Beih. Ber. Naturh. Ges.	5	Keller-Festschrift	Hannover 1968

Gesteinsverwitterung an Bauwerken

Von Peter SEEGER*)

Mit 2 Abbildungen und 2 Tafeln

Zusammenfassung

Maßgeblich für das Erkennen eines Verwitterungsablaufes ist die Kenntnis der die Gesteinsfaktoren umwandelnden physikalischen und chemischen Kräfte der Verwitterungsfaktoren, die bei der Bautenverwitterung durch die expositionsbedingten mikroklimatischen Verhältnisse am Gestein und das Vorkommen von zusätzlichen Agenzien in der urbanen Atmosphäre ihre besondere Differenzierung erhalten.

Die entscheidende Rolle im Verwitterungsablauf spielt das Wasser in seiner Eigenschaft als Lösungsmittel und durch seine Wandlungsfähigkeit in die verschiedenen Aggregatzustände unter Wärmeeinfluß.

Die Kenntnis vom Ablauf einer Gesteinsverwitterung ist eine notwendige Voraussetzung für Maßnahmen der Gesteinserhaltung in der Denkmalspflege. Auf Grund von Untersuchungen der vielfältigen Verwitterungserscheinungen an gebräuchlichen Bausteinen in verschiedenen Klimabereichen wird der Versuch unternommen, die komplexen Verwitterungsursachen an Hand von Rückschlüssen aus stattgefundenen Verwitterungsvorgängen zu erkennen und nach Gesetzmäßigkeiten zu ordnen. Die Beobachtungen dazu wurden für das aride Klima in Ägypten und im nördlichen Sudan, für das mediterrane Klima in der westlichen Türkei, Griechenland, Italien, Spanien und für das humide Klima sowohl mit maritimem als auch mit kontinentalem Einschlag in Deutschland, Belgien, den Niederlanden und Frankreich durchgeführt.

Summary

A decisive factor for detecting a weathering process is the knowledge of physical and chemical forces of weathering agents for stone which, through micrometeorological conditions and additional agents in the urban atmosphere, experience their changes.

Water as a solution and due to its possibility of changing into various physical conditions through influence of heat plays a decisive part in the weathering process.

This knowledge is a necassary condition for monumental stone preservation. Based en tests of various weathering phenomena on stone, one has tried to observe and to specify the rather complex weathering causes by testing older weathering processes. Observations have been carried out in aride climate in Egypt and in the Northern part of the Sudan, in mediterranean climate in the Western part of Turkey, Greece, Italy and Spain, in humid climate with maritime as well as continental influence in Germany, Belgium, the Netherlands and France.

*) Dr. P. SEEGER, Konservator, 32 Hildesheim, Hohnsen 31, Roemer-Pelizaeus-Museum.

Inhalt

1. Einleitung
2. Verwitterung und Klima
3. Allgemeine petrographische Faktoren
4. Verwitterungsfaktoren
4.1. Temperaturverwitterung
4.2. Frostverwitterung
4.3. Salzsprengung und Hydratation
4.4. Kapillarwirkung des Wassers
4.5. Chemische Verwitterung
5. Regionale Beobachtungen von Verwitterungserscheinungen
5.1. Verwitterung im ariden Klima
5.1.1. Verwitterungserscheinungen an Kalk- und Sandsteinen sowie an Graniten in Ägypten
5.1.2. Kalkstein
5.1.3. Nubischer Sandstein
5.1.4. Assuan-Granit
5.2. Verwitterung im humiden Klima
5.2.1. Kalkstein
5.2.2. Sandstein
5.2.3. Granit
6. Untersuchungsergebnis
7. Literatur

1. Einleitung

Unter Gesteinsverwitterung (V) werden die im Kontaktbereich von Lithosphäre und Atmosphäre durch exogene Kräfte ausgelösten und naturgesetzlich ablaufenden Vorgänge verstanden, bei denen das Gefüge (Textur und Struktur) und die Gemengteile (Mineralien) der Gesteine (G) verändert werden. Die exogenen Kräfte wirken über Atmosphärilien und Organismen auf Gesteine ein, dabei werden physikalische, chemische und biologische Vorgänge sowie Kombinationen davon eingeleitet und unterhalten.

Die Verwitterungsabläufe lassen sich durch die Funktionsgleichung $V = f(G, K)$ ausdrücken. Die Faktoren (G) und (K) sind im Sinne der für die Verwitterung maßgeblichen Thermodynamik offene Systeme, die beim Aufeinandertreffen einen gegenseitigen Energie- und Stoffaustausch solange bewirken, bis sich die Zustandsgrößen von (G) und (K) in einem Gleichgewicht befinden. Im Verwitterungsablauf wird das Gestein in seinem Gefüge mechanisch zerstört und seine Gemengteile durch chemische Prozesse von weniger stabilen in stabilere Zustände überführt.

Die Gesteinsverwitterung läßt sich an Verwitterungsprodukten und an Verwitterungsformen feststellen, die zusammen die Verwitterungserscheinungen ausmachen. Verwitterungsprodukte sind alle durch Verwitterungseinflüsse veränderten ursprünglichen Gesteinsanteile, die als Lockermaterial und als Krusten oder Rinden auftreten können. Eine Kruste ist suprakutan, d. h., die Verwitterungsprodukte liegen auf der ursprünglichen Gesteinsoberfläche. Eine Rinde ist dagegen subkutan, d. h., die Verwitterungszone reicht von der Gesteinsoberfläche in das Gestein

hinein. Verwitterungsformen entstehen dadurch, daß die Verwitterungsprodukte ganz oder auch nur teilweise durch Schwerkraft oder Transportmittel wie Wind und Wasser abgeführt worden sind.

Für die Suche nach Zusammenhängen zwischen bisher eingewirkten Verwitterungsfaktoren und Verwitterungserscheinungen bieten sich Beobachtungen über die Verwitterung an Gesteinen in der Natur und an Bauten an. Auf Grund der komplexen Beschaffenheit von (G) und (K) ergeben sich für (V) vielfältige Lösungen. Aus der Ähnlichkeit von Verwitterungserscheinungen kann daher nicht ohne weiteres auf die Gleichheit der Verwitterungsursachen und der Verwitterungsabläufe geschlossen werden. Relativ gute Betrachtungsmöglichkeiten liefert die Gesteinsverwitterung an Bauten, da hier auf kleinem Raum unter verschiedenen mikroklimatischen Verhältnissen weitgehend gleichmäßiges Gesteinsmaterial betroffen ist.

2. Verwitterung und Klima

Als Endprodukt der Verwitterung ist der Boden anzusehen, bei dem selbst bei unterschiedlichem Ausgangsmaterial der Gesteine weitgehend eine einheitliche Ausbildung nach Klimazonen vorliegt, woraus sich die Priorität der Klimafaktoren gegenüber Gesteinsfaktoren ableiten läßt.

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich jedoch nicht um den Endzustand im Verwitterungsablauf, sondern vielmehr jeweils um ein Zwischenstadium, das geprägt wird a) vom Gestein in bezug auf sein Gefüge und seine mineralogische Zusammensetzung, b) vom Expositionsklima, c) von den in der Verwitterungssphäre vorkommenden Akzessoren wie u. a. CO_2, SO_2 und SO_3 und d) von der Einwirkung durch Organismen.

Unter Expositionsklima wird das unmittelbar auf das Gestein einwirkende Mikroklima verstanden, für das die Makroklimawerte nur bedingt zutreffen. So tritt z. B. im humiden Klima an Gebäuden ein schattiges, feucht-kaltes Nord- und ein sonniges, trockenes Südexpositionsklima auf. SCHUBERT (aus GEIGER, 1950) gibt für einen Tag im Mai folgende Strahlungswerte in cal/cm² an: Vollstrahlung (Fläche senkrecht zur Sonnenstrahlung) 916, Horizontalfläche 547, Südwand 264, Ost- bzw. Westwand 278, Nordwand 39. Ebenso deutlich sind die Unterschiede der Feuchtigkeitsmengen an Regenluv- und Regenleeseiten.

Die relativ einfachen Verhältnisse komplizieren sich bei architektonischer Gestaltung der Gesteinsmassen (z. B. gotischen Bauten) und bei speziellem Klima (z. B. in Stadt- und Industriegebieten).

3. Allgemeine petrographische Faktoren

Berücksichtigt sind Gesteine, die auf Grund ihrer Eigenschaften als Baumaterial verwendbar sind, sie sind im Sinne der Mechanik feste Körper mit einem gerichteten oder ungerichteten körnigen Gefüge. Die Gesteinskörper sind aus ihrer natürlichen Lagerung im Steinbruch entfernt und mehr oder weniger isoliert auf-

gestellt worden. Sie haben außerdem durchweg durch eine Bearbeitung eine künstliche Oberfläche erhalten, nach deren Gestaltung und dem effektiven Porenraum (= Raum, der aus allen im Gestein vorhandenen und miteinander verbundenen Hohlräumen besteht) sich die Größe der Fläche richtet, über die Verwitterungsfaktoren angreifen können. Die durchschnittlichen Porositätswerte betragen für Granit 0,05—2%, für Muschelkalk 1—25%, für Sandsteine 7—30%. Der mineralogischen Zusammensetzung nach ist von Bedeutung, ob das Gestein homogen (z. B. Quarzit) oder inhomogen (z. B. Granit) ist.

