

Plastizität und Festigkeit von Steinsalz unter Wasser.

Von **W. Ewald** und **M. Polanyi** in Berlin-Dahlem.

Mit 6 Abbildungen. (Eingegangen am 25. Juni 1924.)

Wie ist der Zusammenhang zwischen der von Joffe gefundenen hohen Festigkeit von Steinsalz unter Wasser und seiner bekannten Biegsamkeit unter gleichen Bedingungen? Joffe nimmt an, daß die Festigkeitserhöhung die Biegung ermöglicht. Hier wird der umgekehrte Standpunkt vertreten: Das Wasser beseitigt in der Oberfläche sitzende Hindernisse und setzt die Elastizitätsgrenze herab. Dadurch verhält sich das Salz schon bei kleinen Spannungen plastisch und ist, wenn die normale Bruchspannung erreicht wird, durch die vorangegangene Reckung schon verfestigt. Spannung und Verfestigung können nun weiter gesteigert werden, und es ergibt sich das Bild des Joffe-Effektes.

1. Plastizierung von Steinsalz unter Wasser. Gewöhnlich verhält sich Steinsalz als spröder Körper. Ein Stäbchen, das man einem Biegungsversuch unterwirft, bricht ohne nennenswerte plastische Formänderung durch. Nur mit feineren Methoden läßt sich hierbei eine geringfügige plastische Durchbiegung nachweisen, was schon von W. Voigt¹⁾ bemerkt wurde und auch in dieser Arbeit noch zahlenmäßig belegt werden soll.

Eine auffallende Abweichung von diesem Verhalten sieht man bei Biegungsversuchen unter Wasser. Steinsalzprismen lassen sich, in warmes Wasser getaucht, deutlich krumm biegen. Es scheint völlige Plastizität einzutreten. In konzentrierter Salzlösung tritt der Effekt nicht auf.

Diese in den Salzbergwerken schon längst bekannte Tatsache²⁾ ist in den letzten Jahren von verschiedener Seite erörtert worden. Insbesondere hat E. Hentze³⁾ auf Veranlassung von L. Milch diese Erscheinung messend verfolgt. Außerdem hat neuerdings A. Joffe⁴⁾ die Plastizierung unter Wasser im Dehnungsversuch röntgenographisch untersucht und mit der von ihm unter gleichen Umständen gefundenen hohen Reißfestigkeit von Steinsalz in Zusammenhang gebracht.

¹⁾ W. Voigt, Ann. **48**, 636, 1893; Pogg. Ann., Ergzbd. **7**, 1 u. 177, 1875/77.

²⁾ Nach L. Milch geht ihre Entdeckung auf Herrn Markscheider Engelhardt in Solvayhall zurück, der im Jahre 1867 Steinsalzprismen, als er sie in warmem Wasser reinigen wollte, deutlich biegen konnte und seitdem diese Erfahrung zur Herstellung von kleinen Kunstwerken benutzte.

³⁾ E. Hentze, ZS. „Kali“, Heft 4, 6, 8, 9, 1921; vgl. auch Kleinhanns, Phys. ZS. **15**, 363, 1914.

⁴⁾ A. Joffe, M. W. Kirpitschewa u. M. A. Lewitzky, ZS. f. Phys. **22**, 286, 1924.

Da die Ergebnisse der beiden Autoren unserer Ansicht nach in Widerspruch stehen, mögen sie hier miteinander verglichen werden.

E. Hentze arbeitet so, daß er Spaltstücke von etwa 3 mm Höhe und 4 mm Breite auf zwei Schneiden von 34 mm Abstand auflegt. In der Mitte wird das Prisma belastet, und zwar mit etwa der Hälfte der (auf Grund einer zulässigen Höchstspannung von 1190 g/mm² berechneten) normalen Bruchlast. Mit der mittleren Schneide, an der die Last hängt, ist ein Schreibhebel verbunden, der deren Senkung bei der Durchbiegung zu verzeichnen hat. Wird nun das Steinsalzprisma mit Wasser überflutet und dadurch dessen Auflösung eingeleitet, so senkt sich die Mittelschneide im Laufe von 50 bis 60 Sekunden um Beträge von 1 bis 3 mm, und man sieht, daß diese Senkung der Schneide durch eine entsprechende Durchbiegung des Prismas ermöglicht worden ist.

Nach dem Versuch werden die gebogenen Prismen möglichst schnell aus dem Wasser herausgenommen und die veränderten Abmessungen festgestellt.

Indem man nun die wirkende Last auf das durch die Ablösung verjüngte Prisma bezieht, rechnet man aus, wie hoch die Spannung im äußersten Falle sein konnte zur Zeit, als die plastische Durchbiegung vor sich ging.

Es ergibt sich dabei, daß die Beanspruchung des Steinsalzprismas während der Plastizierung in der Mehrzahl der 113 untersuchten Fälle geringer war als der normalen zulässigen Bruchlast entsprechend. In 71 Proz. der Fälle ist die Höchstspannung im Prisma zwischen 64 und 100 Proz. der normalen Bruchspannung gelegen, und in den restlichen 29 Proz. der Fälle liegt diese Spannung zwischen 100 und 160 Proz. der normalen Bruchspannung. In konzentrierten Salzlösungen trat keinerlei Effekt ein.

Diese Ergebnisse weisen darauf hin, daß die Plastizierung des Steinsalzes unter Wasserwirkung als Herabsetzung der Elastizitätsgrenze aufzufassen ist¹⁾. Dies steht im Gegensatz zu den später zu er-

¹⁾ Anmerkung bei der Korrektur. Wir haben hier noch einiges aus der neuesten mineralogischen Literatur anzuführen, die uns leider erst nach Einreichung des Manuskripts bekannt wurde: L. Milch (Neues Jahrb. f. Miner. 48, Beilagenbd. 147, 1923) äußert sich in einem zusammenfassenden Bericht über die erwähnten Arbeiten seiner Schüler wie folgt: Der hemmende Einfluß, den die Oberflächenschicht der größeren Neigung zur Deformation des Hauptteils des Stäbchens entgegenstellt, wird in einem lösenden Medium schon bei niedrigerer Temperatur durch Auflösung der jeweiligen Oberflächenschicht geschwächt und überwunden.

Diese Schlußfolgerung ist dieselbe, die wir selbst aus dem Umstande ziehen, daß sich die Prismen bei Hentze meistens unterhalb der normalen Bruchspannung

örternden Versuchen von Joffe, der nachzuweisen sucht, daß die Elastizitätsgrenze unverändert bleibt und die Plastizierung nur dadurch möglich wird, daß die Zerreißspannung durch die Wasserwirkung bedeutend heraufgesetzt wird, wodurch ein Überschreiten der Elastizitätsgrenze gestattet wird.

Wir glauben, daß den Versuchen von Hentze den weniger unmittelbaren röntgenographischen Feststellungen von Joffe gegenüber volle Beweiskraft zukommen würde, wenn nicht der störende Umstand vorhanden wäre, daß Hentze seine Versuche bei erhöhter Temperatur (55 bis 100°) ausgeführt hat, und es nicht bewiesen ist, daß man bei diesen Temperaturen Steinsalzprismen nicht auch ohne Wasser biegen kann, wenn man sie so vorsichtig belastet, wie es Hentze tut¹⁾. Wir haben

biegen ließen. Merkwürdigerweise schreibt aber Milch umgekehrt: „Einen sinnfälligen Beweis für die Steigerung der Plastizität in lösungsfähigen Medien erblickt Hentze mit Recht in der Tatsache, daß infolge der Auflösung bei seiner Versuchen die Belastung oft über 100 Proz. der Bruchbelastung stieg, nicht selten 130 Proz. und sogar 160 Proz. erreichte, ohne daß die Stäbchen brachen.“

