

4. Kaliproduktion 1920—1925 (1000 dz K₂O).

Jahr	1920	1921	1922	1923	1924	1925	1913
Deutschland . .	11 386	9 241	13 070	8 860	8 420	12 255	11 608
Elsaß	1 223	884	1 327	1 580	2 698	3 103	350
Ver. Staaten . .	481	102	117	202	229	—	—
Zusammen	13 100	10 250	14 520	10 650	11 350	15 375	12 000

5. Weltproduktion von Zinn (in Tonnen).

Jahr	1920	1921	1922	1923	1924	1925	1913
Malaienstaaten .	36 927	36 237	36 223	39 376	46 045	48 425	51 366
Niederl.-Indien .	21 608	21 534	27 539	26 130	31 962	32 750	19 260
Siam	6 201	6 150	6 979	6 334	7 256	6 802	6 747
Brit. Indien . .	1 648	1 362	1 530	1 305	1 087	1 323	303
China	10 566	11 200	12 435	8 727	6 858	8 500	8 408
Bolivien	27 821	18 804	31 616	29 777	29 450	32 980	26 327
England	3 065	680	370	1 021	1 986	2 500	5 288
Südafrika . . .	1 429	720	470	884	1 210	1 103	2 251
Nigerien	5 168	5 067	5 123	5 912	6 162	6 181	3 872
Australien . . .	5 233	3 592	2 570	3 283	2 500	2 800	7 780
Sonst. Länder .	3 225	4 364	3 375	3 000	1 665	3 000	1 666
Zusammen	122 910	109 710	128 230	125 750	136 181	146 364	134 268

6. Weltproduktion der wichtigsten Gebrauchsmetalle 1913—1925.

	Blei	Kupfer	Zink	Nickel	Alumi- nium	Queck- silber
	1000 t	1000 t	1000 t	1000 t	1000 t	1000 t
1913	1 186	1 022	1 002	30,6	68,4	4,0
1914	1 183	962	889	30,1	83,5	3,8
1915	1 150	1 092	833	34,6	81,7	3,9
1916	1 154	1 421	978	38,5	115,1	3,8
1917	1 185	1 457	993	39,4	156,0	4,0
1918	1 223	1 460	836	52,0	179,9	3,7
1919	860	978	648	26,0	156,0	2,6
1920	910	942	714	34,0	158,2	2,8
1921	868	549	440	12,0	90,5	2,1
1922	1 084	893	702	10,0	112,0	3,3
1923	1 220	1 246	947	—	179,3	3,2
1924	1 021	1 368	997	—	185,2	3,3
1925	1 147	1 429	1 122	—	200,0 ¹	3,3 ¹

7. Welterdölförderung 1920—1925 (in 1000 t).

Jahr	1920	1921	1922	1923	1924	1925	1913
Ver. Staaten . .	62 188	70 475	82 268	109 310	106 560	113 000	33 126
Mexiko	24 410	28 865	27 620	22 296	20 820	17 000	3 671
Rußland	3 483	4 351	5 237	5 840	6 760	8 200	9 247
Persien	1 685	2 500	3 450	4 300	4 830	5 220	250
Nied.-Indien ⁸⁾ .	2 512	2 631	3 157	3 550	3 830	4 000	1 534
Venezuela . . .	70	215	348	640	1 303	2 830	—
Rumänien . . .	1 034	1 250	1 465	1 622	1 985	2 230	1 885
Peru	373	552	795	850	1 166	1 642	276
Brit. Indien . .	1 000	1 195	1 191	1 240	1 215	1 200	1 107
Galizien	765	763	771	802	847	765	1 088
Argentinien . .	242	261	400	507	700	745	19
Trinidad	281	350	365	455	608	720	71
Japan	285	365	300	267	293	300	259
Ägypten	156	188	178	157	168	180	13
Deutschland ⁹⁾ .	35	29	30	30	59	79	133 ¹⁰⁾
And. Länder . .	225	230	225	200	190	200	20
Zusammen	98 704	114 320	127 800	152 066	151 334	159 211	52 700

[A. 98.]

Fortschritte in der Anwendung künstlicher Kälte im Bergbau.

Von Bergwerksdirektor W. LANDGRAEBER, München.

(Eingeg. 30. März 1926.)

Unser neuzeitlicher Großbergbau sieht sich mehr und mehr genötigt, die in größeren Teufen lagernden nutzbaren Lagerstätten zu erschließen. Neben der Überwin-

⁸⁾ Einschließlich Sarawak. — ⁹⁾ Hannover. — ¹⁰⁾ Einschließlich Elsaß.

dung erheblicher Teufen gilt es die Bekämpfung der Schwierigkeiten, die lockere Ton- und Schwimmsandschichten des Tertiärs, wasserreicher Buntsandstein und gebräuche Salzhatgebilde bereiten. Zu ihrer Meisterung kommen nur Spezialverfahren beim Schachtbau in Frage. Von der Anwendung des Schachtabteufens von Hand unter Zuhilfenahme von Wasserwältigungsmaschinen, des Abbohrens und dem Zementiervverfahren muß in vielen Fällen Abstand genommen werden, da eine Aussicht auf Gelingen unter schwierigen Gebirgsverhältnissen kaum zu erwarten ist. Will man sich daher vor großen unnützen Kosten bewahren, dann kann nur die Anwendung künstlicher Kälte mittels Gefrierverfahren retten.

Dieses geniale Verfahren wurde erstmalig vor 42 Jahren auf der Braunkohlengrube Emilie bei Hennersdorf-Finsterwalde in Anwendung gebracht. Der Erfinder ist der Ingenieur P o e t s c h aus Aschersleben. Kurz vorher war es auf der Braunkohlengrube Archibald und der Steinkohlengrube Michalkowitz versucht worden. Bei beiden wurde es aber nicht durchgeführt. Der erstgenannte Gefrierschacht hatte nur eine Teufe von 38,5 m. Es hat etwa 15 Jahre gedauert, bis man sich an das Abteufen derartiger Schächte bis über 100 m heranwagte. Der erste tiefere Gefrierschacht in Deutschland wurde auf den Kaliwerken Hansa-Silberberg im Jahre 1899 von 62—115 m fertiggestellt. Dann folgte Schacht I der Steinkohlengrube Auguste Viktoria mit 146 m.

Mit welch ungeheuren Schwierigkeiten und Aufwand an Zeit und Geld früher beim Schachtbau gerechnet werden mußte, geht daraus hervor, daß die Abteufarbeiten auf Zeche Rheinpreußen für das Niederbringen des Schachtes I durch Tertiär bis in 80 m Teufe rund 20 Jahre (1857—77) dauerten. Ohne Gefrierverfahren wären wahrscheinlich die nördlich davon sich ausbreitenden Tertiärschichten, die 200—600 m mächtig sind, gar nicht zu bezwingen. Mehr als 20 Jahre vergingen, bis man erstmalig bis in 300 m Teufe vorging. Es war wiederum das klassische Gebiet des Schachtabteufens — der Niederrhein —, wo in der Zeit von 1906—1909 der erste Gefrierschacht auf 350 m gebracht wurde. Ein 400 m tiefer Schacht wurde kurz darauf bei Aachen und dann mit 415 m auf Lohberg bei Dinslacken geteuft. Dann ist es aber wiederum der Niederrhein, wo die Wallachschächte mit 350 m Frosttiefe im Jahre 1913 begonnen wurden. Kürzlich ist eine Spitzenleistung von 560 m in der Campine erzielt worden. Das sind gegen früher ganz gewaltige Errungenschaften.

