

19. Ein Beispiel schneller Bausteinzerstörung in Uppsala, Schweden

Von

Bengt Collini und Olle Wallner

ABSTRACT.—A case of rapid mechanical surface weathering on tombstones and grave-borders of a Bohus granite is described. The phenomenon is shown to be due to salt wedging caused by crystallization and recrystallization of magnesium sulfate in the pores of the surface layer of the stone. The high salt concentration of the pore solution is due to high temperature and long-lasting dry weather. Owing to differences in water absorption and water release capacity the granite blocks display different degrees of weathering damage. The formation of the weathering crust is favoured by a high water absorption and a high water release capacity.

Einleitung

Während des Sommers und Frühherbstes 1959 traten in Uppsala an Bausteinen eines besonderen Typs Anwitterungsschäden auf, die, soweit den Ver-

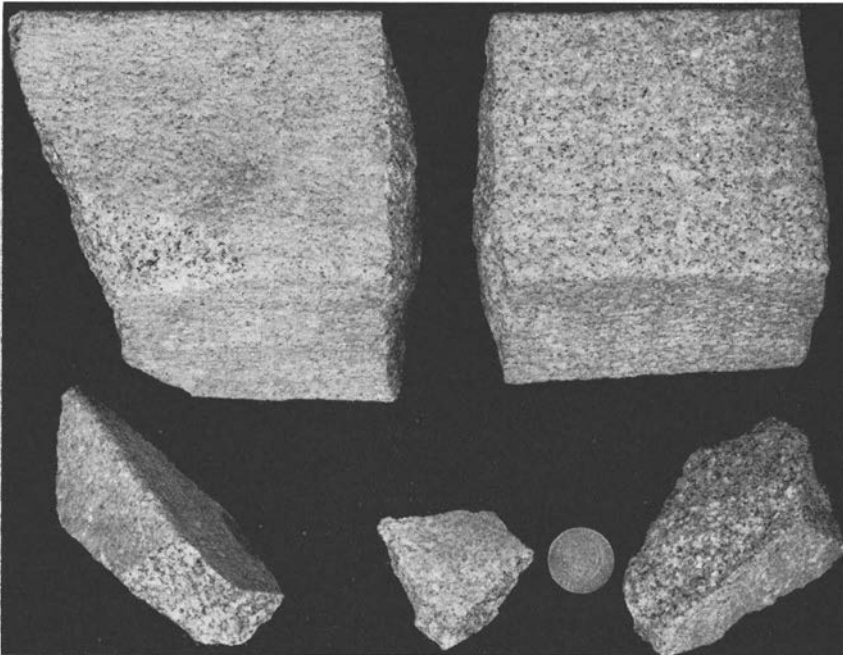


Abb. 1. Rechts oben: frischer Granit (sandgeblasener Fries aus dem alten Bruch). Übrige Handstücke: angewitterter Granit (sandgeblasener Fries aus dem neuen Bruch, Probe N₃).
Photo G. Andersson.