4. Verwitterungsfaktoren

Durch die Wettervorgänge werden im Gestein dessen Wärme- und Wasserhaushalt Veränderungen unterworfen, die ihrerseits physikalische und chemische Prozesse auslösen. Als Hauptfaktor ist dabei das Wasser anzusehen, dessen Lösungsaktivität durch die Aufnahme von zusätzlichen Agenzien aus der Atmosphäre (z. B. CO_2, SO_2, SO_3, HCl, NH_3) oder aus dem Boden verstärkt wird und die, das in Verbindung mit dem Temperaturgang die Umlagerungen im Gestein bewirken, folgen. Im einzelnen unterscheidet man folgende Verwitterungsarten:

4.1. Temperaturverwitterung

Durch Dilatation bei Erwärmung und Kontraktion durch Abkühlung verändern sich auf Grund der geringen Wärmeleitfähigkeit vornehmlich die der Wärmeein- und -ausstrahlung ausgesetzten Oberflächenpartien. Der bei der Dilatation auftretende Druck ist durchweg nicht groß genug, um Mineralindividuen aus ihrem Verband zu lösen. Durch Summierung aller Drucke werden jedoch insbesondere bei grobkörnigen Gesteinen mit geringer Porosität (z. B. beim Granit) Gesteinspartien unter Spannung gesetzt, durch die bei Überschreiten der Elastizitätsgrenze des Gesteins Schuppen bzw. Schalen losgelöst werden. Die Temperaturverwitterung wirkt sich insbesondere in Gebieten mit großem Temperaturgefälle in kurzen Zeiträumen aus. Das trifft nicht nur für Wüsten, sondern auch für Bereiche in unseren Breiten zu, in denen bei günstiger Position Gesteine bis zu 70° C erwärmt werden können (GEIGER, 1950). Die Größe der durch Insolation vom Gestein aufgenommenen Wärmemenge ist abhängig a) von der Wärmeleitfähigkeit der Gesteine (Sedimente $0{,}8—8{,}0 \cdot 10^{-3}$, Granit $5—9 \cdot 10^{-3}$ cal/sec · cm), b) von der Oberflächengestalt (bei einer Kugel z. B. liegt je nach Sonnenstand nur eine kleine Flächenpartie unter Vollstrahlung), c) von der Oberflächenbeschaffenheit (die größte Reflexion und damit die geringste Wärmeeinstrahlung liegt z. B. bei polierten Flächen vor).

4.2. Frostverwitterung

Frost bewirkt die bekannte Aggregats- und Volumenänderung der im Porenraum vorhandenen Flüssigkeiten. Die Eisbildung erfolgt in den oberflächennahen Gesteinspartien.

Ist im darunterliegenden Gestein Wasser vorhanden, so wird dieses über den effektiven Porenraum an die Stelle der ersten Eisbildung herangezogen. Das Eis wächst dabei der Frosteinfallsrichtung entgegen (STEINFELD). Der Eisdruck kann maximal bis zu 2115 kg/cm² betragen, er reicht demnach aus, um die Gesteinsoberfläche aufzubrechen bzw. geschichtete Gesteine zu spalten. Den Schichten müssen auch die oben besprochenen Rinden und Krusten zugerechnet werden. Die Frostverwitterung ist abhängig 1. vom effektiven Porenraum, 2. von dem Grad der Wassersättigung, 3. von der Häufigkeit des Frostwechsels (zur Bodenfläche hin nimmt die Häufigkeit des Frostwechsels zu):

Höhe über dem Boden in m:	1,0	0,5	0,1	0,05	0,02	0,00
Frostwechselsumme:	0,3	3,5	24,1	47,2	78,1	119,4

(GEIGER, 1950).

4.3. Salzsprengung und Hydratation

Ähnlich dem Eis wirkt sich die Volumwirkung auskristallisierender Salzlösungen in Hohlräumen und die Volumenzunahme durch Hydratation aus.

4.4. Kapillarwirkung des Wassers

Durch die Kapillarwirkung des Wassers treten bei Wasseraufnahme Quellungs- und bei Wasserabgabe Schrumpfungserscheinungen im Gestein auf. Da der Volumenverlust beim Austrocknen größer als die Volumenzunahme bei Durchfeuchtung ist, treten an den betroffenen Gesteinspartien Risse auf (HIRSCHWALD, 1911).

4.5. Chemische Verwitterung

Die chemische Verwitterung ist nach V. M. GOLDSCHMIDT mit einer Analyse zu vergleichen, bei der Stoffe nach ihrer Löslichkeit getrennt werden. Bei vollkommener Analyse bleiben solche Substanzen zurück, die durch Verwitterungsagenzien nicht oder nur schwer zersetzbar sind.

Die chemische Verwitterung ist ein hydrochemischer Vorgang, d. h. sie ist vom Vorhandensein von Wasser abhängig, dessen dissoziierter Anteil dieses zum einfachsten Lösungsmittel macht. In der Natur kommt das Wasser selten rein vor, meistens hat es entweder Gase der Atmosphäre oder Lösungsstoffe anorganischer oder organischer Natur gelöst, wodurch seine Aktivität verstärkt wird. Bei den Lösungsgenossen handelt es sich in erster Linie um Kohlensäure, Chlorverbindungen, Sauerstoff, Schwefelsäure, Humusstoffe und Salpetersäure. Eine Vorrangstellung nimmt zweifelsohne die Kohlensäure ein, die entweder aus der Atmosphäre oder der Lithosphäre stammt (Atmung lebender Pflanzenwurzeln und niederer Bodenorganismen, Verwesung organischer Stoffe). In kohlensäurehaltigem Wasser lösen sich alle Karbonate unter Bildung von Bikarbonaten, die unter dem Einfluß von Luftsauerstoff wieder in Karbonate überführt werden. Alkalihydrate, die bei der Hydrolyse vieler Mineralien entstehen, bilden unter dem Einfluß von

Kohlensäure Alkalikarbonate, die teil alkalisch und teils sauer reagieren, und die sowohl auflösend als auch aufschließend auf Silikate einwirken können. Schon die allein im Wasser befindliche Kohlensäure greift Silikate an und löst aus ihnen Alkalien (K_2O, Na_2O) und Erdalkalien (CaO, MgO), außerdem Eisenoxyd und Manganoxyd (BEHREND, 1927). Das bei den Verwitterungsvorgängen gebildete Ferrokarbonat wird unter Zerstörung der Verbindung als kolloides Brauneisen ($2FeO_3 \cdot 3H_2O$) abgeschieden und überzieht die Oberfläche der verwitternden Gesteine mit einer braunen Rinde. Ähnlich verhält sich das Mangan, wobei sich das schwarze Mangandioxyd (MnO_2) bildet. Eine weitere Eigenschaft der Kohlensäure ist ihr Vermögen, gelöste Kieselsäure aus basischer oder schwachsaurer Lösung als Gel auszufällen (BEHREND, 1927). Chlorverbindungen (in erster Linie NaCl, KCl, $CaCl_2$, $MgCl_2$) sind durch Verwitterung entstandene Salze, die an sich sehr beständig sind, die aber auf Grund der Löslichkeit leicht wandern. Lösungen mit Chlorverbindungen wirken koagulierend auf Verwitterungslösungen ein, außerdem kann es durch sie zu einer Löslichkeitsverstärkung für Salze mit fremden Ionen kommen (BEHREND, 1927).

Die Bedeutung des im Wasser gelösten Sauerstoffes ist im allgemeinen gering. Bei einigen Sulfiden findet eine Umwandlung in Sulfate statt (z. B. das unlösliche Eisensulfit wird durch Oxydation in das lösliche Eisensulfat umgewandelt). Durch Sauerstoffaufnahme werden weiterhin die chemisch meist niedrigwertigen grünlich oder dunkel gefärbten Oxydulverbindungen des Eisens und Mangans in die fast unlöslichen höherwertigen Oxyde überführt. Diese Oxyde zeigen durch ihre lebhafte Farbgebung (beim Eisen gelb, braun, rot; beim Mangan schwarz) die erfolgte Verwitterung an.

Die in Lösungen enthaltene Schwefelsäure kann sowohl aus der Lithosphäre als auch aus der Atmosphäre stammen. Viele Gesteine enthalten Pyrit, bei dessen Verwitterung Schwefelsäure frei wird und Brauneisen zurückbleibt. Schwefelsäure kann außerdem bei Fäulnisvorgängen unter Mitwirkung von Bakterien (Microspira desulfuricans) entstehen. Ebenso können sogenannte Schwefelbakterien (u. a. die Monasarten) im Verlauf ihres Lebensprozesses Schwefelsäure entwickeln.

Mit am wichtigsten für die Verwitterung in Siedlungs- und Industriegebieten sind die im steigenden Maße anfallenden Verbrennungsgase. Eine besondere Bedeutung kommt hier der schwefligen Säure zu. Der größte Teil des Schwefels stammt aus Brennstoffen (handelsübliche Kohle mit 0,8—1,5% S, Ballastkohle bis zu 3,5% S, schweres Heizöl bis zu 5,5% S. Nicht minder gefährlich ist das bei der Verbrennung von Kunststoff anfallende Chlorwasserstoffgas, das zusammen mit der Luftfeuchtigkeit Salzsäure ergibt.

Ebenso zur chemischen Verwitterung kann die biologische Verwitterung gezählt werden. Unter Anteilnahme von Bakterien, Fadenpilzen und anderen niedrigen Lebewesen entstehen durch Fäulnis und Verwesung pflanzlicher Stoffe Humusböden. Im Laufe dieses Prozesses wird dem Boden Kohlendioxyd zugeführt, das mit dem Regenwasser als kohlensäurehaltiges Sickerwasser tief in die Ver-

witterungszone eindringt und an Gesteinen die bekannten Lösungserscheinungen hervorruft.