Das Gefrierverfahren besteht darin, das Gebirge im Bereich des abzuteufenden Schachtes wegen mangelnder Standfestigkeit oder starker Wasserführung vorübergehend in einen für das Abteufen von Hand geeigneten Zustand zu versetzen. Durch Entnahme latenter Wärme und Überführung der Erdfeuchtigkeit in den festen Aggregatzustand wird ein gefrorener Gebirgsklotz erzeugt, in welchem abgeteuft wird. Zu diesem Zwecke werden rings um den Schacht Bohrlöcher ins Erdreich gestoßen. Die Anzahl und Tiefe der Bohrlöcher richtet sich nach der lichten Weite und Tiefe des projektierten Schachtes. Für den ersten oben erwähnten Gefrierschacht von 2,68 m lichter Weite hatte man 12 Bohrlöcher und 11 Ersatzbohrlöcher gestoßen. Der Verlauf der Bohrlöcher muß sorgfältig geprüft werden, da Abweichungen aus der Lotrechten Lücken verursachen, die für eine einwandfreie Schließung der Frostmauer unabsehbare Gefahren im Gefolge haben können. Derartige Lücken müssen durch Ersatzbohrlöcher ausgefüllt werden.

Die Prüfung der Gefrierlöcher geschieht mittels sinnreich konstruierter Lotapparate.

Nach Beendigung der Bohrarbeit werden in die brauchbaren Löcher Gefrierrohrstränge eingebaut, in denen ein Kälteträger — Chlorcalciumlauge — umläuft. Unter der Einwirkung fortgesetzter Abkühlung wächst die Frostmauer radial nach innen und außen. Ist das gesamte Erdreich im Bereich des abzuteufenden Schachtes ausgefroren, so beginnen die eigentlichen Abteufarbeiten. Die Abkühlung des Kälteträgers erfolgt in Gefriermaschinenanlagen, die den Eismaschinen der Brauereien und Schlachthäuser ähneln, nur bedeutend größer sind. In einer der größten Anlagen der Welt — Schachtanlage Wallach bei Wesel — wurden stündlich etwa 3 000 000 negative Calorien, sogenannte Frigorien, erzeugt. Die Werkbesitzer haben somit von vornherein mit einer beträchtlichen Vorbelastung zu rechnen. Infolgedessen wird die Zahl der Schächte möglichst gering bemessen, und es empfiehlt sich, von Anfang an größere Schachtdurchmesser zu wählen. Nur das Großkapital ist instande, derartige Betriebe zu eröffnen.

Das Verfahren galt lange Zeit als sehr unsicher. Noch im Jahre 1907 schrieb Loewe in der Festschrift des Eisenacher Bergmannstages: „Hinsichtlich der Zuverlässigkeit des Gelingens kann sich das Gefrierverfahren nach den bisherigen Erfahrungen des Kalibergbaues mit dem Abbohren nicht messen.“ Das frühere Mißtrauen, das gerade die Werkbesitzer des rheinisch-westfälischen Industriebezirks dem Gefrierverfahren entgegenbrachten, ist durch das erfolgreiche Niederbringen einer ganzen Anzahl tiefer Schächte dieser Art völlig verschwunden.

Vorbereitungen zum Ausfrieren des Erdreichs.

Der Arbeitsvorgang ist bei dem Verfahren des Abfrierens folgender: Nachdem über den Schachtansatzpunkt Klarheit geschaffen ist, beginnt man mit dem Absinken eines Vorschachtes von 5—8 m Tiefe. Der Vorschacht dient zur Aufnahme der Standrohre für die Gefrierbohrlöcher sowie zur Unterbringung des Verteilungs- und Sammelrohres für den Kälteträger. Der Durchmesser des Vorschachtes wird so bemessen, daß genügend Raum für die Aufnahme der Gefrierrohre, der Ringleitungen für die Lauge und zur Aufnahme von Ersatzbohrlöchern vorhanden ist. Über dem Vorschacht wird der Schachturm, der zugleich Bohrrüst ist, errichtet. Dieser muß für die vielfachen Arbeiten, die in ihm ausgeführt werden, vor allem genügend Platz aufweisen und ausreichend kräftig konstruiert sein. Man baut den Turm fast immer aus Holz. In neuerer Zeit verwendet man neben Schachttürmen mit quadratischer oder rechteckiger Grundfläche auch solche von achteckiger Form. Es sollen durch diese Anordnung größere unbenützte Ecken vermieden werden. Meist wird an ihm noch ein Ausbau vorgesehen, in dem die Bohraparate mit der Antriebsmaschine aufgestellt werden. In dem Turm selbst stehen neben diesen noch einige Pumpen, Spülpumpen, deren Anzahl der jeweiligen Bohrvorrichtung entspricht, ferner Dampfkabel und Handkapsel. Außerdem befindet sich darin noch ein Raum für Bohrmeister und Aufsichtsbeamte.

Die Herstellung der Gefrierbohrlöcher.

Das Bohren der Gefrierlöcher geschieht fast immer mittels Meißelbohrer unter Anwendung von dicker Spülung. In schwimmendem Gebirge, wo sich die Nachbarlöcher häufig gefährden, ist nur mit Dickspülung zu bohren. In losem, beweglichem Gebirge, in dem größere Gerölle vorkommen, ist das senkrechte Stoßen mit großen Schwierigkeiten und Unsicherheiten verbunden. Zur Erzielung eines möglichst senkrechten Verlaufs der Bohrlöcher wird

stoßend gebohrt. Als Bohraparate verwendet man heute meistens den sogenannten Schnellspülschlag mit federnd gelagertem Bohrschwengel. Man erzielt hierdurch kurze, scharfe Schläge des Meißels von bedeutender Wirkung. Die Anzahl der in der Minute ausgeführten Schläge kann 60—80 betragen; die Bohrung schreitet dabei rasch fort. Durch besonders kräftige Pumpen, die den Spülstrom gegen die Bohrlochsohle pressen, wird die Wirksamkeit in lockerem Gebirge noch erhöht. Gewöhnlich arbeiten drei Apparate zu gleicher Zeit, von denen jeder in losen Schichten 60—75 m und in festen 10—15 m in einem Arbeitstag leistet. Das Bohrmehl wird durch Wasserdruck aufgespült. Ein Herausziehen des Bohrers ist nur beim Schärfen notwendig. Der Gestängenachlaß geschieht mittels Sprungschlüssel, wodurch ein Abbohren ganzer Gestänge ermöglicht wird. Die heutige Bohrtechnik ist sehr leistungsfähig. Bohrfortschritte von 200 m in 24 Stunden können oft erreicht werden. Es ist am Niederrhein vorgekommen, daß mit drei Apparaten 250 m in einem Tage fertiggestellt wurden.

