

Die Ursachen von Gasausbrüchen in Steinkohlengruben.

Von Prof. Dr. Dr.-Ing. E. h. OTTO RUFF, Technische Hochschule Breslau.

(Eingeg. 14. Oktober 1930.)

Inhalt: I A. Form des Vorkommens der Kohlensäure und des Grubengases in den Steinkohlen. I B. Verteilung der Kohlensäure in den Flözen nach Druck und Menge. I C. Zeitpunkt und Entstehungsart der ausbruchgefährlichen Kohlen und Ursachen des Ausbruches. II. Löslichkeit von Grubengas in den Steinkohlen und Folgerungen daraus.

Die zahlreichen und oft gefährlichen Ausbrüche von Kohlensäure in den niederschlesischen Steinkohlengruben haben den preußischen Minister für Handel und Gewerbe im Jahre 1921 zur Bildung eines Ausschusses zur Erforschung der Kohlensäureausbrüche in Niederschlesien veranlaßt. An den Arbeiten dieses Ausschusses war der Verfasser beteiligt. Ihm lag es ob, die chemischen und physikalischen Vorgänge bei diesen Ausbrüchen zu untersuchen.

1.

Die Unsicherheit, welche trotz der umfangreichen Tätigkeit der verschiedenen Untersuchungsausschüsse bezüglich der Ursachen der Gasausbrüche auch heute noch besteht, rechtfertigt eine kritische Sichtung des gesamten Beobachtungs- und Gedankenstoffs derart, daß erkennbar wird, was von diesem erwiesen, wahrscheinlich und möglich ist. Dabei mögen Schlüsse als bewiesen gelten, wenn sie auf exakte Messungen oder einen lückenlosen Indizienbeweis gestützt sind, und als wahrscheinlich, wenn ihnen lediglich qualitative Beobachtungen zugrunde liegen, sie aber in jeder Hinsicht den Tatsachen gerecht werden; nur möglich sind sie, solange sie dem Stand der wissenschaftlichen Erkenntnis nicht widersprechen. Bei dieser Sichtung sollen die Kohlensäureausbrüche¹⁾ bevorzugt behandelt werden (Abschnitt I); Grubengasausbrüche aber nur insoweit, als das vorhandene Beobachtungsmaterial zu einem Vergleich herausfordert (Abschnitt II). Das den Ausführungen zugrunde liegende Wissen stammt in erster Linie aus den Arbeiten des eingangs erwähnten Ausschusses; dann aber beruht es auch auf eigenen Beobachtungen, welche ebenso wie diejenigen des Ausschusses in der „Zeitschrift für Berg-, Hütten- und Salinenwesen im preußischen Staat“ 1927 und 1930 veröffentlicht worden sind²⁾. Einzelheiten zu dem hier Vorgebrachten mögen diesen Veröffentlichungen entnommen werden.

I. Abschnitt. Kohlensäureausbrüche.

2.

A. Die Art der Kohlensäureaufnahme im Flöz.

Die Kohlensäure wird von Steinkohlen, ganz gleich welcher Herkunft, gelöst³⁾, ähnlich wie vom Wasser. Der Lösungsvorgang ist dadurch gekennzeichnet, daß sich die einzelnen Moleküle des Gases an einzelne Moleküle des Lösungsmittels durch und durch in gleichmäßiger Verteilung anlagern, und zwar in einer Menge, die vom Druck abhängig ist, unter dem das Gas über oder neben der Lösung steht. Die Kräfte, welche die Bindung er-

¹⁾ Der Ausdruck „Kohlensäureausbrüche“ entspricht bergbaulichem Gebrauch. In Wirklichkeit handelt es sich stets um Kohlendioxydausbrüche.

²⁾ Ztschr. f. Berg-, Hütten- u. Salinenwesen im preuß. Staat 75, 1–131 [1927] — weiterhin in dieser Abhandlung als Niederschlesischer Ausschußbericht = „Ndschl. A.-B. 1927“ bezeichnet — dann ebenda 78, S. B. 22–32 [1930].

³⁾ Die von Potonié in dieser Ztschr. 48, 768 [1930], geäußerte Ansicht, daß die Kohlensäure sich lediglich in Hohlräumen, so insbesondere auf feinsten Klüften der Kohlen finde, ist ihrer unzureichenden Begründung wegen längst aufgegeben; sie ist auch mit den Feststellungen in diesem Abschnitt A unvereinbar.

halten, sind dieselben, welche auch die Moleküle des Lösungsmittels zusammenhalten und die sogenannte Adsorption an den freien Oberflächen fester Stoffe veranlassen — die sogenannten van der Waalschen Kräfte. Von der Adsorption ist der Lösevorgang insofern verschieden, als die Adsorption auf die frei dastehende Oberfläche beschränkt bleibt und darum größere Werte nur bei sehr großer Oberflächenentwicklung erreichen kann. Die Menge der bei einem bestimmten Druck aufgenommenen Kohlensäure hat sich bei den Steinkohlen als weitgehend unabhängig von der Korngröße (d. h. Oberflächenentwicklung) und chemischen Beschaffenheit der Kohlen erwiesen. Stark beeinflußt wird durch die Korngröße nur die Geschwindigkeit der Gasaufnahme und -abgabe.

3.

Die Bestimmung der Löslichkeit der Kohlensäure in Steinkohlen hat insofern einige Schwierigkeiten gemacht, als sie die Kenntnis zuverlässiger Zahlen über das spezifische Gewicht hohlräumfreier Kohlen zur Voraussetzung hatte; denn bei allen derartigen Messungen hat man mit einem gewissen Hohlraum in und neben der Kohle zu rechnen, dessen Bestimmung nur möglich ist, wenn eben das spezifische Gewicht der hohlräumfreien Kohle genau bekannt ist. Wir haben dieses spezifische Gewicht für eine bestimmte Kohle der Rubengrube nach drei verschiedenen Verfahren übereinstimmend zu 1,44 gefunden: Die anderen Kohlen ergaben dann ebenso zuverlässige Werte zwischen 1,33 und 1,49. Mit Hilfe dieser Zahlen ließ sich das Volum der hohlräumfreien Kohlen berechnen. Wurde ein bestimmtes Volum der Kohle dann in einem geeigneten Gefäß bei einem bestimmten Druck mit Kohlensäure gesättigt und die Menge des dafür nötigen Gases bestimmt, so waren alle Unterlagen zur Berechnung der Löslichkeit gegeben, wenn man annahm, daß die innerhalb und außerhalb der Kohlen im Meßgefäß usf. vorhandenen Hohlräume entsprechend den für das Gas geltenden v-p-Gesetzen mit CO₂ erfüllt waren.

Es sind folgende Kohlen untersucht worden:

- | | |
|---|--|
| 1. Rubengrube, Röschenflöz,
4. Sohle, Bohrlochmehl, sehr
starke Entgasung, bisher
kein Ausbruch.
2. Rubengrube, Antonflöz,
4. Sohle, kohlensäurerreich,
ausbruchgefährlich.
3. Wenceslausgr., 3. Wilhelmfl.,
weich, 90% CO ₂ , ausbruch-
gefährlich.
4. Wenceslausgr., 3. Wilhelmfl.,
fest, 90% CO ₂ , ausbruch-
gefährlich.
5. Wenceslausgr., 5. Wilhelmfl.,
fest, 90% CO ₂ , ausbruch-
gefährlich.
6. Wenceslausgr., Wenceslausfl.,
weich, 10% CO ₂ , nicht aus-
bruchgefährlich. | 7. Wenceslausgr., Wenceslaus-
flöz, fest, 10% CO ₂ , nicht
ausbruchgefährlich.
8. Grube Ludwigs-Glück, O.-S.,
feste Glanzkohle, gepulvert.
9. Grube Ludwigs-Glück, O.-S.,
feste Glanzkohle, in Stücken.
10. Wenceslausgrube,
Fusit aus verschiedenen
Flözen.
11. Rubengrube,
bei Ausbruch ausgeworfe-
ner Kohlenstaub.
12. Verein Glückhilf-Friedens-
hoffnungsgr., Ndr.-Herms-
dorf, 18. Flöz, 7. Sohle,
Wrangelschachtanlage. |
|---|--|

Die ermittelten Zahlen⁴⁾ sind zur Zeichnung der bei stehenden Kurvenzüge mit eingeklammerten Nummern

⁴⁾ Bezuglich aller Einzelheiten s. den Ndschl. A.-B. 1927, S. 54 ff.

verwendet worden (Abb. 1). Die Kurvenzüge mit offenen Nummern kennzeichnen das Aufnahmevermögen derselben Kohlen im Flözverband, dessen Berechnung unter der durch mancherlei Versuche gestützten Voraussetzung geschah, daß das spezifische Gewicht der Kohlen im Flözverband etwa 1,25 beträgt.