Kernprobleme der chemischen Verwitterung sind Auflösung der Karbonate und Zersetzung der Feldspäte (CORRENS, 1960).

5. Regionale Beobachtungen von Verwitterungserscheinungen

5.1. Verwitterung im ariden Klima

Durch das Fehlen einer Vegetationsdecke teilt sich der starke Temperaturwechsel im Laufe eines Tages unmittelbar der Erdoberfläche mit. Der tägliche Temperaturgang von 20 bis 50° C wirkt sich bis etwa 10 cm unter der Erdoberfläche aus (WALTHER, 1912), Messungen am Gestein fehlen. Die geringen Niederschläge fallen unregelmäßig als heftige Strichregen. Die Feuchtigkeitsverhältnisse für die Gesteinsverwitterung werden in erster Linie durch kapillar aufsteigendes Bodenwasser und Kondenswasser aus der Luftfeuchtigkeit bestimmt. Gebiete, die bis sechs Kilometer von einer größeren offenen Wasserstelle entfernt liegen, sind Zonen intensiver Taubildung (WALTHER, 1924). Aber auch abseits davon steigt bei nächtlicher Abkühlung der Feuchtigkeitsgehalt der Luft so stark an, daß der Taupunkt erreicht wird. Bei einer angenommenen Tageshöchsttemperatur z. B. von 37° C und einer Luftfeuchtigkeit von 20% wird der Taupunkt bei einer Abkühlung auf 12° C erreicht, bei 40% Luftfeuchtigkeit liegt der Taupunkt bei 21° C und schließlich bei 60% Luftfeuchtigkeit bereits bei 28° C. Die Hygroskopizität des Bodens wird erheblich erhöht durch die mit dem kapillar aufsteigenden Wasser an die Gesteins- bzw. Bodenoberfläche gebrachten Salze. Der Salzausscheidungsprozeß ist durchweg als eine Reaktion in Grenzflächen aufzufassen, in denen die Verdunstung stärker als die Diffusion ist. Die einzelnen Salzkristalle wachsen aus den Kapillaren durch Zufuhr von unten her der Verdunstungssphäre entgegen. Erst bei abnehmender Verdunstungsgeschwindigkeit oder Lösungskonzentration wird die Diffusion stärker als die Verdunstung und dadurch das Salz wieder in eine Lösung überführt.

Über Verdunstung, Diffusion und Kapillarität wird eine Zirkulation der flüssigen wie gasförmigen Phasen im Gestein angeregt. Eine besondere Bedeutung kommt der Verdunstung zu, bei der es sich um eine Evaporation handelt, die einsetzt, wenn die Temperatur an der Verdunstungsstelle größer ist als sie dem Sättigungsdampfdruck der anliegenden Luft entspricht. Im umgekehrten Fall tritt Taufall ein. Die Verdunstungsstelle braucht nicht an der Oberfläche der Gesteine direkt, sondern kann auch darunter liegen. Bei der Evaporation wird zwischen einer potentiellen Verdunstung, bei der Wasser in beliebiger Menge vorhanden ist (z. B. bei Bodenfeuchtigkeit) und der effektiven Verdunstung, bei der die Zufuhr von Wasser behindert ist (z. B. Durchfeuchtung von Baukörpern durch Regenwasser oder bei Taufall) unterschieden (GEIGER, 1950).

In Trockengebieten kann es wegen der schnellen Abkühlung fester Körper gegenüber der Luft bereits bei 60% relativer Luftfeuchtigkeit zum Taufall kommen

(GEIGER, 1950). Von Bedeutung ist dabei die Exposition hinsichtlich der unterschiedlichen Wärmeein- und -ausstrahlungsmengen sowie der Windverhältnisse. Im Windschatten treten wegen der verzögerten Verdunstung höhere Tauwerte auf, die daraus resultierende Verwitterung wird mit Schattenverwitterung bezeichnet. Schließlich haben in Trockengebieten wegen des geringen Trübungsfaktors der Luft Farbe und Oberflächenbeschaffenheit der Gesteine einen erheblichen Einfluß auf dessen Emissions-, Absorptions- und Reflexionsvermögen gegenüber Strahlungen (z. B. absorbiert ein schwarzer Körper mehr Wärmestrahlen als ein heller, eine polierte Oberfläche reflektiert die Strahlen stärker als eine rauhe usw.). Makroklimatisch liegt in Trockengebieten durch die Aridität überwiegend ein Einwegsystem vor, bei dem Salze aus der Tiefe in die Verdunstungszone transportiert werden. Diese Zone liegt durchweg wenige Dezimeter unter der eigentlichen Bodenoberfläche und stellt die Nährquelle für die über die mikroklimatisch ausgelösten Verwitterungsprozesse (Wechsel durch Taubefall und Verdunstung) an die unmittelbare Oberfläche gebrachten und in Ausblühungen sichtbaren Salze dar. Die Feuchtigkeitsverhältnisse an diesen Stellen werden durch die Hygroskopität der Salze stark beeinflußt.

Nicht nur die leicht löslichen, auch die schwerer löslichen Stoffe, wie Kalk, Gips, Kieselsäure, Eisen, Mangan und Aluminium, wandern, wie Untersuchungen in Trockengebieten zeigen. Bei den hohen Temperaturen wird die Hydrolyse des Wassers gesteigert, über die chemische Verwitterung gehen Mineralanteile in Lösung, die dann durch den Verdunstungsvorgang in die Ausfällungszone befördert werden. Die Kalkrinden im mediterranen Klima, die Gipsausscheidungen im extrem ariden Klima, die brauneisenstein- und kieselsäurehaltigen sogenannten Schutzrinden in Kataraktgebieten gehören hierher.

5.1.1. Verwitterungserscheinungen an Kalk- und Sandsteinen sowie an Graniten in Ägypten

5.1.2. Kalkstein

Die etwa 4500 Jahre alte Sphinx bei Gise (Taf. 1, Fig. 1) besteht im Hauptteil aus einer inmitten eines alten Kalksteinbruches stehengebliebenen Gesteinsmasse, die durch Bearbeitung des Anstehenden das menschliche Haupt und durch Anfügen von Hausteinen (Kalkstein) die bekannte Form eines liegenden

---

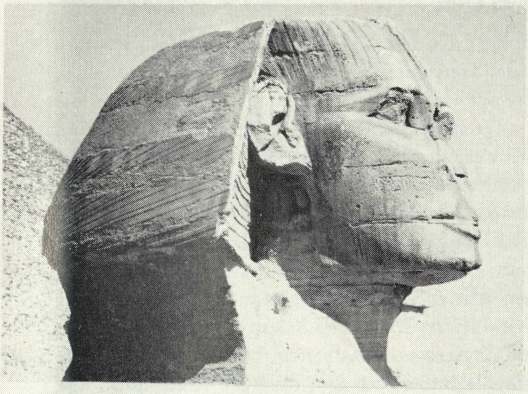
Tafel 1

Fig. 1: Kopf der Sphinx bei Gise/Ägypten (24. Jh. v. Chr.) — Kalksteinverwitterung.

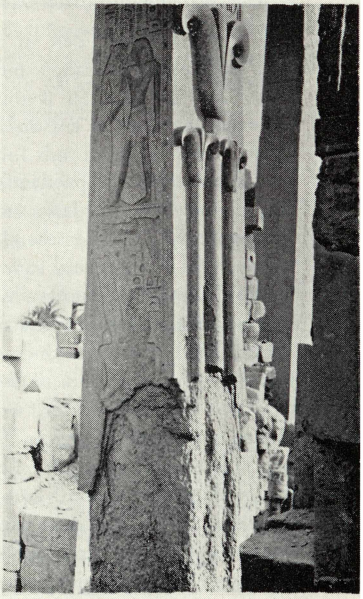
Fig. 2: Hathor-Tempel in Abu Simbel/Ägypten (12. Jh. v. Chr.) — Verwitterung am nubischen Sandstein.

Fig. 3: Lotospfeiler aus poliertem Assuangranit (15. Jh. v. Chr.) im Tempelbezirk von Karnak/Ägypten — Granitverwitterung bis zum Kapillarsaum.

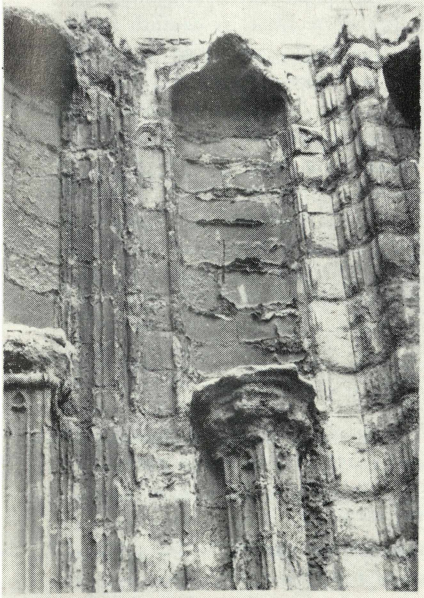
Fig. 4: Nische an der Südseite der Petri-Kirche in Löwen/Belgien (15. Jh.) mit Erscheinungen der Kalksteinverwitterung und technischer Schäden durch Auftrag einer Zementschlemme auf das Gestein.