Der Durchmesser der Schächte wird möglichst groß, in der Regel nicht unter 6 m genommen. Der Vorschacht bekommt einen Durchmesser von 10—15 m. In ihm werden rings um den projektierten Schacht herum auf einem zum Schacht konzentrischen Kreise von etwa 8—13 m eine ganze Anzahl Gefrierbohrlöcher angesetzt. Der Bohrlochkreisdurchmesser ist im allgemeinen doppelt so groß wie der Schachtdurchmesser. Die normale Anzahl der Bohrlöcher für Schächte von 4—6 m Durchmesser beträgt 25 bis 40, ohne Ersatzlöcher. Sie werden so bemessen, daß ihr Abstand 0,75—1,20 m, also durchschnittlich 1 m beträgt. Nimmt man größere Abstände, so ist die Sicherheit des Gelingens, eine geschlossene Frostmauer zu erhalten, nicht gegeben. Die um die Rohre sich bildenden Frostkreise können sich dann nicht nähern, selbst wenn sich die Kälte noch so sehr steigert. Es wird allmählich in der Ausstrahlung der Kälte von jedem Gefrierrohre aus ein Beharrungszustand eintreten. Außer den Gefrierlöchern wird noch ein Mittelloch innerhalb der Schachtscheibe angesetzt. Früher wurden außer den äußeren Löchern noch einige mehr, 3—4, innerhalb des Schachtes niedergebracht. Heute wird wegen der dadurch entstehenden Hindernisse und Gefahren für das Schachtabteufen davon abgesehen. Die äußere Schachtwand bleibt, falls die Bohrlöcher senkrecht niederkommen, noch etwa 2 m von den Gefrierrohren entfernt.

Lotung der Gefrierlöcher.

Nach Erreichen der erforderlichen Teufe, die gewöhnlich bis 2—3 m unter die Sohle des abzuteufenden Schachtes gehen muß, werden die Bohrlöcher gelotet. Es ist empfehlenswert, den Durchmesser der Bohrlöcher so vorzusehen, daß es möglich wird, dieselben erforderlichenfalls um etwa 20—30 m zu vertiefen, um den Frostkörper weiter nach unten ausdehnen zu können. Auf ein möglichst senkrechtes Niederbringen der Löcher kommt fast alles an. Dazu ist vor allen Dingen zunächst eine ganz genaue, senkrechte Führung der ersten Bohrröhre von oben notwendig. Um diese zu erzielen, wird vor Beginn des Bohrens für je ein Bohrloch ein Standrohr, Bohrführungsrohr, mit größter Sorgfalt lotrecht eingebaut. Dieses Rohr reicht etwa 25 m tief ins Erdreich. Besonders bei ungünstigen Gebirgsverhältnissen darf man sich vor größter Mühe, es lotrecht zu stellen, nicht scheuen. Obwohl die Anwendung der Standrohre ein senkrechtes Niederbringen erleichtert, wird es doch selbst bei langsamem, vorsichtigen Bohren nur sehr selten erreicht. Schon in 100 m Tiefe sind manchmal Abweichungen bis zu einem Meter zu beobachten. Eine größere Zunahme der Abweichung hat zur Folge, daß die Abstände benachbarter Bohrungen unregelmäßig wer-

den, was bei dem späteren Schließen der Frostmauer und bei der Bildung des gesamten Frostkörpers zu Störungen Anlaß geben kann. Abweichungen nach außen sind, in normalen Grenzen gehalten, meistens günstig, da sie den Gefrierkreis erweitern und den gefrorenen Gebirgsklotz vergrößern. Eine Abweichung nach innen führt die Rohre leicht in die Schachtscheibe, wo sie beim Abteufen hinderlich sind und leicht beschädigt werden. In Teufen, in denen die Gefrierrohre weit auseinanderstehen, wird sich die Frostmauer bedeutend langsamer bilden und auch später verhältnismäßig dünn bleiben. Diese Stellen sind durch Frostmauerbrüche gefährdet. Je größer die Teufe ist, desto größer wird der auf der Frostmauer lastende Druck, desto größer ist die Gefahr des Durchbrechens. Um die Erzielung einer genügend starken Frostmauer zu sichern, ist zunächst die Abweichung der Gefrierlöcher zu ermitteln. Viele Mißerfolge beim Gefrierschachtbau früherer Zeiten sind fast nur darauf zurückzuführen, daß der genaue Verlauf der Bohrlöcher mangels geeigneter Instrumente nicht genügend festgestellt werden konnte. Mit der Brauchbarkeit der Lotapparate steht und fällt die Schachtbautechnik nach dem Gefrierverfahren. — Man bedient sich bei einigen modernen Lotapparaten eines Pendels, das in einem Lotzylinder mit einem Feinmechanismus zur Aufzeichnung der Ausschläge in der jeweiligen Stellung in Verbindung steht. Das Lotungsverfahren einschließlich Berechnung und Kartierung gestaltet sich heute sehr einfach. Aus den Ausschlägen und der Länge des Pendels wird die lineare Abweichung bestimmt. Dazu sind geeignete Apparate geschaffen, mit deren Hilfe auch diese sonst so zeitraubende Tätigkeit schnell vonstatten geht. Die größte Schwierigkeit beim Loten besteht in der Orientierung der Abweichungen gegen eine bestimmte Anfangsrichtung. Das einfachste für die Praxis ausreichende Hilfsmittel ist das feste Gestänge, an welchem der wasserdicht verschlossene Lotzylinder aufgehängt wird. Die einzelnen Teile des Gestänges sind durch Kreuzgelenke oder dergleichen miteinander verbunden. Die Anfangsrichtung wird hierbei am genauesten eingehalten, und die Verdrehung auf ein Mindestmaß beschränkt. Durch Wiederholungen der Lotungen mit umgekehrtem Gestänge kann auch dieser Einfluß ausgemerzt werden. Es sei noch erwähnt, daß bei dem ersten tieferen Gefrierschacht — Schacht I Borth der Solvay-Werke — mit dem Erlingenhagen'schen Lotapparate gelotet worden ist, bei Schacht II derselben Anlage sowie bei den Schächten der Anlage Wallach mit dem Gerhardschen Lotapparate. Die Resultate waren befriedigend. Die gewöhnlichen Magnetnadelapparate haben sich in den Gefrierrohren zur Richtungsbestimmung als ungeeignet erwiesen.

Mit großem Interesse verfolgen die Schachtbautechniker heute den Bohrlochneigungsmesser von Anschütz-Hausmann mit dem Kreiselkompaß, bei dem ein rotierender Kreisel die Rotationsachse in die Richtung einer festen in der Natur gegebenen Linie, den astronomischen Meridian, stellt. Im übrigen sei noch bemerkt, daß es heute gelingt, den Verlauf der Bohrlöcher bis in 1000 m Teufe zu ermitteln.

Ist durch die Lotung eine zu große Abweichung von der Senkrechten festgestellt, so sind neben dem schiefen Bohrloch, das entweder ganz oder von einer gewissen Tiefe ab unbrauchbar ist, Ersatzlöcher notwendig. Jede Lücke im Gefrierlochkreis hindert die Bildung eines geschlossenen Frostkörpers und muß durch ein Ersatzbohrloch ausgefüllt werden. Abweichungen von 1,5–2 m von der Lotrechten können noch als zulässig angesehen werden, je nach Teufe und Gebirgsart auch wohl etwas größere. Für Schacht I der Anlage Borth waren neun und beim Schacht I der Anlage Friedrich Heinrich acht neue Löcher erforder-

lich. Durchschnittlich ist mit etwa 25 % Ersatzbohrlöcher zu rechnen, unter Umständen auch mit mehr.

Herstellung der Gefrierrohrstränge und Laugenleitungen.

Nach Beendigung der Bohrarbeit werden in die brauchbar befundenen Bohrlöcher die Gefrierrohre eingebaut, zuvor werden die Futterrohre, soweit es noch möglich ist, gezogen. Als Gefrierrohre verwendet man etwa 120 mm weite Röhren aus weichem Eisen. Der Durchmesser schwankt. Weiches Eisen wird wegen der Ausdehnungsbewegungen, die durch den Temperaturwechsel hervorgerufen werden, bevorzugt. Ihre Wandstärke beträgt 6–9 mm und ihre Länge 6–8 m. Ein sicherer Einbau ist ein Hauptfordernis für das Gelingen des Abfrierens. Die Verbindung der einzelnen Rohre miteinander muß sehr sorgfältig geschehen, um die gefürchteten Laugenverluste zu vermeiden. Größtmögliche Dichtigkeit muß erreicht werden, da die in das Gebirge entrinnende Lauge dessen Gefrierfähigkeit ganz außerordentlich vermindert. Das untere Rohr des Gefrierrohrstranges ist mit einem Abschlußboden versehen. Nach beendetem Einbau wird jedes Rohr 2–3 Stunden hindurch einem angemessenen erhöhten Probedruck ausgesetzt.