In seinem Bericht über die Arbeit von Milch schreibt A. Johnsen (Naturw. 8, 153, 1924: „Die Hentzesche Erklärung“ (die wir im Text angeben) „ist, wie auch Milch andeutet, haltlos. Richtig dürfte aber die Deutung sein, die ich auf der Tagung der D. Mineralog. Ges. im September 1922 zu Leipzig gelegentlich einer Diskussion gab und jetzt hier wiederholen möchte. Der belastete Steinsalzstab erfährt an seiner konvexesten und an seiner (gegenüberliegenden) konkavsten Stelle die stärkste Spannung (Zerrung bzw. Pressung), die nach der Mitte zwischen beiden Stellen bis auf 0 abnimmt. Die immer weiter wachsende Spannung würde baldigen Bruch zur Folge haben, wenn nicht nach dem Rieckeschen Prinzip oder auch infolge winziger Sprünge gerade die gespanntesten Außenteile die schnellste Auflösung erführen; die dadurch frei gelegten tieferen Partien gestatten nunmehr, weil weniger gespannt, eine weitere Biegung des Stabes, wobei ihre Spannung wächst und ihre Auflösung sich beschleunigt usw.; an gleicher Stelle erleichtert auch die Verkleinerung des Querschnittes die fortschreitende Biegung.“

Demgegenüber ist zu sagen, daß der sich biegende Kristall in jedem Augenblick eine bestimmte Dicke hat und eine bestimmte Last trägt, woraus für jeden Augenblick ein bestimmter Spannungszustand folgt. Wenn nachgewiesen wird, daß ein Spannungszustand, der im trockenen Kristall keine bleibende Formänderung hervorruft, eine solche erzeugt wenn der Kristall unter Wasser ist, so ist damit eine Herabsetzung der Elastizitätsgrenze durch das Wasser erwiesen.

Erwähnt sei noch, daß ein besonderer Widerstand der Oberflächenschicht von Steinsalz gegen plastische Formänderung (und zwar gegen Vergrößerung der Oberfläche) von A. Ritzel (ZS. f. Kristallogr. 58, 97, 1913) angenommen wurde. Es ist uns jedoch nicht klar geworden, inwiefern die von ihm bei der Deformation von Steinsalzkristallen gefundenen Merkwürdigkeiten mit unserem Gegenstand zusammenhängen.

¹⁾ Die von Hentze in konzentrierter Salzlösung angestellten Versuche können nicht zur Entscheidung herangezogen werden, da hier kein Lösungseffekt auftritt, und sich demgemäß die angehängte Last nicht weiter steigert.

selbst Steinsalz gehabt, das schon bei normaler Temperatur hohe Biegsamkeit zeigte. Die Fig. 1 gibt ein anschauliches Bild davon. Sie stellt den Umriß von Steinsalzstücken dar, welche, als wir sie aufspalten wollten, zwei stark auseinanderlaufende gekrümmte Äste ergaben. Zuweilen kann man sogar die Äste wieder zurückbiegen, ohne sie zu brechen¹⁾.

Ein besonderer Umstand muß noch hervorgehoben werden, auf den sich Hentze bei der Deutung seiner Versuche stützt. Es ist dies der verspätete Eintritt der Plastizierung, die erst nach etwa 30 Sekunden zu beobachten war. Hentze nimmt an, daß diese Zeit der Eindringungsdauer des Wassers in das Steinsalz entspricht, und daß die Plastizierung durch eine Art Quellung des Steinsalzes bedingt ist. Unsere eigenen Versuche, die wir mit einer feineren Anzeigevorrichtung der Durchbiegung ausführten, zeigen, daß die Wasserwirkung sofort nach Berühren des Steinsalzes einsetzt, und führen zur Annahme, daß die scheinbar verspätete Wirkung bei Hentze dadurch zu erklären ist, daß sein Schreibhebel nur größere Durchbiegungen nachweisen ließ, die sich erst einstellen, nachdem die Spannung in dem Kristall durch die Ablösung einen erheblichen Betrag erreicht hat.

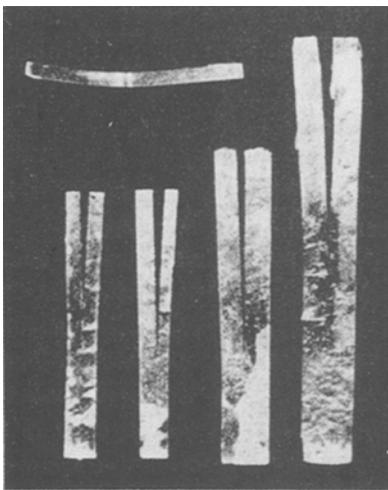


Fig. 1.

Steinsalzprismen, die beim Spalten plastisch gekrümmte Äste geben.

A. Joffe, M. Kirpitschewa und M. A. Lewitzky (l. c.) unter-

suchen im Zugversuch das Lauediagramm von Steinsalzprismen und verwenden dessen Verzerrung zur Anzeigung der Plastizierung. Eine solche tritt nur ein bei Temperaturen über 200°. Bei tieferen Temperaturen reißt der Kristall ohne merkliche Dehnung. Anders verhält er sich unter Wasser. Hier ist die Zerreiβfestigkeit so weit heraufgesetzt, daß die Elastizitätsgrenze stets erreicht und überschritten wird. Die so unter Wasser gemessenen Elastizitätsgrenzen schließen sich dem Verlauf der bei höheren Temperaturen aufgenommenen Kurve glatt an. Daraus

¹⁾ Ähnliches fand G. Schroeder (Mittel. d. Nat. Ver. f. Neuvorpomm. u. Rügen 45, 1913).

schließt Joffe, daß die plastizierende Wirkung des Wassers gewissermaßen nur eine scheinbare ist, indem die Elastizitätsgrenze unbeeinflußt bleibt und nur ihre Überschreitung durch die erhöhte Reißfestigkeit gestattet wird. Die Versuche, die wir hier mitteilen werden, sprechen gegen dieses Resultat von Joffe und weisen zum mindesten im Biegungsversuche eine wirklich plastizierende Wirkung des Wassers nach, also eine Herabsetzung der Elastizitätsgrenze des Steinsalzes unter Wasser nach.

2. Reißfestigkeit von Steinsalz unter Wasser. Neben der abnormen Plastizität des Steinsalzes zeigt es bei Berührung mit Wasser eine zweite Merkwürdigkeit, die kürzlich von Joffe entdeckt worden ist. Er fand eine Reißfestigkeit, die bis zum 100fachen Betrag des normalen Wertes erhöht ist. Joffe glaubt, daß diese Erhöhung der Festigkeit darauf zurückzuführen ist, daß gewisse störende Momente, die normalerweise an der Oberfläche vorhanden sind und ein vorzeitiges Reißen bedingen, durch den Ablösungsvorgang dauernd eliminiert werden. Hierdurch steigt dann die Festigkeit zu denjenigen Werten hinauf, die man für das ungestörte Gitter aus der Bornschen Theorie zu erwarten hätte.

Gegen diese Erklärung kann eingewendet werden, daß man aus den Angaben von Joffe schließen muß, daß das Steinsalz während der Belastung unter Wasser eine erhebliche innere Verfestigung erleidet. Nach Joffe beträgt nämlich die Elastizitätsgrenze zu Anfang der Belastung unter Wasser bei gewöhnlicher Temperatur den Wert von 900 g/mm^2 . Soll es nun möglich sein, die Spannung bis auf etwa das 100fache dieses Wertes zu steigern, so muß die Elastizitätsgrenze während dieser Steigerung auf etwa den 100fachen Betrag ansteigen. Wenn sich aber der Kristall in bezug auf die Elastizitätsgrenze derart verfestigt, so ist es anzunehmen, daß zugleich auch die Reißfestigkeit in entsprechendem Maße ansteigt. Die hohe Reißfestigkeit des Steinsalzes unter Wasser wäre dann schließlich als Verfestigungseffekt zu deuten.

Daß auch Einzelkristalle, insbesondere auch Steinsalz, durch plastische Deformation sowohl hinsichtlich der Elastizitätsgrenze als auch der Reißgrenze verfestigbar sind (also sowohl „Formverfestigung“ wie „Reißverfestigung“ aufweisen), ist ja durch frühere Versuche schon bekannt¹⁾.

