

BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ  
GEOTECHNISCHE SERIE  
KLEINERE MITTEILUNGEN

Nr. 14

Versuche zur Deutung  
der Einwirkung leicht löslicher Salze  
auf Gesteine

von

F. de QUERVAIN

unter Mitarbeit von

V. JENNY

---

BUCHDRUCKEREI AG. GEBR. LEEMANN & CO. ZÜRICH 2  
KOMMISSIONSVERLAG: KÜMMERLY & FREY, BERN

1948

## Vorwort der Geotechnischen Kommission

Die nachstehende Abhandlung „Versuche zur Deutung der Einwirkung leicht löslicher Salze auf Gesteine“ von F. de Quervain unter Mitarbeit von V. Jenny stellt ein Teilergebnis von größeren Versuchsreihen über die physikalischen und chemischen Vorgänge bei der Verwitterung natürlicher und künstlicher steinartiger Baustoffe dar. Die Darstellung der gesamten Ergebnisse ist als Teil II von „F. de Quervain: Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz (Lieferung 23 der Beiträge, 1945)“ vorgesehen, dessen Herausgabe aber umständehalber noch etwas hinausgeschoben werden muß. Die Untersuchungen wurden in hohem Maße unterstützt durch eine Zuwendung der Eidg. Volkswirtschaftsstiftung. Ihr sei auch seitens der Geotechnischen Kommission der beste Dank ausgesprochen.

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

Zürich, den 21. Juni 1948.

Für die Geotechnische Kommission der S. N. G.

Der Präsident: Prof. Dr. P. Niggli

Der Aktuar: Dr. F. de Quervain

# Versuche zur Deutung der Einwirkung leicht löslicher Salze auf Gesteine

Von *F. de Quervain*, Zürich

Mitarbeit: *V. Jenny*

Im Zusammenhang mit systematischen Untersuchungen über das Verhalten schweizerischer Bausteine gegenüber den Einwirkungen löslicher Salze, wie sie an Bauwerken auftreten, wurde auch den Beziehungen der im Experiment festgestellten verschiedenartigen Zerfallsformen zu den Salzanreicherungen im Gestein Beachtung geschenkt. Über einige Ergebnisse wird nachfolgend kurz berichtet. Eine Darstellung der gesamten Versuche und eine eingehendere Diskussion ist für die „Beiträge zur Geologie der Schweiz, geotechnische Serie“ vorgesehen. Die Untersuchungen, ausgeführt an der Geotechnischen Prüfstelle des Mineralogisch-Petrographischen Institutes der E. T. H. und der E. M. P. A., wurden durch eine verdankenswerte Zuwendung der Eidgenössischen Volkswirtschaftsstiftung ermöglicht. Die technischen und chemischen Bestimmungen wurden durch Fräulein V. JENNY ausgeführt, der für ihre sorgfältige Arbeit bestens gedankt sei.

## 1. Versuchsanordnung

Für die Ermittlungen der Salzeinwirkungen auf Gesteine wurden an Probekörpern mit Salzlösungen Tränk- und Aufsaugversuche verschiedener Art durchgeführt. Diese Mitteilung behandelt nur Tränkversuche. Als Versuchsgesteine wurden fein- bis mittelkörnige, homogene, fast schichtungsfreie Sandsteine der Molasse von verschiedener Porosität und Festigkeit gewählt (Tabelle 1). Molassesandsteine sind durch ihr gleichmässiges, sehr feines Porennetz für solche Laboratoriumsuntersuchungen besonders gut geeignet. An Gesteinen mit groben, oder unregelmässig angeordneten Poren (bei grobkörnigen Strukturen oder schichtigen, lagigen oder geschieferten Texturen), Rissbildungen, Tonhäuten usw. lassen sich Gesetzmässigkeiten schwerer feststellen, auch Betonproben sind ungünstiger.

Tabelle 1

*Technische Daten der verwendeten Sandsteine der Molasse*

Gestein	Spez. Gew.	Raum-Gew.	Absolute Porosität %	Wasseraufnahme		Scheinb. Porosität bezogen auf Wasseraufnahme	
				Total %	24h %	Total %	24h %
A	2,70	2,64	2,2	0,73	0,58	1,9	1,5
B	2,69	2,52	6,3	2,31	1,53	5,8	3,8
C <sub>1</sub>	2,65	2,21	16,5	6,26	5,52	13,8	12,2
C <sub>2</sub>	2,65	2,23	15,8	6,50	5,56	14,5	12,4
C <sub>3</sub>	2,65	2,12	20,0	7,50	6,47	15,9	13,7
C <sub>4</sub>	2,65	2,13	19,6	7,95	6,81	16,9	14,5

- A Sandstein, feldspatreich, mit kalkigem Bindemittel, mittel- bis feinkörnig. Übergang granitischer Sandstein zu kalkreichem Sandstein, Aquitan bis Stampien der subalpiner Zone. Druckfestigkeit (trocken) nach ähnlichen Proben des gleichen Bruches um 1500 kg/cm<sup>2</sup>.
- B Sandstein, feldspatreich, mit spärlichem kalkigem Bindemittel, sehr feinkörnig, homogen. Typischer feinkörniger granitischer Sandstein, Aquitan der subalpiner Zone. Druckfestigkeit (trocken) nach analogen Proben um 800 kg/cm<sup>2</sup>, nass etwa 70–80 % der Trockenfestigkeit.
- C<sub>1–4</sub> Sandsteine, petrographisch sehr ähnlich, Porenfüllmasse kalkig, z. T. auch pelitisch, fein- bis mittelkörnig, homogen. Marine Molasse der flachen Region, sog. Bernertypus, Burdigalien. Druckfestigkeit trocken nach analogen Proben 240–320 kg/cm<sup>2</sup>, nass etwa 50–60 % der Trockenfestigkeit.