In die Gefrierrohre werden dann die aus Stahl hergestellten Fallrohre eingelassen. Ihr Durchmesser beträgt 30–35 mm, die Länge jedes einzelnen 5–7 m. Die Tragvorrichtung besteht meist aus Kreuzstufen.

Infolge starker Abkühlung bei tiefen Temperaturen ziehen sich die Gefrierrohre zusammen. Sie verkürzen sich um einen merkbaren Betrag und würden, von enganliegendem Gebirge festgeklummt, leicht zerreißen, wenn nicht Vorkehrungen getroffen würden, dieses zu verhindern. Laugenverluste wären die unausbleiblichen Folgen. Um derartige Rohrbrüche zu vermeiden, hat man Kompensationsreinrichtungen eingeschaltet in Gestalt elastischer Verbindungen. Für Teufen bis etwa 300 m genügen drei solcher Spannungsausgleicher.

Zur Erkennung und Verhütung von Laugenverlusten werden selbsttätige Vorrichtungen in die Laugenleitungen über Tag eingebaut, die das Entweichen anzeigen und zugleich durch automatisches Absperren der Laugenpumpen dieses sofort verhindern.

Neuerdings wird anstatt im Sammelring der Zusammenfluß der Lauge in Sammelkästen bewerkstelligt. Diese müssen dann, um Gefälle zu den Kühlbottichen im Eismaschinenhaus zu erhalten, höher als der Sammler angebracht werden.

Die Gefriermaschinenanlage.

In der Zeit, während der die Gefrierlöcher gestoßen, gelotet und für den Gefrierprozeß fertig hergerichtet werden, wird die Eismaschinenanlage über Tage aufgebaut. Ihre Größe richtet sich nach dem Durchmesser und der Teufe des herzustellenden Schachtes. Im wesentlichen besteht sie aus den Kompressoren, den Kondensatoren und den Refrigeratoren. Als Antriebskraft wird Dampf oder Elektrizität verwandt, wobei dem Dampfbetrieb, besonders wenn die Stromlieferungen in abseits liegenden Gebieten nicht ganz regelmäßig geschehen, der Vorzug gegeben ist. Bei Doppelschachtanlagen liegt das Gefriermaschinenhaus zweckmäßig zwischen den beiden Schachttürmen. Der Kälteerzeugungsvorgang beruht auf dem bekannten Gesetz, daß komprimierte und darauf wieder gekühlte Gase sich bei der Druckentlastung erwärmen und die Verdunstungswärme ihrer Umgebung entziehen. Es sind also Maschinenanlagen, in denen durch Saug- und Druckpumpen Gase, meistens kondensierbares Ammoniak, angesaugt, zusammengepreßt, alsdann abgekühlt und ver-

flüssigt werden, um nachher durch Verminderung des Druckes infolge Erweiterung des Leistungsquerschnittes wieder zur Entspannung gebracht zu werden. Es findet also im wesentlichen nichts anderes statt, als ein Verdichten, Abkühlen, Sichentspannenlassen von Kälteerzeugungsgasen, die in geeigneter Weise mit einem Kälte Träger, den man in das Erdreich einläßt, zwecks Abkühlung in Berührung gebracht werden. An Stelle von Ammoniak kann Kohlensäure als Kälteerzeuger verwandt werden. Man unterscheidet daher Ammoniak- oder Kohlensäure- oder auch Ammoniak-Kohlensäuremaschinen. Bei letzteren bedient man sich alsdann bis zu einem gewissen Grade der Ammoniakmaschinen lediglich zur Unterkühlung oder zur sogenannten Tiefenkühlung der vorgekühlten Kohlensäure. Nach dem Ammoniakverfahren können Temperaturen bis zu -27° erzeugt werden und bei Kohlensäuremaschinen solche bis zu -55° .

Eine Schachtbaueisgefriermaschinenanlage von 3 000 000 negativen WE besteht aus 6 Ammoniak- und 6 Kohlensäuredoppelaggregaten von Kompressoren. Den Wirkungsgrad einer Gefriermaschinenanlage zu bestimmen, ist wohl noch niemals praktisch durchgeführt worden. Er dürfte auch wohl kaum mehr als 60—70 % betragen.

Bezüglich des Kälte Trägers, der die Kälte ins Erdreich übertragen soll, kommt es dem Gefriertechniker vornehmlich darauf an, ein Kältemittel zu wählen, das einen tiefen Gefrierpunkt besitzt, leicht beweglich ist und große Wärmeaufnahme-fähigkeit besitzt. Gase (z. B. Kohlensäure oder Luft) anzuwenden, ist einmal wegen der geringen Wärmekapazität nicht empfehlenswert, sodann würden bei tiefen Schächten derartig große Kühlmaschinen benötigt, wie sie kaum hergestellt werden könnten. Schon der Umstand, daß bei Anwendung von Luft etwa 4 cbm benötigt würden, um dieselbe Menge Wärmeeinheiten zu bekommen, wie bei Anwendung von etwa 0,001 cbm Chlormagnesiumlösung, dürfte zeigen, daß Gase zu diesem Zwecke kaum in Frage kommen. Man verwendet gern als Lauge eine 28 % ige Chlorcalciumlösung mit einem Gefrierpunkt von -40° .

Kälteerzeuger wie Kältebringer sollen möglichst ohne Verluste im Umlauf bleiben. Wenn hierbei von „ohne Verluste“ gesprochen wird, so werden stillschweigend die praktisch unvermeidlichen Verluste nicht mitgerechnet. Eine Gefriermaschinenanlage ohne Verluste an Kältegas arbeiten zu lassen, ist wegen der mancherlei eintretenden Störungen nicht durchführbar. Trotzdem sind sie bei ordnungsgemäß geführtem Betriebe sehr gering. Sind mehrere Kompressionsanlagen vorhanden, die gemeinsam für die Abkühlung eines Kälteerzeugers arbeiten, so kommt es vor, daß infolge von Ausbesserungen hin und wieder ein oder mehrere Kompressoren stillgesetzt werden müssen. Um nun jedesmal eine Unterbrechung des gesamten Betriebes zu vermeiden, schaltet man die einzelnen Aggregate nebeneinander.

Für das Abteufen des Schachtes I der Anlage Borth (bis 330 m Gefrierschacht) wurde eine Eismaschinenanlage mit Ammoniakkompression benutzt, die stündlich 750 000 negative WE erzeugte. Sie bestand aus 4 Kompressoren, welche von zwei Dampfmaschinen von 180 PS angetrieben wurden. Auf der von dieser Anlage nicht sehr weit entfernten Schachtanlage Friedrich Heinrich (Gefrierschachteufe 315 m) erzeugten die Eismaschinen stündlich 850 000 negative WE. Zu einem Maschinenaggregat von 1 000 000 bis 1 500 000 WE stündlicher Leistung werden 400—500 PS an Kraftbedarf und etwa 1000—1400 qm Kühlfläche der Kondensatoren zur Abkühlung des in den Kompressoren gepreßten und erwärmten Kälte-gases benötigt, ferner etwa 300—350 cbm Lauge, die in den Verdampferbottichen an Verdampferschlangen mit einer Kühl-oberfläche von an-

nähernd 1000—1400 qm abgekühlt werden. Der Betrieb einer Ammoniakemaschinenanlage mit einer stündlichen Leistung von 7 000 000 WE kostet täglich 400 bis 500 Mark.

