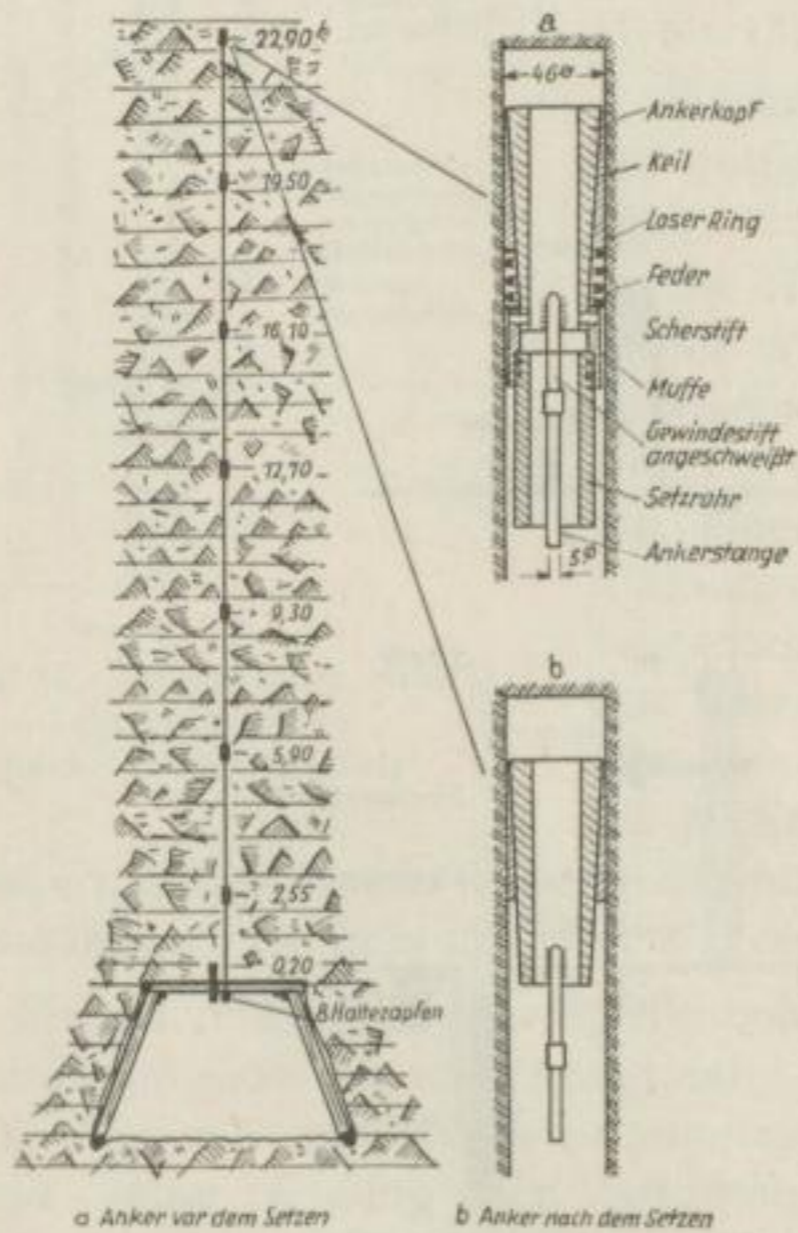


Bild 18. Prinzip einer Bohrloch-Längenmessung im Hangenden (nach O. JACOBI und E. BRÄNDLE)

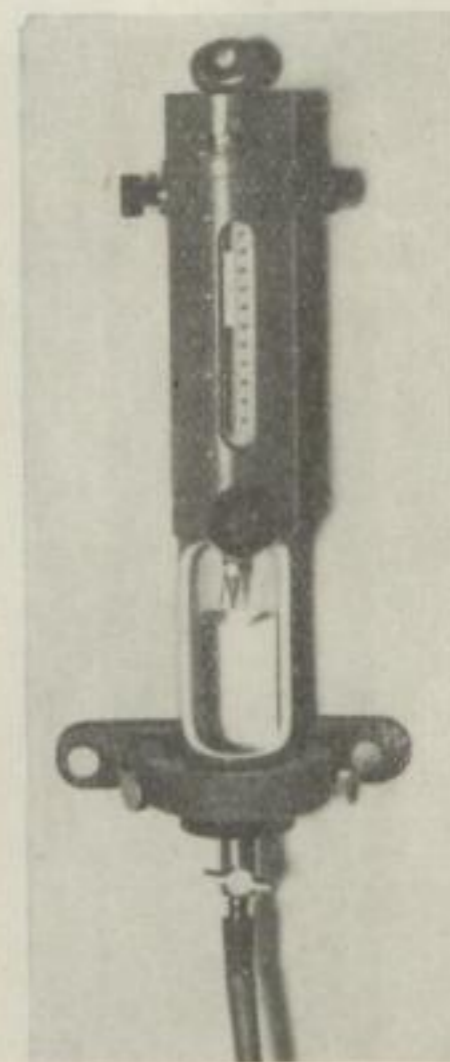


Bild 17 Präzisions-Schlauchwaage nach Professor Dr. MEISZER



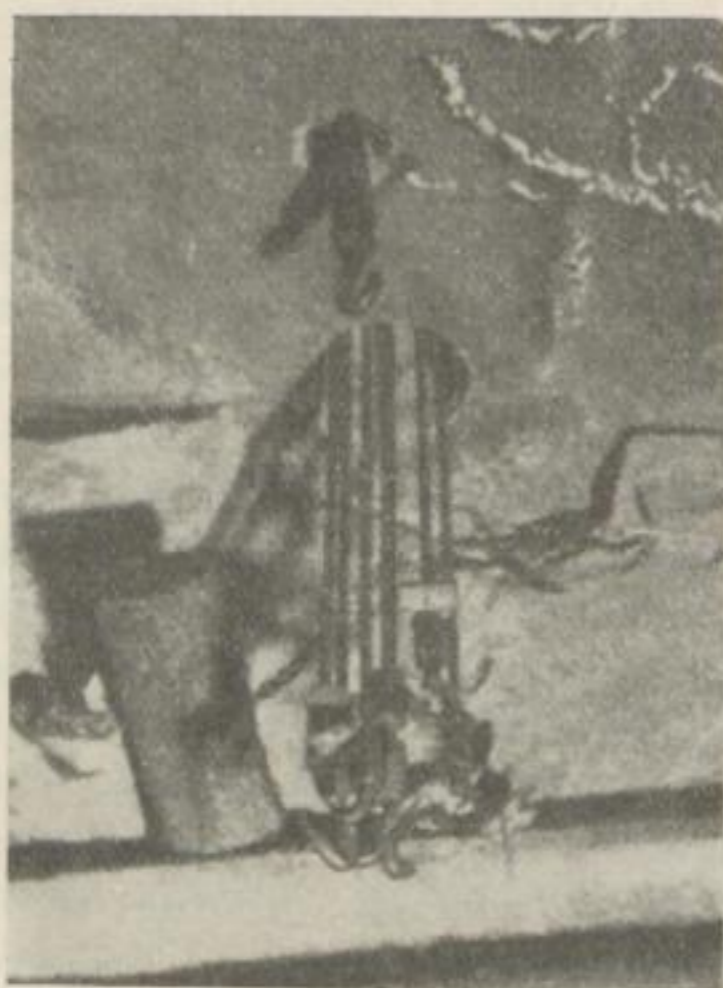


Bild 19. Die Ankerstangen eines Bohrlochlängungs-Meßgerätes (nach O. JACOBI und E. BRÄNDLE)

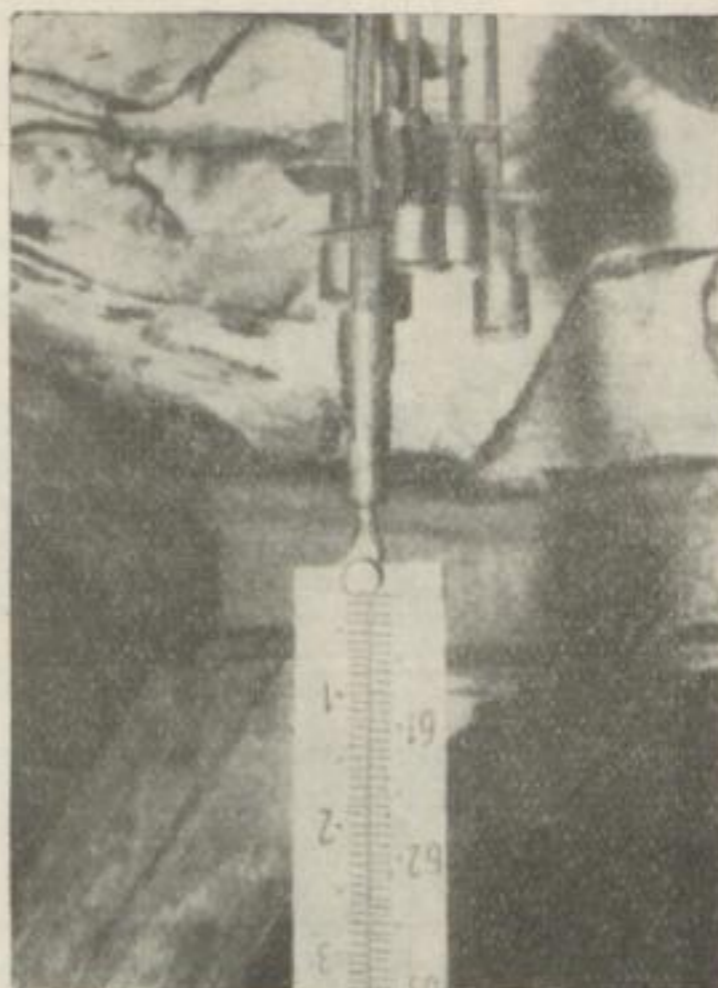


Bild 20. Aufhängevorrichtung der Nivellierlatte am Bohrlochlängungs-Meßgerät (nach O. JACOBI und E. BRÄNDLE)

### ERKENNTNISSE

Seit mehreren Jahrzehnten wissen wir, daß im Steinkohlenbergbau in der Hauptsache zwei Faktoren im Zusammenwirken miteinander den Gebirgsschlag heraufbeschwören: das Vorliegen mächtiger, massiger und feinkörniger Sandsteine und falsche Abbauführung. Letztere wird durch die eingangs erwähnte Gebirgsschlagsystematik gekennzeichnet. Wie aus Bild 1 ersichtlich, bauten wir auf Neumühl gleichmäßig in Richtung der Pfeile in beiden Bauhöhen 2 und 3 nach Südwesten zu ab. Die Strebfront war von Anbeginn bis zur Abbaubehendigung in derselben Richtung beibehalten worden; sie war damit stets so gestellt, daß sie nie parallel zu einer bereits vorhandenen Strecke, z. B. der Diagonalstrecke oder den Begrenzungsstrecken im Westen und Süden, verlief. Wie ich schon bemerkt habe, trat im ganzen Baufeld zwischen Flöz Girondelle und dem 24 bis 28 m mächtigen hangenden Sandstein ein bis zu 3 m, im Durchschnitt 1,2 m mächtiges Zwischenmittel aus Schiefertone oder Sandschiefer auf. Nur an der schraffierten Stelle des Bildes 1 lag der Sandstein unmittelbar auf dem Flöz auf, und zwar in einer Länge von etwa 300 m und einer Breite von 100 m. Wir sehen auch, daß gerade an dieser Stelle, die wir als Gefahrenzone bezeichnen, die beiden markscheiderischen Meßfelder eingerichtet wurden, ebenso das Hauptmeßort 4. Bauhöhe für die Durchführung elektrischer Fernmessungen. Und damit setzt der interessante Teil des Unternehmens ein.



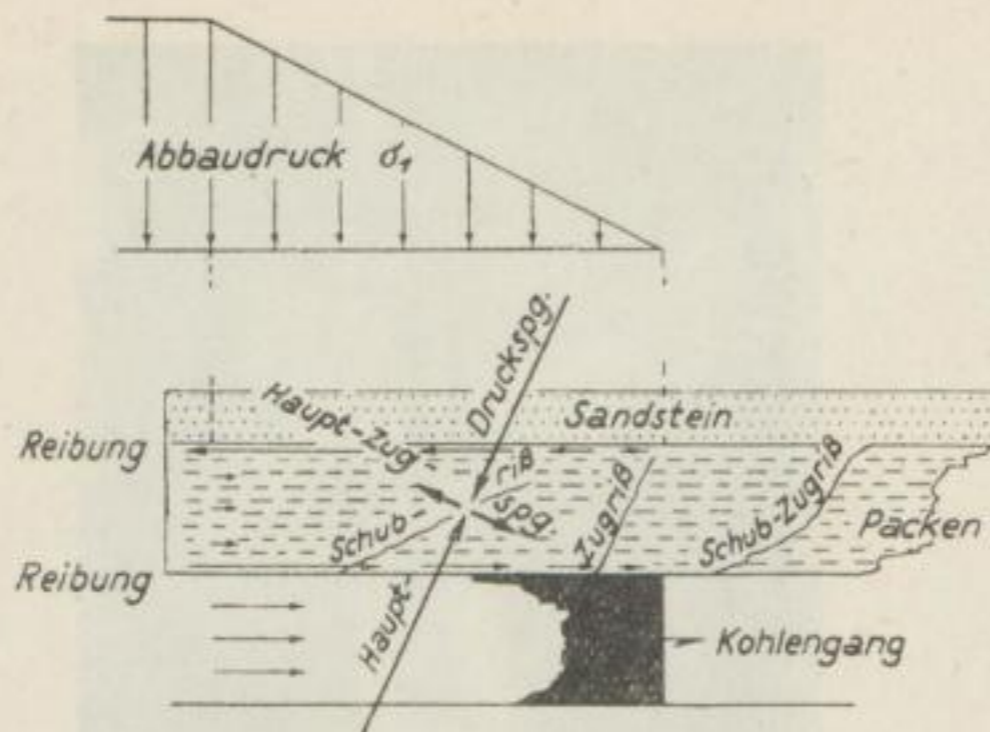


Bild 21. Beanspruchung des Hangenden  
(nach H. HOFFMANN)

Da wir, wie gesagt, alles taten, um eine falsche Abbauführung zu vermeiden, merkten wir beim gleichzeitigen Abbau der zweiten und dritten Bauhöhe sehr bald, daß der Schieferpacken zwischen Flöz und Sandstein einen günstigen Einfluß auf den Ablauf der Gebirgsbewegungen nahm. Unsere Messungen sowohl in den Strebefeldern wie in der Mittelstrecke zeigten einmal, daß mit zunehmender Abbaufächengröße die täglichen Bewegungen der Punkte im Schieferpacken nach dem jeweiligen Abbauschwerpunkt, also in den Versatz hinein, gerichtet waren und Werte von 1 bis 2 dm nachwiesen, zum zweiten, daß Gleitungen der Schieferbank und des überlagernden Sandsteins stattfanden. Professor HOFFMANN [14] erklärt diesen Bewegungsvorgang folgendermaßen:

Im vorliegenden Fall waren in der Kohle ein waagerechter Bohrlochgeber, ferner im Packen und im Sandstein je ein Hangendgeber eingebaut, wie er im Bild 21 gezeigt wurde. Die Bohrlochverengung, die der elektrische Geber anzeigte, begann schon 45 m vor dem Strebstoß, die Gleitung zwischen Flöz und Zwischenmittel setzte 30 m vor dem Strebstoß ein — der Geber zeigte 1 mm Bohrlochverengung an — und war fast während der gesamten Beobachtungszeit größer als der Kohlengang in der Mitte des Flözes, oder, anders ausgedrückt, die Reibung zwischen Flöz und Schieferpacken war geringer als die Reibung im Flözinneren. Das Flöz will also die Bank mitnehmen, doch wird diese wegen der auftretenden Reibung nicht so stark geschoben wie das Flöz selbst. Der Sandstein verhindert den Vorschub, es entstehen wiederum an der Oberfläche des Packens Reibungskräfte, die, wie die Pfeile zeigen, nunmehr in das Vorfeld gerichtet sind. Aus diesen beiden einander entgegenwirkenden Kräften und dem lotrechten Abbaudruck entsteht die Hauptdruckspannung. Auf ihr senkrecht steht die Hauptzugspannung. In der Halbierungslinie beider Spannungen liegen die wichtigen Schubspannungen. Unter der Wirkung der Schubspannungen entstehen die flachen Schubrisse. An der Strebkante kann der Packen ausweichen; es gibt daher keine Schubspannungen mehr, sondern nur noch Zugrisse, die sich in die vorgebildeten Schwächezonen der Schubrisse einfügen.

Wir sprechen in diesem Falle von einem pseudoplastischen Verhalten des Gebirgskörpers, das etwa mit einem Strömungsvorgang vergleichbar ist. Neben, ja sogar zugleich mit den elektrischen Geber- und Hangendanker-Messungen erfolgten die markscheiderischen Feinlängen- und Höhenmessungen. Wir hatten längst festgestellt, daß die früher angewandten Meßverfahren mit



Genauigkeiten von 1 : 50 000 der Längen nicht mehr ausreichen. Wenn daher auf größere Entfernungen — und hier lagen Streckenlängen bis zu 800 m vor — Millimetergenauigkeiten erzielt werden sollten, mußten wir auf 0,1 mm genau die Längen messen. Bis zu 440 m Vortrieb in beiden Bauhöhen waren immer nur Längungen in den wiederholt mit großer Präzision gemessenen Längen der Mittelstrecke festgestellt worden, wobei der Packen aus Schieferton oder

Sandschiefer eine Mächtigkeit von 1 bis 2 m aufwies. Am Beginn des ersten markscheiderischen Meßfeldes (Bild 1) lag das Meßpunktpaar 17 bis 18. Die Zuglängen betragen stets rund 10 m. Bei Punkt 17 war noch eine Schieferbank von 20 cm Stärke vorhanden, bei Punkt bzw. Meßanker 18 lag der Sandstein unmittelbar auf dem Flöz auf. Erst rund 90 m weiter nach Westen zu schob sich wieder ein mächtiger werdender Schieferpacken ein. Wie sich das Hangende verhielt, zeigt Bild 22. Die Längenänderungen der je 10 m langen Zugseiten 17 bis 18, 18 bis 19, 19 bis 20 und 20 bis 21 sind in Kurvenform dargestellt. Die stark ausgezogene senkrechte Linie stellt den Strebstoß dar. Wir erkennen bei Linie 17 bis 18 — bei Punkt 18 liegt der Sandstein auf — bis zum Kohlenstoß keine Bewegung, sodann bis 5 m hinter dem Strebstoß eine kleine Längenverkürzung und anschließend ein Längerwerden der Zugseite, deren Maximum 15 m, hinter der Abbaukante 32 mm beträgt. Linie 18 bis 19 zeigt vor dem Kohlenstoß unbedeutende Verkürzungen, dahinter geringfügige Längungen bis zu 15 mm. Auch in Linie 19 bis 20 finden wir zunächst keine Bewegungen, jedoch stellen sich 12 m vor der Abbaukante Längungen ein, die bis 3 m hinter der Kohlenfront auf 45 mm anwachsen, um danach rasch abzunehmen und im Versatz in Verkürzungen überzugehen.

Gänzlich abweichend hiervon zeigt die Linie 20 bis 21 ein anderes Verhalten, und es ist gewiß kein Zufall, daß die Mitte dieser Zugseite rund 25 m vom Punkt 18 entfernt ist, an dem der Sandstein über dem Flöz Girondelle einsetzt. In der Linie 20 bis 21 stellen sich schon rund 30 m vor der Strebfront Ver-

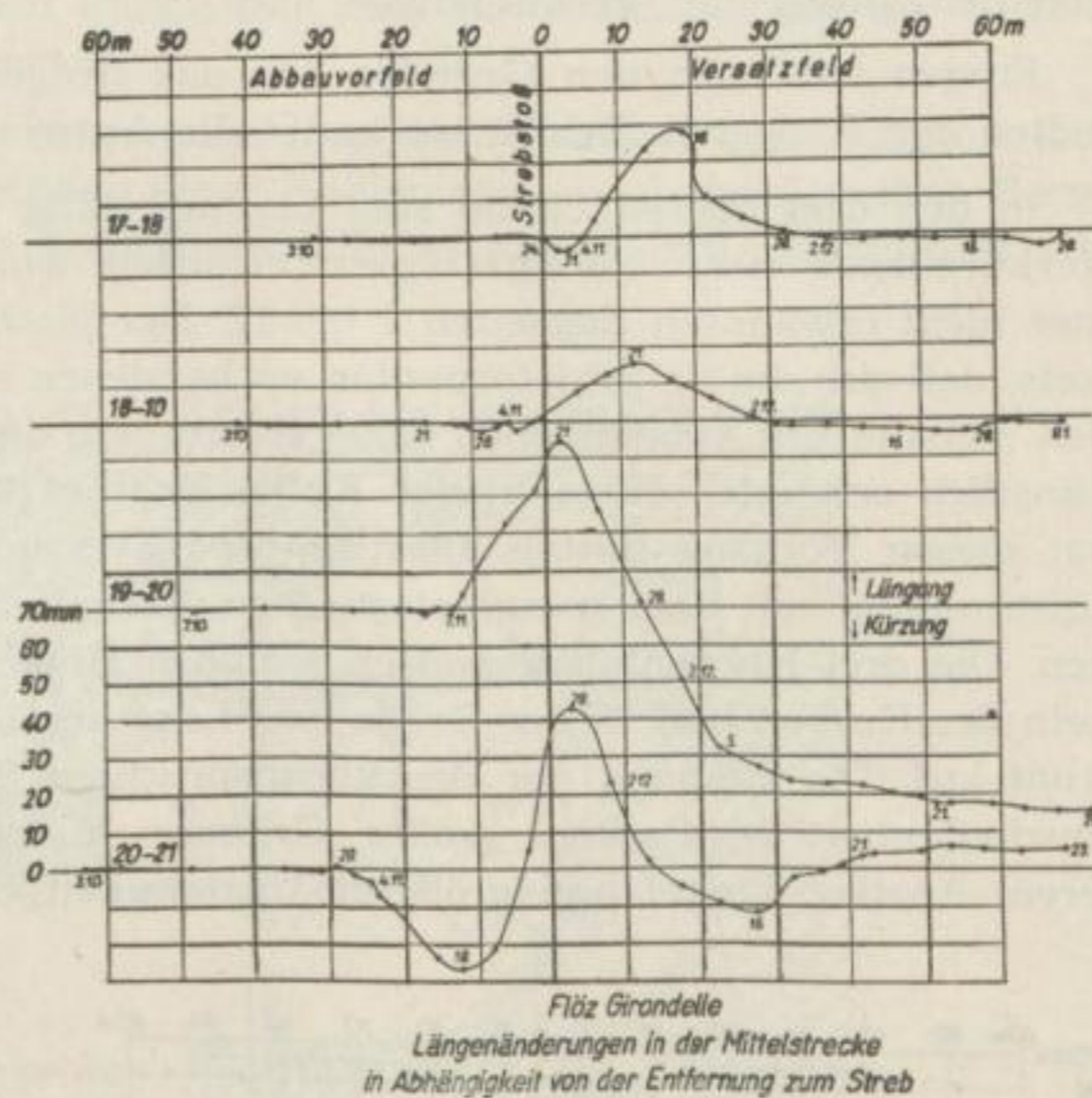


Bild 22. Kurven der Längenänderungen vor und hinter dem Strebstoß



kürzungen der Längen ein, deren Maximum mit 28 mm, also rund 2,8 bis 3 mm/m, 12,5 m vor der Kohlenkante liegt. Dieser Punkt bei 12,5 m vor dem Kohlenstoß bezeichnet die Spitze des Zusatzdruckes, der gefährlich werden kann. Die Verkürzungen gehen 8 m vor der Kohlenfront in Längungen über; diese Längungen erreichen schon 5 m hinter dem Strebstoß ihren Höchstwert mit 43 mm, und die Längen weisen dann im Versatz eine Wechselfolge von Längungen und Verkürzungen nach.

Fragen wir nach den Gründen für das festgestellte unterschiedliche Verhalten der Hangendschichten, so lautet die Antwort wie folgt.

In den drei oberen Linien sind bis auf völlig bedeutungslose geringfügige Verkürzungen nur Längungen ermittelt worden. Das gilt auch für die hier nicht erwähnten Zugseiten 1 bis 17. Der Nachweis von Längungen besagt stets, daß sich die im Schieferpacken vorhandenen natürlichen Klüfte und durch den Abbaudruck entstandenen Risse ebenso wie die natürlichen Schichten und künstlich erzeugten Risse in der Kohle geöffnet und erweitert haben. JACOBI hat diesen Vorgang mittels Plastilin-Modellversuchen nachgeahmt und Übereinstimmung mit dem pseudoplastischen Verhalten des Gebirgskörpers gefunden. Die drei Kurvenbilder weisen lediglich Unterschiede in den Anstiegswinkeln der Kurven und in der Größe und Lage der Längungsmaxima zur Abbaufront auf. Die Reibung der druckbeanspruchten Schichten wird bei stückiger Beschaffenheit des Packens größer. Gröberes Material bringt Kurven mit steilerem Anstiegswinkel und größerer Unstetigkeit hervor als feinere Schichten.

Damit glaube ich, zur Genüge dargelegt zu haben, weshalb der mehr oder weniger starke Packen zwischen Kohle und Sandstein trotz dessen Mächtigkeit im Hangenden und Liegenden des Flözes keine Gebirgsschlaggefahr heraufbeschwören konnte.

Nun kann es aber vorkommen, daß der Bewegungsschub zur Strebfront hin wegen zu großer Reibung unterbunden wird dergestalt, daß sich der Schichtenverband vor dem Abbauraum staut. Solche Stauungen führen zum Schließen der Klüfte und Risse und damit zu Längenverkür-

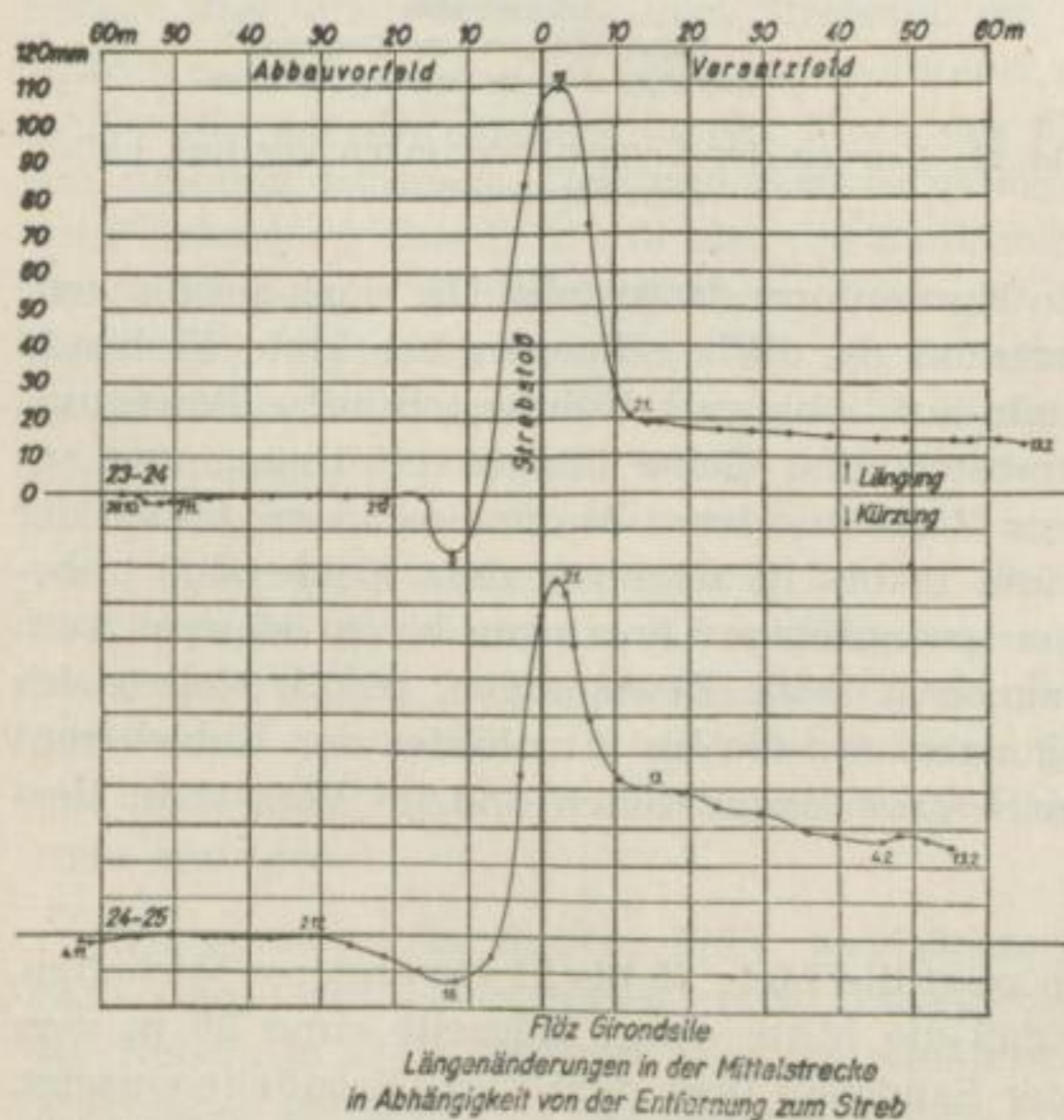


Bild 23. Längenverkürzungen vor dem Strebstoß



zungen im Vorfeld des Strebs, und zwar vornehmlich an der Stelle, an der der stärkste Zusatzdruck herrscht. Und das zeigt uns die Linie 20 bis 21. Wie bereits bemerkt, ist die Mitte dieser Linie 20 bis 21 genau 25 m vom Punkt 18 entfernt. Weitere 25 m nach Westen zu, also 50 bis 60 m vom Punkt 18 entfernt, sind, wie Bild 23 ausweist, in den Längen 23 bis 24 und 24 bis 25 nochmals wenn auch kleinere Verkürzungen aufgetreten, einmal mit 15 mm und ferner mit 12 mm Verkürzung, in beiden Fällen mit dem Höchstzusatzdruck im Vorfeld bei 14 m Abstand zum Abbaustoß.

Diese Messungsergebnisse erinnern uns an die Dissertation INNERLINGS [15] vom Jahre 1938, in der der Abbau einer Kohleninsel im ober-schlesischen Bergbau eine Rolle spielte. Ich erwähne mit Bild 24 diesen Fall, demzufolge wir

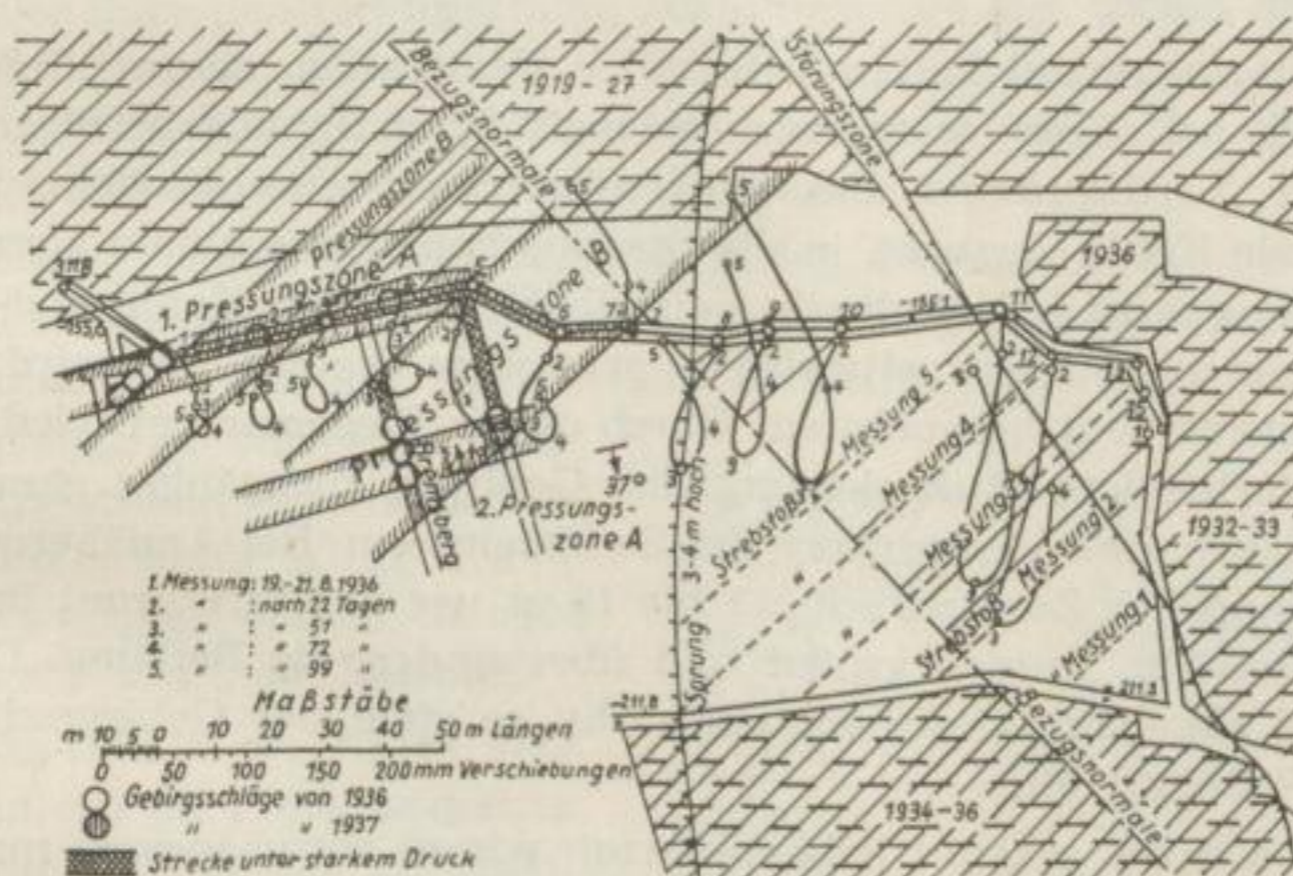


Bild 24. Längenänderungsmessungen in einer Kohleninsel  
(nach H. INNERLING)

aus den Verschiebungen „Auflockerungszonen“ und „Verdichtungszonen“ ermittelten und hieraus die WEBERSche Welle ableiteten, die wir im Ruhrgebiet allerdings bisher nie ermittelt haben. Die Verdichtungszonen riefen Verkürzungen von 2 bis 6 mm/m 25 m und 50 m vor dem Strebstoß hervor. Verkürzungen zu 5 bis 6 mm/m zeigten damals leichte Gebirgsschläge an, bei 10 bis 12 mm/m Verkürzung nahmen wir für ober-schlesische Verhältnisse mit den mächtigen Kohlenflözen und bis zu 150 m starken Sandsteinpaketen das Auftreten schwerster Gebirgsschläge an.

Diesen beachtlichen Zahlenwerten, die wir vor 20 Jahren bekannt gaben, stehen im Abbaufeld Neumühl auf einer relativ kleinen Fläche Verkürzungsbeträge von nur 1,2 bis 2,8 mm/m gegenüber. Doch wissen wir heute, daß es hierauf nicht allein ankommt, sondern auf das Verhalten einer ohne Zwischenmittel aufliegenden Sandsteinbank im ganzen, auf ihre petrographische Aus-



bildung, auf Blockbildung, Klüftung, Kluftrichtung und damit vor allem auf die während des Gleitungsvorganges auftretenden Reibungskräfte.

Dazu kam aber im Falle Neumühl noch folgendes. Zur selben Zeit, als die Längenmessungen im Bereich des Meßfeldes der Mittelstrecke stattfanden, stellten wir fest:

- a) im Strebfeld zwischen der 2. und 3. Bauhöhe im Bereich der Gefahrenzone äußerst geringfügige Verschiebungen von Hangendpunkten, die sich auf wenige Millimeter in drei Tagen beliefen,
- b) in der Kopfstrecke Bauhöhe 3 keine Verschiebungen der Hangendpunkte sowie dortselbst kaum fühlbare Konvergenzen, und
- c) durch höchst genaue Höhenmessung in der Mittelstrecke, daß sich am Punkt 21 die Sandsteinbank um 2 mm und bei Punkt 24 um 1 mm gehoben hatte.

Da Messungsungenauigkeiten unter allen Umständen auszuschließen waren, konnte es sich bei diesen wenn auch geringfügigen Hebungsbeträgen lediglich um elastische Verdichtungen des hangenden Sandsteins handeln. Die unter Druck stehende Kohle versucht, in die Streckenhohlräume hinein auszuweichen. Diese Bewegung wird jedoch durch die Reibung zwischen Kohle und Sandstein gehemmt, wenn nicht sogar zeitweise unterbunden. Die Reibung wird in diesem Falle ein Biegemoment hervorrufen. Durch dieses Biegemoment wird nicht nur die bereits vorhandene Auflockerung des Gebirges rückgängig gemacht, sondern es tritt auch eine Verdichtung des Sandsteins ein. Bei Annäherung an den Strebstoß nimmt der Zusatzdruck, 12 bis 15 m vor der Strebfront im Vorfeld, zu. Die Schubkräfte werden größer und überwinden die Reibung. Das Biegemoment wird abgebaut. Geschieht das nicht, so steht der Gebirgsschlag bevor (vgl. Diss. W. ROSE [16]).

Ich hoffe, daß Sie erkannt haben, warum wir so genau messen mußten und weshalb in solchen Situationen unter Umständen der Einsatz einer Präzisions-Schlauchwaage zweckdienlich ist. Wir standen zwar nicht vor einer Gebirgsschlaggefahr. Erkennen kann sie der Bergmann nicht, erkennen konnten wir die Bildung der Gefahrenzone nur durch unsere mit großer Sorgfalt bewirkten Messungen, die Ergebnisse brachten, die sich weitgehend von denjenigen Erkenntnissen unterschieden, die wir im übrigen Feldesteil, in dem der Schieferpacken zwischen Flöz und Sandstein vorherrschte, gewonnen hatten. Und abwenden läßt sich die Gefahr nur durch einen gleichmäßigen, langsamen Abbaufortschritt in gerader Front unter Vermeidung aller in der Gebirgsschlag-Systematik aufgeführten Fehler. Ein reiner Abbau und ein nicht zu schneller Abbaufortschritt (1,0 bis 1,2 m täglich) ermöglicht den allmählichen Spannungsabfall im Zusammenhang mit einem Nachlassen der hemmenden Schubkräfte.

Sodann kann eine Gebirgsschlaggefahr vielleicht auch aus Bohrlochverengungen angezeigt werden. Je Millimeter Bohrlochverengung wurden von



JACOBI-BRÄNDLE [17]  $2500 \text{ t/m}^2$  Abbaudruck errechnet, und man fand den normalen Zusatzdruck bei  $3,5 \text{ mm}$  Bohrlochverengung  $15 \text{ m}$  vor der Strebfront zu  $9000 \text{ t/m}^2$ , beim Abbau einer Kohleninsel zu  $11000 \text{ t/m}^2$  und beim Verhieb einer Teilfläche zu rund  $7000 \text{ t/m}^2$ . Damit ist aber die Gebirgsschlaggefahr noch keineswegs gekennzeichnet, und ich glaube auch, daß bei der nachgewiesenen Inhomogenität der Karbonsandsteine bestimmte Werte in  $\text{t/m}^2$  für den Eintritt eines Gebirgsschlages kaum angegeben werden können. Diese Spitzenzusatzdrücke, die eine Gebirgsschlaggefahr anzeigen sollen, werden vielleicht zwischen  $14000$  bis  $20000 \text{ t/m}^2$  schwanken, und das ist eine recht große Spanne.

### GEBIRGSSCHLAG IM NACHBARFELD CONCORDIA

Ich möchte nun gemäß meiner Ankündigung zu Beginn der Arbeit noch kurz einiges über den Gebirgsschlag ausführen, der sich knapp ein halbes Jahr nach Beendigung des Abbaus im Untersuchungsfeld Neumühl am 27. 6. 1956 in nur  $300 \text{ m}$  Entfernung im Nachbarfeld Concordia ereignete. Die Unterlagen hierfür verdanke ich Herrn Professor Dr.-Ing. HOFFMANN.

Es ist eine Tragik um die von so vielen Forschern seit Jahrzehnten mit Eifer und besten Erfolgen betriebene Gebirgsschlag-Forschung, daß sie so selten auf fruchtbaren Boden fällt. Nach meinen Ermittlungen sind zumindest  $90\%$  aller Gebirgsschläge auf Nichtbeachtung der Gebirgsschlag-Systematik zurückzuführen. Dafür ist auch dieser Gebirgsschlag, dessen Grundriß ich zuerst zeige, ein Beispiel.

Wie aus Bild 25 ersichtlich, war der Abbau, wie die Pfeile zeigen, in langer Front nach Westen gerichtet. Der Markscheider der Zeche hatte, bevor er eine Urlaubsreise antrat, davor gewarnt, den Abbau über die stark gerissen gezeichnete Stundungslinie hinaus zu treiben, denn ihm war klar, daß bei weiterem Verhiebsfortschritt das schwarz dargestellte Abhauen oder die Strebfront bei einer Annäherung auf  $20$  bis  $25 \text{ m}$  zusammengeschlagen werden mußten. Das ist der Fall 3 der Gebirgsschlag-Systematik. Man glaubte, dieser Warnung nicht folgen zu müssen, sondern baute weiter ab, mit einer zaghaft angedeuteten Drehung des Strebs, die viel zu gering war, um zu wirken.