Die Tränkungen wurden einerseits mit dem in Zürich an Bauwerken oft festgestellten Natriumsulfat ausgeführt, daneben auch mit Magnesiumsulfat, Calciumsulfat und Natriumchlorid (alles ebenfalls wichtige Ausblühungssalze an städtischen Mauern), die, wie zu erwarten, z. T. analoge, z. T. wesentlich abweichende Verhältnisse der Anreicherungen und Einwirkungen zeigen. Hier werden nur die Versuche mit Natriumsulfat besprochen.

Bekanntlich löst wiederholte Natriumsulfat-Tränkung bei Gesteinen und künstlichen steinartigen Materialien (Kunststein, Beton, Backstein usw.) einen relativ rasch verlaufenden Zerfall aus. Natriumsulfat wurde deshalb als Standardsalz für den „Kristallisierungsversuch“ nach BRARD gewählt. Die Einwirkung wird zur Hauptsache darauf zurückgeführt, dass sich aus Lösung unterhalb 32° Glaubersalz (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> · 10 H<sub>2</sub>O, Molekulargewicht 322, Molekularvolumen 220,5) ausscheidet, das sich in trockener Luft schon unter 32° in das wasserfreie Salz (als Mineral Thenardit genannt (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), Molekulargewicht 142, Molekularvolumen 53,5) umwandelt. Bei Wasserzutritt bildet sich wieder Glaubersalz, unter Wärmeabgabe (pro Mol 18,8 kcal), resp. Druckwirkung. Für Näheres über die physikalisch-chemischen Verhältnisse muss auf die Literatur (z. B. 3, 7) verwiesen werden.

Die Lagerung der würfelförmigen Probekörper (meist von 7 cm, vereinzelt von 8 oder 10 cm Kantenlänge) in der Lösung dauerte mit wenig Ausnahmen 24 Stunden; für die Trocknung wurde meist 100° gewählt (24 Stunden), daneben auch 150°, 50° und Zimmertemperatur (16°, Dauer 6 Tage). Mit 24-stündiger Tränkung wird um 85—90 % der totalen Sättigung erreicht, eine 24-stündige Lagerung im Trockenschrank bei 100° vermag den Stein auf einen Feuchtigkeitsgehalt zu bringen, der nicht stark vom lufttrockenen abweicht. Die Temperatur von 100° erzeugt in den verwendeten Sandsteinen sicher keine irreversiblen Veränderungen<sup>1)</sup>. Die Schwankungen der

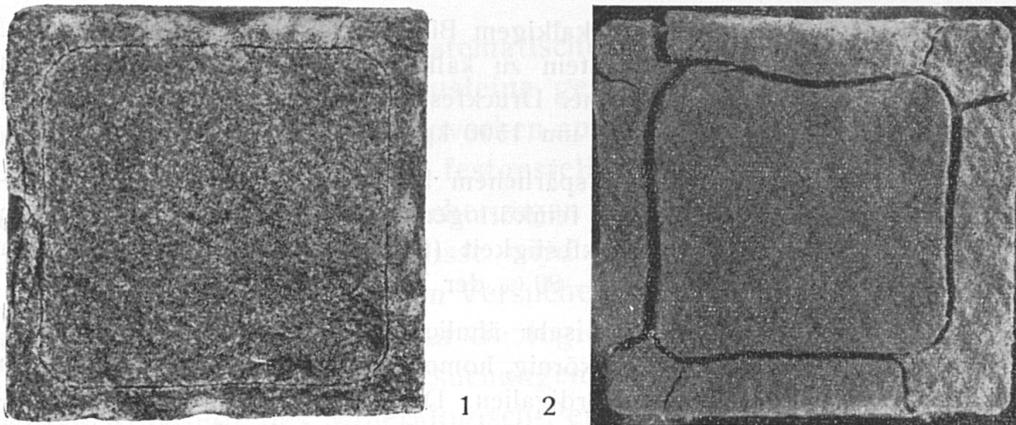


Fig. 1 und 2. Nach 10 Tränkungen (10 % Natriumsulfat) in der Lösung sichtbar erfolgte plötzliche Schalenablösung an Sandsteinen vom Typus B (Näheres siehe Text). Fig. 1. Anfangsstadium bei relativ dünner Schale (24 h Lösungslagerung, erste Rissbildung bereits nach  $\frac{1}{4}$  h). Fig. 2. Endstadium bei dicker Schale (erreicht bereits nach 24 h, erste Rissbildung ebenfalls nach  $\frac{1}{4}$  h)

Lösungstemperaturen entsprechend den Raumtemperaturen von etwa 15—22° sind von keinem wesentlichen Einfluss auf die sichtbare Zerfallsgeschwindigkeit der Gesteine, obwohl bei Natriumsulfat die Löslichkeit sehr temperaturabhängig ist (so ist z. B. bei 10° eine 8 %ige Lösung gesättigt, bei 20° erst eine ca. 16 %ige). Auch die verschiedene Luftfeuchtigkeit im Trockenschrank, dadurch verursacht, dass eine unterschiedliche Zahl von Proben gleichzeitig getrocknet wurde, ist von geringerem Einfluss als erwartet wurde.

Nach dem Auftreten eines charakteristischen Zerfallsstadiums wurden Probesplitter aus verschiedenen Bereichen des Steines ent-

<sup>1)</sup> Probekörper der Sandsteine B und C zeigten nach 200 Tränkungen in Wasser (kalkhaltiges Leitungswasser oder destilliertes Wasser) und Trocknungen bei 100° (je 24 Stunden) keine äusserlichen Veränderungen.