Handelt es sich darum, möglichst tiefe Temperaturen zu erzielen, sei es um Steinsalzlauge oder Gebirge mit hohen Wassertemperaturen zum Gefrieren zu bringen, so bedient man sich der Kohlensäure-Ammoniak-kältemaschinen, bei der die nach der Kompression auf etwa $+15^{\circ}$ abgekühlten Kohlensäuregase bis auf -10 bis -12° abgekühlt werden. Dabei ist es möglich, den Kälte Träger bis auf Temperaturen von -55° zu bringen. Man kann die Kompressoren so arbeiten lassen, daß sie die mit 8 bis 15 Atm. aus der Saugleitung angesogene Kohlensäure entweder sofort bis auf etwa 60 Atm. pressen, oder man nimmt die Pressung in zwei Stufen, in einem Niederdruck- und einem Hochdruckkompressor vor, indem man zuerst bis auf etwa 30—35 Atm. und dann bis auf etwa 60 Atm. komprimiert. Der Betrieb einer Kohlensäureanlage für eine stündliche Leistung von nur 200—300 000 WE kostet schon täglich 400—500 Mark.

Der Gefriervorgang.

Während nun das Erdreich wochen- und monatelang unter dauernder Kältezuführung gehalten wird, wird ihm nach und nach die Eigenwärme entzogen. Nimmt man z. B. an, daß in 500 m Teufe eine Temperatur von etwa $+17^{\circ}$ zu erwarten wäre, so würden diese alsbald durch Einführung von Kälte bis auf mindestens -15° zu bringen, also um mehr als 30° abzukühlen sein. Nach den heutigen Erfahrungen ist dazu für einen Schacht von 6 m lichter Weite eine Eismaschinenanlage nötig, die stündlich mindestens 1 000 000 negative WE erzeugt.

In Schichten mit geringer Durchlässigkeit geht das Abfrieren ohne Störung vonstatten. Es ist selbstverständlich, daß beim Anfahren von Wasseradern durch die Gefrierrohre bei der Abkühlung Wasserbewegung entsteht; abgekühltes Wasser sinkt in die Tiefe und wärmeres steigt auf. Diese Bewegung dauert so lange an, bis bei $+4^{\circ}$ seine größte Dichtigkeit erreicht ist. Durch derartige Umstände tritt natürlich eine unangenehme Verzögerung in der Bildung der Frostmauer ein, weil meistens eine erhebliche Kälteentziehung verursacht wird. Unüberwindlich sind derartige Hindernisse nicht. Gefährlich sind unterirdische Wasserausströmungen. Zum Glück gehören sie zu den Seltenheiten. Sie können aber künstlich erzeugt werden, wenn z. B. ein Schacht oder ein Grubenbau, aus welchem fortwährend Wasser gefördert wird, einem in der Nähe befindlichen Gefrierschacht das diesen umgebende Wasser entzieht oder es in Bewegung bringt. Da die zugeführte Kälte selbstverständlich mit entweicht, ist Eisbildung dann ausgeschlossen.

Zu Beginn und in den ersten Wochen des Gefrierbetriebes fällt die Temperatur sehr schnell. Nach einem längeren Stillstand der durch das Gefrieren des Wassers bedingt ist, geht der Temperaturfall langsam weiter, bis man beim tiefsten erreichbaren Kältegrad angelangt ist, der bei ungefähr -15 bis -20° liegt. Ist der Gefrierprozeß in vollem Gange, so tritt bei den gebräuchlichsten Anlagen die Lauge mit durchschnittlich -25° ein und mit -20° wieder aus. Diese Zahlen sind selbstverständlich Schwankungen von einigen Graden unterworfen. Gewöhnlich beträgt der Unterschied in der Temperatur der ein- und austretenden Lauge 3—6°. Er wird bis zur Fertigstellung des Schachtes möglichst eingehalten. Ein normaler Verlauf des Gefrierbetriebes findet erst dann statt, wenn beim Ein- und Ausfluß der Lauge fortwährend gleiche Unterschiede in der Temperatur bestehen. Für die

Temperaturbeobachtung ist jedes Gefrierrohr mit einem Ansatz zum Einbringen eines Kontrollthermometers versehen. Die größte Kälteübertragung an das Gebirge müßte eigentlich dort sein, wo die kalte Lauge aus den Fallrohren in die Steigrohre übertritt, also auf der Bohrlochsohle. Das ist aber nicht der Fall, da die einfallende Lauge bereits auf ihrem Wege nach unten einen Teil ihrer Kälte durch die Wandung der Fallrohre an die aufsteigende Lauge abgibt. Die abwärts fließende Lauge erwärmt sich somit schon erheblich, ehe sie unten ankommt. Dadurch kommt es, daß die Kälteübertragung an das Gebirge im mittleren Teil der Fallrohrtour am größten ist. Es wäre unter diesen Umständen sogar denkbar, daß, bei genügend tiefen Gefrierschächten, die abfallende Lauge, wenigstens zeitweise, unten mit einer Temperatur von über 0° austräte und sich auf ihrem Wege nach oben, also als aufsteigende Lauge, an der abfallenden wieder abkühlte. In der Praxis war man noch nicht in der Lage, diese vermutlichen Erscheinungen zu prüfen. Dieser Umstand kann bei absatzweisem Gefrieren des Gebirges sehr verhängnisvoll werden, z. B. beim Senken der Fallrohre um einen zu großen Betrag. Nach beendeter Bildung des Frostkörpers ist nur noch so viel Kälte notwendig, als zur Erhaltung der Frostmauer dient.

Von den zu gefrierenden Gebirgsschichten erstarrt entsprechend der Wärmeleitungsfähigkeit der Schwimmsand am schnellsten, weniger schnell sandiger Ton und am schwersten reiner Ton. Dem Fortschreiten des Ausfrierens sehr lästig ist das Vorkommen von bitumenhaltigem Gebirge und Braunkohlen. Braunkohlen sind ein sehr schlechter Wärmeleiter, sie setzen der Ausdehnung der Frostwirkung zwar großen, aber doch überwindbaren Widerstand entgegen. Von allen auftretenden und durch Eis verkitteten Schichten besitzt der mit Wasser gesättigte unregelmäßig gekörnte Sand die größte Druckfestigkeit, dann folgen sandiger Ton und reiner Ton. Mit zunehmender Kälte wächst dies natürlich. Reines Eis zeigt die geringste Druckfestigkeit. Letztere beträgt bei einer Temperatur von -14° für wasserhaltigen Sand etwa 130 kg/qcm , für reinen Ton nur die Hälfte, etwa 65 kg/qcm , und für sandigen Ton etwa 80 kg/qcm . Ganz feiner Sand, also reiner Schwimmsand, hält auch in gefrorenem Zustand nur wenig Druck aus. Seine gleichmäßige Zusammensetzung in der Korngröße läßt ein inniges Ineinandergreifen der Sandkörner nicht in dem Maße zu, wie bei gröber gekörntem Zustand mit ungleichmäßigen Bestandteilen. Reiner Ton kommt auch nur selten vor. Meistens besitzen die Tonbänke einen mehr oder weniger erheblichen Einschlag an Sand. Bei festem Gebirge, wie im Buntsandstein, wo Wasser nur auf Spalten vorhanden ist, kommt kaum größerer Gebirgsdruck vor, sondern hydrostatische Pressung. Hier dürfte nach Ansicht Kundiger die Frostmauer schon stark genug sein, wenn die Wasserklüfte ausgefroren sind. Ein Herauspressen der Eiszapfen ist wegen des großen Reibungszustandes kaum zu befürchten.

