

BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ
KLEINERE MITTEILUNGEN

Nr. 69

**Auswirkungen einer Festigung von
Ostermundiger Sandstein mit
Kieselsäureester**

von

K. ZEHNDER und F. DE QUERVAIN

Vorwort der Schweizerischen Geotechnischen Kommission

Die vorliegende Arbeit wurde auf Anregung von Herrn Prof. F. de Quervain und mit Unterstützung der Schweizerischen Geotechnischen Kommission ausgeführt. Sie bildet einen interessanten Beitrag zur Frage der Konservierung eines wichtigen schweizerischen Bausteins. Die Kommission dankt beiden Autoren.

Für den Inhalt von Text und Figuren sind die Verfasser allein verantwortlich.

Zürich, April 1978.

Der Präsident der
Schweiz. Geotechnischen Kommission

V. TROMMSDORFF

Erscheint gleichzeitig in
„Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen“
Band 57, Heft 3, 1977

Auswirkungen einer Festigung von Ostermundiger Sandstein mit Kieselsäureester*)

Von *Konrad Zehnder* und *Francis de Quervain***)

Abstract

A calcite-cemented sandstone was treated with a silicone ester using several different techniques. In the laboratory some of its properties were measured in order to determine their variability as a function of weathering.

EINLEITUNG

Zum Thema *Steinkonservierung* möchte diese Mitteilung über eine Versuchsreihe informieren, die sich mit der künstlichen Verfestigung von Bernersandstein befasste.

Die Untersuchungen wurden im Auftrag der Schweizerischen Geotechnischen Kommission unter der Leitung von Prof. de Quervain an der ETH in Zürich durchgeführt.

Die früher weite Verbreitung des Bernersandsteins als Baumaterial – heute ist er vorwiegend an Gebäuden der Stadt Bern und ihrer Umgebung anzutreffen – hängt von seiner günstigen Gewinnung ab: Er ist bekannt als ein relativ weiches Gestein in homogenen und mächtigen Lagern; ebenso bekannt dürfte dem aufmerksamen Betrachter von Sandsteinbauten aber auch seine meist schlechte Verwitterungsresistenz sein (DE QUERVAIN, 1969). Bei der heutigen, durch Luftverschmutzung stark beschleunigten Verwitterung stellen sich damit der Erhaltung historischer Gebäude grosse Probleme.

Es geht nun um die Frage, mit welchen einfachen Mitteln der Bernersandstein bedeutend widerstandsfähiger gegen die Verwitterungseinflüsse gemacht werden kann.

Diese Versuchsreihe sollte im Sinn einer vorläufigen Untersuchung prüfen, inwiefern sich ein Kieselsäureester – es wurde ein Produkt der Firma Wacker-

*) Erscheint gleichzeitig als «Beiträge zur Geologie der Schweiz, Kleinere Mitteilungen Nr. 69».

**) Institut für Kristallographie und Petrographie, ETH-Zentrum, CH-8092 Zürich.

Chemie München gewählt, das unter der Bezeichnung «Sandsteinverfestiger OH» vertrieben wird – zur Behandlung von Bernersandstein eignet – oder zumindest: welche Auswirkungen dieses Produkt am Bernersandstein hat. Als gebrauchsfertige Lösung ist der Kieselsäureester mit einem leichtflüchtigen Lösungsmittel (Alkohol-Aceton) verdünnt.

VERSUCHE UND ERGEBNISSE

Als Probenmaterial diene ein Block Ostermündiger Sandstein der gelben Varietät; er wurde durch die Firma Schürmann AG in Bern in Würfel der Kantenlänge 4 cm geschnitten und dem Institut geliefert. Hier erfolgte die Behandlung der Proben durch Eintauchen in den flüssigen Festiger, wobei mehrmaliges Tränken in verschiedenen Abständen schliesslich fünf verschiedene Behandlungsstufen ergab. Wir unterscheiden damit sechs *Probenkategorien*:

- 0: unbehandelt
- 1: 1 Tränkung (in Kieselsäureester)
- 2k: 2 Tränkungen im Abstand von 2 Tagen
- 2l: 2 Tränkungen im Abstand von 1 Monat
- 3k: 3 Tränkungen im Abstand von je 2 Tagen
- 3l: 3 Tränkungen im Abstand von je 1 Monat