Die Kurven zeigen, wie stark das Lösevermögen der durch die beistehenden Nummern gekennzeichneten Kohlen vom Druck abhängig ist, und wie viele Kubik-

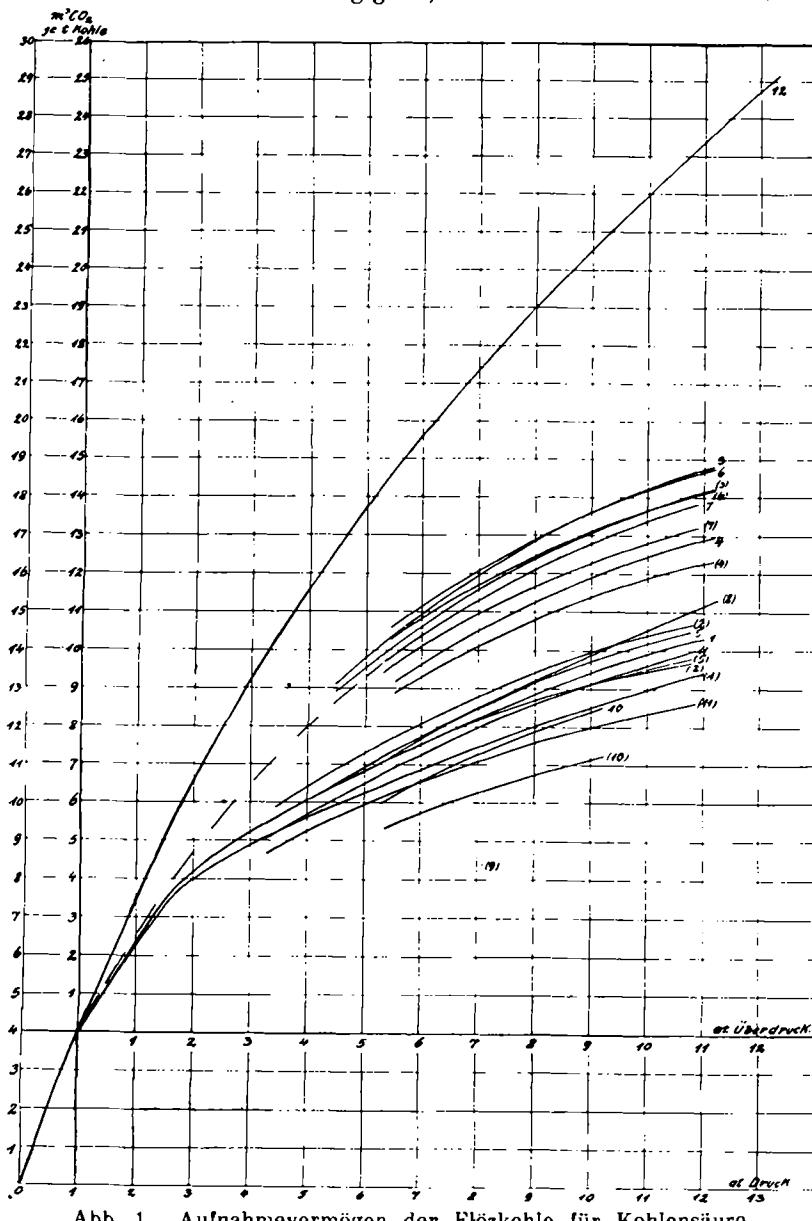


Abb. 1. Aufnahmevermögen der Flöz Kohle für Kohlensäure.

meter CO_2 je Tonne jede einzelne Kohle für sich allein, d. h. hohlräumfrei (eingeklammerte Nummern), und wie viele sie im Flözverband aufnehmen kann (offene Nummern). Nur die Kurve der Ausbruchskohle Nr. 12 aus der Glückhilf-Friedenshoffnung-Grube hat eine etwas andere Bedeutung. Bei ihr ist das Lösevermögen nicht wie bei den übrigen auf die aus dem Flöz gekommene Kohle bezogen, sondern auf deren mineralstofffreie Kohlesubstanz (s. u.); sie hatte einen Mineralstoffgehalt von 19,6%. Durch eine Erweiterung des Koordinatensystems haben wir in unserer Abbildung auch denjenigen Kohlensäuremengen Rechnung getragen, welche bis zu Atmosphärendruck von den Kohlen aufgenommen werden (etwa 4 m^3 je Tonne Kohle); es sind außerhalb des für Überdrücke gezeichneten Koordinatennetzes auch die für den Gesamtdruck maßgeblichen Zahlen eingetragen worden.

Nach dem Gasausbruch auf der Wrangelschachtanlage am 13. September 1928 haben wir die der Abb. 1 zugrunde liegenden Messungen zum Teil wiederholt, zum Teil erweitert — indem wir für Grob- und Feinkorn der Kohlen das Aufnahmevermögen getrennt bestimmten, von allen Kohlen genaue Analysen anfertigten und damit nun auch in der Lage waren, das CO_2 -Aufnahmevermögen für die mineralstofffreie Kohlesubstanz zu berechnen. Die so gewonnenen Zahlen finden sich in der Tafel 4 auf S. B. 27 der Ztschr. f. Berg-, Hütten- und Salinenwesen, 1930, zusammengestellt. Sie beweisen die Zuverlässigkeit der älteren Messungen, zeigen aber zugleich an den Kohlen der Glückhilf-Friedenshoffnung-Grube, daß das Lösevermögen für CO_2 wesentlich größer sein kann, als wir früher angenommen hatten — ohne daß damit auch die Ausbruchsgefährlichkeit der Kohlen erhöht wird —, und daß bei verschiedenen Teilen eines und desselben Flözes das Lösevermögen ziemlich verschieden sein kann. Nachdem mehrfach der Gedanke erörtert worden ist, daß die Kohlensäure in den Steinkohlen ähnlich wie in den aktiven Kohlen oberflächlich gebunden, also nur entsprechend der Oberflächenentwicklung der Kohlen vorhanden sein könnte, haben wir auch in dieser Richtung Versuche gemacht. Wir konnten an den untersuchten Kohlen aber keines der Kennzeichen einer wirklich aktiven Kohle finden⁵⁾, abgesehen davon, daß die Kohlensäureführung nicht bloß in glanzlosen, mulmigen, sondern auch in dichten, glänzenden — also sicher nicht weitgehend zerteilten Kohlen festgestellt ist.

4.

Nach allen Beobachtungen über das Aufnahmevermögen der Steinkohlen für CO_2 , darf nunmehr folgendes als erwiesen gelten.

- Das Aufnahmevermögen für CO_2 ist bei verschiedenen Steinkohlen zwar verschieden, aber seiner Größenordnung nach immer ausreichend, um die bei den Ausbrüchen auftretenden Gasmengen und -drücke zu liefern. Je Tonne Kohlesubstanz wurden als Grenzwerte bei 1 at Überdruck $2,0$ bis $3,6 \text{ m}^3$ und bei 10 at $8,5$ bis $22,5 \text{ m}^3$ gelöster CO_2 gefunden.
- Unterschiede des Aufnahmevermögens der Kohlesubstanz sind bei ein und derselben Kohle für Grob- und Feinkorn mit Sicherheit kaum festzustellen; wohl aber sind kleinere Unterschiede in verschiedenen Teilen eines und desselben Flözes und größere, aber innerhalb obiger Grenzen gelegene, bei Kohlen aus verschiedenen Flözen zu finden.
- Die Verschiedenheit der Kohlesubstanz wirkt sich vor allem in der Weise aus, daß die Zunahme des Aufnahmevermögens für CO_2 mit dem Druck eine verschiedene ist. Der Mineralstoffgehalt der Kohlen ist für die Unterschiede des Aufnahmevermögens nur von untergeordneter Bedeutung.
- Für die Ausbruchgefährlichkeit der CO_2 -führenden Kohlen sind die Unterschiede im Aufnahmevermögen gleichfalls nicht wesentlich. (Man vergleiche z. B. die gleich ausbruchgefährlichen

⁵⁾ Ndschl. A.-B. 1927, S. 58 ff.

Kohlen 8 und 12 in Abb. 1.) Daraus ergibt sich als wahrscheinlich: Die Gefährlichkeit ist weniger an die chemischen, als an die strukturellen Verschiedenheiten der Kohlen gebunden.

B) Die Verteilung der Kohlensäure in Kohleflözen nach Druck und Menge.

5.

