

Vergleichende Untersuchungen über die Methoden zur Bestimmung der Druckfestigkeit von Gesteinen.

Bericht über von L. PRANDTL und F. RINNE durchgeführte Versuche, erstattet

von

F. Rinne in Hannover.

Mit Taf. VI—VIII und 2 Textfiguren.

Die Versuche, über die hier berichtet werden soll, gehören als vorbereitende Untersuchungen einer Reihe von experimentellen Studien an, die dem Zusammenhange gewidmet sind, der zwischen den Festigkeitseigenschaften von Gesteinen und ihrer mineralogischen Art sowie ihrem Gefüge besteht.

Erfreulicherweise wurden die Versuche wegen ihres technischen Interesses durch größere Mittel seitens der Jubiläumstiftung der deutschen Industrie unterstützt. Da aber die Beantwortung der Fragen nach der Festigkeit der Gesteine für mineralogische und geologische Betrachtungen gleichfalls von Bedeutung ist, so scheint es uns zweckmäßig, die Ergebnisse auch in diesem Jahrbuch zu veröffentlichen soweit sie für die wissenschaftliche Mineralogie und Geologie von Nutzen sein könnten. Ich gestatte mir daher im nachstehenden einen Überblick über die bislang von uns angestellten Untersuchungen zu geben. Andererseits wird Prof. PRANDTL die Resultate in der Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure in einer dem technischen Charakter jener Zeitschrift angepaßten Form veröffentlichen.

Zur Bestimmung der Druckfestigkeit von Gesteinen bedient man sich im allgemeinen würfelförmiger Probekörper von gewöhnlich 5—7 cm Kantenlänge¹. Natürlich müssen die Würfel recht „schonend“ hergestellt werden. Grobe Behandlung des Materials bei seiner Bearbeitung zu Druckkörpern, z. B. durch Hammerschläge, kann die Festigkeit stark erniedrigen. Die Druckflächen müssen genau eben und einander parallel sein, was sich durch sorgfältigstes Abschleifen erreichen läßt. Für gewöhnlich zerdrückt man die Würfel zwischen den peinlich eben bearbeiteten, harten (gußeisernen oder stählernen) Druckplatten einer Presse, die mit einer Vorrichtung zum Ablesen der in ihr wirkenden Kräfte versehen ist. Von den Druckplatten ist meist eine in einem Kugellager beweglich, so daß für glattes Anliegen am Probewürfel und für zentrischen Kraftangriff gesorgt ist.

Der Versuch geht in der Weise vor sich, daß man den Druck so lange verstärkt, bis Zusammenbruch des zu untersuchenden Materials erfolgt.

Als Druckfestigkeit nimmt man den Mittelwert von mehreren Versuchen. Man kennzeichnet die Festigkeit durch Angabe der Maximalbelastung in Kilogrammen auf den Quadratcentimeter des Würfelquerschnitts.

Die Zerstörung äußert sich bei einem solchen Experiment, im Falle völliger Regelmäßigkeit, in der Weise, daß sich von den vier freien Würfelseiten Platten ablösen und die Zerstörungszonen in steter Verjüngung nach innen voranschreiten. Schließlich erfolgt plötzlicher Zusammenbruch. Es bleiben die an den Druckplatten anliegenden Würfelflächen unversehrt, und man erhält so pyramidenförmige Körper, wie es z. B. die Textfig. 1 bei einem künstlichen Konglomerat (Beton) zeigt.

Man hat nun schon früher beobachtet, daß die Druckfestigkeitszahl sehr wesentlich von der Form des Probestücks und von der Art der Anstellung des Versuchs abhängt. Benutzt man nicht Würfel, sondern im Verhältnis zu letzteren niedrige Körper, also Platten, oder andererseits solche mit stärkerer Längenentwicklung, also Säulen, so erhält man andere Werte, und zwar sind die Differenzen sehr beträchtlich.

¹ 7,07 cm Kantenlänge entsprechen 50 qcm Druckfläche.

Scheinbar steht also das Verhalten der Körper bei der Bestimmung ihrer Druckfestigkeit im Gegensatz zu dem bei Zugfestigkeitsproben. Während im letzteren Falle die Länge des Probekörpers auf das Ergebnis keinen wesentlichen Einfluß hat, ist die Höhe bei dem in oben erwähnter Art angestellten Druckversuch, wie erwähnt, von sehr großer Bedeutung. Dies scheinbar ganz andere Verhalten erklärt sich dadurch, daß beim Zugversuch stets verhältnismäßig lange Stücke benutzt werden, beim Druckversuch aber wegen der

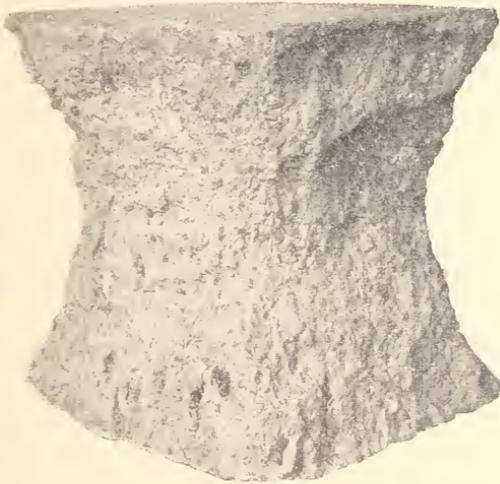


Fig. 1.