Mit verschiedenen *Prüfungen* sollten nun die Resultate dieser Behandlungsarten miteinander verglichen werden, um möglicherweise eine qualitative Aufächerung zu erhalten. Es waren dies im wesentlichen:

1. Verhalten bei der *Festiger-Aufnahme*: Gewichtsveränderungen
2. Bestimmung der *Porosität* im weiteren Sinn:
 - Absolute Porosität
 - Scheinbare Porosität, Wasseraufnahme
 - Porenvolumen-Porenradienverteilung in Teilbereichen des Würfels
3. *Druckfestigkeit*
4. *Kristallisierungsversuche*:
 - Tränkversuch
 - Aufsaugversuch

Ein detaillierter Bericht über die Versuche und die Zusammenhänge ihrer Resultate liegt bei der Schweizerischen Geotechnischen Kommission. Hier soll lediglich anhand einiger Besonderheiten auf charakteristische Auswirkungen der Behandlung hingewiesen werden.

Festiger-Aufnahme (Fig. 1): In den bei der Festiger-Aufnahme registrierten Gewichtsveränderungen kommt ein wesentlicher Unterschied zwischen der Behandlung in kurzen Abständen (2 Tage) und der Behandlung in langen Ab-

ständen (1 Monat) zum Ausdruck. Die nach einmonatigem Intervall getränkten Proben (3l) erreichen jeweils Sättigungswerte, die mit der ersten Tränkung vergleichbar sind, ihr Aufsaugvermögen ist demnach «normal». Bei kurzzeitigen Behandlungsintervallen (3k) spiegelt die bei jeder nachfolgenden Tränkung deutlich rückgängige Gewichtszunahme eine Verschlechterung der Saugfähigkeit wider; spätere Prüfungen liessen eine gleichzeitige Verstopfung der äusseren Poren vermuten (vgl. Fig. 2. – Diese Beobachtungen gelten für Trocknungsbedingungen bei Raumklima).

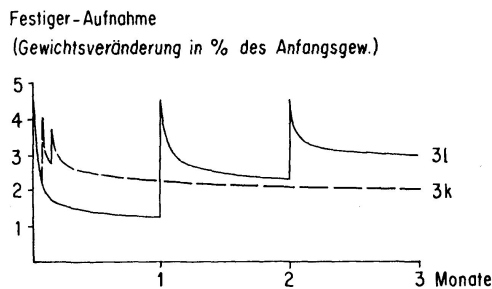


Fig. 1. Festiger-Aufnahmen der Kategorien 3k und 3l (schematisch).

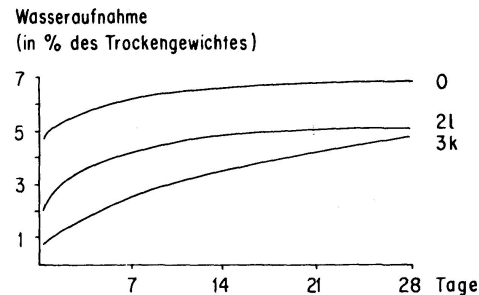


Fig. 2. Wasseraufnahmen der Kategorien 0, 2l und 3k (schematisch).

Wasseraufnahme (Fig. 2): Die zuvor während 6 bis 10 Monaten bei Raumklima gelagerten Proben entwickelten während der Wasseraufnahme einen deutlichen Geruch nach Lösungsmittel des Festigers. Offensichtlich war die Aushärtung nach dieser Zeitspanne noch unvollständig.

Die äusserst langsame Benetzung der behandelten Proben liess auf eine zumindest anfänglich wasserabstossende Wirkung des Festigers schliessen. (Sie ist nach Produktinformationen unerwartet und auch praktisch unerwünscht.)

Die scheinbare Porosität (aufgrund der Wasseraufnahme nach 28 Tagen) wird durch die Festiger-Aufnahme um den zwei- bis dreifachen Wert des absoluten Porenverlustes reduziert. Dies bedeutet eine teilweise Verstopfung der Porenverbindungen, sei sie durch Materialausfüllung oder den hydrophoben Effekt bedingt. Im speziellen ist der unterschiedliche Kurvenverlauf der Kategorien 2l und 3k bemerkenswert. 3k zeigt trotz ungefähr gleichem Festiger-Gehalt und gleicher scheinbarer Porosität eine viel langsamere Wasseraufnahme als 2l – ein mögliches Indiz für die relative Porenverstopfung in der Randzone bei kurzzeitigen Behandlungsintervallen.