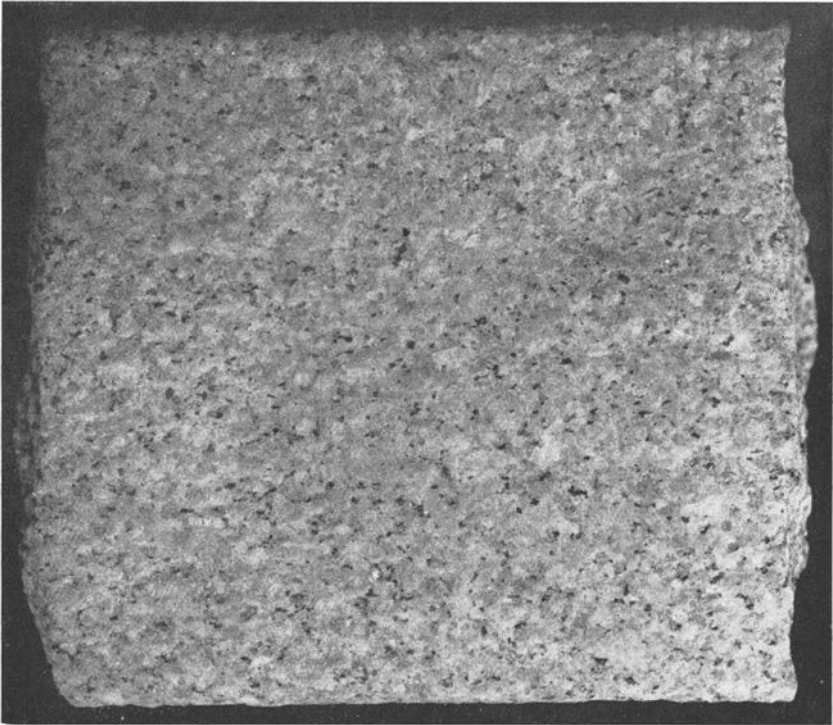


Abb. 2. Frische, sandgeblasene Oberfläche (dasselbe Stück wie in Abb. 1 rechts oben). Photo G. Andersson.

fassern bekannt, in Schweden nicht früher beschrieben worden sind. Der genannte Zeitraum war in Uppsala, wie in grossen Teilen des Landes, extrem warm und trocken. Ein Zusammenhang zwischen Wittertyp und Anwitterung konnte deshalb von vornherein angenommen werden, um so mehr, als angeblich das betreffende Gestein in Uppsala nie früher von ähnlichen Schäden betroffen worden ist.

Der aktuelle Baustein ist ein Bohusgranit aus der Gegend von Strömstad in Südwest-Schweden, der während einer Folge von Jahren in Uppsala hauptsächlich zur Herstellung von Grabdenkmälern und Grabfriesen angewandt worden ist. Der Rohstoff stammt aus zwei Steinbrüchen, dem „Alten“ und dem „Neuen Bruch“, die nahe beieinander gelegen sind. Angeblich wurde etwa zur Jahreswende 1958/59 der Abbau vom alten zum neuen Bruche verlegt.

Die Schäden äusserten sich in den gelindesten Fällen als ölartige Flecke, in den schwersten als graue-braungraue, tonartige Häute auf den Gesteinsflächen. Zwischen den beiden Typen konnten alle Übergänge beobachtet werden. Besonders verunzierend waren die Schäden an gesägten und nachträglich sandgeblasenen Flächen, während jene an maschinengemeisselten weniger hervortretend waren und sich im allgemeinen nur als mehr oder weniger dunkle,



Abb. 3. Angewitterte, sandgeblasene Oberflächen (die Handstücke sind auch in Abb. 1 abgebildet; Probe N₃). Photo G. Andersson.

auffallend langsam trocknende Flecke äusserten. Das Aussehen des frischen und des schwer angewitterten Gesteins wird in Abb. 1–3 gezeigt.

Bei Inspektion einer grossen Anzahl von Grabsteinen und Friesen konnte festgestellt werden, dass die Schäden hauptsächlich auf den Granit aus dem neuen Bruche begrenzt waren. Wenn ausnahmsweise auch am Granit vom alten Bruche auftretend, waren sie immer bedeutend gelinder. Die Schäden kommen sowohl an vertikalen als auf horizontal orientierten Gesteinsflächen vor. Besonders was die vorigen betrifft, lag in vielen Fällen ein deutlicher Zusammenhang mit aufsteigender Grundfeuchte vor. Als einzige Erklärung aber reicht dieser Umstand bei weitem nicht aus. Die Besichtigung zeigte weiter, das die Verbreitung der Schäden nicht in Verbindung mit den Vorkommen von Zementierungen oder Fugen gebracht werden konnte. Von grossem Interesse ist die Angabe der Inhaber der betreffenden Steinmetzwerkstatt, dass Grabsteine aus Granit vom neuen Bruche nach genauer Reinigung in vielen Fällen binnen wenigen Wochen wieder mit einer Verwitterungshaut überzogen waren.