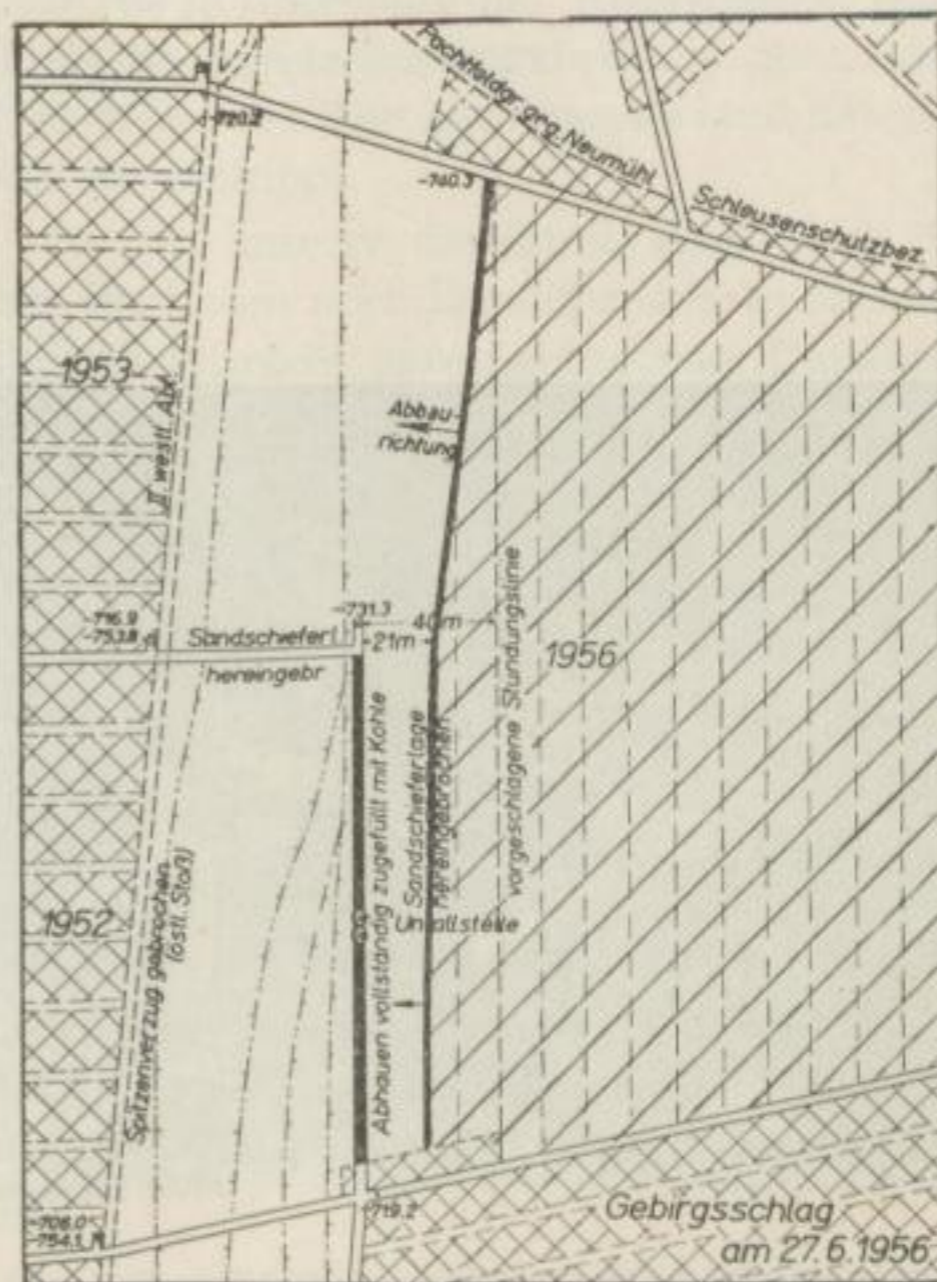


Bild 25. Gebirgsschlag am 27. 6. 1956  
Grundriß (nach H. HOFFMANN)



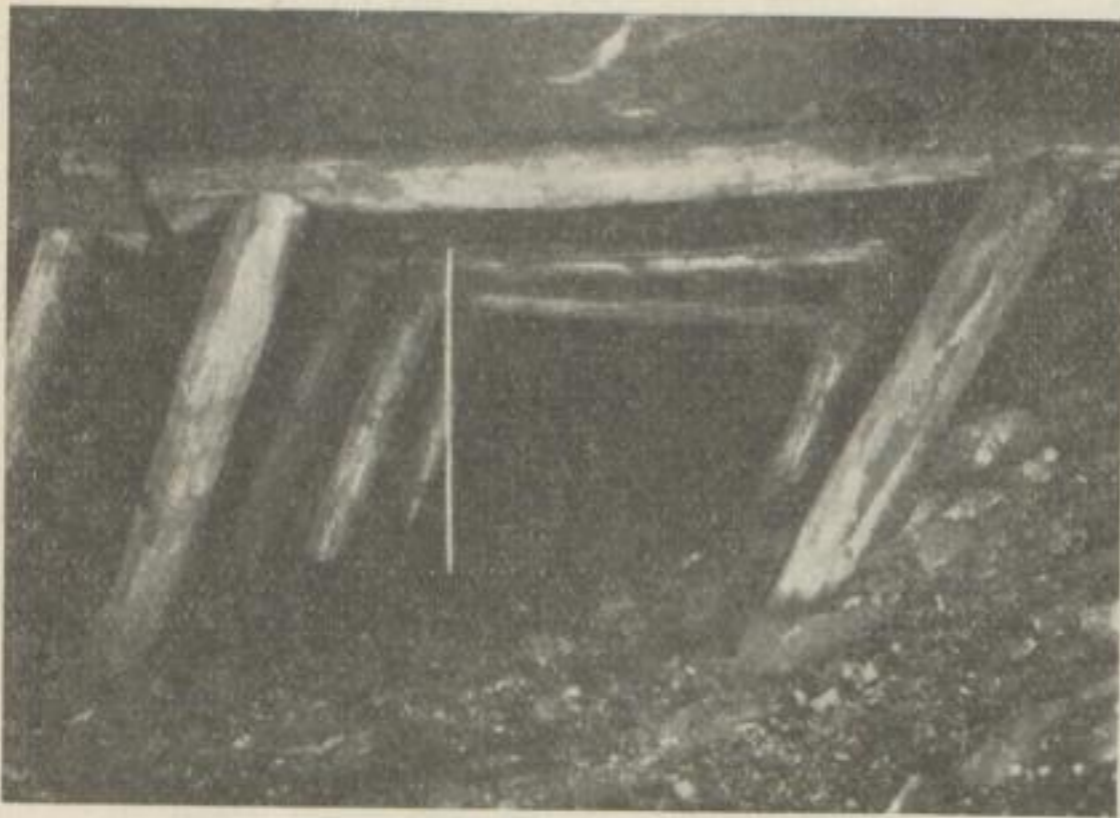


Bild 26. Beanspruchung des Ausbaus nach dem Gebirgsschlag (nach W. GRÄBSCH)



Bild 28. Liegendes und Hangendes nach dem Gebirgsschlag (nach W. GRÄBSCH)



Bild 27. Blick in das Blasversatz-Feld nach dem Gebirgsschlag (nach W. GRÄBSCH)



Bild 29. Unveränderter Streckenzustand in der Gebirgsschlagstrecke, 216 m von der Kopfstrecke entfernt (nach W. GRÄBSCH)



Das Abhauen war 4 m breit. Bei 21 m Abstand vom östlichen und 25 m Entfernung vom westlichen Stoß des Abhauens erfolgte der Gebirgsschlag. Er forderte an den mit Kreuzen bezeichneten Stellen zwei Tote, die unter den Trümmern des vernichteten Abhauens begraben wurden und deren Überreste man nach einer Aufwältigungsarbeit von 14 Tagen Dauer fand.

Die geologischen Verhältnisse waren folgende: Von der Kopfstrecke aus nach Norden zu lag auf 70 m Länge derselbe Sandstein, wie er von Neumühl her bekannt ist, unmittelbar auf dem Flöz auf. Von dort an legte sich ein allmählich an Mächtigkeit zunehmender Packen aus festem Sandschiefer zwischen Flöz und Sandsteinbank. Das Unglück ereignete sich um 15.35 Uhr nach der Frühschicht. Im Streb selbst befanden sich keine Leute mehr, sonst wäre die Zahl der Opfer erheblich größer gewesen. Über den Zustand des Strebs geben die Bilder 26 bis 29 Auskunft.

Das Bild 26 zeigt den Streb 20 m unterhalb der Kopfstrecke. Man erkennt zur Kohlenfront hin schräg gestellte Baue. Das Liegende ist aufgebrochen. Im Hangenden steht klingender Sandstein an, feinkörnig, mit Haarrissen.

Bild 27 ist etwa 80 m südlich der Kopfstrecke aufgenommen. Der 1 m mächtige Sandschieferpacken ist hereingebrochen. Das Bild gestattet einen Blick in das Blasfeld. Links oben steht wiederum der freigelegte feinkörnige graue Sandstein an.

Bild 28 zeigt den Strebzustand nahezu 100 m unterhalb der Kopfstrecke. Das Liegende war hochgepufft, das Sandschieferhangende hereingebrochen. Setzrisse sind an der Hangendplatte rechts oben zu erkennen. Die Holzkappen sind besenförmig abgesplittert, der Panzerförderer ist verkippt.

216 m unterhalb der Kopfstrecke, also im unteren Strebteil, zeigt Bild 29 eine Aufnahme nach dem Gebirgsschlag, die kaum noch Zerstörungen erkennen läßt. Der Sandschieferpacken, 1,3 m mächtig, ist nicht hereingebrochen. Darüber befindet sich massiger Sandstein. Links ist ausgelaufene Kohle zu sehen.

Zieht man die Erfahrungen heran, die wir innerhalb der Forschungsgemeinschaft Neumühl gesammelt haben, wonach während der gesamten Abbauzeit von vier Jahren nicht ein einziger Gebirgsschlag zu verzeichnen war, so wäre der Gebirgsschlag auch im Nachbarfeld niemals eingetreten, wenn das Abhauen nicht vorhanden gewesen wäre. Daß es vorhanden war, bedeutete eine Warnung, die leider nicht beachtet wurde.

Ich beschließe meine Ausführungen mit denselben drei Sätzen, mit denen ich meinen Vortrag am 17. Oktober 1956 anlässlich der „Internationalen Tagung über Gebirgsdruckforschung“ in Essen [18] beendet habe:

1. Wir wissen heute, weshalb und auf welche Weise ein Gebirgsschlag zustande kommt und wie man ihn etwa abwehren kann.
2. Ebenso sind uns die Anzeichen dafür bekannt, wann ein Gebirgsschlag nicht eintreten kann oder wird.
3. Schließlich wissen wir, wann wir, um ein gebirgsschlaggefährdetes Flöz abzubauen, messen müssen und was wir zu beobachten und zu messen haben.



## Literatur

- [1] Report of the Witwatersrand Rook Burst Committee. Kapstadt 1925.
- [2] NIEMCZYK, O.: Bergschadenkunde. Verlag Glückauf, 1949.
- [3] SPACKELER, G.: Die sogenannte Druckwelle. Glückauf 64 (1928).  
SPACKELER, G.: Untersuchungen über Gebirgsschläge. Zeitschr. f. d. Berg-, Hütten- u. Sal. Wes., 1931.
- [4] HOFFMANN, H.: Der Ausgleich der Gebirgsspannungen in einem streichenden Strebau. Dissert. T. H. Aachen, 1931.
- [5] WEISZNER, J.: Gebirgsbewegungen beim Abbau flach gelagerter Flöze. Glückauf 68 (1932).
- [6] MAINZER, F. J.: Seismische Untersuchungen zur Gebirgsschlagforschung im Ausland. Glückauf 92 (1956) H. 13/14.
- [7] KVAPIL, R.: Neue Ansichten in der Theorie des Gebirgsdruckes und der Gebirgsschläge. Prag 1957.
- [8] EVERLING, G.: Neue Untersuchungen unter dreiaxsigem Druck an Karbongesteinen im Rahmen der Gebirgsdruckmessung. Dissert. T.H. Aachen, 1957.
- [9] JACOBI, O.: Die Bewegungen zerbrochener Gesteinsschichten um bergmännische Hohlräume. Glückauf 93 (1957) H. 45/46.  
JACOBI, O., und BRÄNDLE, E.: Elektrische Fernmeßgeräte für die Gebirgsdruckforschung. Glückauf 92 (1956) H. 13/14.
- [10] HAHNE, C., und HÜNERMANN, F. W.: Die geologischen und petrologischen Arbeiten und Untersuchungsverfahren der Forschungsgemeinschaft Neumühl. Glückauf (1956).
- [11] GRÄBSCH, W.: Markscheiderische Meßverfahren zur Feststellung von Gebirgsbewegungen. Glückauf (1956) H. 13/14.
- [12] ROSE, W.: Eine neue Präzisions-Schlauchwaage für Setzungsbeobachtungen. Zeitschr.: Der Bau und die Bauindustrie (1955).
- [13] MEISZER, O.: Sehr genaue Schlauchwaagenmessungen und praktische Anwendungen. Soproner Mitteilungen 1956, S. 69—79.
- [14] HOFFMANN, H.: Entspannungsbewegungen des Flözes und seines Nebengesteins in der Nähe des Strebstoßes. Vortrag Internat. Gebirgsdruck-Tagung 17. 10. 1956.
- [15] INNERLING, H.: Markscheiderische Feinmessungen zur Klärung von Gebirgsdruckfragen an Kohleninseln und Restpfeilern im oberschlesischen Kohlenbergbau. Dissert. T.H. Berlin, 1938.
- [16] ROSE, W.: Die bankrechten Bewegungen des Sandsteinhangenden beim Abbau des Flözes Girondelle auf der Schachtanlage Neumühl. Dissert. T.H. Aachen, 1956.
- [17] JACOBI, O.: Druck auf Flöz und Versatz. Vortrag Internat. Gebirgsdruck-Tagung 17. 10. 1956.
- [18] NIEMCZYK, O.: Die Bedeutung der Forschungsarbeiten auf Neumühl. Vortrag Internat. Gebirgsdruck-Tagung 17. 10. 1956.

## Diskussion

*Prof. Dr.-Ing. habil. NEUBERT, Freiberg:*

Ich danke Ihnen, lieber Herr Kollege, zugleich im Namen aller Anwesenden, für die außerordentlich interessanten Ausführungen. Eine Reihe wertvoller Hinweise sind uns Ansporn, auf diesem Gebiete erfolgreich weiterzuarbeiten.

Prof. NIEMCZYK gab uns einen recht interessanten Einblick in die verschiedenen Meßmethoden mit elektrischen Gebern, mit markscheiderischen Meßmethoden, vor allen Dingen mit der Punktvermarkung und der Schlauchwaage. Wenn es bei der Schlauchwaage keinen mittleren Fehler geben soll, so mag diese Behauptung unter günstigen Verhältnissen mit bestimmten Apparaten zutreffen. Wir haben mit der Schlauchwaage beim Institut andere Erfahrungen gemacht. Wenn der eine Zylinder der Schlauchwaage in der Höhe des etwas geöffneten Fensters aufgehängt war, erhielten wir Fehler, die wesentlich größer sind als beim Präzisionsnivellement. Es dürfen weder Luftbewegung noch Temperaturunterschiede vorhanden sein, damit der mittlere Fehler wegfällt bzw. zu einem Minimum wird.

*Prof. Dr.-Ing. NIEMCZYK, Aachen:*

Es besteht ein Unterschied zwischen der MEISZERSchen und meiner Schlauchwaage. Die MEISZERSche Schlauchwaage arbeitet nach einem etwas anderen Prinzip; das Thermo-



meter ist im Schlauch eingebaut, während unsere Schlauchwaage das Thermometer im Glaszylinder enthält. Bei meiner Schlauchwaage ist durch das eingebaute Thermometer jeder Temperaturunterschied von  $0,1^\circ$  meßbar.

*Prof. NEUBERT:*

Mit der erforderlichen Steigerung der Genauigkeit, wie sie Prof. NIEMCZYK ausführte, sind wir alle einverstanden. In meinen Vorträgen habe ich immer darauf hingewiesen, daß jemand, der noch nicht messen kann, es bei dieser Gelegenheit lernt, weil es hier auf die größten Feinheiten ankommt, die nur unter Beachtung aller Erkenntnisse erreicht werden können. Das schwierigste Kapitel ist die Feinlängenmessung, die zunächst dem Nichtfachmann als sehr einfach erscheint, aber an den Fachmann außerordentlich hohe Anforderungen stellt, wenn selbst die kleinsten Fehler erfaßt werden sollen. Um so interessanter waren die hier aufgezeigten Möglichkeiten, um zu dieser hohen Genauigkeit zu gelangen. Von Interesse waren ferner die Ausführungen über die Schubspannung, die bereits bei der Essener Gebirgsdrucktagung eine besondere Rolle spielte. Ein Gebirgsschlag kann unter bestimmten Verhältnissen auftreten. Es bestehen jedoch grundsätzliche Unterschiede in den Ursachen. Letzten Endes lassen sich drei Bedingungen aufstellen:

1. Es müssen bestimmte Gesteinseigenschaften vorhanden sein: fest, spröde, hart. Während einige Gesteinspakete geschmeidig und quasiplastisch sind, zeigen sich andere elastisch.
2. Es muß eine große Spannungszunahme eintreten, die dadurch hervorgerufen wird, daß die Richtung der Abbaufont zu den aufgefahrenen Strecken ungünstig liegt; auch können Restflächen, Kohleninseln und tektonische Begrenzungen der Baufelder Spannungserhöhungen verursachen. Tektonische Störungslinien wirken wie Trennflächen.
3. Es sind die Spannungsunterschiede in den verschiedenen Gesteinen maßgebend. Vorhandene Spannungsunterschiede führen zu einer weiteren Aufspeicherung in bestimmten Schichten, während in anderen Schichten bereits Zerrüttungszonen eintreten. Gefährlich in dieser Hinsicht sind Gebirgsschichten, wie Sandsteine, da die Zerrüttung viel länger zurückgehalten wird. Es ist also ein Versagen der Gewölbebildung dieser Zone festzustellen. Der Druck konzentriert sich auf diese Schicht, bis plötzlich die Spannung so beträchtlich anwächst, daß schlagartig die Zerrüttung ausgelöst wird.

Interessant war vor allem auch die letzte Darstellung über den Gebirgsschlag in der Nachbargrube von Neumühl, die einen Einblick in die schlagartige Auswirkung der Zerstörung vermittelte.

*Markscheider KOOP, Freiberg:*

Es ist etwas heterogen, wenn ich als Markscheider im Gangerzbergbau in die Probleme der Sedimentär-Abbauführung eingreife. Bei den Freiburger Bleierzgruben ist uns die Beschaffenheit der alten Abbaue geläufig: wir haben eine Teufe von 600 bis 700 m erreicht und die obersten Partien in der Grube zeigen immer noch den Versatz ohne jegliche Einspannung; wie die Alten den Versatz lose hineingeworfen haben, so liegt er heute noch da. Andererseits ist uns bekannt, daß in Südafrika – am Witwatersrand – nur mit ganz planmäßiger Abbauführung das Gebirge im Gangerzbergbau beherrscht werden kann; dort sind Teufen von fast 3000 m vorhanden. Dort ist die Grenze überschritten, wo zwangsläufig etwas geschehen muß.

Wann kommt diese Grenze, wo habe ich mich vorzusehen? Hinzu kommt noch der Optimismus der Gangerzbergleute; sie sehen die Notwendigkeit nicht ein, daß vorher gemessen werden muß, und wollen es erst einmal darauf ankommen lassen.

Im Gangerzbergbau ist durch die ganz andere Richtung der Hauptkräfte die Notwendigkeit, daß das Gebirge nachkommt, nicht in dem Maße gegeben wie bei sedimentären Lagerstätten, weil wir bei jenem nur die kleinen Horizontalkräfte in Rechnung zu stellen



haben. Das auslösende Moment des Gebirgsdrucks wird die Horizontalkraft sein, die dann entsteht, wenn die hangende Partie — diesseits einer vertikalen Fläche über dem tiefsten streichenden Grubenbau — aus dem Gebirgsgefüge unter dem Einfluß ihres Eigengewichtes kippend herausgerissen wird. Wir würden, um diesen Vorgang von Anfang an zu verfolgen, mit sehr ausgedehnten Feinmessungen — vom Hangenden her auf das Liegende zu — zu arbeiten haben; denn der Abrißpunkt wird wahrscheinlich beim Epizentrum über der Strecke auf der tiefsten Sohle liegen. Diese Messung, in der erforderlichen Genauigkeit als Absolutmessung durchgeführt, ist keine nebensächliche Angelegenheit. Ich muß Herrn Prof. NEUBERT bescheinigen, daß er oft genug versucht hat, eine Gebirgsmechanik für den Gangerzbergbau zu schaffen.

Man muß annehmbar die Feinmessung in der Richtung vom Hangenden zum Liegenden auf eine Länge ausdehnen, die der Teufe entspricht, damit man an der Tagesoberfläche auch gewisse Bruchwinkelansätze feststellen kann. (Mehrere derartige Profile mit der erforderlichen Punktsicherheit zu vermarken und messend in horizontaler und vertikaler Richtung zu verfolgen, wird auf Jahre erhebliche Aufwendungen erforderlich machen, ohne das zunächst ein greifbares Resultat zu erwarten ist.)

Ich möchte diesen Tatbestand nur einmal mitgeteilt haben, ich erwarte nicht, daß daraufhin etwas geschieht. Es sei denn, daß die südafrikanischen Kollegen so großzügig wären, uns entsprechende Erfahrungen mitzuteilen. Voraussetzung dazu wäre, daß die petrographischen Verhältnisse dort sich etwa mit dem Freiburger Gneis vergleichen ließen. Wir würden so schon verschiedene Anhaltspunkte bekommen.

*Prof. NEUBERT:*

Die Ausführungen von Herrn KOOP verdienen deshalb Beachtung, als dem Problem der Gebirgsbewegung beim Erzbergbau keine aktuelle Bedeutung zugemessen wird. Ein sehr interessantes Objekt stellte uns jedoch vor zwei Jahren vor wichtige Entscheidungen: Ein alter Gang, 6 m mächtig, bis zu einer Teufe von 600 m abgebaut, oben steil einfallend, in größeren Teufen in geringeres Einfallen übergehend. Herr Dipl.-Ing. PROBST hat diese interessante Lagerung im Flachriß anschaulich dargestellt. Die Schlepplung leitet von fast  $90^\circ$  zu einem Einfallen von  $60^\circ$  über. Über dem z. Z. umgehenden Abbau befinden sich alte Baue. Wir wissen nicht genau, ob sie offen stehen. Vor 1900 stellte der Markscheider mit flächenhaftem Anlegen ohne irgendeine Begrenzung durch Verwaschen die abgebauten Flächen dar. Wir vermuten, daß große Hohlräume mit Teufen von 250 m, abgesehen von kleinen unbauwürdigen Inseln, offen stehen. Am Ausbiß oben wurde nicht durchgeschlagen. Man hat noch eine Brücke von etwa 6 m stehen lassen. Darüber wurde ein Betonbogen gespannt, um die vorher provisorisch umgelegte Freiburger Mulde wieder über das Gewölbe fließen zu lassen. Vor einigen Jahren zeigten sich kleine Risse. Man befürchtete, daß noch weitere Auswirkungen eintreten könnten. Die Sachlage war gefährlich. Wenn man mit einem Zubruchgehen rechnet, würde der gesamte Freiburger Bergbau durch das Eindringen der gewaltigen Wassermengen der Mulde zum Erliegen kommen. Um die Gefahr zu bannen, wurden verschiedene Möglichkeiten diskutiert. Natürlich spielte dabei auch die Wirtschaftlichkeit eine Rolle. Die sicherste Lösung wäre die Umleitung der Mulde gewesen. Es wurde schließlich eine Lösung gefunden, die eine große Betonplatte zur Versteifung vorsah. Es haben sich bisher keinerlei sicher feststellbare Bewegungen gezeigt.

*Markscheider KOOP:*

Die kleinen Veränderungen, die in der Betonplatte hätten aufgetreten sein können, liegen innerhalb der Meßgenauigkeit.

*Prof. NEUBERT:*

Die andere Frage des Herrn KOOP bezüglich des südafrikanischen Bergbaus will ich zu beantworten versuchen. Wir können künftig nicht Markscheider für verschiedene



Teufen ausbilden. 3000 m und 800 m sind ganz erhebliche Unterschiede. Die afrikanischen Verhältnisse lassen sich deshalb nicht mit denen in Freiberg vergleichen.

*Dr.-Ing. HÖFER, Freiberg:*

Ich möchte an die Worte von Herrn KOOP über die Gebirgsschläge im südafrikanischen Bergbau anschließen. Man braucht aber gar nicht so weit zu gehen. Es genügt schon das Příbramer Revier. Ich möchte die Verhältnisse nicht unbedingt vergleichen, aber in diesem Revier traten die ersten Gebirgsschläge auch bei einer Teufe von etwa 800 m auf. Ich weiß, daß Sie hier in Freiberg auch beim Durchbauen zur oberen Sohle Schwierigkeiten bekommen, wenn die Schweben noch 15 oder 20 m stark ist. Ähnliches ereignete sich auch in Příbram, nur, daß es sich dort nicht um einfache Druckwirkungen, sondern um Gebirgsschläge handelt, die nach der Gebirgsschlagsystematik dem Fall 3 entsprechen. Das ist ein ganz wesentlicher Punkt, um das Abbaufahren zu ändern. Man müßte von der Seite her, oder von oben nach unten abbauen; das wären rein betriebliche Fragen. Und nun zu etwas anderem: Müssen für das Auftreten von Gebirgsschlägen unbedingt Sandsteinschichten oder biegungssteife Schichten, die im Stande sind, Energie aufzuspeichern, im Hangenden sein? Es sind verschiedene Fälle bekannt, wo solche Schichten nicht vorhanden waren, aber trotzdem gebirgsschlagähnliche Erscheinungen aufgetreten sind. Hier handelt es sich wahrscheinlich um die grundsätzliche Unterscheidung zwischen Firstschlägen und Spannungsschlägen. Die Spannungsschläge scheinen aber insbesondere in bezug auf die Abbaugeschwindigkeit eine große Rolle zu spielen. Anknüpfend an das alte Bild von Haak, von dem leider meist nur der obere Teil gezeigt wird, die Spannungsverteilung vor dem Kohlenstoß bei schnellem Verhieb, sei an die Unterschiede in der Spannungsverteilung bei langsamem und schnellem Verhieb erinnert. Bei langsamem Verhieb liegt das Maximum weit vom Stoß entfernt, bei schnellem Verhieb jedoch bekommen wir eine sehr große Spannungsspitze nahe am Stoß, die den Spröbruch fördert. Spröde bezeichnet ja keine Materialeigenschaft an sich, sondern in gewissem Sinne ein Materialverhalten, das durch die Belastungsgeschwindigkeit sehr stark beeinflußt wird. Die Belastungsgeschwindigkeit wird aber wesentlich durch die Abbaugeschwindigkeit bestimmt.

*Prof. NIEMCZYK:*

Ich glaube in diesem Falle nicht an die Gefahr von Gebirgsschlägen. Da kein gefährliches Nebengestein vorhanden war, kann ich mir kaum vorstellen, daß hier ein Gebirgsschlag ausgelöst wurde.

*Dr. HÖFER:*

Wir haben in Mitteldeutschland den Braunkohlentiefbau Egel mit relativ fester Kohle. Dort ging man vom Pfeilerbruchbau auf den Kurzstrebruchbau mit wesentlich größeren Verhiebsgeschwindigkeiten, durchschnittlich 4 bis 5 m pro Schicht, über. Hierbei ereigneten sich häufig plötzliche Entspannungen, wonach die Kohle wesentlich leichter ging. Das war z. T. sogar erwünscht, bis es zu einem größeren Schlag kam, bei dem die Schäden erheblich waren. In der sowjetischen Literatur neigt man sehr stark dazu, Gebirgsschläge allgemein aus der in der Kohle aufgespeicherten Energie zu erklären. Inwiefern das richtig ist, mag noch dahingestellt sein. Es gibt aber gewisse Fälle, wo nicht unbedingt eine schlagende Schicht im Hangenden da ist, wo es sich um plötzliche Entspannungen handelt. Es ist die Frage, ob man das als Gebirgsschlag bezeichnen soll oder als plötzliche Entspannung.

*Prof. NIEMCZYK:*

Es ist schwer, zwischen First- und Spannungsschlägen eine Grenze zu ziehen. Ohne Zweifel ist ein Übergang vorhanden. Wir haben vor 40 Jahren behauptet, daß schwere Gebirgsschläge in keinem Zusammenhang mit leichten Schlägen stehen, und wir glaub-



ten, die schweren Gebirgsschläge auf tektonische Einwirkungen zurückführen zu können. Das war damals meine Überzeugung.

Nun bedeutet das Wort Professor „*Bekenner zur Wahrheit*“. Ich habe früher an das Auftreten tektonischer Restspannungen geglaubt, bin aber im Laufe der Zeit zu der Überzeugung gelangt, daß zwar in den Alpen von tektonischen Restspannungen gesprochen werden kann, nicht aber im Ruhrgebiet. Deshalb finden Sie in meiner „*Bergschadenkunde*“ [1949, S. 223/224] mein Bekenntnis darüber, daß ich im Irrtum war.



Modellvorstellungen zur Deutung  
von Senkungs- und Druckerscheinungen  
beim Strebbau in flacher Lagerung

Von TILO DÖRING



## I N H A L T

1 Literaturhinweise . . . . .	37
2 Biegung auf stetiger elastischer Unterlage . . . . .	38
3 Modellvorstellungen vom Strebbaue . . . . .	44
3.1 Begründung der Modellvorstellungen . . . . .	44
3.2 Bestimmung der Konstanten . . . . .	48
3.3 Strebvorfeld . . . . .	51
3.31 Senkungskurven im Strebvorfeld . . . . .	51
3.32 Vergleiche mit markscheiderischen Feinmessungen . . . . .	53
3.33 Spannungsverteilung und Zusatzdruck . . . . .	56
3.4 Versatzfeld . . . . .	61
3.41 Allgemeines . . . . .	61
3.42 Einfluß eines Flözrandes . . . . .	61
3.43 Verlauf des Versatzdruckes bei Einfluß von zwei Auflagern . . . . .	64
3.44 Folgerungen für die Trogtheorie . . . . .	68
3.5 Schlußbetrachtungen . . . . .	70
4 Abbau von Restpfeilern . . . . .	72
4.1 Problemstellung . . . . .	72
4.2 Gleichungen der Senkungskurve . . . . .	75
4.3 Vergleiche zwischen Pfeiler und Streb . . . . .	77
4.4 Beziehungen zur Gebirgsschlaggefahr . . . . .	79
5 Über das Verhalten eines Schichtsystems bei der Absenkung . . . . .	80
5.1 Biegung eines Schichtsystems . . . . .	80
5.2 Das Problem der Brückenbildung und seine Bedeutung für Senkungs- und Druckerscheinungen . . . . .	82
5.3 Deutung der Rißbildung als Folge der Durchbiegung . . . . .	85
5.31 Zum Bruchvorgang . . . . .	85
5.32 Verlauf der Hauptspannungen bei der Biegung . . . . .	88
5.4 Schlußfolgerungen . . . . .	92
5.5 Über die Berücksichtigung verschiedenartiger Tragfähigkeits- eigenschaften der nachgiebigen Unterlage (Versatz) . . . . .	94
6 Zusammenfassung . . . . .	97
Literatur . . . . .	100

Bergakademie  
- Bücherei -  
Freiberg i. Sa.



Es ist bei allen physikalischen Untersuchungen von der größten Wichtigkeit, mit den allgemeinsten Eigenschaften eines materiellen Systems vertraut zu sein . . .

(J. C. MAXWELL)

Die Absenkungsvorgänge der Hangendschichten über den abgebauten Feldesteilen, die theoretisch auf der Grundlage der LEHMANNschen Trogtheorie in guter Annäherung zu beschreiben und vorauszuberechnen sind, führten schon früh zu einem Vergleich zwischen Absenkung und Durchbiegung. Mit dieser Konzeption ergeben sich Gesichtspunkte zur Deutung der Senkungs- und Druckerscheinungen in einer Einheit vom Abbau bis zur Tagesoberfläche, die heute gefordert<sup>1</sup> und schon früh erkannt war.

In ihrem Lehrbuch der Bergbaukunde geben HEISE und HERBST [6] bereits 1923 folgende Darstellung der Abbauwirkungen, bei der sie trennen in

Beobachtungen über die Senkungsvorgänge an der Erdoberfläche;  
Verlauf der Bewegungen im Gebirgskörper.

Zum letztgenannten Problem schreiben sie (S. 429):

„Über die Gesetze, nach denen die Abbauwirkungen sich durch den Gebirgskörper nach oben und nach den Seiten hin fortpflanzen, gehen die Ansichten noch auseinander. Es stehen sich im großen und ganzen die Bruchtheorie und die Durchbiegungstheorie gegenüber. Nach der Bruchtheorie, die insbesondere von HAUSSE und GOLDREICH vertreten wird, bricht das Gebirge über dem Abbau zunächst an annähernd seigeren Begrenzungsebenen herein, worauf dann die Seitenwände diese Senke unter eine mehr oder weniger dem natürlichen Böschungswinkel angenähertem Winkel nachbrechen. Die Biegungstheorie, für die namentlich ECKARD eintritt, rechnet nur für die liegendsten Schichten und nur bei stärkeren Senkungen mit einem Zubruchgehen in die Hohlräume hinein, nimmt dann aber eine Ausfüllung dieser Hohlräume durch die Auflockerung der hereingebrochenen Massen und infolgedessen für die hangenderen Schichten, die auf den Trümmern Auflage finden, nur noch eine Durchbiegung an.“

Sie betonen anschließend, daß sich im allgemeinen „die beobachteten Vorgänge an der Erdoberfläche . . . besser mit der Biegungstheorie in Einklang bringen“ lassen, wobei je nach der Gebirgsbeschaffenheit auch Brucherscheinungen stärker hervortreten können.

<sup>1</sup> Vgl. die Beiträge des Kongresses über Bodenabsenkung in Leeds (Engl.) 1957, z. B. [1] [2] [3] [4] [5].



Seit dieser Zeit wurden vor allem markscheiderische Messungen unter Tage (sog. „abbaudynamische Feinmessungen“) durchgeführt, die bestimmte, regelmäßig auftretende Abbauwirkungen erkennen ließen; so entstanden Begriffe wie WEBERSche Welle, Zusatzdruck, Setzrißbildung, Gewölberißbildung, Senkungskurve, Versatzdruck usw.

Zweifellos ist eine umfassende Erklärung dieser „Abbauerscheinungen“ notwendig; anderenfalls entsteht eine Diskrepanz zwischen den Einzelercheinungen und der Deutung ihrer Zusammenhänge, d. h. zwischen den Erscheinungen und unserer Kenntnis ihrer Gesetzmäßigkeiten. Praktische, betriebliche Maßnahmen werden von solchen Erkenntnissen weitestgehend bestimmt.

Geht man auf ECKARD zurück, so kommt seinen Vorstellungen von der Durchbiegung der Hangendschichten auf dem Nachbruch bzw. Versatz sicher Bedeutung zu. Der Versuch, diese Grundgedanken zur Erklärung der Abbauwirkungen heranzuziehen, wurde vorwiegend von STÖCKE, HERRMANN und UDLUFT [7] sowie von KEGEL [8] weitergeführt.

Theoretische Arbeiten über die Verwendung der Biegetheorie auf nachgiebiger Unterlage, wie sie bei ECKARD zum Ausdruck kommt, wurden von LEHR und SEIDL [9] verfaßt.

Besonders polnische Wissenschaftler haben sich mit diesen Fragen theoretisch auseinandergesetzt. In der Gegenwart ist hier in hervorragendem Maße SALUSTOWICZ [10] [11] zu nennen, der auf BUDRYK [11, S. 192] aufbaut. Letzterer hatte die mathematische Theorie der Balkenbiegung auf elastischer Unterlage bereits 1933 zur Erklärung der „Druckwelle“ verwendet.

Die angeführten Überlegungen und Rechnungen fortsetzend, werden in der vorliegenden Arbeit Modellvorstellungen erörtert, mit deren Hilfe man in vielen Fragen plausible Erklärungen für gebirgsmechanische Vorgänge beim Strebau erhalten kann.

## 2 BIEGUNG AUF STETIGER ELASTISCHER UNTERLAGE

Gebirgsschichten, die sich über rechteckigen Abbauhohlräumen absenken und damit einer Biegebeanspruchung ausgesetzt sind, gleichen Platten im Sinne der Mechanik, wenn ihre Mächtigkeit im Verhältnis zur Flächengröße gering ist und die Durchbiegung bei genügend mächtigen Schichten im Verhältnis zu ihrer Mächtigkeit klein bleibt.

Setzt man neben diesen geometrischen Bedingungen annähernd die Gültigkeit linear-elastischer Verformungseigenschaften voraus, so gilt die grundlegende Differentialgleichung der Platte zur Ermittlung von Verschiebungen der Mittelebene dieser Platte:

$$N \left( \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 y}{\partial x^2 \partial z^2} + \frac{\partial^4 y}{\partial z^4} \right) = p(x, z) \quad (2.0)$$

Man findet die Entstehung dieser Gleichung in den Lehrbüchern der Festigkeitslehre [12] [13]. Bild 1 zeigt die Lage des Koordinatensystems (zur Lage des Strebens vgl. Bild 13).



Nun biegt sich im Gebirge eine solche „Ersatzplatte“ nicht frei durch, sondern liegt auf nachgiebigen Unterlagen, den Flözrändern und vor allem dem Versatz. Bereitet die Lösung der Gleichung (2.0) schon für rechteckige Platten ohne Unterlage große Schwierigkeiten, so müssen diese enorm wachsen mit dem Vorhandensein einer solchen Unterlage, weil dann die Beziehung  $p = p(x, y, z)$  gilt, d. h., daß die Gegenkraft der Unterlage bei der Durchbiegung unbedingt berücksichtigt werden muß. Die Notwendigkeit, einerseits die Gegenreaktion der Unterlage bei der Aufgabenstellung zu berücksichtigen und auf der anderen Seite die damit verbundenen mathematischen Schwierigkeiten zu umgehen, führt zwangsläufig zur Einführung weiterer Vereinfachungen.

Mit der Annahme, daß die Durchbiegung dieser Platte in der  $z$ -Richtung unveränderlich sei (d. h. die Belastung  $p$  darf nur noch eine Funktion von  $x$  sein), vereinfacht sich die

Gleichung (2.0) ganz bedeutend. Praktisch wird damit die Streblänge in der  $z$ -Richtung als unendlich lang angesehen. Dieser Fall würde eintreten, wenn die Streblänge genügend groß ist, und gilt dann zumindest für einen Streifen in der  $x$ -Richtung im mittleren Teil dieses Strebes bzw. der Platte (Dachschicht), also in genügend weiter Entfernung von den seitlichen Auflagern. Alle Ableitungen nach  $z$  verschwinden damit; man erhält die Differentialgleichung eines Plattenstreifens aus der Gleichung (2.0):

$$N \frac{d^4 y}{d x^4} = p(x) \quad (2.1)$$

Sie unterscheidet sich von der eines einfachen Balkens nur durch den Wert für die Biegesteifigkeit  $N$ . Hier bedeutet  $N$  die Steifigkeit der Platte:

$$N = \frac{E_0 h^3}{12(1 - \mu^2)}$$

Bei einem Balken gilt  $N = E_0 \cdot J$ .

Die Steifigkeit der Platte wird also größer sein, da bekanntlich  $\mu < 0,5$  ist.

Die Gleichung (2.1) berücksichtigt in dieser Form noch nicht die Biegung auf der Unterlage, durch die  $p = p(x, y)$  gilt.

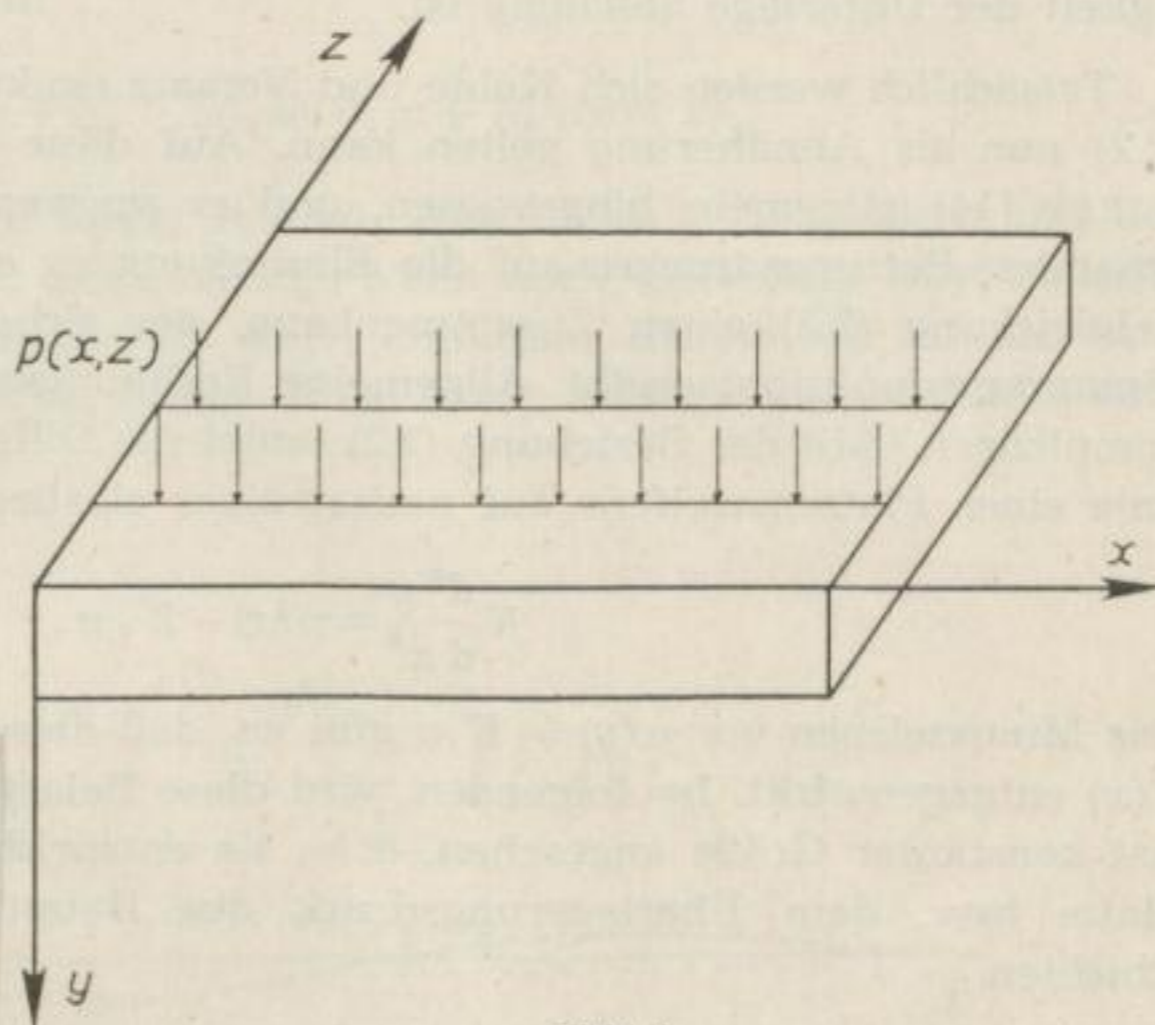


Bild 1



Nach der sogenannten WINKLER-Hypothese ist die Gegenkraft der Unterlage proportional der Senkung  $y$  an jeder Stelle  $x$ .

Es gilt also:

$$p(y) = E'_1 y \quad (2.2)$$

$E'_1$  ist eine von den elastischen Eigenschaften der Unterlage abhängige Konstante (Bettungsziffer) in  $\text{kg/cm}^2$ , deren Größe vom  $E$ -Modul und von der Mächtigkeit der Unterlage abhängig ist.

Tatsächlich werden sich Kohle und Versatz exakt nicht so verhalten, so daß (2.2) nur als Annäherung gelten kann. Auf diese Tatsache hat schon WIEGHARDT [14] allgemein hingewiesen, und er verwendete, um den Einfluß des gesamten Bettungsdruckes auf die Einsenkung zu erfassen, statt der Differentialgleichung (2.3) einen Zusammenhang, der sich aus der Elastizitätstheorie (Spannungsfunktion) ergibt. Allgemeine Rechnungen dieser Art sind aber sehr kompliziert.<sup>2</sup> Mit der Beziehung (2.2) lautet die Differentialgleichung der Biegelinie eines Plattenstreifens auf nachgiebiger elastischer Unterlage

$$N \frac{d^4 y}{dx^4} = p(x) - E'_1 y. \quad (2.3)$$

Das Minuszeichen vor  $p(y) = E'_1 y$  gibt an, daß diese Gegenkraft der Belastung  $p(x)$  entgegenwirkt. Im folgenden wird diese Belastung der Platte als Flächenlast konstanter Größe angesehen, d. h., sie entspricht dem Eigengewicht dieser Platte bzw. dem Überlagerungsdruck des Haupthangenden auf die Dachschichten.

Mit  $p(x) = p_0 = \text{const}$  lautet die inhomogene Differentialgleichung:

$$N \frac{d^4 y}{dx^4} + E'_1 y = p_0 \quad (2.4)$$

Ihre allgemeine Lösung ist bekannt:

$$y = \frac{p_0}{E'_1} + e^{-\alpha_1 x} (A_1 \sin \alpha_1 x + A_2 \cos \alpha_1 x) + e^{\alpha_1 x} (B_1 \sin \alpha_1 x + B_2 \cos \alpha_1 x) \quad (2.5)$$

mit

$$\alpha_1 = \sqrt[4]{\frac{E'_1}{4N}}.$$

Dabei stellen  $p_0/E'_1$  eine spezielle Lösung der inhomogenen und die beiden anderen Summanden die allgemeine Lösung der homogenen Gleichung dar.

<sup>2</sup> Die WINKLER-Hypothese berücksichtigt also z. B. nicht das Ansteigen der Verformungswiderstände des Flözes vom Strebstoß nach dem Vorfeld. Sie bietet aber einfache Näherungen und wird in der Baustatik darum auch verwendet. Insbesondere – und das sei hier nur erwähnt – bleiben nach dem Ansatz (2.2) Schubspannungen zwischen Platte und Unterlage unberücksichtigt. Indem diese Bedingung  $(\tau_{xy})_{y=0} = 0$  besteht, müssen die Normalspannungen  $\sigma_y$  zwischen Dach und Unterlage (die sich aus der Lösung (2.4) ergeben (vgl. S. 51 ff.)) oszillieren, wie MARGUERRE (ZAMM 1937, Heft 4, S. 229) betont. Es ist somit denkbar, daß je nach der Wirksamkeit von Schubspannungen zwischen Platte und Unterlage eine wellenartige Senkungskurve bzw. Verteilung der Normalspannungen entstehen kann und meßtechnisch auch nachweisbar bleibt.



Für den Sonderfall, daß die Platte unendlich lang ist, vereinfacht sich die Gleichung (2.5). Bild 16 zeigt eine endliche Platte der Länge  $2 \cdot s$  und im Gegensatz dazu Bild 14 eine Platte, die unendlich lang ist. In diesem Fall werden die Konstanten

$$B_1 = B_2 = 0,$$

da für  $x \rightarrow \infty$  mit  $e^{\alpha_1 x}$  sonst die Durchbiegung unendlich groß werden müßte.

Die Lösung lautet darum:

$$y = \frac{p_0}{E_1} + e^{-\alpha_1 x} (A_1 \sin \alpha_1 x + A_2 \cos \alpha_1 x) \quad (2.6)$$

Die Gleichung (2.6) zeigt in ihrem Aufbau eine formale Ähnlichkeit mit der Gleichung einer gedämpften Schwingung. Wenn auch keinesfalls physikalische Identität besteht, so darf man doch einen ähnlichen Kurvenzug für die Senkungslinie erwarten, wie er bei dieser Schwingung entsteht und in Bild 2 dargestellt ist.