Knickgefährdung langer Körper und wegen der einfacheren Herstellung verhältnismäßig kurze.

Die Ingenieure haben sich seit langem dahin geeinigt, die „Würfelfestigkeit“, d. h. diejenige Zahl als Druckfestigkeit anzugeben, die man beim Zerdrücken von Würfeln gewinnt. Und auch bei geologischen Betrachtungen hat man immer diesen Wert benutzt.

Es ist nun hinsichtlich des besagten Einflusses der Druckkörperhöhe auf das Versuchsergebnis zu vermerken, daß bei Benutzung harter Platten die Druckverteilung an den Enden des Probstückes durchaus nicht gleichmäßig ist. Beim Pressen des Materials kommt außer einer Zusammendrückung in der

Druckrichtung eine Art Quellen in seitlicher Richtung ins Spiel. Diesem seitlichen Ausweichen stellt sich bei der Verwendung harter Platten, die mit großer Gewalt gegen den Probekörper gepreßt worden, die Reibung zwischen letzteren und den Maschinenplatten entgegen. Die Teile des Probekörpers, die den harten Platten der Presse anliegen, werden durch die eisernen Backen zusammengehalten, d. h. es wird gewissermaßen der Zerstörung entgegen gearbeitet, der Körper wird vor dem Bersten durch die Reibung geschützt: die Festigkeit wird also erhöht.

Es kommt nun darauf an, ob diese Ungleichmäßigkeit der Druckverteilung an den Endflächen sich bis zur Mitte des Probekörpers hin ausgleicht oder nicht. Bei niedrigen Körpern ist das nicht der Fall. Deshalb geben sie beim Versuch unter Verwendung harter Druckplatten sehr wesentlich größere Festigkeitszahlen als höhere Probekörper.

Bei sehr bedeutenden Längserstreckungen kommt natürlich auch die Knickfestigkeit, also eine seitliche Durchbiegung in Betracht. Tritt sie ins Spiel, so wirkt das natürlich stark als Minderung der Festigkeitszahl.

Die Würfelfestigkeit ist also die Festigkeit bei einer in bestimmter Weise ungleichmäßigen Druckbeanspruchung. Das was man aber, auch bei geologischen Betrachtungen, wünscht, ist die Festigkeitszahl bei völlig homogener Druckverteilung.

Wenn man als Ausdruck der Gesteinsfestigkeit die Würfelfestigkeitszahl benutzt, so ist zu bedenken, daß es sich um eine praktisch natürlich recht wichtige Vergleichszahl handelt, daß diese aber nicht als Idealzahl, nämlich als Zeichen für die dem Material innewohnende Festigkeit gelten darf.

Man kann sich dem Ideal, der Festigkeitsangabe bei völlig homogener Druckverteilung, wie unten zu ersehen ist, nähern durch genügende, aber nicht allzu große Länge des Probestücks, andererseits aber kann man auch versuchen, die Druckverteilung an den Enden durch eine nachgiebige Apparatur an Stelle der harten Platten gleichmäßiger zu gestalten. Es hat sich ergeben, daß die vereinigte Anwendung beider Mittel sehr gut zum Ziele führt.

Bei unseren experimentellen Untersuchungen mußte es sich also zunächst darum handeln, auf Grund vieler einschlägiger Versuche ein sicheres Bild aller in Betracht kommenden Verhältnisse zu gewinnen, um mit Hilfe der gemachten Erfahrungen wenn möglich eine Methode ausfindig zu machen, die den oben gestellten Anforderungen entspricht und dabei praktisch leicht ausführbar ist.

Wir bedienten uns zumeist einer Maschine von AMSLER-LAFFON in Schaffhausen, welche 30 000 kg Pressung auszuüben gestattete. Sie wurde uns von Prof. G. LANG, Vorstand des Bauingenieur-Laboratoriums der Technischen Hochschule zu Hannover, zur Verfügung gestellt. Bei den Versuchen hat uns Herr Dr. RÜDENBERG, Assistent am Institut für angewandte Mechanik in Göttingen, freundlichst unterstützt. Den Genannten sei auch an dieser Stelle unser bester Dank abgestattet.

Die oben erwähnte vortreffliche Maschine ist in der Textfig. 2a im Längsschnitt, in 2b im Grundriß und in der Fig. 10 Taf. VIII in Ansicht dargestellt. Man erkennt, daß es sich um eine hydraulische Presse handelt. Ihre Höhe beträgt 2,1 m und die vom kreisförmigen Fuße eingenommene Bodenfläche hat 77 cm Durchmesser. Die Handhabung der Maschine ist äußerst einfach, ihre Arbeitsweise sehr zuverlässig.