Tabelle 2. Ergebnisse der Tränkversuche mit Natriumsulfatlösung

Nr.	Gestein	Konzentration	Trocknung	Veränderung	nach Tränk.	Gehalt der Probe (Gew. %) an $\text{Na}_2\text{SO}_4$ (bestimmt)			Relative Salzanreicherung im Stein bezogen auf Konzentration der Lösung = 1			Porenfüllung von $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ in % des Gesteinsvolumens					
						(berechnet)			RZ	MZ	Z	RZ	MZ	Z	RZ	MZ	Z
						RZ	MZ	Z	RZ	MZ	Z	RZ	MZ	Z	RZ	MZ	Z
1	A	10%	100°	Schale 5 mm	23	0,62	0,40	0,04	10,6	6,9	0,7	2,5	1,6	0,1			
2	B	10%	100°	Schale 10 mm	10	1,40	0,90	0,09	7,3	5,1	0,6	4,3	3,0	0,3			
3	B	10%	100°	Schale 10 mm	9	1,12	0,78	0,09	5,8	13,7	1,9	3,4	8,0	1,1			
4	B	10%	150°	Schale 12-16 mm	8	2,04	1,77	0,20	6,8	13,2	3,4	4,0	7,8	2,0			
5	B	10%	50°	Schale 12-15 mm	11	0,90	2,10	0,30	6,8	5,3	2,0	4,0	3,1	1,2			
6	B	10%	6 Tage	Schale 4 mm	11	2,04	4,76	0,68	7,8	12,8	2,2	4,7	7,7	1,3			
7	C <sub>s</sub>	10%	100°	Schale	4	1,04	0,81	0,31	5	4,2	3,4	10,4	8,7	7,1			
8	C <sub>2</sub>	10%	100°	Absanden	5	2,72	4,38	0,77	9,4		1,9	17,7		3,7			
9	C <sub>1</sub>	10%	150°	Schale u. Risse	4	3,2	2,7	2,2	5,7	4,0	3,2	10,6	7,5	6,1			
10	B	1%	100°	Risse	31	7,26	6,12	4,99	24	26	30	1,5	1,5	1,8			
11	C <sub>3</sub>	1%	100°	Risse Absanden	13	5,20	1,09	2,47	2,4	1,5	1,7	5,8	3,2	3,6			
12	B	1/4%	100°	Risse	87	3,15	2,23	1,80	7,9	126	207	0,1	1,8	3,0			
13	C <sub>4</sub>	1/4%	100°	Risse	25	7,15	5,06	4,08	16	32	66	0,9	1,8	3,6			
14	C <sub>3</sub>	1/4%	100°	Risse	13	0,38	0,40	0,46	3,1	1,8	23	0,2	0,1	1,2			
						0,86	0,91	1,04									
						1,59	1,00	1,11									
						4,06	2,27	2,51									
						0,03	0,48	0,79									
						0,07	1,08	1,79									
						0,27	0,55	1,12									
						0,61	1,24	2,54									
						0,05	0,03	0,38									
						0,11	0,06	0,86									

RZ = Randzone MZ = Mittlere Zone Z = Zentrum

nommen und chemisch auf  $\text{SO}_4$  untersucht. Als Bereiche wurden gewählt: ca. 0–10 mm vom Rand (bei erkennbarer Schalenbildung bis zum Riss), ca. 10–20 mm und die zentrale Partie des Würfels. Teilweise wurde auch die Veränderung des Salzgehaltes im Randbereich während des Versuches verfolgt. Die abgeschlagenen Splitter hatten natürlich jeweils etwas abweichende Grössen und Formen, was eine gewisse Streuung der Analysenwerte zur Folge hat.

## 2. Die Zerfallsformen der Sandsteine

Nach einer je nach Sandsteinart und Versuchsbedingungen sehr unterschiedlichen Zahl von Tränkungen (3 bis 87) zeigten die Proben (ausser den in Tabelle 2 aufgeführten noch viele weitere, die chemisch nicht untersucht wurden) folgende typischen, meist ohne weiteres reproduzierbaren Veränderungen:

**Schalenbildung.** Allseitige Trennung einer wechselnd dicken (ca. 4 bis 15 mm, abhängig von den Trocknungsbedingungen) Gesteinsschale (Dimensionen bei einem Versuch meist ziemlich gleichmässig mit Ausnahme der Lagerfläche im Trockenschrank) vom Gesteinsinnern, meist unter Rissbildung parallel den Kanten (Fig. 2, 3).

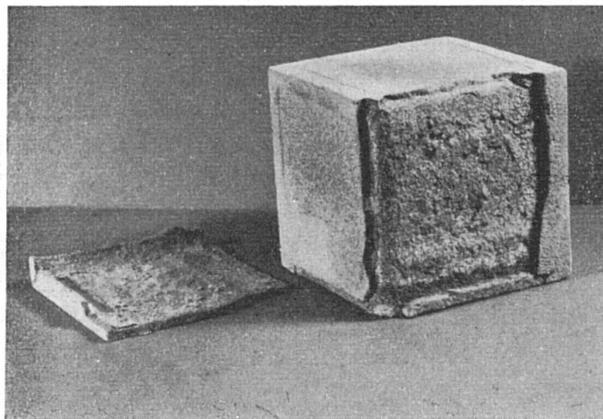


Fig. 3. Schalenablösung nach 11maliger Tränkung in Natriumsulfatlösung (10 %) und Trocknung an Luft (Versuch Nr. 6, Tabelle 2). Steinoberfläche und Schalenriss sind mit ausblühendem Salz bedeckt

**Rissbildung nicht parallel den Kanten.** Entweder vereinzelte ziemlich unregelmässige Risse zur Hauptsache senkrecht zu den Kanten (Fig. 5, 9), oder aber sehr charakteristische Diagonalrisse auf den Würfelflächen (Fig. 4, 7).

