

**BEITRÄGE  
ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ**

GEOTECHNISCHE SERIE, 30. LIEFERUNG

*Herausgegeben mit Subvention der Eidgenossenschaft von der  
Schweizerischen Geotechnischen Kommission  
Organ der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft*

*zugleich*

*Bericht Nr. 178*

*der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Versuchsanstalt  
für Industrie, Bauwesen und Gewerbe*

**Verhalten der Bausteine gegen  
Witterungseinflüsse in der Schweiz**

**Teil II**

**Versuche über das Verhalten der Bausteine gegen  
die Einwirkung leicht löslicher Salze zur Aufstellung  
einer allgemeinen Prüfmethodik über  
die Wetterbeständigkeit**

Von F. de Quervain und V. Jenny

KOMMISSIONSVERLAG:

KÜMMERLY & FREY, GEOGRAPHISCHER VERLAG, BERN

1951

DRUCK VON ASCHMANN & SCHELLER AG., BUCHDRUCKEREI ZUR FROSCHAU, ZÜRICH

# BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ

GEOTECHNISCHE SERIE, 30. LIEFERUNG

*Herausgegeben mit Subvention der Eidgenossenschaft von der  
Schweizerischen Geotechnischen Kommission  
Organ der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft*

*zugleich*

*Bericht Nr. 178*

*der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Versuchsanstalt  
für Industrie, Bauwesen und Gewerbe*

## **Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz**

Teil II

**Versuche über das Verhalten der Bausteine gegen  
die Einwirkung leicht löslicher Salze zur Aufstellung  
einer allgemeinen Prüfmethode über  
die Wetterbeständigkeit**

Von F. de Quervain und V. Jenny

KOMMISSIONSVERLAG:

KÜMMERLY & FREY, GEOGRAPHISCHER VERLAG, BERN

1951

DRUCK VON ASCHMANN & SCHELLER AG., BUCHDRUCKEREI ZUR FROSCHAU, ZÜRICH

## Vorwort

In der Sitzung vom 16. Dezember 1950 lag der Kommission ein Manuskript von F. DE QUERVAIN und V. JENNY: „Versuche über das Verhalten der Bausteine gegen die Einwirkung leicht löslicher Salze zur Aufstellung einer allgemeinen Prüfmethodik über die Wetterbeständigkeit“ vor, als Teil II der durch die Kommission 1945 in den Beiträgen publizierten Studie „Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz“ von F. DE QUERVAIN. Die Arbeit enthält die Ergebnisse von experimentellen Untersuchungen, ausgeführt 1945—1950 unter Mitwirkung der Kommission auf der Geotechnischen Prüfstelle des Mineralogisch-Petrographischen Institutes der Eidg. Technischen Hochschule. Die Kommission beschloß die Herausgabe in den „Beiträgen“ als Lieferung 30.

Die Untersuchung wurde ermöglicht durch eine große Unterstützung durch die Eidg. Volkswirtschaftsstiftung. Ihr sei dafür der beste Dank ausgesprochen. Sie dankt vielmals Fräulein V. JENNY für die ausgedehnten experimentellen Arbeiten.

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

ZÜRICH, Juli 1951.

Für die Schweiz. Geotechnische Kommission

Der Präsident:

**F. de Quervain.**

Der Aktuar:

**P. Esenwein.**

Die vorliegende Abhandlung „Versuche über das Verhalten der Bausteine gegen die Einwirkung leichtlöslicher Salze zur Aufstellung einer allgemeinen Prüfmethodik über die Wetterbeständigkeit“ berührt zahlreiche der wesentlichen Fragen einer materialtechnischen Prüfung der Bausteine in derart unmittelbarer Weise, daß eine gemeinsame Veröffentlichung der Studie von F. DE QUERVAIN und V. JENNY durch die Schweiz. Geotechnische Kommission und die Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt gegeben war. Zugleich bot sich damit die willkommene Gelegenheit, ein erstes Mal die erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen der Geotechnischen Prüfstelle des Mineralogisch-Petrographischen Instituts der ETH und der EMPA augenfällig zu dokumentieren.

ZÜRICH, Juli 1951.

