

# Zeitschrift für praktische Geologie.

1908. Juli.

## Die Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihre Wetterbeständigkeit.

Von

J. Hirschwald.

### I.

Seitens des Ministeriums der öffentlichen Arbeiten wurde im Jahre 1893 eine Kommission eingesetzt behufs Ermittlung eines Verfahrens zur Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihre Widerstandsfähigkeit gegen Witterungseinflüsse. Die Ergebnisse der zur Lösung der gestellten Aufgabe ausgeführten Arbeiten sind in dem unter obigem Titel erschienenen Werke<sup>1)</sup>, dessen Verf. mit der experimentellen Untersuchung beauftragt worden war, niedergelegt.

Für die Aufstellung des Arbeitsplanes war die Erwägung maßgebend, daß unsere Kenntnis der Gesteinsverwitterung lediglich auf dem Studium derjenigen Umwandlungen beruht, welche die Felsgesteine unter dem Einfluß der Atmosphärien, des Frostes wie der in der Erdrinde zirkulierenden wäßrigen Lösungen im Laufe geologischer Zeiträume erfahren haben. Da aber für die Qualitätsbestimmung der Bausteine nur diejenigen Veränderungen zu berücksichtigen sind, welche innerhalb der für Bauwerke in Betracht kommenden beschränkten Zeitläufe zur Geltung gelangen, und ferner die in der Erdrinde wirksamen Verwitterungsagenzien nicht nur quantitativ, sondern z. T. auch ihrem Wesen nach von denjenigen verschieden sind, welche auf die Gesteine der Bauwerke einzuwirken vermögen; endlich aber ein Zeitmaßstab für den Verlauf der einzelnen Verwitterungs-

vorgänge sich aus dem geologischen Befunde nicht ableiten läßt, so konnte eine geeignete Grundlage für die Ermittlung des in Rede stehenden Prüfungsverfahrens nur durch eine umfassende Untersuchung der aus älteren Bauwerken entnommenen Gesteinsproben hinsichtlich ihres Erhaltungszustandes und ihrer denselben bedingenden besonderen Eigenschaften gewonnen werden.

Für die Beschaffung des hiernach erforderlichen Untersuchungsmaterials war von der Kommission die Vermittelung der Baubehörden in Vorschlag gebracht worden.

Demgemäß erging seitens des vorgesetzten Ministeriums an die Bauinspektionen, Eisenbahn-Direktionen und Strombauverwaltungen zunächst die Aufforderung, ein Verzeichnis derjenigen innerhalb ihres Bezirks aus natürlichen Gesteinen errichteten Baulichkeiten aufzunehmen, welche ein Alter von mehr als 50 Jahren aufweisen oder bei geringerem Alter bereits deutliche Spuren der Verwitterung erkennen ließen. Diesem Verzeichnis sollten Angaben über die Art der betreffenden Bausteine und deren Erhaltungszustand hinzugefügt werden. Die hierauf aus 222 Baukreisen eingereichten Berichte enthielten die gewünschten Angaben von zusammen 2953 Bauwerken. Darunter befanden sich eine große Zahl von 300—600 Jahre alten Gebäuden, und nicht unbeträchtlich war die Zahl derselben im Alter von 700—1000 Jahren. Auf Grund dieser Berichte wurden nunmehr, mit Rücksicht auf Gesteinsmaterial und Verwitterungserscheinung, diejenigen Baulichkeiten ausgewählt, von denen Materialproben für die beabsichtigte Untersuchung entnommen werden sollten.

Es gelangten demgemäß zur Einsendung:

1. Sandsteine einschl. Grauwacken . . . . .	von 532 Bauwerken
2. Kalksteine einschl. Dolomit u. Marmor . . . . .	- 173 -
3. Dachschiefer . . . . .	- 122 -
4. Granit und Syenit . . . . .	- 27 -

854 Bauwerke

<sup>1)</sup> Hirschwald, J.: Die Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihre Wetterbeständigkeit. (Herausgegeben im Auftrage und mit Unterstützung des Königlich Preußischen Ministeriums der öffentlichen Arbeiten.) I.: Die Verwitterungsagenzien und ihr Einfluß auf die natürlichen Bausteine. — II.: Die Methoden zur Prüfung der Gesteine auf ihren Wetterbeständigkeitsgrad. — III.: Die Bewertung des Einflusses, den die verschiedenen Eigenschaften des Gesteines auf ihre Widerstandsfähigkeit gegen Witterungseinflüsse ausüben. — IV.: Die systematische Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihren Wetterbeständigkeitsgrad und die Ergebnisse dieser Prüfung an Gesteinsmaterialien älterer Bauwerke. — Berlin, W. Ernst & Sohn, 1908. 675 S. m. 54 Lichtdrucktafeln, 4 Taf. i. Buntldr. u. 133 Fig. Pr. M. 36,—.

Red.

	Übertrag	854	Bauwerke
5. Gneis und krist. Schiefer von	37	Bauwerken	
6. Porphyry und Porphyrtuff	-	28	-
7. Trachyt und Andesit . . .	-	22	-
8. Basalt und Basaltlava . . .	-	48	-
9. Vulkanische Tuffe . . . .	-	58	-
10. Schalsteine . . . . .	-	12	-

im ganzen Proben von 1059 Bauwerken  
nebst 950 Belegstücken der zugehörigen  
frischen Bruchgesteine.