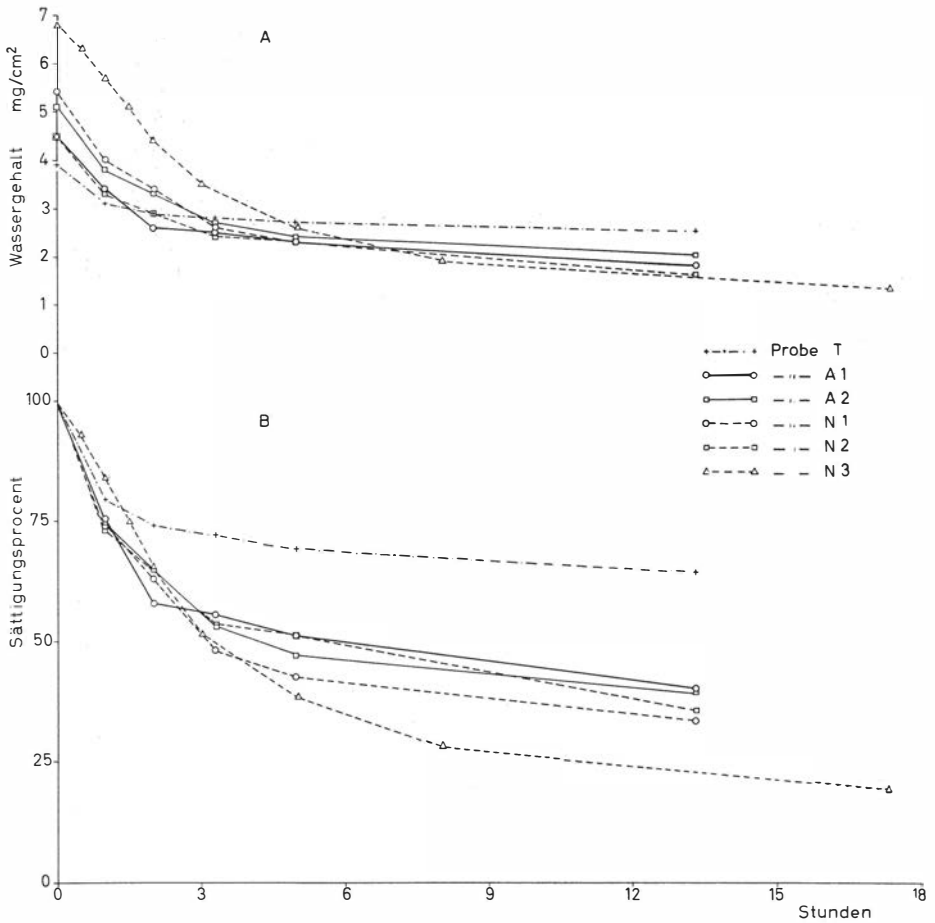


Abb. 4. Wasserabsorptionsverhältnisse der Sägeschnittflächen. A. Absoluter Wassergehalt in mg/cm². B. Relativer Wassergehalt als Sättigungsprozent.

Mikroskopische und Röntgenuntersuchung

Die Granite der beiden Steinbrüche sind mittelkörnige, graurote Bohusgranite (vgl. ASKLUND 1947, S. 60–61). Das Gestein aus dem neuen Bruche ist durch das Vorkommen von vereinzelt grösseren Mikroklinkristallen porphyrisch, während das aus dem alten Bruche als unscharf porphyrisch charakterisiert werden kann. Der Mineralbestand ist derselbe, nämlich hauptsächlich Quarz, Mikroklinperthit, Na-reicher Plagioklas, Biotit und etwas Muskovit. In Dünnschliffen waren keine Unterschiede zwischen den beiden Granittypen festzustellen, die dazu beitragen konnten, deren verschiedenartige Anwitterungsneigung zu erklären.

Material für die mineralogische Untersuchung der Anwitterungshaut wurde an einem Fries entnommen, der während des ganzen Sommers im Vorrat