¹⁾ M. Polanyi, Über Verfestigung von Einzelkristallen durch Kaltbearbeitung; ZS. f. Elektrochem. **28**, 16, 1921; Literatur bei G. Masing u. M. Polanyi: Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften **2**, 177, 1924. Seither noch erschienen: R. Gross, ZS. f. Metallkunde **16**, 18, 1924; E. Schmid, ZS. f. Phys. **22**, 328, 1924.

Am glänzendsten wird die Reißverfestigung von Steinsalz gerade von Joffe bei Reckung in der Hitze bestätigt. Die Reißfestigkeit steigt dabei bis auf das 10fache.

Warum soll aber diese Verfestigung, wird man fragen, nur unter Wasser zustande kommen können? Auf Grund der bereits angedeuteten Ergebnisse unserer Versuche muß die Antwort lauten: Weil das Wasser die Elastizitätsgrenze herabdrückt, kommt der Kristall ins Fließen und verfestigt sich. Diese Verfestigung geht so lange vor sich, als die Reißverfestigung der Formverfestigung voraneilt. Dort, wo die Elastizitätsgrenze in ihrem Anstieg die Kurve der gleichfalls ansteigenden Reißfestigkeit kreuzt, bricht der Kristall.

Daß ein Körper durch die Herabsetzung seiner Elastizitätsgrenze verfestigbar wird, ist nichts Ungewöhnliches. Nach Untersuchungen von E. Schmid¹⁾ kann ein bandförmig gedehnter Zinkkristall bei normaler Temperatur bis auf 6 kg/mm^2 belastet werden, wogegen ein ähnlich orientierter Kristall in flüssiger Luft nur etwa $2,5 \text{ kg/mm}^2$ aushält. Daß es sich dabei um eine Reißverfestigung handelt, sieht man dadurch, daß der bei normaler Temperatur gedehnte Kristall auch bei der Temperatur der flüssigen Luft die 6 kg/mm^2 aushält.

Wenn die Wirkung des Wassers über den Weg der herabgesetzten Elastizitätsgrenze und der darauf folgenden Verfestigung durch die angehängte Last schreitet, so muß folgendes zutreffen:

1. Setzt man einen Kristall unter Wasser und trocknet ihn dann, so muß er normale Festigkeit haben.

2. Setzt man ihn unter Wasser, aber so, daß eine Last an ihm hängt, und trocknet ihn hierauf, so muß er verfestigt sein.

3. Reißt man einen Kristall unter Wasser so, daß er vor dem Reißen keine plastische Deformation erleidet, so muß er normale Festigkeit zeigen. Eine Anordnung, die dies ermöglicht, besteht darin, daß man den Kristall bricht und nur die gespannte Seite unter Wasser hält.

Wir werden sehen, daß diese drei Versuche im positiven Sinne ausfallen.

3. Neue Versuche über Plastizität von Steinsalz, trocken und unter Wasser. Das plastische Verhalten des Steinsalzes haben wir im Biegungsversuch beobachtet. Das zweiseitig auf Schneiden aufliegende Prisma wurde in der Mitte mit einem in Wasser schwimmenden Gewicht

¹⁾ E. Schmid, Auszüge aus den Verhandlungen des internat. Kongresses für angew. Mechanik in Delft, 1924.

belastet, dessen wirksame Größe durch Veränderung der Wasserhöhe geregelt wurde. Die Durchbiegung wurde an der Verdrehung eines an beiden Stabenden aufge kitteten Spiegelpaares in Poggendorffscher Anordnung mittels Fernrohrs und Skala gemessen. Die Genauigkeit der Ablesung an der Skala betrug 0,1 bis 0,2 mm, bei einer Skalenentfernung von 1,5 bis 4 m. Das entspricht 6 Bogensekunden des Winkels der beiden Stabenden, entsprechend einer Durchbiegung von 0,0001 bis 0,0003 mm bei 2 bis 5 cm Abstand der Schneiden. Die Nullage und die einzelnen Durchbiegungswerte waren, wenn eine plastische Deformation ausgeschlossen war, auf etwa 20" reproduzierbar.

Tabelle 1. Zahlenwerte des in Fig. 2 dargestellten Biegungsversuches.

Prismenhöhe = 0,197 cm, Breite = 0,450 cm, Schneidenabstand = 5,04 cm, Spiegelabstand = 5,45, Skalenabstand = 4,65 cm. Der Elastizitätsmodul E ist jedesmal aus den Zahlen berechnet, zwischen denen er angeschrieben ist.

Last g	Skale cm	E kg/mm ²	Last g	Skale cm	E kg/mm ²
0	72,66		200	67,66	
98	70,17		0	72,50	4270
0	72,66	4070	210,25	67,22	
98	70,18		0	72,33	4255
0	72,66	4080	198	67,515	
41	71,66		0	72,33	4230
0	72,66	4230	220	66,725	
41	71,67		0	72,08	4230
0	72,67	4230	220	66,65	
68,5	70,935		0	72,01	4230
0	72,67	4070	98	69,605	
74,5	70,76		0	72,08	4085
0	72,68	4000	220	66,61	
98	70,22		0	71,96	4240
0	72,68	4155	220	65,17	
119	69,72		100	67,93	4200
0	72,67	4170	0	70,57	
119	69,705		241	64,58	
0	72,66	4160	0	70,47	4220
130	69,40		263,75	63,57	
0	72,65	4130	0	69,97	4255
130	69,39		282,5	61,38	
0	72,64	4130	0	68,38	4160
153,5	68,78		297	59,38	
0	72,625	4120	0	66,65	4210
179	68,235		314	56,45	
0	72,59	4235	0	64,28	4130
179	68,21				
0	72,58	4225			

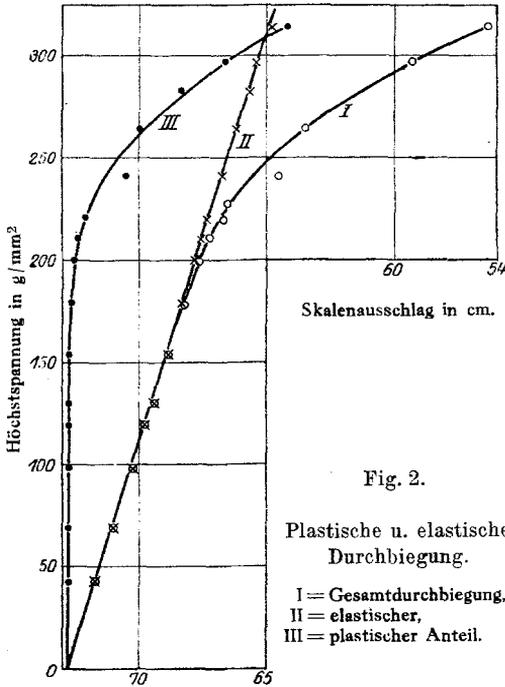
Kristall bricht bei 325 g
Die Höchstspannung betrug 1410 g/mm²

Zur Darstellung der Leistungsfähigkeit der Methode und des normalen Verhaltens von Steinsalz im Biegungsversuch haben wir in Tabelle 1

ein Versuchsprotokoll abgedruckt. In der letzten Spalte findet sich der Elastizitätsmodul ausgerechnet. Man sieht, daß die Versuche, die hier bis zu 97 Proz. der Bruchlast durchgeführt wurden, kein sicheres Anzeichen einer Abweichung vom Hookeschen Gesetz enthalten¹⁾.

Bezüglich des plastischen Verhaltens merkt man, daß bei wiederholter Belastung und Entlastung der Nullpunkt konstant bleibt, bis man etwa die halbe Bruchlast erreicht hat. Bei Höherbelastung und Rückkehr zum Nullpunkt findet man eine Verschiebung des Nullpunktes nach

größeren Durchbiegungen. Diese bleibende Durchbiegung wächst dann bei noch stärkerer Belastung schnell an und erreicht in der Nähe der Bruchlast ungefähr den Wert der elastischen Durchbiegung.