Der Pumpenkolben K_1 (vergl. Textfig. 2) wird durch Kurbel K, Getriebe R_{1-4} und Schraubenspindel Sp_1 bewegt. Der Zylinder C_1 ist mit dickflüssigem Öl gefüllt, das durch Empordrücken des Kolbens K_1 durch das Rohr L_1 nach dem Hauptzylinder C_2 gepreßt wird, in welchem sich der genau geschliffene Druckkolben K_2 im Öl bewegt. Kolben und Zylinder sind so peinlich genau gearbeitet, daß auch beim höchsten Druck (ca. 200 Atm.) das dickflüssige Öl nur langsam durch den Zwischenraum quillt; es fließt in einen Becher und wird von Zeit zu Zeit durch eine Handpumpe wieder in den Zylinder gefüllt. Demzufolge bewegen sich die Kolben fast reibungslos; sie schwimmen sozusagen in Öl. Der Gang der Maschine ist sehr leicht. Auf dem Druckkolben K_2 ruht mittels Kugelgelenk die untere Druckplatte D_1 , in deren genaustens abgemessene Mitte der Probekörper P gestellt wird.

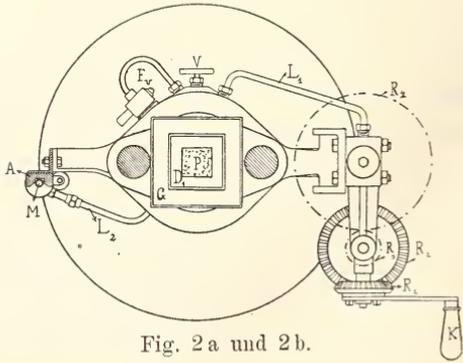
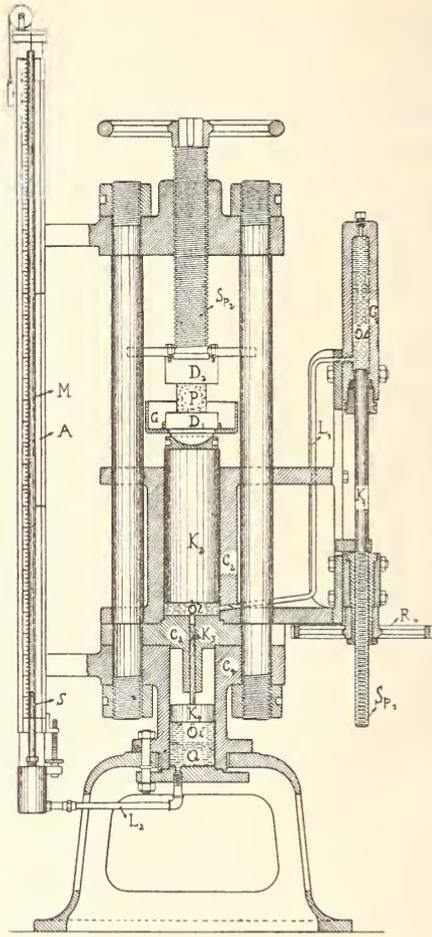


Fig. 2 a und 2 b.

Die obere Druckplatte D_2 ist durch eine Spindel Sp_2 ausgiebig verstellbar, derart daß selbst 30 cm lange Probekörper zwischen die Platten der Maschine gestellt werden können.

Die Pressung geschieht durch Empordrücken des Kolbens K_2 sowie der auf ihm ruhenden unteren Stahlplatte und des Probestückes gegen die obere Stahlplatte.

Die Größe des Druckes unter dem Kolben K_2 wird durch eine Quecksilbersäule gemessen, die durch einen in der Textfig. 2 kenntlichen „Druckreduktor“ gehoben wird. Man bemerkt in der Fig. 2 a im Zylinder C_3 einen nur bleistiftdicken Kolben K_3 , der im Zylinder C_4 einen in Fig. 2 a schematisierten Kolben K_4 bewegt. Unter letzterem befindet sich Quecksilber Q , auf dem eine Schicht Öl schwimmt. Vom Boden dieses Raumes führt eine Leitung L_2 nach einem geteilten Manometerrohr M aus durchsichtigem Celluloid, in dem das Quecksilber entsprechend dem Druck, der auf den Probekörper ausgeübt wird, steigt. Der vom Quecksilber erreichte höchste Stand wird durch einen kleinen Schwimmer S angezeigt, welcher seinen Platz innebehält, auch wenn das Quecksilber, z. B. nach dem Zusammenbruch des Probekörpers, wieder gesunken ist.

A ist ein Brett mit Skala zum Ablesen des Quecksilberstandes. Schließlich seien noch erwähnt eine Füllvorrichtung F_v , ein Ventil V und ein Gefäß G zum Auffangen der Bruchstücke des Probekörpers.

Für höhere Drücke als 30 t stand uns eine hydraulische Presse mit einer Leistung bis 150 t im Institut für angewandte Mechanik in Göttingen, das Prof. PRANDTL unterstellt ist, zur Verfügung.

Als Material für die Versuche dienten zwei Sorten weißen Marmors von Carrara. Das verwandte Gestein hatte zumeist ein gleichmäßig körniges Gefüge. In einer Reihe von Probekörpern traten allerdings vereinzelt großkristalline Nester auf, die aber wie die übrige Masse des Marmors lückenlos waren und nicht wesentlich störten.

Die sehr zahlreichen Probestücke, z. T. Zylinder, z. T. Säulen mit quadratischem Querschnitt, wurden in der mechanischen Werkstatt von VOIGT & HOCHGESANG (R. BRUNNÉE) in Göttingen aus größeren Marmorstücken und zwar parallel zueinander herausgeschnitten, um etwaigen störenden Einfluß

von Festigkeitsunterschieden in verschiedenen Richtungen der Gesteinsbank hintanzuhalten. Herr R. BRUNNÉE, dem wir für die zahlreichen, äußerst sorgfältig gearbeiteten Probekörper sehr zu Dank verpflichtet sind, schreibt uns bezüglich der Herstellung letzterer wie folgt.