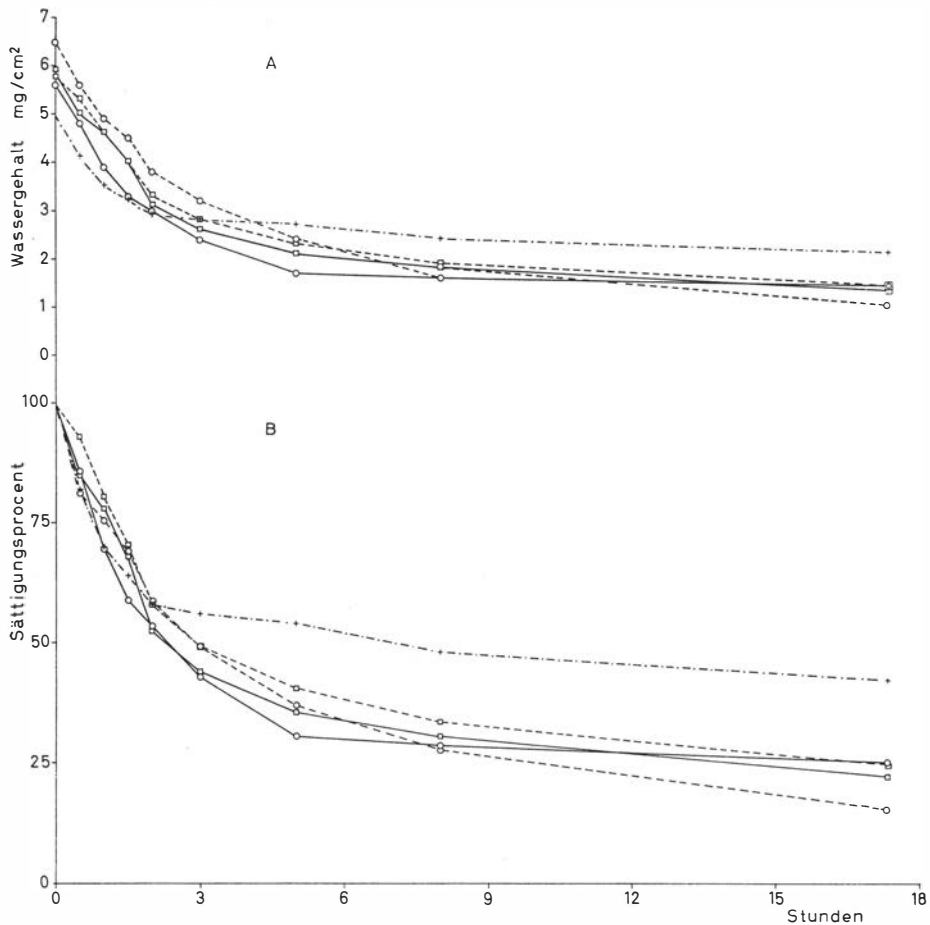


Abb. 5. Wasserabsorptionsverhältnisse der sandgeblasenen Sägeschnittflächen. A. Absoluter Wassergehalt in mg/cm². B. Relativer Wassergehalt als Sättigungsprocent. — Dieselben Bezeichnungen wie in Abb. 4.

liegen geblieben war, etwa ein Meter über dem Boden aufgestapelt, und der trotzdem schwere Schäden aufwies (Probe N₃; Abb. 1 und 3). Eine Pulveraufnahme gab denselben Mineralbestand wie das Muttergestein. Die 10 Å-Interferenz der Glimmer ist scharf. Keine sekundären Minerale wurden registriert, auch nicht im Dünnschliffe. Die Anwitterungshaut ist somit, soweit festgestellt werden kann, ein Produkt mechanischer Verwitterung. Anschliessend wurde auch ein wenig Anwitterungsmaterial in destilliertem Wasser gelaugt. In diesem konnten Mg²⁺-, SO₄²⁻- und Cl⁻-Ionen nachgewiesen werden, doch nicht Na⁺-Ionen.

Porositätsverhältnisse

Um die Ursache der verschiedenartigen Anwitterungsneigung beider Granit-typen zu ermitteln, wurden ihre Porositätsverhältnisse näher studiert, und

zwar durch Bestimmungen ihrer Wasseraufnahme- und Wasserabgabefähigkeit. Erstere wurde sowohl durch langsames Eintauchen der Probekörper in Wasser, als auch durch Kochen derselben in Wasser bestimmt (HAGERMAN 1943, S. 64–65; WALZ 1957, S. 160–162), letztere durch Trocknung der wassergetränkten Proben in Exsiccator über konzentrierter Schwefelsäure bei 20° (WALZ *o.c.*, S. 163). Aus technischen Gründen aber waren die Probekörper nicht zylindrisch sondern würfelig mit einer Kantenlänge von 3–5,5 cm. Die maximalen Wasserabsorptionswerte in Abb. 4 und 5 wurden mittels der Kochmethode ermittelt. Gegenüber den Ergebnissen der Eintauchmethode bestehen keine prinzipiellen Unterschiede.