**Absandung.** Oberflächlicher Zerfall in Einzelkörner, von Ecken und Kanten ausgehend unter Rundung und Verkleinerung der Probe (Fig. 6). Oft lösen sich auch mehr blattartige Kornhaufwerke (**Abblätterung**) vom Stein.

Diese drei Hauptformen können zur Hauptsache für sich allein gefunden werden, oder aber auch kombiniert, z. B. Absandung mit Schalen, oder Diagonalrisse (bis ins Zentrum) mit äusserer Schalenbildung (Fig. 7).

### 3. Der Vorgang des Gesteinszerfalles

Beim Natriumsulfatversuch erfolgt die Hauptveränderung der Proben unzweifelhaft in der Lösung. Hier lassen sich die Zerfallsvorgänge oft gut von Auge verfolgen. Das Absanden beginnt meist rasch nach dem Eintauchen und hört nach kurzer Zeit auf. Bei bereits angerundeten Proben der Sandsteine C löst sich oft rasch ein Blatt nach dem andern und zerfällt in einzelne Sandkörner. Mit etwas Glück kann auch eine plötzliche Rissbildung, sogar ein völliges Zerspringen des Steines in der Lösung beobachtet werden. Eine Schalenablösung lässt sich am sichersten auf folgende Weise von Auge verfolgen: Die getrocknete Würfelprobe, an der sich nach den Ergebnissen von Vorversuchen bei der nächsten Tränkung Schalen ausbilden werden (beim Sandstein B ist dies z. B. nach 9 Tränkungen der Fall), wird zur Freilegung einer Innenfläche gespalten (mit Hammer und Meissel). Auf dieser Bruchfläche lassen sich gegenüber einer unbehandelten Probe keine sichtbaren Veränderungen erkennen, jede Andeutung einer Schalenbildung (Risse, Lockerungszone, Festigkeitsverminderung) fehlt. Wird der zerteilte Stein mit der Bruchfläche nach oben in die Lösung gelegt, so kann man beobachten, wie nach etwas unterschiedlicher Zeit ein ganz feiner Riss parallel den Seitenflächen entsteht (an den Ecken resp. Würfelkanten meist schön gebogen), der sich allmählich (im Verlaufe von Stunden) auf mehrere mm erweitert, allseitig eine Schale abtrennend, die meist da wo die Eckenkrümmungen beginnen, aufreißt (Fig. 1, 2). Neben diesen sichtbaren Rissen parallel den Seitenflächen bildet sich natürlich auch ein solcher parallel der Unterfläche des Würfels aus. Auch wenn die vor dem Eintauchen erzeugte Trennfläche nur wenige mm innerhalb eines vorbestimmten (aber noch durch nichts sichtbaren) Schalenrisses liegt, so bildet sich dieser nach der Tränkung in gleicher Weise aus, es wird dann gewissermassen diese mm dicke Gesteinshaut von der Schale abgesprengt.

Veränderungen während des Trocknens der Proben konnten bei diesen Versuchen nicht beobachtet werden, wohl aber bei solchen mit andern Salzen.

#### 4. Lösungskonzentration und Salzanreicherung im Stein

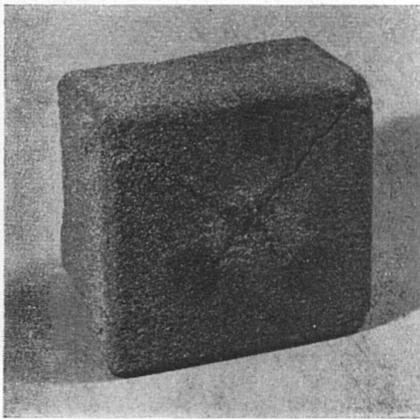
Die chemischen Bestimmungen (Tabelle 2, 3) zeigen unzweifelhaft, dass im Verlaufe der wiederholten Tränkungen und Trocknungen die Salze sich im Stein anreichern. Bei geringer Lösungskonzentration findet eine Anreicherung (bei grosser Tränkungsanzahl) bis über das 200fache statt, bei hoher Konzentration nur bis zum 10fachen, da dann der Porenraum des Gesteins meist völlig besetzt ist, resp. die Probe zerfällt. Eine 24-stündige Lagerung in Lösung vermag ganz offensichtlich in den Gesteinsporen dieser Sandsteine keine erhebliche Salzwanderung durch Diffusion herbeizuführen, wodurch sich das Konzentrationsgefälle ausgleichen könnte.