Wo sich CO_2 -reiche Flöze finden, ist auch das Vorhandensein vulkanischer Störungszonen erwiesen. In einer und derselben Grube einer solchen Zone können sich an Kohlensäure reiche und arme Flöze finden, über- und untereinander; die Kohlensäureführung ist gewöhnlich an durchlässige Gesteishorizonte (Sandstein, Konglomerate) im Hangenden oder Liegenden gebunden, während die CO_2 -armen Flöze durch dichtere Horizonte (z. B. Schieferton) gegen das Eindringen von CO_2 geschützt sind. Aus diesem Tatsachenkomplex wird geschlossen, daß die CO_2 -reichen Flöze ihre CO_2 von außen erhalten haben, und zwar in flächenhaft ausgebreiteter Form beim Vorhandensein durchlässiger, CO_2 -führender Gesteishorizonte im Hangenden oder Liegenden, in linienhafter Form aus CO_2 -führenden, ins Flöz mündenden Klüften. In Wirklichkeit lassen sich diese beiden Formen von CO_2 -Führung in Flözen nur in großen Zügen auseinanderhalten. Die CO_2 -Führung läßt sich in einem Flöz gewöhnlich weithin verfolgen, ohne daß man über die Höhe des CO_2 -Gehaltes der einzelnen Flözabschnitte genauere Angaben machen könnte; denn die immer wieder festzustellenden Unterschiede in der Geschwindigkeit der Entgasung dieser Abschnitte kennzeichnen nicht auch solche des Gasgehalts der Kohlen im unverwitterten Flöz. Für die Geschwindigkeit der Entgasung der Ortsstöße sind die Struktur und Abbauverhältnisse maßgebender als der Gasgehalt. Eine von Schlechten usw. durchzogene magere Kohle entgast leichter als eine dichte, fette Kohle, ebenso eine beim Abbau schiefrig und bröckelig werdende Kohle stärker als eine dem Abbaudruck ausweichende, weiche, mulmige und evtl. selbst zerreibbare Kohle. Die Verteilung der Kohlensäure im Flöz läßt sich deshalb nur auf Grund von Analogieschlüssen beurteilen. Deren Grundlage müssen vor allem die im Flöz herrschenden Drucke liefern.

6.

Kohlensäuredrucke im Flöz: Direkte Messungen dieser Drucke haben in Schlesien bis zu etwa 2 m vom Ort stets weniger als 1 at Überdruck ergeben. Derart gemessene Drucke sind aber für das unverwitterte Flöz natürlich nur Minimalwerte. Das Zuquellen von Bohrlöchern, Vorschieben freigelegter Stöße oder der Wandungen von Ausbruchhohlräumen^{a)} beweisen, daß der Abbau auf viele Meter hinter dem Ortsstoß hin im CO_2 -führenden Flöz Gefügeveränderungen veranlaßt, welche die Entgasung erleichtern und nur einen Teil des Druckgefäßes vom Flözinnern nach dem Ort hin zu messen gestatten. In dem Bericht des französischen Ausschusses zur Erforschung von Gasausbrüchen^{b)} werden für das Flöz Chauffournoise in l'Aggrappe in Belgien 2–3 at Gasdruck angegeben. Es ist, allerdings ohne nähere Angaben, aber auch von 25–30 at als den größten Gasdrucken die Rede (bei 3–12 m Tiefe) nach S. 87 des Ndschl. A.-B. I. Mit Drucken von 2,5 at und mehr in 7 m tiefen Bohrlöchern wird in Ungarn gerechnet^{c)}.

^{a)} Siehe z. B. Ndschl. A.-B. 1927, S. 84.

^{b)} Reichskohlenrat-Tagebuch Nr. 171, 7. 30, S. 9. Weiterhin als franz. A.-B. bezeichnet.

^{c)} Auf etwa 2–3 at schätzt auch Kindermann solche Drucke im Ndschl. A.-B. I., S. 86.

Ein zuverlässigeres Bild von diesen Drucken bekommt man, wenn die Mengen der bei Ausbrüchen ausgeworfenen Kohlen in Beziehung zu den gleichzeitig entwickelten Gasmengen gesetzt und zu diesen Gasmengen auf Grund des Aufnahmevermögens der Kohlen die zugeordneten Drücke ermittelt werden. Freilich ist man auch bei dieser Art des Vorgehens auf die Verwertung einiger nur roh geschätzter Zahlen angewiesen; aber sie reichen aus, um wenigstens die Größenordnung der in Frage stehenden Drucke zuverlässig zu bestimmen.

Eine Tabelle über das Verhältnis von Kohlensäurevolumen und Auswurfsmassen bei verschiedenen Ausbrüchen findet sich im Ndschl. A.-B. S. 84 und S. 49 – und ebenda wird auch eine kritische Bewertung der Zahlen gegeben; die Kritik findet eine Ergänzung im franz. A.-B. auf S. 10. Von allen diesen und auch anderen bekanntgewordenen Zahlen lassen sich nach diesen Kritiken nur wenige benutzen. Diese führen für drei schlesische Ausbrüche zu einem Wert von 4,5 bis höchstens 9,6 m³ CO_2 je Tonne ausgebrochener Kohle. 4 bis 6 m³ je Tonne Kohle sind auch bei dem letzten großen Ausbruch vom 9. Juli 1930 im Wenceslausflöz der Wenceslausgrube entwickelt worden, welcher 150 Bergleute getötet hat. (Ausgebrochen etwa 5000 t Kohlen nebst 20–30 000 m³ Gas, d. h. 4–6 m³ je Tonne; 4–6 m³ entsprechen auf unserem Kurvenzug 7 [Abb. 1], welcher von der etwa gleichen Kohle stammt, etwas mehr, 1,6–2,6 at.) 2–3 at Druck sind bei kleinerem Grubenraum und größeren Ausbrüchen auch schon bei den Schiebtüren gemessen worden, so z. B. 2 at beim Ausbruch vom 20. Oktober 1927 im Kurtschacht (der Druck von 2 at blieb hier acht Stunden erhalten) und fast 3 at ebenda bei dem Ausbruch vom 16. August 1927. Danach kann ein Druck von 2–3 at CO_2 in den in den letzten Jahren ausgebrochenen Teilen der Neuroder Flöze als erwiesen gelten. Der Druck in den stehengebliebenen Flözteilen aber war, jedenfalls in der Nähe der ausgebrochenen Teile und bei unverletztem Zustand, derselbe; denn die Durchlässigkeit der Kohlen für CO_2 ist groß genug, um einen Druckausgleich auf weite Strecken hin sicherzustellen.

7.

Der Druckausgleich im Flöz: Zur Beurteilung dieses verfügen wir zwar nur über das Ergebnis eines einzigen und dazu noch etwas primitiven Versuchs; aber es reicht für unseren Zweck aus.

Es wurden nußgroße, d. h. 1–2 cm dicke Stückchen aus dichter oberschlesischer Kohle in ein Druckgefäß gegeben, unter 10,4 at CO_2 -Druck gesetzt und dann sich selbst überlassen. Der Druck fiel im Verlaufe von 4 Tagen auf 7,5 und von 5 Tagen auf 7,25 at. Die Kohle hatte in dieser Zeit 4,4 l CO_2 je Kilogramm aufgenommen, d. h. etwa die Hälfte derjenigen Menge, welche feinstgepulverte gleicher Art bei 7,45 at zu binden vermag.

Wenn nußgroße Stücke von 1–2 cm Durchmesser einer besonders dichten Kohle im Verlaufe von fünf Tagen bis zur Hälfte derjenigen CO_2 -Menge aufnehmen, die sie zu ihrer völligen Sättigung nötig hat, so können die einzelnen Teile eines Jahrhunderte hindurch mit einer CO_2 -Quelle in Berührung stehenden Flözes über einige Meter weg keine wesentlichen Druckunterschiede haben; insbesondere kann der verhältnismäßig kleine Bereich eines ausbrechenden Flözteiles seiner Umgebung gegenüber solche Druckunterschiede nicht besitzen. Daraus folgt, daß der CO_2 -Druck im unverwitterten Flöz auf weite Strecken hin den gleichen Wert besitzt, und das gleiche gilt für den CO_2 -Gehalt im unverwitterten Flöz; denn der Gehalt ist durch das Lösevermögen der Kohle

und den Gasdruck festgelegt. Das Lösevermögen ändert sich innerhalb eines Flözes nur wenig; gleicher Gasdruck bedingt darum auch ähnlichen Gasgehalt.

Der oben ermittelte Druck von 2–3 at in den Neuroder Flözen ist seiner Bestimmungsform nach ein Minimalwert. Um wieviel er sich mit dem Fortschreiten vom Ort nach immer tiefer liegenden Flözteilen ändert, läßt sich nicht einmal schätzen. Der in der Literatur vorhandene Zahlenstoff ist zu unsicher, als daß er auch nur zur Beantwortung der anderen Frage reichte, ob in Flözen gelegentlich noch wesentlich höhere CO₂-Drucke wie z. B. 10–15 at oder gar 25–30 at (s. o.) auftreten. Solange die Unzuverlässigkeit solcher Zahlen aber nicht sicher behoben ist, muß die Möglichkeit des Bestehens solcher Drucke in tieferen Flözlagen selbst in den Neuroder Flözen im Auge behalten werden.

Unterschiede des Drucks und damit auch des Gehalts an CO₂, können sich auf kürzere Entfernungen im Flöz nur als Folgen des Abbaus einstellen. Am Ort herrscht der CO₂-Druck Null, weil die frischen Wetter alle austretende CO₂, mitnehmen. Hier muß die anstehende Kohle entgasen, und zwar um so schneller, je durchlässiger sie ist und je größer in ihr das Druckgefälle nach dem Ort hin ist. Vom Ort weg in das Flöz hinein steigt der Druck an bis zu demjenigen Betrag, der — wie oben ausgeführt — dem unverritzten Flöz eigentlich ist. Der Anstieg bis dahin braucht nicht gleichmäßig zu erfolgen; vielmehr hängt er von der Verteilungsgeschwindigkeit der CO₂ in den einzelnen Teilen des unter dem Abbau leidenden Flözes ab. In den ausbrechenden Flözteilen, die wir weiterhin als Kohlensäurenester bezeichnen wollen, muß diese Durchlässigkeit besonders groß sein aus folgenden Gründen:

8.