Dieses Probematerial sollte auf alle jene Eigenschaften untersucht werden, von welchen sich nach den gemachten Vorstudien erwarten ließ, daß sie von Einfluß auf die größere oder geringere Widerstandsfähigkeit des Gesteines gegen die Angriffe der Witterung sein würden. Demgemäß erstreckten sich die auszuführenden Untersuchungen auf folgende Gesteinseigenschaften: 1. die chemische Zusammensetzung, 2. die mineralogische Zusammensetzung und Struktur, 3. die Festigkeit, 4. die Porositätsverhältnisse, 5. die Erweichbarkeit in Wasser und 6. die Widerstandsfähigkeit gegen Frostwirkung.

Zu 1. Die quantitative chemische Analyse gelangte an mehr als 800 verschiedenen Gesteinsvorkommnissen zur Ausführung.

Wenn die Ergebnisse dieser Untersuchungen nur in geringem Maße zu praktischen Erfolgen geführt haben, so ist der Grund hierfür zunächst in dem Umstande zu suchen, daß sich lediglich für die einfacher konstituierten kristallinisch-körnigen Felsarten aus der chemischen Analyse ein Schluß auf die Beschaffenheit der Mineralkomponenten ziehen läßt, während für die zusammengesetzteren und namentlich für die sedimentären Gesteine die chemische Analyse im allgemeinen keinen Anhalt für die Bestimmung der einzelnen Gemengteile und insbesondere der Bindemittel gewährt, obgleich gerade hier eine Ergänzung der mikroskopischen Bestimmung durch chemische Hilfsmittel von besonderer Wichtigkeit gewesen wäre. Nur in besonderen Fällen, wie z. B. bei Bestimmung des Gehalts an kohlenurem Kalk in wesentlich aus kieselsauren Verbindungen zusammengesetzten Gesteinen, bei Bestimmung des Tongehalts in Kalksteinen, des Eisenkiesgehalts und des Gehalts an bituminösen und kohligen Bestandteilen, konnte die Analyse eine zweckentsprechende Verwendung bei der Gesteinsprüfung finden. Zu wenig befriedigenden Resultaten führte auch meistens die vergleichende Untersuchung der Verwitterungsrinde und des unzersetzten Gesteines. Lediglich in solchen Fällen, in denen bei der Verwitterung ein mechanischer Substanzverlust nicht stattgefunden hat, vermag die Analyse

einen Aufschluß über die chemische Natur des Verwitterungsprozesses zu gewähren. Meistens aber ist die Verwitterung mit einer starken Auflockerung der Gesteinsoberfläche und demzufolge mit einer Ausschlämmung bzw. Abbröckelung verbunden, ein Vorgang, der sich bei gemengten Gesteinen keineswegs gleichmäßig auf alle Bestandteile erstreckt, so daß eine sichere Unterscheidung zwischen dem durch chemische und mechanische Prozesse bewirkten Substanzverlust sich nicht feststellen läßt.

Diese der chemischen Gesteinsuntersuchung anhaftenden Unzulänglichkeiten wären geeignet, die Ermittlung eines zuverlässigen Prüfungsverfahrens namentlich für die sedimentären Felsarten gänzlich in Frage zu stellen, wenn die Verwitterung der Bausteine, wie dies bisher vielfach angenommen worden ist, vorzugsweise auf der chemischen Wirkung der Atmosphärrilien beruhte. Erfahrungsgemäß ist dies jedoch nur in selteneren Fällen zutreffend. Die chemische Zersetzung, wie sie in der Erdrinde in so bedeutsamen Umfange stattfindet, darf im allgemeinen als derjenige Teil des Verwitterungsprozesses betrachtet werden, der sich erst in geologischen Zeiträumen bis zu einer beträchtlichen Auflockerung des Gesteines und schließlich zu einer Auflösung der Gemengteile in ihre von den Atmosphärrilien nicht mehr veränderlichen Bestandteile steigert.

Nachweislich sind aber die sämtlichen felsbildenden Mineralien der primären Gesteine wie Quarz, Feldspat, Glimmer, Hornblende, Augit, Granat und Magnetit, ja selbst Olivin und Nephelin in frischem Zustande gegenüber den chemischen Wirkungen der Atmosphärrilien von solcher Widerstandsfähigkeit, daß sie nicht nur innerhalb der für Bauwerke in Betracht kommenden Zeiträume, sondern weit darüber hinaus sich durchaus intakt erhalten. So findet man z. B. unter den Geschieben und erraticen Blöcken unserer Tiefebene zahlreiche feldspathaltige Gesteine, namentlich Gneis und Felsitporphyry, mit vollkommen frischem Orthoklas; in den zutage tretenden Tertiärsanden nahezu frische Blättchen von Kaliglimmer und im Diluvialsand sehr reichlich Körnchen von so frischem Magnetit, daß dessen magnetische Eigenschaften noch vollkommen erhalten sind. Nur wenn die kristallinen Silikatgesteine bereits in der Erde im Laufe geologischer Perioden eine beträchtliche chemische Umwandlung erfahren haben, schreitet die chemische Verwitterung erfahrungsgemäß auch an den aus solchem Gestein errichteten Bauwerken verhältnismäßig schnell

fort. Es bildet daher die Untersuchung der Bruchmaterialien auf den Verwitterungsgrad ihrer Gemengteile einen wichtigen Teil der Gesteinsprüfung, welcher jedoch am zweckmäßigsten durch die mikroskopische Untersuchung von Dünnschliffen zur Ausführung gelangt.

Eine Ausnahme von dem geschilderten Verhalten der gedachten Felsgemengteile bilden gewisse eisenreiche und in Säuren leicht zersetzbare glasartige Substanzen, wie sie namentlich in Basalten und Trachyten häufiger vorkommen und besonders bei Verwendung des Gesteines zu Wasserbauten schon in wenigen Jahrzehnten eine beträchtliche Verwitterung unter Ausscheidung von Eisenhydroxyd erfahren können.