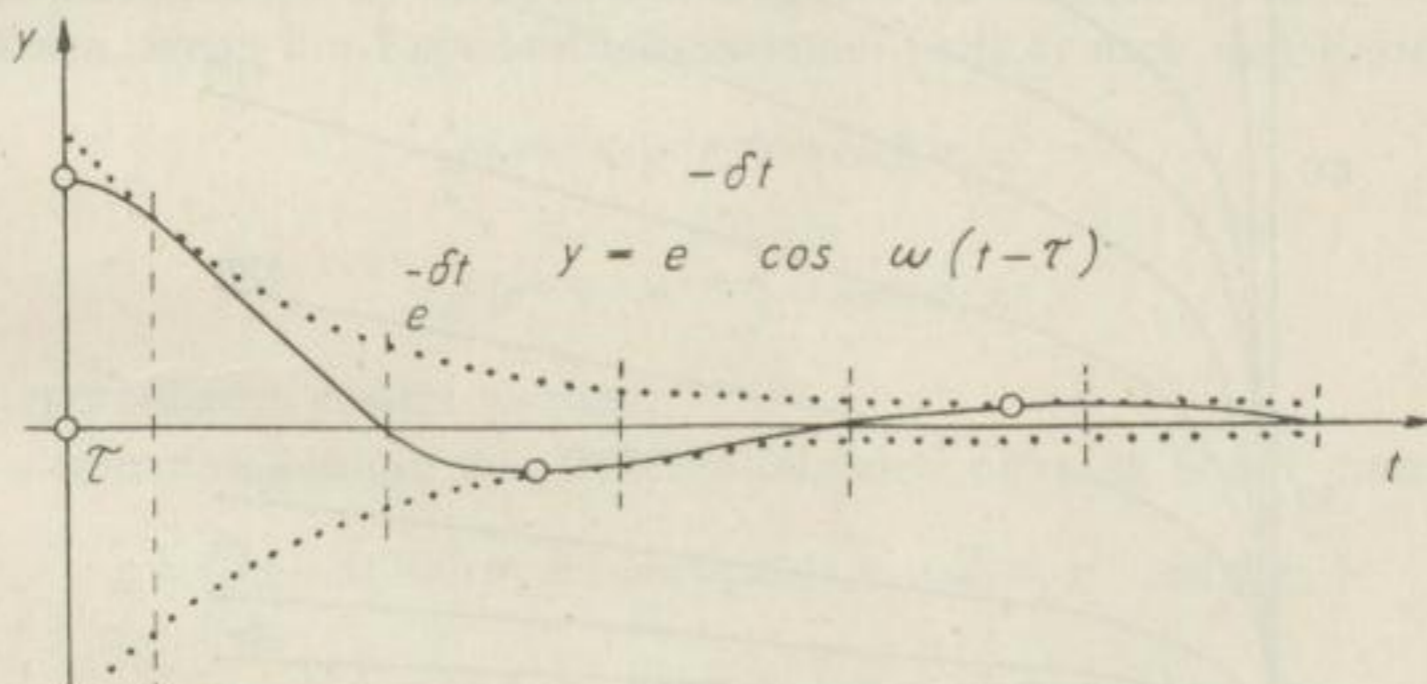


Bild 2

Zieht man in diesem Sinne zwischen beiden Gleichungen Analogien, so ist der Begriff der „Wellenlänge“ wie folgt zu übertragen:

$$\lambda_1 = \frac{2\pi}{\alpha_1} = 2\pi \sqrt[4]{\frac{4N}{E_1}}$$

Dieser Ausdruck wird in der Festigkeitslehre auch verwendet [12].

Die Wellenlänge ist eine für das System äußerst typische Konstante und erhält im folgenden große Bedeutung für die Beurteilung der Senkungsvorgänge. Es lohnt sich daher, diesen Ausdruck graphisch darzustellen (Bild 3). Bei der graphischen Darstellung der Beziehung wurden die folgenden Voraussetzungen zugrunde gelegt. Setzt man nach KEGEL [8]  $\mu = 0,27$ , so gilt angenähert:

$$N = \frac{E_0 h^3}{11}$$



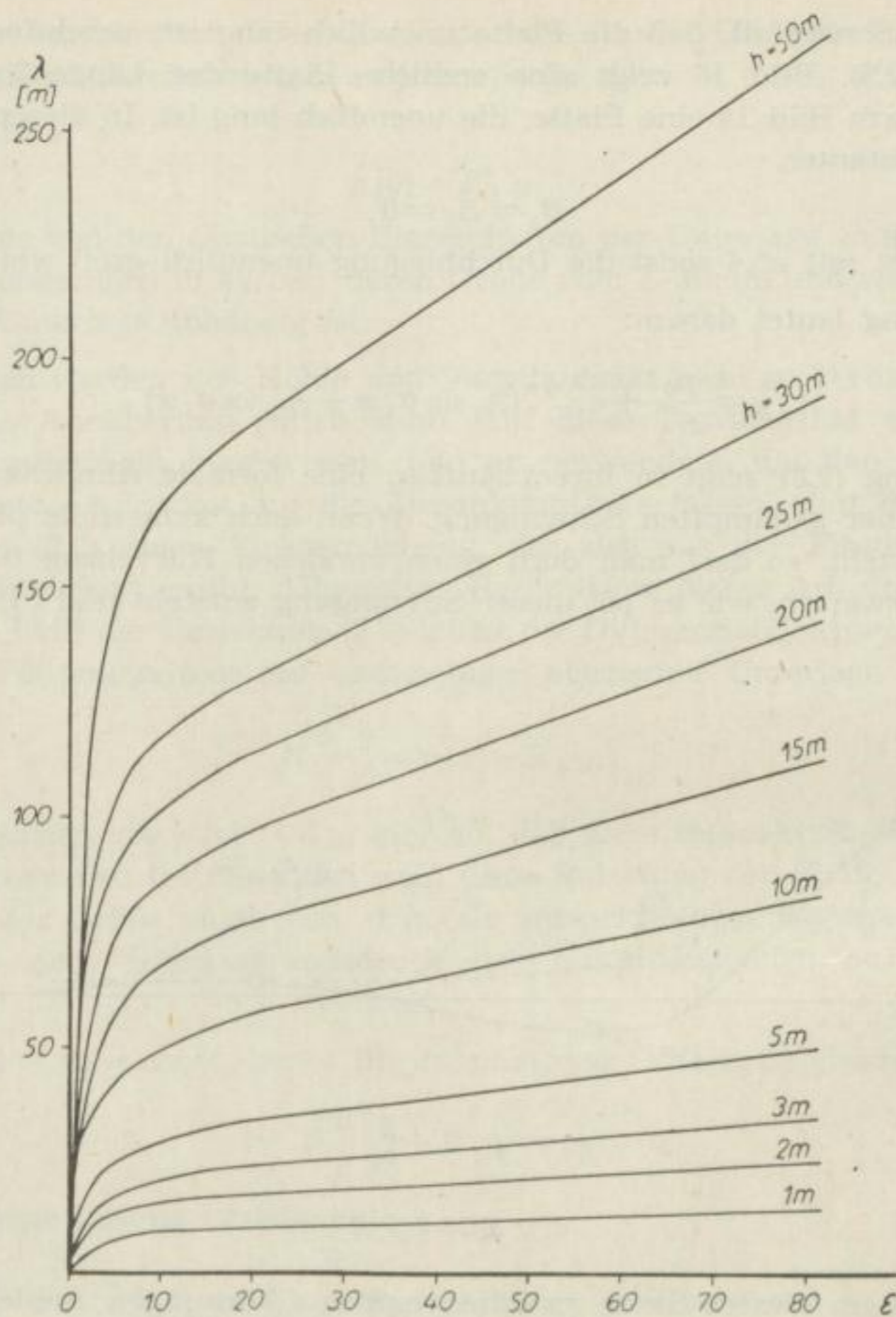


Bild 3

Die Gleichung für  $\lambda_1$  lautet dann:

$$\lambda_1 = c \sqrt[4]{\varepsilon \cdot h^3}$$

mit

$$c = 2\pi \sqrt[4]{4/11} \approx 5$$

$$\varepsilon = E_0/E'_1$$

Für  $\varepsilon$  sind alle Werte  $0 \leq \varepsilon \leq \infty$  denkbar, so daß die Wellenlänge der Senkungskurve (d. h. der Abstand zweier Amplitudenmaxima z. B.) als Funktion von  $\varepsilon$  und  $h$  beispielsweise für  $E'_1 = 0$  nach unendlich strebt. Dieser Grenzfall besagt, daß der Balken auf elastischer Unterlage zum einfachen Balken ohne



Unterlage wird, so daß die Biegung ohne Unterlage nur als ein Grenzfall erscheint.

Die Wellenlänge steigt nach Bild 3 stark mit der Höhe der Dachschicht und mit dem Wachstum von  $\varepsilon$ , d. h., je biegungssteifer die Schicht ist, desto geringer ist der Einfluß der Gegenkräfte auf die Biegung und die Durchbiegung selbst.

Die Spannungsverteilung in einer Schnittebene zwischen der Platte und ihrer Unterlage läßt sich definitionsgemäß nach Gleichung (2.2) mit den Gleichungen (2.5) bzw. (2.6) bestimmen, beispielsweise<sup>3</sup>

$$-\sigma_y(x) = E'_1 y = p_0 + E'_1 e^{-\alpha_1 x} (A_1 \sin \alpha_1 x + A_2 \cos \alpha_1 x). \quad (2.61)$$

Man erkennt, daß an jeder Stelle  $x$  die Belastung (Überlagerungsdruck) plus einem (positiv oder negativ zu denkenden) Zusatzwert wirksam ist, der sich aus der Größe der Konstanten  $A_1$  und  $A_2$  ergibt, die nach den jeweils vorliegenden Randbedingungen der Aufgabe festzulegen sind.

Für spätere Rechnungen ist es günstig, die allgemeine Lösung der Differentialgleichung auch in einer anderen Form zu schreiben. Man erhält eine solche Form, wenn die Exponentialfunktionen in (2.5) nach den Beziehungen

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}(e^{\alpha_1 x} + e^{-\alpha_1 x}) &= \cosh \alpha_1 x \\ \frac{1}{2}(e^{\alpha_1 x} - e^{-\alpha_1 x}) &= \sinh \alpha_1 x \end{aligned}$$

durch hyperbolische ersetzt werden.

Die allgemeine Lösung der Differentialgleichung (2.4) lautet dann:

$$\begin{aligned} y = \frac{p_0}{E'_1} + \bar{A}_1 \sinh \alpha_1 x \sin \alpha_1 x + \bar{A}_2 \cosh \alpha_1 x \cos \alpha_1 x + \\ + \bar{A}_3 \sinh \alpha_1 x \cos \alpha_1 x + \bar{A}_4 \cosh \alpha_1 x \sin \alpha_1 x \end{aligned} \quad (2.7)$$

Der Vorteil dieser Lösung liegt in ihrer Verwendung bei Symmetrieeigenschaften des Modells. Bild 4 zeigt z. B. ein Modell, bei dem beiderseitig der Ordinate Symmetrie herrscht.

Die Bedingung für Symmetrie lautet (gerade Funktionen):

$$y(x) = y(-x)$$

Die Senkungsbeträge an den Stellen  $x < 0$  müssen genau denen von  $x > 0$  entsprechen.

Untersucht man die vier Summanden der allgemeinen Lösung, inwieweit sie einzeln diese Bedingung erfüllen, so gilt, daß diese Bedingung nur von den partikulären Lösungen

$$\begin{aligned} \sin x \sinh x &= \sinh(-x) \sin(-x) \\ \cos x \cosh x &= \cosh(-x) \cos(-x) \end{aligned}$$

erfüllt wird. Die beiden anderen sind demnach als Produkt ungerade Funk-

<sup>3</sup> Das negative Vorzeichen vor  $\sigma_y$  soll andeuten, daß diese Spannungen der Belastung  $p_0$  entgegengerichtet sind.



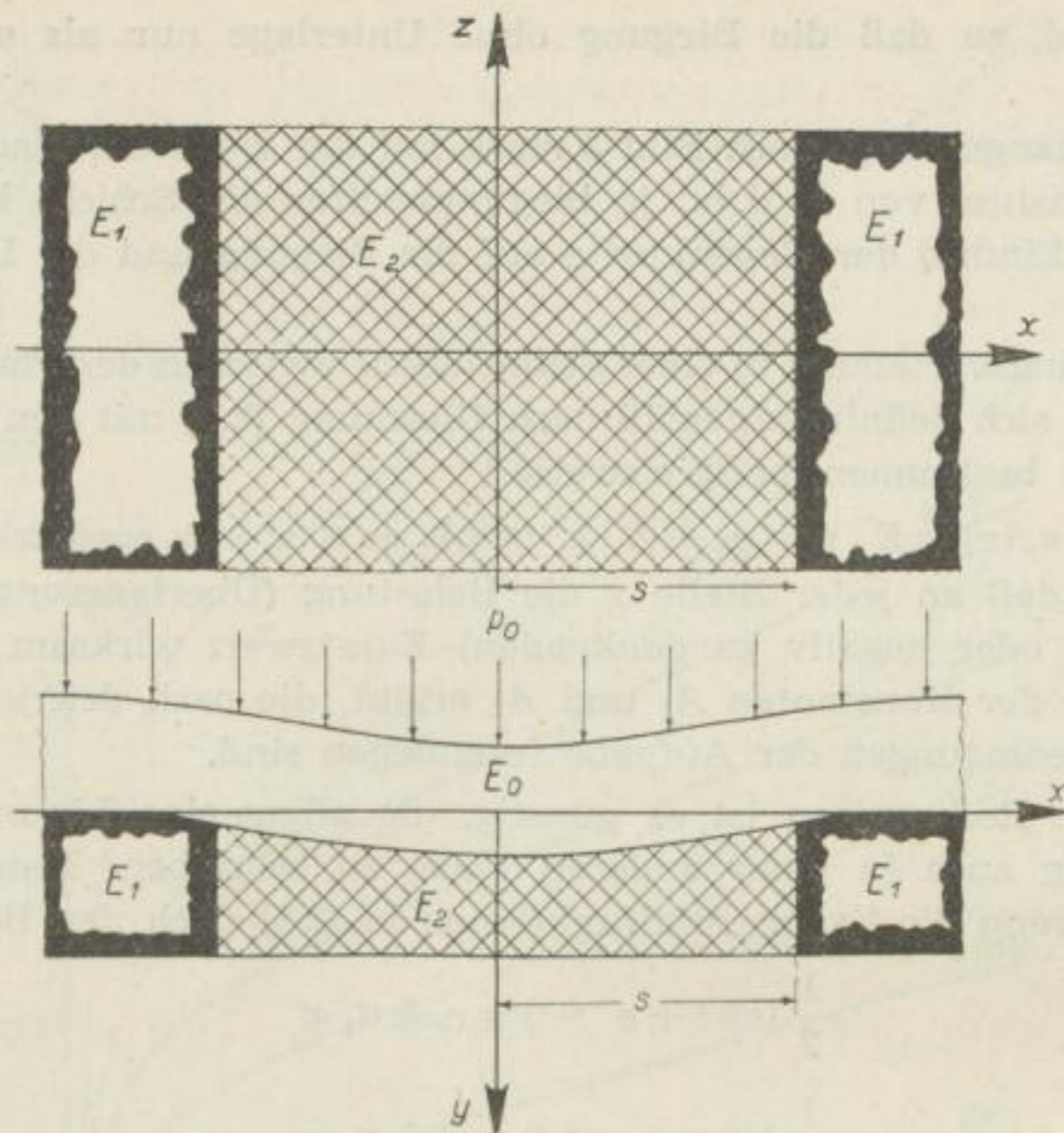


Bild 4

tionen, und aus der Bedingung der Symmetrie folgt damit:

$$\bar{A}_3 = \bar{A}_4 = 0$$

Die allgemeine Lösung der inhomogenen Gleichung ist unter diesen Bedingungen also recht einfach:

$$y = \frac{p_0}{E'_1} + \bar{A}_1 \sinh \alpha_1 x \sin \alpha_1 x + \bar{A}_2 \cosh \alpha_1 x \cos \alpha_1 x \quad (2.8)$$

Die Vorzüge der beiden allgemeinen Lösungen treten jeweils dann hervor, wenn in besonderen Fällen, die (2.6) und (2.8) angeben, zwei Konstante nicht zu berechnen sind. Liegt nach dem Modell ein Plattenstreifen von unendlicher Länge vor, so wird man mit Vorteil (2.6) verwenden, während bei endlicher Länge und Symmetrie der Vorteil von (2.8) augenscheinlich ist.

### 3 MODELLVORSTELLUNGEN VOM STREBBAU

#### 3.1 Begründung der Modellvorstellungen

Bild 4 zeigt im Schnitt und im Grundriß das Gedankenmodell, das den folgenden Rechnungen zugrunde liegt. Mit  $E'_1$  wird das Flöz, mit  $E'_2$  der Versatz (als Unterlagen) und mit  $E_0$  die Dachschicht bezeichnet, deren Biegelinie es im folgenden zu ermitteln gilt (als Plattenstreifen). Die abgebaute Flözfläche, die voll mit Versatz ausgefüllt sei, ist in Wirklichkeit von vier Flözkanten um-



randet, die ein Rechteck darstellen sollen. Wie schon hervorgehoben, bereitet die Ermittlung der Gleichung der gebogenen Fläche dieser Platte mathematische Schwierigkeiten, sobald man die vier Ränder zu berücksichtigen wünscht. Um diese Schwierigkeit zu umgehen, wurde die Differentialgleichung der Platte in den Grenzfall des Plattenstreifens überführt, für den sich die Platte in der  $z$ -Richtung ins Unendliche erstreckt. Die Bestimmung der Randwerte wird bedeutend vereinfacht, da im Endlichen nur noch zwei Ränder für  $x = \pm s$  vorhanden sind. Somit gilt es, noch eine Festsetzung über die Lage des Strebens zu treffen.

Im Grubenbetrieb erfolgt die Entwicklung des Abbaus aus einer Strecke, deren Längsachse im Idealfall parallel zu sich selbst verschoben wird (vgl. Bild 20), so daß sich die abgebaute Fläche ständig vergrößert. Diese Vergrößerung erfolgt aber nur in der Verbreiterung der aufgefahrenen Strecke, da ihre Länge, die spätere Streblänge, während des gesamten Abbaus konstant bleibt, was hier vorauszusetzen ist: Die Abbaufäche wird aus dem schmalen Rechteck der Streckengrundfläche im Laufe des Abbaus zu einer quadratischen Form gelangen, um dann wieder zu einem Rechteck zu werden, dessen längere Seite nun die senkrecht zur Streblänge stehende „verhauene Feldlänge“<sup>4</sup> bildet.

Nach Bild 4 ergeben sich prinzipiell zwei Möglichkeiten:

1. Die Länge  $2s$  ist gleich der Streblänge zu setzen und die verhauene Feldlänge wird im Modell unendlich lang angenommen.
2. Die Streblänge sei unendlich lang und der Wert  $2s$  entspricht der verhauenen Feldlänge.

Man erkennt, daß durch die Darstellung des Daches als Plattenstreifen zwangsläufig das Modell immer nur einen Grenzfall des wirklichen Abbaus erfassen kann, entweder unendliche Streblänge oder unendliche verhauene Feldlänge. Die mathematischen Schwierigkeiten der Aufgabe zwingen zu dieser Vereinfachung.

Wie im Folgenden noch näher ausgeführt wird, ist die Festlegung der Länge  $2s$  als Streb- oder verhauene Feldlänge durchaus nicht gleichwertig, wenngleich sie für beide Fälle mit entsprechender Einschränkung anwendbar erscheint. Bezeichnet man mit  $2s$  die verhauene Feldlänge, dann lautet die Frage: Wie verändern sich die Senkungs- und Druckerscheinungen im Strebvorfeld und im Versatzraum im Verlauf des stetigen Verhiebs, d. h. mit der ständigen Vergrößerung dieser Feldeslänge?

Wird  $2s$  als Streblänge angesehen, heißt die Frage: Welchen Einfluß übt die Größe der Streblänge auf die Verteilung des Druckes im Flöz und im Versatz bei genügend großer verhauener Feldlänge aus?

In der Literatur ist der zweiten Frage bisher nur äußerst wenig Augenmerk geschenkt worden, was zum Ausdruck kommt in den Messungen der Senkungs-

<sup>4</sup> Für diese abgebaute Länge des Baufeldes gibt es in der Literatur keine fixe Bezeichnung. Um den Ausdruck nicht ständig zu umschreiben, wird im folgenden dieser Längenwert, der also während des Abbaus mit dem Fortschreiten des Verhiebs sich stetig vergrößert, in Ermanglung eines anderen Begriffs als „verhauene Feldlänge“ bezeichnet.



kurven (und der Druckverteilung im Versatz), die im allgemeinen nur im Strebvorfeld erfolgten; die „stehenden Abbaukanten“ wurden kaum berücksichtigt. Die Vernachlässigung dieses Problems erklärt sich einfach daraus, daß für den Betriebsablauf zunächst nur die Senkungs- und Druckerscheinungen in der Nähe des Streb, d. h. im Strebvorfeld, bedeutungsvoll sind, während die stehenden Baukanten für den Betriebsablauf im Streb (ausgenommen für die Förderstrecken) unmittelbar keine Bedeutung besitzen<sup>5</sup>. Eine solche Auffassung wäre aber verhängnisvoll, wenn man versucht, für die Senkungs- und Druckerscheinungen eine theoretische Erklärung zu finden.

Bei Beantwortung der Frage nach dem Einfluß der Veränderungen der verhauenen Feldlänge muß — als Folge des stetigen Verhiebs — der Zeitfaktor berücksichtigt werden, der durch die Verhiebsgeschwindigkeit eingeführt wird. Die Aufgabe wird zu einem „dynamischen“ Problem. Für die Frage nach dem Einfluß der Streblänge wird die Verhiebsgeschwindigkeit nur von untergeordneter Bedeutung sein, weil die stehenden Baukanten sich im Gegensatz zum Strebstoß nicht bewegen, so daß sich dieses Problem leichter auf ein statisches reduzieren läßt.

Wollte man dem Charakter der hier verwendeten Theorie der Mechanik voll entsprechen, so bliebe allein die Untersuchung der „statischen Bedingungen“, d. h. des Einflusses der Veränderungen der Streblänge, denkbar. Für sehr kleine Verhiebsgeschwindigkeiten wird man aber voraussetzen können, daß zu jeder beliebigen Zeit der Senkungsvorgang im Verlaufe der Vergrößerung der verhauenen Feldlänge  $2s$  als abgeschlossen anzusehen ist, wodurch die theoretischen Ergebnisse, die exakt nur auf die Erscheinungen an den stehenden Baukanten und in einer Richtung des Versatzraumes parallel zum Strebstoß anwendbar sind, unter entsprechender Berücksichtigung dieser Unvollkommenheit z. B. auf das Strebvorfeld übertragen werden dürfen. Vergleiche zwischen den theoretischen Ergebnissen und praktischen Messungen ermutigen zu diesem Schluß (vgl. Abschnitte 3.32 und 3.44). Mit anderen Worten: Es werden nach dieser Überlegung Symmetrieeigenschaften für die Senkungs- und Druckerscheinungen angenommen, d. h., diese Erscheinungen sind parallel und senkrecht zum Strebstoß für Flöz und Versatz im Grundsätzlichen gleich zu erwarten. Betont sei aber nochmals, daß die verwendeten Modellvorstellungen vor allem für die stehenden Baukanten von Bedeutung sind, wofür dem Verfasser aber leider keine markscheiderischen Meßergebnisse zugänglich waren, so daß in der vorliegenden Arbeit beim praktischen Vergleich auf Meßergebnisse im Strebvorfeld zurückgegriffen werden mußte. Selbstverständlich müssen auch hier prinzipiell analoge Gesetze gelten, so daß diese Betrachtungsweise berechtigt erscheint.

Modell wie Streb ist gemeinsam, daß die Nachgiebigkeit des Versatzes, hervorgehoben durch  $E'_2$ , viel größer ist als die des Flözes ( $E'_1$ ).

<sup>5</sup> SCHULTE [27] hat z. B. diesen Fragen durchaus Bedeutung zuerkannt. Auch JACOBI [24] hat den Druckerscheinungen auf den stehenden Baukanten Aufmerksamkeit geschenkt.



Diese Beziehung, die durch das nachträgliche Verfüllen des Abbauhohlraumes gegeben und damit Folge der Hohlrumbauebildung ist, bildet die eigentliche Ursache für das Absinken (Durchbiegen) des Hangenden über dem Versatzfeld, für die daraus resultierende Rißbildung im Dach etc.; sie hat eine zusätzliche Hebelwirkung (Moment) auf das Flöz zur Folge, die sich auf eine bestimmte Entfernung ins Vorfeld ausbreitet; sie erzeugt in Verbindung mit der Eigentragfähigkeit (Steifigkeit) des Daches und der Wirkung der Flözränder (Auflager) eine grundsätzliche Form der Druckverteilung im Versatz. Indem sich der Streb ständig ausbreitet, werden diese Wirkungen verstärkt, variiert und können unter Umständen zum Bruch des Hangenden führen. Daraus ergibt sich eine charakteristische Form der Biegelinie des Daches, die als Senkungskurve der Dachschichten bekannt ist und tatsächlich gemessen wurde (vgl. Bild 9).

In den folgenden Modellvorstellungen sind keine geometrischen und physikalischen Unstetigkeiten des Gebirgskörpers, wie Klüfte, tektonische Störungen, wechselnde Mächtigkeiten einzelner Schichten etc., berücksichtigt. Diese können und werden oft sogar örtlich typisch sein — aber immer nur örtlich. Sie sind im Hinblick auf einheitliche, umfassende Aussagen über die Senkungs- und Druckerscheinungen beim Strebbau schlechthin nicht spezifisch, nicht gesetzmäßig, d. h., auch durch kein überall gültiges Gesetz zu berücksichtigen. Sie erzeugen lokale Modifikationen, aber keine wesentlichen Merkmale für den Strebbau. Wenn dem nicht so wäre, könnte man keine allgemeinen Grundsätze in den zu untersuchenden Fragen finden und die LEHMANNsche Trogtheorie könnte z. B. nicht allgemeingültig sein. Im Sinne dieser Überlegungen gilt es darum, das Schichtsystem des Gebirgskörpers — und nur ein solches ist hier Untersuchungsgegenstand — durch ein Ersatzsystem zu erfassen, das, geometrisch und physikalisch vereinfacht, im Hinblick auf die zu untersuchenden Eigenschaften dem Gebirgskörper ähnlich bleibt.

Die Gebirgseigenschaften des hangenden Schichtensystems lassen sich generell durch die sinnvollen und allgemein anerkannten Begriffe „Dachschichten“ und „Haupthangendes“ symbolisieren. Diese Teilung liegt den Modellvorstellungen zugrunde. Vorausgesetzt wird weiterhin bruchlose Verformung der Dachschichten bei ihrer Absenkung, wobei das Verformungsverhalten selbst linear-elastisch sein soll. Das Haupthangende wird als Belastung der Dachschichten angesehen. Die qualitativen Unterschiede in der Beschaffenheit dieser Dachschichten, wie sie in den verschiedenen Revieren auftreten, werden auf quantitative Unterschiede einer Materialkennziffer, nämlich des  $E$ -Moduls ( $E_0$ ) dieser Schichten zurückgeführt. Damit sind die elastischen bzw. „Härte“-Eigenschaften des Daches theoretisch zwischen Null und unendlich zu variieren; das „plastische“ Verhalten eines Schiefertondaches entspricht beispielsweise einem niedrigen  $E$ -Modul im Gegensatz zum mehr „spröden“ Charakter des Sandsteins. Weiterhin werden genaue Versatzeigenschaften nicht berücksichtigt, bleiben Versatzlücken etc. unbeachtet; desgleichen wird von Einflüssen des vorhandenen freien Strebraumes abgesehen. Die Entwicklung des Strebs aus einer Strecke, wie sie in der Tat erfolgt, ist nur mittelbar, über die Variation der verhauenen



Feldlänge erfaßt. Es ist klar, daß die Deutung der Erscheinungen an Hand von Modellen nur eine Näherungslösung darstellt, der um so mehr Bedeutung zukommt, je mehr wesentliche, d. h. allgemeingültige, Merkmale sie hervorhebt.

Alle wesentlichen Merkmale, die auf die Abbauwirkungen von Einfluß sind, lassen sich in drei Gruppen zusammenfassen:

- a) geometrische,
- b) physikalische und
- c) zeitliche Faktoren.

Die ersten beiden Gruppen könnte man als die „statischen“ Merkmale der Aufgabe ansehen, weil sie im allgemeinen unabhängig sind von zeitlichen Einflüssen. Sie allein sind mit den Modellvorstellungen — auf der Grundlage der gegebenen Voraussetzungen — vereinfacht und erfaßt, wobei auch aus mathematischen Gründen Vereinfachungen notwendig sind. Anders die dritte Gruppe, die zeitlichen oder dynamischen Faktoren. Diese Begriffe, die in der Bergschadenkunde mittelbar berücksichtigt werden und bei den sog. „dynamischen Zwischenformen“ auftreten [15], sind im Modell nicht erfaßt. Ihre Kenngröße bildet die Verhiebsgeschwindigkeit und (durch diese auf das Gebirge übertragen) die Absenkungsgeschwindigkeit der Schichten.

Bei der Untersuchung der hier zu klärenden Fragen kann man von den zeitlichen Einflüssen absehen. Es ist zu zeigen, daß sich das Wesen von Zusatzdruck, Versatzdruck, Teil-, Voll- und Überflächendruck ohne Berücksichtigung der Verhiebsgeschwindigkeit erklären läßt, daß sie in diesen Fragen ohne entscheidenden Einfluß ist. Mit anderen Worten: Das Wesen des Zusatzdruckes auf den Flözkanten läßt sich aus der Hohlräum- und Überflächendruckbildung ableiten, und der Einfluß der Verhiebsgeschwindigkeit ist für diese Erscheinung nicht unmittelbar maßgebend.

Die Begründung für die gewählten Vorstellungen und ihre Ergebnisse ist qualitativ in der Vollständigkeit des Begriffsbildes zu suchen, das aus der Praxis gewonnen ist und von diesen Vorstellungen widergespiegelt werden muß. Quantitativ müssen die Einzelbegriffe nach Größenordnung und Tendenz ihrer Veränderung einzuschätzen sein. Diese Gedanken werden als Kriterium für „Widerspruchsfreiheit“ zwischen der gewählten Theorie und den praktischen Erscheinungen angesehen.

### 3.2 Bestimmung der Konstanten

Das Modell des Bildes 4 besitzt für  $x = s$  eine Unstetigkeitsstelle; die Gleichung der Senkungskurve der Dachschichten ist aus diesem Grunde für zwei Bereiche aufzustellen.

- a) Bereich  $0 \leq x \leq s$  (Versatzfeld)
- b) Bereich  $s \leq x \leq \infty$  (Strebvorfeld)

Im ersten Fall (Versatzfeld) verläuft die Senkungskurve symmetrisch, d. h.  $y(x) = y(-x)$  für alle  $x$  im angeführten Bereich. Man wird darum mit Vorteil die Lösung (2.8) verwenden; es genügt, nur eine Hälfte des Modells zu betrachten. Im Strebvorfeld erstreckt sich die Dachschicht ins Unendliche, und die Verwendung der Gleichung (2.6) ist angebracht.



Vorfeld:

$$y = \frac{p_0}{E_1'} + e^{-\alpha_1(x-s)} [B_1 \sin \alpha_1 (x-s) + B_2 \cos \alpha_1 (x-s)] \quad (3.21)$$

Versatzfeld:

$$y = y_0 + \frac{p_0}{E_2'} + A_1 \sinh \alpha_2 x \sin \alpha_2 x + A_2 \cosh \alpha_2 x \cos \alpha_2 x \quad (3.22)$$

Dabei gelten die Abkürzungen:

$$\alpha_1 = \sqrt[4]{\frac{E_1'}{4N}}, \alpha_2 = \sqrt[4]{\frac{E_2'}{4N}}, y(s) = y_0$$

Aus beiden Gleichungen ergeben sich fünf unbekannte Konstante:

$$y_0, A_1, A_2, B_1, B_2$$

Ihnen stehen für  $x = s$  auch fünf Bestimmungsgleichungen gegenüber. Die Lösung der Aufgabe ist eindeutig. Die Bestimmungsgleichungen folgen aus den Randbedingungen ( $l = \text{links}$ ,  $r = \text{rechts}$ ):

$$\left. \begin{aligned} y_l'(s) &= y_r'(s) \\ y_l''(s) &= y_r''(s) \\ y_l'''(s) &= y_r'''(s) \\ y_l(s) &= y_0 \\ y_r(s) &= y_0 \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

Verwendet man die Ableitungen von (2.6)

$$\left. \begin{aligned} y_r' &= \alpha_1 e^{-\alpha_1(x-s)} [(B_1 - B_2) \cos \alpha_1 (x-s) - (B_1 + B_2) \sin \alpha_1 (x-s)] \\ y_r'' &= 2 \alpha_1^2 e^{-\alpha_1(x-s)} [B_2 \sin \alpha_1 (x-s) - B_1 \cos \alpha_1 (x-s)] \\ y_r''' &= 2 \alpha_1^3 e^{-\alpha_1(x-s)} [(B_1 - B_2) \sin \alpha_1 (x-s) + (B_1 + B_2) \cos \alpha_1 (x-s)] \end{aligned} \right\} \quad (2.241)$$

und ebenso die der Gleichung (2.8)

$$\left. \begin{aligned} y_l' &= \alpha_2 [(A_1 - A_2) \cosh \alpha_2 x \sin \alpha_2 x + (A_1 + A_2) \sinh \alpha_2 x \cos \alpha_2 x] \\ y_l'' &= 2 \alpha_2^2 [A_1 \cosh \alpha_2 x \cos \alpha_2 x - A_2 \sinh \alpha_2 x \sin \alpha_2 x] \\ y_l''' &= 2 \alpha_2^3 [(A_1 - A_2) \sinh \alpha_2 x \cos \alpha_2 x - (A_1 + A_2) \cosh \alpha_2 x \sin \alpha_2 x] \end{aligned} \right\} \quad (3.242)$$

und berücksichtigt die Abkürzungen für  $x = s$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 s &= \varphi \\ P_1 &= \sinh \varphi \sin \varphi \\ P_2 &= \cosh \varphi \cos \varphi \\ P_3 &= \sinh \varphi \cos \varphi \\ P_4 &= \cosh \varphi \sin \varphi \\ R_1 &= P_3 - P_4 \\ R_2 &= P_3 + P_4 \\ v &= \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \sqrt[4]{\frac{E_2'}{E_1'}} \end{aligned} \right\} \quad (3.243)$$



so lauten die Bestimmungsgleichungen nach (3.23):

$$\left. \begin{aligned} A_2 \cdot P_2 + A_1 \cdot P_1 &= -\frac{P_0}{E'_2} \\ B_2 - B_1 + A_2 v R_1 + A_1 v R_2 &= 0 \\ B_2 - A_2 v^2 P_1 + A_1 v^2 P_2 &= 0 \\ -B_2 - B_1 - A_2 v^3 R_2 + A_1 v^3 R_1 &= 0 \\ \frac{P_0}{E'_1} + B_2 &= y_0 \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

Verwendet man bei der Bestimmung der Konstanten Additionstheoreme, so gilt im Verlauf der Rechnungen:

$$\cos^2 \varphi \sinh \varphi \cosh \varphi + \sin^2 \varphi \cosh \varphi \sinh \varphi = \frac{1}{2} \sinh 2 \varphi$$

$$\cosh^2 \varphi \sin \varphi \cos \varphi - \sinh^2 \varphi \sin \varphi \cos \varphi = \frac{1}{2} \sin 2 \varphi$$

$$\sinh^2 \varphi \sin^2 \varphi + \cosh^2 \varphi \cos^2 \varphi = \sinh^2 \varphi + \cos^2 \varphi$$

Läßt man alle Zwischenrechnungen aus, so lauten die Konstanten letztlich:

$$A_2 = -2 \frac{p_0}{E'_2} \frac{(1+v^2) \sinh \varphi \cos \varphi + (1-v^2) \cosh \varphi \sin \varphi + 2v \cosh \varphi \cos \varphi}{(1+v^2) \sinh 2 \varphi + (1-v^2) \sin 2 \varphi + 4v (\sinh^2 \varphi + \cos^2 \varphi)} \quad (3.261)$$

$$A_1 = 2 \frac{p_0}{E'_2} \frac{(1-v^2) \sinh \varphi \cos \varphi - (1+v^2) \cosh \varphi \sin \varphi - 2v \sinh \varphi \sin \varphi}{(1+v^2) \sinh 2 \varphi + (1-v^2) \sin 2 \varphi + 4v (\sinh^2 \varphi + \cos^2 \varphi)} \quad (3.262)$$

$$B_2 = v^2 \frac{p_0}{E'_2} \frac{(1+v^2) \sinh 2 \varphi - (1-v^2) \sin 2 \varphi + 4v (\sinh^2 \varphi + \sin^2 \varphi)}{(1+v^2) \sinh 2 \varphi + (1-v^2) \sin 2 \varphi + 4v (\sinh^2 \varphi + \cos^2 \varphi)} \quad (3.263)$$

$$B_1 = -v^2 \frac{p_0}{E'_2} \frac{(1-v^2) \sinh 2 \varphi - (1+v^2) \sin 2 \varphi}{(1+v^2) \sinh 2 \varphi + (1-v^2) \sin 2 \varphi + 4v (\sinh^2 \varphi + \cos^2 \varphi)} \quad (3.264)$$

$$y_0 = \frac{p_0}{E'_1} + v^2 \frac{p_0}{E'_2} \frac{(1+v^2) \sinh 2 \varphi + (1-v^2) \sin 2 \varphi + 4v (\sinh^2 \varphi + \sin^2 \varphi)}{(1+v^2) \sinh 2 \varphi - (1-v^2) \sin 2 \varphi + 4v (\sinh^2 \varphi + \cos^2 \varphi)} \quad (3.265)$$

In den Konstanten – und damit in den Gleichungen der Senkungskurve – tauchen folgende Größen auf, bzw. sind die nachstehenden Bedingungen berücksichtigt.

Die Größe  $v$  stellt das Verhältnis der Beschaffenheit zwischen Versatz und Flöz dar. Geometrisch geht die Größe  $s$  bzw.  $\alpha_1 s = \varphi$  als verhaufene Feldlänge oder Maß für die Abbaufäche in die Gleichungen ein. Mit  $\alpha_1$  bzw.  $\alpha_2$  kommt die Steifigkeit des Daches gegenüber seinen Unterlagen zum Ausdruck. Im Folgenden sollen diese Faktoren für Vorfeld und Versatzfeld getrennt untersucht werden.



## 3.3

## Strebvorfeld

## 3.31

## Senkungskurven im Strebvorfeld

Die Gleichung der Senkungskurve des Daches auf den Flözrändern lautet nach (3.21):

$$y = \frac{p_0}{E_1} + \frac{p_0}{E_2} v^2 [-\Phi_1 \sin \alpha_1 (x-s) + \Phi_2 \cos \alpha_1 (x-s)], \quad (3.31)$$

wenn man mit  $\Phi_1$  bzw.  $\Phi_2$  die entsprechenden Ausdrücke der Brüche mit den hyperbolischen und trigonometrischen Gliedern der Gleichungen (3.263) und (3.264) bezeichnet.

Diese Gleichung der Senkungskurve ist formal der Lösung der Differentialgleichung für eine gedämpfte Schwingung ähnlich (vgl. Bild 2). Der damit gegebene oszillierende Charakter der Senkungskurve folgt zwangsläufig aus der Form des gewählten Ansatzes (vgl. Fußnote 2); markscheiderische Feinmessungen bestätigen seine Existenz wie im folgenden gezeigt ist.

Setzt man

$$\frac{(p_0/E_2) v^2 \Phi_2}{\cos \psi} = \frac{-(p_0/E_2) v^2 \Phi_1}{\sin \psi} = D,$$

so erhält man unter Anwendung von Additionstheoremen die Gleichung

$$y = \frac{p_0}{E_1} + D e^{-\alpha_1(x-s)} \cos [\alpha_1 (x-s) - \psi]. \quad (3.32)$$

Diese Beziehung ist (3.31) identisch, wobei die beiden „Teilschwingungen“ der letztgenannten Gleichung in (3.32) zu einer resultierenden „Schwingung“ mit der Phasenverschiebung  $\psi$  zusammengesetzt sind (vgl. [16]).

Setzt man zwei Amplitudenwerte der Senkungskurve, die um  $2\pi$ , also um eine Wellenlänge, auseinander liegen, für die somit

$$x_1 - x_0 = 2\pi/\alpha_1 = \lambda_1$$

ist, ins Verhältnis, so erhält man

$$y_1/y_0 = e^{-\alpha_1(x_1-x_0)} = e^{-\alpha_1 \frac{2\pi}{\alpha_1}} = e^{-2\pi} = \text{const.}$$

Der Wert  $e^{-2\pi}$  ist angenähert gleich  $0,00187 \approx 0,002$ . Das Verhältnis zweier Amplitudenwerte, die um eine Wellenlänge auseinanderliegen, beträgt also 0,002. Zum Beispiel hat sich die Amplitude  $y(s) = y_0$  der Senkungskurve nach  $x = \lambda_1$  auf einen Wert  $0,002 y_0$  verringert.

Dieses Ergebnis ist wichtig, weil aus dem Maß, mit dem die Senkungskurve nach dem Vorfeld gedämpft wird, auf die Reichweite der Senkungskurve selbst zu schließen ist.

Setzt man z. B. die Senkung am Stoß gleich 20 cm, so könnte man nach einer Wellenlänge mit einem Senkungsbetrag von 0,4 mm rechnen, der praktisch im Meßfehlerbereich liegen dürfte. Die Senkungskurve erhält nach den Modellvorstellungen zwischen  $x = s$  und  $x = \lambda_1$  darum grundsätzlich die Form, die Bild 5 zeigt. Es treten im Mittelteil der Kurve Hebungen auf.

→ wie groß



Als markante Größe der Senkungskurve erweist sich der Wert  $y_0$ , von dem alle anderen Amplitudenwerte abhängen. Für  $x = \lambda_1/2$  erhält man z. B. die Amplitude  $-0,043 y_0$ , also eine Hebung, etc.

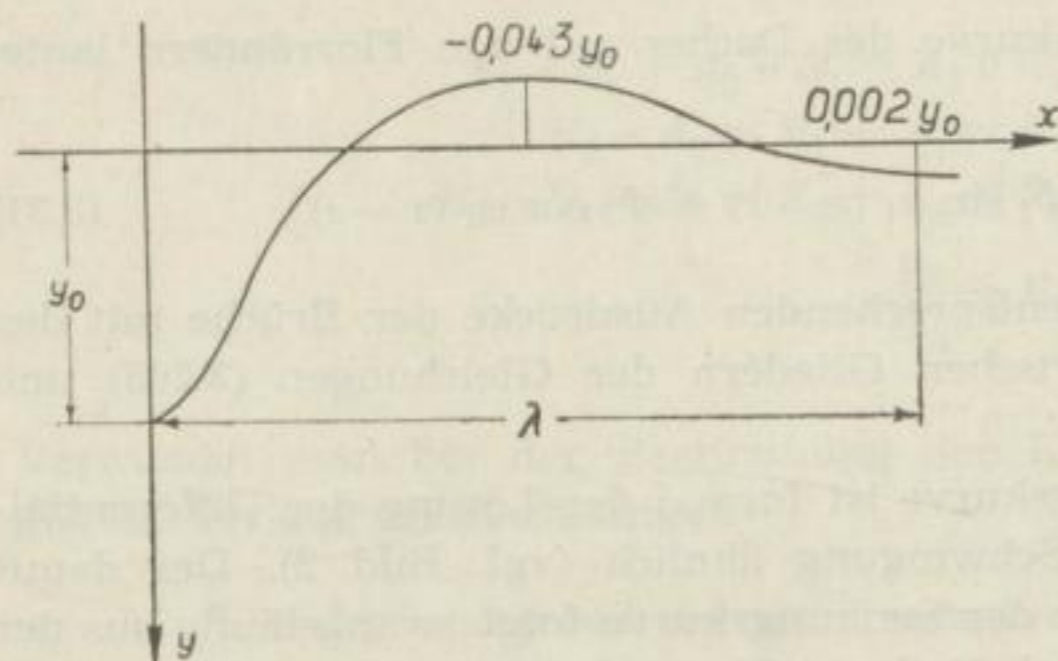


Bild 5

Die Senkung am Stoß vergrößert sich demnach mit schlechter werdendem Versatz, d. h. mit abnehmenden  $v$ -Werten; mit der Vergrößerung von  $s$ , d. h. mit größer werdender verhaunener Feldlänge oder Abbaufäche sowie bei gleicher verhaunener Feldlänge und konstantem  $v$  vergrößert sich  $\varphi$  mit der Vergrößerung von  $\alpha_1$ , d. h.

mit kleiner werdender Steifigkeit des Daches bzw. mit nachlassender Härte des Flözes. Untersuchen wir diese Faktoren einzeln.

#### a) Einfluß der verhaunenen Feldlänge<sup>6</sup>

Die verhaunene Feldlänge kann zwischen zwei theoretischen Grenzwerten schwanken:

$$0 \leq s \leq \infty$$

Für  $s = 0$  hat noch kein Abbau stattgefunden. Wir erhalten  $y_0 = p_0/E'_1$ . Das Senkungsmaß ist über das gesamte Flöz konstant und gleich diesem Wert.