Das Untersuchungsmaterial umfasste zwei Proben aus dem alten Bruche (G₁, G₂), drei aus dem neuen (N₁ und N₂ mit gelinderen Schäden als N₃) und, als Vergleichsmaterial, eine Probe von sog. Tanumgranit (T), einem anderen Typ des Bohusgranites, aus der Nähe von Hällevadsholm, südlich vom Klufort des ersteren. Das Probestück ist ein grauer Mikroklin-Plagioklas-Granit mit niedrigem Glimmergehalt und porphyrischer Ausbildung. Dieser Granit hat angeblich nie Anwitterungsschäden der beschriebenen Art aufgewiesen. Wenn die verschiedenartige Anwitterungsneigung überhaupt etwas mit den Porositätsverhältnissen zu tun hätte, sollten in dieser Hinsicht gewisse Unterschiede erwartet werden können, wenigstens zwischen dem Tanumgranit und dem schwer beschädigten Granit der Probe N₃. Mit Ausnahme von dieser wurden die Prüfkörper sowohl vor, als auch nach Behandlung der frischen Sägeschnittflächen mit Sandstrahlgebläse untersucht. Die Ergebnisse sind in Abb. 4 und 5 zusammengestellt. Auf der Abszisse ist die Trocknungszeit eingetragen, auf der Ordinate der Wassergehalt bzw. die Wassersättigung, angegeben in Prozent der respektiven höchsten Wassergehaltswerte.

Die Kurven zeigen viele interessante Einzelheiten. In Kürze können sie folgendermassen zusammengefasst werden. Die niedrigste maximale Wasserabsorption hat der Tanumgranit, die höchste die Probe N₃ (Abb. 4A und 5A), welche, wie oben genannt, die schwersten Schäden zeigte. Die Reihenfolge der zwischen den beiden Extremen fallenden Werte ist vor und nach dem Sandstrahlblasen etwas verschieden. Weiter ergibt sich, dass sandgeblasene Flächen (Abb. 5A) mehr Wasser absorbieren als Sägeschnittflächen (Abb. 4A) und bei der Wasserabgabe den höheren Wassergehalt während der ersten 2,5–3 Stunden behalten.

Auch was die Schlusswerte des Wassergehalts bei der Wasserabgabe betrifft, herrscht eine Gesetzmässigkeit (Abb. 4A und 5A). Die niedrigsten Werte geben Proben des neuen Bruches, den höchsten der Tanumgranit, also ein umgekehrtes Verhältnis gegenüber dem für die maximale Wasserabsorptionswerte beobachteten. Am deutlichsten ist dies für die nicht sandgeblasenen Flächen. Von Interesse ist weiter zu bemerken, dass das Sandstrahlblasen eine Senkung der Schlusswerte des Wassergehalts zur Folge hat, d. h. eine intensivere Austrocknung bedingt.

Das Verhältnis zwischen den Kurven der absoluten (Abb. 4 A und 5 A) und der relativen (Abb. 4 B und 5 B) Wassergehalte soll hier nur kurz erörtert werden. Auf der einen Seite bestätigten die Versuche, dass, wie von vornherein wohl angenommen werden konnte, der Farbenwechsel der Gesteine während der ersten 2–4 Stunden mit dem Fallen der absoluten Wassergehaltswerte parallel läuft: Zuerst wird der Tanumgranit hell, zuletzt die Proben N₃ und N₁ (nach dem Sandstrahlblasen). Auf der anderen Seite zeigen die Sättigungskurven am deutlichsten die sehr verschiedenen Reaktionsweisen bei Trocknung der untersuchten Gesteine. Hier soll nur auf ein für die Diskussion wichtiges Verhältnis hingewiesen werden. Der gesägte Tanumgranit behält nach mehr als 13 Stunden Trocknung noch etwa 65 % seines ursprünglichen maximalen Wassergehalts, während nach derselben Zeit z. B. die entsprechenden Werte der Proben N₁ und N₃ geringer als 35 bzw. 25 % sind. Durch das Sandstrahlblasen sinken die Sättigungsprozente, für den Tanumgranit und die Probe N₁ zu 45 bzw. 20. Es ist von Interesse zu erwähnen, dass in einem Versuch mit anhaltender Austrocknung, der Tanumgranit noch nach 85 Stunden eine 45 %ige Sättigung zeigte. Der entsprechende Wert für Probe N₁ ist etwa 10 %.