„Durch Sägen quer zur Lagerfläche wurden zunächst 250 mm lange Stäbe von z. T. 47 mm, z. T. 52 mm Quadrat hergestellt. Die von 52 mm wurden auf einer großen Schleifmaschine abgerundet, und vor ihre Endflächen wurde je eine Eisenplatte mit feinem Loch als Zentrum mit Schellack gekittet. Hierauf wurden die Säulen vermittels eines glasharten Stahls auf der Drehbank sehr vorsichtig abgedreht und schließlich mit einer Schleifhülse genau rund auf 50,2 mm Durchmesser fertig geschliffen. Nachdem diese Säulen in vorgeschriebene Längen zersägt waren, mußte noch eine besonders wichtige Arbeit, das Schleifen peinlich genau ebener und paralleler Endflächen ausgeführt werden. Zu diesem Zwecke wurden drei große Spiegelglasscheiben benutzt, welche aufeinander geschliffen wurden, bis von allen sechs Flächen der Scheiben je zwei beliebige zur vollkommenen Berührung gebracht werden konnten. Auf diesen Planflächen wurden dann je 10 durch Wachskitt verbundene Säulen gleicher Länge vermittels Polierschmirgel geschliffen. So ließen sich Endflächen herstellen, die genau aufeinander paßten, so daß zwei übereinandergestellte Säulen aneinander hafteten. Ganz entsprechend wurde bei der Herstellung der Stäbe mit quadratischem Querschnitt verfahren.“

Bei vorsichtig verstärkter Druckausübung ließ sich auf der Oberfläche der Marmorprobestücke verhältnismäßig sehr leicht die interessante Erscheinung von regelmäßigen Rißsystemen beobachten, von bestimmt angeordneten kleinen Sprüngen nämlich, die ungefähr bei Maximalbelastung auftraten (Taf. VI Fig. 1—4). Bei weiter geführter Druckäußerung begann das Quecksilber im Skalenrohr der Maschine zu sinken, und dann trat plötzlicher Zusammenbruch ein.

Es ist also möglich, Präparate herzustellen, die trotz der ausgeübten Maximalbelastung in sich zusammenhalten. Abgesehen von den feinen Rissen und Verdrückungszonen sind die Stücke so gut wie unverändert; sie besitzen, wie eine

erneute Belastung zeigt, häufig noch $\frac{9}{10}$ ihrer ursprünglichen Festigkeit.

Ähnliche Linienscharen sind schon vor vielen Jahren von LÜDERS¹ bei Eisen beobachtet worden. Obwohl es sich dabei um Verschiebungen ohne Ribbildung handelt, besteht zwischen derartigen Erscheinungen beim Eisen, den sogen. Fließfiguren, und den erwähnten beim Marmor gewiß eine innere Verwandtschaft. LÜDERS sah die Fließfiguren auf blank polierten Eisenstäben, die Druck oder Zug ausgesetzt waren, und zwar besonders deutlich nach einem Ätzen oder Glühen des Eisens. Sei vermerkt, daß auch DAUBRÉE² solche regelmäßigen Liniensysteme z. B. an künstlichen Gemischen von Gips und Bienenwachs mit Harz, die er einem Druck unterwarf, hergestellt und abgebildet hat. Zahlreiche einschlägige Beobachtungen an Metallen hat L. HARTMANN³ gemacht. Einige entsprechende Erscheinungen am Marmor, der bei Einschluß in Kupferhülsen unter Umschließung durch Alaun gepreßt wurde, habe ich in diesem Jahrbuch abgebildet⁴.

Eine theoretische Begründung der in Rede stehenden Verhältnisse hat O. MOHR⁵ gegeben, der in seiner Veröffentlichung in der Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure auf die Beobachtungen von L. HARTMANN bezug nimmt, die mit den Berechnungen MOHR's sehr gut übereinstimmen⁶.

In der erwähnten MOHR'schen Abhandlung heißt es: „Die an einem gleichartigen Körper nach Überschreiten der Elastizitätsgrenze zu beobachtenden Formänderungen erstrecken sich

¹ W. LÜDERS, Über die Äußerung der Elastizität an stahlartigen Eisenstäben und über eine beim Biegen solcher Stäbe beobachtete Molekularbewegung. DINGLER's Journal. 155. 18. 1860.

² DAUBRÉE, Synthetische Studien zur Experimentalgeologie. 1880. p. 241.

³ L. HARTMANN, Distribution des déformations dans les métaux soumis à des efforts. 1896.

⁴ F. RINNE, Beitrag zur Kenntnis der Umformung von Kalkspat-kristallen und von Marmor unter allseitigem Druck. Dies. Jahrb. 1903. I. 160.

⁵ O. MOHR, Welche Umstände bedingen die Elastizitätsgrenze und den Bruch eines Materials? Zeitschr. d. Ver. deutsch. Ingen. 44. 1524 u. 1570. 1900.