Was die sedimentären Gesteine betrifft, so bestehen sie zum größten Teil aus den Restprodukten der mechanischen und chemischen Verwitterung der primären Felsarten, also aus Substanzen, welche durch die Atmosphärenmeistens keine chemische Veränderung mehr erfahren können, wie z. B. Quarz, die tonigen Substanzen, Kalzium- und Magnesiumkarbonat, Kalziumsulfat etc. Die chemische Verwitterung erstreckt sich bei diesen Gesteinen daher lediglich auf die nicht mehr frischen untergeordneten Beimengungen von Feldspat, Augit und Hornblende, auf die zersetzbaren Bruchstücke von anderen Gesteinsarten, auf die durch Eisenkies hervorgerufenen Zersetzungen und endlich auf die Umbildungen eisenhaltiger, authigener Substanzen, wie sie in den Bindemitteln dieser Gesteine vorkommen können.

Lange aber bevor im allgemeinen diese chemischen Prozesse zu einer erheblichen Festigkeitsverminderung der Gesteine führen, pflegen die wetterunbeständigen Abänderungen der sedimentären Felsarten durch den Frost und die erweichende und abschwemmende Wirkung des Wassers eine derartige Auflockerung ihres Gefüges zu erfahren, daß hierdurch bereits sehr beträchtliche Defekte an der Oberfläche der Werkstücke hervorgerufen werden.

In den bei weitem meisten Fällen ist demnach der Verwitterungsprozeß, insoweit er sich innerhalb der für Bausteine in Betracht kommenden Zeiträume vollzieht, als ein mechanischer Vorgang zu betrachten, und es wird deshalb die Wetterbeständigkeitsprüfung der Bausteine sich, abgesehen von der Feststellung einzelner schädlicher Gemengteile, weniger auf die substanzielle Zusammensetzung des Materials als vielmehr auf seine strukturellen und physikalischen Eigenschaften zu erstrecken haben.

Zu 2. Die Untersuchung der mineralogischen Zusammensetzung und

Struktur der Baugesteine geschieht unter Anwendung der durch die petrographische Forschung ausgebildeten mikroskopischen Methoden. Mit völliger Sicherheit lassen sich hierdurch die körnigen Gemengteile der Gesteine bestimmen, und nur hinsichtlich der aus der Zersetzung der primären Felsarten hervorgegangenen feinerdigen und staubförmigen Substanzen und ihrer Infiltrationsprodukte — Bildungen, wie sie in den sedimentären Gesteinen als Bindemittel vorkommen — erweist sich die mikroskopische Methode nicht immer als ausreichend, und man ist zur Charakterisierung dieser Substanzen genötigt, ihre physikalischen Eigenschaften (Härte, Erweichbarkeit in Wasser etc.) sowie ihr Verhalten gegen chemische Agenzien zu Hilfe zu nehmen.

In struktureller Hinsicht erscheinen namentlich die Kornbindungsverhältnisse für die Wetterbeständigkeit der Gesteine von Bedeutung, und es sind hierbei zu unterscheiden: a) Gesteine mit unmittelbarer Kornbindung (kristallinische Gesteine), b) solche mit mittelbarer, durch ein besonderes Zement bewirkten Kornbindung (klastische Gesteine). Die Kornbindung der ersteren Art, welche lediglich durch den Kristallisationsprozeß bedingt wird, ist in der Regel von gleicher oder auch größerer Festigkeit als die der körnigen Bestandteile selbst, und man findet daher, daß beim Zerschlagen der Gesteine die Schlagflächen meistens durch die körnigen Gemengteile hindurchgehen. Eine Aufhebung des Kornzusammenhangs tritt hier erst mit der Verwitterung der körnigen Bestandteile ein, und da diese bei gemengten Felsarten meist von verschiedener Beständigkeit sind, so hat man für die Beurteilung der Wetterbeständigkeit folgende Strukturklassen zu unterscheiden:

1. Gesteine mit durchweg „dispergenten“ Gemengteilen, d. h. mit solchen, welche zerstreut durcheinander liegen, ohne daß einzelne derselben eine für sich zusammenhängende Aggregationsform bilden.

2. Gesteine mit mehr oder weniger vorherrschenden „symplexen“ Gemengteilen, die unter sich ein netzartiges, maschenförmiges oder baumartig verzweigtes Skelett innerhalb der übrigen Bestandteile bilden.

3. Gesteine mit „syndetischer“ Bestandmasse, welche als untergeordnete Zwischenmasse die Verbindung der vorherrschenden Gemengteile bewirkt. Diese Zwischenmasse kann glasig, mikro- oder kryptokristallinisch sein.

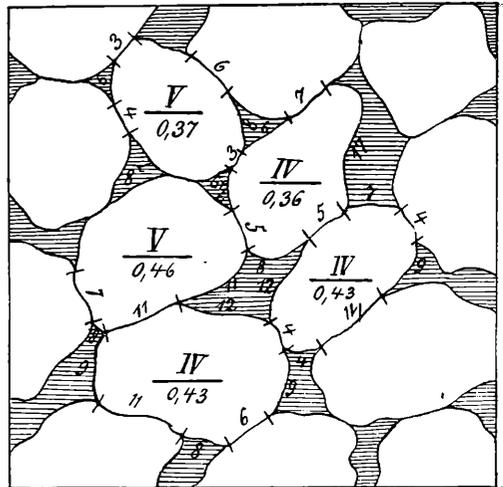
4. Gesteine mit „basaler“ Bestandmasse, d. h. mit einer sehr reichlichen bis vorherrschenden zusammenhängenden Grundmasse, die bei den Porphyren amorph bis

mikrokristallinisch ist, bei anderen primären Felsarten aus dem grobkristallinen Aggregat eines einzelnen Gemengteiles bestehen kann (Feldspat in gewissen Syeniten).