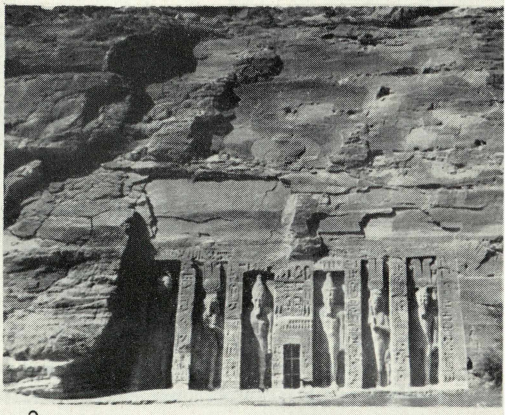
1



3



4



2

Löwen erhalten hat. Der Kalkstein enthält nach einer Analyse von BLANCKENHORN (1900) im Durchschnitt 90% $CaCO_3$, 1% NaCl, weiterhin $MgCO_3$, $FeCO_3$ SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3,$CaSO_4$, $Ca(PO_4)_2$, CaO.

Im Laufe der Zeit ist die Sphinx bis zur Kinnpartie des Kopfes mehrfach vom Wüstensand begraben und wieder freigelegt worden. Bei der relativ schnellen Einbettung der unteren Rumpfteile auf der Sohle des Steinbruches hat hier die Verwitterung nicht so entscheidend angreifen können wie an der Rumpfkuppe und am Kopf. Hier lassen sich folgende Verwitterungserscheinungen feststellen: Hals- und untere Kopftuchpartien sind stark zurückgewittert. Bei der Einbettung im Wüstensand sind die darin enthaltenen Salze (vornehmlich NaCl) an der Berührungsstelle mit dem Anstehenden wirksam geworden. Die für die Lösung der Salze notwendige Feuchtigkeit stammt aus dem Boden und in erster Linie aus dem Taubefall. Die Salzlösungen sind am Anstehenden emporgewandert, und das Salz ist am obersten Kapillarrand auskristallisiert. Die durch Salzsprengung gelockerten Oberflächenteile sind durch den Wind abgetragen worden. Im Laufe der viereinhalb Jahrtausend hat sich die tiefe Hohlkehle bilden können, die auch heute noch, und zwar von unten nach oben, weiterwächst. Ursache dafür ist der in Schattenpartien stärker anfallende Betrag an Tau, durch den die im Gestein vorhandenen oder mit dem Wüstensand angewehten Salze gelöst werden, die dann in der Verdunstungszone wieder zum Ausfall kommen. Gleiche Vorgänge sind unter dem rechten Ohr festzustellen, die von den Kapillarsäumen durchwanderte Zone ist deutlich zu erkennen. Die oberen Kopftuchpartien liegen noch außerhalb dieses eben geschilderten Verwitterungsbereiches, sie sind Zonen starker Sonneneinstrahlung. Die Gesteinsoberfläche ist hier durch $CaCO_3$- und SiO_2-Anteile imprägniert. Diese Rinde ist bei dichterem Untergrund fest mit dem Anstehenden verbunden, bei mehr lockerem Untergrund hat sich zwischen der Rinde und dem Anstehenden eine Magerschicht ausgebildet. Durch Temperaturverwitterung platzen hier die Schichten auf und fallen als Schalen ab, die gesamte bearbeitete Oberfläche geht dabei verloren. Um eine Rindenbildung handelt es sich auch beim Kopftuch an der Stirnseite. An Partien der größten Krümmung (Kalotte) hat auch die stärkste Rindenbildung stattgefunden. Wesentlich geringmächtiger ist die Rinde links neben dem rechten Auge, an dieser Partie hat sich selbst die ehemalige Bemalung erhalten. In der unteren Gesichtshälfte haben sich durch selektive Verwitterung die Schichtausbisse deutlich markiert. Die Gesteinsoberfläche ist hier narbig zerstört.

Die Beschädigung an der Nase, den Mundpartien und der Uräusschlange am Kopftuch gehen auf mutwillige Zerstörungen durch Menschenhand zurück.

5.1.3. Nubischer Sandstein

Der nubische Sandstein besteht fast ausschließlich aus feinen bis gröberen abgerollten Quarzkörnern mit einem quarzitischen Bindemittel und Beimengungen von Eisen- und Manganverbindungen. Seine Porosität liegt bei etwa 22%. Ein Hauptmerkmal einer chemischen Verwitterung sind Rindenbildungen aus Eisen-

und Mangansalzen, die zusammen mit gelöster Kieselsäure in die Gesteinsoberfläche eingewandert sind und diese, wie auch die Quarzkörner selber, dunkel färben. Nach WINGARD setzen sich die Rinden wie folgt zusammen: 36,86% Eisenoxyd, 30,57% Manganoxyd, 4,04% Sauerstoff, 4,89% Bariumoxyd, 8,91% Tonerde, 8,44% Kieselsäure, 5,9% Wasser und 0,25% Phosphorsäure. Die Anteile von Eisen- und Manganoxyden schwanken, es kommen alle Mischungsverhältnisse vor. Durch die glaskopfähnliche Ausbildung der Gesteinsoberfläche vermindert sich sowohl die Ein- als auch die Ausstrahlung.

Die auf Grund der Gesteinsfaktoren anzunehmende gute Wetterbeständigkeit des nubischen Sandsteins läßt sich an vielen Beispielen, so auch beim Hathor-Tempel in Abu Simbel, nachweisen. Der Tempel ist um 1250 v. Chr. aus dem Anstehenden herausgearbeitet worden (Taf. 1, Fig. 2). Tempelwand, Pfeiler und Plastiken sind mit einer dünnen Rinde überzogen, die fest auf dem Untergrund sitzt. In Bodennähe sind in etwa 50 cm Höhe Verwitterungen durch Salzsprengungen feststellbar. Das Salz stammt aus dem Wüstensand und wird durch Bodenfeuchtigkeit (der Tempel liegt nur wenige Meter vom Nil entfernt) in das Gestein gebracht.

Eine starke Abschalung wird im Anstehenden oberhalb der Tempelfront sichtbar. An den glatten Hangflächen hat sich auf dem durchweg söhlig liegenden Gestein eine oberflächenparallele Schalung gebildet. Entgegen früheren Anschauungen, wonach Abschalungen allein auf die durch Dilatation und Kontraktion hervorgerufenen Spannungen beruhen sollen, ist KIESLINGER (1932) der Ansicht, daß sie auf einen nachlassenden Überlagerungsdruck zurückzuführen sind. Die Schalenstärke nimmt in den einzelnen Partien von unten nach oben zu. Die dadurch bedingte konvexe Hangbildung nach Abfall der Schalen konnte vielfach an Zeugenbergen am Nil beobachtet werden.

Neben Abschalung und Abschuppung sind Kernsprünge ein hervorstechendes Merkmal der Temperaturverwitterung in Trockengebieten. Die Verwitterung tritt nicht nur an massig ausgebildeten Eruptivgesteinen, sondern auch an Sandsteinen auf, wenn diese eine Rinde tragen. Die Abb. 1 gibt einen solchen Fall wieder. Die Oberfläche der im Kataraktgebiet aus dem Wüstensand aufragenden Halbkugel (Radius etwa 30 cm) ist mit einer dünnen, dunkelbraunen Rinde, der sogenannten Kataraktrinde, bedeckt, die fest auf dem Gesteinskern sitzt und in der Stärke von unten nach oben abnimmt. Diese Rinde fehlt am flachen, im Wüstensand steckenden Gesteinsfuß, der keine Verwitterung zeigt. Der Untergrund unter dem Gestein war feucht. Durch einen parallel zur Bodenfläche verlaufenden Kernsprung ist eine Kalotte, und durch mehrere senkrecht dazu verlaufende Risse sind scharfkantige Teilstücke abgetrennt worden. Das Zerbrechen des Gesteins geht m. E. auf die bei Temperaturwechsel auftretenden Spannungen zurück. Die Kataraktrinden unterliegen ihrem Gefüge nach vornehmlich der physikalischen Verwitterung und bilden auf Grund ihrer Zusammensetzung einen Schutz gegen chemische Verwitterungsfaktoren. Diese greifen jedoch beim Vorhandensein von Grundfeuchte oftmals

das Gestein von der Basis aus an. Diese Verwitterung ließ sich insbesondere an Graniten feststellen. Durch Aufbereitung der Feldspäte vergrust der Gesteinskern. Bei Beschädigung der Kataraktrinde läuft das Lockerungsmaterial heraus und übrig bleibt ein als Pelzkappenstein bezeichnetes Rindengebilde. Bei der chemischen Verwitterung spielen die bei den hohen Temperaturen verstärkt auftretende

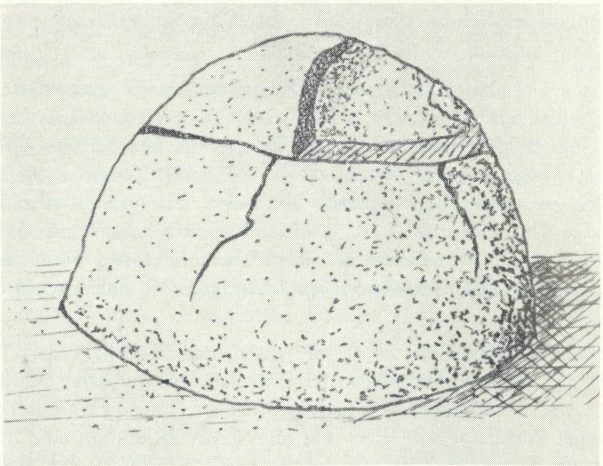


Abb. 1: Nubischer Sandstein aus dem 2. Kataraktgebiet/Sudan mit Rindenbildung, Rindenrissen und Kernsprung durch Temperaturverwitterung.