Das Ergebnis der Tabelle 1 ist noch einmal in Fig. 2 dargestellt. Die Kurve I gibt in Abhängigkeit von der Belastung die Gesamtdurchbiegung, also die Skalenausschläge vom (ursprünglichen) Nullpunkt gerechnet.

Die Kurve II stellt den elastischen, Kurve III den plastischen Teil der Durchbiegung dar.

Unseren Erfahrungen nach ist das plastische Verhalten des Steinsalzes im Biegungsversuch, wie es in diesem Fall zum Ausdruck kommt, typisch für normales Steinsalz in geschliffenen Prismen. Wir verwendeten hier Steinsalz aus Wieliczka, das einschlußfrei und in glatten Flächen gut spaltbar war.

Außer dem mitgeteilten Versuch wurden noch sechs ähnliche Kurven aufgenommen, die wir hier nur auszugsweise in Tabelle 2 mitteilen.

¹⁾ Die Versuche von Voigt, Wied. Ann. 52, 536, 1894 und Koch, Wied. Ann. 5, 251 und 3, 611, 1878, hatten die Konstanz des Elastizitätsmoduls nur bis zu einer Belastung von etwa der halben Bruchlast nachgewiesen.

Tabelle 2. Orientierungswerte für die normale Plastizität von Steinsalz im Biegungsversuch.

Bleibende Verdrehung der Prismenenden in Bogensekunden bei den Höchstspannungen S .

	$S = 300 \text{ g/mm}^2$	$S = 600 \text{ g/mm}^2$	$S = 900 \text{ g/mm}^2$	Schlußwert der plastischen Durchbiegung	S in g/mm^2 für den Schlußwert
1	0''	22''	1,5'	4'	1075
2	24''	3'	14'	22'	1225
3	42''	41'	12'	23'	1245
4	36''	6'	14'	24'	1183
5	4''	4'	12'	20'	1230
6	6''	4'	10'	15'	1580

Die Bruchfestigkeit des Wieliczkaer Steinsalzes ergab sich als Mittel von 40 Versuchen bei einer mittleren Abweichung von 1,2 Proz. zu 1190 g/mm^2 ¹⁾).

Allerdings muß nochmals betont werden, daß es neben diesem „normalen“ Steinsalz auch wesentlich anderes, und zwar viel plastischeres gibt. Solches Material, das auch aus Wieliczka stammte, haben wir ebenfalls in mehreren Fällen im Biegungsversuch untersucht. Schon bei kleinster Belastung setzte bleibende Deformation ein, die sich bei 50 bis 60 Proz. der normalen Bruchlast bis zu starken, mit bloßem Auge sichtbaren Krümmungen steigerte. Für unsere Zwecke war dieses Material unbrauchbar.

Die Versuche, die auf die Wirkung von Wasser auf die Durchbiegung angestellt wurden, konnten nicht auf dieselbe Weise durchgeführt werden wie die soeben mitgeteilten Messungen an trockenem Steinsalz, weil eine langandauernde gleichmäßige Behandlung mit Wasser bei der verwendeten Anordnung nicht durchführbar war. Es wurde also so verfahren, daß das Steinsalzprisma erst mit einem bestimmten Gewicht belastet und dann im mittleren Teil mit Wasser benetzt wurde. Hierauf setzte sofort ein Anwachsen der Durchbiegung ein, das durch 20 bis 30 Sekunden im Fernrohr beobachtet wurde. Sodann haben wir das Steinsalz durch Absaugung des Wassers getrocknet und das Verhalten im Fernrohr weiter verfolgt.

Womöglich ist dabei so vorgegangen worden, daß das Prisma zuletzt, also bis zum Bruch oder sonstigen Abschluß des Versuchs, unter Wasser stand.

Die Benetzung mit Wasser erfolgte entweder allseitig oder nur einseitig. Im letzteren Falle auf der oberen Fläche (Druckseite) oder

¹⁾ Ausführliche Angaben bei W. Ewald, Diss. Berlin 1924.

auf der unteren Fläche (Zugseite). Der Vergleich der drei erwähnten Fälle zeigt, daß die allseitige Wasserwirkung zwar am stärksten ist, daß aber, merkwürdigerweise, auch die einseitige Bewässerung an der

Tabelle 3. Orientierungswerte für die plastische Durchbiegung von Steinsalz bei Benetzung.

h = Höhe, b = Breite des Kristalls in Millimeter, l = Schneidenabstand in Millimeter, S_e = Endwert der Höchstspannung in Gramm/Quadratmillimeter, P_e = zugehörige plastische Durchbiegung (in Winkelmaß).

Lfd. Nr.	Umfang der Benetzung	Vor dem Versuch		l	S_e	P_e	Nach dem Versuch	
		h	b				h	b
1	allseitig	1,78	6,70	40,0	995	24°	1,46	6,30
2	"	1,55	3,66	34,0	840	11°	1,43	3,60
3	"	1,73	4,75	34,0	900	9°	1,61	4,67
4	oben	0,84	4,80	20,0	1450	2° 30'	0,52	4,80
5	"	1,65	4,33	30,0	1180	5° 20'	1,45	4,33
6	"	1,05	5,20	29,0	1375	8°	0,95	5,20
7	"	1,62	7,05	36,3	970	1° 54'	1,45	7,05
8	"	1,85	3,73	36,2	1250	1° 50'	1,64	3,73
9	unten	1,62	4,35	26,0	1200	11'	1,50	4,35
10	"	1,56	3,67	29,0	1380	13'	1,46	3,67
11	"	2,12	5,04	34,0	960	9'	1,92	5,04

Druckseite kaum hinter jener an Wirkung zurückbleibt. Sehr wenig macht dagegen die Berührung mit Wasser an der Zugseite aus. Die Tabelle 3 gibt eine Darstellung dieses Sachverhalts. Es sind in ihr die Fälle aufgenommen, in denen die Benetzung bis zum Versuchsabschluß aufrechterhalten wurde. Man sieht, daß bei der allseitigen und Druckseitenbenetzung (trotz kleineren Schneidenabstandes) die Winkelverdrehung der Kristallenden bedeutend größer ist als in Tabelle 2, ohne daß die Spannung höhere als normale Werte erreicht.

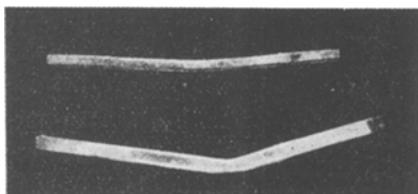


Fig. 3. Gebogene Steinsalzprismen. Das stärker gebogene unter allseitiger, das andere unter druckseitiger Wasserwirkung entstanden.

Einige gebogene Prismen aus diesen Versuchen sind in Fig. 3 dargestellt.

Da bei Benetzung der Druckseite die Wasserwirkung sehr deutlich und dabei die abgelöste Salzmenge verhältnismäßig gering ist und ferner die Ablösung bei dieser Art Benetzung sehr regelmäßig erfolgt, wurde diese Versuchsführung für das genauere Studium bevorzugt. Es sei hier daher einiges über die Technik derselben gesagt.

Die Steinsalzprismen wurden vollständig mit wasserdichten Überzügen versehen und dann die eine Seite abgeschliffen. Zur Abdichtung wurde in den verschiedenen Versuchen Wachs-Kolophoniumkitt bzw. Schellacküberzug oder Kanadabalsam mit Schellack überzogen, verwendet. Die eingehüllten Prismen wurden auf Dichtigkeit während 1 Minute in fließendem Wasser geprüft. Die Art des Überzuges war ohne Einfluß auf die Erscheinung.