Im Gegensatz dazu strebt  $y_0$  mit steigender verhaunener Feldlänge einem endlichen Grenzwert zu:

$$y_{0 \max} \Big|_{s \rightarrow \infty} = \frac{p_0}{E'_1} + v^2 \frac{p_0}{E'_2}, \quad (3.33)$$

der nur noch von der Versatzdichte, d. h. von der Größe  $E'_2$  abhängig ist.

#### b) Einfluß der Versatzdichte

Wiederum sollen zwei Grenzfälle herausgegriffen werden. Einerseits  $E'_2 = v = 0$ , und als zweiter ist z. B. ein Wert  $E'_2 = E'_1 = E$ , d. h.  $v = 1$ , denkbar.

Im ersten Fall ist gar kein Versatz eingebracht. Das widerspricht der Voraussetzung unserer Aufgabenstellung, nach der eine elastische Unterlage besteht. Die Differentialgleichung (2.4) geht in den Grenzfall (2.1) über.

Im Falle  $v = 1$ , d. h., der eingebrachte Versatz habe die gleichen Tragfähigkeitseigenschaften wie das Flöz, wird

<sup>6</sup> Nach Abschnitt 3.1 ist für  $2s$  (bei unendlicher verhaunener Feldlänge) also ebenfalls die Streb-  
länge zu setzen, und alle folgenden Überlegungen gelten dann auch für die stehenden Bau-  
ränder.



$$y_0 = \frac{p_0}{E} + \frac{p_0 \sinh 2\varphi + 4(\sinh^2 \varphi + \sin^2 \varphi)}{E \sinh 2\varphi + 4(\sinh^2 \varphi + \cos^2 \varphi)} \quad (3.34)$$

$y_0$  ist nur noch eine Funktion der verhauenen Feldlänge. In Abhängigkeit von dieser (s. o.) ist der Maximalwert wiederum für  $s \rightarrow \infty$  erreicht und lautet:

$$y_0 = \left(\frac{p_0}{E}\right)_1 + \left(\frac{p_0}{E}\right)_2 \quad (3.35)$$

Diese Lösung besagt, daß auch bei dichtestem Versatz, dessen  $E'$ -Wert gleich dem des Flözes ist, Senkungen und damit Zusatzdruckzonen im Vorfeld auftreten. Der Maximalwert der Absenkung  $(p_0/E)_2$  ist im Grenzfall gleich dem Wert der ursprünglichen Zusammendrückung  $(p_0/E)_1$  des Flözes, als noch kein Abbau umging.

Diese Schlußfolgerung ist durchaus plausibel. Der Versatz wird nämlich auch im Falle  $E'_2 = E'_1$  um einen Wert  $p_0/E$  zusammengedrückt, sobald er den vollen Überlagerungsdruck  $p_0$  aufgenommen hat, weil er ja sekundär in den Hohlraum eingebracht wird. Der eigentliche Strebraum ist also in keinem Fall einer „wandernden Strecke“ gleich, weil für die eine „Streckenkannte“ an der Versatzseite größere Senkungen eintreten und keine Zusatzdruckzone ausgebildet ist (vgl. S. 76).

### c) Einfluß der Steifigkeit des Daches

Die Steifigkeit des Daches kommt in der Beziehung

$$\varphi = \alpha_1 s = \frac{2\pi}{\lambda_1} s$$

zum Ausdruck. Nach Bild 3 steigt  $\lambda_1$  mit der Vergrößerung der Steifigkeit des Daches. Bei gleicher verhauener Feldlänge wird sich mit dem Wachstum von  $\lambda_1$  der Wert  $\varphi$  verringern und damit die Absenkung  $y_0$  am Stoß. Je größer  $\lambda_1$ , d. h., je größer die Steifigkeit des Daches, um so größer muß die verhauene Feldlänge  $2s$  sein, damit in jedem Fall der gleiche Wert  $y_0$  erreicht ist.

### 3.32 Vergleiche mit markscheiderischen Feinmessungen

Die Messungen des Bewegungsablaufs im Vorfeld gehen von einer Strecke aus, die dem Streb genügend weit vorausgetrieben ist und danach allmählich in den Bereich der Abbauwirkung gelangt. Davon vermittelt Bild 6 einen Eindruck.<sup>7</sup> NIEMCZYK [15] hat in seiner „Bergschadenkunde“ wohl den größten Teil der bis 1949 erfolgten markscheiderischen Messungen zusammengestellt und interpretiert. Das hier aus diesem Buch wiedergegebene Bild 7 demonstriert das Wesentliche aller Einzelmessungen<sup>8</sup> und stellt ein Schulbeispiel dar, dem praktische Meßergebnisse zugrunde liegen. Gleiches zeigt Bild 8.<sup>9</sup>

<sup>7</sup> [15] Abb. 178, S. 176.

<sup>8</sup> [15] Abb. 234, S. 222.

<sup>9</sup> [15] Abb. 181, S. 181.



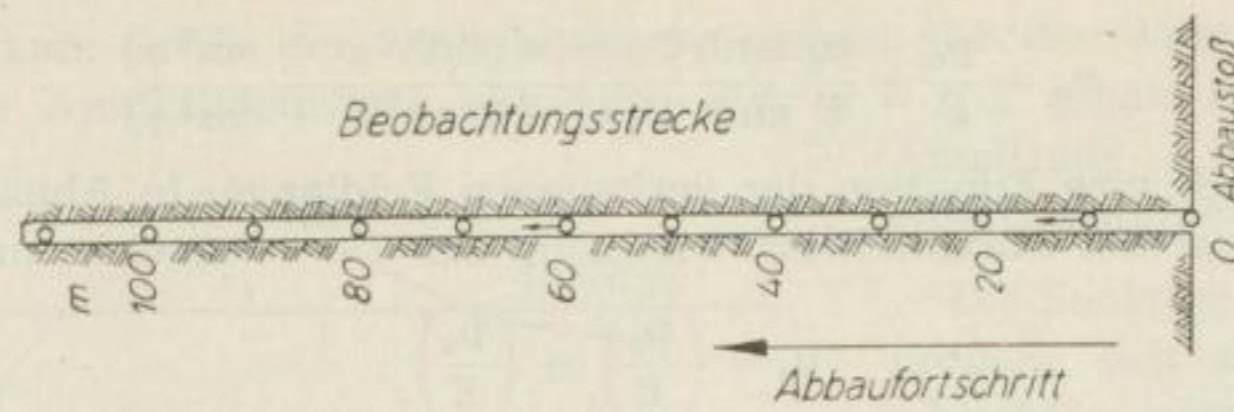


Bild 6

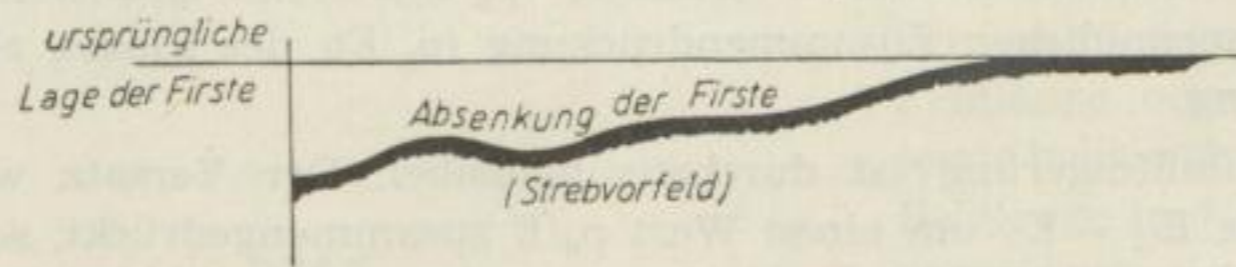


Bild 7



Bild 8

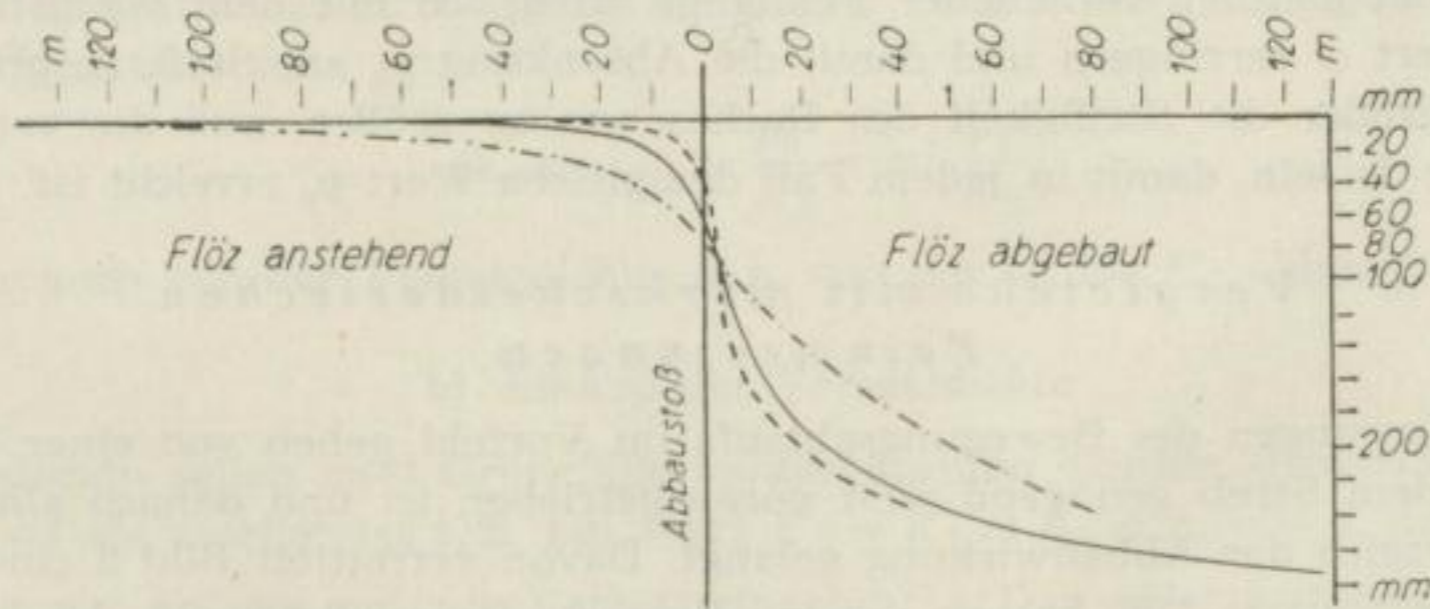


Bild 9

- Absenkung in Flöz Girondelle (Sandstein) (Nach H. HOFFMANN)
- Absenkung in Flöz Karoline (Schiefer-ton) (Nach H. HOFFMANN)
- Absenkung in Flöz Albert 1 (Sandschiefer) (Nach W. GRÄBSCH)



Man erkennt deutlich, daß die Senkung wellenartig verläuft und daß die Senkungskurven ihren tiefsten Punkt am Stoß haben. Weiterhin ist sichtbar, daß der Senkungsverlauf bis zu einer gewissen Länge ins Vorfeld reicht. Dies erläutert noch eingehender Bild 9<sup>10</sup>, das mehrere solcher Senkungskurven zeigt (geglättete Darstellung), wobei besonders auf die jeweils unterschiedlichen Eigenschaften des Daches hinzuweisen ist.

Man erkennt aus den Bildern etwa folgende Eigenschaften, die als Thesen lauten:

1. Im Strebvorfeld besteht eine wellenartige Senkungskurve.
2. Der Punkt größter Absenkung liegt über dem anstehenden Flöz an der Strebkante; die Amplituden klingen nach dem Vorfeld ab.
3. Die Reichweite der Senkungskurve steigt mit der Größe der Absenkung am Stoß und der Steifigkeit des Daches.

Der Charakter der wellenartigen Senkungskurve wurde schon von SPACKELER [17] beschrieben.<sup>11</sup> NIEMCZYK [18] und seinen Schülern [19] [20] gebührt das Verdienst, ihn meßtechnisch nachgewiesen zu haben. Dieser Effekt wurde jedoch nicht im Zusammenhang mit dem Verhältnis der *E*-Werte von Dach und Unterlage, der verhauenen Feldlänge und der Versatzdichte hervorgehoben. Daraus resultiert aber, wann und ob er nachzuweisen ist. Daß er nicht immer oder nur undeutlich erkannt wurde, beweisen praktische Messungen; daß man ihm oft auch keinen besonderen Wert beimaß, bestätigt Bild 9, bei dem die Kurven in der Darstellung geglättet wurden, wie FLÄSCHENTRÄGER [21] hervorhebt. Nur so ist es verständlich, daß die WEBERSche Welle angezweifelt oder negiert wurde [22].

Ein wesentlicher Unterschied besteht jedoch zwischen den Messungen und der „theoretischen Senkungswelle“; er betrifft die Anzahl und Ausbildung der Maxima und Minima, die nach den Bildern 7 und 8 viel größer ist. Diese Tatsache wäre zu erklären, wenn man bedenkt, daß die Ränder des Modells „unbeweglich“ sind und der Strebstoß im Gegensatz hierzu ständig wandert. Durch den stetigen Verhieb, der hier ja nicht berücksichtigt wird, ist die ständige Überlagerung einer bereits vorhandenen Senkungskurve durch die „neu entstehende“ usw. denkbar. Wenn auch die Regelmäßigkeit dieser Senkungen dann nicht eindeutig erscheint, so ist doch die Möglichkeit ihres Auftretens überhaupt, wenn man nach der hier angeführten Theorie urteilt, unbestreitbar.<sup>12</sup>

Ein weiterer Unterschied, der einerseits zwischen Bild 5 und den Bildern 7, 8, 9 andererseits hervortritt, bezieht sich auf die Neigung des Daches über dem Flöz, die Bild 5 nicht zum Ausdruck bringt. Genaugenommen müßte nämlich

<sup>10</sup> [21] Abb. 5.

<sup>11</sup> Auch SPACKELER hat bereits 1928 mit Hilfe der Biegetheorie in der hier vertretenen Richtung diese Erscheinungen interpretiert.

<sup>12</sup> Eine Prüfung der hier angestellten Überlegungen ist also dort denkbar, wo dieses Wandern des Stoßes nicht gegeben ist, d. h. an den „ruhenden Abbaukanten“ im Versatzraum. Hier müssen natürlich die gleichen Gesetze gelten und sogar um vieles mehr, weil eben der Verhieb ohne Einfluß bleibt und einer rein „statischen“ Betrachtung weitaus mehr Bedeutung zukommt.



das Koordinatensystem in Bild 5, wollte man es z. B. mit der Lage der „Abszisse“ als geometrischer Ort für alle Nulldurchgänge der Amplitudenwerte in Bild 7 vergleichen, um einen bestimmten Winkel gegen die Horizontale geneigt sein. Nach den Meßkurven könnte ohne diesen Hinweis durchaus der Eindruck entstehen, als ob Hebungen gar nicht auftreten. Diese Neigung ist in den genannten Beispielen wiederum als Folge des ständigen Verhiebs bzw. des wandernden Stoßes zu erklären, indem durch die stetige Überlagerung vorhandener durch neue Amplitudenwerte die Größe der Senkungen in summa größer ist als die der Hebungen, welche auftreten. Bild 9 zeigt faktisch nur die Neigungen der „Abszissen“, weil Hebungen und Senkungen, die um jene pendeln, nach der Darstellung zeichnerisch ausgeglichen sind, wie oben schon betont.

Von den weiteren auf S. 55 formulierten Thesen spricht die zweite für sich selbst.

Auch die dritte These ist sogleich mit den Überlegungen auf S. 52 verständlich. Je größer nämlich  $y_0$ , desto weiter ins Vorfeld hinaus kann man Amplitudenwerte nachweisen. Damit finden die verschiedenen Reichweiten der gemessenen Kurven (Bild 9) eine natürliche Erklärung. Hinzu tritt noch die Überlegung, daß bei gleichem Wert  $y_0$  am Stoß aber bei verschiedener Wellenlänge, d. h. unterschiedlicher Steifigkeit des Daches, die Reichweite der Senkungskurve für das steifste Dach am größten ist. Die Reichweite der Senkungskurve im Vorfeld steigt mit dem Wachstum der Steifigkeit des Daches und der Vergrößerung der Absenkung am Stoß.

Es sind somit folgende Faktoren vorhanden, die  $y_0$  und die meßtechnisch nachweisbare Reichweite der Senkungskurve beeinflussen:

1. Bleibt  $v$  konstant, so ändert sich  $y_0$  bei gleichen Dacheigenschaften mit der verhauenen Feldlänge. Die Länge der Senkungskurve wächst ebenfalls.
2. Für  $s = \text{const}$  und  $v = \text{const}$  steigt die Reichweite der Senkungskurve mit größer werdender Wellenlänge, d. h. zunehmender Steifigkeit des Daches.
3. Schlechter Versatz vergrößert ebenfalls die Senkung am Stoß und die Länge der Senkungskurve unter sonst gleichbleibenden Voraussetzungen.

### 3.33 *Spannungsverteilung und Zusatzdruck*

Während mit markscheiderischen Feinmessungen der Verlauf der Senkungskurven relativ einfach zu erfassen ist, stellt die Bestimmung des Zusatzdruckes ein schwieriges meßtechnisches Problem dar [23].

Nach der WINKLER-Hypothese (2.2) ist die Druckverteilungskurve „Spiegelbild“ der Senkungskurve. Diese einfache Beziehung vermittelt zweifellos eine brauchbare wenn auch nicht exakte Lösung und beruht auf der mit den Voraussetzungen eingeführten Überlegung, daß Verformungen (Senkungen) und Spannungen im Sinne des HOOKSchen Gesetzes einander proportional sind. Es gilt damit die Gleichung (2.61). An jeder Stelle  $x$  im Vorfeld entstehen zum Überlagerungsdruck zusätzliche „Spannungen“ (Zusatzdruck) jeweils dort, wo



eine zusätzliche Zusammendrückung des Flözes vorhanden ist, während Entlastungszonen sich dort bilden, wo die Senkungskurve Hebungen zeigt (Bild 10).

Andererseits ist die Verformung des Flözes in einem bestimmten Bereich am Strebstoß allein durch die Möglichkeit der Dehnung (Entspannung) nach dem Strebraum denkbar, so daß ein wirkliches Spannungsmaximum, das auf der zusätzlichen elastischen Zusammendrückung des Flözes beruht, vom Stoß sich immer etwas nach dem Vorfeld zu schieben vermag. Gemessen an der Länge der Senkungskurve im Vorfeld, kann dieser Entspannungsweg nicht sehr groß sein, weil die POISSONSche Konstante klein ist und die Verformungswiderstände (Reibung) nach dem Vorfeld schnell zunehmen. Der Entspannungsweg, für den

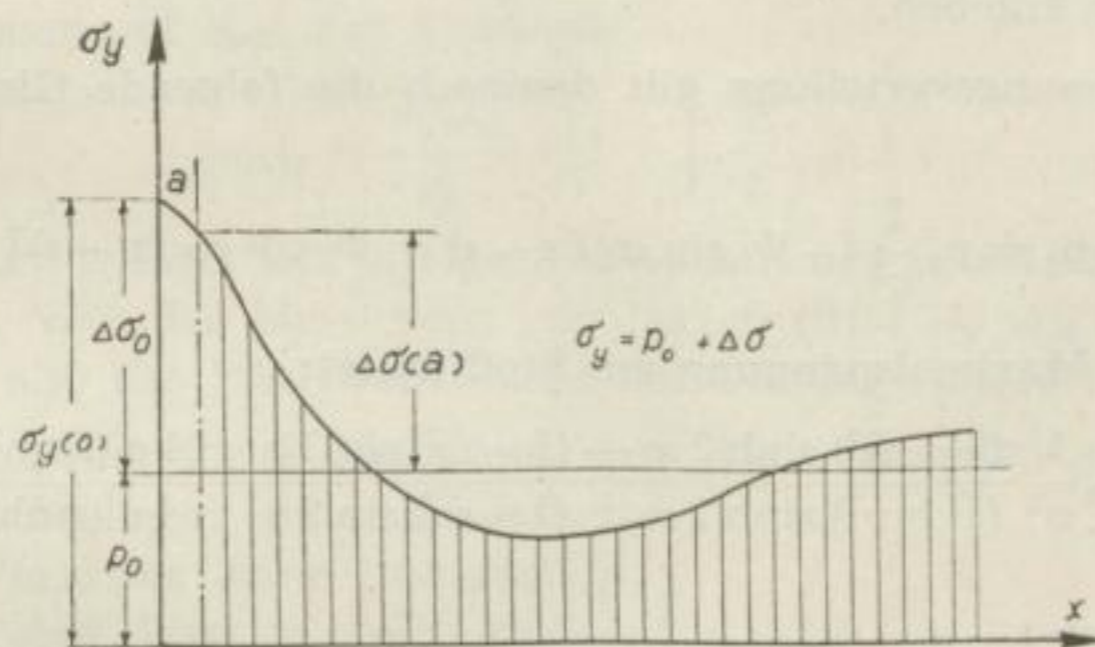


Bild 10

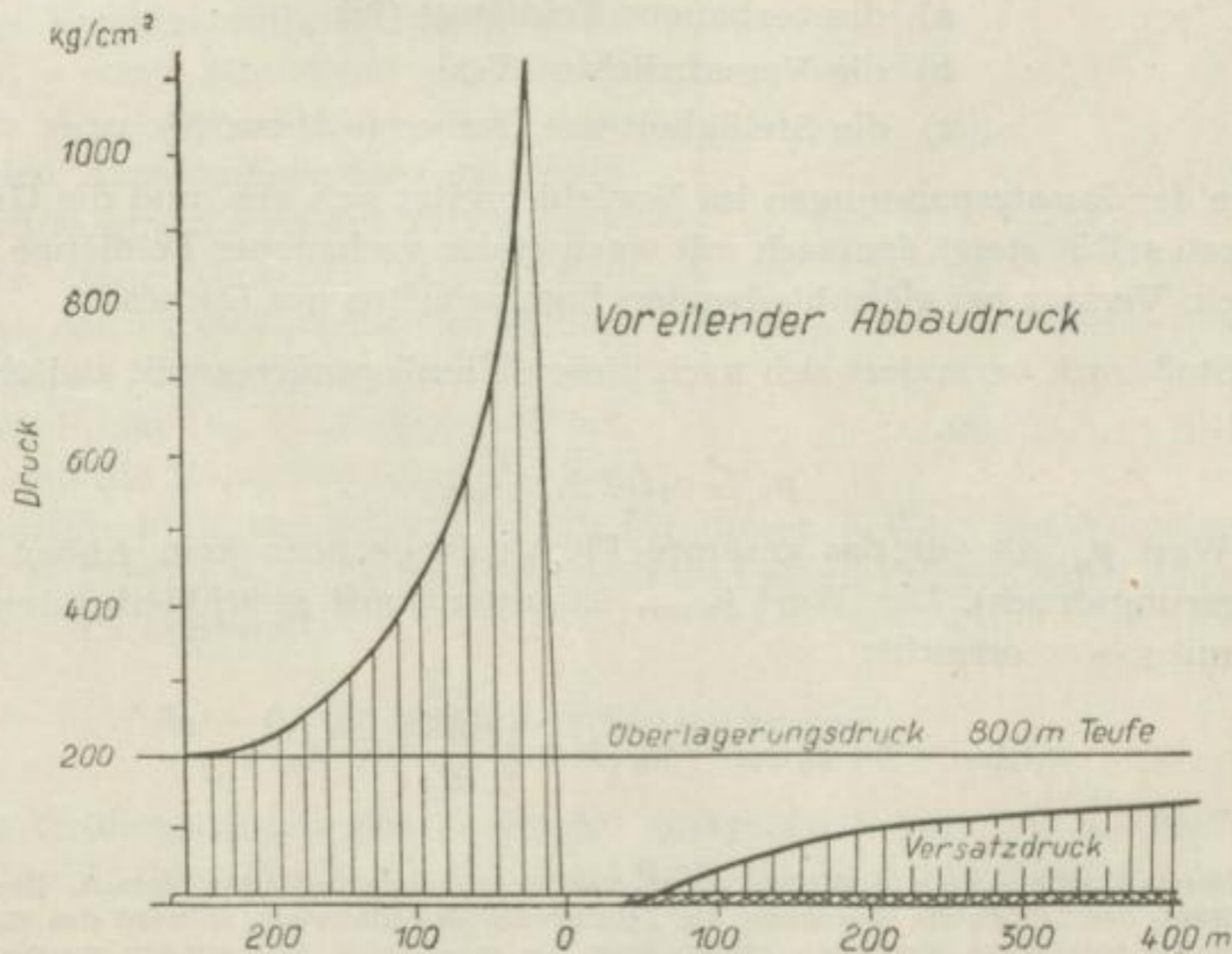


Bild 11



also „Spannungen abgebaut werden“, ist in Bild 10 schematisch mit a angegeben.<sup>13</sup>

JACOBI [24] hat die Spannungsverteilung im Vorfeld dargestellt (Bild 11), wobei diese Angaben auf Meßergebnissen fußen. Eine Analogie zu Bild 10 und damit zu den theoretischen Überlegungen ist unverkennbar.

Da die Spannungen theoretisch aus dem Senkungsverlauf abgeleitet sind, gehen die dort getroffenen Vereinfachungen und Annahmen zwangsläufig in diese Werte ein. Indem dieser Zusammenhang aber besteht, kann man mit notwendiger Vorsicht die Schlußfolgerungen für den Senkungsverlauf auch auf die Verteilung der Zusatzdruckzonen übertragen, die sich theoretisch in der Schnittebene Dach-Flöz ergeben.

Für die Spannungsverteilung gilt demnach die folgende Gleichung in Anklang an (3.31):

$$\sigma_y = p_0 + p_0 \frac{1}{v^2} [-\Phi_1 \sin \alpha_1 (x-s) + \Phi_2 \cos \alpha_1 (x-s)]$$

Die theoretische Maximalspannung am Stoß lautet:

$$\sigma_y(s) = p_0 + p_0 \frac{1}{v^2} \frac{(1+v^2) \sinh 2\varphi - (1-v^2) \sin 2\varphi + 4v (\sinh^2 \varphi + \sin^2 \varphi)}{(1+v^2) \sinh 2\varphi + (1-v^2) \sin 2\varphi + 4v (\sinh^2 \varphi + \cos^2 \varphi)} \quad (3.361)$$

Wiederum ist der Verlauf der Zusatzspannungen nach Reichweite und Größe durch folgende Faktoren bestimmt:

- a) die verhauene Feldlänge ( $2s$ )
- b) die Versatzdichte ( $E'_2$ )
- c) die Steifigkeit des Daches ( $\alpha_1$  bzw.  $N$ )

Die Zone der Zusatzspannungen im Vorfeld breitet sich aus, und die Größe der Spannungen selbst steigt demnach mit wachsender verhauener Feldlänge und mit schlechtem Versatz bei gleichbleibenden Eigenschaften des Daches.

Der Stoßdruck verändert sich nach diesen Überlegungen somit zwischen zwei Grenzen:

$$p_0 \leq \sigma_y(s) \leq \sigma_{y \max}$$

Der Wert  $p_0$  gilt für das gesamte Flöz, solange noch kein Abbau umgeht (Überlagerungsdruck). Der Wert  $\sigma_{y \max}$  ist unter sonst gleichbleibenden Bedingungen mit  $s \rightarrow \infty$  erreicht:

$$\sigma_{y \max} = E'_1 y_{0 \max} = p_0 \left( 1 + \sqrt{\frac{E'_1}{E'_2}} \right) = p_0 \frac{1+v^2}{v^2} \quad (3.362)$$

*für  $v=0,27 \rightarrow 11,5 p_0$*

<sup>13</sup> Diese Überlegungen setzen natürlich elastisches Verformungsverhalten voraus. Überschreitet in der Nähe des Stoßes die Spannung die Fließgrenze des Materials, so wird das Flöz in diesem Bereich plastisches Verhalten zeigen und die maximalen Spannungen werden nur die Fließgrenze erreichen. Diese Bedingungen sind durch den in Wirklichkeit vorhandenen dreiachsigen Spannungszustand noch komplizierter.



Dieser Wert ist interessant, weil er nach den Modellvorstellungen den beim StREBBAU maximal überhaupt nur denkbaren Stoßdruck angibt. Mit  $s = \infty$  ist nämlich der extremste Fall erreicht, der erreichbar ist; dabei ist die Tatsache eingeschlossen, daß schon nach den Voraussetzungen der Aufgabenstellung im Hinblick auf die Streblänge ebenfalls der extremste Fall (unendliche Streblänge) angenommen wurde. In praxi wird dieser Wert exakt also nie erreicht, weil einerseits die Streblänge endlich und zum anderen die verhaue Feldlänge nicht unendlich lang ist, so daß man  $\sigma_{y \max}$  in der Tat als den denkbar größten Grenzwert für den Stoßdruck ansehen muß, wenn nur elastisches Materialverhalten vorausgesetzt wird. (Bei plastischem Verhalten liegt der Maximalwert tiefer und entspricht der Fließgrenze, wenn keine Verfestigung eintritt.)

Bezeichnet man mit  $\kappa_{\max}$  den Ausdruck

$$\kappa_{\max} = \frac{\sigma_{y \max}}{p_0} = 1 + \sqrt{\frac{E_1}{E_2}} \geq 1,$$

so gibt er an, um wieviel sich infolge des Abbaus der Druck an der Strebkante vergrößert hat. Nach den Messungen von JACOBI (Bild 11) ergibt sich beispielsweise  $\kappa \approx 5,5$ , also das Fünfeinhalbfache des Überlagerungsdruckes.

Bild 12 zeigt eine Versatzkennlinie, d. h. die Drucksetzungskurve des Versatzes an einer Stelle  $x$ . Die Druckaufnahme des Versatzes kann maximal praktisch nur den Wert  $p_0$ , also den Überlagerungsdruck, erreichen (vgl. folgenden Abschnitt). Der Schnittpunkt zwischen der Versatzkennlinie und der Geraden  $p_0 = \text{const}$  gibt somit den theoretischen Absenkungsfaktor, d. h. den maximalen Absenkungsbetrag an. Nach der Versatzkennlinie ist der  $E$ -Wert des Versatzes keine konstante Größe. Ersetzt man zur Vereinfachung des Bildes die Kennlinie durch eine Gerade, die durch den Punkt  $(p_0, a)$  verläuft, nimmt, also an, daß die Versatzkompression bis zu diesem Punkt linear erfolgt, so gilt für diesen  $E$ -Wert des Versatzes, wenn man wie in Bild 11  $p_0 = 200 \text{ kg/cm}^2$  wählt und einen theoretischen Absenkungsfaktor  $a = 0,5$  annimmt.

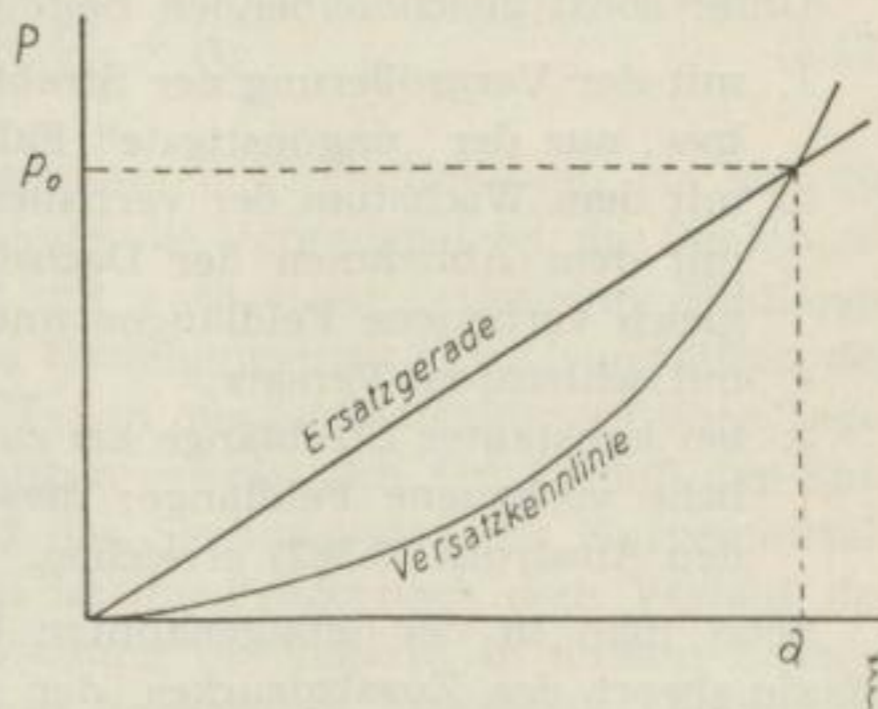


Bild 12

$$E_2 = \text{tg } \alpha = \frac{p_0}{a} = 400 \text{ kg/cm}^2.$$

Diese Größenordnung des  $E_2$ -Wertes entspricht bekannten Steifeziffern [25, S. 241]. Damit folgt für  $\kappa_{\max}$  mit einem  $E$ -Modul  $E_1 = 30\,000 \text{ kg/cm}^2$  des Flözes:

$$\kappa = 1 + \sqrt{\frac{30\,000}{400}} = 9,6,$$



also rund der zehnfache Betrag des Überlagerungsdruckes, wenn man voraussetzt, daß auch die Höhe des eingebrachten Versatzes gleich der Flözmächtigkeit ist, Versatzlücken also nicht auftreten und das Dach auf dem Versatz überall fest aufliegt; das Verhältnis der Bettungsziffern  $E'$  Flöz-Versatz ist dann gleich dem Verhältnis der entsprechenden  $E$ -Werte. In unserem Beispiel würde der Stoßdruck maximal diesen Wert erreichen können. Der von JACOBI angegebene Betrag entspricht darum den hier bestimmten theoretischen Möglichkeiten. Schematisch zeigt Bild 24c den Verlauf des Stoßdruckes als Funktion der verhaunenen Feldlänge.

Alle Beobachtungen und Messungen in der Vergangenheit bestätigen das Vorhandensein eines Zusatzdruckes, wenngleich über seine Größenordnung keine Einigkeit herrscht. Zum Beispiel schreibt SPACKELER [26, S. 9]:

„Während auf dem Lütticher Kongreß mehrfach darüber gestritten wurde, ob der Zusatzdruck das 1,5- oder 1,8fache des Ruhedruckes beträgt, zeichnet PATTEISKY ihn hier in Übereinstimmung mit mir in rd. 4facher Höhe ein...“

Die theoretischen Überlegungen spiegeln einerseits die Vorstellungen und Meinungen aller Forscher grundsätzlich wider, erlauben aber andererseits noch weitgehendere Schlußfolgerungen, indem sie die Einflußfaktoren, die den Zusatzdruck hervorrufen, näher bestimmen und in der Grundgleichung (3.361) erfassen.

Unter sonst gleichbleibenden Bedingungen steigt der Zusatzdruck also

1. mit der Vergrößerung der Streblänge (dieser Faktor ist hier nicht erfaßt bzw. nur der „ungünstigste“ Fall, unendliche Streblänge);
2. mit dem Wachstum der verhaunenen Feldlänge;
3. mit dem Abnehmen der Dachsteifigkeit (vorausgesetzt, daß beim Vergleich verhaunene Feldlängen und Versatz etc. gleich sind);
4. mit schlechtem Versatz;
5. bei konstanter Streblänge bis zu einem endlichen Grenzwert für unendliche verhaunene Feldlänge; dieser Wert kann maximal überhaupt nur den Ausdruck (3.362) erreichen.

Setzt man in der letztgenannten Gleichung  $E'_1 = E'_2$ , so ergibt sich ein Maximalwert des Zusatzdruckes, der gleich dem Überlagerungsdruck ist. Im Betrieb wird dieser Fall nie erreicht.

Wir kennen beim Strebbau eine Erscheinung, die diese Schlußfolgerungen als in der Grube wirklich vorhandenen Effekt vollauf bestätigt. Jeder Betriebsmann weiß, daß der „Gang der Kohle“, d. h. die Wirkungen des zusätzlichen Stoßdruckes (Nutzdruck), in der Tat bei Beginn des Abbaus nicht oder kaum vorhanden sind und daß sie mit der Vergrößerung des abgebauten Raumes stetig wachsen, eben weil die Absenkung der Hangendschichten zunimmt. Diese Erscheinungen sind im Sinne der hier dargelegten theoretischen Überlegungen vor allem von SCHULTE [27] treffend beschrieben. Es ist damit auch ersichtlich, daß z. B. bei gleicher Streblänge und gleichem Versatz die verhaunene Feldlänge wachsen muß, bei der Nutzdruck vorhanden ist, wenn die Steifigkeit des Daches größer wird.



### 3.4 Versatzfeld

#### 3.41 Allgemeines

Für die Senkungskurve der Dachschichten auf dem Versatz gilt die nachstehende Gleichung mit den Konstanten (3.261), (3.262) und (3.265):

$$y = y_0 + \frac{p_0}{E_2} + A_1 \sinh \alpha_2 x \sin \alpha_2 x + A_2 \cosh \alpha_2 x \cos \alpha_2 x \quad (3.41)$$

Sie wird demnach von folgenden Faktoren beeinflusst:

- a) Überlagerungsdruck
- b) Steifigkeit des Daches
- c) Nachgiebigkeit der Ränder (Stöße)
- d) Dichte des Versatzes
- e) verhauene Feldlänge
- f) Streblänge

Dabei ist der letztgenannte in den Gleichungen nicht erfaßt, sondern wieder nur der Grenzfall, unendliche Streblänge.

Der markanteste Punkt der Senkungskurve ist ihr Senkungsmittelpunkt:

$$y(0) = y_0 + \frac{p_0}{E_2} + A_2 \quad (3.42)$$

Im Laufe des Abbaus bleiben die genannten Einflußfaktoren bis auf die verhauene Feldlänge konstant. Deshalb bieten die Veränderungen der Senkungskurve bzw. ihres Senkungsmittelpunktes mit wachsender verhauener Feldlänge interessante Vergleichsmöglichkeiten und Beziehungen zu den Grundsätzen der LEHMANNschen Trogtheorie, d. h. zu den Typen der Senkungskurven über Tage. Als wesentliches Moment dieser Beziehungen erweist sich der Einfluß der Entfernung der Flözränder voneinander auf das Senkungsmaß des Kurvenmittelpunktes an der Stelle  $x = 0$ . Weiterhin ist die Frage nach dem Verlauf des Versatzdruckes, d. h. nach der Druckverteilung im Versatz, in diesem Zusammenhang zu stellen. Gerade hier bestehen bekanntlich keinesfalls einheitliche Anschauungen, sondern recht verschiedenartige und z. T. entgegengesetzte Vorstellungen stehen sich gegenüber.

Im Folgenden werden wegen der relativ großen Zahl der genannten Einflußfaktoren lediglich besondere Grenzfälle diskutiert, die Vereinfachungen erlauben und das grundsätzliche, allgemeine Wesen der Erscheinungen nach den Modellvorstellungen dennoch zum Ausdruck bringen.

#### 3.42 Einfluß eines Flözrandes

Mit steigender Verhiebslänge verschwindet die Wirkung der Flözränder aufeinander und ihr Einfluß auf die Mitte der Senkungskurve immer mehr. Im Falle  $s \rightarrow \infty$  ist er praktisch Null.



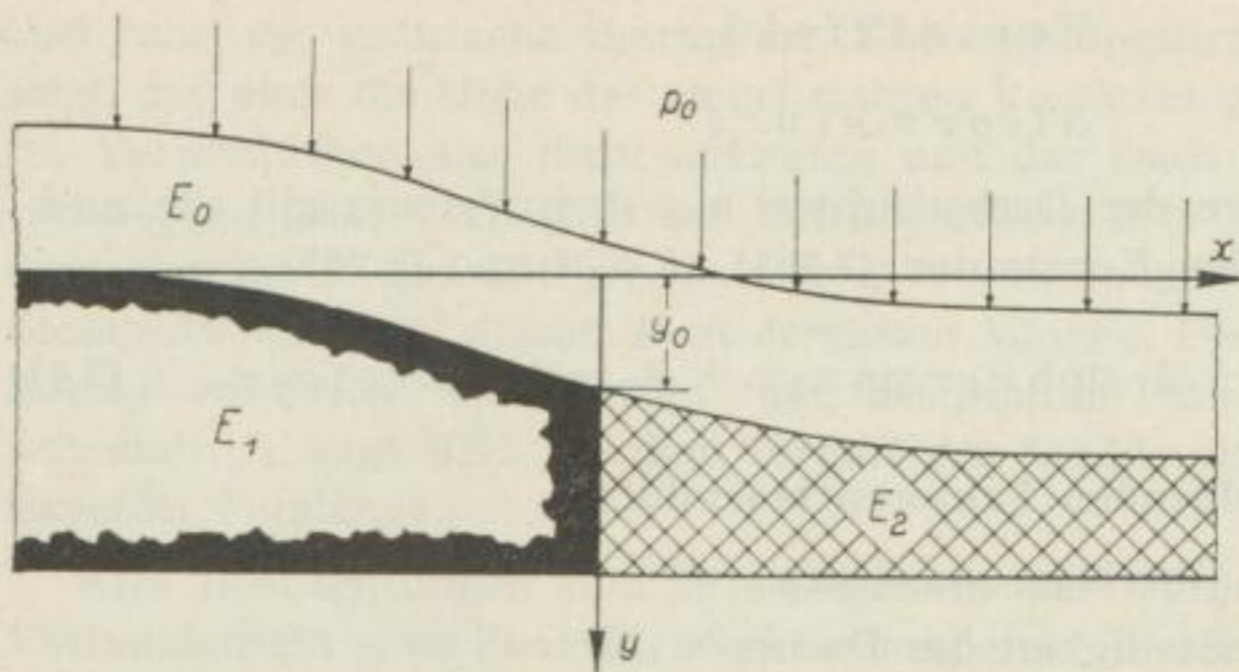


Bild 13

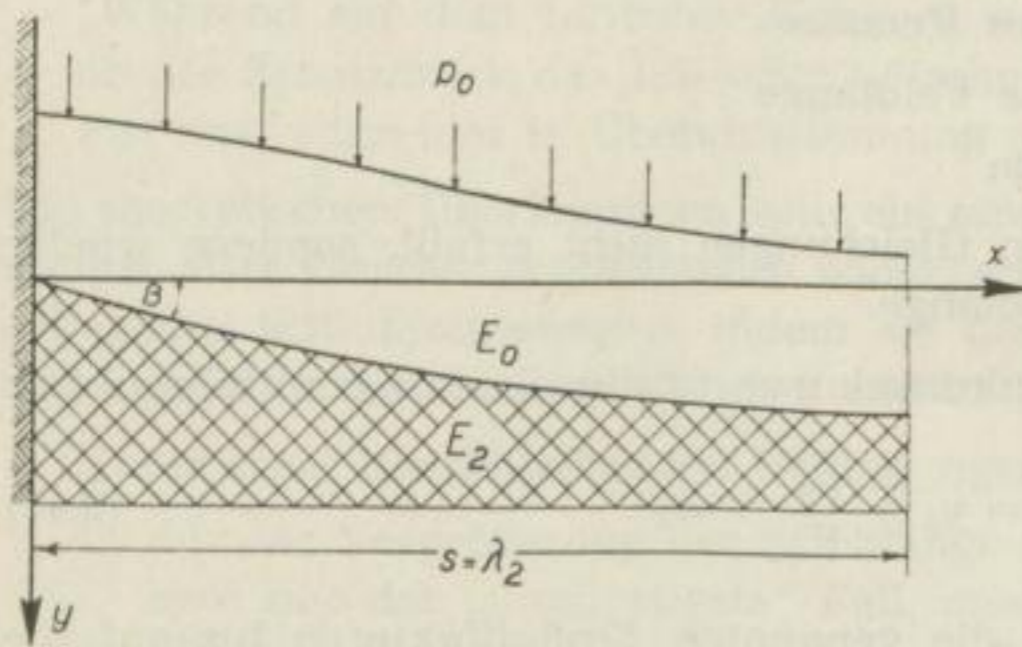


Bild 14

In diesem Fall kann man das Modell des Bildes 4 vereinfachen, und es entsteht Bild 13<sup>14</sup>. (In der Literatur wird im allgemeinen zur Erklärung von Druck- und Senkungserscheinungen ein ähnliches Bild verwendet, ohne daß auf den damit zwangsläufig ver-

wendeten Sonderfall hingewiesen wird.)

Für den Verlauf des Versatzdruckes ist der Einfluß der Nachgiebigkeit des Flözrandes nicht von grundsätzlicher Bedeutung. Das Modell des Bildes 13 läßt sich darum noch weiter vereinfachen, indem man  $v = 0$ , d. h.  $E'_1$  unendlich groß setzt. Praktisch wirkt das Flöz dann wie ein festes Auflager, und man erhält vereinfacht ein Modell, wie es Bild 14 zeigt: An

Stelle eines unendlich starren Flözes kann man sich eine unnachgiebige Einspannung der Dachschichten denken. Für die Senkungskurve der Dachschichten auf dem Versatz gilt dann in Übereinstimmung mit (2.6):

$$y = \frac{p_0}{E'_2} + e^{-\alpha_2 x} (C_1 \sin \alpha_2 x + C_2 \cos \alpha_2 x) \quad (3.43)$$

Die Randbedingungen lauten<sup>15</sup>:

$$y(0) = 0, \quad y'(0) = 0$$

Es ergibt sich die Lösung

$$y = \frac{p_0}{E'_2} [1 - e^{-\alpha_2 x} (\sin \alpha_2 x + \cos \alpha_2 x)], \quad (3.44)$$

mit den Konstanten

$$C_1 = C_2 = -p_0/E'_2.$$

<sup>14</sup> Die Gleichungen für dieses Modell sind bereits von SALUSTOWICZ [11] angegeben. Bei entsprechender Vereinfachung der vorliegenden Gleichungen und Verwendung synonyme Ausdrücke sind sie implizit auch in den hier angegebenen als Grenzfall vorhanden.