Dissoziation des Wassers und die im Boden vorhandenen Salze eine entscheidende Rolle.

Bei fehlender Schutzrinde setzt die chemische Verwitterung von außen an, durch den Vergrusungsprozeß bleibt mit der Zeit ein Kern zurück, der sich in der Form immer mehr einer Kugel bzw. einem Ellipsoid nähert.

5.1.4. Assuan-Granit

Als klassisches Beispiel für die im vorhergehenden Kapitel letztgenannte Verwitterung kann der im Tempelbezirk von Karnak (Luxor) aufgestellte und etwa 3400 Jahre alte Granitpfeiler (Taf. 1, Fig. 3) gelten. Die kunstvoll polierte Oberfläche des Granits zeigt in den oberen Partien keinerlei Verwitterungserscheinungen. Dagegen ist der untere Pfeilerteil durch aufsteigende und mit Salzen beladene Grundfeuchte an der Oberfläche bis zum Kapillarsaum tiefgründig verwittert (Feldspatverwitterung). Durch die Zersetzung der Feldspäte ist eine Vergrusung eingetreten, die noch nicht zum Stillstand gekommen ist, sondern langsam nach oben weiterwächst. Der Kapillarsaum liegt auf der Südseite höher als auf der Nordseite des Pfeilers. Der Granit von Assuan ist ein Hornblendebiotitgranit. Innerhalb der über 3000 Jahre alten Steinbrüche südöstlich von Assuan zeigt sich

das Gestein auffallend frisch und ohne Rindenbildung. Außerhalb der Brüche ist der Granit stark aufbereitet. Blöcke unterschiedlicher Größe haben durch Kantenverwitterung eine kugelige bzw. ellipsoide Gestalt erhalten. Ihre nicht im Detritus steckende Oberfläche ist zwiebelschalenförmig aufgeblättert und trägt eine stumpfe dunkle Rinde. Nur im Überschwemmungsbereich des Nils ist die Rinde hochglänzend, diese sogenannte Kataraktrinde setzt sich nach LUKAS (1934) im Hauptteil aus Eisen- und Manganoxyd sowie aus Kalk, Kieselsäure, Magnesia, Pottasche, Schwefel- und Phosphorsäure zusammen. Der Detritus enthält neben Scherben abgefallener Schalen Quarzsand, Glimmer und toniges Material.

Nach LINK (1930) treten die sogenannten Schutzrinden nicht bei Kreidekalken und am Marmor auf.

5.2. Verwitterung im humiden Klima

Die makroklimatischen Verhältnisse in Norddeutschland, den Niederlanden und Belgien sind gekennzeichnet durch: 1. größere Niederschlagsmengen gegenüber den Verdunstungsmengen, 2. ausgeglichene Temperaturen im Jahres- und Tagesgang, 3. relativ hohe Luftfeuchtigkeit, 4. einen hohen Trübungsfaktor, 5. Neigung zu Nebel-, Tau- und Reifbildung, 6. häufige Niederschläge, 7. südliche und südwestliche Regenwinde und 8. eine Labilität des Wetters. Für die Verwitterungsbedingungen an Bauten treffen diese Verhältnisse nur bedingt zu, da sie durch expositionsbedingte mikroklimatische Verhältnisse überlagert werden. So können hier alle Einflüsse eines ariden bis zu einem extrem humiden Klima wirksam werden. Grundsätzlich neue Verwitterungsfaktoren ergeben sich aus der Frostmöglichkeit, der Einwirkung der Seewinde und aus dem verstärkten Vorkommen von Verbrennungsgasen.

5.2.1. Kalkstein

An der inmitten der Stadt Löwen/Belgien gelegenen, im 15. Jh. aus Kalkstein (wahrscheinlich Baeleghem-Kalkstein aus dem Eozän) erbauten Petri-Kirche lassen sich einige der hauptsächlichen Kalksteinverwitterungen feststellen. Schon von weitem ist die verschiedene Färbung des Gesteins auffallend. Alle vom Regen durchwaschenen Architekturteile zeigen das fast weiße Gestein, während dieses an regengeschützten Stellen fast schwarz aussieht. Bei näherer Betrachtung erkennt man an den hellen Stellen eine Abwitterung, die bei den planen Bauquadern flächig erfolgt ist und die bei Profilen die Kanten abgerundet hat. Die Abwitterung ist ein deutliches Zeichen für die stattgefundene Auflösung von $CaCO_3$-Anteilen durch das im Stadtklima durch zusätzliche CO_2-Gase lösungsverstärkte Regenwasser und gleichzeitig für die Umwandlung von $CaCO_3$ in Gips durch die in der Stadtatmosphäre vorkommenden Verbrennungsgase (SO_2 und SO_3). Der scheinbare Bleichvorgang des Gesteins läßt sich durch die Ausfällung von $CaCO_3$ in Form von Calcit erklären (nach RAMDOHR, 1954, scheidet sich aus Lösungen unterhalb von 29° C stets Calcit, darüber Aragonit ab).

Die im Regenschatten liegenden Gesteinsflächen tragen eine durch Ruß und Staub fast schwarzgefärbte Kruste, die Gips und Calcit in unterschiedlichem Mischungsverhältnis enthält. Der Gips ist umgesetztes $CaCO_3$, das z. T. aus den Bauquadern, z. T. aber auch aus dem Mörtel stammen kann. An den Mörtelfugen ist durch nachtreibenden Gips die Kruste aufgebrochen (s. Taf. 1, Fig. 4). Bei der Petri-Kirche haben sich die natürlichen Verwitterungsschäden dadurch verstärkt, daß man den bereits angewitterten Kalkstein mit einer Zementschlemme versehen hat. Hinter einer solchen künstlichen Kruste wirkt sich der Verwitterungsvorgang besonders intensiv aus. Einmal tritt durch Haarrisse Regenwasser an den Kalkstein, weiterhin kommt es bei Temperaturrückgang zur Ausscheidung von Kondenswasser zwischen Kruste und dem Gestein, besonders dann, wenn hier in den Materialien eine unterschiedliche Porosität vorliegt. Hinter der dichten Kruste wandert die Feuchtigkeit zu Verdunstungsstellen, an denen gelöstes Gesteinsmaterial zur Ausfällung kommt. Anreicherungen von Salzen machen sich durch Aufblähungen und Rissigwerden der Kruste, ähnlich wie bei Frostaufbrüchen, bemerkbar. Durchweg handelt es sich dabei um das sogenannte Gipstreiben.

Die Untersuchung einer Kruste (s. Taf. 2, Fig. 1) von der Balustrade an der Westseite von St. Gudula in Brüssel läßt die verschiedenen Möglichkeiten einer Krustenbildung erkennen. Der dargestellte Anschliff verläuft quer zur ehemaligen Oberfläche einer senkrecht stehenden Strebe. Den Kern bildet ein feinkörniger Kalkstein, dessen hellgelbe Färbung von einem geringen Glaukonitbestand im ursprünglichen Gestein herrührt. Das im Glaukonit vorhandene Eisenoxydul oxydiert bekanntlich unter 6- bis 8facher Volumenvermehrung (FREBOLD, 1942) zu wasserhaltigem Eisenoxyd. Dieses Brauneisen hat die Streifung rechts oben im Gestein hervorgerufen. Im Gegensatz zu der hier deutlichen Dichte zeigt die linke und untere Seite des Kernstücks einen lockeren Verband. An der linken Kante hat sich eine dünne Magerzone ausgebildet, über der eine ebenso dünne Rinde liegt, die sich aus Calcit und quarzitischem Material zusammensetzt. Diese Art von Rindenbildung konnte in verstärktem Maße sowohl an den Kalksteinquadern im Pyramidengebiet von Gise/Ägypten als auch in minderer Ausführung an sonstigen Kalksteinen im maritimen, humiden Klima (Norddeutschland, Belgien, Niederlande) festgestellt werden.

Der beschriebenen Rinde liegt an der linken und oberen Kante eine aus faserigem Calcit und Gips bestehende Kruste auf, die sich z. T. von der Rinde gelöst hat. Den Abschluß über der Sinterkruste bildet eine schaumig ausgebildete

---

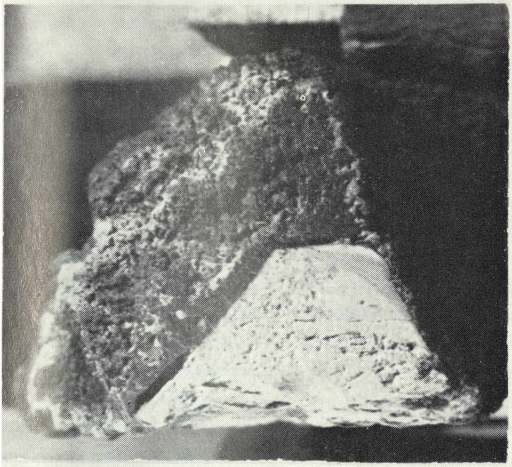
Tafel 2

Fig. 1: Kruste von der Balustrade vor St. Gudula/Brüssel — Krustenbildung auf Kalkstein (untere Kantenlänge des Gesteins 19 mm).