Die Kohlensäurenester: Die chemische Beschaffenheit der ausgebrochenen Kohle ist — wie immer wieder festgestellt worden ist — von derjenigen der im Ausbruchsraum zurückgebliebenen nicht wesentlich verschieden. Dementsprechend ist auch das Lösevermögen der Kohlen für CO₂, innerhalb und außerhalb des Nests das gleiche, und praktisch das gleiche gilt auch für den CO₂-Gehalt. Das verschiedene Verhalten beim Ausbruch kann also nur durch Verschiedenheiten der Struktur veranlaßt sein — und zwar solchen, welche die Geschwindigkeit der Entgasung bestimmen. Ein derartiger Strukturunterschied ist der Zerteilungsgrad der Kohlen, d. h. der Grad der durch die Bildung von Spaltflächen gekennzeichneten Auflockerung des Gefüges, die bis zur Auflösung in die allerfeinsten Gefügeelemente fortschreiten kann.

Ein wohl noch verbesserungsfähiges Bild von diesem Zusammenhang zwischen Verteilungsgrad und Entgasungsgeschwindigkeit geben unsere Versuche mit größeren Kohlestückchen und feinpulverigen Kohlen, über die wir im Ndschl. A.-B. S. 62 berichtet haben. Es zeigte sich, daß stückige Kohle viele Stunden lang entgast, während die Entgasung pulvriger Kohlen schon in wenigen Minuten praktisch beendet ist.

Auch bei den erwähnten Versuchen mit den nußgroßen Stückchen oberschlesischer Kohle (s. 7) haben wir feststellen können, daß die Entgasungsgeschwindigkeit verhältnismäßig klein war; sie reichte nicht aus, um die Kohlestückchen in ihre Gefügeelemente aufzulösen, obwohl die gelöste CO₂ hier mindestens in den oberen Schichten der Stückchen unter einem Druck von etwa 7 at gestanden hatte, gegenüber etwa 3 at bei den Aus-

brüchen der Neuroder Kohle (s. o.). Der bei den Ausbrüchen gewöhnlich in großer Menge auftretende Staub kann deshalb nicht als die Folge einer zerblasenden Wirkung der entweichenden CO₂ angesehen werden, sondern muß als solcher schon vorher das Nest erfüllt haben⁹⁾.

Der Indizienbeweis erscheint lückenlos geschlossen, daß die Nestkohle ihrer Umgebung gegenüber im Augenblick des Ausbruchs nur durch einen lockeren Zusammenhang und in der Folge davon eine größere Entgasungsgeschwindigkeit gekennzeichnet ist (s. dazu auch Abschnitt C).

Die Verteilung des Drucks und damit auch des Gehalts an CO₂ zwischen Flöz, Nestkohle und Ortsstoß zeigt schematisch die bestehende Kurve. Sie fällt erst mehr oder weniger vom Flöz nach dem Nest hin, hält sich im Nest auf etwa gleicher Höhe, weil hier der Druckausgleich mit großer Geschwindigkeit möglich ist, und fällt dann erneut nach dem Ort hin bis Null¹⁰⁾.

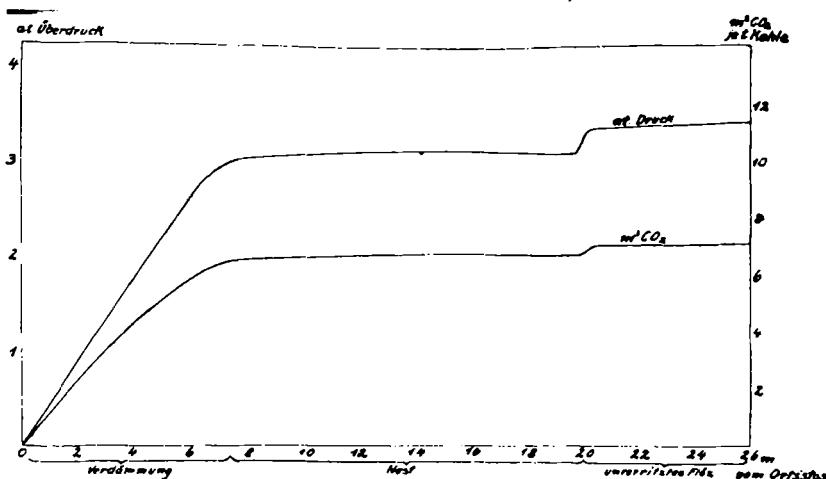


Abb. 2.
Kohlensäureüberdruck und Kohlensäuremenge je m³ Flözkohle.

Den Flözteil, in dem das rasche Absinken des Drucks statthat, nennen wir die Verdämmung des Nests; sie ist identisch mit dem Ortsstoß. Erst der Bruch der Verdämmung gibt Kohle und Kohlensäure im Nest frei. Je fester und dichter die Verdämmung ist, um so steiler kann das Druckgefälle vom Nest zum Ort hin sein. Je durchlässiger die Verdämmung ist, um so länger muß sie sein, damit der Druck im Nest erhalten bleibt, der nur durch das Nachdiffundieren von CO₂ aus dem unverritzten Flöz aufrechterhalten werden kann. Um so steiler ist dann aber auch das Druckgefälle vom unverritzten Flöz zum Nest.

Auch bezüglich der hier skizzierten Beschaffenheit des CO₂-Nestes vor dem Ausbruch ist der Indizienbeweis lückenlos. Meinungsverschiedenheiten können nur noch bezüglich des Zeitpunktes und der Art der Entstehung sowie der Ursachen des Ausbruchs bestehen.

⁹⁾ Der Schluß, daß der Staub nicht eine Folge, sondern eine Ursache der Ausbrüche ist, findet sich auch schon in dem Aufsatz von Henry Briggs, Coal Age 1921, S. 209.

¹⁰⁾ In meiner ersten Abhandlung zu dem Gegenstand habe ich neben diesem Fall auch noch den anderen behandelt, daß das Nest durch einen der Umgebung gegenüber besonders großen Kohlensäuregehalt ausgezeichnet ist. Die Erörterung dieses Falles ist heute nicht mehr nötig, nachdem erwiesen ist, daß gleich zusammengesetzte Kohlen unabhängig von ihrem Gefüge auch ungefähr gleich viele CO₂ zu lösen vermögen.

C. Der Zeitpunkt und die Art der Entstehung sowie die Ursachen des Ausbruchs der Kohlensäurenester.

9.

Der Zeitpunkt und die Art der Entstehung: CO₂-Nester, d. h. eng begrenzte Hohlräume in CO₂-führenden Flözen, ausgefüllt mit einer großen Teils in ihre Gefügeelemente aufgelösten Kohle, hat noch niemand als solche gesehen. Zwar weiß man, wie schon oben bemerkt, daß eine mulmige, zerreibliche Kohle zu Ausbrüchen manchmal besonders geneigt ist. Es ist aber nicht festgestellt worden, ob die Ausdehnung des Vorkommens solcher Kohlen wenigstens gelegentlich auch der Größenordnung der Ausbruchhohlräume entspricht. Dagegen sind des öfteren auch in festen Kohlen Ausbrüche beobachtet worden, ohne daß man vorher auf mulmige, zerreibliche Kohle gestoßen wäre. Die Erklärung dafür, daß Kohlensäurenester noch nicht beobachtet worden sind, kann nur sein: Entweder ihr Inhalt unterscheidet sich beim Abbau kaum von dem der Umgebung, was besonders bei den mulmigen und zerreiblichen Kohlen leicht möglich sein könnte, oder der Zeitpunkt ihrer Bildung fällt mit demjenigen ihres Ausbruchs zusammen, oder endlich: die Nestkohle kann ihrer Beweglichkeit und Gasbeladung wegen gar nicht anders, als in einem Ausbruch in Erscheinung treten.

Es wird sich zeigen, daß nur die beiden letzten Möglichkeiten, diese aber nebeneinander, wahrscheinlich sind.

Der Geologe, Herr von Bubnoff, vertritt den Standpunkt, daß die ausbrechenden Kohlen einem natürlichen Zermürbungsprozeß die Zerstörung ihrer Struktur verdanken, und daß die CO₂ derart lokalisiert in diese zermürbte Kohle eingeströmt ist, daß der Umfang der Nester praktisch mit der Ausdehnung des zermürbten Flözteiles und der CO₂-Beladung zusammenfällt.

Die natürliche Zermürbung mag gelegentlich vorhanden sein und ist in einem Fall von Bubnoff auch erwiesen worden, die nesterweise lokalisierte CO₂-Aufnahme ist unmöglich. Weite Gebiete CO₂-führender, mulmiger und zerreiblicher Flözteile sind abgebaut worden, ohne daß man in diesen durch festere Wände abgegrenzte, als Nester zu bezeichnende Teile hat feststellen können; wenn aus solchen Kohlen Ausbrüche kamen, dann war die ausgetriebene Kohle immer noch feiner zerteilt als die anstehende. Daß eine ungleichmäßige Verteilung des CO₂-Gehaltes für die Entstehung von Nestern nicht verantwortlich gemacht werden kann, ist schon in 8 dargetan worden.