Die Form der Eissäulen, die sich um jedes Gefrierrohr bilden, ist infolge der ungleichartigen Zusammensetzung der zu durchteufenden Schichten in den verschiedenen Teufen und wegen ihrer wechselnden Feuchtigkeitsgehalte außerordentlich verschieden. In den oberen wie in den unteren Teilen ist ihre Stärke nur gering. Sie nimmt nach der Mitte hin zuerst langsam, dann aber schneller zu, um nach unten hin wieder schwächer zu werden. Ebenso verhält es sich mit dem gesamten Frostgebilde, dem Eiskörper. Er ist in der Mitte stärker als oben und unten, und zwar hat er etwas unterhalb der Mitte seine größte Ausdehnung. Der Boden des Frostkörpers zeigt unten eine Wölbung, etwa wie beim Boden einer Flasche. Diese Erscheinung kann dem Gelingen des Abteufens dann gefähr-

lich werden, wenn die Gefrierrohre nicht tief genug in das feste wasserabschließende Gebirge eingelassen sind, weil dadurch leicht Frostmauerbrüche entstehen können, ehe der Schacht fertig geteuft ist. Es empfiehlt sich daher, da die Ausbuchtung 3—4 m beträgt, die Gefrierlöcher wenigstens einige Meter in das Liegendgestein einzulassen. Bei Schacht I der Anlage Borth ging die Frostwirkung nur 1,5 m unter die Gefrierrohre.

Während hohe Gebirgswärme das Ausfrieren erheblich verzögert, hat hoher Druck, d. h. Steigerung des hydrostatischen Druckes, selbst um 50 Atm. nur geringen Einfluß auf die Gefrierfähigkeit des Gebirges. Ein Sinken des Gefrierpunktes tritt bei einem Wechsel der Spannung durch Erhöhung des Druckes natürlich ein. Jedoch ist das Maß der Steigerung der Gefriertemperatur bei der Eisbildung so gering, daß es für die Durchführung des Gefrierverfahrens kaum in Frage kommt, und für die Praxis keine Bedenken hat. Ein viel größerer Feind des Gefrierverfahrens ist ein starker Salzgehalt des Gebirgswassers. Mancher Schacht konnte wegen dieses Übelstandes mittels Abfrierens bei den gebräuchlichen Temperaturen kaum fertiggestellt werden, wenn sein Gelingen nicht ganz scheiterte. Nur die Anwendung des Tiefkälteverfahrens kann hier zum Ziele führen.

Die Zeitdauer der Gefrierperiode, also die Zeit von der Inbetriebsetzung der Gefrieranlage bis zum Beginn des Abteufens ist verschieden. Sie hängt von der Temperatur und der Menge der Gefrierflüssigkeit ab, die in den Gefrierrohren umläuft, ferner von der Reinheit des Gebirgswassers (Gehalt an Salz und organischen Stoffen). Die Gefrierperiode wird durch Temperaturmessungen in der Lauge und durch die bereits erwähnten Wasserstandsbeobachtungen im Mittelloch, in welches selbstverständlich keine Gefrierrohre eingelassen werden, dauernd und sorgfältig überwacht. Erst nachdem man gefunden hat, daß die Kälteabgabe an das Erdreich nur noch gering ist, wird mit dem Abteufen begonnen. Erfahrungsgemäß dauert die Gefrierzeit bei Schächten von 100—200 m zwei bis drei Monate. Bei größeren Teufen 400—600 m kann nach Ablauf von etwa 150—200 Tagen, je nach den vorliegenden Verhältnissen, die Frostmauer als geschlossen betrachtet werden.

Die Ansichten über die Zweckmäßigkeit des absatzweisen Ausfrierens des Gebirges, wie sie zuerst auf „Schieferkante“ angewandt wurde, um mit den Abteufarbeiten nicht bis zur Fertigstellung des gesamten Eiskörpers warten zu müssen, gehen noch auseinander. Die Erfahrungen im absatzweisen Abfrieren sind überhaupt noch nicht abgeschlossen, da sich bei seiner Anwendung immer neue Schwierigkeiten zeigten. Am billigsten und sichersten ist zweifellos, in ganzer Schachtteufe frieren zu lassen. — Die Belassung eines weichen Kerns in der Mitte des Schachtes wird meistens durch die natürlichen Verhältnisse vereitelt. In fast allen Fällen ist der ganze Gebirgsklotz schon in geringer Teufe gefroren.

Die Abteufarbeiten.

Das Abteufen im gefrorenen Erdreich geschieht unter dem Schutze der Frostmauer auf der Sohle in der gewöhnlichen Weise von Hand und ist vollkommen durchgebildet. Die Durchschnittsleistung einschließlich Ausbauen in Tübbings beträgt 1 m täglich. Die Temperatur auf der Schachtsohle beträgt etwa -7 bis -8° . Der Einbruch wird durch Schießarbeit gewonnen. Die Stöße sollten möglichst ohne Anwendung von Sprengungen durchgeführt werden, um die Frostmauer vor zu starken Erschütterungen zu bewahren. Ein verllorener Ausbau ist während des Abteufens nicht unbedingt erforderlich, da die Frostmauer selbst die feste Wand bildet. Abgelöste Stücke frieren,

wenn sie nicht beraubt werden, fast alle wieder fest. Es hat dies den Vorteil, daß man nicht immer auf Durchbrüche gefaßt sein muß. Um Durchbruchgefahren an zweifelhaften Stellen zu vermeiden, hängt man entweder Tübbingsringe vorübergehend unter oder baut von vornherein mit Unterhängefübbings aus. Eine Abteufwasserhaltung ist ebenfalls nicht notwendig. Unter dem Schutze der Frostmauer wird der Abschluß des Schachtes im geeigneten Gebirge vollständig sicher hergestellt, so daß ein Unterspülen beim Sumpfen des Schachtes, wie es beim Senkschachtverfahren vorkommen kann, so gut wie ausgeschlossen ist.

Ein Gefrierschacht von großer Tiefe ist in tieferen Schichten leicht der Gefahr von Frostmauerbrüchen mit Schachtverschlammungen ausgesetzt. Ihre Ursache kann verschiedener Art sein. Zu ihrer Vermeidung sind während der Gefrier- und Abteufzeit Vorkehrungen zur Beseitigung zu treffen. Aber auch während des Abteufens treten noch eine ganze Reihe von Schwierigkeiten auf, die das Gelingen der Arbeit gefährden können. Sie bestehen vorwiegend in der Bekämpfung der schädlichen Einwirkung des Gebirgsdruckes auf die Schachtstöße, wenn diese vor dem Einbauen der Tübbings frei und offen stehen. Wie bereits gezeigt wurde, ist die Druckfestigkeit der gefrorenen Gebirgsschichten sehr verschieden; demnach wird auch die Frostmauer verschieden widerstandsfähig sein. Tonige Schichten besitzen bekanntlich bedeutend geringere Festigkeit als Sand. In den Sanden mit reichem Wassergehalt ist diese größer als in solchen, die nur geringe Feuchtigkeit aufweisen. Grober Kies hält sogar Belastungen bis über 300 kg/qcm aus. Schwimmsande und Trieb-sande haben wohl eine große Festigkeit, widerstehen aber nur einer bedeutend geringeren Belastung. Die Befürchtung, daß trockene Sandschichten dadurch, daß sie sich nicht zum Gefrieren eignen, ein Gelingen des Abteufens nach dem Gefrierverfahren gefährden, ist belanglos. Sie sind für den Schachtbau ungefährlich, weil ihnen wegen Wassermangel auch der Gebirgsdruck fehlt.