⁶ Prof. PRANDTL gedenkt die in Rede stehenden Verhältnisse in einer besonderen Abhandlung dieser Zeitschrift zu behandeln.

nicht auf die kleinsten Teile des Körpers. Sie bestehen vielmehr darin, daß Körperteile von endlicher Ausdehnung in zwei Gruppen von Gleitschichten sich gegeneinander verschieben. Die Spuren dieser Gleitschichten an der Oberfläche des Körpers bilden die Fließfiguren. Bei gleichbleibender Art und wachsender Größe der Inanspruchnahme bleibt die Stellung der Gleitschichten unverändert bis zum Bruch. Oft fallen die Bruchflächen zusammen mit einzelnen Gleitschichten. Die benachbarten Gleitschichten einer Gruppe sind parallel zueinander gestellt. Beide Gruppen kreuzen sich unter einem Winkel, dessen konstante Größe nur von der Materialbeschaffenheit, also nicht vom Spannungszustand der betreffenden Körperpunkte und nicht von der Größe der Spannung abhängig ist. Bei gleicher Gattung, aber wechselnder Beschaffenheit des Materials weicht der Schnittwinkel desto mehr von 90° ab, je härter und spröder das Material ist. Die Abweichung ist z. B. größer für harten Stahl als für weichen. In Prismen, die in ihrer Achsenrichtung gezogen oder gedrückt werden, wird der Gleitschichtenwinkel von der Achsenrichtung halbiert. Dieser von der Achsenrichtung halbierte Winkel ist in einem gezogenen Prisma stets größer, in einem gedrückten Prisma stets kleiner als 90° . Für ein und dasselbe Material ergänzen sich beide Winkel zu 180° .

Die Gleitschichten entstehen nicht gleichzeitig und sind nicht gleichmäßig verteilt. Die bezeichneten Unregelmäßigkeiten sind desto geringer, je gleichmäßiger das Material ist.“

Unsere gepreßten Marmorkörper zeigten die Liniensysteme oft in schönster Weise. Man kann die Deutlichkeit der Erscheinung noch dadurch verstärken, daß man Farblösungen, etwa von Berliner Blau, über das trockene Probestück pinselt. Es wird die Flüssigkeit in die Rißsysteme hineingesaugt zum Zeichen dafür, daß man es mit porösen Zonen, also gegenüber ihrer so gut wie porenfreien und die Farblösung deshalb nicht aufnehmenden Umgebung mit zergrusten Partien zu tun hat.

Der Winkel der Rißsysteme beträgt bei unseren Präparaten etwa 60° bzw. 120° . Der spitze Winkel wird, entsprechend den Mohr'schen Darlegungen, durch die Druckrichtung halbiert.

Auf Schnitten parallel zur Oberfläche von Probewürfeln

mit Rißsystemen zeigte sich, daß die in Rede stehenden Figuren an Deutlichkeit nach dem Innern des Materials sehr schnell abnehmen. Der Bruch erfolgte bei Benutzung schlanker Probestäbe mehr oder minder ausgesprochen am einen oder anderen der oberflächlich sichtbaren Sprünge. Bei geringer Höhe der Probekörper störten die schon erwähnten Wirkungen der Endflächen.

Im allgemeinen ist über die Brucherscheinungen an den Marmorproben zu berichten, daß zweierlei Arten von Bruchflächen zu unterscheiden sind. Es treten nämlich sowohl Zergrusungsbruchflächen als auch, mit ersteren vergesellschaftet, Sprengbruchflächen auf. Die beiden Arten unterscheiden sich durch ihr Äußeres wesentlich voneinander (vergl. Fig. 5—8 Taf. VII). Die erstgenannten Brüche, längs denen Verschiebung vor sich gegangen ist, sind erfüllt von einem weißen, durch Zermalmung der Kalkspatkörner des Marmors entstandenen Mehl, das oft sehr große Feinheit besitzt. Nach seiner Entfernung, z. B. durch Blasen, fällt die entstandene Fläche immer noch durch lockere Beschaffenheit und kreidigweiße Farbe auf, die für stark zermürbte Partien kennzeichnend ist. Die Sprengbruchflächen hingegen sehen ganz wie die üblichen Bruchflächen des Marmors aus, wie man sie z. B. durch Abschlagen eines Splitters mittelst Hammerschlag hervorrufen kann. Sie sind staubfrei.

Im folgenden sollen nun zunächst bei verschiedenen Versuchsanordnungen gewonnene Ergebnisse vermerkt werden. Dabei wird auf die volle Aufzählung der sehr zahlreichen Experimente verzichtet.

I. Zerdrücken von Probekörpern zwischen harten Platten.

Diesen Versuchen wurden sowohl im Querschnitt quadratische als auch zylindrische Körper unterworfen. Im ersteren Fall war die Grundfläche 45 : 45 mm, im zweiten waren Durchmesser von 50 mm gewählt. Bei beiden Versuchsarten wechselte die Höhe der Probestücke von 18,5—225 mm.

Der Einfluß der Höhe der Versuchskörper auf die Festigkeitszahlen zeigte sich in sehr drastischer Weise. Sei aus den vielen einschlägigen Versuchen eine Reihe herausgegriffen.