10.

Fällt die Möglichkeit einer von Natur gegebenen Bildung der Nester weg, so kann ihre Entstehung nur eine Folge der Maßnahmen des Abbaus sein.

Dann kann sein:

1. Daß die Zermürbung der Kohle die Folge einer allmählichen Lösung einer Druckspannung ist. Die Wirkung sieht man fast an jedem Ortsstoß. Sie führt zu einer verhältnismäßig groben, bröcklichen Aufteilung der Kohle, wenn diese hart und glänzend ist; zu einer feineren, wenn sie weich und mulmig ist, aber nie zu jener feinen Zerteilung, welche die Ausbruchskohle kennzeichnet.

2. Daß die Zermürbung die Folge einer rascheren Auflösung solcher Spannungen, z. B. eines Gebirgsschlags ist. In diesem Fall geht die Zerteilung der Kohle sicher weiter als im vorhergehenden; sie mag gelegentlich selbst bis zur Auflösung in die feinsten Gefügebestandteile führen und könnte dann also auch Ausbruchskohle liefern (s. 13). Trotzdem ist auch diese Möglichkeit für sich

allein bei der Mehrzahl der Ausbrüche unwahrscheinlich, weil sie der eigentümlichen sackartigen Begrenzung und der nach dem Flözinnern hin oft zackigen Form der Ausbruchshohlräume nicht Rechnung trägt. Bei einem Gebirgsschlag muß die Begrenzung des Ausbruchshohlraumes wenigstens ungefähr den meist wohl geraden Bruchlinien des Hangenden folgen.

3. Daß die Zermürbung die Folge einer reibenden Bewegung des Hangenden oder Liegenden ist. Auch eine solche könnte unter Umständen eine feinere Zerteilung herbeiführen, aber sicher verbunden mit einer starken Wärmeentwicklung, und wieder nicht in der beobachteten Form der Begrenzung.

So bleibt denn für die Mehrzahl aller Fälle nur die letzte Möglichkeit,

4. daß die Zermürbung die Folge der Schwingungen ist, welche durch Spreng- und Erschütterungsschüsse in dem durch Druckverschiebungen stark beanspruchten Flöz veranlaßt werden. Man hat sich die Wirkung etwa wie folgt zu denken:

11.

Wenn die äußere Gestalt eines festen Körpers sich unter Druck- oder Zugbeanspruchung nicht mehr ändern kann, zerteilt der Körper sich, bildet Spaltflächen; sein Gefüge wird zerstört. Die Höhe der Grenze der Beanspruchung ist vor allem durch die Belastungsgeschwindigkeit bestimmt; bei langsamem Vorgängen können Spannungen durch Ausgleich im Aufbau des festen Körpers teilweise wieder aufgehoben werden. In diesem Sinn wird auch die feste Kohle im Flöz beansprucht, zunächst nur durch die ruhende Belastung des Gebirges oder vorhandener Kämpfer bis in die Nähe noch zulässiger Grenzbelastungen. Wird die Grenzbelastung langsam überschritten, so ist die Folge wahrscheinlich eine sehr grobe Zermürbung der Flöz Kohle, wie sie vor Ort zu sehen ist; sie gestattet eine langsame, ruhige Entgasung. Wird die Grenzbelastung durch kleinere Zusatzbelastungen aber rasch überschritten, so ist die Folge eine stärkere Zerstörung des Gefüges und feinere Aufteilung. Zusatzbelastungen mit ganz besonders großer Geschwindigkeit und einer gerade die feinsten Gefügeelemente ergreifenden Wirksamkeit bringen die Erschütterungsamplitüden, welche beim Schießen längs der Schußwellen im Flöz entstehen, und deren Größenordnung nach Hundertsteln und Tausendsteln eines Millimeters zählt¹¹⁾). Es ist unnötig, bei diesen Amplitüden zwischen feinen Knallwellen und aufgelagerten Periodizitäten zu unterscheiden; sie werden ihrer Größe entsprechend immer nur die kleinsten Gefügeelemente der Flöz Kohle in Schwingung versetzen bzw. aus ihrem Verband lösen.

Da zur Zermürbung der Kohle als Vorspannung, wie oben gezeigt, ein großer Gebirgsdruck gehört, ist es erklärlich, wenn dieser, wirkend auf die zermürbte Kohle wie auf eine Flüssigkeit, beim Entlasten (Ausbruch) auch große Klötze (Flözschorlen) beiseite zu schieben vermag. Der eigentliche Kohlensäuredruck hat damit weniger zu tun; denn die Kohlensäure ist ein Gas und als solches befähigt, sich überall in weitem Raume auszugleichen und eventuell in andere Gebiete auszuweichen, was bei den festen Körpern, die nur örtlich in bestimmten Punkten beansprucht werden, nicht möglich ist.

Was sich bezüglich der Knall- und Explosionswellen sonst noch sagen läßt, insbesondere wie sich ihre Wirkung

¹¹⁾ Im Staub der Ausbruchskohle sind die Teilchen in der Größenordnung von $1/1000$ bis $2/100$ mm Durchmesser ihrer Masse nach vorherrschend.

steigern muß, wenn sie eine Reflexion erfahren, ist im Ndschl. A.-B. S. 65 niedergelegt worden. Daran ist ohne neues Beobachtungsmaterial nicht viel zu ändern. Nur die Vorstellung von der Entwicklung wirksamer Wellenzüge, d. h. der Bildung mehrerer Nester hintereinander unter der Wirkung eines einzigen Schusses wünsche ich nicht mehr aufrechtzuerhalten. Die Ausbruchreihen im Ferdinand- und Antonflöz der Rubengrube (Ndschl. A.-B. S. 71), welche die Grundlage dieser Vorstellung bildeten, werden besser als die Folge wiederholter, gleichartiger Maßnahmen bewertet. Die auflösende, zerteilende Wirkung der Sprengschüsse erschöpft sich wahrscheinlich mit der Bildung eines einzigen Nestes („Schwingungsbauch“).

Die hier vorgetragene Darstellung der Nestbildung gestattet zwangsläufig die Einreihung aller Beobachtungen. Nicht überall kann ein Schuß die Nestbildung veranlassen, sondern nur da, wo die geschilderten Spannungsverhältnisse bestehen; und auch nicht jeder so gelegene Schuß kann es tun, sondern nur ein so starker, daß seine Wirkung über die zermürbte Zone des Ortsstoßes weg in das Gebiet der Grenzspannungen reicht. Schon verhältnismäßig geringfügige Unterschiede in der Festigkeit der Flözkohle müssen an den Stellen, wo die Grenzspannung nur wenig überschritten wird, genügen, die Kohle vor der Zerstörung zu bewahren. An der dem Flözinnern zugerichteten hinteren Seite der Nester ist die Vorspannung am kleinsten, weil hier das unverritzte Flöz das Hangende trägt; nach der dem Ort zugerichteten Seite wird sie, sicher etwa bis zur Mitte des Nestes, größer (s. u.). Die Zusatzspannung, in Form von Schwingungsamplitüden, hat in einer gewissen, auf einige Meter zu schätzenden Entfernung von der Sprengstoffkammer zwar ihren größten Wert, ist der Vorspannung gegenüber aber immer nur klein. Im hintersten Teil des Nestes wird die Grenzspannung nur eben erreicht; davor wird sie überschritten. Hinten werden deshalb auch schon kleine Unterschiede in der Festigkeit einzelner Flözteile und ihres Hangenden wirksam. Es bilden sich die Flözrippen, welche die zackige Begrenzung der Ausbruchhohlräume veranlassen. Der Ortsstoß ist mit einer Zermürbung seines Gefüges den Spannungen schon vorher ausgewichen; zudem liegt er der Sprengkammer zu nahe, als daß er von größeren Amplitüden erreicht werden könnte. Die beim Ortsstoß verfügbaren Zusatzspannungen können deshalb nicht bis zur Grenzspannung führen. Der Ortsstoß bleibt darum von der Auflösung in seine feinsten Gefügelemente verschont und bildet, wenn er der treibenden und brechenden Wirkung der Sprengstoffgase, dem CO₂-Druck im Nest und der möglichen Steigerung dieses Drucks infolge der Schwingungen (s. 12) standhält, die Verdämmung des gebildeten Nestes (bezüglich der „Verdämmung“ s. 8).

12.