Tabelle 3. *Veränderung des Sulfatgehaltes der Randzone im Verlauf der Tränkung*

	nach Tränkung	$\text{Na}_2\text{SO}_4$ $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ Gew. %		nach Tränkung	$\text{Na}_2\text{SO}_4$ $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ Gew. %
Gestein A	5	0,23	Gestein B	2	0,42
Lösg. 10%		0,52	Lösg. 10%		0,95
(Nr. 1)	10	0,32	(Nr. 2)	4	0,55
	15	0,72		6	1,24
	20	0,42		8	0,70
	23	0,95		10	1,58
		0,57			0,78
		1,29			1,77
		0,62			1,12
		1,40			2,54
Gestein B	10	0,13	Gestein C <sub>3</sub>	5	0,13
Lösg. 1/4%		0,29	Lösg. 1/4%		0,29
(Nr. 12)	30	0,06	(Nr. 14)	10	0,11
	50	0,13		13	0,24
		0,18			0,05
		0,40			0,11
	87	0,03			
		0,07			

Weiter ergeben die Versuche, dass bei hoher Lösungskonzentration (10 % Salz) beim Trocknen das Sulfat sich in den Randpartien der Würfel anreichert, am ausgesprochensten bei den Sandsteinen mit geringerer Porosität. Bei den Trocknungen bei höherer Tempe-

ratur ( $150-50^{\circ}$ ) wurden auf der Oberfläche nie Ausblühungen bemerkt, beim Versuch Nr. 6 bei  $16^{\circ}$  bedeckte sich der Würfel aber ganz mit weissem Salz (Fig. 3). Bei geringer Lösungskonzentration ( $< 1\%$ ) findet eine sehr starke relative Anreicherung im Zentrum der Proben statt. Verschiedentlich wurde auch unmittelbar innerhalb der Schale die grösste Salzmenge gefunden, und zwar in einer, den Porenraum des Steines (vor der Behandlung) beträchtlich übersteigenden Anreicherung. Ob hier bereits vor dem Schalenriss eine Lockerung mit Erhöhung der Porosität und entsprechender Salzimprägnierung stattfand, oder ob die Anreicherung durch beim Trocknen bereits vorhandene Schalenrisse (Ausblühungen auf der Innenseite des



4 5

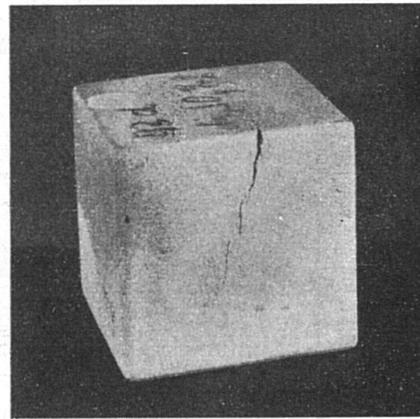


Fig. 4. Typische Diagonalarisse ohne Schalen nach 13 Tränkungen in  $\frac{1}{4}\%$ iger Natriumsulfatlösung (Versuch Nr. 14, Tabelle 2)

Fig. 5. Durchgehender Riss entstanden nach 25 Tränkungen in  $\frac{1}{4}\%$ iger Natriumsulfatlösung (Versuch Nr. 13, Tabelle 2)

Risses) beeinflusst wurde, bleibe hier dahingestellt. Vergleichende Analysen von Ecken, Kanten und Flächenmitten (Tabelle 4) zeigen, dass sich unter den Versuchsbedingungen Ecken und Kanten stärker mit Salz durchsetzen als die Flächen, sofern überhaupt eine Anreicherung in der Randzone stattfindet.

##### 5. Salzanreicherung und Zerfallsform

Die Versuche mit Natriumsulfatlösung erzeugen bei den relativ festen granitischen Sandsteinen A und B, welche starke Salzanreicherung in der Randzone feststellen liessen, typische Schalenrisse (übrigens noch bei vielen anderen verwandten Sandsteinen). Bei den wenig festen Sandsteinen der marinen Molasse (C) überwiegt bei

Tabelle 4. *Veränderung des Sulfatgehaltes zwischen Ecken, Kanten und Flächen im Verlaufe der Tränkungen*

	nach Tränkung	$\text{Na}_2\text{SO}_4$ $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ Gew. %		nach Tränkung	$\text{Na}_2\text{SO}_4$ $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ Gew. %
Gestein $\text{C}_2$ Lösng. 10% (Nr. 8)	1 Ecken	5,20 11,80	Gestein $\text{C}_3$ Lösng. 1% (Nr. 11)	1 Ecken	0,84 1,90
	Kanten	7,03 15,95		Kanten	0,81 1,83
	Flächen	3,52 7,99		Flächen	0,79 1,79
	2 Ecken	6,55 14,86		3 Ecken	1,29 2,92
	Kanten	7,74 17,56		Kanten	0,70 1,58
	Flächen	4,79 10,87		Flächen	0,79 1,79
	3 Ecken	7,76 17,61		5 Ecken	2,33 5,28
	Kanten	4,69 10,64		Kanten	0,76 1,72
	Flächen	6,16 13,98		Flächen	1,09 2,47
	4 Ecken	7,95 18,04		10 Ecken	3,14 7,12
	Kanten	6,88 15,61		Kanten	2,72 6,17
	Flächen	7,43 16,86		Flächen	1,38 3,13

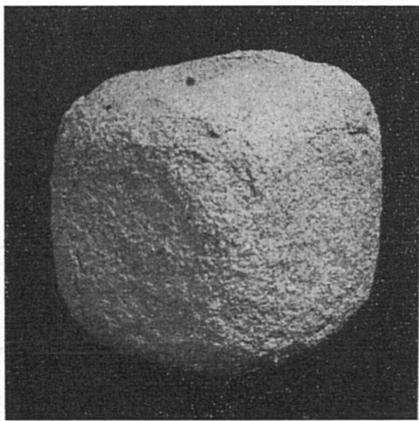
Tabelle 5

*Übersicht der Schalendimensionen und der aufgenommenen Salz-  
mengen bei Versuch Nr. 1 und Nr. 2 (nach 23, resp. 10 Tränkungen)*