Es handelt sich bei den angeführten Zahlen um die Mittelwerte von meist je 3 Versuchen, ausgenommen beim Würfelversuch, dem 6 Druckkörper unterworfen wurden. Die Zahlenstreuung hielt sich in ziemlich engen Grenzen: z. B. sind die Einzelbeobachtungen beim unten angeführten Stab von 135 mm Länge 25,6 t, 26,4 t, 25,4 t; beim Stab von 225 mm Länge 26,6 t, 25,35 t, 25,1 t; beim Zylinder von 135 mm Länge 25,75 t, 26,05 t, 25,05 t; bei dem von 225 mm Länge 25,7 t und 25,1 t.

1. Probekörper mit quadratischem Querschnitt (45:45 mm).

Höhe	Mittlere Festigkeit
18,5 mm	1940 kg/qcm
30 "	1650 "
45 " (Würfel)	1500 "
90 "	1330 "
135 " }	1280 "
225 " }	

2. Zylindrische Probekörper (50 mm Durchmesser).

Höhe	Mittlere Festigkeit
18,5 mm	1880 kg/qcm
30 "	1630 "
45 "	1440 "
90 "	1330 "
135 " }	1290 "
225 " }	

Die Festigkeitszahlen der quadratischen Platten von 18,5 mm und der quadratischen Säulen von 135 bzw. 225 mm Höhe weisen also die sehr beträchtlichen Unterschiede von 1940—1280 = 660 kg/qcm = 50% der kleinsten Zahl auf. Bei den Probezylindern ist die Abweichung nur wenig geringer, nämlich 1880—1290 = 590 kg/qcm. Im Verhältnis zu der, nach Übereinkommen der Ingenieure, allgemein benutzten Würfel Festigkeitszahl, im vorliegenden Falle 1500 kg/qcm ist der bei obiger Versuchsreihe erhaltene höchste Wert um 1940—1500 = 440 kg/qcm größer, der niedrigste Wert um 1500—1280 = 220 kg/qcm kleiner. Es ist das obige also ein recht deutliches Beispiel dafür, daß man, z. B. bei geologischen Betrachtungen, nicht ohne weiteres die Würfel Festigkeit eines Gesteins Berechnungen zugrunde legen darf.

Bezüglich des in Rede stehenden Verhältnisses der Druckfestigkeitszahlen von verschiedenen hohen Körpern, die zwischen harten Platten zerdrückt werden, hat BAUSCHINGER¹ die Meinung vertreten, daß diese Zahlen sich, zunächst für die quadratischen Prismen, geometrisch durch eine Hyperbel, also durch die Formel $\lambda + \nu \frac{a}{h}$ ausdrücken lassen, wo λ und ν Konstanten des Materials, a die Seite des quadratischen Querschnitts und h die Höhe des Probekörpers bezeichnet. Die oben angeführten Versuchszahlen lassen sich dieser Auffassung im allgemeinen anpassen, soweit Höhen von 18,5—135 mm in Betracht kommen. Die Versuche mit den noch schlankeren Säulen haben aber keine deutliche weitere Erniedrigung der Festigkeitszahl ergeben, wie das die Hyperbelformel verlangen würde. Es scheint, daß beim Marmor von einer Höhe der Versuchskörper an, die etwa dem dreifachen Durchmesser gleichkommt, die Festigkeitszahlen bei Druckversuchen zwischen harten Platten konstant bleibt. Bei sehr schlanken Proben ist natürlich eine Abweichung infolge von Durchbiegung zu erwarten.

Die vorliegenden Versuchsergebnisse entsprechen also der theoretischen Forderung, daß bei langen Stücken der störende Einfluß der Enden der Probekörper verschwindet und man von einer gewissen Länge an eine gleichmäßige Ziffer gewinnt, die man als Idealzahl für die dem Material als solchem innewohnende Festigkeit ansehen kann. Für die untersuchte Art des carrarischen Marmors ist diese Zahl etwa 1285 kg/qcm. Sie weicht von der Würfelfestigkeit = 1500 kg/qcm um 215 kg/qcm = 14,3% nach unten ab.

II. Versuche zum Zwecke gleichmässiger Spannungsverteilung an den Enden der Probekörper.

Um die oben erwähnte Idealzahl auch bei niedrigeren Proben erlangen zu können, was für viele Fälle praktisches Bedürfnis ist, mußte für eine gleichmäßige Spannungsverteilung

¹ BAUSCHINGER, Experimentelle Untersuchungen über die Gesetze der Druckfestigkeit. *Mitteil. aus d. mech.-techn. Labor. d. techn. Hochsch. München.* Heft 6. 1876.

an den Enden der Probestücke gesorgt werden. Ein hydraulischer Druck würde das am besten ermöglichen. Prof. FÖPPL¹ hat sich zu dem Zwecke bereits eines Flüssigkeitspolsters bedient. Es erscheint aber einfacher, an Stelle einer Flüssigkeit vulkanisiertes Gummi, etwa von der Festigkeit härteren Radiergummis, zu verwenden, das sich unter allseitigem Druck annähernd wie eine Flüssigkeit verhält. Bei den betreffenden Versuchen wurde das Gummipolster durch eine Messingkapsel abgedichtet und in ein Stahlgehäuse eingeschlossen. Der Probekörper empfing den in der Presse ausgeübten Druck durch die Messingkapsel hindurch vom Gummi. Bei Belastung drängt sich das letztere in alle Unebenheiten hinein und sorgt dadurch für eine gleichmäßige Druckverteilung.