Der Ausbruch der Kohlensäurenester. In der Mehrzahl der Fälle erfolgt der Ausbruch sofort nach dem Schuß, also zugleich mit der Bildung des Nestes oder alsbald danach, weil der Ortsstoß nicht hält. Daß es aber auch anders sein kann, beweist ein Versuch, den der Kohlensäureausschuß im Antonflöz der Rubengrube 1926 angestellt hat. Ein 12 m langes Bohrloch wurde mit 5½ kg brisantem Sprengstoff geladen (die Sprengdruckkammer war etwa 1 m lang) und abgetan. Es erfolgte zunächst kein Ausbruch. Die Triebkraft der Sprengstoffmenge in 12 m Tiefe war zur Lösung des vorderen Flözteils viel zu gering. Es traten aber beim Abräumen des Bohrlochs mit Hilfe von gewöhnlichen Schüssen zwei kleinere Ausbrüche im Abstand von 4 bzw. 6 m vom

ersten Ortsstoß auf. Als dann der Vortrieb der Strecke den Ort der Sprengkammer um einige Meter überholt hatte, kam ein ganz erheblicher Ausbruch (mit etwa 300 t Kohle) und dann etwa 6 m weiter noch ein zweiter Ausbruch (mit etwa 250 t Kohle). Diese Ausbrüche waren durch schwächeres Nachschießen derart eingeleitet worden, daß man von diesem unter normalen Verhältnissen keine Ausbrüche hätte erwarten dürfen. Zwischen beiden Nestern war das Flöz auf einer Strecke von vielleicht 6 m erhalten geblieben, ein Beweis dafür, daß die Zusatzspannungen (Schwingungsamplitüden) erst in einiger Entfernung vom Erzschrätenzentrum die für die Nestbildung erforderliche Stärke erreichen.

Als weitere Belege dafür, daß sich Nester unter Umständen längere Zeit erhalten können, ließen sich noch zahlreiche andere Beispiele anführen, bei denen große Ausbrüche, mit allen Kennzeichen solcher, nach vorausgegangenem starkem Schießen beim Abbau mit der Keilhacke oder mit Schrämmaschinen oder bei schwachem Nachschießen vorgekommen sind — also unter Abbaubedingungen, welche die Bildung der ausgebrochenen Nester nicht haben veranlassen können. Insbesondere scheint das starke Schießen in Querschlägen nahe beim unverritzten Flöz die Bildung haltbarer Nester zu begünstigen. Die Ausbrüche aus solchen unvermuteten Nestern können die schwersten Katastrophen veranlassen.

Jetzt läßt sich auch die Frage beantworten, ob „haltbare Nester“ nicht auch durch den Ortsstoß hindurch so weit entgasen können, daß sie ungefährlich werden. Sicher ist dies gelegentlich der Fall, aber selten. Die Nester reichen so weit in das unverritzte Flöz, ihre CO₂-Quelle, hinein, daß in ihnen ein gewisser Überdruck stets erhalten bleibt. Dieser Umstand, zusammen mit der Beweglichkeit der Nestkohle, hat zur Folge, daß die Entfernung der Verdämmung ohne Ausbruch kaum möglich ist, und wenn sich dieser auch nur durch einen plötzlichen Vorschub des geschwächten Ortsstoßes zu erkennen gibt.

Zusammenfassend läßt sich zu unserer Theorie der Ausbrüche sagen: Die Tatsache, daß starkes Schießen oft Ausbrüche veranlaßt, während beim Abbau ohne dieses Schießen entsprechende lokalisierte Flözbesonderheiten mit Sicherheit nicht festzustellen sind, dann der Umstand, daß die vorgetragene Darstellung von der gelegentlich Nester bildenden Wirkung starker Schüsse nahezu allen Beobachtungen gerecht wird, gibt der Theorie ein hohes Maß von Wahrscheinlichkeit.

13.

Neben ihr ist aber auch die andere gerechtfertigt, daß der sogenannte Gebirgsschlag die Ursache der Ausbrüche sei, freilich nur für besondere Fälle. Ein Gebirgsschlag kann zwar unter Umständen die den Ausbruch kennzeichnende fein zerteilte Kohle liefern (s. 10, 2). Seinem ganzen Charakter nach ist er aber eine seltene Erscheinung, und seines brutalen Verlaufs wegen wird er zu einer Nestbildung mit Verdämmung führen. Beim Gebirgsschlag muß die Zerstörung des Kohlegefäßes mit dem Ausbruch deshalb stets zusammenfallen.

Der Gebirgsschlag als Ursache für den Bruch der Verdämmung eines vorhandenen Nestes ist ohne weiteres verständlich.

14.

Schließlich ist noch einer Möglichkeit zu denken, welche Ausbrüche zwar nicht verhindern, aber doch für deren Verlauf und Wirkung von erheblicher Bedeutung sein kann; sie verdiente deshalb wohl eine

experimentelle Prüfung. Es ist die Beschleunigung der Entgasung einer Lösung durch Erschütterungen. Eine solche bemerkt man (im Ndschl. A.-B. I S. 13 hat Werne auf diesen Zusammenhang hingewiesen) beim kräftigen Aufstoßen einer geöffneten Sekt- oder Bierflasche. Die Folge des Aufstoßens ist eine lebhaftere Gasentwicklung aus der an Kohlensäure übersättigten wässrigen Lösung und in der Folge eine vorübergehende Drucksteigerung. Die übliche Erklärung ist, daß die Geschwindigkeit des Druckausgleichs zwischen der Kohlensäure innerhalb und außerhalb der Lösung nach dem Öffnen eine nur kleine sei, durch den Stoß aber vergrößert werde. Der Gedanke liegt nahe, daß die dem Stoß folgenden Schwingungen, so klein ihre Zahl je Sekunde auch ist, in der Flüssigkeit die lockende Wirkung der Wärmebewegung gegenüber dem Verband der Wasser- und Kohlensäuremoleküle verstärken, daß die Schwingungen also auch in diesem Fall gewissermaßen als Zusatzspannung bei Molekülen wirken, deren durch die Wärmebewegung gegebene Vorspannung noch nicht an die Grenzspannung heranreicht. Die Schwingungen in der Folge eines Sprengschusses sind natürlich noch weit wirksamer als diejenigen Stoß folgenden. Dies rechtfertigt die Vermutung, daß die größere Intensität der dem Schuß folgenden Schwingungen auch eine feste Lösung, wie diejenige der CO_2 in Kohle, so weit beeinflussen könnte, daß deren Zerfall in mehr oder weniger großem Umfang beschleunigt wird.

Eine Überschlagsrechnung läßt erkennen, welch außerordentlicher Druckanstieg in der kurzen Zeitdauer der Schwingungen eintreten könnte, wenn der Zerfall vollständig wäre, bzw. wenn die Rückbildung der Lösung so viel langsamer als der Zerfall vor sich ginge, daß sie während des Schwingens praktisch bedeutungslos bliebe. Nach dem Abklingen der Schwingungen müßte der Anstieg infolge der Rückverbindung freilich wieder verschwinden, wenn kein Ausbruch eingetreten ist.

Nimmt man den „Porenraum“ von 1 m^3 eines unverwitterten Flözteiles zu $0,2 \text{ m}^3$ an, und zugleich, daß dessen Kohle etwa $8 \text{ m}^3 \text{ CO}_2$ gelöst enthalte (entspr. etwa 2 at Überdruck, s. 2), so wäre bei vollständiger Sprengung des Verbands zwischen Kohlensäure und Kohle eine fast augenblickliche Steigerung des Drucks auf $8,0 / 0,2 =$ etwa 40 at in dem Porenraum zu erwarten.

Wenn auch nicht anzunehmen ist, daß Schüsse in der Kohle derart starke Schwingungen veranlassen können, so würde doch schon ein Teilbetrag genügen, um die Intensität der Ausbrüche (deren Brisanz) gewaltig zu steigern. Der Verfasser beabsichtigt, dem hier aufgeworfenen Fragenkomplex experimentell näherzutreten.

15.

Das Ende eines Ausbruchs ist, wenn der Druck in den benachbarten Flözteilen einige Atmosphären nicht überschreitet, mit dem Auswurf der Nestkohle eingetreten. Eventuell schieben sich im Anschluß an den Ausbruch infolge des erheblichen Druckgefälles vom unverwitterten Flöz zum Hohlraum hin die gelockerten Wände des Hohlraums vor; ein weiteres Ausblasen feinster Kohle ist aber nicht mehr zu erwarten. Die Entgasungsgeschwindigkeit grober Kohlen ist zu klein. Bei unserem diesbezüglichen Versuch (7) waren selbst bei einem Druckgefälle von 7 at die Kohlenstückchen nach dem Ausblasen der CO_2 nicht zerfallen.

Etwas anderes könnte es sein, wenn größere Druckgefälle als bei unserem Versuch wirksam werden. Dann wäre denkbar, daß ein Ausbruch weiterreicht, indem die den Hohlraum umschließenden Kohlen in der Folge ihrer

raschen Entgasung nach vorausgegangenem Zerbröckeln von der Oberfläche her sich selbst zerblaseu und so in ihre Bestandteile auflösen. In diesem Fall käme der Ausbruch nur durch die allmähliche Verstopfung der Nestöffnung und Strecke mit ausgebrochenen Kohlenmassen, d. h. durch eine selbsttätige Verminderung des Druckgefälles zum Ende.

16.