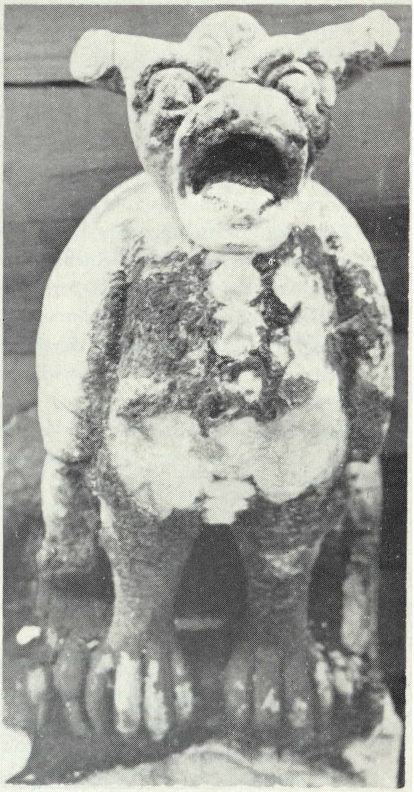
Fig. 2: Wasserspeier vom Rathaus in Brügge/Belgien (15. Jh.?) — Urbane Kalksteinverwitterung.

Fig. 3: Plastik von der Südseite des Bremer Rathauses (Anfang 15. Jh.) — Elmkalkstein — Kalksteinverwitterung und technische Schäden (Bruchbildung an Hals und Kragen).

Fig. 4: Westwand der Kathedrale in Herzogenbosch/Niederlande (14.—16. Jh.) — Sandsteinverwitterung.



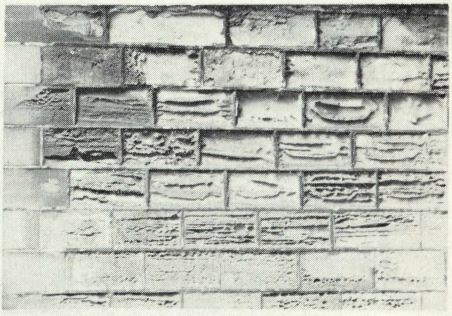
1



2



3



4

harte Masse aus Calcit und Gips, in der Ruß und Staubkörner eingebacken sind. Dieses Krustenmaterial stammt aus der Balustradenbrüstung und ist durch Regenwasser herangebracht worden.

Auf Kalksteinen mit einem tonig-serizitischen Bindemittel konnten Krusten beobachtet werden, die über eine Magerschicht nur noch eine lose Verbindung mit dem Gesteinskern hatten. Bei dem in der Taf. 2, Fig. 2 gezeigten Beispiel handelt es sich um eine Plastik aus Kalkstein mit etwa 8% tonigen Beimengungen. Der etwa 500 Jahre alte Wasserspeier zeigte ebenso wie eine vor 50 Jahren aufgestellte Kopie einer Frauenplastik, aus ähnlichem Kalkstein wie oben beschrieben, so starke Zersetzungserscheinungen, daß diese und weitere Plastiken aus Sicherheitsgründen von ihrem Standort am Rathaus zu Brügge abgenommen werden mußten. Ähnlich ist es den aus Elmkalkstein Anfang des 15. Jh. geschaffenen Plastiken vom Rathaus in Bremen ergangen. Bei dem auf Spalt gestellten Gestein waren (Taf. 2, Fig. 3) in Hals- und Schulterpartien durchgehende Risse aufgetreten, die m. E. zum großen Teil zu Lasten von Transportschäden bei der Aufstellung der Plastiken gehen. Auf diese Schadensart wird in der Zusammenstellung noch einmal eingegangen. Über vorgezeichnete Risse hat die Verwitterung das Gestein angegriffen und schließlich die Abtrennung von Gesteinspartien bewirkt. Den allgemeinen Verwitterungsfaktoren müssen in Stadtgebieten die durch den Verkehr ausgelösten Erschütterungen zugerechnet werden. Die Berücksichtigung solcher und ähnlicher technischer Schadensfaktoren ist unerläßlich, da durch sie die Verwitterung eine sonst nicht zu verstehende Beschleunigung erfährt, wie sie im oben beschriebenen Fall Brügge vorliegt.

5.2.2. Sandstein

Im Gegensatz zum Kalkstein befindet sich der am Bremer Rathaus Anfang des 17. Jh. verarbeitete Obernkirchner Sandstein in einem guten Erhaltungszustand. Mit 84%-Quarz und 16% tonig-serizitischem Bindemittel bei rund 11% effektivem Porenraum ist das Gestein weitgehend wetterbeständig. Außer einer minimalen Rindenbildung durch Anreicherung von Alkalien in der Oberfläche ist diese durch Anflug von Staub und Ruß verschmutzt. Nach CORRENS, 1949, wird durch Regenwasser der im Gestein vorhandene Kalifeldspatanteil in Muskovit, Alkali und Quarz umgewandelt. Der Quarz kommt bereits im Porenraum des Gesteins zur Ausfällung. Eine Alkalianreicherung kann durch das Eindringen von in Lösung gegangenen Mörtelanteilen von den Kanten her in das Gestein erfolgen.

Als Beispiel für einen Verwitterungsablauf in Abhängigkeit von der Regenwassermenge wird in der Fig. 4 der Taf. 2 eine Verwitterungszone an der Westwand der Kathedrale in Herzogenbusch/Niederlande angeführt. Die Wandpartie liegt unter einem schadhaften Gesims in etwa 2 Meter Höhe und ist in neuerer Zeit ausgebessert worden. Die mit einer senkrechtstehenden Scharierung versehenen Quadern aus feinkörnigem, tonhaltigem Sandstein unbekannter Herkunft sind mit einem fetten Zement verbaut und damit isoliert. Das über die Westwand ab-

rinnende und z. T. über die schadhafte Stelle im Gesims von hinten in die Quadern eindringende Regenwasser muß über deren Oberfläche wieder verdunsten. Die von oben nach unten abnehmende Durchfeuchtung hat auf den einzelnen Quadern eine Verwitterungsabfolge entstehen lassen, die in direkter Beziehung zur Durchfeuchtungsmenge gebracht werden kann. In den obersten Quaderreihen ist die Oberfläche bereits tiefgründig entfernt, wie aus den stehengebliebenen Mörtelfugen zu ersehen ist. In der Mittelzone sind die verschiedenen Stadien einer Wabenverwitterung zu erkennen. In den einzelnen Quadern wächst, wie allgemein üblich, die Verwitterung von unten nach oben.

Es ist selbstverständlich, daß die vielen Übergänge vom Sandstein zum Kalkstein eine ebenso große Anzahl von unterschiedlichen Verwitterungserscheinungen hervorbringen, die beim Sandstein mehr von physikalischen und beim Kalkstein mehr von chemischen Prozessen herrühren. Eine besondere Bedeutung kommt den tonigen Anteilen im Gestein zu, da sie quellfähig sind und außerdem Verwitterungsagenzien lange Zeit im Gestein festhalten können.

5.2.3. Granit

Beispiele von Granitverwitterung, ähnlich wie in Taf. 1, Fig. 3 beschrieben, zeigen sich vielfach an Haussockeln, die im Spritzwasserbereich liegen. Besonders gesteinszerstörend wirken sich die aus der winterlichen Salzstreuung stammenden Lösungen aus, durch die der Feldspatanteil im Gestein aufbereitet wird. Durch die tonige Verwitterung entsteht quellfähiges Gesteinsmaterial, durch das bei Wasser-



Abb. 2: Flechtenbewuchs auf Granit, Okertal/Harz.

aufnahme die Gesteinsoberfläche feinschuppig aufgelockert wird. Die Verwitterungszone verläuft vom Erdboden bis in die Höhe des Kapillarstreifens.

Außerhalb des Einflusses von Verwitterungssalzen unterliegt in mittleren Breiten der Granit kaum der Verwitterung. Beispiele dafür bieten die Megalithgräber. Hier muß jedoch berücksichtigt werden, daß diese Gräber durchweg aus unbehauenen Findlingen aufgebaut wurden, die den Kern ehemaliger Granitblöcke darstellen, die durch Verwitterung und durch den Transport in den Eiszeiten ihre jetzige Ausformung erhalten haben. Besonders gut haben sich durch Gletscherschliff polierte Granitblöcke erhalten, so z. B. in Bohuslän/Schweden, wo die in den Granit eingeschnittenen Felsbilder nach vielen tausend Jahren nur eine geringfügige Kantenabrundung zeigen, obwohl der Block mit seiner Oberfläche in der Bodenebene liegt und voll der Sonneneinstrahlung ausgesetzt ist.

Außerhalb von Stadt- und besonders Industriegebieten beobachtet man oft an Graniten Flechten und Moose, die anzeigen, daß hier bereits durch Verwitterung der Nährboden für niedere Pflanzen geschaffen wurde. Die von den Hyphen ausgeschiedenen Säuren greifen die Silikatstrukturen des Granits weiter an und zerstören sie. An diesen Stellen entsteht ein Mikroklima mit besonderen Feuchtigkeitsverhältnissen (s. Abb. 2). Auf die biologische Verwitterung wird im Untersuchungsergebnis eingegangen.

6. Untersuchungsergebnis

Die angeführten Beispiele machen keinen Anspruch auf Vollständigkeit und können nur als stellvertretend für die vielfachen Beobachtungen (s. Zusammenfassung) über Verwitterungserscheinungen an Bauwerken unter verschiedenen klimatischen Bedingungen angesehen werden. Die Feststellungen lassen sich wie folgt zusammenfassen: Die Verwitterung im eigentlichen Sinn ist ein naturgesetzlich ablaufender Anpassungsvorgang der Gesteinsfaktoren unter die Bedingungen der Verwitterungsfaktoren.