Kann das zu prüfende Gestein nach Maßgabe seines mikroskopischen Strukturbildes einer dieser 4 Klassen zugeteilt werden, so ist damit zugleich ein Anhalt für die Beurteilung der Wirkung gewonnen, welche die Zersetzung der einzelnen Gemengteile auf den Zusammenhang des Gesteines auszuüben vermag. Die Beständigkeit von Gesteinen mit symplexer, syndetischer oder basaler Bestandmasse wird vorzugsweise von der Beschaffenheit der letzteren abhängen. Ist dieselbe wetterfest, so wird selbst bei beginnender Verwitterung der in einzelnen Körnern oder isolierten Korngruppen auftretenden Gemengteile der allgemeine Zusammenhang des Gesteines erhalten bleiben; bei symplexer oder basaler Struktur auch, wenn jene Gemengteile völlig ausgenagt sind. Gesteine dieser Art zeigen eine narbige oder zellige Verwitterungsrinde. Unterliegt aber die zusammenhängende Bestandmasse der Verwitterung, so wird das Gestein, selbst bei frischer Beschaffenheit der isolierten Gemengteile, in kurzer Zeit zerbröckeln. Gesteine mit dispergenter Struktur erweisen sich nur dann beständig, wenn die sämtlichen vorherrschenden Gemengteile wetterfest sind. Verwittert bei solchen Gesteinen auch nur einer dieser Bestandteile, so wird dadurch in den meisten Fällen der Zusammenhang des ganzen Gesteines aufgehoben werden.

Die Wetterbeständigkeit klastischer Gesteine, deren Kornbindung durch ein besonderes Zement bewirkt wird, ist vorzugsweise abhängig von der Widerstandsfähigkeit des letzteren und von dem Grade der Kornbindung bzw. der Dichtigkeit der Kornlagerung. Die in Frage kommenden Bindemittel bestehen meist aus feinerdigen bis staubförmigen Gemengen, welche mehr oder weniger reichlich mit authigenen Substanzen infiltriert bzw. durchwachsen sind. Die Untersuchung hat sich hier sowohl auf die stoffliche Beschaffenheit der Zementsubstanz als auch auf ihre Härte, Festigkeit und Erweichungsfähigkeit in Wasser zu erstrecken. Bei Bestimmung des Grades der Kornbindung ist zwischen der „Bindungszahl“ und dem „Bindungsmaß“ zu unterscheiden. Unter Bindungszahl ist die Anzahl der Körner zu verstehen, welche mit jedem einzelnen derselben in der Ebene des mikroskopischen Schliffes verbunden erscheinen, unter Bindungsmaß der Quotient aus der Summe derjenigen Teile des Kornumfanges, welche mit den anlagernden Körnern verwachsen sind, und dem

gesamten Kornumfang. So würde sich beispielsweise in Fig. 49 die Bindungszahl zu IV—V, das Bindungsmaß zu 0,36—0,46 bestimmen. Zur Feststellung des Bindungsmaßes bedient man sich eines für die verschiedenartigen mikroskopischen Messungen konstruierten Planimeter-Okulars, und zwar bedarf es der Durchmessung einer größeren Anzahl von Schliffen, um ein zutreffendes Durchschnittsresultat zu erlangen.



Kornbindung:  $\frac{IV-V}{0,36-0,46}$

Fig. 49.

„Bindungszahl“ und „Bindungsmaß“ bei klastischen Gesteinen.

Aber auch dann wird man, bei der geringen Größe des mikroskopischen Sehfeldes, nicht sicher sein, durch die gedachten Untersuchungen eine zutreffende Vorstellung von dem Grade der strukturellen Gleichmäßigkeit des Gesteines zu gewinnen. Als eine in dieser Hinsicht zweckentsprechende Ergänzung der mikroskopischen Untersuchung hat sich die künstliche Durchfärbung größerer Gesteinsstücke erwiesen. Die mit dem Hammer formatierten Probstücke von etwa  $7 \times 5 \times 4$  cm werden zwei Tage in eine konzentrierte alkoholische Lösung von Nigrosin gelegt und nach dem oberflächlichen Abtrocknen zerschlagen. Die Farblösung dringt je nach dem Dichtigkeitsgrade des Gesteines mehr oder weniger tief in dasselbe ein, und es markieren sich durch intensivere Färbung: Spalten, Schichtfugen, Absonderungsflächen und diejenigen Stellen, welche ein von der Gesamtmasse abweichendes mehr lockeres Gefüge haben.