In der Tat wurden unter Benutzung solcher Anordnung recht gleichmäßige Ergebnisse bei Probekörpern verschiedener Höhe bis zu einem sehr niedrigen Maße herab erzielt. Voraussetzung ist eine recht genaue Abdichtung, andernfalls strömt das Gummi ähnlich wie eine Flüssigkeit, aber außen sofort wieder erstarrend, aus der Apparatur heraus.

Der Bruch stellte sich bei der in Rede stehenden Art der Versuchsanordnung in anderer Art dar als beim Experiment unter alleiniger Benutzung harter Druckplatten. Nach dem Erscheinen der Systeme von Rißlinien, die anzeigten, daß die Maximallast erreicht wurde, sprang nämlich stets nur eine Scherbe vom Probestück ab, wie das die Fig. 9 auf Taf. VIII zeigt. Da nach erfolgtem Scherbenbruch Gummi ausströmte, war der Versuch natürlich hiermit zu Ende.

Aus den zahlreich angestellten Experimenten sei die letzt-erhaltene Reihe herausgegriffen. Sie betrifft eine andere Marmorsorte als die, welche für die oben erwähnten Versuche zwischen harten Platten benutzt wurde. Zur Kennzeichnung dieser zweiten Marmorsorte sei auch ihre Würfelfestigkeit = 1185 kg/qcm angegeben. Die Zahlen sind Mittelwerte von meist je 6 Versuchen. Der Durchmesser der verwandten Marmorzylinder betrug 50 mm.

¹ FÖPPL, Druckversuche mit Wasserkissen. Mitteil. aus dem mech.-techn. Labor. der techn. Hochsch. München. Heft 28 p. 44. 1902.

Höhe	Mittlere Festigkeit
15 mm	1090 kg/qcm
25 "	1065 "
45 "	1055 "
70 "	1088 "
100 "	1060 "

Während also die Versuche unter alleiniger Anwendung harter Platten außerordentlich verschiedene Festigkeitszahlen ergaben, ist bei vorliegender Versuchsanordnung in der Tat eine sehr gleichmäßige Ziffer bei stark abweichenden Höhen der Versuchskörper erzielt.

Als dem Marmor der in Rede stehenden Versuchsreihe zukommende Druckfestigkeitszahl kann man 1070 kg/qcm annehmen. Von der Würfelfestigkeit weicht sie um 115 kg/qcm = 9,7% nach unten ab, weniger also als beim festeren Marmor der ersten Reihe, bei dem die entsprechende Differenz von 14,3% festgestellt wurde.

Die Gleichmäßigkeit in den Ergebnissen der einzelnen Versuche ist im vorliegenden Falle sehr zufriedenstellend. Andererseits ist jedoch zu vermerken, daß die Eigenart des Bruches, der, wie erwähnt, nur im Absprengen eines randlichen Scherbes besteht, bei etwaigem ungleichmäßigem Material Mißlichkeiten mit sich bringen kann. Bei Stoffen nämlich, welche die für die Maximalbelastung charakteristischen Rißsysteme nicht zeigen, kann es in Ansehung des Umstandes, daß beim Versuch kein völliger Zusammenbruch erfolgt, zweifelhaft sein, ob bei dem Scherbenabbruch in der Tat die Maximalbelastung schon erreicht war oder ob nicht vielleicht nur eine einzelne schwächere Stelle nachgegeben hatte. Auch ist nicht zu verkennen, daß die Versuchsvorbereitungen bei den in Rede stehenden Anordnungen ziemlich umständlich sind.

Es wurde daher versucht, eine Methode ausfindig zu machen, die in bezug auf Verhinderung ungleichmäßiger Spannungsverteilung wenigstens annähernd so gut wirkt wie die Anbringung eines Gummikissens, und bei der sich die Erreichung der Maximalbelastung außer durch Liniensysteme (wenn das Material dafür geeignet ist) durch völligen Zusammenbruch des Probekörpers bekundet.

In der Hinsicht erwiesen sich Papierlagen zwischen Druck-

platten der Maschine und Probekörper als gut geeignet. Papierlagen bilden ein nachgiebiges Polster zwischen Stein und Platten, das beim Zusammenpressen nur sehr geringe Querausdehnung erfährt.

Zuerst verwandten wir als Zwischenlagen käufliche Pappen, die etwa 2 mm Stärke besaßen, und von denen gelegentlich zwei aufeinander gelegt wurden. Die Pappen waren den Endflächen der Probestücke genau angepaßt. Dabei ergab sich eine ausgleichende Wirkung ähnlich wie beim Verwenden des Gummidruckkissens; doch war die Streuung der Zahlen beträchtlich groß, weit bedeutender als bei allen anderen Versuchen. Daraus mußte geschlossen werden, daß dieses Schwanken der Ergebnisse auf Ungleichmäßigkeiten im Material der Pappzwischenlagen zurückzuführen sei. In der Tat ergab sich alsbald eine recht zufriedenstellende Gleichmäßigkeit als wir uns aus bestem Fließpapier selbst Pappen herstellten und diese als Zwischenlagen verwandten. Es wurden je 15 genau zugeschnittene Blätter Fließpapier mittels eines Druckes von ca. 5 t zu Pappe zusammengepreßt. Durchaus nötig ist es, hierbei die Druckplatten der Maschine vorher durch Zusammenpressen parallel zu richten. Eine vorangegangene einseitige Pressung des Fließpapierpaketes ist nicht wieder zu entfernen und hat einseitigen Bruch des Probestückes zur Folge.