Zur allgemeinen Orientierung wurden zunächst Kurven in folgender Weise aufgenommen: Das Steinsalzprisma wird zunächst mit etwa $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{2}$ der normalen Bruchlast belastet, hierauf bei dieser Last 1 bis 2 Minuten lang gewartet, um zu sehen, ob nicht etwa eine Steigerung der Durchbiegung durch plastische Verformung mit der Zeit schon von selbst eintritt. Nun werden mit einem weichen Pinsel ein bis zwei Tropfen destillierten Wassers von Zimmertemperatur auf die obere Seite des Prismas gebracht. Die untersuchte Skalenverschiebung wird von 10 zu 10 Sekunden abgelesen. Nach

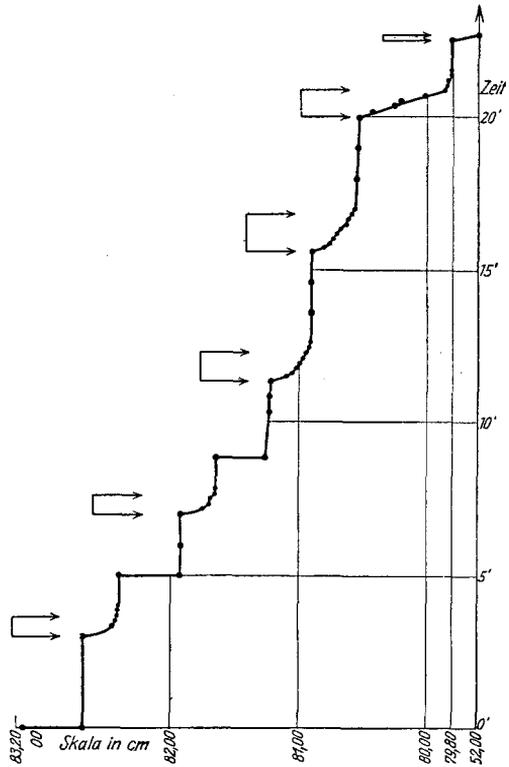


Fig. 4. Durchbiegungskurve bei periodisch einsetzender Wasserwirkung.

In den durch die Pfeilpaare abgegrenzten Kurvenstücken stand das Prisma unter Wasser. (Man beachte den veränderlichen Abszissenmaßstab.)

20 bis 30 Sekunden wird das Wasser mit Hilfe einer biegsamen Kapillarpipette abgesaugt und die Durchbiegung noch weiter 1 bis 2 Minuten beobachtet. In der Folge wird der Versuch entweder bei derselben Last wiederholt, oder man geht zu einer höheren Last über und macht ihn dort wieder. Um die Wirkung der Erschütterung bei der Benetzung und Absaugung festzustellen, wurde in etwa 10 Fällen das Versuchsobjekt vor der Benetzung durch Stoß in Schwingungen versetzt,

was jedoch in keinem Falle zu einer Verschiebung der Ruhelage führte.

Die starken Durchbiegungen, die man infolge der Wasserwirkung in Fig. 4 auftreten sieht, weisen deutlich darauf hin, daß hier nicht etwa die durch die Ablösung bedingte erhöhte Beanspruchung für die Erscheinung maßgebend ist, sondern die in Tabelle 3 angedeutete plastizierende Wirkung des Wassers vorliegt. Immerhin ist es erwünscht, auch quantitativ festzustellen:

1. Welcher Anteil der Wasserwirkung ist darauf zurückzuführen, daß das dünner gewordene Prisma unter der angehängten Last rein elastisch stärker durchbogen wird?

2. Welcher Anteil entfällt auf den Umstand, daß die zusätzliche Beanspruchung des Steinsalzes, die mit der Abnahme der Prismendicke einhergeht, etwa auch dann zu einer plastischen Deformation führen würde, wenn das Steinsalz sich wie im trocknen Zustand verhielte?

Die von der Einwirkung des Wassers herrührende Durchbiegung (ΔD) ist somit zu teilen in elastische (ΔE) und plastische (ΔP), und von ΔP ist noch eine Größe $\Delta_1 P$ abzuziehen, welche die plastische Durchbiegung bedeutet, die auch an trockenem Steinsalz eintreten würde, wenn die Höhe des Prismas in gleicher Weise vermindert würde wie bei der Ablösung mit Wasser. Es gilt also erstens

$$\Delta D = \Delta P + \Delta E,$$

und zweitens, daß der eigentlich gesuchte Betrag $\Delta_s P$, welcher den Anteil der plastischen Durchbiegung bedeutet, der lediglich vom spezifischen Einfluß des Wassers herrührt, ausgedrückt wird durch

$$\Delta_s P = \Delta P - \Delta_1 P.$$

Die Bestimmung von ΔP und ΔE erfolgt einfach so, daß man nach der Wassereinwirkung auf die Last Null zurückgeht und feststellt, um wieviel sich die zu dieser gehörige Fernrohrablesung verschoben hat. Diese Verschiebung ist gleich ΔP , wodurch auch sofort $\Delta E = \Delta D - \Delta P$ ausgedrückt werden kann.

Um noch die Korrekturgröße $\Delta_1 P$ zu finden, verfährt man folgendermaßen. Aus ΔE kann man berechnen, um welchen Betrag das Prisma durch Weglösung dünner geworden ist. Bezeichnet man nämlich den Betrag der elastischen Durchbiegung vor der Wassereinwirkung mit E_1 , nach der Wassereinwirkung mit E_2 ($= E_1 + \Delta E$), so verhalten sich die

entsprechenden Höhen h_1 und h_2 des Prismas umgekehrt wie die dritten Wurzeln der Durchbiegungen:

$$\frac{h_1}{h_2} = \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_1}}, \quad (1)$$

wobei allerdings vorausgesetzt ist, daß die Ablösung der oberen Seite gleichmäßig erfolgt. Da dies nicht ganz zutrifft, findet sich die Beziehung (1) nur annähernd erfüllt, wie man dies in Tabelle 5 sehen kann. Doch genügt die Übereinstimmung für die Berechnung der gesuchten sehr kleinen Korrekturgröße $\mathcal{A}_1 P$ durchaus.

Um diese zu finden, berechnet man nun die Höchstspannungen S_1 und S_2 vor und nach der Wassereinwirkung. Da die Last sich nicht ändert, verhalten sich die Höchstspannungen umgekehrt wie die Quadrate der Höhen:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{h_2^2}{h_1^2} = \left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{2/3}.$$

Die gesuchte Größe $\mathcal{A}_1 P$ bedeutet den Betrag an plastischer Durchbiegung, die an trockenem Steinsalz bei Steigerung der Höchstspannung von S_1 auf S_2 eingetreten wäre. Man findet $\mathcal{A}_1 P$ hiernach, indem man zugrunde legt, daß die plastische Durchbiegung P bei trockenem Steinsalz gleichmäßig mit der Spannung S zunimmt. Indem man also vor dem Wasserversuch den Verlauf von P in Abhängigkeit von S unterhalb S_1 bestimmt und dann nach der Wassereinwirkung den Verlauf von P jenseits von S_2 aufsucht, kann man die auf das Intervall $S_1 - S_2$ entfallende Veränderung von P mit ausreichender Annäherung abschätzen.

Bei jedem Wasserversuch haben wir also vorher bei einer geringen Last und nachher bei einer höheren Last den Wert von P (durch den Betrag der Nullpunktverschiebung) gemessen¹⁾. Da die Spannungen beiderseits des Intervalls $S_1 - S_2$ einfach proportional den Lasten sind, so ergibt sich aus den Lasten sofort die gesuchte Abhängigkeit $P = f(S)$.

In Wirklichkeit vereinfachte sich der ganze Sachverhalt sehr dadurch, daß in den Trockengebieten $S < S_1$ und $S > S_2$ meist überhaupt keine Veränderung von P bei wachsender Spannung vorhanden war. Die meisten Versuche sind eben in einem Beanspruchungsbereich durchgeführt, in dem trockenes Steinsalz unplastisch ist und somit $\mathcal{A}_1 P = 0$ und einfach

$$\mathcal{A}_s P = \mathcal{A} P$$

ist. Auch in den übrigen Fällen war $\mathcal{A}_1 P$ sehr klein.

¹⁾ Bei diesen Belastungen wurde dem Kristall immer ausreichende Zeit zur plastischen Verformung gelassen. Man erkennt das in Tabelle 4 daran, daß die Skalenstellung bei der erhöhten Last während einer Minute unverändert blieb.