Zu 3. Die Festigkeitsprüfung hat einen mehrfachen Zweck; sie dient zur Bestimmung a) der Kornbindungsfestigkeit,

b) der Erweichbarkeit der Gesteine in Wasser und c) zur Feststellung des Ergebnisses der experimentellen Frostversuche. In allen diesen Fällen handelt es sich aber im wesentlichen um die Bestimmung der Festigkeit des Zusammenhanges der körnigen Gemengteile, und es sind deshalb an die der Prüfung zugrunde liegende Methode folgende Anforderungen zu stellen: Das Resultat darf durch die Festigkeit der körnigen Bestandteile an sich nicht beeinflußt werden; die Trennungsfäche muß meßbar sein und erkennen lassen, welche Bestandteile des Gesteines eine Zerstörung bzw. eine glatte Auslösung aus dem Zusammenhange mit den benachbarten Gemengteilen erfahren haben, und endlich muß das Resultat sich auf das porenfrei gedachte Material reduzieren lassen. Diesen Anforderungen entspricht von allen hier in Betracht kommenden Methoden lediglich die Zugfestigkeitsprüfung, aus deren Ergebnis sich mit Hilfe der Porositätsbestimmung bzw. des Kornbindungsmaßes die Bindungsfestigkeit näherungsweise feststellen läßt. Nur wenn die letztere gleich der Kohärenz der körnigen Bestandteile ist, liefert das Resultat der Prüfung auch hier einen Durchschnittswert der gesamten Festigkeitsfaktoren. In diesem Falle, dessen Vorhandensein sich aus der Beschaffenheit der Bruchfläche erkennen läßt, handelt es sich aber um einen relativ so hohen Grad der Kornbindung, daß eine zahlenmäßige Feststellung sich für die Qualitätsbestimmung des Gesteines erübrigt.

Zu 4. Hinsichtlich der Porosität ist zwischen dem absoluten und relativen Wert derselben zu unterscheiden. Die Bestimmung der absoluten Porosität geschieht durch Vergleichung des spez. Gew. des Gesteinspulvers mit dem eines größeren Gesteinsstückes; die Bestimmung der relativen Porosität dagegen durch Feststellung der Wasseraufsaugung unter bestimmten äußeren Bedingungen. Da die Ungleichheit der Wasseraufnahme, welche ein und dasselbe Gestein unter verschiedenen Verhältnissen zeigt, lediglich von der Form, Größe und dem Zusammenhange seiner Hohlräume abhängt, so können diese Beziehungen einen Anhalt für die Beurteilung des Charakters der Porenbildung gewähren. Es wird z. B. ein größerer Unterschied der Wasseraufnahme bei schnellem und langsamem Eintauchen der Probestücke dann eintreten, wenn das Gestein von vielfach miteinander zusammenhängenden Poren bzw. Kapillaren durchzogen wird, weil in diesem Falle die Mehrzahl der Höhlungen dem Wasser von der Außenfläche des Gesteines zugänglich ist, und ein vollkommenes

Entweichen der in den Hohlräumen eingeschlossenen Luft bei langsamem Eindringen des Wassers stattfinden kann. Sind die Hohlräume nicht zusammenhängend, so wird der Unterschied in den beiden Fällen der Wasseraufsaugung nur gering sein. Vergleicht man hiermit die Wasseraufnahme im Vakuum, so ist eine beträchtliche Zunahme derselben namentlich dann zu erwarten, wenn größere Hohlräume durch Spalten oder größere Kapillaren miteinander in Verbindung stehen. Dagegen wird sich bei Anwendung eines stärkeren Druckes die Wasseraufnahme erheblich steigern, wenn isolierte Poren durch feine Kapillaren verbunden oder durch feinporeige Zwischenwände voneinander getrennt sind.

Des weiteren läßt sich die Prüfung des Wasseraufsaugungsvermögens dazu verwenden, um bei geschichteten Gesteinen den Unterschied in der Dichtigkeit des Gefüges parallel und rechtwinklig zur Schichtung festzustellen. Zu diesem Zweck werden parallelepipedische Probestücke des Gesteines derartig an einzelnen Flächen mit undurchlässigem Firnis überzogen, daß in dem einen Falle das Wasser nur von der Schichtenfläche, in dem anderen Falle nur von der Querfläche einzudringen vermag. Der Quotient beider Bestimmungen der Wasseraufsaugung (Verteilungskoeffizient) gibt einen ziffermäßigen Ausdruck für die Ungleichheit des Gefüges in den gedachten Richtungen.

Zu 5. Die Prüfung der Erweichungsfähigkeit der Gesteine in Wasser geschieht durch Bestimmung der Zugfestigkeit des Materials in trockenem Zustande ( $\zeta_t$ ) und nach längerer Wasserlagerung ( $\zeta_w$ ). Der Quotient  $\frac{\zeta_w}{\zeta_t}$  wird als Erweichungskoeffizient bezeichnet. In beträchtlichem Maße in Wasser erweichbar sind lediglich die feinerdigen und pulverförmigen mineralischen Substanzen, welche ihren Zusammenhang in trockenem Zustande allein der Adhäsion ihrer körnigen Partikel verdanken, ohne daß dieselben durch eine homogene Infiltrations- oder Durchwachungsmaße (Kieselsäure, Kalkspat, Glaukonit etc.) zementiert sind. Gesteine, welche den Zusammenhang ihrer körnigen Bestandteile einem derartigen Bindemittel verdanken, gehören durchweg zu den wetterunbeständigen Baumaterialien, und es erlangt deshalb die Prüfung der Erweichungsfähigkeit der Gesteine in Wasser eine besondere Bedeutung für die Qualitätsbestimmung derselben. Zu beachten ist hierbei jedoch, daß alle Gesteine, auch die kristallinen, in wassergesättigtem Zustande eine gewisse Festigkeitsverminderung

erleiden, und zwar infolge der Hineinpressung des Wassers in die feinen Kapillaren des Gesteines bei der Druck- und Zugbeanspruchung des Probestückes wie andererseits infolge der Verminderung der inneren Reibung bei der Kompression und Dilatation.