Zusammenfassung zum 1. Abschnitt: Das Bild, welches man sich von dem Zustandekommen eines normalen Kohlensäureausbruchs und von dessen Verlauf auf Grund der vorausgegangenen Ausführungen als das wahrscheinlichste zu machen hat, ist also das folgende: Ein ausbruchgefährliches Kohleflöz ist gleichmäßig durchzogen von einem langsamen Kohlensäurestrom — im Neuroder Gebiet mit einem Druckgefälle von etwa 3 at von der Grenze des unverwitterten Flözes bis vor Ort. Die durch den Abbau veranlaßten Druck- und Zugspannungen führen vor Ort meist zu grober Zermürbung des Flözes; dahinter findet sich eine Zone, in der die zur Zerstörung des Flözzusammenhalts nötige Grenzspannung noch nicht erreicht ist. Es werden die Spannungen im Flöz bis zum unverwitterten Gebiet hin also kleiner. In der Zone noch nicht erreichter Grenzspannung genügt das Hinzukommen kleiner Zusatzspannungen, um die Zerstörung der Flözstruktur zu veranlassen, die um so feiner ausfällt, je rascher die Grenzspannung überschritten wird. Das Ergebnis einer besonders raschen Zerstörung ist der Staub der Ausbruchskohle. Hinreichend rasch auftretende Zusatzspannungen liefern nur Gebirgsschläge und Erschütterungen durch Sprengschüsse. Die ersten führen, wenn überhaupt, dann sofort zu Ausbrüchen; die Erhaltung des Ortsstoßes als Verdämmung vor der Ausbruchskohle ist nicht möglich. Die zweiten führen, weil die durch sie veranlaßten Schwingungen erst hinter dem Ortsstoß ihre größte Kraft entwickeln, sofort oder später zu Ausbrüchen, je nachdem der Ortsstoß der vorübergehenden Drucksteigerung im dahinterliegenden gestörten Flözteil („Nest“) widersteht oder nicht. Bei den Gebirgsschlägen kommen Festigkeitsunterschiede im Flöz kaum zur Geltung, weil sie zu großen Energiemengen hinzubringen, wohl aber bei den Erschütterungen durch Schießen. Der Ausbruch eines Nests ist gekennzeichnet durch den Wegbruch des Ortsstoßes, der als Verdämmung für die dahinterliegende mit CO_2 beladene Feinkohle wirkt, und in der Folge davon das Freiwerden und die rasche Entgasung der Feinkohle. Die Ursache für die rasche Entgasung ist die feine Zerteilung bzw. große Oberfläche der in Neurode unter einem Druck von etwa 3 at mit CO_2 gesättigten Kohle. Die Ausdehnung des Nests ist durch den Wirkungsbereich der Schwingungen (er ist von dem Verf. im Ndschl. A.-B. I als „Schwingungsbauch“ bezeichnet worden) in der Zone der Grenzspannungen bestimmt.

Der Ausbruch ist für gewöhnlich beendet, wenn der lockere Kohleininhalt des Nests ausgeblasen ist. Nur in seltenen, bis jetzt vielleicht überhaupt noch nicht beobachteten Fällen besonders großer Drucke im Flöz, und damit auch im Nest, ist mit der Möglichkeit zu rechnen, daß der Ausbruch sich in das unverwitterte Flöz hinein fortsetzt und erst mit der Verstopfung von Nestausgang und Strecke durch Ausbruchskohle sein Ende findet¹²⁾.

¹²⁾ Die jetzige Darstellung weicht in Einzelheiten von den früher gebrachten (Ndschl. A.-B. I, S. 68, und II, B. 29) ab; zum Teil ist sie ausführlicher, zum Teil gekürzt. Die Grundgedanken hält sie fest. Die Beobachtungen der letzten Jahre und die daran sich anschließenden Erörterungen haben die Änderung der Fassung veranlaßt.

II. Abschnitt. Grubengasausbrüche.

17.

Methan ausbrüche. Die Art der Bindung des Methans durch Steinkohle ist grundsätzlich die gleiche wie diejenige der CO_2 ; es bildet sich eine „feste Lösung“. Die Kurvenzüge der beistehenden Abb. 3 gestatten ab-

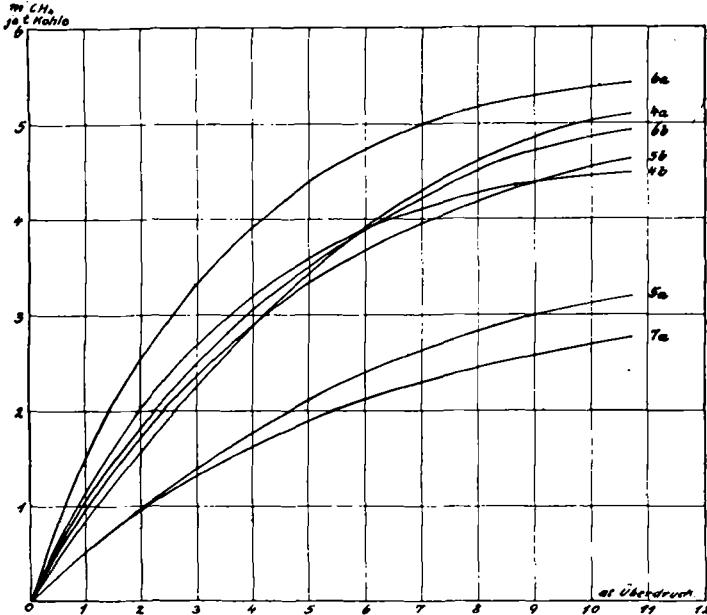


Abb. 3. Aufnahmevermögen der mineralstofffreien Kohlesubstanz für Methan.

zulesen, wieviel Kubikmeter Methan je Tonne mineralstofffreier Kohlesubstanz bei einem bestimmten Außendruck in der Kohle gelöst sind.

Über die Bestimmung des Mineralstoffgehalts ist in der „Zeitschrift für Berg-, Hütten- und Salinenwesen“ 1930, S. B. 22, berichtet worden. Das Lösevermögen einer Kohle auf mineralstofffreie Kohlesubstanz zu beziehen, hat den Vorteil, ein zuverlässiges Ergebnis zu liefern, wenn größere Mengen indifferenter Mineralstoffe die Kohle begleiten.

Die untersuchten Kohlen stammten aus der:

- 4 a) Glückhilf-Friedenshoffnung-Grube, Ndr.-Hermsdorf, 18. Flöz, 7. Sohle, Ausbruchkanal, Korngröße < 1 mm.
- 4 b) Wie zuvor, Korngröße > 1 mm.
- 5 a) Glückhilf-Friedenshoffnung-Grube, Ndr.-Hermsdorf, 18. Flöz, 7. Sohle, Niederstoß v. Ort, Korngröße < 1 mm.
- 5 b) Wie zuvor, Korngröße > 1 mm.
- 6 a) Wenceslausgrube, 5. Wilhelmflöz, 3.—2. Sohle, ausbruchgefährliche Kohle in der Schwebenden, Korngröße < 1 mm.
- 6 b) Wie zuvor, Korngröße > 1 mm.
- 7 a) Wenceslausgrube, Wenceslausflöz, Ausbruchkohle, 3. Sohle, Korngröße < 1 mm.
- 7 b) Wie zuvor, Korngröße > 1 mm.

Die für die letzte Kohle (7b) ermittelten Werte sind in die Figur nicht eingezzeichnet worden, weil der Mineralstoffgehalt dieser Kohle fast 50% betrug.

Die Löslichkeit des Methans in Steinkohle ist wesentlich kleiner als die der CO_2 . Bei gleichen Drucken im Flöz ist die Gefahr, daß Methan ausbricht, entsprechend

kleiner. Das Zustandekommen und der Verlauf solcher Ausbrüche werden demjenigen der Kohlensäureausbrüche zwar grundsätzlich gleichen; aber die wesentlich geringere Dichte des Methans ($= \frac{16}{44}$ der CO_2) muß die mechanischen Wirkungen des ausgebrochenen Gases erheblich vermindern. Dafür bringt seine Brennbarkeit ein neues Gefährmoment.

18.

Mischgasausbrüche (Methan und Kohlensäure). Über die Löslichkeit von Mischungen aus Methan und CO_2 läßt sich sagen, daß durch die Zusammensetzung und den Druck des gemischten Gases über der Kohle auch das Mischungsverhältnis und die Menge der gelösten Gase in der Kohle bestimmt sind.

Diese Beziehung sagt nicht, daß die Zusammensetzung des Gasgemisches außerhalb und innerhalb der Kohle dieselbe ist; vielmehr wird man in erster Annäherung annehmen können, daß die Aufnahme der beiden Gase entsprechend dem Verhältnis ihrer Teildrücke im Gasraum und entsprechend den zu diesen Teildrucken festgestellten Löslichkeiten (Abb. 1 und Abb. 3) unabhängig voneinander erfolgt, bis die Kohle an beiden Gasen nach diesem Verhältnis gesättigt ist.