Man überblickt das ganze Verhalten in Fig. 5, wo für den in Tabelle 4 zahlenmäßig verzeichneten Versuch die zusammengehörigen Werte von P und S dargestellt worden sind. Man sieht, daß die trockenen Teile nur gegen höhere Lasten zu merklich von der Vertikalen abweichen. Die in den feuchten Intervallen gefundenen Anstiege von P sind also in keinem nennenswerten Anteile auf die gleichzeitige Zunahme von S zurückzuführen, sondern beruhen auf der spezifischen Einwirkung des Wassers.

In den Fällen, wo die Trockenkurven $P = f(S)$ nicht genau vertikal verlaufen, ist $\Delta_1 P$ durch lineare Interpolation zwischen den Kurven vor und nach der Wassereinwirkung bestimmt worden.

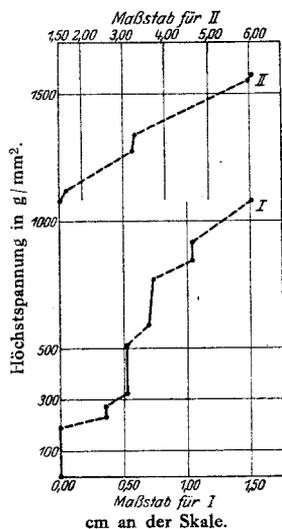


Fig. 5. Kurve der plastischen Durchbiegung bei zeitweise einsetzender Wasserwirkung.

Die gestrichelten Teile sind unter Wasser aufgenommen.

war. Ein Benetzungsversuch führte jetzt jedesmal zu negativen Resultaten, es war keine plastische Durchbiegung zu erzielen.

Die ersten deutlichen Wassereffekte sind in einzelnen Fällen bei Spannungen nachgewiesen worden, die nur etwa ein Siebentel der Bruchlast betragen. Das Wasser hat also die Elastizitätsgrenze hier auf ein Siebentel des normalen Wertes herabgesetzt. Doch kann diese Zahl schon deswegen nur zur allgemeinen Orientierung dienen, weil die Deutlichkeit des Effekts sich mit der Höhe der Prismen wesentlich ändert, und zwar bei abnehmender Höhe stark zunimmt.

Die Gesamtheit der auf diese Weise gemachten Versuche ist in Tabelle 5 verzeichnet. Man sieht, daß $\Delta_s P$ stets deutlich meßbare Werte erreicht. Im allgemeinen steigen diese am gleichen Versuchskörper stets an, wenn die Last, bei der benetzt wird, gesteigert worden ist. Doch kann der Anstieg fehlen, wenn die Last beim neuen Versuch die des letzten nur um ein geringes übertrifft.

Diese Erscheinung hängt zusammen mit der auch sonst nachweisbaren Verfestigung bei plastischer Deformation unter Wassereinwirkung. (Siehe nächsten Abschnitt.) Wir haben diese Verfestigung (in drei Versuchen) auch noch dadurch festgestellt, daß wir nach einem Wasserversuch bei einer höheren Last auf eine niedrigere zurückgingen, bei der schon einmal Wasserwirkung nachgewiesen worden

Wir erwähnen noch, daß an dem Angriffspunkt der Last keine Einsenkung entstanden war. Die Kraft wurde auf die obere Fläche nicht wie gewöhnlich durch eine Schneide, sondern durch eine Kugel übertragen. An der Stelle, wo sie den Kristall berührte, blieb durch unvollständige Ablösung eine kleine Erhabenheit übrig. Die Ablösung war sonst gleichmäßig bis auf die Kanten, die nicht angegriffen wurden und an denen dünne Leisten (von etwa $\frac{1}{10}$ mm Höhe) zurückblieben.

Tabelle 4. Zahlenwerte des in Fig. 5 dargestellten Versuches.
(Abmessungen siehe Tabelle 5, Nr. 1 bis 7.)

Zeit	Belastung g	Skale cm	Zeit	Belastung g	Skale cm	Zeit	Belastung g	Skale cm
	0	67,35		3	66,59	1' 20"		62,22
	3 ¹⁾	67,24		53	65,30	1' 30"		61,62 ³⁾
	22	66,96		3	66,56	1' 40"		61,49
	3	67,22	0'	53	65,295	1' 50"		61,47
	22	66,96	1'		65,29 ²⁾	2' 50"		61,47
	3	67,235	1' 10"		64,97		3	64,09
0'	22	66,97	1' 20"		64,82		61,8	61,06
1'		66,975 ²⁾	1' 30"		64,75 ³⁾		3	64,055
1' 10"		66,55 ³⁾	2' 30"		64,75		63,5	60,97
1' 20"		66,54		3	66,25		3	64,035
2' 20"		66,55		58	64,56	0'	63,5	60,95
	3	66,89		3	66,26	1'		60,95 ²⁾
	25,5	66,48	0'	58	64,56	1' 10"		60,07
	3	66,90	1'		64,56 ²⁾	1' 20"		59,27
0'	25,5	66,49	1' 10"		64,08	1' 30"		58,62
1'		66,495 ²⁾	1' 20"		63,82	1' 40"		57,87 ³⁾
1' 10"		66,21 ³⁾	1' 30"		63,67 ³⁾	1' 50"		57,68
1' 20"		66,19	1' 40"		63,65	2'		57,63
2' 20"		66,20	1' 50"		63,62	3'		57,52
	3	66,73	2' 50"		63,62		3	61,33
	41	66,095		3	65,79		64,5	57,22
	3	66,77		60,5	63,50		3	61,27
0'	41	66,10		3	65,64		66,5	57,07
1'		66,10 ²⁾	0'	60,5	63,49		3	61,10
1' 10"		65,79 ³⁾	1'		63,48 ²⁾	0'	66,5	57,07 ²⁾
1' 20"		65,73	1' 10"		62,82	20"		54,0 ⁴⁾
2' 20"		65,75						

Betont sei noch der bereits erwähnte Umstand, daß die Trocknung nur durch Absaugen des Wassers erfolgte. Die Oberfläche blieb dabei merklich feucht. Dennoch verhielt sich der Kristall in den Perioden zwischen den Benetzungen wie trocken (vgl. Fig. 5). Das liegt daran,

¹⁾ Als Nullpunkt wurde hier eine Belastung mit 3 g gewählt.

²⁾ Nach der Ablesung erfolgt Benetzung mit Wasser.

³⁾ Nach der Ablesung erfolgt Trocknung.

⁴⁾ Hier brach der Kristall durch.

Tabelle 5.
Bei Berührung mit Wasser an der Druckseite erzielte plastische Durchbiegungen.

Nr.	h vor dem Versuch mm	b mm	l mm	S_1 g/mm ²	S_2 g/mm ²	ΔD		$\Delta_1 P$ an der Skale cm	$\Delta_s P$ (= $\Delta P - \Delta_1 P$) an der Skale cm	h nach dem Versuch	
						ΔP an der Skale cm	ΔE an der Skale cm			gef. mm	ber. mm
1	0,84	4,80	20,0	198	230	0,35	0,08	0,00	0,35	—	0,77
2	—	4,80	20,0	270	320	0,17	0,12	0,00	0,17	—	0,71
3	—	4,80	20,0	510	590	0,18	0,17	0,01	0,17	—	0,66
4	—	4,80	20,0	765	840	0,31	0,23	0,00	0,31	—	0,63
5	—	4,80	20,0	915	1080	0,47	0,47	0,31	0,16	—	0,58
6	—	4,80	20,0	1120	1270	1,55	0,47	0,13	1,42	—	0,55
7	—	4,80	20,0	1340	1550	2,71	0,72	0,63	2,08	0,51	0,51
8	1,74	4,80	40,0	582	618	0,22	0,10	0,00	0,22	—	1,69
9	—	4,80	40,0	666	723	0,20	0,17	0,00	0,20	—	1,62
10	1,42	4,80	40,0	468	545	0,23	0,17	0,00	0,23	—	1,31
11	—	4,80	40,0	589	642	0,41	0,23	0,00	0,41	1,29	1,26
12	1,05	4,80	40,0	363	406	0,49	0,21	0,00	0,49	—	0,99
13	—	4,80	40,0	682	723	0,38	0,22	0,00	0,38	—	0,96
14	—	4,80	40,0	797	862	0,92	0,34	0,00	0,92	0,94	0,92
15	1,50	5,21	40,0	985	1063	0,38	0,26	0,01	0,37	1,48	1,44
16	1,46	5,21	40,0	832	1018	0,57	0,58	0,00	0,57	1,34	1,32

h , b und l sind die Abmessungen.