Die freistehende Gebirgsmauer wird auf Druck und Biegung beansprucht. Der Schachtstoß verhält sich wie ein gespannter Bogen; steht er längere Zeit hindurch offen, so beginnt er sich auszubauchen und nach innen zu wölben. Anfangs widerstrebt die Kohäsion des Gesteins noch einem Ablösen einzelner Gesteine. Nach einiger Zeit schälen sich flache bis mehrere Quadratmeter große Scherben von 5 bis 20 cm Stärke ab. Die Stücke fallen nicht ab, sondern bleiben in einer Stelle am Stoß haften. Mit zunehmender Teufe kommen diese Erscheinungen häufiger vor.

Stärke der Frostmauer.

Die Frostmauer muß so stark sein, daß sie selbst bei ihrer größten Beanspruchung dem Gebirgsdruck mit Sicherheit standhalten kann. Die größte Beanspruchung erfährt sie, wenn auf größere Teufen nicht sofort ausgebaut wird, sondern die Stöße einige Zeit frei stehen. Zu sehr seltenen Ergebnissen ist man bei den Berechnungen der Frostmauerstärke gekommen. Zwar ist die statische Frage nach der Mindeststärke, Beanspruchung und Spannungsverteilung durch die Belastung der Frostmauer verschiedentlich zu lösen versucht worden. Es sind Erfahrungs- und Näherungsformeln aufgestellt, aber ihre Grundlagen, sowohl die physikalischen wie die statischen, sind nicht immer ganz widerspruchsfrei geblieben. Zu viele unvorhergesehene Faktoren werfen die Rechnung über den Haufen. Jeder Versuch, den auflastenden Druck aus den Faktoren Teufe und lichte Weite des auszubauenden Schachtes, spezifischem Gewicht des losen Gebirges und spezifischer Druckfestigkeit des Eiskörpers zu errechnen, scheitert daran, daß die Gestalt der Frostmauer, weil sie von dem gegenseitigen

Verlauf der Gefrierlöcher abhängt, unregelmäßig ist. Unsere Kenntnis des Erddruckes ist zudem noch unsicher. Es sei beiläufig bemerkt, daß er 1,2—1,8 mal so groß angenommen wird, wie der hydrostatische Druck. Bisher ist man lediglich auf praktische Erfahrungen angewiesen. Die früher gehegte Befürchtung, wonach infolge des auflastenden Druckes der Schacht unterhalb der gefährlichen Teufe, die schon in geringer Tiefe eintreten sollte, zusammengehen würde, hat sich glücklicherweise nicht bestätigt. Es kommt eben außer den oben angegebenen Faktoren noch ein anderer in Betracht, der vorwiegend darauf beruht, daß plastische Körper in hohem Maße Formveränderungen vertragen, ohne den Zusammenhang der einzelnen Bestandteile aufgeben zu müssen. Aus der tektonischen Geologie sind solche Erscheinungen von Faltungen von Schiefern und Sandsteinen, sowie bei Gletschern zur Genüge bekannt. Genau dieselben plastischen Eigenschaften besitzt eine Frostmauer, die sich wohl langsam durchbiegt, aber so leicht nicht bricht. Würde man aber den Querschnitt des Schachtes von Zeit zu Zeit nachmessen, so würde man bald eine Verengung feststellen. Die Frostmauer verändert dabei ihre Form, sie schmilzt um, ohne ihre Gleichgewichtslage zu verlieren. In welcher Teufe eine normale Frostmauer aus losen Bestandteilen beginnt, plastisch zu werden, wo also, mit anderen Worten, die Gleitkörner ihre Grenze erreichen, steht noch nicht fest, obwohl reines Eis schon bei 20 Atm. diese Eigenschaft aufweist. Wenn schon an weniger tiefen Stellen im Schacht Gleitererscheinungen auftreten, so ist eben die Frostmauer zu schwach. An solchen Stellen vermeidet man am besten größere Durchbiegungen dadurch, daß man die Schachtstöße nicht zu lange freistehen läßt. Es empfiehlt sich hier, sofort einen fertigen Ausbau durch Unterhängefübbings einzubringen und ihn sorgfältig mit Zement zu hinterfüllen. Frostmauerstärken von 3—5 m für Teufen von 300—500 m erweisen sich als stark genug. Sehr empfindliche Stellen befinden sich in der Frostmauer dort, wo ein Wechsel in der Gebirgsart stattfindet, z. B. beim Übergang von Sand zum fetten Ton, oder von lockerem Tertiär zum festen Buntsandsteingebirge. An solchen Punkten kann infolge der ungleichen Widerstandsfähigkeit der gefrorenen Schichten ein ungleichmäßiges Ausweichen des Stoßes in den Schacht hinein stattfinden. Ton weicht dem Druck leichter aus als Sand. Dieser Umstand führt zu Verbiegungen oder zum Zusammenpressen von Gefrierrohren, die dann sehr leicht undicht werden und Lauge in das Gebirge durchlassen. Vor allem ist an den Übergangsstellen von lockerem Tertiär zum Buntsandstein oder überhaupt zum festen Gebirge die Beanspruchung der Rohre auf Biegung sehr groß. Besondere Maßnahmen lassen sich dagegen nicht treffen. Durch unvorsichtige Schießarbeit werden solche an und für sich schon wenig widerstandsfähige Stellen erschüttert und damit noch mehr gefährdet. Die Lauge sucht sich meistens einen Ausflußweg zum Schachtinnern, da sie dort den geringsten Widerstand findet. Die schadhaften Rohre schaltet man alsdann aus dem Kreis aus, falls man sie nicht durch Anlegen von Rohrschellen oder dergleichen ausbessern kann.

Über die Frage, bis zu welcher Teufe sich das Gefrierverfahren im Tertiär wirksam anwenden läßt, kann eine bestimmte Antwort noch nicht gegeben werden, da das physikalische Verhalten des gefrorenen Gebirges großen unberechenbaren Schwankungen unterworfen ist. Frostmauern von geringer Stärke und verhältnismäßig tiefen Kältegraden sind nicht in der gleichen Weise imstande, den Gebirgsdruck aufzunehmen, wie dicke Frostmauern mit Temperaturen, die weniger tief unter dem Gefrierpunkt liegen. Damit ist nicht gesagt, daß mit einer Erniedrigung der Temperatur nicht auch eine Zunahme der Druckfestigkeit verbunden wäre. Das ist nicht abzustreiten.

Aber die Abkühlung ist nicht von so großer Bedeutung, wie früher angenommen wurde. Sie beträgt bei tertiären Sanden mit Tonen bei einer Abnahme von 1° etwa 1,5 bis höchstens 3 kg/qcm. Im übrigen lassen sich über die Beziehungen der Temperaturen zur Druckfestigkeit genaue Angaben nicht machen, da ihre Beobachtung große Schwierigkeiten bereitet.

Ausbau der Schächte.