Diskussion

Eine Prüfung der oben angeführten Daten ergibt, dass die beschriebene Gesteinszerstörung durch Salzsprengung verursacht sein muss. Vor allem durch die Arbeiten von VON MOOS und DE QUERVAIN (1948), DE QUERVAIN (1945, 1949, 1957), DE QUERVAIN und JENNY (1951) und SCHMÖLZER (1936) sind das Auftreten und der Mechanismus dieser Erscheinung an Bausteinen in gemäßigtem Klima beleuchtet worden, überwiegend dabei an Beispielen sedimentärer Gesteine. Der Gesteinszerfall ist nach diesen Untersuchungen durch Aus- und Umkristallisation leicht löslicher Salze bedingt, vor allem Magnesium- und Natriumsulfate, die wegen ihrer Eigenschaft, mehr als eine Hydratstufe zu bilden, besonders zerstörend wirken. Das Sulfation stammt zum grössten Teil aus den Rauchgasen, die Kationen aus verschiedenen Gesteinsmineralien.

Im untersuchten Falle hängt der Gesteinszerfall offenbar von der Aus- und Umkristallisation des in den Poren der oberflächlichsten Teile der Granitblöcke vorkommenden Magnesiumsulfats ab. Die meteorologischen Voraussetzungen während des Sommers und Frühherbstes 1959 waren vom Gesichtspunkt der Bildungs- und Kristallisationsbedingungen der gesteinszerstörenden Salze optimal. Die Dürre und die hohe Temperatur verursachten eine hohe Salzkonzentration in der Porenlösung der oberflächlichsten Teile der Gesteinskörper, im Tau und in der aufsteigenden Grundfeuchte. Der Mangel an Regen verhinderte die Wegspülung der Salze und der von ihnen erzeugten Anwitterungsprodukte. Der Temperatur- und Feuchtigkeitswechsel — im letzten Falle hauptsächlich vom Tau bedingt — ermöglichte tägliche Auflösung, Aus- und Umkristallisation des Magnesiumsulfats.

Über die genannten Faktoren hinaus aber spielen im untersuchten Falle die Porositätsverhältnisse, und zwar die Wasserabsorptions- und Wasserabgabefähigkeit des Granits eine entscheidende Rolle. Aus den angeführten Daten geht deutlich hervor, dass ein, was die untersuchte Verwitterungsart betrifft, „ungefährlicher“ Baustein vom Typ Tanumgranit (Probe T), ein „gefährlicher“ vom Typ Probe N₃ sein sollte. Der erstere ist charakterisiert durch niedrige Absorptionsfähigkeit und grosses Vermögen, Wasser bei Trocknung zu behalten, der letztere durch das umgekehrte Verhältnis. Es ist folgender Zusammenhang einleuchtend: Je niedriger der Wassergehalt, desto intensiver ist die Ausscheidung von Magnesiumsulfatkristallen. Das Sandstrahlblasen verstärkt die „gefährlichen“ Eigenschaften des Gesteins, was von einer Änderung der Porositätsverhältnisse vor allem durch Rissbildung in den Mineralkörnern abhängen muss.

Es ist von Interesse zu notieren, dass der oben erwähnte Unterschied zwischen dem vom Anwitterungsgesichtspunkt „gefährlichen“ bzw. „ungefährlichen“ Typ von Granit gewissermassen umgekehrt, gegenüber dem für die Frostbeständigkeit der Gesteine festgestellten, ist. KREÜGER (1923) hat nämlich gefunden, dass dichte Materialien mit niedriger Wasserabgabefähigkeit *ceteris paribus* frostempfindlicher sind, als poröse mit grosser Wasserabgabefähigkeit.