S_1 und S_2 die Höchstspannungen vor und nach der Benetzung. (Die Differenz beruht auf der Abnahme von h .)

ΔD = Änderung der Durchbiegung während der Benetzung, ΔP = plastischer, ΔE = elastischer Anteil.

$\Delta_1 P$ = Anteil der plastischen Durchbiegung, der auf den Spannungszuwachs von S_1 auf S_2 entfällt.

$\Delta_s P$ = Bleibende Durchbiegung als Folge der plastizierenden Wirkung des Wassers.

daß die noch vorhandene Wassermenge auf NaCl gesättigt und daher wirkungslos ist. Auch in eigens hierzu angestellten Versuchen erwies sich, daß die Benetzung mit gesättigter Kochsalzlösung keine plastizierende Wirkung hat.

4. Festigkeit von Steinsalz, trocken und unter Wasser. Es gibt eine Merkwürdigkeit in der Festigkeit von Steinsalz, die bereits von W. Voigt festgestellt wurde, aber bisher noch nicht erklärt werden konnte. Sie besteht darin, daß die Zugfestigkeit weit unter der Bruchfestigkeit gelegen ist. Das Verhältnis der beiden Größen fand Voigt zu etwa 1:2, und zahlreiche Versuche, die wir in anderem Zusammenhang selbst ausgeführt haben, bestätigen dieses Ergebnis.

Ähnliche Abweichungen sind gelegentlich auch bei polykristallinen Materialien (Gußeisen, Steinen) gefunden worden und konnten dort zurückgeführt werden auf die Abweichungen vom Hookeschen Gesetz. Dieser Ausweg ist hier nicht gangbar, weil Abweichungen vom Hookeschen Gesetz nicht gefunden worden sind und auch vom Standpunkt der Bornschen Gittertheorie (bei den in Betracht kommenden Spannungen) unmöglich eintreten können. Angesichts dieser ungeklärten Sachlage betrachten wir in der Folge die normale Reißspannung von etwa 450 bis 550 g/mm² und die normale Bruchspannung von 1050 bis 1250 g/mm² als durch die Erfahrung im Zug- bzw. Biegungsversuche gegebenen Zahlen, deren Beziehung zueinander nicht erörtert wird.

Das Studium der Festigkeit unter Wasser begannen wir mit einigen Wiederholungen des Joffe-Effekts. Prismen von 25 mm² Querschnitt wurden in entsprechende Metallfassungen¹⁾ eingekittet und mit etwa der halben normalen Bruchlast, und zwar 5250 g, belastet und hierauf allseitig mit Wasser benetzt. In etwa 10 Minuten erfolgt das Reißen. Die sofort getrockneten Reißstücke zeigten, daß der Bruch nicht an der engsten Stelle eingetreten war. Diese Stellen hatten den Querschnitt von 1,0, 1,5, 1,6 und 3,0 mm². Die Festigkeit dieser Stellen war also jedenfalls größer als 5250, 3500, 3280 bzw. 1750 g/mm². Es zeigt sich also eine Verfestigung um mehr als das Zehnfache.

Eine weitere Steigerung wäre bei unserer Anordnung nur möglich, wenn wir auch noch kleinere Querschnitte abgelöst hätten. Damit kämen wir aber auf das Gebiet, in dem sich Steinsalz nach H. Müller²⁾ abnorm verhält. Es zeigt sich hier auch in trockenem Zustande erhöhte Festigkeit, was die systematische Durchführung unserer vergleichenden Unter-

¹⁾ Die nach der Vorschrift von W. Voigt (l. c.) angefertigt wurden.

²⁾ H. Müller, Phys. ZS. 25, 223, 1924.

suchungen unübersichtlich gestaltet hätte. Auf den von Müller gefundenen Effekt, den wir bestätigen könnten, kommen wir später noch zurück.

In einer nächsten Versuchsreihe wurden Prismen von genau derselben Art, wie sie zum Nachweis des Joffe-Effekts verwendet wurden, zu Zugversuchen verwendet, jedoch so, daß die Versuchskörper diesmal im unbelasteten Zustand abgelöst, hierauf durch Bespritzung mit Alkoholäther getrocknet und innerhalb von zwei bis drei Minuten gerissen wurden. Die Prismen rissen an den engsten Stellen, deren Querschnitte 9,9, 11,1, 13,6 und 14 mm² betragen, und hatten hierauf bezogen die Festigkeiten 530, 477, 490 bzw. 448 g/mm², also, wie zu erwarten war, durchaus normale Werte.

Ebenso ergab sich die Bruchfestigkeit von Steinsalzprismen, deren Oberfläche in Wasser abgelöst und die nachfolgend getrocknet wurden, zu 1193, 1100, 1045 und 1105 g/mm², also auch hier durchaus normale Werte.

Ganz anders wird das Verhalten der mit Wasser abgelösten und getrockneten Prismen, wenn die Ablösung der Oberfläche unter Spannung vor sich geht. In den hierauf bezüglichen sieben Versuchen wurden wiederum Prismen von 25 mm² mit 5250 g vorbelastet und hierauf allseitig mit Wasser benetzt, bis eine erhebliche Querschnittsabnahme erreicht war. Diese wurde jedoch nicht so weit getrieben wie bei den Versuchen über den Joffe-Effekt, sondern auf Grund der dort gewonnenen Erfahrungen so weit eingeschränkt, daß zunächst kein Bruch eintrat. Dann wurde mit Alkoholäther getrocknet und durch Zuließenlassen von Schrotkörnern das Gewicht bis zum Bruch gesteigert.

Dabei zeigte sich, daß die Prismen stets an den jüngsten Stellen am festesten waren und daher an weiteren Stellen rissen. Die Tabelle 6 enthält die Querschnitte der jüngsten Stellen sowie der Reißstellen und die auf die engeren Querschnitte berechneten Festigkeiten. Diese sind

Tabelle 6. Festigkeit von Steinsalz bei Vorbelastung unter Wasser und nachheriger Trocknung.

Nr.	Bruchlast	Reißquerschnitt	Engster Querschnitt	Untere Grenze der Festigkeit	Verfestigung
1	5800	7,5	5,0	1160	2,3 fach
2	6400	8,85	5,0	1280	2,6 "
3	9250	16,8	4,65	2000	4,0 "
4	8400	6,3	3,5	2400	4,8 "
5	5600	5,3	3,6	1550	3,1 "
6	8800	23,0	4,9	1800	3,6 "
7	5250	12,0	2,1	2500	5,0 "

also (ebenso wie beim Joffe-Effekt) als untere Grenzen zu betrachten. In Fig. 6 sieht man das eine Bruchstück des Probestückes Nr. 6 der Tabelle 6. Die auf rund 500 g/mm^2 bezogene Verfestigung ist in der letzten Spalte enthalten und beträgt das 2,3- bis 5fache.

Die an u. für sich unwirksame Ablösung wirkt verfestigend, wenn sie unter Anspannung erfolgt.