Porenvolumen-Porenradienverteilung in Teilbereichen des Würfels: Aus dem Vergleich der Porenvolumen-Porenradienverteilungen bei unbehandelten und behandelten Proben geht u. a. hervor, dass bei allen Behandlungsarten und jeweils im ganzen Würfel ein mehr oder weniger ausgeprägter Porenverlust im Radienbereich 0,01–0,1 μm entsteht. Die genauere Interpretation dieser Erscheinung bleibt vorläufig noch offen. Sie lässt allgemein auf eine vollständige

Durchtränkung der Proben zumindest während der ersten Festiger-Behandlung schliessen.

Bei den Kategorien 1, 2l und 3l scheinen die im ganzen Würfel recht ähnlichen Kurven der Porenvolumen-Porenradienverteilung eine relativ homogene Verteilung des Festigers anzudeuten. 3k zeigt die deutlichste Zonierung von innen nach aussen mit einer verminderten Porosität in der Randzone.

Druckfestigkeit: Die Druckfestigkeit steigt entsprechend der Festiger-Aufnahme von rund 330 kg/cm² (1) bis 750 kg/cm² (3l). Dabei war nach Aushärtungszeiten zwischen 5 und 8 Monaten (Raumklima!) deren starker Einfluss auf die Druckfestigkeit der Proben bemerkenswert: Offenbar fand in diesen Zeiträumen eine unterschiedliche und teilweise recht unvollständige Reaktion des Festigers statt, so dass die Endfestigkeiten wohl über den angegebenen Werten liegen.

Tränkversuch (Fig. 3 und 4): Im Tränkversuch werden die Auswirkungen der Behandlung auf die praktische Verwitterungsresistenz am direktesten sichtbar.

Die Würfel werden alternierend während 4 Stunden in 10%iger Natriumsulfatlösung getränkt und anschliessend während 16 Stunden bei 100°C getrocknet (DE QUERVAIN und JENNY, 1951, modifiziert nach LUCKAT, 1975). Nach einer bestimmten Anzahl solcher Zyklen treten jeweils charakteristische Zerfallsstadien auf (DE QUERVAIN und JENNY, 1951).

Fig. 3 zeigt die verschiedenen Probenkategorien mit je einem typischen Zerfallsbild. Wir sehen daraus im einzelnen:

- 0: Das typische Zerfallsbild des Bernersandsteins: starkes Absanden übergehend in Abblättern zu rundlicher Form, schliesslich Zerfall des total gelockerten Gefüges nach 5 bis 6 Zyklen.
- 1: Ähnliches Zerfallsbild wie 0 nach 8 Zyklen.
- 2k: Gleichmässiges Absanden an Ecken, Kanten und Flächen. Gleichmässige Schalenbildung nach 16 Zyklen (angedeutet im Riss).
- 2l: Gegenüber 2k wesentlich erhöhte Resistenz (24 Zyklen). Dünne unregelmässige Schalenbildung bei teilweise angegriffenen Flächen.

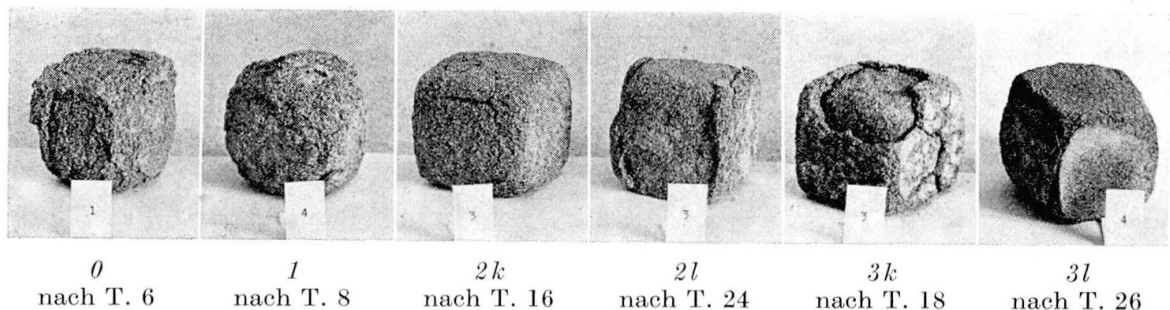


Fig. 3. Tränkversuch in 10%iger Natriumsulfatlösung. Typische Zerfallsbilder der verschiedenen Kategorien nach einer bestimmten Anzahl Tränkungen.