<sup>15</sup> Man erhält die folgende Lösung auch einfach aus der Gleichung (4.53), wenn man dort die Veränderung  $v = 0$  vornimmt und die Ordinate an die Strebkante legt, d. h.  $s_1 = 0$  setzt.



Man kann auch die Form wählen:

$$y = \frac{p_0}{E'_2} F(x) , \tag{3.441}$$

wobei  $F(x)$  den Klammersausdruck der Gleichung (3.44) darstellt.

Die Spannungen in der Schnittebene Versatz-Dach lauten:

$$\sigma_y = E'_2 y = p_0 \cdot F(x) \tag{3.45}$$

Tabelle 1 zeigt zusammenfassend einige Werte für  $x = x(\lambda_2)$ . Die Senkungswerte im Versatz schwanken also praktisch zwischen Null für  $x = 0$  und dem markscheiderisch-theoretischen Höchstwert (Absenkungsfaktor)  $a = p_0/E'_2$ .

Tabelle 1

$x$	$F(x)$	$y_V$	$\delta_V$
0	0	0	0
$\lambda/4$	0,8	$0,8 \cdot a$	$0,8 \cdot p_0$
$3\lambda/8$	1,0	$a$	$p_0$
$\lambda/2$	1,04	$1,04 \cdot a$	$1,04 \cdot p_0$
$3\lambda/4$	1,01	$1,01 \cdot a$	$1,01 \cdot p_0$
$\lambda$	0,998	$0,998 \cdot a$	$0,998 \cdot p_0$
$\infty$	1,0	$\frac{p_0}{E'_2} = a$	$p_0$

Man erkennt, daß mit genügender Genauigkeit für eine Grenzlänge,

$$x_{\text{grenz}} = n \cdot \lambda_2, \quad n \leq 1 ,$$

Senkung und Druckaufnahme praktisch abgeschlossen sind.

Die Versatzdruckkurve hat ab  $x_{\text{grenz}}$  faktisch eine waagerechte Tangente. Einen „Ruhepunkt“, d. h. einen Punkt im Versatz, von dem ab die Senkung theoretisch als abgeschlossen anzusehen ist, kann man exakt nicht angeben. Meßtechnisch müßte er zwischen

$$\lambda_2/4 < x < \lambda_2/2$$

liegen. Das ist eine Frage der Meßgenauigkeit und nur definitiv zu entscheiden. Bild 15 zeigt diesen Druckverlauf.

Setzt man den Wert  $x = x_{\text{grenz}}$ , für den zuerst  $\sigma_V = p_0$  in dem angegebenen Intervall ist, für den die Kurve also zum ersten Mal  $p_0$  schneidet und für den

$$\cos \frac{2\pi}{\lambda_2} x + \sin \frac{2\pi}{\lambda_2} x = 0$$

gilt, so ist diese Bedingung mit

$$x = \frac{3}{8} \lambda_2 = 0,375 \cdot \lambda_2$$

erfüllt. Definitiv wird damit  $n = 0,357$ , wenn man bedenkt, daß für  $x > x_{\text{grenz}} = 0,375 \cdot \lambda_2$  die Werte des Versatz-

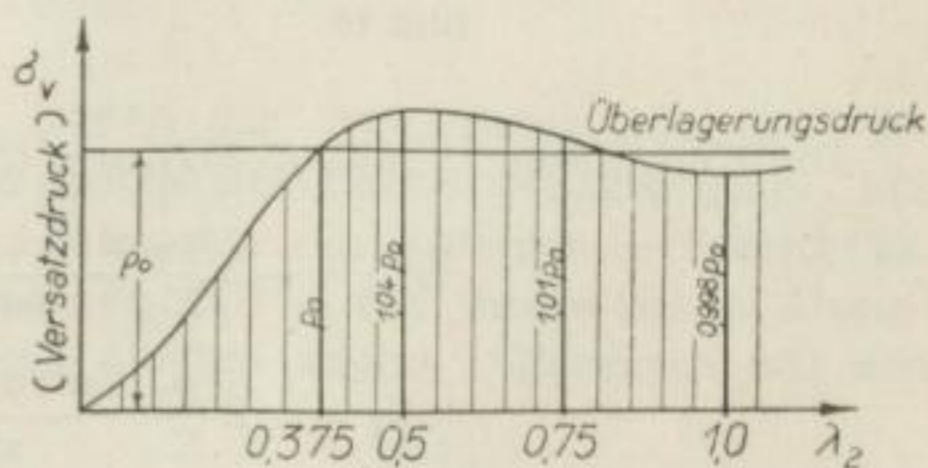


Bild 15



druckes nur unbedeutend um  $p_0$  schwanken. Beispielsweise müßte für  $x = \lambda_2/2$  ein Zusatzdruck von 4% des Normaldruckes  $p_0$  (für  $p_0 = 200 \text{ kg/cm}^2$  und das  $8 \text{ kg/cm}^2$ ) mit Meßgeräten nachgewiesen werden; das ist in praxi kaum denkbar.

Die Versatzdruckkurve steigt bis  $x = 0,375 \cdot \lambda_2$  stetig an und erreicht für diesen Grenzwert praktisch  $p_0$ . Der „Ruhepunkt“ ist somit definitiv diesem Grenzwert gleichzusetzen.

Man erkennt, daß die Wellenlänge  $\lambda_2$  über dem Versatzfeld größer sein muß als  $\lambda_1$  (Vorfeld), weil  $E'_2 < E'_1$  ist. Daraus folgt, daß die „Zone ungenügender Versatzdichte“  $0 \leq x \leq x_{\text{grenz}}$ , für die  $\sigma_V < p_0$  ist, im Vergleich zur Zusatzdruckzone des Vorfeldes größer ist. Die Größe  $E'_2$  (und damit der Versatz) ist hierfür entscheidend.

Zusammenfassend gilt der Grundsatz:

Je steifer das Dach, d.h., je größer die Wellenlänge  $\lambda_2$ , desto größer wird die Zone ungenügender Versatzdichte.

Für das Problem der Hangendbrüche ist dieser Gedanke wichtig.

### 3.43 Verlauf des Versatzdruckes bei Einfluß von zwei Auflagern

Bei der Untersuchung der Senkungen über dem Versatz muß man zwei Phasen unterscheiden. In der ersten Phase des Strebbaus wird die Senkung des Mittelpunktes des Daches von zwei Auflagern (Flözrändern) beeinflusst; mit dem Fortschreiten des Strebraumes verschwindet der Einfluß dieser Auflagern

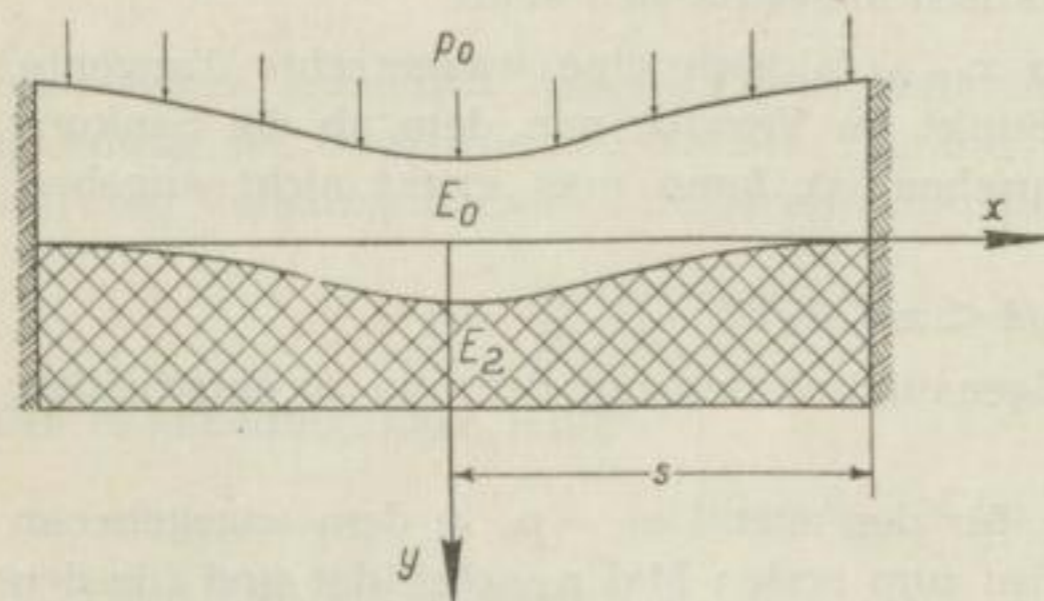


Bild 16

auf die Mitte der Senkungskurve immer mehr, so daß schließlich ein neuer Gleichgewichtszustand entstehen muß, wobei der im voranstehenden Abschnitt erwähnte Ruhepunkt sich bildet und „ausbreitet“.

Auch hier soll der einfachste Fall, nämlich  $E'_1 = \infty$ , untersucht werden. Die Absenkung am Stoß soll gegenüber der Senkung in der Strebfeldmitte zu vernachlässigen sein (Bild 16).

Die Konstanten (3.261), (3.262) und (3.265) lauten dann mit  $v = 0$ :

$$A'_2 = -2 \frac{p_0}{E'_2} \frac{\sinh \varphi \cos \varphi + \cosh \varphi \sin \varphi}{\sinh 2\varphi + \sin 2\varphi}$$

$$A'_1 = 2 \frac{p_0}{E'_2} \frac{\sinh \varphi \cos \varphi - \cosh \varphi \sin \varphi}{\sinh 2\varphi + \sin 2\varphi}$$

$$y_0 = 0$$



Die Gleichung der Senkungskurve:

$$y = \frac{p_0}{E'_2} + A'_1 \sinh \alpha_2 x \sin \alpha_2 x + A'_2 \cosh \alpha_2 x \cos \alpha_2 x \quad (3.51)$$

Die Senkung des Mittelpunktes:

$$y(0) = \frac{p_0}{E'_2} \left( 1 - 2 \frac{\sinh \varphi \cos \varphi + \cosh \varphi \sin \varphi}{\sinh 2\varphi + \sin 2\varphi} \right) \quad (3.52)$$

Alle Senkungen sind nach den Gleichungen nur noch Funktionen von  $\varphi = \alpha_2 s$  und für konstantes  $\alpha_2$ , d. h. gleichbleibende Dach- und Versatzverhältnisse, nunmehr Funktionen der verhauenen Feldlänge  $2s$ . Diese Länge kann zwischen den Grenzen

$$0 \leq s \leq \infty$$

schwanken. Für  $s = 0$  hat der Abbau noch nicht begonnen, demnach ist auch kein Versatz vorhanden, und statt  $E'_2$  muß der Wert  $E'_1$  des Flözes gelten. Mit fortschreitendem Verhieb wächst  $s$ , wird Versatz ( $E'_2$ ) eingebracht und das Dach drückt die neue Unterlage mit der Vergrößerung von  $s$  immer stärker zusammen.

Es ist somit der Verlauf der Funktion

$$f(\gamma) = 2 \frac{\sinh 2\pi\gamma \cos 2\pi\gamma + \cosh 2\pi\gamma \sin 2\pi\gamma}{\sinh 4\pi\gamma + \sin 4\pi\gamma} \quad (3.53)$$

zu diskutieren, wobei

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_2} s = 2\pi\gamma, \quad \gamma = \frac{s}{\lambda_2} \begin{matrix} < \\ = \\ > \end{matrix} 1$$

gesetzt wurde. Die Relation  $\gamma$  gibt das Verhältnis aus der halben verhauenen Feldlänge zur Wellenlänge des Systems an. Mit der Vergrößerung von  $\gamma$  wächst die verhauene Feldlänge.

Wir wählen zuerst  $\gamma = 1$ , d. h.,  $s = \lambda_2$ .

$$f(1) = 2 \frac{\sinh 2\pi}{\sinh 4\pi} = \frac{1}{\cosh 2\pi} \approx 2e^{-2\pi} \approx 0,004^{16}$$

In Annäherung beträgt dann

$$y(0) = 0,996 \frac{p_0}{E'_2},$$

d. h., die Senkung des Daches macht 99,6 % der Vollsenkung aus, bzw. die Druckaufnahme des Versatzes beträgt 99,6 % des Überlagerungsdruckes. Ein Vergleich mit dem Modell des Bildes 14, das nur ein Auflager berücksichtigt, zeigt uns, daß für  $s = \lambda_2$  eine Senkung von 99,8 % des theoretischen Absenkungsfaktors erreicht ist. (In der Regel dürften solche Differenzen mit den

<sup>16</sup> Da  $\frac{1}{\cosh 2\pi} = 2 \frac{1}{e^{2\pi} + e^{-2\pi}}$  und  $e^{-2\pi} \ll e^{2\pi}$ , ist der Summand  $e^{-2\pi}$  im Verhältnis zu  $e^{2\pi}$  praktisch zu vernachlässigen. Dadurch entsteht der angeführte Wert.



üblichen Meßeinrichtungen und nach den Größenordnungen der Absenkungsbeträge nicht nachzuweisen sein.)

Für  $\gamma = \frac{1}{2}$ , d. h.,  $s = \lambda_2/2$ , wird

$$f\left(\frac{1}{2}\right) = -0,08; \quad y(0) = 1,08 \frac{p_0}{E'_2},$$

für  $\gamma = \frac{1}{4}$ , d. h.,  $s = \lambda_2/4$ , wird

$$f\left(\frac{1}{4}\right) = +0,4; \quad y(0) = 0,96 \frac{p_0}{E'_2}.$$

Es ist wiederum deutlich, daß in einem Intervall

$$x = (n_1 - n_2) \cdot \lambda_2 > 0$$

theoretische Hebungen auftreten können und die Senkungen nahezu dem Absenkungsfaktor entsprechen, womit der Nachweis dieser Meßwerte — wenn man von praktischen Gesichtspunkten aus urteilt — eine Funktion der Meßgenauigkeit ist, so daß für die Grenzlänge, bei der für den Mittelpunkt volle Senkung (und den Versatz an dieser Stelle volle Druckaufnahme) besteht, geschrieben werden muß:

$$x_{\text{grenz}} = n \cdot \lambda_2, \quad n \leq 1$$

Wählt man in Anklang an S. 63  $n = 3/8$ , d. h.,  $x = (3/8) \cdot \lambda_2$ , so gilt

$$y(0) = 0,997 \frac{p_0}{E'_2}.$$

Dieser Wert ist im Gegensatz zum Modell mit nur einem Auflager etwas geringer als der Absenkungsfaktor  $p_0/E'_2$ , weil eben hier beide Auflager die Senkung noch beeinflussen. Der Versatzdruck würde  $0,997 p_0$  betragen. Für  $p_0 = 200 \text{ kg/cm}^2$  sind das  $199,4 \text{ kg/cm}^2$ , also eine Differenz von  $0,6 \text{ kg/cm}^2$  zum Überlagerungsdruck. Man wird darum auch hier sagen dürfen, daß praktisch  $p_0$  erreicht ist.<sup>17</sup>

Eine Länge  $s = n \cdot \lambda_2$  der Platte würde also im mittleren Teil derselben — jedenfalls aber für den Mittelpunkt — die volle Setzung bzw. Druckaufnahme ergeben.

Diese Lösung läßt den Schluß zu (wenn man das Ergebnis mit dem Zahlenwert für  $x = n \cdot \lambda_2$  beim unendlich langen Dach vergleicht, siehe S. 63), daß sich der zweiseitig eingespannte Plattenstreifen von einer Länge  $s = (3/8) \lambda_2$  ab für die Modellvorstellung genügend genau in den Grenzfall des einseitig eingespannten, unendlich langen Daches überführen läßt, das nur noch einen Rand im Endlichen besitzt. Bild 17 verdeutlicht schematisch nochmals diese Über-

<sup>17</sup> Diese Festsetzung geht wieder davon aus, daß Hebungen praktisch nicht nachzuweisen sind, die im Meßfehlerbereich liegen, und daß der Mittelpunkt der Senkungskurve damit der Punkt größter Absenkung ist.



legung. Es zeigt die Druckaufnahme der Unterlage (Versatz) in Abhängigkeit von der Länge eines gegebenen Plattenstreifens (Dach) bei gleichbleibender Belastung  $p_0$ . Man kann sich diese Darstellung sinnentsprechend auf den wandernden Streb übertragen denken.

Solange die Balkenlänge  $s < n \cdot \lambda_2$  bleibt – wenn man wieder diese Länge als etwa der vollen Senkung bzw. Druckaufnahme entsprechend festlegt –, ist das Maximum der Druckaufnahme in der Feldesmitte kleiner als der Überlagerungsdruck. Mit  $s = n \cdot \lambda_2$

wäre gerade für diesen Mittelpunkt die Druckaufnahme des Versatzes gleich dem Überlagerungsdruck, d. h. der Einfluß der Auflager Null. (In Bild 17 ist  $n = 1$  gesetzt.) Breitet sich der Streb über diese Länge aus, entsteht für  $\Delta x \geq n \cdot \lambda_2$  eine waagerechte Tangente, d. h., der mittlere Teil der Unterlage erfährt die volle Druckaufnahme usw.

Urteilt man von der Druckaufnahme des Versatzes aus bzw. vom Standpunkt der maximalen Senkung, des Absenkungsfaktors  $a = p_0/E'_2$ , so ergeben sich folgende allgemeingültigen Beziehungen.

Bis zur Grenzlänge  $x_{\text{grenz}}$  ist die Gesamtlänge  $2s$  relativ klein, so daß an jeder Stelle  $x$  nur ein Teilbetrag des Überlagerungsdruckes auf den Versatz übertragen wird. Beim Grenzwert  $s = x_{\text{grenz}}$  erfährt der Mittelpunkt gerade volle Absenkung und Druckaufnahme.

Alle Zwischenformen bis zu diesem Wert wollen wir als „Teillängen“ bezeichnen, den Grenzwert mit „Volllänge“ und alle Werte  $s > x_{\text{grenz}}$  mit „Überlängen“.

Zieht man alle genannten Faktoren (S. 61) in Betracht, so wird der Betrag der Volllänge – er ist hier unabhängig von der Streblänge, weil diese unendlich lang angenommen ist – wie folgt beeinflußt: Er vergrößert sich

1. mit wachsender Steifigkeit des Daches;
2. mit größer werdendem Verhältnis  $a = p_0/E'_2$ , d. h. mit kleiner werdendem  $E'_2$  (schlechter Versatz) und wachsendem  $p_0$  (Überlagerungsdruck), also wachsender Teufe;
3. mit steigender Härte des Flözes ( $E'_1$ ).

Bei Berücksichtigung der Streblänge gilt prinzipiell, daß eine Senkung  $a = p_0/E'_2$  in der Feldesmitte nur dann auftreten kann, wenn auch die Streblänge größer oder zumindest gleich der Volllänge ist.

Abschließend noch ein Hinweis: Die zweiseitige oder einseitige Einspannung bedingt zwangsläufig das Vorhandensein eines bzw. zweier Wendepunkte der Senkungskurve. Bild 9 vermittelt davon eine anschauliche Vorstellung.

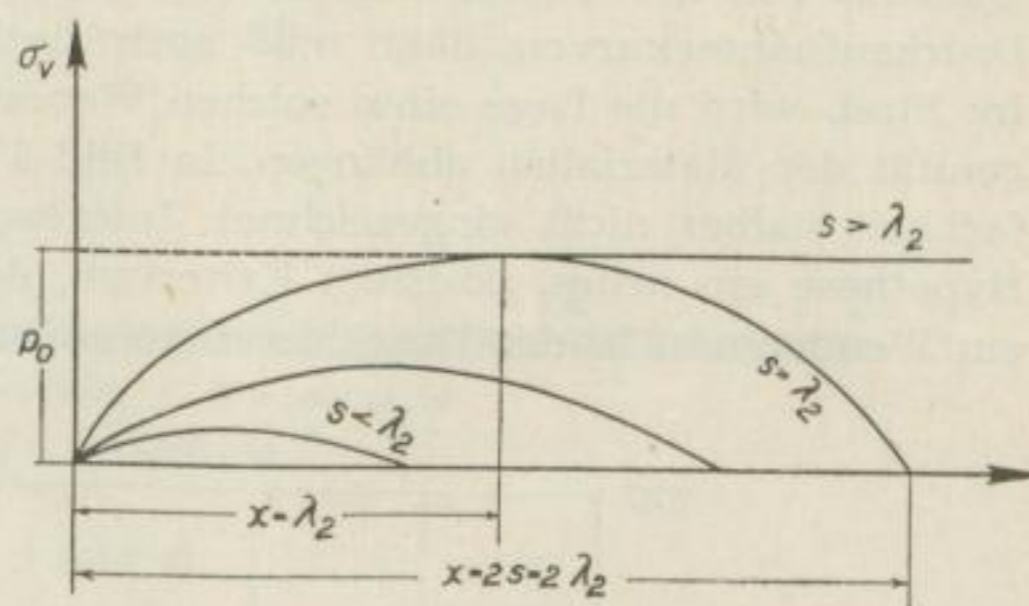


Bild 17



Die Entfernung dieses Wendepunktes vom Stoß muß wiederum eine Funktion der Steifigkeit des Daches, der Nachgiebigkeit des Flözes etc. sein. Geht man aus von der Vorstellung der Spiegelbildlichkeit zwischen Senkungs- und Druckaufnahmekurven, dann muß auch die letzte einen Wendepunkt besitzen. Im Streb wird die Lage eines solchen Wendepunktes u. a. noch von der Homogenität der Materialien abhängen. In Bild 17 sind die Wendepunkte der Einfachheit halber nicht eingezeichnet. Interessant ist aber und sogleich für die Hypothese ein neues, positives Kriterium, daß bei ähnlichen Messungen sogar ein Wendepunkt in der Druckkurve gefunden wurde (Bild 18).<sup>18</sup>

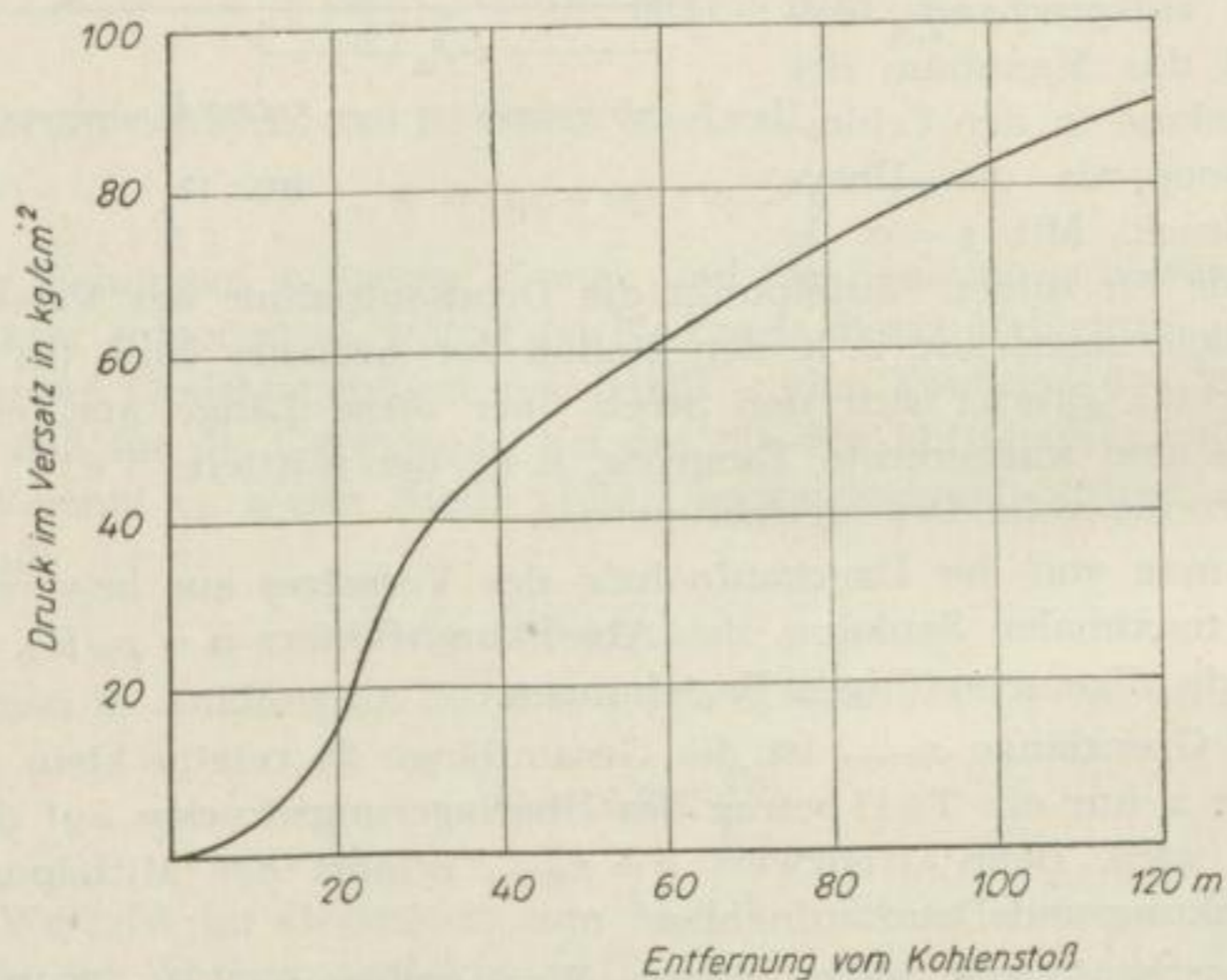


Bild 18

## 3.44

*Folgerungen für die Trogtheorie*

Betrachtet man die Senkungskurven über Tage, so fällt eine unverkennbare Ähnlichkeit mit den Senkungskurven über dem Versatzfeld auf.

Nach LEHMANN [15] gilt eine Unterteilung der Absenkungswirkungen an der Erdoberfläche in „Teil-, Voll- und Überfläche“. Bild 19 veranschaulicht diese Begriffe.

Demnach stellt die Vollfläche den Übergang zwischen den beiden anderen Formen, d. h. den Grenzfall, dar. Während Teil- und Überflächen für einen Abbau in unendlicher Zahl (Zwischenformen) auftreten können, gibt es für einen Abbau immer nur eine Vollfläche, die erreicht ist, wenn der Mittelpunkt der Senkungskurve sein volles maximal mögliches Senkungsmaß (Absenkungs-

<sup>18</sup> MIDDENDORF und JACOBI, Glückauf 1952, S. 641, Abb. 16.



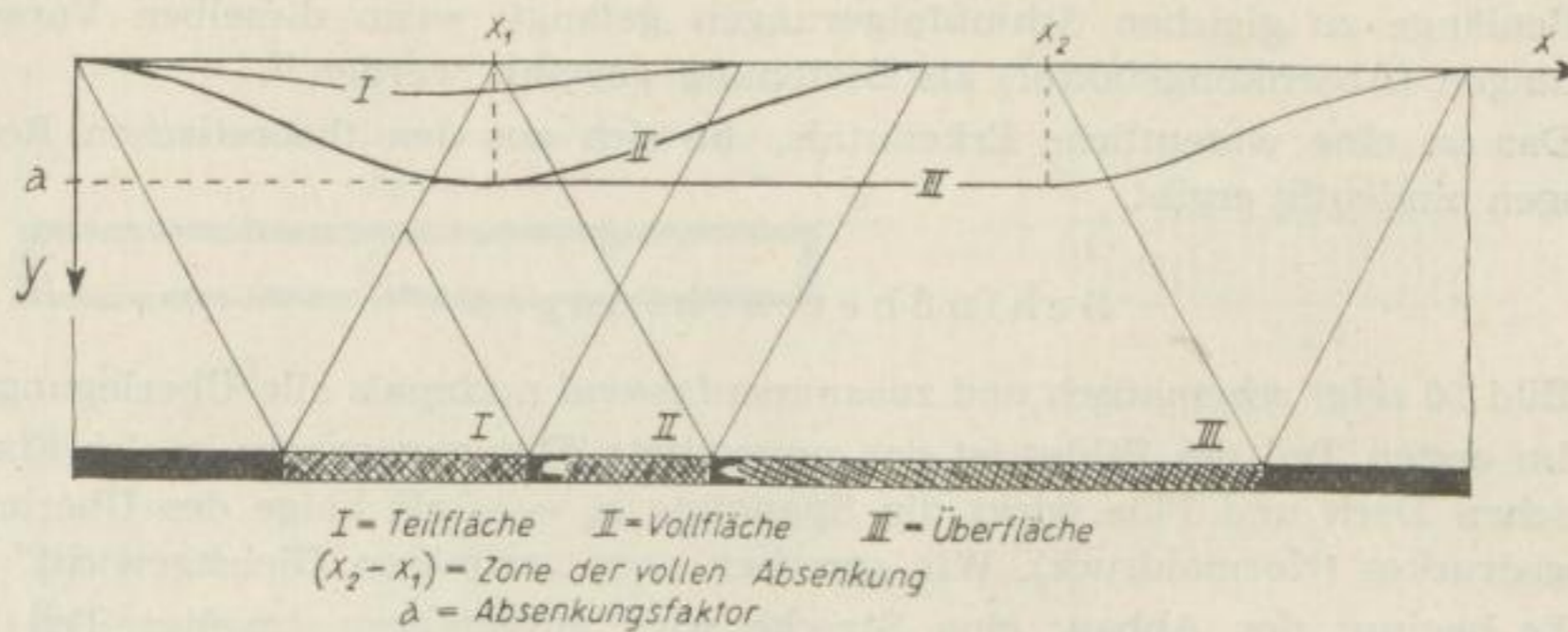


Bild 19

faktor) erreicht hat. Geht der Abbau über die Vollfläche hinaus, dann wird dieses Senkungsmaß verbreitet (die Senkungskurven haben also im mittleren Teil bis zur Vollfläche nur eine waagerechte Tangente im Senkungsmittelpunkt), und man erhält eine waagerechte Tangente im Mittelstück der Kurve für einen Bereich  $x_1 \leq x \leq x_2$  (Wannenbildung).

Diese Überlegung führt zu sinnvollen Schlußfolgerungen über das physikalische Wesen der Begriffe Teil-, Voll- und Überfläche in unserem Modell.

Da den Vorstellungen von LEHMANN Abbaufächen zugrunde liegen, wurden im Zusammenhang mit der Modellanalogie die Begriffe Teil-, Voll- und Überlänge gebraucht, weil ja eine Flächenseite, die Streblänge, als unendlich lang angesehen wird (S. 45). Tatsächlich muß man sich diese Begriffe auch in der  $z$ -Richtung bei einer Platte als Dachschicht vorstellen.

Definitiv ist eine Volllänge erreicht, sobald die Länge  $2s$  des Plattenstreifens gleich dem  $n$ -fachen der doppelten Wellenlänge ist. Für den Mittelpunkt ( $x = n \cdot \lambda_2$ ) gilt dann eine Druckaufnahme  $p_0$  und eine Setzung  $a = p_0/E'_2$ .

Eine Teillänge bedeutet damit  $s < n \cdot \lambda_2$ , während eine Überlänge für  $s > n \cdot \lambda_2$  gilt (Bild 17).

Eine Teillänge ist physikalisch also dadurch gegeben, daß beide Auflager auf Senkung und Druckverteilung einen Einfluß ausüben, der für die Volllänge in der Mitte verschwindet etc. Diese Wirkungen erstrecken sich bis zur Tagesoberfläche. Diesen Begriffen liegt somit ein ganz natürlicher physikalischer Sinn zugrunde, und die Überlegungen der LEHMANNschen Trogtheorie folgen zwingend aus den behandelten Modellvorstellungen.

Während die Betrachtungen der Trogtheorie bekanntlich von rein geometrischen Vorstellungen ausgehen und in diesem Sinne den geometrischen Hilfsbegriff des Grenzwinkels einführen, läßt sich nach den Modellvorstellungen auf der Grundlage eines physikalischen Verformungsgesetzes (Biegung auf elastischer Unterlage) zeigen, daß man über den physikalischen Hilfsbegriff der



Wellenlänge zu gleichen Schlußfolgerungen gelangt, wenn dieselben Voraussetzungen (Absenkungsfaktor) als Beziehung gewählt werden<sup>19</sup>.

Das ist eine wesentliche Erkenntnis, die sich aus den theoretischen Rechnungen eindeutig ergibt.

### 3.5

### Schlusbetrachtungen

Bild 20 zeigt schematisch und zusammenfassend nochmals alle Überlegungen.

Im ersten Teil des Bildes ist das unverritzte Flöz angegeben; in der Ebene zwischen Dach und Flöz wirkt die Spannung  $p_0 = \sigma_0$  als Folge des Überlagerungsdruckes (Normaldruck). Wir sprechen vom „primären Gleichgewicht“.

Es beginnt der Abbau: eine Strecke wird aufgefahren (zweiter Teil des Bildes). Betrachtet man die Auswirkungen dieser Strecke wiederum in der Schnittebene Dach—Flöz, so wird, entsprechend den Verhältnissen variabel, aber dennoch grundsätzlich, das primäre Gleichgewicht auf eine Länge  $L$  gestört. An den Flözkanten treten Zusatzspannungen auf.

Im dritten Teil ist die Vergrößerung des abgebauten Raumes zu einer Teilfläche gezeigt. Der Raum ist sekundär mit Versatz gefüllt, auf dem das absinkende Dach Auflage und Widerstand findet. Der Zusatzdruck steigt, der Versatz erfährt eine Druckaufnahme. Als Grenzfall sprechen wir bei einer bestimmten verhauenen Feldlänge von einer Vollfläche, wenn die wachsende Versatzdruckkurve für ihren Mittelpunkt gerade die Höhe des Überlagerungsdruckes erreicht, die volle Absenkung ist an dieser Stelle vorhanden (Absenkungsfaktor).

Von diesem Zeitpunkt an wird fernerhin eine Überfläche abgebaut, und es entsteht im mittleren Teil des Versatzfeldes eine Zone, in welcher der Versatz wie ehemals das Flöz den vollen Überlagerungsdruck aufgenommen hat. Diese Zone vergrößert sich mit dem fortschreitendem Verhieb: Ein neues „sekundäres Gleichgewicht“ ist erreicht (Normaldruckzone).

Abschließend sei nochmals betont, daß eine endliche Streblänge diese Kurven beeinflußt. Für den mittleren Teil des Strebens wird sich an den geführten Überlegungen nichts ändern, wenn auch in der  $z$ -Richtung die notwendige Überlänge als Streblänge vorhanden ist. Bleibt aber die Streblänge kleiner als dieser Wert bzw. die Volllänge, dann kann eine echte Überfläche in dem ange deuteten Sinn nie auftreten. Man kann zur Illustration dieser Gedanken eine

<sup>19</sup> Diese Überlegungen führen auch zu der folgenden wichtigen Frage: Welches sind die physikalischen Ursachen für das Auftreten zeitlich veränderlicher dynamischer Einflüsse, die wir mit dem Begriff „dynamische Zwischenformen“ bezeichnen? Und spezieller: Läßt sich das Entstehen solcher Formen auf die Rolle der Verhiebsgeschwindigkeit in Verbindung mit dem Charakter der Absenkungsvorgänge zurückführen und auf welche Weise?

Auch in der LEHMANNschen Trogtheorie ist diese Fragenstellung zunächst unbeantwortet enthalten. Wie schon betont (S. 69), geht sie von rein geometrischen Betrachtungen aus und muß aus diesem Grunde einen empirischen Faktor als Hilfsbegriff — den Grenzwinkel — einführen, um auf diese Art mittelbar physikalische Bedingungen zu berücksichtigen. Diese Überlegungen beziehen sich damit aber ebenfalls nur, wenn man von der hier erörterten Fragenstellung ausgeht, auf die statische Seite der Aufgabe (vgl. auch S. 48).

Ihren dynamischen Charakter kann die Trogtheorie mit den genannten Vorstellungen nicht erfassen. Sehr interessant ist, daß diese Unvollkommenheit bald erkannt war und in den Verfahren zur Vorausberechnung der Senkungen an der Erdoberfläche darum ein neuer Hilfsbegriff enthalten ist: der Zeitfaktor. Der Zeitfaktor ist (wie der Grenzwinkel) also eine empi-



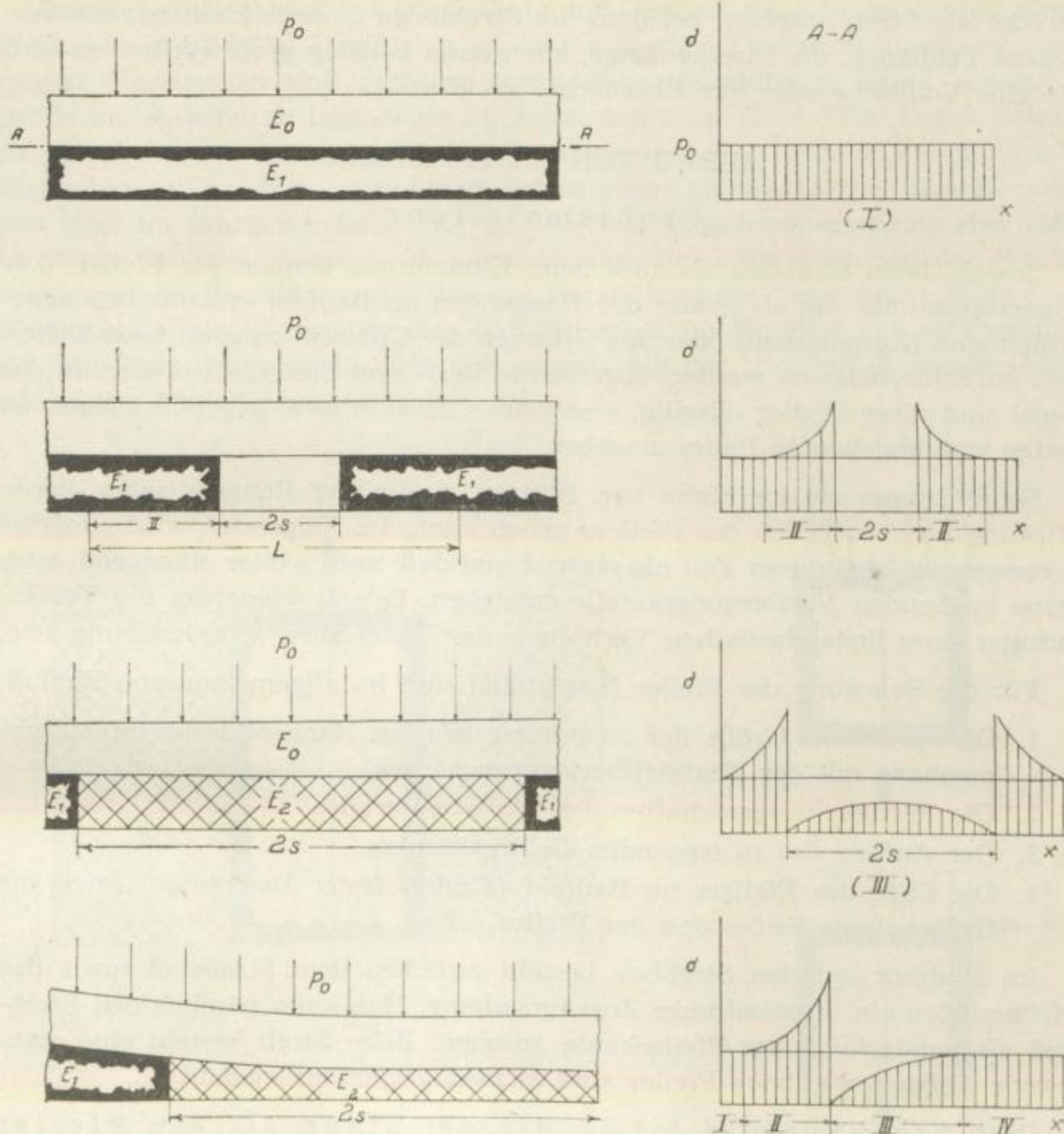


Bild 20

- I Primäres Gleichgewicht (Normaldruck)
  - II Zusatzdruckzone
  - III Druckentlastete Zone (Zone der ungenügenden Versatzdichte)
  - IV Sekundäres Gleichgewicht (Normaldruckzone)
- Zonen des gestörten primären Gleichgewichtes

rische Größe [15], die das dynamische Wesen der Senkung indirekt berücksichtigt. Daß die Verbiegeschwindigkeit in diese Zusammenhänge mit Gewicht eingreift, geht aus ihrer Bedeutung für den Verlauf der Senkungs-Zeitkurven hervor [28, Abb. 12].

Das physikalische Verformungsgesetz, das in Verbindung mit dem Wesen der Absenkungsvorgänge den Inhalt der dynamischen Zwischenformen bestimmt, ist mit der hier verwendeten Theorie der Mechanik natürlich nicht zu interpretieren, weil diese Theorie selbst nur auf rein statischen Gesichtspunkten basiert.



Strecke als Streb ansehen, bei dem die Streblänge  $2s$  sehr klein ist; die verhaufene Feldlänge, die Streckenlänge, kann dann beliebig groß werden, es wird nie eine Vollfläche oder gar Überfläche erreicht.

#### 4 ABBAU VON RESTPFEILERN

##### 4.1 Problemstellung

Sowohl beim Strebbau als auch beim Kammerbau kennen wir Pfeiler, d. h. Lagerstättenteile, die als Stütze des Hangenden im Baufeld systematisch angeordnet sind (Kammerbau) oder aus Gründen der Unbauwürdigkeit bzw. Sicherheit im Felde belassen werden, sogenannte Rest- und Sicherheitspfeiler. In der Regel sind diese Pfeiler allseitig, wenigstens aber an zwei gegenüberliegenden Seiten vom abgebauten Raum umgeben.

Somit tragen sie im Sinne von Stützen zusätzliche Hangendlasten, deren Wirkung bis zum Bruch des Pfeilers gehen kann. Im Folgenden wird zunächst vorausgesetzt, daß dieser Fall nie eintritt und daß, noch weiter einengend, auch keine bleibenden Verformungsanteile entstehen. Es soll wiederum die Vereinfachung eines linearelastischen Verhaltens der Materialien Voraussetzung sein.

Für die Belastung der Pfeiler (Lastgröße) sind im allgemeinen von Einfluß:

1. Die spezifische Größe der zu unterstützenden Hangendfläche im Zusammenhang mit der Teufe (Überlagerungsdruck).
2. Die Festigkeitseigenschaften des Pfeilermaterials.
3. Der Aufbau des zu tragenden Gebirgskörpers.
4. Die Lage des Pfeilers im Baufeld (Einfluß fester Baukanten) sowie die Größe dieses Feldes und der Pfeiler selbst.

Im Hinblick auf den Strebbau besteht zwischen dem Strebstoß sowie den Pfeilerstößen ein verständlicher Zusammenhang. Man kann nämlich den Strebstoß als Sonderfall einer Pfeilerkante ansehen. Beim Streb besteht eine wandernde Abbaukante, beim Pfeiler sind es zwei gegenüberliegende.

Das Strebvorfeld ist in diesem Sinne als ein Pfeiler mit unendlicher Pfeilerbreite anzusehen. Jeder endliche Wert dieser Breite  $2s_0$  führt damit zur Pfeilerwirkung (vgl. Bild 21), wenn man dem Pfeiler die nachstehenden Merkmale zuschreibt:

1. Genügend große Pfeilerlänge oder Streblänge ( $L$ ).
2. Parallele Kanten des Pfeilers.

Im allgemeinen wird es unter den vorgegebenen Bedingungen eine genügend große endliche Pfeilerbreite  $2s_0$  geben, von der ab man den Pfeiler wie einen zweiseitigen Strebbau behandeln darf, bei dem also beide Kanten oder Strebstöße einander nicht mehr beeinflussen. Im Sinne dieser Überlegungen bildet demnach die Pfeilerbreite — wenn man nach der Voraussetzung die Pfeilerlänge genügend groß wählt, um ihren Einfluß nicht zu berücksichtigen — ein wesentliches Merkmal für die Beanspruchung des Pfeilers.



Das einfachste Modell zur Darstellung und Deutung der Beanspruchung eines Pfeilers zeigt Bild 22a. Der Pfeiler ist einer einfachen Druckbeanspruchung ausgesetzt. Variationen sind denkbar, wenn diese Belastung  $p_0$  keine konstante Größe bildet, sondern irgendeine Funktion von  $x$  ist (Bild 22b). Damit würde die Spannungsverteilung im Pfeiler (Isotropie und Homogenität des Materials eingeschlossen) in einer horizontalen Schnittebene keine einfache lineare Funktion sein. Im Sinne der Belastung als Überlagerungsdruck erscheint aber eine konstante Größe  $p_0$  durchaus als gerechtfertigt. Beim Vergleich mit den Strebwirkungen im Vorfeld erweist sich zur Darstellung des Senkungsverlaufs eine Modellvorstellung sinnvoller, die Bild 22c zeigt. Im Hinblick auf eine grundsätzliche Betrachtungsweise läßt sich zeigen, daß der „Sonderfall des Streb“ mit diesem Modell darzustellen ist.