Wir fügen hier noch einige Messungen der Reißfestigkeit an engen Querschnitten hinzu. Die Prismen, die ursprünglich 25 mm^2 Querschnitt hatten, wurden auf die Querschnitte von $0,25 \text{ mm}^2$, $0,40 \text{ mm}^2$, $0,6 \text{ mm}^2$ und $0,22 \text{ mm}^2$ abgelöst, getrocknet und gerissen. Die so gewonnenen dünnen Stäbe zeigten deutliche Biegsamkeit. In den Fällen 1 bis 3 ergeben sich die Festigkeiten zu 400 g/mm^2 , 437 g/mm^2 und 615 g/mm^2 . Im Falle 4 riß der Kristall nicht an der engsten Stelle, sondern an einer anderen Stelle mit $0,65 \text{ mm}^2$. Auf den engeren Querschnitt bezogen ergibt sich der stark erhöhte Wert von 1320 g/mm^2 .

Auch diese Erscheinung, deren genauere Untersuchung hier nicht unternommen werden soll, möchten wir als Verfestigung deuten. Eine solche kann entweder dadurch zustande kommen, daß während der Ablösung das Gewicht der unteren Fassung, das etwa ein Viertel der Bruchlast ausmacht, die Verfestigung hervorruft, oder kommt vielleicht eine Plastizität des dünnen Kristallfadens als Grundlage der Verfestigung in Betracht.



Fig. 6.

Durch Belastung unter Wasser verfestigter und dann trocken gerissener Steinsalzkristall.

Tabelle 7. Bruchversuche, bei denen die Zugseite unter Wasser steht.

Nr. d.Versuchs- körpers	Ob unter Wasser oder trocken	h	b	l	P	F
		mm	mm	mm	g	g/mm^2
1	unter Wasser	1,76	4,32	40,0	250	1120
	trocken	1,89	4,31	20,0	615	1192
	trocken	1,93	4,34	20,0	626	1165
2	unter Wasser	1,87	4,82	40,0	302	1082
	trocken	1,99	4,83	20,0	681	1070
	trocken	2,02	4,82	20,0	690	1060
3	unter Wasser	1,91	4,85	40,0	294	1000
	trocken	2,02	4,87	20,0	710	1070
	trocken	2,00	4,88	20,0	680	1050
4	unter Wasser	1,56	4,92	40,0	202	1020
	trocken	1,72	4,90	20,0	510	1058
	trocken	1,71	4,92	20,0	503	1058

Zum Schluß sei noch auf die Bruchversuche eingegangen, bei denen die „Zugseite“ des Steinsalzes bis zum Augenblicke des Bruches unter Wasser und der übrige Teil des Kristalls trocken war. Sie ergaben normale Werte. Zum Vergleich wurden die beiden Bruchstücke des Versuchskörpers in trockenem Zustande gebrochen. Die dabei erzielten Ergebnisse stimmen mit den unter Wasser beobachteten Werten überein. (Vgl. Tabelle 7.)

Man sieht hier, daß eine erhöhende Wirkung des Wassers auf die Festigkeit ausbleibt, wenn man dafür sorgt, daß das Wasser keine Plastizierung und daher auch keine Verfestigung herbeiführt. Hier ist dies durch den wasserdichten Überzug an den Seitenflächen und an der „Druckseite“ erreicht worden. Erwähnt sei, daß die Seitenflächen im unteren Drittel ebenfalls frei gelassen und mit Wasser benetzt wurden, damit nicht ein Brechen an einer vielleicht nicht völlig benetzten Kante eintreten könne.

Rückblick.

1. Es wurde die bekannte Plastizierung des Steinsalzes unter Wasser im Biegungsversuch untersucht und festgestellt, daß der Effekt in einer Herabsetzung der Elastizitätsgrenze besteht, die sofort bei Berührung mit Wasser einsetzt und bei Trocknung oder bei Sättigung des Wassers an NaCl aufhört.

2. Auch wenn nur die obere (also gedrückte) Seite des gebogenen Prismas benetzt wird, tritt der Effekt ein, wenn auch etwas schwächer.

3. Wenn nur die untere, also die unter Zugspannung stehende Seite des gebogenen Prismas benetzt wird, ist die Plastizierung kaum nachweisbar.

Aus den Punkten 1 bis 3 ist zu schließen, daß bei Steinsalz von normaler Temperatur der wesentlichste Widerstand gegen Formänderung in der Oberfläche gelegen ist. Während der Ablösung der oberflächlichen Schichten werden diese Widerstände dauernd beseitigt.

Eine Erklärung dieses Effektes kann man darauf gründen, daß die Biegung der Steinsalzprismen durch ein Gleiten entlang der Rhombendodekaederfläche bedingt ist. Dabei treten die gleitenden Schichten an der Oberfläche hervor und erzeugen feine Treppen, die man Gleitlinien nennt. Es muß wohl angenommen werden, daß in der normalen Oberfläche sich ein Widerstand gegen dieses Hinausschieben von Gleitschichten geltend macht, so daß diese hier gleichsam abgeriegelt sind.

Die dauernd vor sich gehende Ablösung der Oberflächenschicht scheint die Verriegelung dauernd wegzunehmen. Anscheinend muß eine gewisse Zeit verstreichen, ehe sich diese an einer frischen Fläche ausbildet.

4. Des weiteren wurde die von Joffe gefundene erhöhte Festigkeit von Steinsalz unter Wasser untersucht. Der Effekt wurde bis zu zehnfacher Verfestigung reproduziert.

5. Steinsalzprismen, deren Oberfläche abgelöst wurde, zeigen normale Zug- und Bruchfestigkeit.

6. Erfolgt die Ablösung der Oberfläche unter Belastung, so erweist sich Steinsalz auch nach der Trocknung als bedeutend verfestigt. Es wurde bis zu 5facher Festigkeit gefunden.

7. Ein Steinsalzprisma, das man so bricht, daß die untere Seite („Zugseite“) unter Wasser steht, dagegen der übrige Kristall wasserdicht überzogen ist, bricht bei normaler Last.

Aus den Versuchen 5 bis 7 wird geschlossen, daß die Erklärung des Joffe-Effektes in einer Verfestigung zu suchen ist, die das Steinsalz bei Belastung unter Wasser erleidet. Die Verfestigung wird durch die Herabsetzung der Elastizitätsgrenze durch das Wasser herbeigeführt. Diese Herabsetzung ist der primäre Effekt, wenn er fehlt (wie im Falle 7), so bleibt auch die Wirkung des Wassers auf die Festigkeit aus.

Der Standpunkt, zu dem wir gelangen, ist also der, daß man sich der „molekularen Festigkeit“ von Steinsalz, wie sie sich aus der Bornschen Gittertheorie ergibt, durch Verfestigung des Kristalls nähern kann. Die Verfestigung ändert wohl nichts Wesentliches an den Gitterkräften, aber sie beseitigt die Umstände, die ein vorzeitiges Reißen bedingen.

Worin diese Umstände bestehen, wissen wir freilich nicht, es spricht aber bisher wenig dafür, daß sie in der Oberfläche gelegen sind. In einer Untersuchung, über die demnächst berichtet werden soll, konnten wir feststellen, daß bei Steinsalzkristallen, die man auf Grund genauer optischer Prüfung des Materials auswählt, die einzelnen Bestimmungen der Festigkeit (namentlich im Biegungsversuch) auf wenige (im Mittel 1 bis 2) Prozente übereinstimmen. Der Zustand der Oberfläche — ob Spaltfläche, geschliffen, poliert, abgelöst oder auch angeritzt — ist nur von mäßigem Einfluß. Am stärksten weichen grobgeschliffene Stücke ab, deren Festigkeit etwa 20 Proz. über dem Durchschnitt liegt.

Bei Ausführung der obigen Arbeit sind wir vom Elektrophysik-ausschuß der Notgemeinschaft der deutschen Wissenschaften unterstützt worden, wofür wir nochmals unseren besten Dank aussprechen.

Für gütige Unterstützung bei der Beschaffung von Steinsalz aus Wieliczka danken wir den „Optischen Werkstätten von B. Halle Nachf. in Berlin-Steglitz“.

Schließlich sei Herrn Dr. E. Schmid für sein dauerndes Interesse und seine Hilfsbereitschaft herzlichst gedankt.

Berlin-Dahlem.

Kaiser Wilhelm-Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie.

Kaiser Wilhelm-Institut für Faserstoffchemie.