Hieraus ergibt sich unter Berücksichtigung der größeren Löslichkeit der Kohlensäure gegenüber dem Methan, daß die Auflösung der Gase in der Kohle eine Änderung ihrer Zusammensetzung zur Folge hat. Diese tritt nur bei einer bestimmten Zusammensetzung der Mischung nicht ein: wenn das Verhältnis der absoluten Löslichkeiten gleich dem Mischungsverhältnis der Gase ist. Auch bedingt die genannte Gesetzmäßigkeit, daß eine Durchspülung methanhaltiger Kohlen mit Kohlensäure das Methan aus diesen Kohlen entfernt. Ausbrüche von Mischgas in Flözen, die in einem Kohlensäurestrom liegen, sind nur da möglich, wo die Durchspülung unvollkommen ist, oder wo der Kohlensäurestrom nicht rein, sondern methanhaltig ist. Bei einer Verminderung des Außendrucks (Entgasung der Kohlen) entweichen beide Gase aus der Kohle wieder entsprechend der Änderung der Löslichkeiten. Auch hier kann das Mischungsverhältnis des entweichenden Gases ein anderes sein als das der gelösten Gase.

Weiterhin gibt die Möglichkeit einer sehr viel rascheren Diffusion des spezifisch leichteren Methans durch feste Kohle hindurch, wenn der Austritt der Gase aus der Kohle vor Ort langsam erfolgt, Anlaß zu einer Änderung des Mischungsverhältnisses der in der Kohle gelösten Gase bei ihrem Austritt. So kann es kommen, daß aus der gleichen Kohle bei langsamer Entgasung infolge der Diffusion durch die kompakte Kohle hindurch ein methanreiches Gas austritt, leichter als Luft, das am Hangenden entlang zieht, während eine sehr rasche Entgasung zermürbter Partien, bei der die Bedeutung der Diffusion in den Hintergrund tritt, beide Gase in dem Verhältnis erscheinen läßt, in dem sie auch in der Kohle enthalten sind; ist das Gemisch dann schwerer als Luft, so streicht es am Liegenden entlang. Eine gewisse Entmischung der Gase ist also beim Austritt auf der festen Kohle möglich; im Gaszustand würde eine solche praktisch niemals eintreten.

Das Verhältnis von Methan zu Kohlensäure wird nach Ausbrüchen am Hangenden und Liegenden immer praktisch dasselbe und bei normaler Entgasung nur dann verschieden sein, wenn rasch entgasende Kleinkohle vor Ort den Gasstrom am Liegenden speist und zugleich dieselbe Kohle im kompakten Zustand vor Ort den Gasstrom zum Hangenden liefert.

19.

Zusammenfassung zum II. Abschnitt.
Das Lösevermögen der Steinkohlen ist für Methan wesentlich kleiner als für Kohlensäure. Die Ursachen

und der Verlauf der Grubengasausbrüche sind wahrscheinlich die gleichen für die beiden Arten von Ausbrüchen. Ein neues Gefährmoment bringt die Brennbarkeit des Grubengases. [A. 142.]

Osmotisches Verhalten von starken Elektrolyten in Lösung und Hydratation ihrer Ionen*).

Von Prof. Dr. K. FAJANS und Dr. G. KARAGUNIS,

Chemisches Laboratorium der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Physikalisch-chemische Abteilung.

(Eingeg. 14. November 1930.)

Die osmotischen und die Aktivitätskoeffizienten starker Elektrolyte in wässriger Lösung hängen außer von der Konzentration und der Ladung der beteiligten Ionen auch noch von individuellen Eigenschaften der Elektrolyte ab und nehmen z. B. bei Alkalichloriden von Lithium zu Calcium ab. Die Theorie von P. Debye und E. Hückel¹⁾, welche derzeit die beste Berechnung der elektrostatischen Kräfte zwischen den Ionen in Lösung darstellt, vermag für genügend kleine Konzentrationen den Einfluß der Ladung befriedigend, den der Konzentration angenähert richtig wiederzugeben²⁾. Die individuellen Unterschiede sucht sie durch einen Parameter zu deuten, den sogenannten „Ionendurchmesser“ a , der für den Fall, daß Kation und Anion gleiche Größe haben, den Abstand zwischen den Mittelpunkten von zwei sich unmittelbar berührenden Ionen, im allgemeineren Fall eine etwas komplizierte Funktion der beiden Ionenradien darstellt, hauptsächlich aber durch die nächstmögliche Annäherung zwischen den Mittelpunkten der entgegengesetzten geladenen Ionen beeinflußt wird. Je näher sich diese kommen können, um so stärker werden die zwischen ihnen wirkenden Anziehungskräfte sein, um so kleiner der osmotische und der Aktivitätskoeffizient.

Die Grundlage für die quantitative Behandlung der Kraftwirkungen bildet das Coulombsche Gesetz

$$k = \frac{z_1 e \cdot z_2 e}{D \cdot r^2} \quad (1)$$

wo z die Ladung der Ionen, r den jeweiligen Abstand, D die Dielektrizitätskonstante des als Kontinuum betrachteten Lösungsmittels ist, wobei für letztere meistens der Wert (80) des reinen Wassers benutzt wird. Die Prüfung der theoretischen Formeln, welche den individuellen Unterschieden Rechnung tragen, an der Erfahrung geschieht durch die Wahl eines Wertes für den „Ionendurchmesser“, durch den die bestmögliche Übereinstimmung erreicht wird. Die sich für a der Alkalichloride ergebenden Werte nehmen von Li zu Cs ab, und zwar gilt diese Abstufung für das ganze untersuchte Konzentrationsgebiet. Den Widerspruch, der sich dabei zu den bekannten Ionenabständen in Kristallen ergibt, suchte man durch die Annahme zu erklären, daß in der Lösung die Chlorionen bei ihrer stärksten Annäherung an die Kationen nicht mit wasserfreien, sondern mit hydratisierten Kationen in Berührung kommen, wobei das stärker hydratisierte Li^+ größer sein könnte als das schwächer hydratisierte Cs^+ . Bei näherer Betrachtung

erweist sich aber diese Annahme als wenig plausibel, denn durch die Hydratation kann zwar ein statistischer mittlerer Abstand beeinflußt werden, während ein definierter kleinster Abstand für die allermeisten Elektrolyte der Berührung wasserfreier Ionen entsprechen müßte. Die Deutung des Parameters a im Sinne der kleinstmöglichen Entfernung zwischen den Ionenmittelpunkten erwies sich weiterhin als sehr unwahrscheinlich auf Grund refraktometrischer Untersuchungen der Elektrolytlösungen. Da auf Grund des optischen Verhaltens kristallisierter Salze bekannt ist³⁾, daß die Refraktion eines Halogenions um so stärker erniedrigt wird, je kleiner sein Abstand vom Kation ist, konnte aus der von K. Fajans, H. Kohner und W. Geffcken⁴⁾ studierten Abhängigkeit der Refraktion der gelösten Elektrolyte von der Konzentration geschlossen werden, daß auch in Lösungen, zum mindesten bei den bisher hauptsächlich untersuchten Konzentrationen über 1 molar, das Chlorion näher an Li^+ als an Cs^+ heranzukommen vermag, und daß es bei den nächsten Entfernungen zwischen den Ionen zu einer Berührung von wasserfreien Ionen kommen könne, was im Gegensatz zu der aus der Theorie gefolgerten Abstufung der a -Werte steht.

Zu einer befriedigenderen Übersicht über die individuellen Unterschiede im Verhalten der gelösten Elektrolyte als die deduktive quantitative Theorie führten nun einfache, von empirischen Grundlagen ausgehende Überlegungen. Die Löslichkeit der Alkalihalogenide zeigt sehr auffällige Regelmäßigkeiten⁵⁾, deren Grundzüge aus Tabelle 1 zu ersehen sind, welche zugleich auch

Tabelle 1.
Abstufung der Löslichkeit, der Lösungswärmen, der Neigung zur Hydratbildung, der osmotischen Koeffizienten.

	F	Cl	Br	J
Li	—	▲	▲	→
Na	—	—	—	→
K	◀	—	—	—
Rb	◀	—	—	—
Cs	▼	—	—	—

für die Abstufung der Lösungswärmen der wasserfreien Salze in viel Wasser und, soweit vergleichbare Daten vorhanden, auch für die Neigung zur Bildung fester Hydrate gilt. Die Pfeile zeigen die Richtung an, in welcher die betreffenden Werte steigen. Die Vorgänge der Auflösung und der Hydratisierung eines festen Salzes kann man sich nun zerlegt denken in das unter Energieaufnahme stattfindende mehr oder minder

*) Nach einem in der Mathematisch-naturwissenschaftlichen Abteilung der Bayerischen Akademie der Wissenschaften am 8. November 1930 gehaltenen Vortrage. Die ausführliche Arbeit wird in der Zeitschrift für physikalische Chemie publiziert.

¹⁾ Vgl. z. B. E. Hückel, Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften 3, 199 [1924].

²⁾ Vgl. z. B. die Prüfung der Theorie an Hand der Verdünnungswärmen durch E. Lange und Mitarbeiter, Ztschr. Elektrochem. 36, 772 [1930].

³⁾ K. Fajans u. G. Joos, Ztschr. Physik 23, 1 [1924].

⁴⁾ Trans. Faraday Soc. 23, 357 [1927]; Ztschr. Elektrochem. 34, 1, 512 [1928].

⁵⁾ K. Fajans, Naturwiss. 9, 729 [1921].