Aber die hierdurch bewirkte Festigkeitsverminderung beträgt erfahrungsgemäß kaum mehr als  $\frac{1}{10}$  der Trockenfestigkeit, während bei der tatsächlichen Erweichung des Bindemittels eine Reduktion der Festigkeit auf  $\frac{1}{2}$  des ursprünglichen Wertes nicht selten ist. Bei sedimentären Gesteinen und namentlich bei Sandsteinen ist jedoch zu unterscheiden zwischen dem eigentlichen Kornbindemittel und der Porenausfüllungssubstanz. Sehr häufig ist die letztere stark erweichbar, während das eigentliche Bindemittel sich in Wasser als durchaus widerstandsfähig erweist.

erhebliche Druckwirkung auszuüben. Es läßt sich experimentell nachweisen, daß dies tatsächlich der Fall ist. Wenn man kleine Glasgefäße, wie sie in Fig. 50 in natürlicher Größe abgebildet sind, mit Wasser füllt und der Frosttemperatur aussetzt, dann dringt das gebildete Eis in Form eines kurzen Zylinders bzw. eines langen Fadens mit pilzartig aufgesetztem Knopf aus dem Gefäß heraus. Das Gefrieren hatte also an der Oberfläche begonnen, so daß die Fläschchen mit einem Eispfropfen verschlossen worden waren, und erst dann war der Inhalt beim Fortschreiten des Gefrierens durch den engen Hals der Fläschchen hinausgepreßt worden, ohne daß ein Zersprengen derselben eingetreten wäre. Auch in Kapillarröhren findet der gleiche Vorgang statt, und nur wenn Gefäße wie d zu einer feinen Kapillare

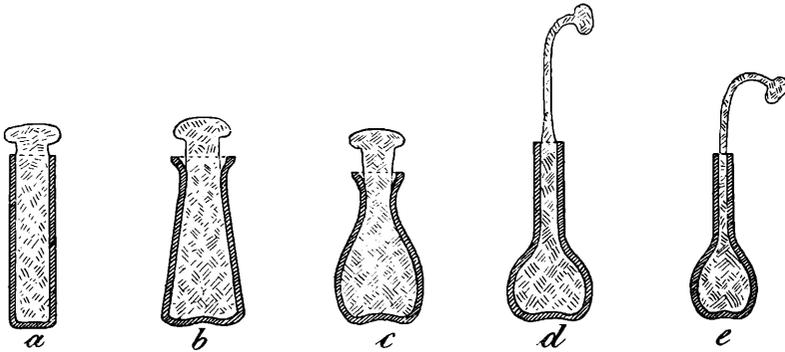


Fig. 50.

Erscheinungen der Eisbildung in einseitig offenen Hohlräumen.

In diesem Falle kann das wassergetränkte Gestein eine nicht unbeträchtliche Festigkeitsverminderung erleiden, ohne daß die Kohärenz des Kornbindemittels erheblich vermindert worden ist.

Zu 6. Die Bestimmung der Frostwiderstandsfähigkeit bildet eine der wichtigsten Aufgaben der Gesteinsprüfung. Die notwendige Voraussetzung für die zerstörende Wirkung des Frostes ist ein bestimmter Grad der Wasserfüllung der Gesteinsporen. Bekanntlich beträgt die Ausdehnung, welche das gefrierende Wasser im Moment seines Festwerdens erfährt, etwa  $\frac{1}{10}$  von dem Volumen des Wassers bei  $0^{\circ}$  C. Man wird daher annehmen dürfen, daß das vom Gestein aufgenommene Wasser nur dann eine Druckwirkung auf die umschließenden Porenwänden auszuüben vermag, wenn es die Hohlräume mehr als  $\frac{9}{10}$  ihres Volumens erfüllt. Dabei wird vorausgesetzt, daß das Wasser im Moment des Gefrierens einen elastischen Körper darstellt, der befähigt ist, sich innerhalb des leeren Teils des Hohlraumes auszudehnen, ohne hierbei eine

ausgezogen und gänzlich mit Wasser gefüllt wurden, traten Sprünge in der Glaswandung auf. Es gewähren diese einfachen Versuche einen Einblick in den Verlauf des Frostprozesses, wie er in den Hohlräumen wassergetränkter Gesteine stattfindet. Zusammenhängende, nicht zu enge Porenzüge, die nach der Außenfläche des Gesteines münden, werden hiernach auch bei vollkommener Wassersättigung der Gesteinsoberfläche zu keiner beträchtlichen Frostwirkung Veranlassung geben; vielmehr wird hier ein Hinauspressen des sich in den Hohlräumen bildenden Eises erfolgen, so daß das Gestein äußerlich mit granulösem oder fadenförmigem Eis bedeckt wird, ein Fall, wie er häufig, namentlich an stark porösen Sandsteinen, zu beobachten ist und an die Erscheinung des Raureifes erinnert. Nur wenn die größeren Poren durch Kapillaren untereinander und mit der Oberfläche in Verbindung stehen, oder wenn das Gestein von einem zusammenhängenden feinen Kapillarnetz durchzogen wird, ist bei vollkommener Wassersättigung eine erhebliche

Frostwirkung zu erwarten. Sind dagegen die Hohlräume des Gesteines auf weniger als 0,9 ihres Volumens mit Wasser gefüllt, so wird in keinem Falle durch den Frost eine namhafte Druckwirkung auf die Porenwandungen ausgeübt werden. Von welchem maßgebenden Einfluß der Grad der Wasserfüllung der Gesteinsporen hierbei ist, dafür spricht die Tatsache, daß Gesteine, welche sich unter natürlichen Verhältnissen, infolge der hierbei stattfindenden unvollkommenen Wassersättigung, durchaus frostbeständig erweisen, bei gänzlicher Wasserfüllung ihrer Hohlräume im Vakuum ausnahmslos der Frostwirkung erliegen.