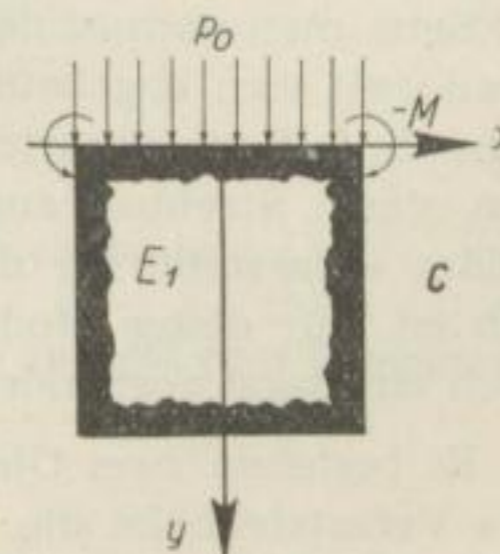
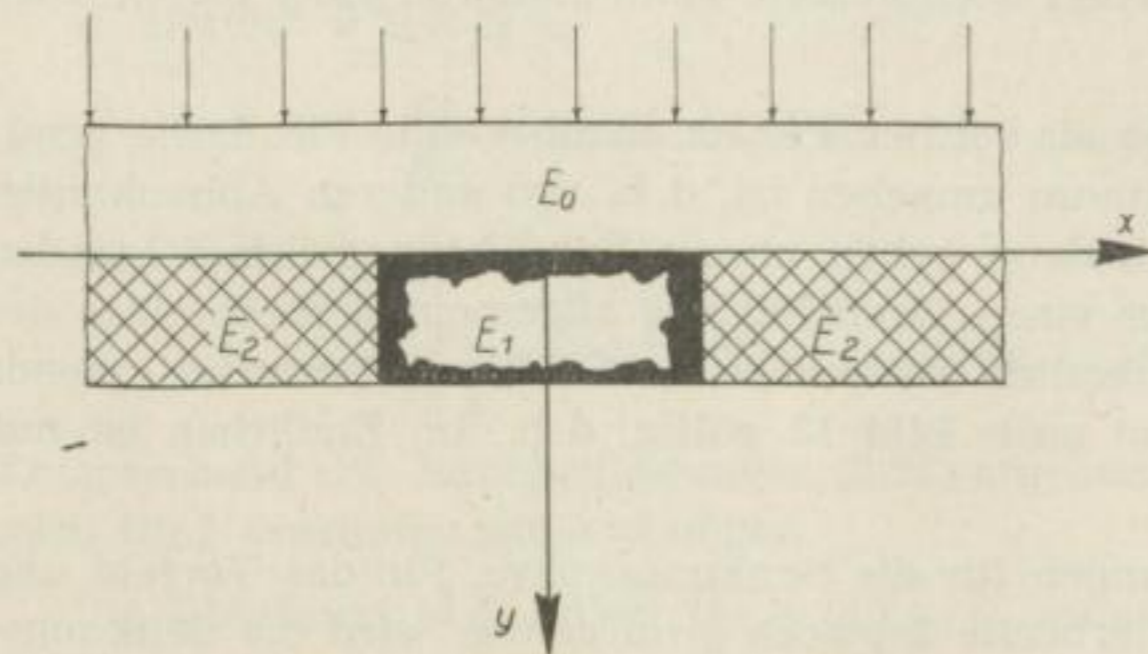
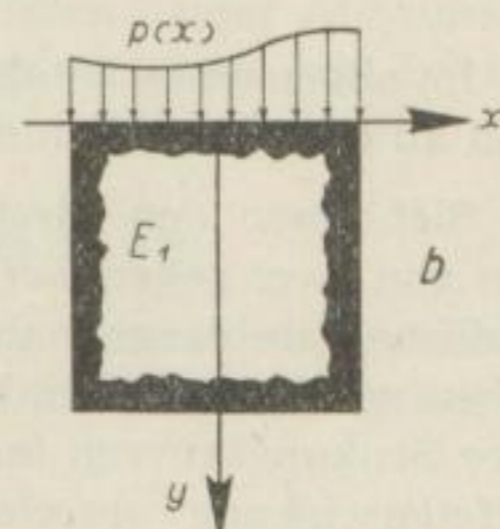
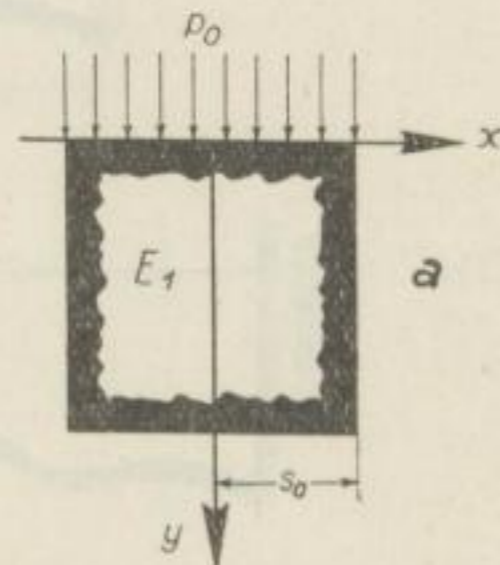
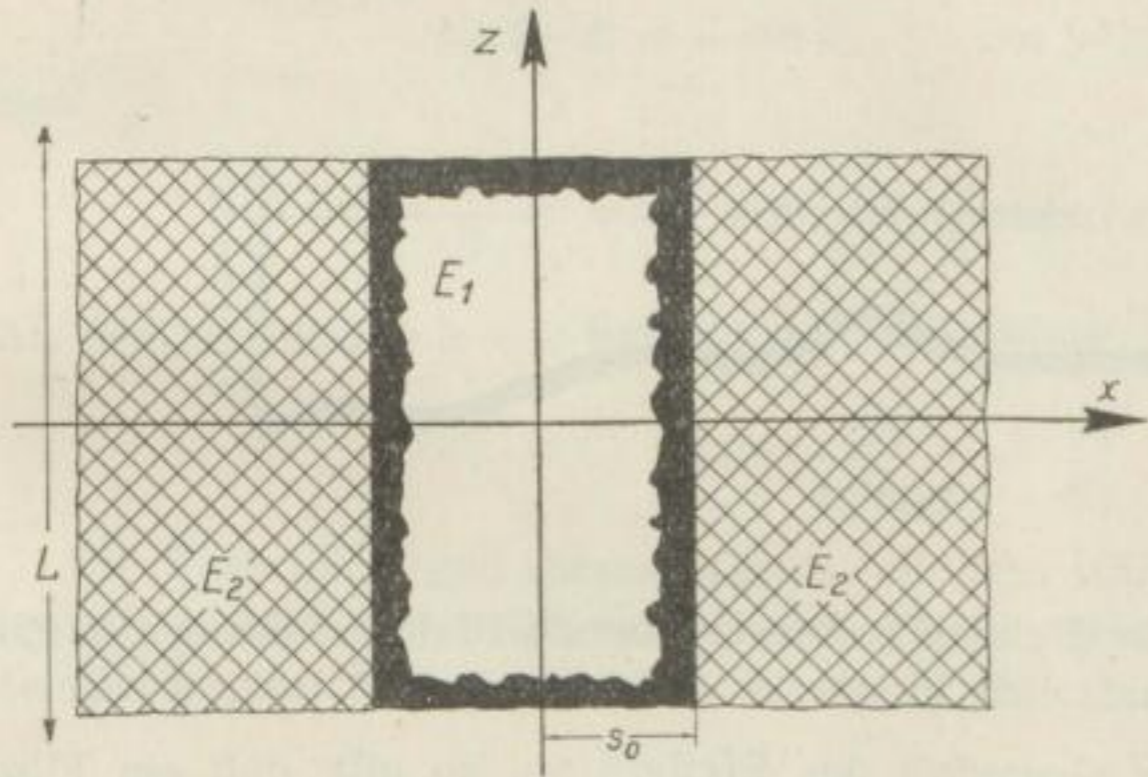


Bild 21

Bild 22



Die Berechtigung einer solchen Betrachtungsweise für die Pfeiler im Steinkohlenbergbau ergibt sich aus der Analogie mit den bekannten Erscheinungen im Strebvorfeld (Senkungswelle), die auch über den Pfeilern von Markscheidern nachgewiesen und in Bild 23 wiedergegeben sind. Der oben erwähnte Sonderfall einer reinen Druckbeanspruchung des Pfeilers mit konstanter Belastung  $p_0$  wird also dann entstehen, wenn praktisch an den Kanten des Pfeilers keine Biegemomente und zusätzlichen Querkräfte auftreten, so daß der Einfluß einer „zusätzlichen Belastung“ verschwindet.

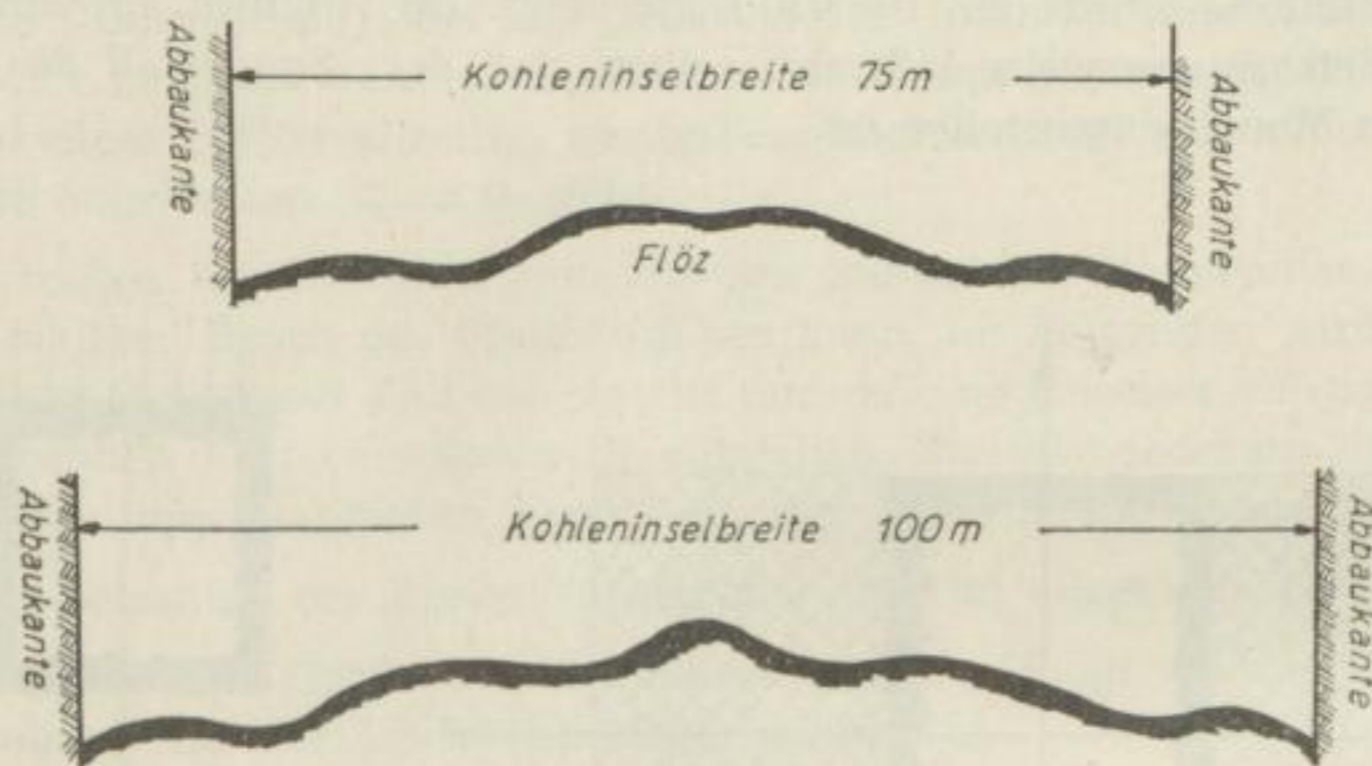


Bild 23

Im allgemeinen ist aber für die hier zu beschreibende Pfeilerwirkung typisch, daß an den Pfeilerkanten zusätzlich Momente wirksam sind.

Sieht man den Streb als Grenzfall des Pfeilers an, so gilt, daß ein Flöz, das von zwei gegenüberliegenden Seiten verhauen wird (vgl. Bild 21) und unendliche Streblänge haben möge, zunächst von beiden Seiten als Streb angesehen werden kann. Haben sich beide Abbaufrenten so weit genähert, daß sich ihre Senkungskurven im Vorfeld beeinflussen, kann man von einer eigentlichen „Pfeilerwirkung“ sprechen.

Setzt man voraus, daß die als solcher Pfeiler abzubauen Flözfläche genügend weit vom abgebauten Raum umgeben ist, d. h. von anderen Abbaukanten kein Einfluß zu erwarten ist, dann gehen unsere Betrachtungen im folgenden von einem Strebbau aus, der einen Grenzfall des allgemeinen Strebfeldes des Bildes 4 darstellt, für den nämlich die verhauene Feldlänge praktisch unendlich ist. Für dieses Modell ist auch Bild 13 gültig, d. h., im Endlichen ist nur noch ein Rand vorhanden.

Es bestehen zwei Gleichungen für die Senkungskurve, für das Vorfeld und das Versatzfeld. Ist die Pfeilerbreite  $2s_0$  noch groß genug, wird die Senkungskurve des Daches über dem Flöz der Gleichung (3.31) entsprechen, wobei  $s \rightarrow \infty$  gilt und ferner der Ursprung des Koordinatensystems nach Bild 13 an der Streb-



kante liegt. Unter diesen Bedingungen lauten die Konstanten  $B'_1$  (3.264) und  $B'_2$  (3.263):

$$B'_1 = -v^2 \frac{p_0}{E'_2} \frac{1-v}{1+v} \quad (4.11)$$

$$B'_2 = v^2 \frac{p_0}{E'_2} \quad (4.12)$$

Die Gleichung der Senkungskurve ist wie folgt zu schreiben:

$$y = \frac{p_0}{E'_1} + v^2 \frac{p_0}{E'_2} e^{-\alpha_1 x} \left( -\frac{1-v}{1+v} \sin \alpha_1 x + \cos \alpha_1 x \right) \quad (4.21)$$

Ist nach Bild 13 zu beachten, daß diese Gleichung für das Flöz, d. h. für den Bereich  $x < 0$  gelten soll, dann ist die dort angeführte positive Abszissenrichtung beizubehalten. Für  $x < 0$  gilt:

$$\sin(-x) = -\sin x, \quad \cos(-x) = \cos x$$

also

$$y = \frac{p_0}{E'_1} + v^2 \frac{p_0}{E'_2} e^{\alpha_1 x} \left( \frac{1-v}{1+v} \sin \alpha_1 x + \cos \alpha_1 x \right). \quad (4.22)$$

An der Strebkante  $x = 0$  beträgt die Absenkung

$$y(0) = \frac{p_0}{E'_1} + v^2 \frac{p_0}{E'_2}.$$

Die Veränderungen dieses Wertes mit dem Näherrücken beider Abbaufrenten zueinander lassen die spezifischen Pfeilerwirkungen erkennen, wie im folgenden gezeigt ist.

#### 4.2 Gleichungen der Senkungskurve

Wählt man das Pfeilermodell des Bildes 21, das den Einfluß des Versatzes berücksichtigt, dann gelten wiederum zwei Gleichungen für die Senkungskurve:

a) Bereich  $0 \leq x \leq s_0$ :

$$y = \frac{p_0}{E'_1} + A_1 \sinh \alpha_1 x \sin \alpha_1 x + A_2 \cosh \alpha_1 x \cos \alpha_1 x \quad (4.3)$$

b) Bereich  $s_0 \leq x \leq \infty$ :

$$y = y_0 + \frac{p_0}{E'_2} + e^{-\alpha_2(x-s_0)} [B_1 \sin \alpha_2(x-s_0) + B_2 \cos \alpha_2(x-s_0)] \quad (4.4)$$

Entsprechend den Randbedingungen (3.23) ergeben sich für die fünf Konstanten auch fünf Bestimmungsgleichungen.

Die Gleichung (4.4) liefert für  $y(s_0) = y_0$  sofort:

$$B_2 = -\frac{p_0}{E'_2} \quad (4.51)$$



Für das Gleichungssystem bleibt dann <sup>20</sup>:

$$\begin{aligned} y_0 - A_2 P_2 - A_1 P_1 &= p_0 / E'_1 \\ -v B_1 + A_2 R_1 + A_1 R_2 &= v (p_0 / E'_2) \\ v^2 B_1 - A_2 P_1 + A_1 P_2 &= 0 \\ -v^3 B_1 - A_2 R_2 + A_1 R_1 &= -v^3 (p_0 / E'_2) \end{aligned}$$

Für die Konstante  $B_1$  gilt der Ausdruck:

$$B_1 = -\frac{p_0}{E'_2} \frac{(1+v^2) \sin 2\varphi_0 + (1-v^2) \sinh 2\varphi_0}{(1-v^2) \sin 2\varphi_0 + (1+v^2) \sinh 2\varphi_0 + 4v (\sinh^2 \varphi_0 + \sin^2 \varphi_0)} \quad (4.52)$$

Für die Gleichung der Senkungskurve auf dem Versatz folgt:

$$y = y_0 + \frac{p_0}{E'_2} \left\{ 1 - e^{-\alpha_2 (x-s_0)} [\Phi \sin \alpha_2 (x-s_0) + \cos \alpha_2 (x-s_0)] \right\}, \quad (4.53)$$

wobei  $\Phi$  dem Wert des Bruches als Faktor von  $p_0/E'_2$  in (4.52) entspricht. Diese Gleichung ist insofern interessant, als sie für  $E'_1 = \infty$ , d. h.  $v = 0$  als Grenzfall, die vereinfachte Modellvorstellung nach Bild 14 liefert. Mit  $v = 0$  wird  $\Phi = 1$ ,  $y_0 = 0$ , und die Gleichung (4.53) ist der erwähnten analog. Statt  $x$  steht hier nur das Argument  $(x-s_0)$ , weil der Ursprung des Koordinatensystems definitionsgemäß nicht an der Flözkante liegt, sondern um  $x = -s_0$  verschoben ist.

Die Absenkung am Stoß lautet:

$$y_0 = \frac{p_0}{E'_1} + v^2 \frac{p_0}{E'_2} \frac{(1+v^2) \sinh 2\varphi_0 - (1-v^2) \sin 2\varphi_0 + 4v (\sinh^2 \varphi_0 + \cos^2 \varphi_0)}{(1+v^2) \sinh 2\varphi_0 + (1-v^2) \sin 2\varphi_0 + 4v (\sinh^2 \varphi_0 + \sin^2 \varphi_0)} \quad (4.54)$$

Für  $s_0 \rightarrow \infty$  erhält man statt des Pfeilers einen Streb als Sonderfall. Auch dieser ist in den Gleichungen enthalten; das Modell entspricht dann Bild 13, d. h. einer abgebauten Oberfläche beim Strebbau. Mit den Gleichungen (4.51) und (4.52) kann man auch für diesen Fall sofort die Gleichung der Senkungskurve des Daches über dem Versatz hinschreiben:

$$y = \frac{p_0}{E'_1} + v^2 \frac{p_0}{E'_2} + \frac{p_0}{E'_2} \left[ 1 - e^{-\alpha_2 x} \left( \frac{1-v}{1+v} \sin \alpha_2 x + \cos \alpha_2 x \right) \right] \quad (4.6)$$

Der Ursprung des Koordinatensystems wurde an der Strebkante angenommen.

Die Gleichung (4.6) zeigt im Sinne der Ausführungen des Abschnitts 3.31 b, daß für  $E'_2 = E'_1 = E$ , d. h.,  $v = 1$ , auch eine Senkungskurve über dem Versatz entsteht:

$$y = \frac{p_0}{E} (2 - e^{-\alpha x} \cos \alpha x) \quad (4.61)$$

<sup>20</sup> Um die Abkürzungen nicht zu komplizieren, wurden die Ausdrücke  $P_i$ ,  $R_i$  von S. 49 übernommen; statt  $\varphi = \alpha_2 s$  gilt hier aber  $\varphi_0 = \alpha_1 s_0$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ).



## 4.3 Vergleiche zwischen Pfeiler und Streb

Es sollen an Hand der Absenkung  $y_0$  am Stoß Unterschiede in den Druckwirkungen beim Abbau eines Strebes und eines Restpfeilers, die sich nach den Modellvorstellungen ergeben, diskutiert werden. Gegenstand des Vergleiches sind die Gleichungen (3.265) und (4.54):

$$y_{01} = \frac{p_0}{E'_1} + v^2 \frac{p_0 (1 + v^2) \sinh 2\varphi - (1 - v^2) \sin 2\varphi + 4v (\sinh^2 \varphi + \sin^2 \varphi)}{E'_2 (1 + v^2) \sinh 2\varphi + (1 - v^2) \sin 2\varphi + 4v (\sinh^2 \varphi + \cos^2 \varphi)}$$

$$y_{02} = \frac{p_0}{E'_1} + v^2 \frac{p_0 (1 + v^2) \sinh 2\varphi_0 - (1 - v^2) \sin 2\varphi_0 + 4v (\sinh^2 \varphi_0 + \cos^2 \varphi_0)}{E'_2 (1 + v^2) \sinh 2\varphi_0 + (1 - v^2) \sin 2\varphi_0 + 4v (\sinh^2 \varphi_0 + \sin^2 \varphi_0)}$$

Für  $s \rightarrow \infty$  (unendliche verhauene Feldlänge) und  $s_0 \rightarrow \infty$  (unendliche Pfeilerbreite) müssen beide identisch sein und den Wert

$$y_0 = \frac{p_0}{E'_1} + v^2 \frac{p_0}{E'_2}$$

annehmen, was der Fall ist.

Beim Pfeiler gilt nach den Voraussetzungen stets  $s = \infty$ , und  $s_0$  wird durch den Abbau verkleinert. Beim Streb ist charakteristisch, daß  $s_0 = \infty$  bleibt und  $s$  sich stetig vergrößert. Dort sinken also Größe und Widerstandsvermögen des Pfeilers, hier steigt der Zusatzdruck durch verstärkte Senkung des Daches über dem Versatzfeld. Letztlich vergrößert sich in beiden Fällen der Stoßdruck nur mit dem Unterschied, daß er für den Strebstoß in den Grenzen

$$p_0 \leq \sigma_0 \leq p_0 \left( 1 + \sqrt{\frac{E'_1}{E'_2}} \right)$$

schwankt, wobei er seinen Maximalwert für unendlich große Abbaufäche (praktisch bei einer abgebauten Überfläch) theoretisch erreicht. Es gilt dann  $s, s_0 \rightarrow \infty$ . Hier setzt der Abbau eines Pfeilers in der Regel aber erst ein. Seine Grenzen liegen darum zwischen

$$p_0 \left( 1 + \sqrt{\frac{E'_1}{E'_2}} \right) \leq \sigma_0 \leq \infty.$$

In gleicher Weise vergrößern sich natürlich die Senkungsbeträge (Amplituden) der Senkungskurve über dem Pfeiler. Der Grenzwert  $\sigma_0 \rightarrow \infty$  wird theoretisch mit  $s_0 \rightarrow 0$  erreicht. Beim Abbau des Pfeilers ist die Erhöhung des Zusatzdruckes nur noch auf die Verkleinerung des Pfeilers selbst zurückzuführen. (Man erkennt zum Vergleich sofort, daß für  $\varphi \rightarrow 0$  dagegen  $y_{01}$  nach  $p_0/E'_1$  strebt. Dieser Unterschied liegt mathematisch in den Summanden  $4 \cdot v \cdot \cos^2 \varphi$  bzw.  $4 \cdot v \cdot \sin^2 \varphi$  begründet.)

Praktische markscheiderische Messungen an Restpfeilern bestätigen diese Folgerungen. Bild 23 zeigt solche Meßergebnisse.

Auch hier vollzieht sich wie im Strebvorfeld der Vorgang, der mit den Modellvorstellungen nicht erfaßt ist: die ständige Addition von Senkungsbeträgen als Folge des stetigen Verhiebs (vgl. Bild 23).



Für die Charakterisierung der Senkungskurve über dem Pfeiler sind die Konstanten

$$A_1 = 2 v^2 \frac{p_0}{E_2} \frac{(1 - v^2) \sinh \varphi_0 \cos \varphi_0 + (1 + v^2) \cosh \varphi_0 \sin \varphi_0 + 2 v \sinh \varphi_0 \sin \varphi_0}{(1 - v^2) \sin 2 \varphi_0 + (1 + v^2) \sinh 2 \varphi_0 + 4 v (\sinh^2 \varphi_0 + \sin^2 \varphi_0)}$$

$$A_2 = 2 v^2 \frac{p_0}{E_2} \frac{(1 + v^2) \sinh \varphi_0 \cos \varphi_0 - (1 - v^2) \cosh \varphi_0 \sin \varphi_0 + 2 v \cosh \varphi_0 \cos \varphi_0}{(1 - v^2) \sin 2 \varphi_0 + (1 + v^2) \sinh 2 \varphi_0 + 4 v (\sinh^2 \varphi_0 + \sin^2 \varphi_0)}$$

in die Gleichung

$$y = \frac{p_0}{E_1} + A_1 \sinh \alpha_1 x \sin \alpha_1 x + A_2 \cosh \alpha_1 x \cos \alpha_1 x$$

einzusetzen. Untersucht man diese Gleichung für

$$y(s) = y_0 = \frac{p_0}{E_1} + A_1 \sinh \varphi_0 \sin \varphi_0 + A_2 \cosh \varphi_0 \cos \varphi_0 ,$$

so erhält man nach entsprechender Multiplikation der Konstanten und dem Ordnen der Summanden den Ausdruck (4.54) für  $y_0$  (diese Rechnung ist als Kontrolle anzusehen).

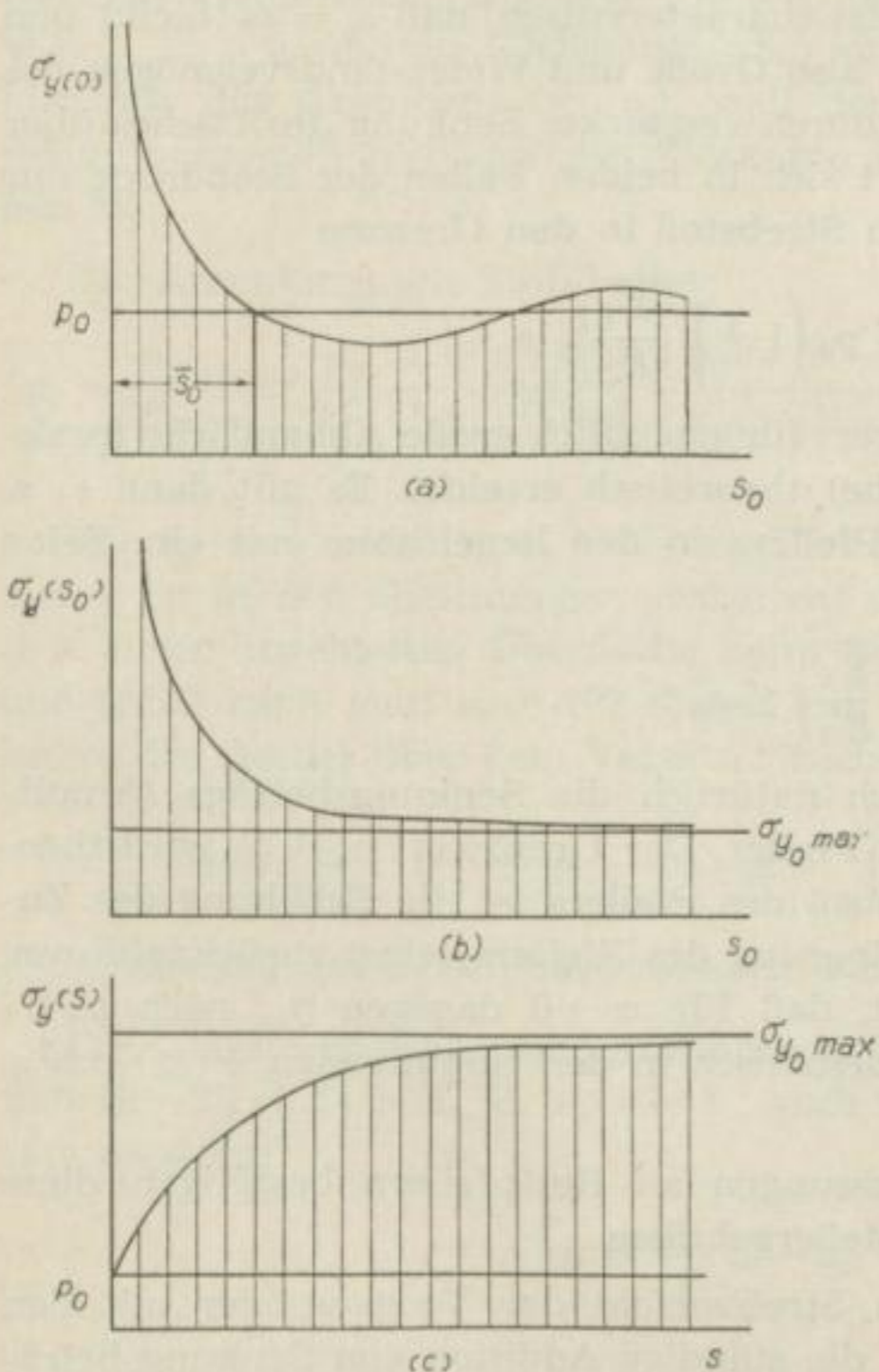


Bild 24

Zusammenfassend zeigen die Bilder 24a, b und c schematisch die Spannungsänderungen in der Pfeilermite (24a) und am Pfeilerstoß (24b) als Funktionen der Pfeilerlänge  $s_0$ . Das Bild 24c zeigt zum Vergleich den Spannungsverlauf an der Strebkante als Funktion der sich ständig vergrößernden Verhiebslänge  $s$ .

Solange die Pfeilerbreite  $s_0$  größer bleibt als ein Wert  $\bar{s}_0$ , treten im Pfeilerkern Zusatzspannungen und auch Entlastungen vom Überlagerungsdruck auf, ähnlich dem Strebvorfeld. Die Pfeilerbreite ist praktisch im Verhältnis zur Wellenlänge groß genug, so daß der Unterschied zum Streb im Wesentlichen noch nicht ausgeprägt erscheint. In gleicher Weise steigt der Zusatzdruck an der Pfeilerkante, der von dem Maximalwert des Strebens  $\sigma_{y_0 \max}$  ausgeht, relativ langsam. Mit der ste-



tigen Verkleinerung des Pfeiles nimmt die Neigung der Kurven rasch zu, und von der Pfeilerbreite  $\bar{s}_0$  ab steht der gesamte Pfeiler unter Zusatzdruck. Dieser Wert  $\bar{s}_0$  ist abhängig von der Wellenlänge  $\lambda_1$ , d. h. von der Steifigkeit des Daches im Verhältnis zur Härte der Unterlage und von der Größe  $\nu$ , also von den  $E'$ -Werten des Versatzes und des Flözes.

4.4 Beziehungen zur Gebirgsschlaggefahr

Durch die Symmetrie des Pfeilers ergeben sich zwei markante Stellen: die Kanten und die Pfeilermitte. Im ersten Fall interessiert der Verlauf des Zusatzdruckes am Abbaustoß als Folge der stetigen Verkleinerungen, die der Pfeiler mit fortschreitendem Verhieb erfährt, im zweiten Fall die damit verbundene Beanspruchung des Pfeilerkerns (vgl. Bild 25).

Diese spezifischen Pfeilerwirkungen – im Gegensatz zu den einfacheren Streberscheinungen – können bekanntlich zu „schädlichen Druckwirkungen“, d. h. zu Gebirgsschlägen, führen. Welche Voraussetzungen rufen diese Gefahren hervor?

Faßt man den Begriff Gebirgsschläge als Oberbegriff auf und unterteilt in „Flözschläge“ und „Hangendschläge“, so bildet die erste Kategorie den hier zu behandelnden Gegenstand. Als Kennzeichen solcher Flözschläge sind z. B. Abplatzen und Herausschleudern von Kohlenschalen aus dem Stoß, plötzliches Zerdrücken des Stoßes, kurz, plötzliche Entspannungswirkungen bekannt. Sie stellen zweifellos das kurzfristige „Entladen“ aufgespeicherter innerer Kräfte dar. Folglich müssen u. a. zwei Voraussetzungen erfüllt sein:

1. Der jeweilige Körper (Flöz) muß Spannungen speichern und kurzzeitig sowie kurzfristig abgeben können.
2. Äußere Kräfte müssen in entsprechender Stärke und Form vorhanden sein, damit die Körper auch solche inneren Kräfte (Spannungen) mobilisieren.

Geht man von der hier verwendeten grundlegenden Betrachtungsweise der Mechanik aus, nach der die Körper als homogen und isotrop angesehen werden<sup>21</sup>, ihre unterschiedlichen qualitativen Materialeigenschaften demnach auf

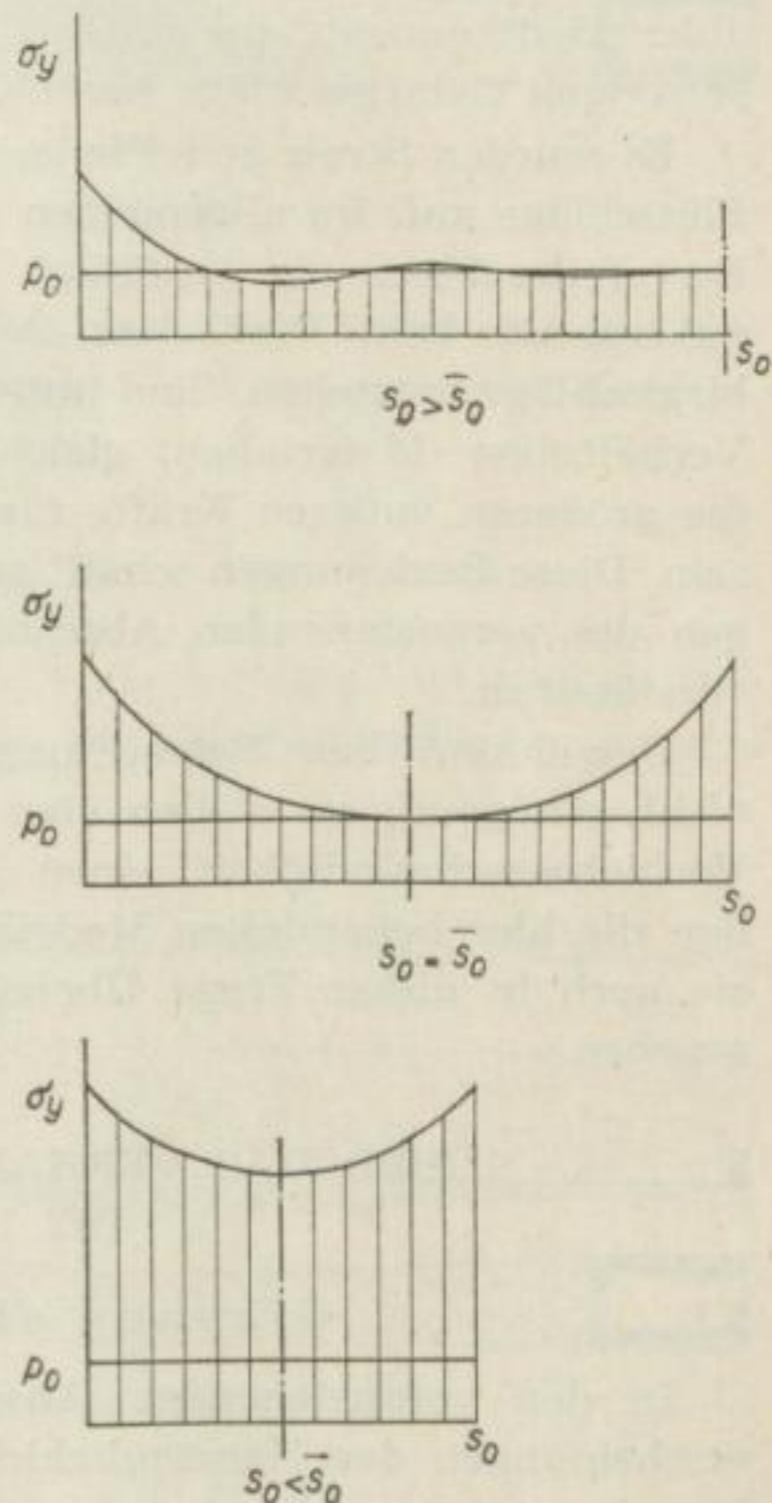


Bild 25

<sup>21</sup> Die Gesteine sind im Laufe geologischer Zeiträume genetisch verfestigte Körper, denen man in gewissen Grenzen „statistische“ Isotropie und Homogenität zweifellos zubilligen kann [29, S. 74 ff.]. Vgl. auch Abschnitt 5.31.



quantitative Differenzen einiger weniger allgemeiner Kennziffern reduziert werden, so bildet der  $E$ -Modul eine wesentliche dieser Kennziffern. Als Reservoir zur Spannungsanhäufung eignen sich nach diesen Erkenntnissen Stoffe mit großem  $E$ -Modul, weil sie nennenswerte Kräfte ohne große Verformungswege aufzunehmen vermögen (im umgekehrten Sinn geben sie diese Kräfte auch ohne große Rückverformungswege wieder ab). Ihr Verhalten wird im allgemeinen als spröde bezeichnet, ganz besonders dann, wenn die Verformungsgeschwindigkeiten groß sind.

Während die Stoffeigenschaften (Flöz) in einem Revier im wesentlichen gleich bleiben, ändern sich die äußeren Kräfte, die auf jene einwirken, mit der Art und Form der bergmännischen Abbauführung. Sie ist maßgebend für die variablen Bedingungen, die unter Umständen bei entsprechenden Materialvoraussetzungen Gebirgsschläge herbeiführen können<sup>22</sup>.

Es wurden Streb und Pfeiler verglichen. Auch beim StREBBAU treten solche Flözschläge auf. Im allgemeinen sind sie aber für den Streb im Gegensatz zum Restpfeilerabbau als „zufällig“ anzusehen. Unter gleichen Flözverhältnissen müssen also beim Pfeilerbau die „günstigeren“ Voraussetzungen für diese Gebirgsschläge entstehen. Sind unter beiden Abbaubedingungen die physikalischen Verhältnisse (Materialien) gleich, dann können nach dem Gesagten nur noch die größeren äußeren Kräfte für das Auftreten von Flözschlägen entscheidend sein. Diese Beziehungen schafft sukzessive der Restpfeilerabbau; die Überlegungen des voranstehenden Abschnitts ergeben es zwingend und an sich selbstverständlich.

Gewiß sind diese Betrachtungen zur Deutung des Wesens von Flözschlägen nicht genügend; sie stellen aber zweifellos neben anderen Bedingungen (z. B. Verhiebsgeschwindigkeit) einen immer in Erwägung zu ziehenden Faktor dar, den die hier behandelten Modellvorstellungen wohl richtig einschätzen, so daß sie auch in dieser Frage Übereinstimmung mit den Erfahrungen der Praxis ergeben.

## 5 ÜBER DAS VERHALTEN EINES SCHICHTSYSTEMS BEI DER ABSENKUNG

### 5.1 Biegung eines Schichtsystems

In den voranstehenden Abschnitten wurden die Senkungs- und Druckerscheinungen der Hangendschichten – bezogen auf die Unterlagen Flöz und Versatz – dargestellt und daraus Schlußfolgerungen für die Senkungserscheinungen über Tage gezogen. Die wesentlichen Vereinfachungen zur Beurteilung dieser Fragen waren die Wahl eines Modells Dachsicht–Haupthangendes sowie die Annahme bruchloser Absenkung dieser Dachsicht.

Im allgemeinen handelt es sich beim Hangenden um ein komplexes Schichtsystem, das weder geometrisch noch physikalisch homogen ist: Es wechseln

<sup>22</sup> Die Gebirgsschlagsystematik von NIEMCZYK [15], die aus Erfahrungsgründen aufgestellt ist, hebt gerade Pfeiler als Zentren solcher Konzentrationen äußerer Kräfte heraus, die damit vorwiegend gebirgsschlaggefährdend sind.



Größe und Art der Schichten. Die Einteilung Dachschicht–Haupthangendes stellt demgegenüber eine vereinfachte Betrachtungsweise dar, die für die behandelte Problemstellung der Senkungs- und Druckercheinungen genügend war.

Man erkennt, daß dieser Betrachtung reale Bedeutung zukommt, wenn die Schichten mit ihren Biegesteifigkeiten  $N_k$  in bestimmter Weise angeordnet sind (Bild 26). Gilt beispielsweise

$$N_1 > N_2 > N_3 > \dots > N_k$$

so ist deutlich, daß die jeweils aufliegenden Schichten für die darunter liegenden als Belastung anzusehen sind, weil sie bei einer Spannweite  $2s$  sicher der Durchbiegung folgen, die von der steifsten Schicht  $N_1$  vorgeschrieben wird<sup>23</sup>.

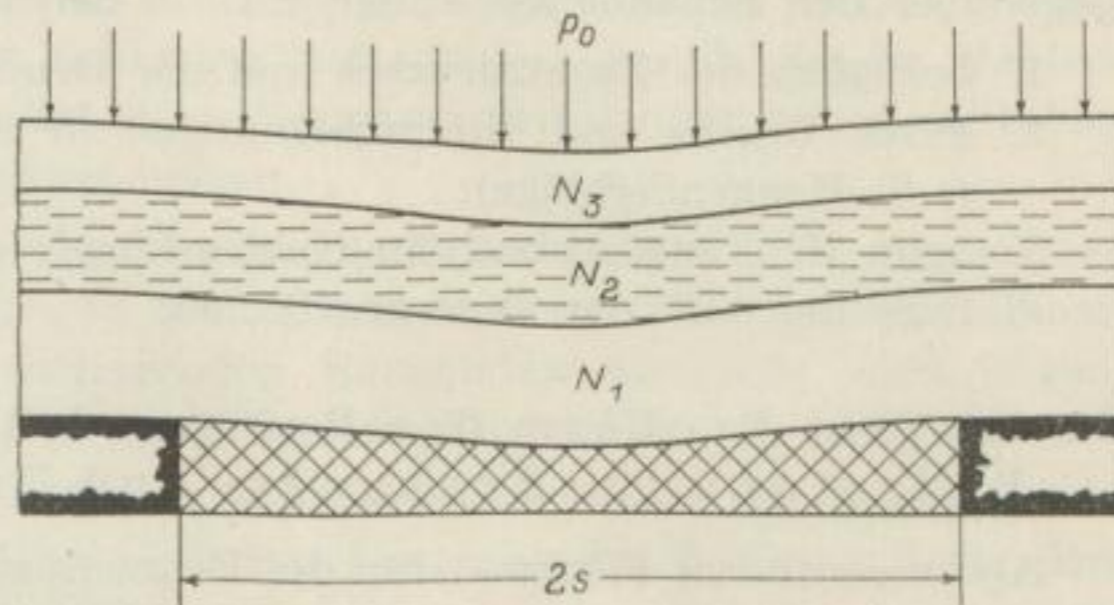


Bild 26

Gilt andererseits zum Beispiel

$$N'_1 < N'_2 > N'_3$$

so zeigt Bild 27, daß jetzt die unterste Schicht als weniger steife unter der Voraussetzung, daß die Spannweite  $2s$  genügt, um sie durchzubiegen, bereits abgesunken ist, während

für die aufliegenden Schichten mit den Steifigkeiten  $N_2$  und  $N_3$  und der Belastung  $p_0$  die vorgegebene Spannweite keine oder nur eine geringfügigere Absenkung zuläßt, die später frei erfolgt, d. h. keine Unterlage als Gegenreaktion besitzt. Im erstgenannten Fall kann man sich die Dachschichten durch eine Einzelschicht (Ersatzschicht) ersetzt denken, so daß das behandelte Modell Dachschicht–Haupthangendes praktisch vorhanden ist.