Gestein	Nr. 1	Nr. 2	
	Sandstein A	Sandstein B	
Schale {	Dicke	5 mm	10 mm
	Volumen	127 cm <sup>3</sup>	218 cm <sup>3</sup>
	Gewicht	335 g	550 g
	Fläche	254 cm <sup>2</sup>	218 cm <sup>2</sup>
Gesamtsalzmenge in Schale ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )			
	4,7 g	14,0 g	
Den Porenraum*) übersteigende Salzmenge			
	1,9 g	1,2 g	
Salzmenge pro cm <sup>2</sup> Schale			
	0,018 g	0,064 g	
Den Porenraum*) übersteigende Salzmenge pro cm <sup>2</sup>			
	0,0075 g	0,0055 g	

\*) d. h. die Salzmenge, welche übrig bleibt, wenn der Porenraum (berechnet aus der 24stündigen Wasseraufnahme) mit Glaubersalz völlig erfüllt angenommen wird.

starker Salzdurchsetzung in der Randzone das Absanden, offenbar weil hier der Zerfall einsetzt, bevor die Verhältnisse für eine Schalenablösung realisiert sind. Die Salzanreicherung in Ecken und Kanten führt bei diesen Gesteinen zu einer Rundung der Proben (Fig. 6), die im Endstadium vollkommen zur Kugel werden. Eine Salzanreicherung im Zentrum der Proben führt zu Rissen, bisweilen direkt zu einer Spaltung in zwei Stücke (Fig. 4, 5). Die bis zur Riss- oder Schalenbildung notwendige Zahl der Tränkungen ist umso grösser,



6 7

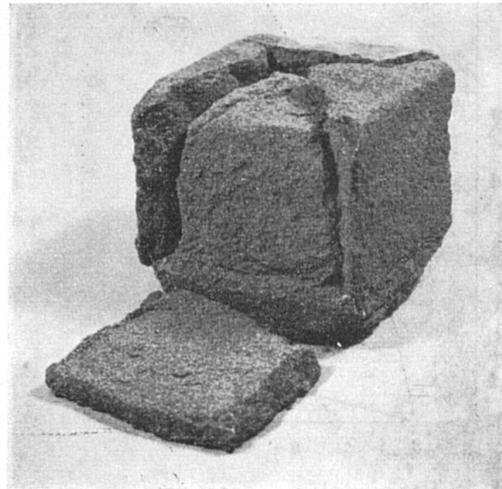


Fig. 6. Absandung und Ablätterung typisch für wenig feste Sandsteine bei Tränkungen in 10%iger Natriumsulfatlösung. Im Endstadium kann eine vollkommene Kugel entstehen

Fig. 7. Diagonalrisse (auch im innern Teil), verbunden mit Schalenbildung nach 4 Tränkungen in 10%iger Natriumsulfatlösung (Versuch Nr. 9, Tabelle 2)

je weniger porös und fester die Gesteine sind und je geringer die Lösungskonzentration ist. Es bedarf bei dem sehr festen Sandstein A einer grösseren relativen Anreicherung von Sulfat, was eben eine grössere Tränkungszahl bedingt. Die Rissbildung erfolgt hier bei einer kleineren absoluten Sulfatmenge (Tabelle 5). Für alle Einzelheiten sei auf die Tabellen verwiesen.

## 6. Deutung der Versuche

Ganz offensichtlich tritt bei den Sulfatversuchen der Sandsteine A und B der plötzliche Schalenriss zeitlich dann (z. B. bei Stein B nach 10 Tränkungen) und örtlich da (bei Nr. 2 z. B. 10 mm vom Rand) auf, wenn resp. wo die Anreicherung an Sulfat randwärts so hoch wird, dass die Porenfüllung (in Vol. %) des sich in der nächsten