Bezüglich der Porositätsverhältnisse ist der Granit vom neuen Bruche offenbar inhomogen. Was seine Anwendung als Baustein betrifft, wurde schon im Herbst 1959 vorausgesagt, dass die Gefahr des Auftretens von Anwitterungserscheinungen nur während längerer Trockenperioden bestände. Dieser Aussage lag, neben oben erwähnten Daten, auch ein Versuch zugrunde, in welchem ein sandgeblasenes Probestück vom neuen Bruche während etwa eines Monats tagsüber in Wärmeschrank bei 45–50° und nachtsüber im Freien verwahrt wurde. Schon nach kurzer Zeit trat ein Fleck auf, der aber zufolge der zunehmenden Herbstregen wieder verschwand. Eine Bestätigung im grösseren Masstabe wurde während des vergangenen Sommers erhalten, als die Anwitterungsschäden während der trockenen Zeit vor Mittsommer sehr auffallend waren, während sie für den übrigen Sommer und während des Frühherbstes, die sehr regnerisch waren, ganz fehlten.

In seiner Untersuchung der Verwitterungserscheinungen an den Bausteinen des Kölner Doms hebt KNETSCH (1952, S. 62) hervor, dass einige von diesen regional-klimatisch gesehen zu Trockengebieten und nicht zu Gebieten mit gemässigtem Klima gehören. Das ist der Fall auch mit dem oben beschriebenen Anwitterungstyp. Über sein Auftreten in der Natur unseres Landes ist bisher nichts bekannt geworden. An steilen Felswänden mit geringer Regenspeicherung dürfte er jedoch auch in nasseren Sommern vorkommen. Unter natürlichen Umständen dürfte seine Rolle darauf begrenzt sein, solche steile Flächen vom Porositätsgesichtspunkt geeigneter Gesteine aufzulockern und somit eine nachfolgende Kolonisation von Flechten und Moosen zu fördern.

Literatur

- ASKLUND, BROR, 1947: Svenska stenindustriområden I-II. Gatsten och kantsten. *Sverig. Geol. Unders.*, Ser. C, nr 479. Stockholm.
- HAGERMAN, TOR H., 1943: Om svenska bergarter och deras provning för konstruktionsändamål. *Stat. Provn.-anst.*, Medd. 85. Stockholm.
- KNETSCH, GEORG, 1952: Geologie am Kölner Dom. *Geol. Rdsch.*, Bd. 40: 1. Stuttgart.
- KREÜGER, H., 1923: Utredning rörande klimatisk inverkan på byggnadsfasader. *IVA. Handl.*, nr 24. Stockholm.
- MOOS, A. VON, u. QUERVAIN, F. DE, 1948: Technische Gesteinskunde. Basel.
- QUERVAIN, F. DE, 1945: Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz. Teil I. *Beitr. Geol. Schweiz. Geotechn. Ser.*, Lief. 23. Bern.
- 1949: Petrographie für den Ingenieur. In BENDEL, LUDWIG: Ingenieurgeologie. Wien.
- 1957: Prüfung der Wetterbeständigkeit der Gesteine. In Handbuch der Werkstoffprüfung, herausgeg. v. SIEBEL, ERICH. 2. Aufl., Bd. 3. Berlin.
- QUERVAIN, F. DE, u. JENNY, V., 1951: Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz. Teil II. *Beitr. Geol. Schweiz. Geotechn. Ser.*, Lief. 30. Bern.
- SCHMÖLZER, ANNEMARIE, 1936: Zur Entstehung der Verwitterungsskulpturen an Bausteinen. *Chem. d. Erde*, Bd. 10. Jena.
- WALZ, K., 1957: Bestimmung der Rohwichte (Raumgewicht), der Reinwichte (spezifisches Gewicht) und des Hohlraumgehalts der natürlichen Gesteine. In Handbuch der Werkstoffprüfung, herausgeg. v. SIEBEL, ERICH. 2. Aufl., Bd. 3. Berlin.