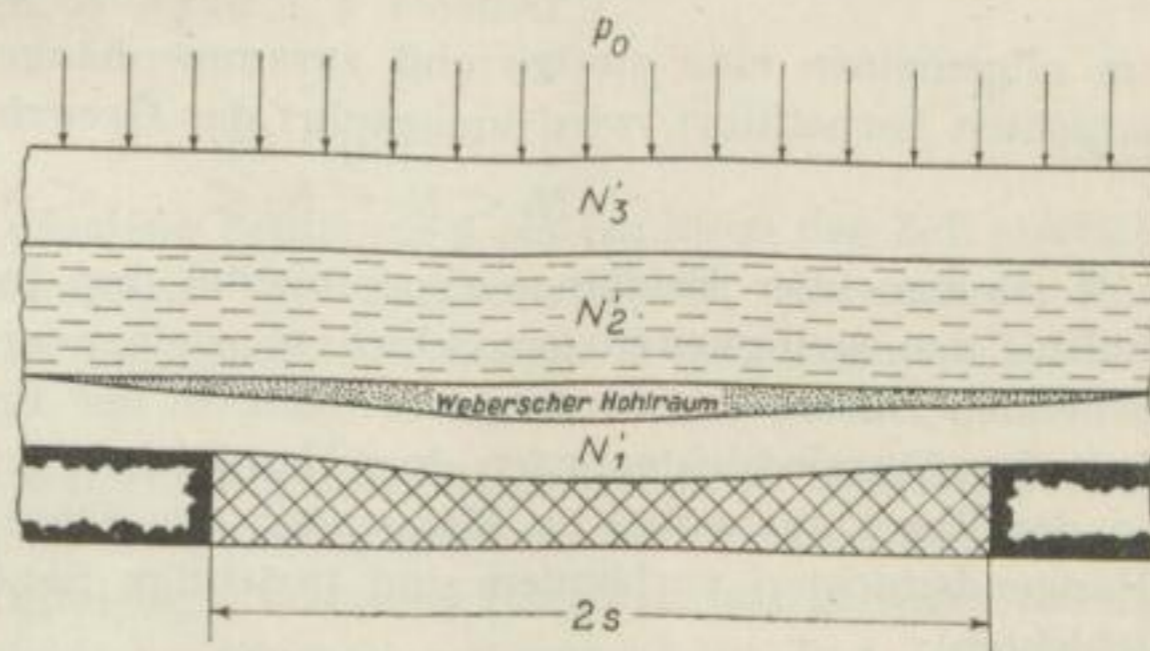


Bild 27

Im zweiten Fall ist die Absenkung der Schichten mit wachsender Verhiebslänge ein un stetiger, ein „rhythmischer“ Vorgang, der vom Verhältnis der Spannweiten zur Steifigkeit der Schichten und der Tiefe bzw. Belastung ab-

<sup>23</sup> Diese Steifigkeit kann Folge eines harten Materials oder einer großen Schichtmächtigkeit oder beider Erscheinungen zusammen sein (z. B. mächtige Sandsteinschicht).



hängt und für den die behandelten Modellvorstellungen in dieser Form zweifellos nicht mehr gültig sind.<sup>24</sup>

Durch diesen „rhythmischen“ Charakter der Senkung treten Veränderungen gegenüber den behandelten Fällen z. B. in den folgenden Punkten ein:

1. bezüglich des Zusatzdruckes und der Druckverteilung im Versatz;
2. durch Bruch- und Rißerscheinungen in den starren, steifen Schichten (z. T. Hangendschläge);
3. beim Senkungsverlauf im Gebirgskörper (z. B. aufgehaltene, gebremste Senkung nach der Tagesoberfläche).

## 5.2 Das Problem der Brückenbildung und seine Bedeutung für Senkungs- und Druckerscheinungen

Als wesentliches Merkmal für die Beurteilung des Senkungsverhaltens der Dachschichten im Komplex ist das Problem der „Brückenbildung“ anzusehen.

Darunter soll grundsätzlich die Erscheinung verstanden werden, die sich aus der Fähigkeit hangender Schichten ergibt, als Folge ihrer großen Biegesteifigkeit größere Flächen ohne nennenswerte Senkungen überspannen zu können und dadurch über dem abgebauten Feldesteil gleich einer Brücke die höher liegenden Schichten (Auflast) zu tragen (Bild 27). Es ist dabei durchaus denkbar, daß im Verlauf der Absenkungen mehrere „Brücken“ auftreten können, wie am praktischen Beispiel noch gezeigt werden soll.

Während der eine Grenzfall

$$N_1 > N_2 > N_3 > \dots > N_k \quad (5.21)$$

im allgemeinen eine stetige und zusammenhängende Absenkung aller Dachschichten herbeiführt, wird umgekehrt der Grenzfall

$$N_1 < N_2 < N_3 < \dots < N_k \quad (5.22)$$

mit zunehmender Feldlänge (Spannweite) und in Verbindung mit dem Verhältnis der Steifigkeiten der Schichten zueinander einen als rhythmisch anzusehenden Absenkungsvorgang erzeugen. In der Praxis nimmt die Biegesteifigkeit der Einzelschichten nach dem Hangenden, d. h. mit ihrem Jüngerwerden, in der Regel ab, wobei im Hangenden der Flöze oft einzelne solcher starren Hangendschichten vorhanden sind (mächtige Sandstein- oder auch Anhydritschichten).

Für das komplexe Schichtsystem ist also generell ein ungleiches Senkungsverhalten der Einzelschichten kennzeichnend. Die in den ersten Abschnitten der vorliegenden Arbeit erörterten Modelle stellen Typen der Beziehung (5.21) dar

<sup>24</sup> Exakter ausgedrückt: Solange die Abbaufäche eine Teilfläche ist, ist dem Problem der Brückenbildung Beachtung zu schenken. Schon aus der Definition einer Vollfläche ergibt sich aber, daß das gesamte Schichtsystem — vom Abbau bis zur Tagesoberfläche — den vollen Senkungsbetrag erreicht hat, womit auch die steife Schicht als Brücke nicht mehr wirksam sein kann und — wenn man sich zunächst nur bruchfreie Absenkung vorstellt — die Abbaufächengröße bzw. die verhaufene Feldlänge als Volllänge genügend groß sein muß, um auch diese Schicht weit genug durchzubiegen. Die Brückenbildung kommt also mit ihrer vollen Wirkung nur beim Teilflächenabbau zum Ausdruck, d. h. beim „Beginn“ des Abbaus.



und sind demnach als Grenzfälle gültig, vor allem dann, wenn man große verhaueene Feldlängen voraussetzt. In den meisten Steinkohlenrevieren wird man bei größeren verhaueenen Feldlängen mit diesen einfacheren Vorstellungen auskommen; kennzeichnend ist hierfür u. a. eine geringe Größe des Zeitfaktors, der für Reviere mit typisch starren Schichten (z. B. die Sandsteinbänke im Waldenburger Revier) groß ist, weil eben diese Schichten den Senkungsvorgang bremsen, indem sie zur Brückenbildung neigen.

Es ist ersichtlich, daß man Gesetze für die Brückenbildung im allgemeinen Sinn nicht anzugeben vermag, weil das Auftreten dieser Erscheinung vollkommen vom Typ des jeweils vorliegenden Hangenden bestimmt wird. Eigenschaften dieser Erscheinung sind somit nur an Einzelfällen zu untersuchen.<sup>25</sup>

Sieht man die Schichten wiederum als Platten an, so ist das Senkungsmaß des Mittelpunktes dieser Schicht bei flacher Lagerung das Höchstmaß der Senkung und ganz allgemein wie folgt bestimmt:

$$y_m \sim \frac{p_0}{N} \cdot f(a, b)$$

Die Durchbiegung  $y_m$  bzw. das Senkungsmaß ist also um so größer, je größer die Belastung  $p_0$  und die Abmessungen der Schicht (Abbaufäche) sind und je kleiner ihre Steifigkeit  $N$  ist. Die Abbaufäche, dargestellt durch  $f(a, b)$ , vergrößert sich derart, daß z. B.  $b$  als Streblänge konstant bleibt, während die verhaueene Feldlänge  $2s = a = x$  eine variable Größe ist, die von der Verhiebsgeschwindigkeit  $w$  abhängt. Man kann einfach schreiben:

$$f(a, b) = f(w, t, b = \text{const}),$$

wobei  $a$  gleich

$$x = w \cdot t \text{ [m]} \quad (5.23)$$

zu setzen ist und man die verhaueene Feldlänge  $a$  als Funktion der Zeit  $t$  erhält, wenn ein stetiger und gleichmäßiger Verhieb vorausgesetzt wird und die Verhiebsgeschwindigkeit  $w$  relativ klein bleibt, so daß die Absenkung dem Verhieb stetig folgt.

Es gilt dann der Satz: Schichten großer Biegesteifigkeit besitzen geringe Senkungsgeschwindigkeit, d. h., das Senkungsmaß wächst minimal mit der verhaueenen Feldlänge in der Zeiteinheit, während Schichten mit geringer Steifigkeit durch größere Senkungsgeschwindigkeit gekennzeichnet sind. Im komplexen Schichtsystem wird also da und dort Brückenbildung eintreten, wo eine hangende Schicht gegenüber der unter ihr befindlichen geringere Senkungsgeschwindigkeit besitzt. Das Ergebnis sind Schichtfugen (WEBERSche Hohlräume). Würde dagegen eine Schicht bei freier Biegung größere Senkungsgeschwindigkeit haben als eine andere und liegt die letztere im Schichtverband unter der erstangeführten, dann legt sich die obere Schicht auf die untere auf und belastet sie zusätzlich zu deren Eigengewicht; sie übernimmt also deren

<sup>25</sup> Speziellen Untersuchungen dieses Gegenstandes wurden darum hier die Mansfelder Gebirgsverhältnisse zugrunde gelegt.



Senkungsgeschwindigkeit, die durch die zusätzliche Belastung wiederum größer ist als bei freier Senkung dieser Schicht.

Die unterschiedliche Absenkung der Hangendschichten hat in Verbindung mit der Brückenbildung u. a. zwei wesentliche Eigenschaften:

1. Sie entlastet zunächst Strebausbau und Versatz sowie den Strebstoß (Verringerung des „Zusatzdruckes“).
2. Sie schafft „günstige“ Voraussetzungen für Rißbildung und Zerklüftung in diesen Schichten und damit für Wasserzuflüsse und Hangendschläge.

Der Mansfelder Kupferschieferbergbau – der diese Wirkungen recht deutlich zeigt – ist allgemein als „klassisches“ Revier bezüglich der Ausnutzung des Gebirgsdruckes beim Abbau bekannt. Zur Beurteilung der dort auftretenden Gebirgsdruckerscheinungen sind auch heute noch in erheblichem Maße die grundlegenden Überlegungen von GILLITZER [31] verbreitet. Von seinen Feststellungen, die z. B. den Einfluß der Abbaufächengröße auf den „Zusatzdruck“ angeben, seien hervorgehoben:

„Erst bei etwa 10 m Durchmesser stellt sich in gelindem Maße der Druck ein, der dadurch entsteht, daß sich die etwa 1 m starke Fäule vom Zechstein ablöst und . . . . auf den Versatz niedersenkt.“

„Bei Vergrößerung des Abbaukreises auf einen Durchmesser von 30 bis 50 m gerät der 3 bis 4 m starke Zechsteinkalk in Bewegung und biegt sich ähnlich wie die Fäule durch, wobei eine Schichtfuge zwischen dem Kalk und dem Anhydrit entsteht und der Anhydrit darüber stehen bleibt.“

„Fäule- und Zechsteindruck sind in überwiegendem Maße Durchbiegungsdrücke, die durch die Eigengewichtswirkung des Hangenden das Flöz leichter gewinnbar machen.“

„Erreicht der Abbau einen Durchmesser von 80 bis 100 m, entsprechend einer aufgehauenen Fläche von 5000 bis 8000 m<sup>2</sup>, so beginnt das Stadium, in dem der Anhydrit in stärkerem Maße anbricht. Der Anhydrit verhält sich starr und bricht, wenn die Spannweite zu groß wird. Das Ablösen von Anhydritschollen, die sich auf den zähen Zechsteinkalk legen, gewinnt für die nun einsetzenden Druckerscheinungen eine große Bedeutung. Da die ganze Anhydritschichtenfolge von 60 bis 70 m Mächtigkeit als ein einheitliches, gleichartiges Gesteinspaket anzusehen ist, erfolgt die Ablösung der einzelnen Schollen, wie später gezeigt wird, mit einer gewissen Gesetzmäßigkeit.“ (Vgl. auch Abb. 33)

Während GILLITZER bei der Erklärung von Fäule- und Zechsteindruck, also im wesentlichen von allgemeinen Vorstellungen der Biegetheorie, ausgeht, löst er sich bekanntlich in seiner Arbeit von diesen Überlegungen bei der Beurteilung des Anhydritdruckes und bedient sich hier zur Erklärung des Anhydritdruckes auf den Strebstoß anderer Gedankengänge, ähnlich denen, die etwa zur gleichen Zeit von HAAK [32] für den Steinkohlenbergbau entwickelt wurden.

An sich ist es nicht plausibel, daß eine bestimmte Erscheinung, nämlich der Zusatzdruck, verschiedene qualitative Ursachen an einem Ort haben soll, daß



er einmal als Folge der Biegung bzw. Absenkung auftritt und zum anderen als Kämpferdruck einer Gewölbebildung im Anhydrit definiert wird.

Zweifellos lassen die im Anhydrit in Mansfeld beobachteten und auch z. T. noch zu beobachtenden Erscheinungen der Rißbildung und der Verlauf der Risse bogenförmige, gewölbeartige Formen erkennen. Es entsteht zwangsläufig die Frage nach den Ursachen dieser Rißbildung und ihren Eigenschaften, die als gewölbeartige bezeichnet werden.

Läßt man die von GILLITZER angegebene Voraussetzung der Einheitlichkeit des Anhydrits bestehen — sie ändert im Grundsätzlichen nichts an den zu führenden Überlegungen —, so bleibt die Frage nach den Ursachen dieser Risse und ihren Formen offen.

Daraus ergibt sich folgende Konzeption: Die Biegetheorie muß hier auch eine eindeutige Erklärung liefern können, wenn sie allgemeingültig sein und die Gesetze der Vorgänge widerspiegeln soll.

### 5.3 Deutung der Rißbildung als Folge der Durchbiegung

Das Problem der Rißbildungen im Anhydrit hat in doppelter Hinsicht Bedeutung:

Es treten Spannungen auf, die die Festigkeit des Materials überschreiten; Richtung und Form der Risse müssen Rückschlüsse zulassen auf den Spannungsverlauf.

Es ist zu zeigen, daß sich die Rißbildung als Folge der Biegung im Sinne der gegebenen Modellvorstellungen erklären läßt. Dabei gilt es, sich besonders mit zwei Problemen auseinanderzusetzen:

- a) dem Bruchverhalten von Werkstoffen
- b) dem Verlauf der Spannungen bei Biegevorgängen

Eine weitestgehend widerspruchslöse Verbindung beider Faktoren mit den tatsächlich im Betrieb zu findenden Verformungsbildern wird als Kriterium für die Richtigkeit der Anwendung dieser Gesetze auf die Risse der Hangendschichten zu werten sein.

#### 5.31 *Zum Bruchvorgang*

Um das Verhalten der materiellen Körper gegenüber Kräften deuten zu können, muß man sich eine Vorstellung, ein Modell von diesen Körpern machen. Es werden in der Regel „Strukturmodelle“ ersonnen, die in einfacher Weise die Struktur und ihren Verformungsmechanismus erklären können. Dafür sind Kenntnisse von der Struktur dieser Körper Voraussetzung.

Nach FREUDENTHAL [29, S. 74] läßt sich „die Materie als eine räumliche Anordnung vieler diskreter Teilchen ansehen, deren Verhalten durch ihren potentiellen und kinetischen Energiegehalt bestimmt ist. Das grundlegende Merkmal für die Klassifizierung solcher Gruppen diskreter Teilchen liegt in der Periodizität der geometrischen Anordnung“ mit den Grenzzuständen idealer Ordnung und vollständiger Unordnung. „Die Teilchen reeller Stoffe kommen



in keinem der Grenzzustände vor, sondern in einigen Zwischenzuständen der möglichen Kombinationen von Ordnung und Unordnung (Ordnungs - Unordnungsspektrum).“

Alle reellen Körper sind Diskontinua, wie die modernen Atomanschauungen lehren. Die Theorien der Festigkeitslehre basieren auf den Annahmen der Homogenität und Isotropie der Körper, die streng nur in einem idealen Kontinuum denkbar sind.

„Genaugenommen kann nur ein ideales Kontinuum isotrop sein, weil die Definition der Isotropie fordert, daß die Teilchen in allen Richtungen gleichförmig angeordnet sind. Da dies unmöglich ist, kann die Isotropie einer diskontinuierlichen Gruppe nur statistischer Natur sein. . . . Daher lassen sich die festen oder pseudofesten Kontinua in die Grenzfälle des vollkommen geordneten, anisotropen Kristalls und der ungeordneten, statistisch isotropen, amorphen Substanz unterteilen.“ [29, S. 75]. ROS und EICHINGER [33, S. 19] schreiben im gleichen Zusammenhang von „Quasiisotropie“ als makroskopischer Isotropie, wenn auch die den Körper aufbauenden und regellos orientierten Kristallite mikroskopisch anisotrop sind.

Zum Begriff der Homogenität gilt [29, S. 75]:

„Das Raumgitter wird als homogen bezeichnet, wenn jeder beliebige Gitterpunkt als Ursprung von einander gleichwertigen Koordinatensystemen aufgefaßt werden kann.“ Diese Begriffserklärung kann erweitert werden auf eine Erklärung der makroskopischen Homogenität eines reellen Körpers, zum Beispiel einer Schicht des Hangenden. Es muß hier eine Gleichwertigkeit für alle Punkte dieser Schicht bestehen, so daß praktisch keine ausgezeichneten Orte vorhanden sind.

Die Gesteine, die Zwei- und Mehrphasensysteme darstellen, kann man im Sinne von FREUDENTHAL als „technisch amorphe“ Stoffe ansehen, wenn man sie im Bereich makroskopischer Beobachtungen beurteilt. Mehrphasensysteme sind als solche in der Regel heterogen und ungeordnet (z. B. Beton), besitzen also kein ausgezeichnetes Ordnungsprinzip ihrer Grundgefüge und sind darum im statistischen Sinn als isotrop und homogen anzusehen.

Die Gesteine als Schichtstoffe – und das trifft besonders auf die hier zu behandelnden Sedimentgesteine zu – haben in Schichtrichtung und senkrecht dazu im allgemeinen ausgeprägte Anisotropie. Sie als technisch amorphe Stoffe mit statistischer Isotropie zu betrachten, wird also jeweils nur für eine dieser Ebenen möglich sein. Man betrachtet somit eine Schnittebene der Schicht und hat ein zweidimensionales sogenanntes Scheibenproblem zu erörtern.

Auf der Grundlage dieser hier kurz angedeuteten prinzipiellen und wichtigen Überlegungen folgt die Begründung für die gute Übereinstimmung zwischen den Theorien der Festigkeitslehre und unseren praktischen Erfahrungen, und die Notwendigkeit der Verwendung solcher Gedanken und Rechnungen erscheint verstärkt geboten; das gilt auch für ihre Anwendung in Fragen der Gebirgsmechanik.



Das eigentliche Bruchverhalten der festen Körper — wie es aus den Folgerungen der theoretischen Lehren resultiert — läßt sich im allgemeinsten, abstraktesten Sinn auf Energiebetrachtungen zurückführen und schließt damit an die eingangs dieses Abschnitts erörterten Gedanken an. Solche Überlegungen, die in jüngster Zeit besonders von KVAPIL [34] für gebirgsmechanische Vorgänge angestellt werden, gehen von der Akkumulation der Energie beim Verformungsvorgang aus.

Während nach diesen Anschauungen die Formänderungsarbeit bis zur sogenannten Elastizitätsgrenze reversibel ist<sup>26</sup>, wird sie über dieser Grenze in bestimmte Energieformen (Wärme, Strahlung usw.) verwandelt, und wir erhalten eine bleibende Verformung. Diese, die nichtelastische, d. h. nicht mehr reversible Formänderung, führt im letzten Stadium der Beanspruchung zum Bruch.

Der atomare Aufbau der Körper und die erwähnten Modellvorstellungen diskreter Bauteilchen liefern eine Erklärung dieser Vorgänge. Der Bruch stellt letztlich eine fortschreitende Trennung atomarer Bindungen dar, und zwar an den Stellen, an denen die gespeicherte Energie nicht durch Formänderungen (Platzwechsel der Teilchen) abgebaut werden kann. Wird bei der Energiespeicherung dagegen gleichzeitig Energie abgegeben (dieser Vorgang erfolgt jenseits der Elastizitätsgrenze), so verformt sich der Körper plastisch, und die plötzliche Bruchgefahr wird gemindert.

Diese Vorstellungen sind zu wenig gegenständlich, wenn es gilt, den Einfluß der Struktur und besonders der geometrischen für den Bruchvorgang zu analysieren. Hier helfen die Vorstellungen der Mechanik von den inneren Kräften oder Spannungen.

Experimentelle Untersuchungen an Kristallen zeigen, daß es grundsätzlich zwei Brucharten gibt

- a) Abscheren längs einer Gleitebene
- b) Zerreißen senkrecht zur Trennebene

Im ersten Fall ergibt sich ein „Schiebungs- oder Gleitbruch“ durch zu große Schubspannungen, in deren Richtung er auch verläuft. Im zweiten Fall entsteht ein sogenannter „Trennbruch“ durch übermäßige Zugspannungen (Bild 28).

Nach den theoretischen Lehren der Mechanik ist das Spannungsfeld stetig und homogen. Auf Grund der nur „statistischen Ord-

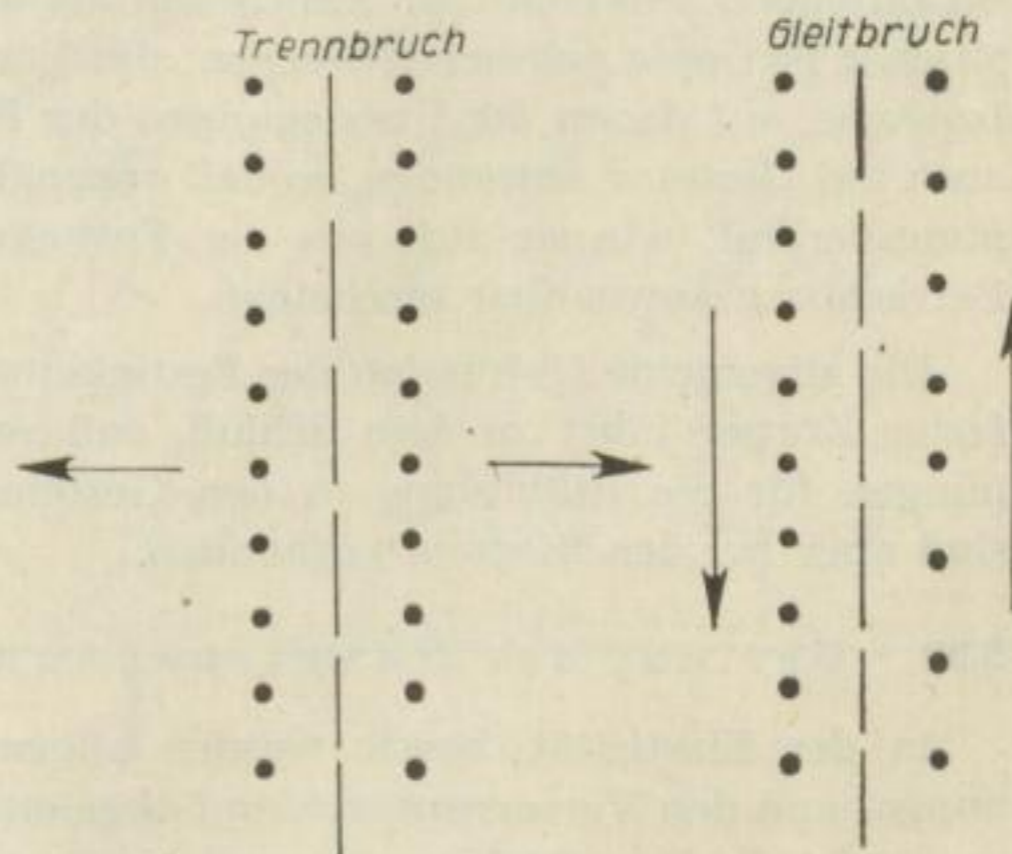


Bild 28

<sup>26</sup> HOUWINK [35] betont, daß der Begriff der Elastizitätsgrenze in gewisser Weise willkürlich und von der Meßgenauigkeit abhängig ist.



nung“ der Körper muß also der wirkliche Spannungszustand vom theoretischen abweichen, und zwar um so mehr, je weniger die dort getroffenen Annahmen gelten.

ROS und EICHINGER bezeichnen daher die theoretischen Spannungen als scheinbare, die um die „vagabundierenden Spannungen“ als Folge der Abweichungen von Homogenität und Isotropie vergrößert oder verringert werden:

„Man muß sich vergegenwärtigen, daß die wahren Spannungen der Summe aus den scheinbaren und den vagabundierenden Spannungen gleich sind, wobei letztere . . . die Folge der Heterogenität und der Anisotropie der einzelnen Bausteine des Probekörpers darstellen.“ [33, S. 63]

Die tatsächliche Bruchgefahr wird also von diesen Bedingungen hervorgerufen.

Weiterhin ist wesentlich [33, S. 63], ob sich das betrachtete Körperelement an der Oberfläche des festen Körpers oder in seinem Inneren befindet. „An der Oberfläche ist ein Freiheitsgrad mehr vorhanden, so daß sich die Kristallite verformen können.“ Gerade bei den Schichten, die zur Brückenbildung neigen, ist damit die Bruchgefahr größer.

Im allgemeinen gilt nun der Grundsatz, daß in erster Annäherung „die mineralischen Stoffe, zum Beispiel Natursteine, die sich bei Beanspruchungen in gewöhnlicher Atmosphäre spröde verhalten, der Hypothese der maximalen Normalspannung“ als Kriterium für das Festigkeitsverhalten genügen [33, S. 62]. „Bei ideal sprödem Material kann demnach ein Bruch nur durch Trennung zustandekommen, wofür aber nicht die scheinbare Hauptspannung, sondern die wahre größte Zugspannung“ als Summe aus scheinbarer und vagabundierender Spannung maßgebend ist.

Zusammenfassend: Die Gesteine sollen in erster Annäherung in einer Schnittebene senkrecht zur Schichtung als technisch amorphe Körper mit statistischer Isotropie angesehen werden; die Voraussetzungen der Homogenität und Isotropie, auf denen die Überlegungen der Festigkeitslehre beruhen, lassen sich auch auf Gesteine anwenden, so daß angenähert die Folgerungen für den Spannungsverlauf, wie sie sich aus der Festigkeitslehre ergeben, für die folgende Betrachtung anwendbar erscheinen.

Die allgemeine Diskussion der Festigkeitseigenschaften bzw. der Bruchgefahr fester Körper führt zu dem Schluß, daß vor allem der Verlauf der Zugspannungen für die Reißbildung in den Gesteinen wesentlich ist; Zugspannungen sind aber bei der Biegung vorhanden.

### 5.32 Verlauf der Hauptspannungen bei der Biegung

In der Elastizitätstheorie werden allgemeine Grundsätze über den Spannungs- und den Verzerrungszustand abgeleitet. Die klassische Elastizitätstheorie verbindet die Formänderungen und die Spannungen mit einer linearen Abhängigkeit, die als Hooksches Gesetz bekannt ist. Somit sind Homogenität und Isotropie der Körper neben der Gültigkeit des Hookschen Gesetzes (als einfachste Annäherung gilt immer die lineare) die Voraussetzungen für theoretische Rech-



nungen. Je nach der Form des Körpers und der Art der Belastung ergibt sich eine bestimmte Spannungsverteilung, aus der man unter den vorgegebenen Annahmen die Beanspruchung bis zum Bruch theoretisch darlegen kann.<sup>27</sup>

Die relativ einfachsten solcher Spannungszustände sind noch die ebenen, bei denen der Körper als Scheibe angesehen wird. Für jeden Punkt dieses Körpers wird man auf Grund von Abmessungen und Belastung bestimmte Spannungswerte und -richtungen erhalten, bei deren Kenntnis der Spannungszustand im Körper als bestimmt anzusehen ist.

In jedem Punkt des Körpers gibt es, entsprechend den Grundlagen des ebenen Spannungszustandes, zwei ausgezeichnete senkrecht aufeinander stehende Richtungen, die sogenannten Hauptnormalspannungsrichtungen, die schubspannungsfrei sind und deren Neigung man bekanntlich den folgenden Wert zuschreibt:

$$\operatorname{tg} 2 \varphi = \frac{\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$$

Sind von genügend Punkten im Körper diese Richtungen bekannt, so erhält man zwei Richtungsfelder, die einander in jedem Punkt orthogonal schneiden. Denkt man sich in diese Felder Linien gezeichnet, die in jedem Punkt eine Tangentenrichtung besitzen, welche einer der beiden Hauptrichtungen entspricht, so erhält man die sogenannten Spannungstrajektorien oder Hauptspannungslinien oder Isostaten.

Da wir zwei sich senkrecht schneidende Richtungsfelder haben, ergeben sich zwei Scharen orthogonaler Trajektorien. Sie zeigen uns gleichsam die Richtung, in welche die angreifenden Kräfte weitergeleitet werden. Bild 29<sup>28</sup> gibt dafür ein einfaches Beispiel.

Die eine Schar entspricht dem Verlauf der Hauptdruckspannungen, die sich in jedem Punkt senkrecht mit der anderen Schar, mit den Hauptzugspannungen, kreuzen. Bild 30<sup>29</sup> zeigt als Beispiel noch den Verlauf der Hauptnormalspannungen in einem

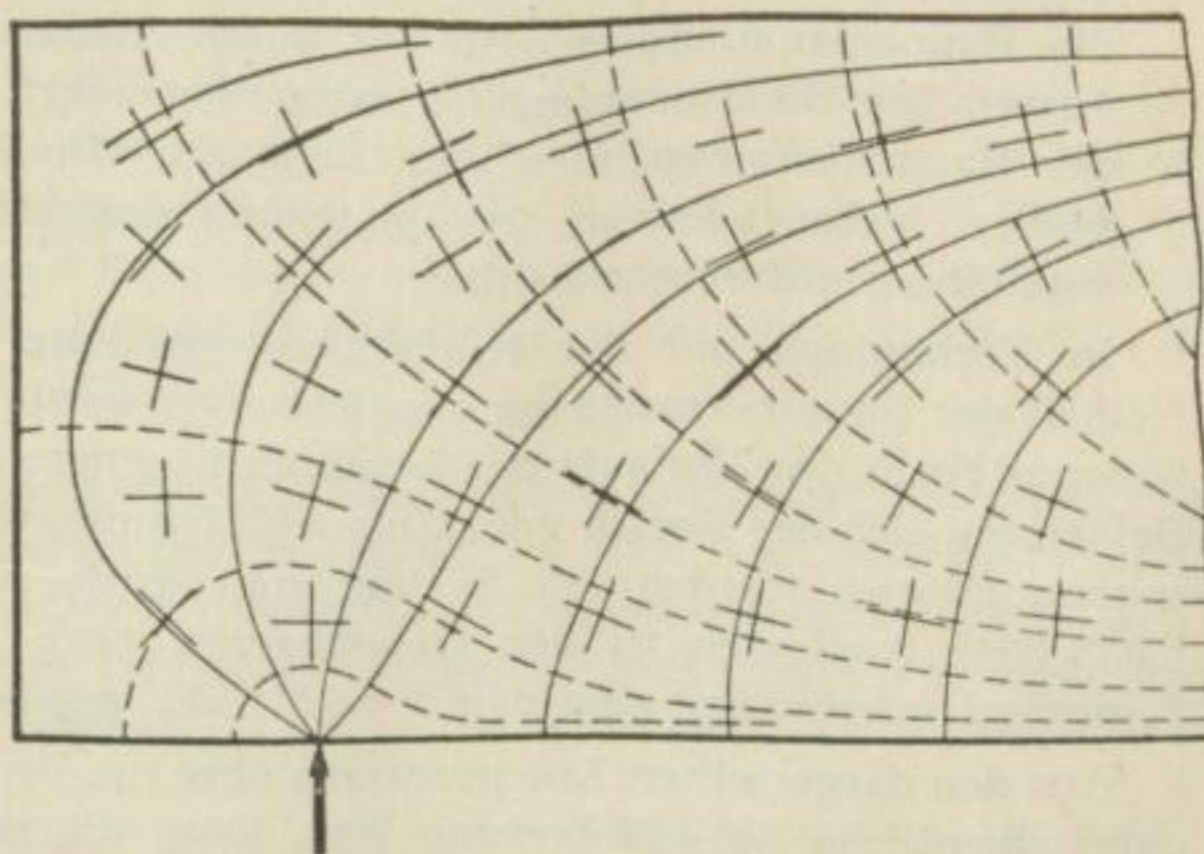


Bild 29

<sup>27</sup> Exakt nur bis zur Fließgrenze. Bei sprödem Materialverhalten fehlt praktisch der Fließbereich und eine Analogie zwischen der Spannungsverteilung und dem Bruchbild erscheint als real.

<sup>28</sup> [39] Abb. 33.

<sup>29</sup> [36] Abb. 454.



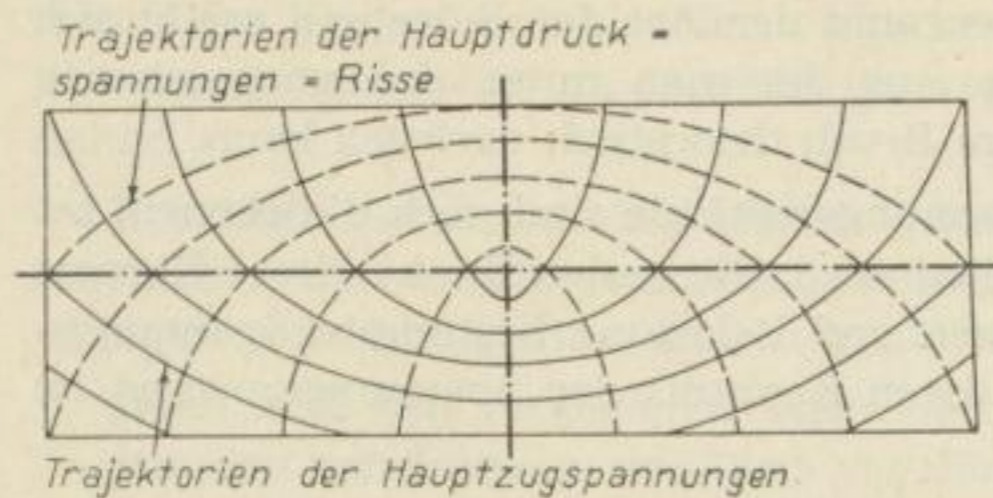


Bild 30

Balken, der auf Biegung beansprucht ist. Man erkennt das Feld der Hauptzug- und Hauptdruckspannungstrajektorien. Dieser Verlauf der Normalspannungen zwischen den Auflagern gilt für nichtörtliche Belastung, wie sie z. B. durch das Eigengewicht entsteht.

An dieser Stelle sei an eine Vorstellung erinnert, welche die Hauptspannungslinien als Kraftlinien ähnlich einer Strömung auffaßt und die man auch in der gebirgsmechanischen Literatur bei der Deutung des Spannungsverlaufs um bergmännische Strecken oft findet. FÖPPL und NEUBER [37, S. 88/89] schreiben zu diesem Problem:

„Diese Vorstellung ist sehr geeignet, das Verständnis für den ebenen Spannungszustand zu erleichtern; jedoch ist sie nur eine Hilfsvorstellung, die streng genommen für den Spannungsverlauf nicht zutrifft; denn wie schon aus der Ableitung der Gleichgewichtsbedingungen hervorging, besteht nicht nur eine Kraftübertragung in der einen Richtung ( $\sigma_1$ ), sondern zugleich auch in der Querrichtung ( $\sigma_2$ ). Die Hauptspannungslinien vermitteln daher streng genommen keine Vorstellung vom wirklichen Kraftfluß, sondern nur dann, wenn man näherungsweise die Querspannung  $\sigma_2$  als genügend klein gegenüber  $\sigma_1$  vernachlässigt. Der hierbei begangene Fehler hängt von der Größe  $\sigma_2/\sigma_1$  ab. Am lastfreien Rand ist  $\sigma_2 = 0$ , so daß  $\sigma_2/\sigma_1 = 0$  wird, sofern nicht zugleich  $\sigma_1 = 0$  ist. Wir begehen dort in der Tat keinen Fehler, wenn wir die Hauptspannungslinien in der unmittelbaren Nähe als Kraftlinien auffassen. Die Randspannung ist dann umgekehrt proportional dem Abstand der Hauptspannungslinien vom Rand. . . . Im Innern jedoch ist an vielen Stellen, insbesondere in der Umgebung singulärer Punkte die Kraftlinienvorstellung nicht mehr haltbar.“

In Verbindung mit der Kraftlinienvorstellung und der Schubspannungsfreiheit der Hauptnormalspannungsrichtungen sowie im Zusammenhang mit der äußeren Form des Verlaufs der Isostaten in einem auf Biegung beanspruchten Balken hat sich der Begriff von „Zug- und Druckgewölben“ gebildet. Die Hauptspannungslinien werden „als System von Druck- und Zuggewölben gedeutet“ [38, S. 304]. Analogien zu den Gewölbewirkungen der Statik im Sinne einer Kämpferdruckwirkung sind damit noch nicht gegeben.

Aus den dargestellten Erkenntnissen über die Bruchvorgänge ergibt sich nun eine wesentliche Schlußfolgerung (vgl. [36]), die gerade für die Reißbilder in den Hangendschichten, speziell für den Mansfelder Anhydrit, bedeutungsvoll ist:

In zugspannungsempfindlichen Werkstoffen fallen die Risse mit der Richtung der Hauptdruckspannungstrajektorien zusammen, weil in dieser Richtung die Angriffsfläche der senkrecht zu ihr verlaufenden Hauptzugspannungen verläuft.



Im folgenden Bild 31<sup>30</sup> ist der Verlauf der Risse in einem Betonbalken gezeigt, der auf Biegung beansprucht wurde. Man sieht überzeugend die Analogie zwischen dem Verlauf der Risse und dem theoretischen Spannungszustand.

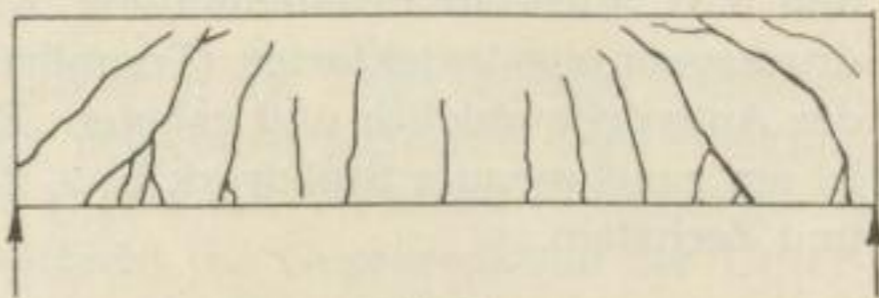


Bild 31

Wie verlaufen die Schubspannungen im Balken? Die Trajektorien der Hauptnormalspannungen stellen nach Bild 30 zwei Systeme orthogonaler Kurvenscharen dar. Auf ihren Flächen sind als Hauptspannungsrichtungen stets die Schubspannungen gleich Null. Die Trajektorien der Hauptschubspannungen sind gleichermaßen untereinander orthogonal und halbieren in jedem beliebigen Punkt des Balkens die von den Trajektorien der Hauptnormalspannungen eingeschlossenen Winkel<sup>31</sup>. Auf Grund dieser Bedingung ergibt sich die Richtung dieser Trajektorien, wie in Bild 32 (linke Hälfte) dargestellt ist. Man erkennt, daß diese Trajektorienschär mehr parallel zur neutralen Achse, also flacher verläuft als die Hauptnormalspannungslinien. Die neutrale Achse ist Schubspannungsebene.



Bild 32

Betrachtet man den Verlauf der Hauptschubspannungen nicht als Fließbedingung (Entstehen plastischer Zonen), sondern als Bruchbedingung für einen Gleitbruch, so ist augenscheinlich, daß bei der Absenkung des Schichtsystems gerade Schichtfugen zu solchen auf Schub höchstbeanspruchten Stellen werden können. Würde das Material ausgezeichnete Gleitrichtungen besitzen, die mit dem Verlauf der Hauptschubspannungen zusammenfallen – es gilt dann natürlich keine ausgeprägte statistische Isotropie des Materials mehr –, so würden Gleitbrüche entstehen, die flacher verlaufen als Trennbrüche.

Ob nun diese oder jene Form der Zerstörung auftritt, ist vor allem von der Materialstruktur abhängig. Die Untersuchung der Werkstoffeigenschaften bildet somit die Voraussetzung für die Urteilsfähigkeit in dieser Frage, wenn auch bei den meist spröden Gesteinen die steiler verlaufenden Trennbrüche im allgemeinen auftreten werden.

Auf Grund dieser Feststellungen findet die Erscheinung des „Anhydritdruckes“ in Mansfeld (vgl. S. 84/85) eine einfache und dem Wesen von Fäule und Zechstein durchaus entsprechende Erklärung.

<sup>30</sup> [36] Abb. 453.

<sup>31</sup> In der Regel sind diese Flächen nicht normalspannungsfrei.



Indem der Anhydrit als Brücke weite Flächen ohne große Senkung überspannt, wächst die Größe seiner inneren Spannungen. Übersteigt die Größe der abgebauten Flözfläche das Tragvermögen des Anhydrits, so kommt es zur Reiß- und u. U. auch zur Schalenbildung, wobei diese Risse dem Verlauf der Hauptdruckspannungstrajektorien (Trennbrüche) folgen. Damit ist eine Beweglichkeit des Anhydrits möglich und geboten: Er senkt sich ab. Die Folge dieser Senkung ist ein zunehmender Stoßdruck bzw. Zusatzdruck wie beim Absenken von Fäule und Zechstein.

## 5.4

## Schlußfolgerungen

Man erhält durch diese Überlegungen eine sehr einfache und natürliche Erklärung der Vorgänge. Bild 33 zeigt nochmals nach Darstellungen der „Sicherheitsinspektion“ des Mansfelder Kombinats schematisch die Brückenbildung des Anhydrits und die vermutete Reißbildung, die als Gewölbewirkung gedeutet ist.<sup>32</sup>

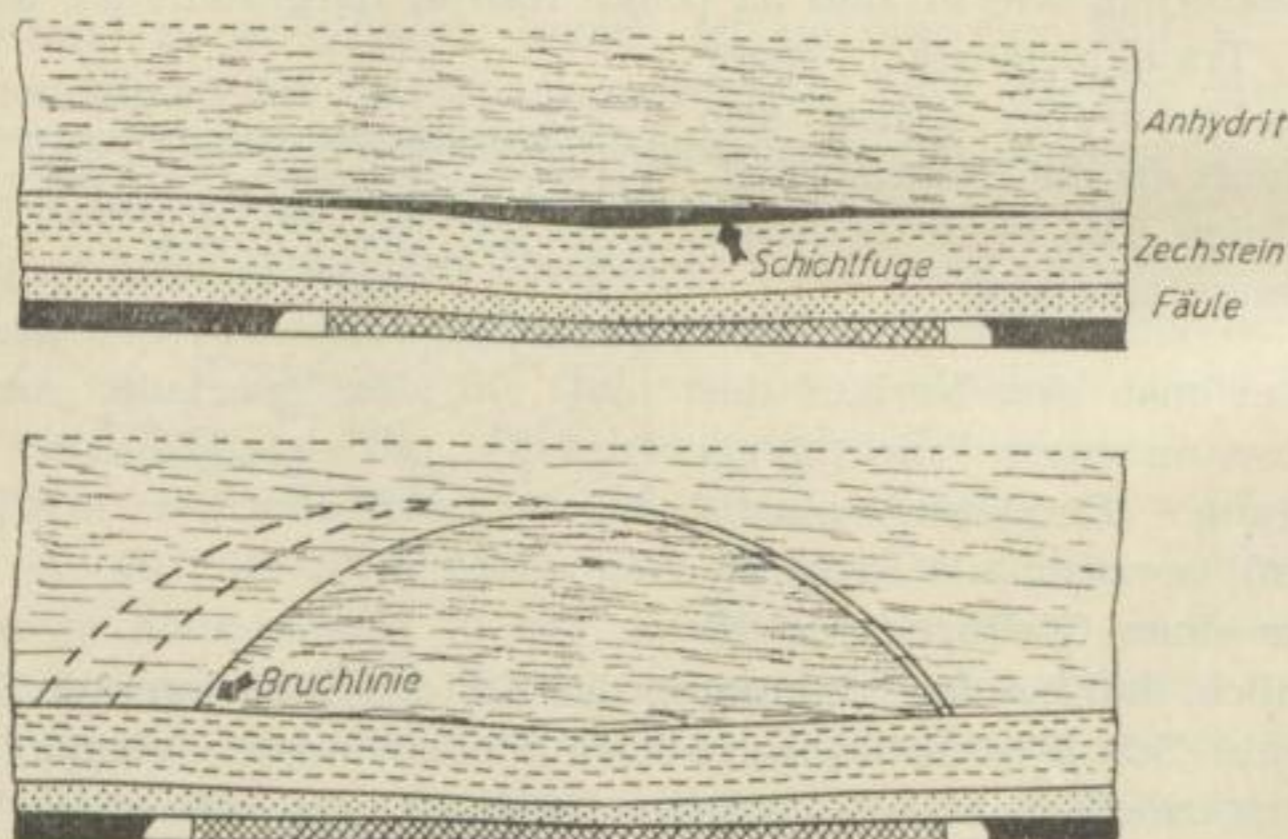


Bild 33

Diese Erscheinungen, wie Brücken- und Reißbildung, sind sicher allgemeingültige, wenn ein Schichtsystem vorhanden ist, bei dem Schichten ungleicher Biegesteifigkeiten wechsellagern. Während einerseits durch die Brückenbildung zunächst eine „Entlastung“ der Flözränder folgt, ist andererseits der Schicht, welche die Brücke bildet, die Gegenreaktion einer Unterlage (Stütze) genommen, und die Gefahr des Zubruchgehens dieser Schicht wächst in steigendem Maße, weil ihre Tragkraft in Abhängigkeit von der Abbaufächengröße und der Auflast beschränkt ist.