Das Maß der Porenfüllung, welche die Gesteine im Bauverbände durch das eindringende Wasser erfahren, bildet demnach ein maßgebendes Kriterium für die Beurteilung der Frostbeständigkeit der Bausteine. Bezeichnet  $w_c$  das zur vollständigen Ausfüllung der Gesteinsporen erforderliche Wasserquantum,  $w$  dagegen die Menge des lediglich durch Kapillarwirkung aufgenommenen Wassers, so wird das Maß der Porenausfüllung für natürliche Wasseraufsaugung ausgedrückt werden durch den Sättigungskoeffizienten  $S = \frac{w}{w_c}$ .

Der Theorie nach müßte  $S = 0,9$  als Maximalwert für frostbeständige Gesteine angenommen werden. Man darf hierbei jedoch nicht außer acht lassen, daß die einzelnen Poren eines Gesteines wohl niemals in gleichem Maße von dem freiwillig aufgenommenen Wasser erfüllt werden; ja es kann der Fall eintreten, daß ein geringer Teil der Gesteinsporen nahezu vollkommen gefüllt ist, obgleich der experimentell bestimmte Sättigungskoeffizient unter dem theoretischen Grenzwert liegt. Das Eintreten dieses Falles hängt von den besonderen Strukturverhältnissen des Gesteines ab, die deshalb mittels der mikroskopischen Methode sowie durch Wassersättigung unter verschiedenen äußeren Bedingungen (s. die Ausführungen zu 4) und durch künstliche Färbungsversuche festzustellen sind. Im allgemeinen wird man aber auch ohne diese Untersuchungen mit einem empirisch bestimmten mittleren Grenzwert für  $S$  auskommen können, der nach Beobachtungen an etwa 1200 verschiedenen Gesteinen auf 0,8 normiert worden ist. Eine besondere Berücksichtigung erfordert hierbei aber der Erweichungskoeffizient und bei geschichteten Gesteinen der Verteilungskoeffizient, durch welche der Grenzwert von  $S$  für die Frostbeständigkeit nicht unbedeutlich vermindert werden kann.

Eine Ergänzung der vorgedachten Untersuchungen vermag in vielen Fällen die in

den Prüfungsanstalten gebräuchliche experimentelle Frostprüfung zu gewähren, doch ist dieselbe zweckmäßig in der Weise abzuändern, daß die Probekörper vor dem Gefrieren in verschiedenem Grade mit Wasser getränkt werden. Aus den Ergebnissen derartiger Untersuchungen lassen sich folgende Schlußfolgerungen ableiten:

a) Tritt nach wiederholtem Gefrieren des vollkommen wassersatten Gesteines eine erhebliche Festigkeitsverminderung oder ein Zerspringen desselben ein, so läßt sich mit Sicherheit annehmen, daß das Material sich bei seiner Verwendung zu Wasserbauten als frostunbeständig erweisen wird, während es nicht ausgeschlossen ist, daß es im aufgehenden Mauerwerk von Hochbauten, bei der dort wesentlich geringeren Wassersättigung, sich als durchaus frostbeständig bewähren kann.

b) Zeigt das vollkommen wassergesättigte Gestein nach wiederholtem Gefrieren keinerlei Veränderung, so darf es für Hochbauten als frostsicher gelten. Bei seiner Verwendung zu Wasserbauten kann jedoch die im Laufe der Zeit sich hundertfach wiederholende Frostwirkung eine erhebliche Zermürbung des Gesteines zur Folge haben.

c) Tritt nach wiederholtem Gefrieren des unvollkommen wassergesättigten Gesteines (durch 2—13 stündige Wasserlagerung) keinerlei Veränderung ein, so ist das Material in aufgehendem Mauerwerk von Hochbauten selbst dann noch als frostbeständig zu erachten, wenn es bei vollständiger Wassersättigung geringe Frostschäden erleidet.

d) Zeigt das unvollkommen wassergesättigte Gestein nach wiederholtem Gefrieren eine Festigkeitsverminderung oder Sprünge, so ist es nur für den Innenaufbau verwendbar.

So wichtig demnach die experimentelle Frostprüfung unter Umständen für die Untersuchung der Bausteine erscheint, so bleiben doch zahlreiche Fälle übrig, in denen die Ergebnisse der gedachten Prüfung einen Schluß auf die Frostbeständigkeit der betreffenden Materialien nicht gestatten. Überdies kommen hierbei immer nur die vehementen Wirkungen des Frostes, wie sie sich durch Spaltenbildung, stärkeres Absanden oder schnell eintretende Festigkeitsverminderung äußern, zur Geltung, während die allmählichen Auflockerungen, welche der Frost in vielen Gesteinen im Laufe von Jahrzehnten oder Jahrhunderten bewirkt, bei der experimentellen Prüfung, naturgemäß nicht zur Erscheinung gelangen können. Es wird demnach neben der vorgedachten Prüfung die Untersuchung der Gesteine auf alle jene Eigenschaften, welche gemäß theoretischen Erwägungen den Grad

ihrer Frostwiderstandsfähigkeit bedingen, für die Wetterwiderstandsfähigkeit nicht zu entbehren sein.