Über den Witterungsablauf werden die Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse in der Atmosphäre laufend verändert. Diese Vorgänge übertragen sich auf den Kontaktbereich von Atmosphäre und Lithosphäre und lösen hier in der sogenannten Verwitterungszone der Gesteine physikalisch-chemische Prozesse aus. Ausschlaggebend für den Verwitterungsablauf sind die Werte des expositionsbedingten Mikroklimas (s. unter 2) an der Verwitterungszone, die ihrerseits durch das Auftreten bzw. das Abtragen von Verwitterungsprodukten einer laufenden Veränderung unterworfen sind.

a) Hauptverwitterungsfaktor ist das Wasser, das in ländlicher Umgebung (s. unter 5.1.2.—5.1.4.) als Feuchtigkeit mit aus der Atmosphäre aufgenommenen Gasen (vornehmlich CO_2) und beladen mit Aerosolen von Salzen aus den Meeren oder als Bodenwasser mit gelösten Salzen und Säuren aus dem Erdboden die chemische Verwitterung in der Verwitterungszone solcher Gesteine einleitet und

unterhält, die gegenüber den Agenzien instabile Mineralien enthalten. Bei Kalk- und Kalksandsteinen wird $CaCO_3$ von der Kohlensäure angegriffen, bei Graniten werden Feldspat und Glimmer umgewandelt (tonige Verwitterung). Die Verwitterungsverhältnisse komplizieren sich in Siedlungs- und Industriegebieten. Durch die schnelle Ableitung des Regenwassers, die stärkere Nebelbildung infolge der in Siedlungsgebieten vermehrt auftretenden Kondensationskerne, die Erwärmung der Stadtluft durch zusätzliche Wärmequellen, die Ein- und Ausstrahlungsbehinderung durch Verschmutzung der Luft (Trübungsfaktor) verändern sich der Feuchtigkeitsrhythmus und der Temperaturgang. Noch stärker und damit einschneidender wirken sich die aus den Verbrennungsgasen und aus den Abwässern stammenden akzessorischen Lösungsgenossen wie CO_2, SO_3, SO_2, HCl aus. Verbrennungsgase können über den Wind und Abwässer über Bodenwässer weit in das Land hineingetragen werden, somit beschränkt sich die urbane Verwitterung nicht nur auf die unmittelbaren Siedlungsgebiete.

b) Als eine mittelbare Verwitterung muß die Gesteinsaufbereitung unter Einfluß von Organismen angesehen werden. Dabei handelt es sich in erster Linie um Algen, Pilze, Flechten und Moose, die an der Bildung von amorphen Verwitterungsprodukten aus Mineralien ebenso beteiligt sind wie die schwefeloxydierenden und nitrifizierenden Bakterien. Die Bodenflora und -fauna ist klimaabhängig, die durch sie bewirkte Gesteinszerstörung hängt damit mittelbar von der Witterung ab, sie wird zweckmäßig unter dem Begriff edaphonitische Verwitterung zusammengefaßt.

c) Schadensursachen, die durch die Bearbeitung der Gesteine, durch ihre Verwendung als Bauteile und Behandlung der Werkstücke mit Konservierungsmitteln ihre Ursache haben, zählen nicht zu den eigentlichen Verwitterungsfaktoren. Sie verdienen jedoch insofern Beachtung, weil durch sie die natürliche Verwitterung beschleunigt oder aber auch verzögert werden kann. Schon bei der Gewinnung der Werkstücke im Steinbruch durch Sprengungen oder mit Hilfe von Preßlufthämmern können versteckte Risse (Stiche) entstehen. Bei der weiteren Bearbeitung werden insbesondere die Sichtpartien mit Steinmetzwerkzeugen behandelt, dabei werden Minerale zerschlagen und der Kornverband an der Oberfläche des Gesteins gelockert. Durch Zug- und Druckbeanspruchung beim Transport können Brüche im Gestein auftreten. Gute Beispiele dafür bieten die Obelisken in Ägypten. Die meisten mehr als 10 m langen Monolithe aus Assuan-Granit sind über eine Wippe (Unterstützung im Schwerpunkt) aus der Horizontalen in die Senkrechte überführt worden. Beim Aufrichten sind durch Zugbeanspruchung die Kanten in der Nähe der Auflagestelle angebrochen. Zu technischen Schäden sind weiterhin u. a. zu rechnen: die Rostsprengung bei Verwendung von Eisendübeln, die Druckbelastung durch das Eigengewicht und die auflagernden Massen, die vom Straßen- und Flugzeugverkehr sowie von Kirchenglocken ausgelöste Vibration und schließlich alle Schäden, die auf Katastrophen, wie Brand, Erdbeben und Überflutungen, zurückzuführen sind. Diese gesteinszerstörenden und der Verwitterung Vorschub leistenden Faktoren sind keine Verwitterungsfaktoren im eigentlichen Sinne.

Schwierig wird die Feststellung des durch Bemalung oder sonstige Konservierungsmittel behinderten Verwitterungsablaufes. Verwitterungshemmend sind z. B. Tränkungen mit hydrophoben Mitteln, verwitterungsfördernd dagegen wirken sich meistens die auf angewitterten Gesteinsoberflächen aufgebrachten, porenabschließenden Substanzen aus (s. Taf. 1, Fig. 4).

d) Verwitterungsarten lassen sich einmal nach Verwitterungsursachen und zum anderen nach gesteinsarteigenen Verwitterungsmerkmalen gliedern, demzufolge spricht man z. B. im Sinne der Verwitterungslehre von einer Kohlensäureverwitterung und aus der Sicht der Denkmalspflege von einer Kalksteinverwitterung.

Die Kalksteinverwitterung verdient besondere Aufmerksamkeit, da Kalksandsteine und Kalksteine, wozu auch die besonders im Mittelmeerraum vielfach verwandten Marmore gehören, zu allen Zeiten verarbeitet worden sind.

Das überall im Verwitterungsbereich vorkommende CO_2 wird in Wasser zu H_2CO_3 hydratisiert. Die starke Säure löst bekanntlich Kalk unter Bildung von unbeständigem, nur in Lösung vorkommendem und somit umlagerungsfähigem Kalziumbikarbonat, aus dem $CaCO_3$ durchweg als Kalksinter ausgefällt wird. Da die Löslichkeit von CO_2 in Wasser bei steigenden Temperaturen (z. B. von 0° auf 20° C um die Hälfte) und ebenso bei Druckentlastung abnimmt, kommt es bei unter Tage gebrochenen Kalksteinen zu einer Härtung durch ausgefällten Kalksinter, sobald das Gestein den Bedingungen an der Erdoberfläche ausgesetzt ist.

Bei dem Härtungsvorgang ergeben sich klimabedingt Unterschiede, die an folgenden zwei Beispielen erläutert werden: Die aus dem Pietersberg/Maastricht in 60 m unter Tage bei gleichbleibenden Temperaturen vor Ort von 10° C und ebenfalls gleichbleibenden Feuchtigkeitsverhältnissen gewonnenen Kalktuffgesteine (97,26% $CaCO_3$, 0,29% Al_2O_3 und Fe_2O_3, Rest unbestimmt) erhärten z. B. durchgehend und zeigen in den oberflächennahen Zonen nur eine geringe Festigkeitszunahme. Die im Mokkatamgebirge bei Turra/Kairo etwa 100 m unter Tag und bei Temperaturen von etwa 18° C gebrochenen Kalksteine (90% $CaCO_3$, Rest u. a. $MgCO_3$, Fe_2CO_3, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 nach BLANCKENHORN) dagegen erhärten wesentlich ungleichmäßiger, da bei der intensiven Insolation die Verdunstung beschleunigt wird. Da die Verdunstungszone gleichzeitig die Zementierungszone ist, kommt es zur Ausbildung einer Rinde oder einer Anreicherungszone, die bis zu einem Drittel der Gesteinsstärke ausmachen kann.

Bei im Tagebau gewonnenen Kalksteinen liegt an und unter natürlichen Kluftflächen ebenfalls eine Gefügeverfestigung durch Anlagerung von Kalksinter im Porenraum vor. Daraus erklärt sich auch die bessere Wetterbeständigkeit von Bruchsteinen gegenüber Hausteinen, da bei letzteren durch die Überarbeitung die oben erwähnte Zementierungszone entfernt worden ist.

Der Ablauf der Kohlensäureverwitterung wird bestimmt durch den Rhythmus von Durchfeuchtung durch Regen, Tau und Bodenwasser und der Austrock-

nung durch Insolation und Wind. An Ort und Stelle entstehen am Gestein mikroklimatische humide und aride Verhältnisse. Gelöste $CaCO_3$-Anteile werden dabei umgelagert und in der Verwitterungszone abgesetzt (Rindenbildung) oder im fließenden Wasser abgeführt und an einer Verdunstungsstelle ausgefällt (Krustenbildung) (siehe hierzu Taf. 1 Fig. 1 und Taf. 2 Fig. 1).

Die Kohlensäure bei diesen Vorgängen stammt, wie bereits erwähnt wurde, aus der Atmosphäre, dem Edaphon und in Siedlungsgebieten im verstärkten Maße aus den Verbrennungsgasen. Beträchtliche Mengen von CO_2 werden aber auch bei der Erwärmung von Ozeanwasser frei, sie spielen in maritimen Gebieten eine wesentliche Rolle. Über Seewinde kann sich der Einfluß bis über 100 km Küstenentfernung bemerkbar machen.