Im Sinne dieser Überlegungen empfehlen sich darum von selbst folgende Möglichkeiten als Gegenmaßnahmen:

<sup>32</sup> Richtlinien zur Erreichung einer unfallsicheren und ergiebigen Strebarbeit mit einer Einführung in das Wesen des Gebirgsdruckes insbesondere im Mansfelder Kupferschieferbergbau (Eisleben 1952, Abb. 5 und 6).



1. dichter Versatz
2. entsprechend geringe Breite des Abbaus (Streblänge)
3. systematisches Entspannen der Brücken-Schicht (z. B. Entspannungsschießen oder Bruchbau)

Zu 1. Vom Versatz wäre zu fordern, daß er in der Lage sei, alle Schichten, die sich unterhalb der zur Brückenbildung neigenden befinden, ohne Senkung stützen zu können. Das heißt also, daß die Dichte des Versatzes (Tragfähigkeit) so groß sein müßte, daß er der Brücken-Schicht die Gegenreaktion der Unterlage (Schichten plus Versatz) voll erhält.

Zu 2. Die Spannungen, die in der Schicht auftreten und bei Erreichen eines kritischen Maßes die Rißbildung herbeiführen, stehen zur Durchbiegung dieser Schicht in direktem Verhältnis; diese ist ihrerseits von der Auflast, von der Steifigkeit der Schicht und in hervorragendem Maße von der Größe der Abbaufäche abhängig. Somit ergibt sich der Schluß, daß die Abbaufäche ein bestimmtes Maß nicht überschreiten darf bzw. daß die Streblänge maximal nur so groß gewählt werden dürfte, daß die Spannungen unter ihren kritischen Werten bleiben.

Zu 3. Diese Gefahren sind zu bannen durch systematisches Entspannen der Brücken-Schicht, d. h., ihr wird Beweglichkeit verliehen, damit sie sich absenken und auf die Unterlage auflegen kann, ohne daß die Spannungen ihr kritisches Maß erreichen.

Im Betrieb ist die Anwendung dieser Möglichkeiten aber beschränkt. Beispielsweise wird die Wahl einer geringen Streblänge im allgemeinen der Wirtschaftlichkeit dieses Strebens entgegenstehen und darum nicht durchzuführen sein. Auch das systematische Entspannen der Brücken-Schicht (z. B. durch Erschütterungsschießen) ist nur begrenzt möglich; einfach darum, weil die Lage dieser Schicht im Hangenden nicht in jedem Fall die Möglichkeiten zur genügend wirtschaftlichen Ausführung dieser Maßnahme bietet. Die Anwendung des Bruchbaus, die zur systematischen Zerstörung solcher Schichten führen kann, setzt voraus, daß der Nachbruch genügend weit ins Hangende reicht und besonders auch diese steife Schicht erfaßt, anderenfalls wirkt der Bruch wie eingebrachter Versatz. Der zuletzt genannte Fall stellt gleichsam einen Sonderfall dar, der nur dort als wirksam denkbar, wo der Nachbruch gerade bis zur Brücken-Schicht erfolgt; wenn er nämlich eine genügende Dichte erreicht, die als Gegenreaktion in der Lage ist, der Senkung dieser Schicht eine Stützkraft entgegenzusetzen. Diese Stützkraft soll nicht die Senkung überhaupt verhindern (das vermag keine Unterlage, die nachgiebig ist und zudem noch solche Nachgiebigkeitseigenschaften wie ein Versatz bzw. Lockergut besitzt). Vielmehr erscheint es nur geboten, daß die Unterlage sich dicht an die Schicht anschmiegt und eben als nachgiebige Unterlage wirksam bleibt, d. h., sie muß Bildungen nach der Art „WEBERScher Hohlräume“ bzw. von „Schichtfugen“ ausschließen und damit dieser Schicht die Möglichkeit der freien Biegung, der Biegung ohne Unterlage und Gegenreaktion von vornherein nehmen. Diese Maßnahme ist somit in ihrer praktischen Anwendbarkeit begrenzt.



Als letzte der drei genannten Möglichkeiten verbleibt noch die Wahl eines genügend dichten Versatzes. Der Versatz, der einen Ausbau zur Stützung des Hangenden darstellt, besitzt im allgemeinen eine sehr ungünstige Charakteristik (Bild 12), die ihn in seiner hergebrachten Form zur Lösung der zgedachten Aufgabe untauglich macht. Es ist unreal, vom Versatz in dieser Form eine Lösung zu erwarten. Denn nach dem Gesagten bedarf es eines Ausbaus, der in der Lage ist, auf Grund seiner Anfangstragfähigkeit den Schichtteil ohne Senkung zu stützen, der die Unterlage der Brücken-Schicht bildet. Das ist beim Versatz nicht möglich, weil seine Nachgiebigkeit sogleich mit der Druckaufnahme beginnt. Die Anfangstragfähigkeit der Unterlage muß darum im Minimum groß genug sein, das Gewicht dieser Schichten ohne Senkung voll tragen zu können, damit die Bildung von Schichtfugen unterhalb der Brücken-Schicht vermieden wird. Erst die Absenkung dieser Schicht darf auch die Unterlage zusammendrücken. Die praktische Lösung dieser Aufgabe ist also um so schwieriger, je höher diese steife Schicht im Hangenden über dem Abbau liegt.<sup>33</sup>

So kann unter den genannten Umständen Rippenversatz durchaus günstiger sein als Vollversatz, weil die Anfangstragfähigkeit der Rippen bedeutend größer ist als die des Vollversatzes, vorausgesetzt, daß die Rippen dicht genug und sorgfältig ausgeführt sind.

In diesem Zusammenhang ist es interessant, auf ein Ausbaufahren des Abbauraumes hinzuweisen, das auch bei KEGEL [8] zitiert ist, und zwar der Abbau mit Standholzpfählern.

„Vor allem wurden selbst bei größeren Flözmächtigkeiten und mächtigem, festem Sandsteinhangenden die Gebirgsschläge in der Regel völlig vermieden. Das Haupthangende biegt sich gleichmäßig und allmählich als geschlossen bleibende Platte bis zur festen Auflagerung durch“ [8, S. 70].

Die von CABOLET [40] beschriebenen Erfahrungen unterstützen unsere Überlegungen und bestätigen, daß sich die gewalttätigen Reiß- und Brucherscheinungen, wie sie im allgemeinen Folge der Brückenbildung sind, durch die Grundgesetze der freien Biegung erklären lassen und daß durch entsprechende Unterlagen (die eine Gegenreaktion schaffen) diese Gefahren gemildert und sogar verhindert werden können. Lösungen dieses Problems sind mit den Biegeerscheinungen auf nachgiebiger Unterlage zu erklären und zu begründen.

## 5.5 Über die Berücksichtigung verschiedenartiger Tragfähigkeitseigenschaften der nachgiebigen Unterlage (Versatz)

Die im Abschnitt 5.4 hervorgehobenen Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften der Unterlage und dem Auftreten von Hangendschlägen bzw. den Bruch- und Reißerscheinungen des Hangenden sollen abschließend noch näher

<sup>33</sup> Es ist möglich, daß die gefährlichen Auswirkungen der Brückenbildung um so geringer werden, je höher diese Schicht, d. h., je entfernter sie von Abbau liegt, wodurch eine Art „Selbstlösung“ des Problems denkbar ist.



untersucht werden. Bild 34 zeigt schematisch zwei Typen von Druck-Setzungskurven, die der Gleichung

$$p = K y^n \quad (5.51)$$

entsprechen mögen, wenn man mit  $p$  den aufgetragenen Druck und mit  $y$  die Zusammendrückung bezeichnet.  $K$  und  $n$  sind Konstante, die von den physikalischen und geometrischen Eigenschaften der jeweiligen Unterlage abhängen. Linearisiert man diese Kurven, ersetzt sie also in einem Bereich  $\Delta p$  durch eine Gerade, so gilt  $n = 1$  und  $K = E'$ , und wir erhalten die Beziehung (2.2). Die WINKLER-Hypothese ist als Sonderfall der Gleichung (5.51) aufzufassen, für den an jeder Stelle  $x$  die Einsenkung von der Belastung linear abhängig ist. Für  $n < 1$  nehmen die Verformungen im Verhältnis zum Druck immer rascher zu, während für  $n > 1$  die Druckaufnahme im Verhältnis zur Verformung mit der Verdichtung schneller wächst. Die letzte Kurve entspricht etwa den Eigenschaften des Versatzes, d. h. der Zusammendrückung eines Lockergutes, während die zur Abszisse konkave Kurve die Drucksetzungsbeziehung eines Festkörpers grundsätzlich widerspiegelt.

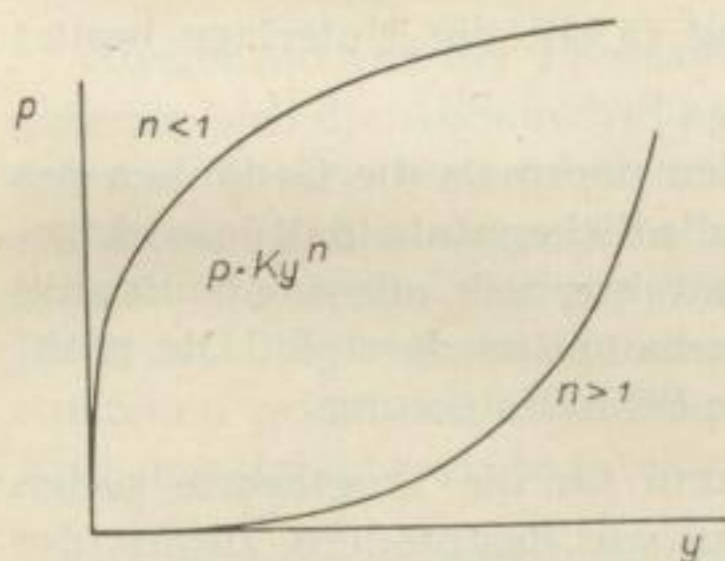


Bild 34

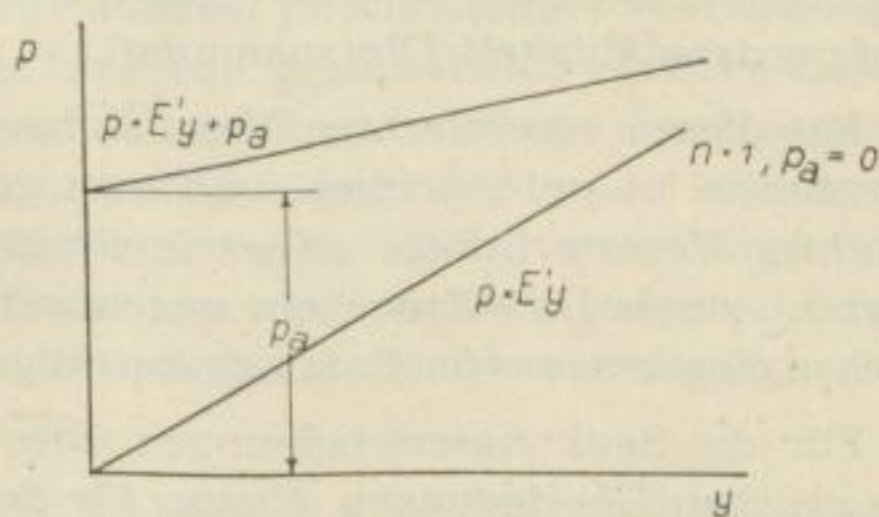


Bild 35

Soll der Versatz eine bestimmte Mächtigkeit der Dachschichten ohne Setzung tragen, so muß diese Belastung optimal dem Eigengewicht dieser Schichten entsprechen. Wollte man auf diese Weise die Brückenbildung verhindern, so müßte diese Anfangstragfähigkeit — wie schon betont — wenigstens gleich dem Eigengewicht des Schichtsystems unterhalb der Brücken-Schicht sein.

Denkt man sich die Tragfähigkeitskurve als Gerade, so ist zur Erfüllung dieser Bedingung eine Charakteristik der Unterlage notwendig, die der Gleichung

$$p = E' y + p_a \quad (5.52)$$

entspricht und die Bild 35 zeigt. Dieser „Versatz“ (zum Beispiel gut verkeilte Holzpfiler oder dicht ausgeführte Bergerippen) wäre in der Lage, ohne Setzung den geforderten Druck  $p_a$  aufzunehmen.

Die Differentialgleichung der Biegelinie (2.4) lautet für diesen Fall<sup>34</sup>:

$$N \frac{d^4 y}{dx^4} + E' y = p_0 - p_a \quad (5.53)$$



Setzt man voraus, daß  $p_a$  eine nur vom Material abhängige Konstante nach Gleichung (5.52) ist, dann gilt natürlich

$$p_0 - p_a = \bar{p} = \text{const.}$$

In den Lösungen der Differentialgleichung (2.4) ist damit nur  $p_0$  durch  $\bar{p}$  zu ersetzen und diese Eigenschaft der Unterlage ist berücksichtigt. Die Unterlage ist gleichsam mit der Vorspannung  $p_a$  eingebracht.

Die Gleichung der Senkungskurve (der Spannungsverteilung entsprechend) auf den Flözrändern lautet jetzt:

$$y = \frac{p_0 - p_a}{E'_1} + e^{-\alpha_1(x-s)} [B_1 \sin \alpha_1 (x-s) + B_2 \cos \alpha_1 (x-s)] \quad (5.54)$$

Auch für die Konstanten  $B_1$  und  $B_2$  der Gleichungen (3.263) und (3.264) ist statt  $p_0$  der Ausdruck  $(p_0 - p_a)$  zu setzen.

Die Gleichungen gehen für  $p_a = 0$  in die Gleichungen (3.21) bzw. (3.263) und (3.264) über: Der Ausbau des Abbauraumes mit losem Versatz stellt mathematisch somit einen Grenzfall dar. Würde das Hangende dagegen dicht mit Holzkästen gestützt, so gilt etwa die Gleichung (5.54); die Unterlage besitzt Anfangstragfähigkeit (Vorspannung).

Mit diesen vereinfachten Vorstellungen werden nochmals die Gedanken des Abschnitts 5.4 unterstrichen, und man gewinnt die Erkenntnis, daß lose eingebrachter Versatz infolge seiner ungünstigen Charakteristik, die im Nullpunkt beginnt, unter Umständen ein ungenügendes Ausbaumittel darstellt. Die praktischen Ergebnisse von CABOLET bestätigen diese Schlußfolgerung.

Für die Senkungserscheinungen über Tage und für die Trogtheorie gelten die gleichen Überlegungen, ebenso für den Abbau von Restpfeilern. Besitzt der Ausbau des Abbauraumes die Eigenschaften (5.52), dann verringert sich z. B. der Absenkungsfaktor

$$a = \frac{p_0 - p_a}{E'}$$

Könnte man diesem Ausbau den (theoretischen) Wert  $p_a = p_0$  als Vorspannung geben, würden überhaupt keine Senkungserscheinungen auftreten.

Dieselben Überlegungen treffen auch für die Druckverteilung im Versatz und für die Länge der Zone ungenügender Versatzdichte zu. So lauten die Gleichungen (3.441) und (3.52) im allgemeinen Fall:

$$y = \frac{(p_0 - p_a)}{E'_2} F(x) \quad (5.55)$$

$$y(0) = \frac{p_0 - p_a}{E'_2} \left( 1 - 2 \frac{\sinh \varphi \cos \varphi + \cosh \varphi \sin \varphi}{\sinh 2 \varphi + \sin 2 \varphi} \right) \quad (5.56)$$

<sup>34</sup> Wollte man eine genauere Beziehung wie (5.51) berücksichtigen, ergibt sich eine nichtlineare Differentialgleichung, deren Lösung unbekannt ist. Diese Form der Linearisierung stellt somit ein nicht exaktes, aber notwendiges Hilfsmittel dar.



Der „Ruhepunkt“ rückt mit der Vergrößerung von  $p_a$  aus dem Versatzfeld immer näher an die Flözkante. Für  $p_a = p_0$  erreicht er diese, und die Unterlage hat jetzt von vornherein den Überlagerungsdruck  $p_0 = p_a$  aufgenommen, so daß Spannungen  $\sigma_y$ , die infolge der Absenkung des Hangenden in der Unterlage entstehen, Null werden, weil eben die Vorspannung bereits besteht.

Mit der Verkleinerung der Durchbiegung, d. h. mit Vergrößerung von  $p_a$ , werden die Zusatzdruckzone im Vorfeld und die Zone ungenügender Versatzdicke verkürzt, verringern sich auch die Größen von Volllänge und Absenkungsfaktor und verschwindet sukzessive die Trogbildung.

So erweist sich nach den theoretischen Überlegungen und den gestellten Voraussetzungen der Ausbau des Abbauraumes als wesentlichstes Hilfsmittel zur Beherrschung der Senkungs- und Druckerscheinungen beim Strebbau. Die Charakteristik der Unterlage, die hier näherungsweise durch lineare Darstellung ersetzt wurde, bildet letztlich das Kennzeichen für diese Erscheinungen.

## 6

## ZUSAMMENFASSUNG

Ausgehend von der Fragestellung, mit welchen physikalischen Verformungsgesetzen sich die Abbauwirkungen beim Strebbau grundsätzlich erklären lassen, wurden in der vorliegenden Arbeit die Absenkungsvorgänge der Hangenschichten als das wesentliche und bestimmende Merkmal für alle Abbauwirkungen angesehen und ihr Wesen über vereinfachte Modellvorstellungen mit Hilfe der Biegetheorie auf elastischer Unterlage mathematisch gedeutet. Damit entstehen prinzipiell zwei Fragen, die, entsprechend den Voraussetzungen der Aufgabenstellung, zu beantworten waren:

1. Sind die Absenkungsvorgänge des Hangenden allein mit Biegevorgängen physikalisch sinnvoll zu deuten?
2. Sind die angegebenen Modellvorstellungen zur Lösung der Aufgabe genügend?

Während die erste Frage — sie stellt bekanntlich das älteste und auch umstrittenste Problem dar (vgl. S. 39 ff) — den Standpunkt einer Interpretation festlegt, über dessen Berechtigung nur die Übereinstimmung zwischen Theorie und Praxis entscheiden kann, ist die zweite Frage vorwiegend von der angewendeten Methode abhängig, welche die mathematische Lösbarkeit der Aufgabe in letzter Konsequenz bestimmt. Beide Fragen sind darum nur im Zusammenhang und nicht unabhängig voneinander zu lösen.

Im zweiten Abschnitt der Arbeit sind die Grundlagen der verwendeten mathematischen Theorie dargelegt.

Der dritte Abschnitt behandelt Modelle zur Darstellung von Senkungs- und Druckverlauf beim Strebbau. Im Vorfeld besteht eine Zusatzdruckzone, deren Reichweite und Größenordnung sehr variabel ist. Der Druck an der Strebkante kann bei elastischem Materialverhalten einen bestimmten maximalen Grenzwert



nie überschreiten. Die theoretischen Ergebnisse wurden mit markscheiderischen Feinmessungen verglichen.

Weiterhin wird die Theorie der Senkung des Hangenden über dem Versatzfeld entwickelt. Als wesentlicher Faktor erweist sich unter sonst gleichen Bedingungen der Einfluß der Auflager (Flözränder) auf die Gestalt der Senkungskurven und die Druckverteilung im Versatz. Gerade das letzte Problem war bisher noch keiner einheitlichen Deutung zugänglich. Als wesentliches Ergebnis ist ferner Übereinstimmung mit der bekannten und anerkannten LEHMANNschen Trogtheorie festzuhalten, die mit der dargelegten Theorie eine einfache physikalische Deutung erfährt. Der Hilfsbegriff „Wellenlänge“ der Modellvorstellungen bildet in abstrahierter Form letztlich die Grundlage für den geometrischen Hilfsbegriff „Grenzwinkel“ der Trogtheorie.

Im vierten Abschnitt wird schließlich die Theorie auf den Abbau von Restpfeilern angewendet und gezeigt, daß Streb- und Restpfeilerabbau Gemeinsames besitzen bzw. daß der Strebbau nach der Theorie ein Sonderfall des Restpfeilerbaus ist; die spezifischen Druckerscheinungen beim Abbau von Restpfeilern deuten einleuchtende Beziehungen zu den Gefahren von Flözschlägen an.

Im fünften Abschnitt ist die Gültigkeit des Gedankenmodells, Dachschicht und Haupthangendes, einer allgemeinen Prüfung unterzogen, wobei der qualitative Unterschied zwischen diesem Modell und dem Verhalten eines Schichtsystems bei der Absenkung bestimmt wird. Als wesentliches Merkmal dieses Verhaltens (durch das es überhaupt ausgeprägt erscheint) wird das Problem der Brückenbildung angesehen, das wiederum zwei Erscheinungen hervorruft: die zeitweise Druckentlastung des Abbaustoßes (Flözränder) und die Gefahren der Reiß- und Brucherscheinungen. Die Brückenbildung ist in der Regel nur beim Abbau von Teilflächen bedeutsam. Es werden Möglichkeiten zu Gegenmaßnahmen erörtert, deren grundsätzliches Ziel die Erhaltung des Schichtkomplexes und damit der Senkung (Biegung) auf nachgiebiger Unterlage sein soll. Das Problem der Brückenbildung ist in seiner Erscheinungsform ein spezifisches, besitzt also lokale Bedeutung. Als Beispiel ist darum der Mansfelder Strebbau angeführt.

Die erörterten Modellvorstellungen und die Schlußfolgerungen, die aus den theoretischen Ergebnissen gezogen wurden, erlauben es, bei manchen Fragen eine umfassendere Erklärung zu finden, als sie bislang bekannt war; man denke hier besonders an Fragen wie Zusatzdruck und Druckverteilung im Versatz sowie an die Beziehungen zur Trogtheorie. Trotz dieser zweifellos vorhandenen Vorzüge sind Modell und Schlußfolgerungen kritikbedürftig.

Akzeptiert man zunächst die Vereinfachung, den Gebirgskörper in Dachschichten und Haupthangendes einzuteilen und diese Einteilung den Modellvorstellungen zugrunde zu legen, so sind folgende, in Hinblick auf die „Gebirgsmechanik beim Strebbau“ sicher noch wesentlichen Merkmale nicht berücksichtigt. (Die genannte Einteilung des Hangenden vereinfacht also das Problem der „komplexen Biegung“ [30], das durch das in der Tat vorhandene Schicht- bzw. Plattensystem gegeben und schwierig zu erfassen ist.)



1. Die Streblänge
2. Das Flözeinfallen
3. Die Verhiebsgeschwindigkeit
4. Das wirkliche Verformungsverhalten der Hangendschichten, das in praxi sicher nur selten linear-elastisch ist.

Somit stellen die hier behandelten Gedankenmodelle nur eine Näherung bzw. Grenz- oder Speziallösungen einer vielfältigeren Wirklichkeit dar. Die Berücksichtigung der Streblänge führt z. B. die Lösung der Aufgabenstellung von der Gleichung (2.1) auf die Gleichung (2.0) zurück, welche die erstgenannte als Grenzfall enthält; der angeführte Ansatz widerspricht also nicht diesen Bedingungen, sondern vereinfacht sie nur, greift einen markanten Fall aus vielen heraus.

Das gleiche gilt in Hinblick auf das Flözeinfallen (hier ist exakt der Spezialfall: Einfallswinkel gleich Null behandelt) und für die Verhiebsgeschwindigkeit, die praktisch als unendlich klein angenommen ist, so daß jeder Zwischenzustand sich voll auszubilden vermag. Entgegen den wirklichen „dynamischen Zwischenformen“ wird also immer der jeweilige Endzustand erreicht. In ähnlicher Form muß man schließlich über die Voraussetzung des linear-elastischen Verhaltens der Materialien urteilen.

Trotz der genannten Unvollkommenheiten spiegeln die gefundenen Ergebnisse — und das zeigt ihr Vergleich mit praktischen Messungen und Betriebsbeobachtungen — die bekannten wirklichen Vorgänge und Erscheinungen wider, und es erweisen sich damit die gewählten Voraussetzungen als durchaus sinnvoll, wenngleich sie unvollständig sind. Die Faktoren, die berücksichtigt werden (z. B.  $p_0$ ,  $v$ ,  $s$  usw.), müssen demnach wesentlich und allgemeingültig sein.

Die Grundfrage, die eingangs gestellt wurde, ob man die Senkungserscheinungen der Hangendschichten und die daraus abgeleiteten Druckwirkungen mit Hilfe der Biegetheorie der Mechanik interpretieren darf, ist somit positiv zu beantworten, unter Beachtung der erwähnten Unvollständigkeit, die ebenso eine Folge der für die darzustellende Aufgabe noch zu wenig entwickelten methodischen Hilfsmittel ist.

Abschließend sei Herrn Prof. Dr.-Ing. eh. K. KEGEL für seine Unterstützung bei der Anfertigung dieser Arbeit sowie Herrn Dr. rer. nat. G. KÄMMEL für wertvolle Hinweise und die Durchsicht der Rechnungen gedankt.

Während der Drucklegung dieser Arbeit fand im Oktober des vergangenen Jahres in Leipzig die Internationale Gebirgsdrucktagung 1958 statt. Im Zusammenhang mit den vorliegenden Rechnungen ist ein Vergleich mit den Darstellungen von VENTER und STASSEN [41] interessant. Vergleicht man die Fig. 1, 2, 3, 4 der genannten Arbeit mit den Ergebnissen der hier angestellten Rechnungen, so erkennt man in der Darstellung des Druckverlaufs Übereinstimmung: Es besteht eine Zusatzdruckzone an der Flözkante; der Druck im Versatz steigt nach dem Versatzfeld in jedem Falle allmählich bis zur Höhe des Überlagerungsdruckes; in einem Kohlenpfeiler ist die Konzentration der Spannungen angedeutet.



Berücksichtigt man, daß diese Ergebnisse für „weiches“ Nebengestein gelten sollen, an den Flözkanten also Plastizierung eintritt, durch die die elastischen Spannungsspitzen abgebaut werden müssen (vgl. Fußnote 13 dieser Arbeit und S. 59), so ist die erwähnte Analogie der Ergebnisse vollständig. Die Modellvorstellungen genügen hier zur Deutung dieser betrieblichen Erscheinungen.

## Literatur

- [1] WHETTON, J. T.: Allgemeiner Überblick über das Problem der Bodenabsenkungen. Leeds 1957, Vortrag Nr. 1.
- [2] PERZ, F.: Eine neue Betrachtungsweise über die Gesetzmäßigkeiten an Senkungsmulden über Abbauen. Leeds 1957, Vortrag Nr. 3.
- [3] KING, H. J., und WHETTON, J. T.: Die Mechanik der Bodenabsenkung. Leeds 1957, Vortrag Nr. 4.
- [4] TURNBULL, D., und POTTS, E. L. J.: Wechselbeziehungen zwischen den Senkungen über Tage und unter Tage. Leeds 1957, Vortrag Nr. 9.
- [5] WARDELL, K., und WEBSTER, N. E.: Einige Über-Tage-Beobachtungen und ihr Verhältnis zu Gebirgsbewegungen unter Tage. Leeds 1957, Vortrag Nr. 15.
- [6] HEISE-HERBST: Lehrbuch der Bergbaukunde (Bd. I), Berlin 1923, Julius Springer Verlag.
- [7] STÖCKE, K., HERRMANN, H., und UDLUFT, H.: Gebirgsdruck und Plattenstatik. Zeitschrift für Berg-, Hütten- und Salinenwesen 1934, S. 307—346 und S. 467—503.
- [8] KEGEL, K.: Bergmännische Gebirgsmechanik. Verlag von W. Knapp Halle, 1950.
- [9] LEHR, E., und SEIDL, K.: Modellversuche über Spannungsverteilung und Formänderung im Bergbau. (Teil 2: Modellversuche an Balken auf elastischer Unterlage zur Klärung der Spannungsverteilung im Hangenden von Abbauörtern.) Forschungsheft 372, Beilage zu „Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens“, Ausgabe B, Band 6, Mai/Juni 1935.
- [10] SALUSTOWICZ, A.: Contribution a l'étude des pressions des terrains en choueche exploitée par remblayage. Wydawnictwo, Zakładu Mechaniki Budowli politechniki Gdanskiej, Gdansk 1950.
- [11] SALUSTOWICZ, A.: Mechanika Górotworu. WGH, Stalinogród, 1955.
- [12] FILONENKO-BORODITSCH: Festigkeitslehre, Bd. II. VEB Verlag Technik, Berlin, 1954.
- [13] FÖPPL, A., und FÖPPL, L.: Drang und Zwang. Verlag Oldenbourg, 1924 (Bd. I).
- [14] WIEGHARDT: Über den Balken auf nachgiebiger Unterlage. Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik 1922, Heft 3.
- [15] NIEMCZYK, O.: Bergschadenkunde. Glückauf Verlag, Essen, 1949.
- [16] LIEBOLD, R.: Technische Schwingungslehre. 1. Lehrbrief, Bergakademie Freiberg, Fernstudium 1955.
- [17] SPACKELER, G.: Die sogenannte Druckwelle. Glückauf 64 (1928) S. 873—880. Glückauf 64 (1928) S. 909—916.
- [18] NIEMCZYK, O.: Die Dynamik der Spannungswelle. Glückauf 80 (1944) S. 105—111.
- [19] INNERLING, H.: Markscheiderische Feinmessungen zur Klärung von Gebirgsdruckfragen an Kohleinseln und Restpfeilern im oberschlesischen Steinkohlenbergbau. (Dissertation, Berlin, 1937.) Mitt. aus dem Markscheidewesen 1938, S. 1—33.
- [20] KAHLERT, O.: Abbaulenkung zur Vermeidung schädlichen Gebirgsdruckes mit Hilfe markscheiderischer Feinmessung. Dissertation, Berlin, 1943.
- [21] FLÄSCHENTRÄGER, H.: Betrachtungen zum Bodenbewegungsvorgang nach Beobachtungen im linksniederrheinischen Gebiet. Leeds 1957, Vortrag Nr. 7.
- [22] SPRUTH, F.: Streckenausbau in Stahl. Glückauf Verlag, Essen, 1955.
- [23] JACOBI, O., und BRÄNDLE, E.: Elektrische Feinmeßgeräte für die Gebirgsdruckforschung. Glückauf 92 (1956) S. 397—411. Vorrichtung zum Messen von Längenänderungen in Bohrlöchern. Glückauf 92 (1956) S. 412—414.
- [24] JACOBI, O.: Der Druck auf Flöz und Versatz. Internationale Tagung über Gebirgsdruckforschung Essen 1956.
- [25] KEIL, K.: Ingenieurgeologie und Geotechnik. VEB Wilhelm Knapp Verlag, Halle, 1954.
- [26] SPACKELER, G.: Grundsätzliche Probleme des Gebirgsdruckes. Freib. Forsch.-H. A 20, S. 5—17.
- [27] SCHULTE, H. F.: Ermittlung der Absenkung bei verschiedenen Versatzarten und flacher Lagerung und ihr Einfluß auf die hangenden Schichten. Leeds 1957, Vortrag Nr. 20.



- [28] PERZ, F.: Der Einfluß der Zeit auf die Bodenbewegung über Abbauen. Mitt. aus dem Markscheidewesen 1948, S. 92—117.
- [29] FREUDENTHAL, A.: Inelastisches Verhalten von Werkstoffen. VEB Verlag Technik, Berlin, 1955.
- [30] SEIDL, E.: Die Bedeutung technischer Bruchformen für den Steinkohlen-Bergbau. Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure 1931, Nr. 13, S. 373 ff.
- [31] GILLITZER, G.: Das Wesen des Gebirgsdruckes und dessen Ausnutzung beim Abbaubetriebe des Mansfelder Bergbaus. Glückauf 64 (1928) S. 977—987, S. 1010—1016.
- [32] HAACK, W.: Die Beherrschung des Gebirgsdruckes. Glückauf 64 (1928) S. 711—719.
- [33] ROS, M., und EICHINGER, A.: Die Bruchgefahr fester Körper. Zürich 1949, EMPA-Bericht Nr. 172.
- [34] KVAPIL, R.: Neue Ansichten in der Theorie des Gebirgsdruckes und der Gebirgsschläge. Praha 1957, Statní Nakladatelství Technické Literatury.
- [35] HOUWINK, R.: Elastizität, Plastizität und Struktur der Materie. Verlag Theodor Steinkopff Dresden und Leipzig 1957.
- [36] SCHULTZE, E., und MUHS, H.: Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten. Springer-Verlag 1950.
- [37] FÖPPL, L., und NEUBER, H.: Festigkeitslehre mittels Spannungsoptik. Verlag Oldenbourg, 1935.
- [38] HENN, W.: Grundlagen der Bauweisen. in Hütte III (Bautechnik) (1956) S. 304.
- [39] MESMER, G.: Spannungsoptik. Springer-Verlag, Berlin 1939.
- [40] CABOLET, P.: Erfahrungen beim Abbau mit Standholzpfählen im Bergbaurevier Bochum I. Glückauf 75 (1939) S. 2—13 und 46—52.
- [41] VENTER, J., und STASSEN, P.: Druck und Bewegungen im weichen Gestein. Internationale Gebirgsdrucktagung 1958 (Vorträge), Akademie-Verlag Berlin 1958, S. 67—73.



# FREIBERGER FORSCHUNGSHEFTE

Schriftenreihe für alle Gebiete der Montanwissenschaften

Reihe A Bergbau, Aufbereitung  
und Verwertung bergbaulicher Rohstoffe

✕ **A 55** Bergbau

Vorträge des VIII. Berg- und Hüttenmännischen Tages, 24. bis 26. Mai 1956  
Format 17×24 cm — 144 Seiten — 78 Bilder — 5 Tabellen — DM 11,—  
Erschienen Dezember 1956

EBERT: Die durch das Volkseigentum an den Mineralien und Bergbaubetrieben hervorgerufenen Änderungen des Bergrechts — LIEBOLD: Der aktivierte Kohlehobel — HOCHSTETTER: Ausbaufragen im Kohlenstreb — DIETZE: Anwendbarkeit des Strebbaues mit geraden Stößen und Entwicklungstendenzen bei der Mechanisierung im Streb im Mansfelder Kupferschieferbergbau — HALBICH: Entwicklung des Streckenvortriebes im Freiburger Erzbergbau — HÖFER: Betrachtungen über das drehende Bohren in Salzgesteinen — OTTO: Untersuchungen über die Frage, ob die Wechselstromzündung gegenüber der Gleichstrom- oder Zündmaschinenzündung in allen Fällen mit größerer Versagergefahr verbunden ist.

**A 60** Bergbau

Festschrift — Karl Kegel zu seinem 80. Geburtstag am 19. Mai 1956  
Format 17×24 cm — 240 Seiten — 114 Bilder — 47 Tabellen —  
Halbleinen DM 17,—, broschiert DM 15,—  
Erschienen Dezember 1957

OHNESORGE: Grundlagen zum Entwerfen und Berechnen der Abschlüge bei Streckenvortrieb — TEUFER: Einige grundsätzliche Gedanken zur Mechanisierung des Weichbraunkohlentiefbaus — HÄRTIG/MATSCHAK: Böschungsbewegungen im Lockergestein — RAMMLER: Zur Geschichte der Theorie der bindemittellosen Brikettierung von Braunkohle (Teil I) — WILSDORF: Zur Theorie und Praxis der Braunkohlenverwertung um 1800 — LÖSCHER: Zur Rechtsgeschichte des alten sächsischen Steinkohlenbergbaus.

**A 63** JOHANNES POSERN:

**Kritische Untersuchung der verschiedenen Methoden zur Isolationsüberwachung in Netzen bis 1000 Volt unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse für Bergwerke unter Tage**

Format 17×24 cm — 84 Seiten — 60 Bilder — 2 Tabellen — DM 11,—  
Nach einer kurzen Schilderung der Wirkungsweise des Schutzleitersystems als Schutzmaßnahme gegen zu hohe Berührungsspannungen nach VDE 0140 § 15 wird auf die verschiedenen Methoden zur Überwachung des Isolationswiderstandes unter Spannung stehender Netze eingegangen. Die bisher gebräuchlichen Verfahren — 3-Voltmeter-Methode, älteres Netzprüfgerät von Siemens, 2-Voltmeter-Methode, Isometer von Bender — benutzen die Verschiebung des Erdpotentials gegen den Mittelpunkt des Drehstromnetzes zur Anzeige des Isolationswiderstandes. Unter Anwendung der Rechnung mit komplexen Größen wird klargestellt, in welchem Umfange gleichgroße Widerstände zwischen den drei Leitern und Erde — auch kapazitiver Art, wie in Kabelnetzen — die Anzeige von Erdschlüssen in einem Leiter verfälschen. Somit sind alle, die Verschiebung des Erdpotentials benutzenden Methoden ganz unzuverlässig und damit unbrauchbar. — Dagegen wird nachgewiesen, daß die laufende Isolationsüberwachung an einfachen oder beliebig verketteten Wechselstromnetzen durch Überlagerung von Meßgleichstrom völlig einwandfreie Meßergebnisse liefert. Als Beispiele dafür werden das neue Netzprüfgerät von Siemens, das „Absolute Asymeter“ von Bender und ein vom Verfasser entwickeltes Gerät behandelt. Als Abschluß wird klargestellt, wann trotz hohem Ohmschen Isolationswiderstand die Berührung eines Leiters gefahrbringend ist und welche Beziehungen zwischen dem Widerstand des Schutzleitersystems und Erde, einem Einzelerdschluß, der keine Verbindung mit dem Schutzleitersystem hat, und der auftretenden Berührungsspannung am Schutzleitersystem bestehen.

A K A D E M I E - V E R L A G · B E R L I N

Bergakademie  
- Bucherei -  
Freiberg i. Sa.



# FREIBERGER FORSCHUNGSHEFTE

Schriftenreihe für alle Gebiete der Montanwissenschaften

## Reihe A Bergbau, Aufbereitung und Verwertung bergbaulicher Rohstoffe

### A 75 Markscheidewesen

Mitteilungen aus dem Institut für Markscheidewesen und Bergschadenkunde der Bergakademie Freiberg

Format 17×24 cm — 124 Seiten — 49 Bilder — 21 Tabellen — DM 14,—

NEUBERT/BERTHOLD: Die klassischen Verfahren der Massenaufmessung in Braunkohlentagebauen — NEUBERT: Gleichgewichtsstörungen im Gebirgskörper infolge Hohlraumbildung und Maßnahmen zur Lenkung der Auswirkung unter und über Tage.

Verschiedene Verfahren der Punktbestimmung und der Massenaufmessung. Massenberechnungsverfahren. Genauigkeitsbetrachtungen über Vorarbeiten, Punkt- und Massenfehler, Aufnahmeverfahren, Auswerteverfahren. Abbau-dynamische Messungen im Stein- und Braunkohlenbergbau. Unterbaute Quersläge. Zeitfaktor. Schutz der Schachtröhre. Zentralgelenkte Vorflutregulierungen. Planmäßiger Abbau unter großen Anlagen. Vorausberechnungsmethoden.

### A 81 BRENNSTOFFTECHNISCHE GESELLSCHAFT IN DER DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK

2. Tiefbautechnisches Kolloquium, 25. April 1957 in Zwickau

Format 17×24 cm — 92 Seiten — 30 Bilder — 8 Tabellen — DM 8,—

BLÜHER: Stand der geologischen Untersuchungen im Zwischengebiet Zwickau-Oelsnitz — LÖWE: Die Betriebsstatistik als Mittel für die Planung, Kontrolle und Abrechnung des Volkswirtschaftsplanes im Steinkohlenbergbau der Deutschen Demokratischen Republik — EILHAUER: Die Möglichkeiten der Automatisierung im Steinkohlenbergbau — SÜSS: Gedanken zur Vorratsberechnung im Steinkohlenbergbau

### A 84 Bergbau

Vorträge des IX. Berg- und Hüttenmännischen Tages, 13. bis 15. Juni 1957

Format 17×24 cm — 144 Seiten — 99 Bilder — 8 Tabellen — DM 12,50

MACZYNSKI: Wärmeeffekte in Grubenbewetterungsnetzen — BOLDIZSÁR: Lösung einiger Probleme der Wetterkühlung tiefer Gruben — BRÜCKNER: Entwicklungsstand von Mechanisierungsgeräten für den Kupferschieferbergbau — POPOWICZ: Versuchsergebnisse mit dem aktivierten Kohleschrämhobel — SEIDELBACH: Die bergmännische und maschinelle Entwicklung des Kurzstrebbruchbaues und einer Streckenvortriebsmaschine in der Grube „Kurt“ des VEB Kombinat Gölzau — PETUCHOW: Anwendungen der Dehnungsmessung — WELTSCHJEFF: Ausbau von Abbaustrecken mit Stahlbetonrahmen — GORBATSCHOW: Die wesentlichsten Richtungen in der Vervollkommnung der Methoden des Abbaus mächtiger Kohlenflöze im Kusnezker Kohlenbecken

A K A D E M I E - V E R L A G · B E R L I N



# FREIBERGER FORSCHUNGSHEFTE

Schriftenreihe für alle Gebiete der Montanwissenschaften

## Reihe A Bergbau, Aufbereitung und Verwertung bergbaulicher Rohstoffe

### **A 86** Markscheidewesen

Vorträge des IX. Berg- und Hüttenmännischen Tages, 13. bis 15. Juni 1957  
in Freiberg

Format 17×24 cm — 120 Seiten — 124 Bilder — 8 Tabellen — DM 9,—

TARCZY-HORNOCH: Einheitliche Herleitung der geodätischen Winkelprismen — SCHWARTZ: Einfluß eines Abbaus auf ein darüber und darunter liegendes Flöz und optimaler Abstand zwischen zwei Abbaufrenten in zwei Flözen — SMOLARSKI: Steilgelagerte Flöze vom Standpunkt der Verschiebungstheorie von stochastischen Medien — SALUSTOWICZ: Horizontale Verschiebungen und Deformationen des Gebirges als Funktion der Zeit — NEUBERT: Beitrag zur Vorausberechnung von Bodenbewegungen — MÜLLER: Ein Beitrag zur markscheiderischen Erfassung großer Hohlräume — RÜGER: Die Verwendung von Tripelspiegeln als Zielzeichen für markscheiderische Messungen — MARTOS: Richtlinien zur Erforschung der Gesetzmäßigkeiten von Bodenbewegungen.

### **A 88** Kalibergbau und Salzgeologie

Vorträge des IX. Berg- und Hüttenmännischen Tages, 13. bis 15. Juni 1957

Format 17×24 cm — 111 Seiten — 47 Bilder — 2 Tabellen — DM 9,—

Erschienen März 1958

RÖDIGER: Wirtschaftliche Bedeutung der Kalindustrie in der Deutschen Demokratischen Republik — JENDERSIE: Neue Probleme der Kalisalzverarbeitung und Folgerung für Bergbau und Aufbereitung — STOLLE: Die Laugen- gefahr im Südharz-Kalibergbau — NEUBER: Mechanisierungsbestrebungen im Kalibergbau — PFEIFFER: Zerspannungsmessungen an Streckenvortriebsma- schinen im Kalibergbau — UHLMANN: Druckakustische Untersuchungen zur Sondierung der Spannungsverhältnisse an Pfeilern im Kali- und Steinsalzberg- bau (Auszug) — WERNER: Die Zechstein-Salzlagerstätten in Mittelpolen (Ku- javien) — HERRMANN: Vorkommen und Verteilung einiger Metallspuren- elemente innerhalb der Staßfurtserie des Südharzbezirkes (Auszug) — MARR: Die Bildung des Staßfurt-Flözes unter Berücksichtigung geochemischer Unter- suchungen — JUNGHANS: Die Bewährung neuartiger Kohlensäuresperren im Werra-Kalibergbau — GERLACH: Entwicklung von Schnellfrequenzbohrma- schinen für den Kalibergbau.

### **A 89** Grubensicherheit

Vorträge des IX. Berg- und Hüttenmännischen Tages, 13. bis 15. Juni 1957

Format 17×24 cm — 68 Seiten — 17 Bilder — 14 Tabellen — DM 6,—

CORDES: Beitrag zur Verhütung der Lochfraß-Korrosion in leichten Sauer- stoff-Stahlflaschen — JUNG: Maßnahmen zur Bekämpfung der Schießschwaden — GÜNTHER: Untersuchungen zur Plastizität wasserbenetzter Salzkri- stalle (Auszug) — JETSCHWA: Untersuchungen über die Giftigkeit von Schießschwaden bei der Detonation von Sprengstoffen im bulgarischen Bergbau

A K A D E M I E - V E R L A G · B E R L I N











✓  
Günther Seldner  
Freiberg i. Sa.  
1848

Bücherei  
• Bergakademie •  
Freiberg i. Sa.