Aus den angestellten Versuchen seien auch hier die letztgewonnenen Ergebnisse angeführt. Sie beziehen sich auf die Marmorsorte, von der die Versuchsreihe unter alleiniger Benutzung harter Druckplatten oben mitgeteilt ist, und deren Idealfestigkeit sich bei diesen Experimenten, wie erwähnt, zu 1285 kg/qcm ergab. Damit sind also die folgenden beiden Reihen zu vergleichen.

1. Benutzung von Probekörpern mit quadratischem Querschnitt (45:45 mm).

Höhe	Mittlere Festigkeit
18,5 mm	1350 kg/qcm
30 "	1335 "
45 "	1310 "
67 "	1260 "
90 "	1265 "
135 "	1280 "
225 "	1245 "

2. Benutzung von Zylindern (50 mm Durchmesser).

Höhe	Mittlere Festigkeit
18,5 mm	1370 kg/qcm
30 "	1280 "
45 "	1335 "
67 "	1325 "
90 "	1285 "
135 "	1275 "
225 "	1285 "

Bei jeder Festigkeitszahl handelt es sich um die Mittelwerte von drei Versuchen.

Als Beispiele für die Streuung der Zahlen seien angegeben die Einzelwerte 26,8 t, 27,5 t, 28,2 t bei einem Zylinder von 18,5 mm Höhe und 26,45 t, 26,1 t, 26,15 t bei einem solchen von 30 mm Länge.

Aus den Versuchsergebnissen ist ersichtlich, daß die Unabhängigkeit der Druckfestigkeitszahlen von der Höhe des Probekörpers nicht so vollkommen erreicht ist wie bei der Versuchsmethode unter Anwendung von Gummikissen. Die kennzeichnende Zahl von etwa 1285 kg/qcm tritt in der ersten Reihe bei Längen von 225 mm bis herab zu 45 mm (Würfel) auf, bei der zweiten Reihe von 225 mm bis etwa 67 mm (dann auch wieder bei 30 mm).

Man kann also unter Berücksichtigung der praktischen Momente (Ungleichartigkeiten im Material, Versuchsfehler) sagen, daß bei Anwendung von recht gleichmäßigen Pappzwischenlagen Konstanz der Ergebnisse vorhanden ist bis zu einer Höhe gleich dem $1\frac{1}{2}$ fachen des Durchmessers herab.

Somit dürfte diese sehr einfache Methode als Normal-Untersuchungsart zu empfehlen sein.

Wir haben uns als nächste Aufgabe gestellt, die Methode auf eine Reihe technisch und geologisch wichtiger Gesteine anzuwenden, um einwandfreie Festigkeitszahlen für diese Materialien darbieten zu können.

Min.-geol. Institut der technischen Hochschule zu Hannover.

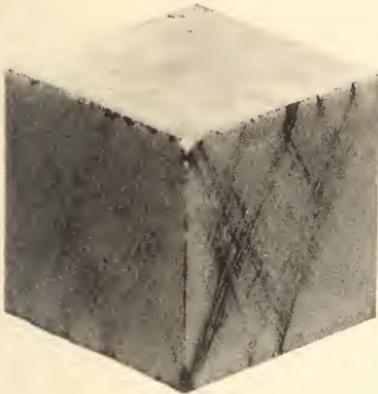


Fig. 1.



Fig. 2.



Fig. 3.



Fig. 4.

Lichtdruck der Hofkunstanstalt von Martin Kommer & Co., Stuttgart



Fig. 5.



Fig. 6.



Fig. 7.



Fig. 8.

Lichtdruck der Hofdruckanstalt von Martin Kozimek & Co., Stuttgart.



Fig. 9.

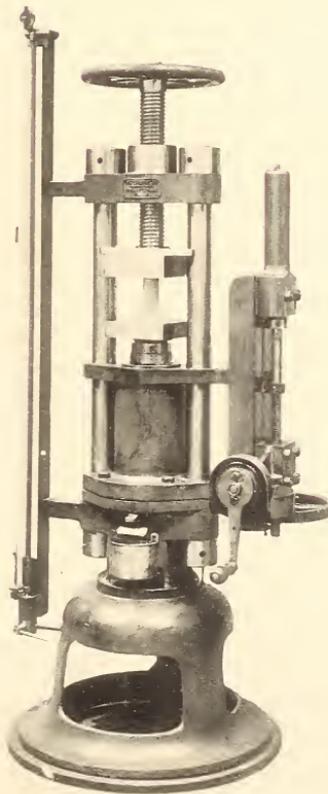


Fig. 10.

Lichtdruck der Hofkunstanstalt von Martin Rommel & Co., Stuttgart

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie](#)

Jahr/Year: 1907

Band/Volume: [1907](#)

Autor(en)/Author(s): Rinne Friedrich

Artikel/Article: [Vergleichende Untersuchungen über die Methoden zur Bestimmung der Druckfestigkeit von Gesteinen. 45-61](#)