Die vielfache Feststellung von Gips bei der Kalksteinverwitterung weist auf die große Bedeutung vom Vorkommen der Schwefelsäureeinwirkung in den Verwitterungszonen hin. Besonders gesteinszerstörend ist das Gipstreiben unter Rinden und Krusten. Die Umwandlung von $CaCO_3$ in $CaSO_4 + 2\ H_2O$ erfolgt unter fast siebenfacher Volumenzunahme. Aufbeulungen der in Schuppen zerlegten Oberflächenschicht und Ausbildung von Magerzonen darunter sind deutliche Anzeichen dieses in Siedlungsgebieten vorkommenden Verwitterungskomplexes (siehe Taf. 1 Fig. 4).

Ebenso bedeutungsvoll ist das Vorkommen des aus der Verbrennung von Kunststoffen (z. B. Polyvinyl) stammenden HCl in der Atmosphäre. Die aus diesem Verwitterungsprozeß entstehenden $CaCl_2$-Salze bei gleichzeitiger Bildung von H_2CO_3 bedingen eine verstärkte Abwitterung bei Kalksteinen. Alle Gesteine mit $CaCO_3$ im Mineral oder im Porenzement unterliegen der Kalksteinverwitterung.

Damit werden die unter Sandsteinverwitterung fallenden Gesteine mineralogisch als Gefüge klassifiziert, die in der Hauptsache aus Quarzkörnern mit einem quarzitischen bzw. tonigen Bindemittel und aus tonigen Einlagerungen bestehen. Auf Grund der Zusammensetzung von verwitterungsunempfindlichen Mineralien, wie Quarz und dem Verwitterungsendprodukt Ton, tritt die chemische Verwitterung gegenüber der physikalischen in den Hintergrund. Dabei soll hier nicht geklärt werden, ob die Reaktion von Kieselsäure auf Tonerde (Kaolinbildung) zu den kolloidchemischen, also physikalischen oder zu rein chemischen Vorgängen zu zählen ist. Sandsteine unterliegen vornehmlich der Temperatur- und Frostverwitterung, der Salzsprengung und Hydratation sowie der Kapillarwirkung des Wassers.

Ähnliche Verwitterungsvorgänge spielen sich ebenfalls bei der Granitverwitterung ab, dessen Kernproblem jedoch eindeutig in der Verwitterung der Feldspäte und sonstigen Silikate zu sehen ist. Nach CORRENS (1939) greift z. B. die Kohlensäure Feldspat an, der sich in Ionen auflöst. Während die Alkalien in der Lösung beständig sind, werden Erdalkalien und auch das Eisen umlagerungsfähig,

ähnlich wie es unter der Kalksteinverwitterung beschrieben wurde. Wenig stabil sind Al- und Si-Ionen, die unlösliche Verbindung eingehen. Durch diese Vorgänge und die Auflösungsprozesse der Silikate durch Hydrolyse verwittern beim Granit bis auf die Restkomponente Quarz der Feldspat, Glimmer und die sonstigen Begleitminerale zu Ton. Typisches Beispiel für die chemische Verwitterung ist die Vergrusung der Granite.

e) Verwitterungserscheinungen sind komplexer Art. Ihr Erscheinungsbild hängt ab vom Gestein in bezug auf sein Gefüge und seine mineralogische Zusammensetzung, von der Gesteinsbearbeitung, der Verwendung und Aufstellung als Werkstück und den Verwitterungsfaktoren. Die Verwitterungsursachen nach Art und Intension ergeben sich aus den mikroklimatischen Verhältnissen im Verwitterungsbereich, sie sind also stark expositionsbedingt. Die Verwitterungsformen und -produkte können bei den gegebenen Kombinationsmöglichkeiten von Gesteins- wie von Verwitterungsfaktoren recht unterschiedlich erscheinen, sie finden jedoch letztlich in obigen Erläuterungen ihre allgemein gültige „Diagnose", aus der für die Denkmalspflege die notwendige „Therapie" der Gesteine und deren zweckmäßige Verwendung als Werkstoff abgeleitet werden kann.

Mit Hilfe von Kenntnissen über allgemeine Verwitterungsfaktoren läßt sich das wahrscheinliche Verhalten der Gesteine voraussagen. Dazu bedarf es sowohl der Feststellung der chemischen Werte (mineralogische Zusammensetzung) und der physikalisch-mechanischen Werte (Struktur, Textur, Druck- und Zugfestigkeit im trockenen und im wassersatten Zustand, effektive Porosität, Gefrierfestigkeit) der Gesteine als auch des Expositionsklimas am verbauten Werkstück.

Für die Beurteilung der Brauchbarkeit eines Gesteins als Werkstein sind die Untersuchungen und Beobachtungen der vielfachen Verwitterungserscheinungen an Bauten der verschiedenen Zeitalter eine besonders wertvolle Hilfe, zumal natürliche Verwitterungsvorgänge in ihrer zeitlichen Abfolge in Laboratoriumsversuchen nicht nachgemacht werden können.

Literatur

BARTH, T. V., CORRENS, C. W., & ESKOLA, P.: Die Entstehung der Gesteine. — 422 S., Berlin (Springer) 1939.

BEHREND, F., & BERG, G.: Chemische Geologie. — 595 S., 61 Abb., Stuttgart (Enke) 1927.

BLANCK, E.: Die Verwitterungslehre und ihre klimatologischen Grundlagen. — Handbuch der Bodenlehre Bd. 2, 148—297, 29 Abb., Berlin (Springer) 1929.

BLANCK, E., & RIESER, A.: Vergleichende Untersuchungen über die Verwitterung von Gesteinen unter abweichenden klimatischen Verhältnissen. — Chemie der Erde, **3**, 1928, 437—452, 1 Abb.

BLANCKENHORN, M.: Ägypten. — Handbuch der Regionalen Geologie, **7**, H. 9, 244 S., 3 Taf., 3 Abb., o. J.

CORRENS, C. W.: Einführung in die Mineralogie. — 414 S., 1 Taf., 405 Abb., Berlin — Göttingen — Heidelberg (Springer) 1949.

ENGELHARDT, W. v.: Der Porenraum der Sedimente. — 208 S., 83 Abb., Berlin — Göttingen — Heidelberg (Springer) 1960.

EUCKEN, A.: Grundriß der physikalischen Chemie. — 715 S., 189 Abb., 5. Aufl., Leipzig (Becker & Erler) 1942.

FREBOLD, G.: Fragen der Wetterbeständigkeit natürlicher Bausteine. — 92./93. Jber. naturhist. Ges. Hannover, 1942, 44—57, 3 Taf.

GEIGER, R.: Das Klima der bodennahen Luftschicht. — 646 S., 281 Abb., 4. Aufl. Braunschweig (Vieweg) 1961.

HÄBERLE, D.: Die gitter-, netz- und wabenförmige Verwitterung des Sandsteins. — Geol. Rdsch., **6,** 1915, 264—285, 2 Taf.

HIRSCHWALD, J.: Die bautechnisch verwertbaren Gesteinsvorkommen des Preußischen Staates und einiger Nachbargebiete. — 283 S., 1 Kt., Berlin (Borntraeger) 1910.

HIRSCHWALD, J.: Die Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihre Wetterbeständigkeit. — 675 S., 58 Taf., 133 Abb., Berlin (Ernst) 1908.

KELLER, G.: Verwitterungserscheinungen an Sandsteinen des Oberkarbons und die Verwendung der oberkarbonischen Ruhrsandsteine als Bausteine. — Geologie u. Bauwesen, **6,** 1935, 81—90.

KELLER, G.: Naturbausteine im Stadtbild Hannovers. — Jb. Techn. Hochschule Hannover 1955/58, 101—109, 17 Abb.

KIESLINGER, A.: Zerstörung an Steinbauten, ihre Ursachen und ihre Abwehr. — 346 S., 291 Abb., Leipzig und Wien (Deuticke) 1932.

KIESLINGER, A.: Gesteinsspannungen und ihre technischen Auswirkungen. — Z. dt. geol. Ges., **112,** 1960, 164—170, 4 Abb.

KNETSCH, G.: Beiträge zur Kenntnis von Krustenbildung. — Z. dt. geol. Ges., **89,** 1937, 177—192.

LINCK, G.: Über Schutzrinden. — Chemie der Erde, **4,** 1930, 67—69.

MORTENSEN, H.: Die Salzsprengung und ihre Bedeutung für die regionalklimatische Gliederung der Wüsten. Peterm. Mitt., **79,** 1933, S. 130.

POSER, H.: Das Problem des Strukturbodens. — Geol. Rdsch., **24,** 1933, 105—121.

SICKENBERG, O.: Die Lagerstätten Niedersachsens und ihre Bewirtschaftung, 1. Abt.-WiWiGe, N. F., **5,** 1951, 328 S., 81 Abb.

WALTHER, J.: Das Gesetz der Wüstenbildung in Gegenwart und Vorzeit. — 421 S., 203 Abb., 4. Aufl., Leipzig (Quelle & Meyer) 1924.

WILHELMY, H.: Klimamorphologie der Massengesteine. — 238 S., 137 Abb., Braunschweig (Westermann) 1958.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Berichte der Naturhistorischen Gesellschaft Hannover

Jahr/Year: 1968

Band/Volume: BH_5

Autor(en)/Author(s): Seeger Peter

Artikel/Article: Gesteinsverwitterung an Bauwerken 35-57