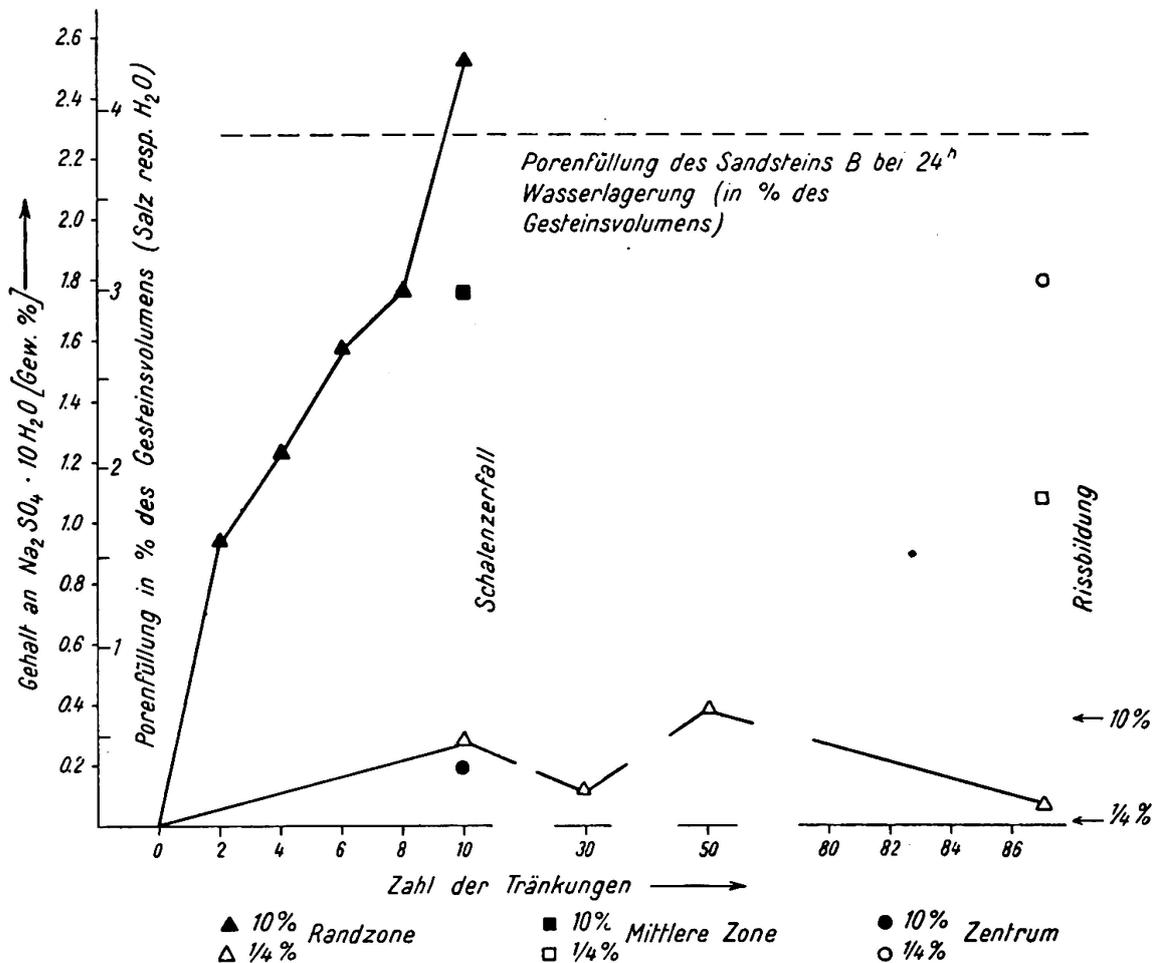


Fig. 8. Veränderung des Gehaltes an Natriumsulfat im Molassesandstein vom Typus B (als Glaubersalz berechnet) im Verlauf der Tränkungen. Dargestellt ist Versuch Nr. 2 (10%ige Lösung) und Versuch Nr. 12 (1/4%ige Lösung). Die Pfeile rechts geben die entsprechend der Lösungsaufnahme und Konzentration (10 resp. 1/4%) im Stein zu erwartenden Salzgehalte an

Lösungslagerung rückbildenden Glaubersalzes der scheinbaren Porosität (bezogen auf 24stündige Wasserfüllung) nahekommst oder sie übersteigt, wobei von vorneherein noch anzunehmen ist, dass der feste Salzkristall nicht in alle Hohlräume eindringen kann wie dies der Flüssigkeit möglich ist. Die dadurch in der Randpartie des Steines vom System Thenardit-Lösung-Glaubersalz ausgeübten Kräfte übersteigen (als Summation unzähliger Einzelwirkungen in Poren) die Zugfestigkeit des Gesteins und führen zur Rissbildung parallel der Aussenfläche<sup>2)</sup>. Bei den Fällen, in denen die Anreiche-

<sup>2)</sup> Zugfestigkeitsbestimmungen liegen von den Versuchsgesteinen nicht vor. Man kann vielleicht auf eine Zugfestigkeit von  $1/10$  bis  $1/15$  der Druckfestigkeit (Tabelle 1) schliessen.

rung im Zentrum erfolgt, findet die Sprengung im Innern statt, was eben zu den charakteristischen „Treibrissen“ führt (Fig. 5, 9). Dass hier die Bestimmungen keine den Porenraum übersteigende Salzanreicherung (bezogen auf  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ ) ergaben, kann darauf beruhen, dass die analysierten Zentrumsbereiche der Würfel zu ausgedehnt gewählt wurden.



Fig. 9. Sandstein vom Typus C kurz nach dem direkt beobachtbaren rasch verlaufenen Zerbersten (in Lösung). Das Zentrum der Probe bestand aus völlig lockerem Sand, der durch die Treibrisse ausfloss.

Es ist schon mehrfach geäußert worden, dass diese Sulfatwirkungen Frostbeanspruchungen verwandt seien. Dies trifft in mancher Beziehung zu: in beiden Fällen handelt es sich um Vorgänge, bei denen in (praktisch) abgeschlossenen Räumen unter den gegebenen Bedingungen Druckwirkung eintreten muss (siehe P-V-T-Diagramme). Verschieden sind aber die vorbereitenden Vorgänge. Beim Sulfat findet man die allmähliche Anreicherung bis zur kritischen Porenfüllung mit Salz und dann durch erneuten Wasser- resp. Lösungszutritt eine rasch einsetzende und damit energische Beanspruchung. Beim Frost kann der zur Beanspruchung notwendige Wärmezug in der Natur nicht anders als durch Abkühlung der Luft (von geringer spezifischer Wärme) erfolgen, die Gesteinstemperatur senkt sich langsam, die Beanspruchung ist wegen des dadurch ermöglichten Druckausgleiches (da die Poren eben doch nicht ganz abgeschlossen sind) geringer. An sich ist es denkbar, dass durch Frost eine ähnliche

Schalenbildung erzielt werden könnte, bei Molassesandsteinen ist allerdings soweit bekannt bei Frostprüfungen nie eine solche beobachtet worden.

Der Beanspruchung in Lösung durch Salze mit verschiedenen Hydratstufen, deren Umwandlung bei normalen Temperaturbedingungen erfolgt, stehen Beanspruchungen gegenüber, die unzweifelhaft auch bei der Kristallbildung im Trockenschrank eintreten (Kristallisationsdruck i. e. S.). Solche Einwirkungen, gemessen z. B. in Lit. 1, sind ausschlaggebend bei Salztränkungen ohne Hydratstufen (wie bei NaCl), wo die Haupttrissbildungen im Trockenschrank erfolgen.