3k: Allgemeine Resistenz vergleichbar 2k (18 Zyklen). Ausgeprägte und gleichmässige Schalenbildung.

3l: Sehr gute Resistenz vergleichbar 2l (26 Zyklen). Angriffe vorwiegend von Ecken und Kanten ausgehend durch Absanden und Abbröckeln, schliesslich dünne Schalenbildung bei teilweise aufgerauhten Flächen.

Das Verwitterungsverhalten der Probe kommt neben dem äusseren Zerfallsbild im Materialverlust zum Ausdruck, der bei jeder Tränkung durch Absprengen einer äusseren Gesteinsschicht entsteht. Die in Abhängigkeit der Zyklenzahl aufsummierten Gewichtsverluste ergaben folgende Kurven (*Fig. 4*):

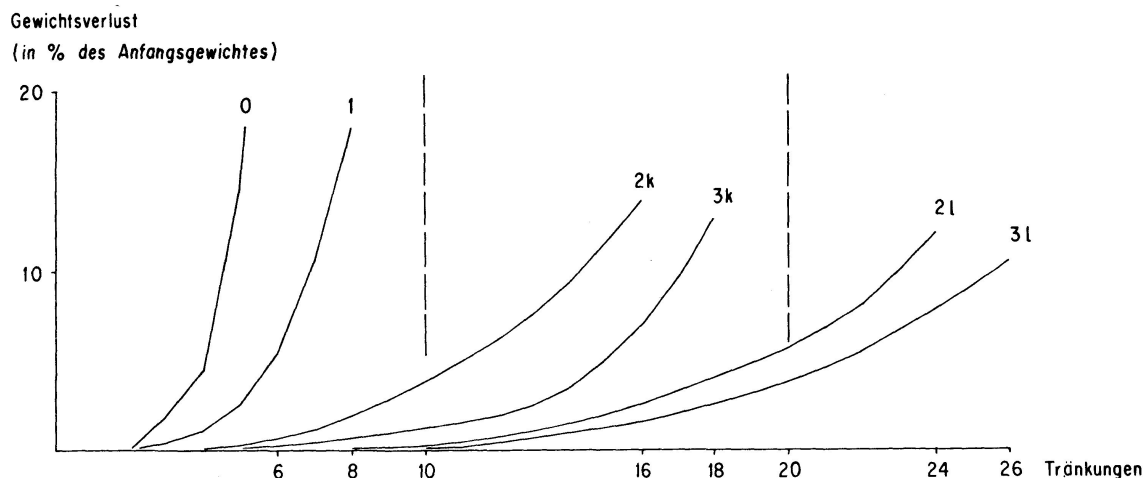


Fig. 4. Tränkversuch in 10%iger Natriumsulfatlösung. Typische Zerfallskurven der verschiedenen Kategorien (schematisch).

Fig. 4 lässt eine Aufgliederung der Kategorien nach ihrer Resistenz in drei Gruppen erkennen, die gleichzeitig das äussere Zerfallsbild prägt (vgl. *Fig. 3*):

- a) 0, 1: Kugelige Formen, Zerfall durch totale Lockerung vor *T. 10*.
- b) 2k, 3k: Gleichmässiges Absanden. Allseitige Schalenbildung vor *T. 20*.
- c) 2l, 3l: Angriffe vorwiegend auf Ecken und Kanten bei resistenten Flächen. Ungleichmässige Schalenbildung nach *T. 20*.

Allgemein fällt die durch verschiedene Behandlungsarten sehr unterschiedlich gesteigerte Resistenz im Salzsprengtest auf. Nach einmaliger Behandlung ist sie nur unwesentlich erhöht (a), nach zwei- bis dreimaliger Behandlung in langen Abständen jedoch wesentlich besser (c), insbesondere gegenüber gleicher Behandlungszahl in kurzen Abständen (b).

Indem der unbehandelte Bernersandstein vor allem durch Absanden zerfällt, kann der allgemeine Effekt der Behandlung unschwer als Tendenz zur Schalenbildung erkannt werden.