Mit der Feststellung aller dieser die Wetterbeständigkeit der Gesteine bedingenden Eigenschaften und ihrer Unterscheidung in solche, welche die Gesteinsqualität günstig oder ungünstig beeinflussen, ist jedoch den praktischen Anforderungen des Materialprüfungswesens noch nicht entsprochen. Wohl gibt es Gesteine, welche bei völliger Abwesenheit aller schädlichen Eigenschaften von so vorzüglicher Beschaffenheit sind, daß sie ohne weiteres als erstklassige Baumaterialien bezeichnet werden können, während andere so stark hervortretende ungünstige Verhältnisse aufweisen, daß diese das Gestein bereits als wetterunbeständig erkennen lassen. Aber bei weitem die Mehrzahl der natürlichen Gesteine zeigt keinen derartig ausgesprochenen Qualitätscharakter. Günstige und ungünstige Eigenschaften treten in den mannigfachsten Abstufungen und gegenseitigen Verhältnissen auf; sie summieren oder kompensieren sich in ihrem Verhalten gegenüber den Wirkungen der Verwitterungsagenzien je nach den besonderen Umständen, und das Fazit dieser Wechselwirkung ist es, welches den Beständigkeitsgrad der Gesteine bedingt.

Um unter solchen Umständen zu einer den Anforderungen des technischen Prüfungswesens entsprechenden Untersuchungsmethode zu gelangen, war es erforderlich, die Wirkungsweise der einzelnen Gesteinseigenschaften derartig zu bewerten, daß aus der Summe der aufgestellten Wertziffern eines Gesteins ein Anhalt für die Beurteilung der Beständigkeitsklasse desselben gewonnen werden konnte. Für derartige Bewertungen fehlt es aber bisher an jeder wissenschaftlichen Grundlage. Die Naturforschung, insoweit sie sich mit den Veränderungen beschäftigt, welche die Körper durch chemische und physikalische Wirkungen erleiden, hat sich bis jetzt im wesentlichen darauf beschränkt, das Resultat dieser Veränderungen festzustellen und die Beziehungen zwischen Ursache und Wirkung zu ermitteln, ohne den zeitlichen Verlauf der betreffenden Vorgänge einer Untersuchung zu unterziehen<sup>1)</sup>.

Zur Lösung der gestellten Aufgabe war daher die Begründung einer selbständigen Methode der Gesteinsbewertung erforderlich, wobei nach Lage der Sache nicht die Er-

langung wissenschaftlich exakter Zahlenwerte, sondern lediglich eine den praktischen Anforderungen entsprechende, auf Erfahrung gegründete, methodische Schätzung dieser Werte in Frage kommen konnte.

Das zur Begründung einer solchen Bewertungsmethode angewandte Prinzip war folgendes:

Es wurde zunächst ein Schema der verschiedenen Wetterbeständigkeitsklassen der Gesteine aufgestellt, unter Bezifferung derselben proportional ihrer Erhaltungsdauer. Bei jedem der nunmehr untersuchten Gesteine wurde alsdann die Summe der Wertziffern sämtlicher Eigenschaften, welche für seinen Beständigkeitsgrad maßgebend erschienen, der Ziffer seiner Beständigkeitsklasse  $Q$  gleichgesetzt. Aus dieser summarischen Bewertung ließen sich die Einzelwerte nach folgendem vergleichende Verfahren ableiten: Angenommen, die Beständigkeitsziffern  $Q$  und  $Q_1$  zweier Gesteine A und B, welche in allen hier in Betracht kommenden Eigenschaften, bis auf eine einzige  $k$ , welche dem Gestein A fehlt, übereinstimmen, seien 1 bzw. 1,5. Da in diesem Falle die Differenz  $d = 0,5$  beider Beständigkeitsziffern, lediglich auf den Einfluß der Eigenschaft  $k$  zurückzuführen ist, so wird  $d$  auch die Bewertung der fraglichen Eigenschaft ausdrücken.

Auf diese Weise läßt sich die Wirkung jeder einzelnen Eigenschaft eines Gesteins beziffern, vorausgesetzt, daß die Werte aller übrigen Eigenschaften sowie die Beständigkeitsklasse  $Q$  des Gesteins bekannt sind. Je größer die Zahl der auf die gedachte Art bereits ausgeführten Bezifferungen ist, desto mannigfaltiger konstituierte Gesteine werden für diese Bestimmungen verwendet werden können. Bei der Wechselwirkung aber, welche die einzelnen Gesteinseigenschaften aufeinander auszuüben vermögen, gelten die so erhaltenen Bewertungsziffern zunächst nur für die ihrer Ableitung zugrunde gelegten Kombinationsgruppen der betreffenden Eigenschaften, und es bedarf somit nicht nur für jede Gesteinsart, sondern auch für erheblich von einander verschiedene Varietäten derselben einer selbständigen Bewertung.

Nach diesem Prinzip sind auf Grund eines umfangreichen Beobachtungsmaterials Bewertungsschemata für die verschiedenen Gesteinsarten bearbeitet worden, und wenn für dieselben auch noch mancherlei Ergänzungen und Vervollkommnungen erforderlich sein werden, so dürfte ihre praktische Brauchbarkeit in der vorliegenden Form sich aus den zahlreichen Kontrollbestimmungen ergeben, wie sie in den Beobachtungstabellen des genannten Werkes niedergelegt sind.

<sup>1)</sup> Erst neuerdings ist damit begonnen worden, diese Lücke der naturwissenschaftlichen Forschung auszufüllen; doch beschränken sich die bisherigen Untersuchungen auf die einfacheren Probleme der physikalischen Chemie und auch hier lediglich auf solche Vorgänge, wie sie bei schnell verlaufenden Prozessen stattfinden.