Die Molassesandsteine (besonders die Sandsteine vom Typus C) enthalten einen ganz geringen Anteil an Tonmineralien. Ob bei den Tränkungen in Alkalisalzen eine Einlagerung von Alkalien zwischen die Schichtgitter (unter Aufweitung) eine merkbare Einwirkung auf das Gestein hat (Erhöhung der Quellfähigkeit bei Wasserzutritt), dürfte bezweifelt werden.

#### 7. Beziehungen zur Gesteinsverwitterung an Bauwerken

Alle untersuchten Gesteine (auch Kalksteine, Marmore, Granite, Gneise, Beton, Kunststeine) zerfallen bei den Tränkeversuchen in Sulfat in gleicher Art wie am Bauwerk. So zeigen z. B. an Bauwerken Molassesandsteine vom Typus A und B ganz allgemein an oft durchfeuchteten Bereichen in Städten die typischen Schalenbildungen (Ablösungen von gleicher Dicke wie bei den Versuchen), für die Bernersandsteine ist die Absandung unter Rundung von Ecken und Kanten der Quader besonders charakteristisch. Typische Beispiele sind in Lit. 6 abgebildet.

Es ist dadurch natürlich naheliegend, die Verwitterung an Bauwerken zur Hauptsache analog zu deuten wie die Versuchsergebnisse, besonders in Städten, wo eine Salzwanderung in die Bausteine ja überall konstatiert wird. In vielen Fällen ist ja der Zusammenhang von Verwitterung und Salzanreicherung völlig augenscheinlich (Beispiele in Lit. 6). Man muss sich nun allerdings bei den viel mannigfaltigeren Einwirkungen, denen die Gesteine im Freien ausgesetzt sind (die hier nicht einzeln aufgezählt werden können) und der langen Einwirkungszeit davor hüten, die Vorgänge zu einfach deuten zu wollen. Im Experiment braucht es bis zur Schalenbildung beim Sandstein B 10 Tränkungen in 10 %iger Natriumsulfatlösung. Im Freien

pflegen allseitig gut beregnete und gut austrocknende, nicht im Grundfeuchtebereich stehende Objekte dieser Sandsteinart (z. B. Monumente auf Sockel) im Mittel nach 30 Jahren Schalen gleicher Art zu erhalten. Bei 60 stärkeren Wasserdurchtränkungen pro Jahr macht dies deren 1800 aus. Die dadurch erzeugten Lösungsvorgänge und Stofftransporte und Wiederausscheidungen, die ausser den leicht löslichen Salzen (Sulfate, durch Einwirkung der Schwefelsäure der Rauchgase gebildet) auch Kalziumkarbonat erfassen, sind natürlich recht verschieden von den Einwirkungen im Experiment. Eine solche Stoffwanderung von Kalziumkarbonat in die Randzone eines Steines kann hier z. B. eine Porenverstopfung bewirken, was einen Schalenriss bei viel geringerem Gehalt an löslichem Salz zur Folge haben könnte.

Versuchsergebnisse (mit Berücksichtigung hier nicht diskutierter an andern Salzen, und unter andern Bedingungen) und Beobachtungen am Bauwerk erlauben es aber vielleicht doch, folgende allgemeinen Schlüsse zu ziehen:

a) Die physikalische Einwirkung der an Bauwerken auftretenden löslichen Salze auf steinartige Stoffe ist bedeutender, als meist angenommen; sie kann die Frostwirkung übertreffen.

b) Natriumsulfat wirkt unter den verbreitetsten Ausblühungssalzen am intensivsten, aber auch Magnesiumsulfat, Natriumchlorid und sogar das in Lösung stets sehr verdünnte Calciumsulfat sind von Einfluss.

c) Die Art der Anreicherung und Einwirkung ist bei den verschiedenen Salzen (auch wenn Konzentration und Löslichkeit ähnlich sind) erheblich verschieden.

d) Auch bei einem Salz kann sich die Einwirkung je nach Art der Befeuchtung, Konzentration und Austrocknung (rasch oder langsam) auf sehr verschiedene Art äussern. Diese ist in gewissem Sinne voraussagbar.

e) Eine wirksame Anreicherung von Salzen kann auch aus sehr verdünnten Lösungen erfolgen.

f) Die Art der Salzanreicherung und die Form der Einwirkung hängt natürlich auch ab von der Porosität (Grad, Weite und Form der Poren) und von der Festigkeit des Steines. Auch sehr feste und mässig poröse Materialien können aber unter Umständen angegriffen werden.

**Literatur**

1. CORRENS, C. W. und STEINBOM, W., Experimente zur Messung und Erklärung der sogenannten Kristallisationskraft. Z. Krist. 101 (1939).
2. KIESLINGER, A., Zerstörungen an Steinbauten. Leipzig und Wien 1932.
3. — Kristallisationsdruck, Quellung und Verwitterung. Geologie und Bauwesen 5 (1933) 49—63.
4. VON MOOS, A. und DE QUERVAIN, F., Technische Gesteinskunde. Birkhäuser, Basel 1948.
5. DE QUERVAIN, F., Prüfung der Wetterbeständigkeit der Gesteine. Handbuch der Werkstoffprüfung 3, Berlin (1941) 188—203.
6. — Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz. Beitr. Geol. Schweiz, geotechn. Serie, 23 (1945).
7. SCHMÖLZER, A., Zur Entstehung der Verwitterungsskulpturen an Bausteinen. Chemie der Erde 10 (1936) 479—520.

Eingegangen: 9. Februar 1948.