Der sicherste Ausbau ist, da die Wasser ihre natürliche Druckhöhe behalten, der in gußeisernen Tübbings in einer der jeweiligen Teufe entsprechenden Stärke. Die Höhe beträgt meistens 1,5 m. Die Tübbings werden, wenn nicht andere Umstände dazu zwingen, von unten nach oben eingebaut, und der Raum zwischen dem Ausbau und dem Schachtstoß wird sorgfältig mit Stampfbeton oder Zement hinterfüllt. Eine provisorische Verzimmerung erübrigt sich. Unterhängetübbings werden nach neueren Erfahrungen nicht gerne angewandt. Gewöhnlich wird in den oberen Abschnitten in Absätzen bis zu 100 m abgeteuft. Je tiefer man kommt, desto kleiner müssen die Absätze werden. Nach Fertigstellung eines jeden Satzes wird ein Keilkranz gelegt und auf diesem der Ausbau aufgebaut. Ihre Wandstärke steigt von 30 mm bis auf 150 mm. Unterhalb 400 m Teufe verwendet man neuzeitlich Tübbings mit besonders breiten Flanschen, sogenannte Breitflansch-Tübbings. Als zweckmäßigste Tübbingsform verwendet man deutsche oder gewellte Tübbings. Ihr Material besteht aus umgeschmolzenem Roheisen und Alteisen. Beim Einbauen dürfen nur sorgfältig geprüfte, fehlerfreie Stücke Verwendung finden, deren Oberfläche möglichst glatt und frei von Blasen und Schalen ist. Die wagerechten und senkrechten Flanschen werden auf besonderen Maschinen bearbeitet. Nach Bedarf erhält jeder Ring einige Vergußlöcher. Um die inneren Wandflächen vor Rost zu schützen, werden sie mit einem Asphaltanstrich versehen.

Zeit des Abfrierens.

Die Dauer der Gefrierperiode betrug bei Borth I (330 m tief, 6 m lichte Weite) 104 Tage, die Dauer des Abteufens einschließlich Ausbaus in Eisen 379 Tage. Bei Friedrich Heinrich-Schacht II (313 m tief und 6,1 m lichte Weite) waren diese Zeiten 167 bzw. 261 Tage. Beim Schachtabteufen nach dem Gefrierverfahren kostete das laufende Meter einschließlich Ausbau auf Friedrich Heinrich rund 10 000 Mark. Das ist, wenn man bedenkt, daß ein Schachtmeter im Steinkohlengebirge durchschnittlich 1000 Mark kostet, sehr viel Geld. Bei 600 m tiefen Schächten muß man mit einem Meterpreis von rund 15 000 Mark rechnen. Trotzdem ist die Anwendung künstlicher Kälte gegenüber anderen Kunstverfahren die billigste, wenn schwierige Gebirgsverhältnisse vorliegen. Sie führt meist zum Ziel, was bei allen andern Methoden nicht immer der Fall ist.

Auftauen der Frostmauer.

Nachdem der Gefrierschacht bis zur vorgesehenen Teufe fertiggestellt ist, wird er aufgetaut. Der Auftauprozess kann künstlich oder auf natürlichem Wege erfolgen. Letzterer benötigt sehr lange Zeit und wird auch wegen verschiedener Mißerfolge, die sich bei ihm einstellen, nicht gerne angewandt, wenigstens nicht allein. Beim künstlichen Auftauen ist man eher der Besorgnis einer Ungleichmäßigkeit im Auftauen enthoben, die für den Ausbau eine einseitige Belastung und mithin eine zu große Beanspruchung auf Biegung hervorrufen kann. Ein ungleichmäßiges Entziehen der Kälte ist bei der ungleichmäßigen Gestalt der Frostmauer trotz aller Vorsicht nicht ganz zu vermeiden. Dieser Umstand ist in der ungleichen spezifi-

schen Wärme und in dem ungleichen Wärmeleitungsvermögen der einzelnen Schichten begründet. Der Vorgang beim Auftauen ist der, daß man in den Gefrierrohren anstatt der kalten, warme Lauge umlaufen läßt, deren Temperatur allmählich gesteigert wird. Am besten eignet sich zwecks Entfernung von Kälte aus dem Gebirge eine Kombination von künstlichem und natürlichem Auftauen, bei welcher der Schachtausbau am wenigsten zu leiden hat. Im Verlaufe des Tauprozesses muß die Temperatur in den Gefrierlöchern sowie diejenige im Schachte dauernd beobachtet werden. Ferner wird während dieser Zeit der Ausbau des Schachtes sorgfältig nachgedichtet. Beim Schacht I Borth sollte der Schacht so dicht verstemmt sein, daß nicht mehr als 20 l/min. Wasserzuflüsse vorhanden waren. [A. 70.]

V 2 A-Stahl bei elektroanalytischen Fällungen.

Von A. SCHLEICHER und L. TOUSSAINT.

Anorgan. u. elektrochem. Laborat. d. Techn. Hochschule Aachen.

(Eingeg. 9. April 1926.)

Die technisch längst verwertete Eigenschaft des V 2 A-Stahls, seine Beständigkeit gegenüber bestimmten namentlich schwachen Säuren, dann aber auch gegenüber Salpetersäure, haben uns veranlaßt, dieses Material auch auf seine Eignung für elektroanalytische Zwecke zu prüfen. Bei diesen Arbeiten kommen bekanntlich nicht nur starke Säuren, wie Salpetersäure, Schwefelsäure und auch Salzsäure, sondern auch schwache organische Säuren, wie Oxalsäure, Essigsäure und andere, sowie schwach und stark alkalische Bäder zur Anwendung. Es schien deshalb von vornherein nicht ausgeschlossen, daß eine ganze Reihe von Fällungen auf das genannte Material möglich sein könnte. Da nun bei elektrolytischen Prozessen sich die beiden Elektroden selbst bei starker Bewegung des Bades in zwei ganz verschiedenen Medien befinden, je nachdem, ob sie Anode oder Kathode sind, und erstere hauptsächlich unter der Einwirkung von elementar in Freiheit gesetztem Sauerstoff steht, an letzterer dagegen Wasserstoff in statu nascendi entwickelt wird, beschränkten wir uns bezüglich der Verwendung der V 2 A-Elektrode lediglich auf die Kathode.

Bezüglich der Form der Elektrode entschlossen wir uns von vornherein nur zu derjenigen des Netzes, da sich dieses immer mehr bewährt hat, und da die Schale hauptsächlich dann in Frage kommt, wenn der in ihr gebildete Niederschlag durch Erhitzen von außen in die Wägeform überzuführen ist (Blei, Mangan, Molybdän). Hierbei hat sich jedoch V 2 A-Stahl als ungeeignet erwiesen, da er selbst oxydiert wird.

Wir verwendeten ferner das Netz in der Anordnung als Doppelnetz nach A. Fischer¹⁾, da wir damit gute Erfahrungen gemacht hatten, wählten aber als Anode das entsprechende Platinnetz. Das uns liebenswürdigerweise von der Firma Friedrich Krupp, A.-G. in Essen gelieferte Netz paßte als Kathode in die Doppelnetzanordnung und konnte auch in die Klemmen des Fischerschen Rührstativs eingespannt werden. Es entsprach in seiner Ausführung, Maschenzahl und Drahtstärke, nicht ganz der Platin Kathode. Es besitzt 17,6 Maschen pro qcm, eine Drahtstärke von 0,2 mm und bei 4,6 cm Länge und 11 cm Breite nach der Formel von A. Sieverts und W. Wippelmann²⁾

¹⁾ „Elektroanalyt. Schnellmethoden“, 1908, S. 79; Neuaufl. im Druck.

²⁾ Z. anorg. Ch. 87, 169 [1914].