INTERPRETATION

Mit den Ergebnissen der Kristallisierungsversuche gelangen wir zur Interpretation der ganzen Versuchsreihe. Das Verhaltensmuster der verschiedenen Behandlungsarten, zu dem die erwähnten Beobachtungen hinführen, kann vorerst natürlich nur unter den angewandten Versuchsbedingungen gültig sein – das heisst bei Voraussetzungen, die am Bauwerk selten erfüllt sind. Erfahrungen mit analogen Versuchen zeigen aber, dass charakteristische Versuchstendenzen sehr oft im grösseren Rahmen am Bauwerk wiederzufinden sind, obwohl dort viel langsamere und komplexere Prozesse spielen (DE QUERVAIN und JENNY, 1951).

Im Tränkversuch verhielt sich der behandelte Bernersandstein mehr oder weniger ausgeprägt schalenbildend. Da besonders granitische Sandsteine (aquitaner Sandstein der subalpinen Molasse) das Phänomen der Schalenbildung im Versuch und am Bauwerk sehr häufig zeigen (DE QUERVAIN, 1945; DE QUERVAIN und JENNY, 1951), liegt es nahe, für den gefestigten Bernersandstein ein praktisches Verhalten ähnlich demjenigen des granitischen Sandsteins zu vermuten. Merkwürdig ist in diesem Zusammenhang die Tatsache, dass der behandelte Bernersandstein auch in Porosität und Festigkeit in die Nähe des granitischen Sandsteins rückt.

Die wichtigsten Ergebnisse – sie sind provisorisch aufzufassen und bedürfen vor allem einer breiteren Versuchszahl – werden nochmals zusammengefasst:

- Unvollständige Reaktion des Festigers nach 6 Monaten.
- Scheinbarer Porositätsverlust grösser als Verlust an totalem Porenvolumen.
- Bei kurzzeitigen Behandlungsintervallen (2 Tage) Verstopfung der äusseren Poren.
- Bei langzeitigen Behandlungsintervallen (1 Monat) relativ gleichmässige Verteilung des Festigers.
- Verwitterungsresistenz aufgrund des Tränkversuches:
 - Nach 1 Behandlung: unwesentlich erhöht, starkes Absanden ähnlich unbehandeltem Stein;
 - nach 2 bis 3 Behandlungen in kurzen Abständen (2 Tage): erhöht, starke Neigung zu Schalenbildung;
 - nach 2 bis 3 Behandlungen in langen Abständen (1 Monat): wesentlich erhöht, Neigung zu Schalenbildung.

Diskussionsbeitrag

Bei der Diskussion wurde u. a. darauf hingewiesen, dass künstliche Verfestigungen meist an bereits verwittertem Gestein vorgenommen würden, dessen Gefüge mehr oder weniger stark gelockert sei. So könnte im günstigsten

Fall die durch Verwitterung erweiterte Porosität nach der Festigung wieder auf ein Volumen reduziert sein, das dem unbehandelten, frischen Stein entspricht. Diese Möglichkeit ist bei geeigneter Behandlung gewiss denkbar, wodurch die negativen Folgen des Porenverschlusses abgeschwächt würden.

Dank

Folgenden Personen sei ihre Mithilfe an dieser Arbeit speziell verdankt:

Herrn Dr. Arnold, ETH, für zahlreiche Anregungen und die Durchsicht des Manuskriptes;
Fräulein Jenny, Schweizerische Geotechnische Kommission, für die Mitarbeit während der ganzen Versuchsreihe;

Herrn Dr. Kahr, ETH, für Mithilfe und die rechnerische Auswertung bei den Druckporosimeter-Messungen;

Herrn Krebs, EMPA, für die Bestimmung der Druckfestigkeiten;

Herrn Schärli und Herrn Willi, ETH, für die Herstellung von Dünnschliffen;

Herrn Wägli, ETH, für die Herstellung von Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen.

Literatur

1. DE QUERVAIN, F. (1945): Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz. – Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser. 23.
2. DE QUERVAIN, F. und V. JENNY (1951): Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz, Teil II. Versuche über das Verhalten leicht löslicher Salze zur Aufstellung einer allgemeinen Prüfmethode über die Wetterbeständigkeit. – Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser. 30.
3. DE QUERVAIN, F. (1969): Die nutzbaren Gesteine der Schweiz. – Kümmerli und Frey, Bern.
4. LUCKAT, S. (1975): Die Einwirkung von Luftverunreinigungen auf die Bausubstanz des Kölner Domes, III. – Kölner Domblatt 40, 75–108.

Manuskript eingegangen am 31. Oktober 1977.