Für die Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt

Der Direktionspräsident:

**Amstutz.**

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
Einleitung ... ..	1
1. Tränkversuche ... ..	2
A. Tränkversuche mit Natriumsulfatlösung ... ..	2
a) Normalversuch ... ..	5
b) Versuche mit 5-Minuten-Tränkung ... ..	17
c) Versuche mit anderen Trocknungsbedingungen ... ..	20
d) Versuche mit Lösungen geringerer Konzentration ... ..	22
B. Tränkversuche mit Lösungen weiterer Ausblühungssalze ... ..	23
2. Aufsaugversuche ... ..	26
A. Die Versuche mit Natriumsulfatlösung ... ..	26
B. Versuche mit andern Salzen ... ..	31
3. Übersicht der Einwirkungen bei den Tränk- und Aufsaugversuchen ... ..	34
A. Die Formen des beobachteten Gesteinszerfalls .. ..	34
B. Übersicht der Einwirkung bei den Tränkversuchen ... ..	35
C. Übersicht über die Einwirkungen bei den Aufsaugversuchen ... ..	36
4. Die Salzanreicherung in den Proben bei den Tränkversuchen ... ..	38
5. Die Deutung der gesteinszerstörenden Auswirkungen bei der Salzaufnahme ... ..	42
A. Beobachtungen über den Vorgang des Gesteinszerfalls .. ..	42
B. Die Beziehungen der Salzaufnahme im Gestein zu den Zerfallsformen ... ..	44
C. Zur Deutung der zerstörenden Vorgänge im Stein... ..	46
6. Beziehungen zwischen den Versuchsergebnissen und der Gesteinsverwitterung am Bauwerk ... ..	48
A. Vergleich zwischen dem Zerfallsvorgang im Versuch und Bauwerk ... ..	48
B. Der Normal-Tränkversuch als Prüfmethode für das Verhalten der Gesteine am Bauwerk ... ..	49
7. Petrographische Charakterisierung der untersuchten Gesteine ... ..	54
A. Sandsteine ... ..	54
B. Kalksteine und Marmore ... ..	59
C. Kristalline Gesteine ... ..	63
Anhang: Physikalisch-chemische Daten der verwendeten Salze ... ..	65
Literatur . ... ..	66

# Einleitung.

Die langjährigen Beobachtungen von F. DE QUERVAIN über das Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz, die 1945 durch die Geotechnische Kommission veröffentlicht wurden (im folgenden als Teil I zitiert), wiesen auf den großen Einfluß (besonders in Städten) der leicht löslichen Salze auf die Zerfallserscheinungen der steinartigen Baustoffe. Sie regten dazu an, die in der Schweiz am meisten verwendeten natürlichen und synthetischen Steinmaterialien im Laboratorium auf ihr Verhalten gegen die Einwirkungen der an Bauten besonders häufig festgestellten löslichen Salze zu untersuchen. Im weitern sollte diese Arbeit der Ausarbeitung einer für unsere Verhältnisse geeigneten, einfachen Prüfmethode zur allgemeinen Wetterbeständigkeitsbeurteilung dienen, entsprechend dem in verschiedenen Ländern gebräuchlichen „Kristallisierversuch“. Der erste Punkt konnte allerdings nur mehr qualitativ behandelt werden. Die zweite Fragestellung verlangte die Untersuchung einer größeren Zahl von Gesteinsarten zur Erfassung eines erheblichen Teiles der petrographischen Mannigfaltigkeit in bezug auf Porositätsverhältnisse, Korngröße, Gefüge und Festigkeit. Damit vermehrte sich aber die ohnehin schon beträchtliche Zahl der Variablen (außer der Petrographie: Art des Salzes, Konzentration und Sättigungsgrad der Lösungen, Temperatur und Luftfeuchtigkeit bei der Trocknung, Dauer der Behandlung in Lösung und beim Trocknen, Art der Einwirkung) so sehr, daß ohne mehr stichprobenartige Behandlung zahlreicher wichtiger Fragen die Untersuchung einen uferlosen Umfang angenommen hätte.

Die hier mitgeteilten Ergebnisse betreffen in erster Linie natürliche Gesteine von der petrographischen Mannigfaltigkeit, wie sie in unserem Lande verwendet werden. Von künstlichen steinartigen Stoffen sind nur einige Vergleichsdaten angeführt. Immerhin mögen gewisse Folgerungen, so z. B. das aus den Versuchen und den Beobachtungen an Bauwerken gewonnene Klassifikationsschema (Tabelle 30) eine allgemeinere Geltung haben und ein weiteres Interesse beanspruchen. Für eine exakte Behandlung der Beanspruchung gesteinsartiger Stoffe durch auskristallisierende Salze werden die aus obengenannten Gründen zu wenig auf diese interessante Frage bezogenen Versuche als nicht ausreichend erachtet. Es wurde deshalb hier davon abgesehen, die Zerstörungsvorgänge physikalisch-theoretisch zu behandeln, ebenso wurde auch darauf verzichtet, die verschiedenen Ansichten über die Einwirkungen der Salze allgemein zu diskutieren (siehe auch S. 46). Eine kurze vorläufige Mitteilung über einen Teil der Untersuchungen erfolgte 1948; die dort mitgeteilten Ergebnisse sind hier größtenteils mitverarbeitet worden. Es ist vorgesehen, weitere Untersuchungsergebnisse in anderem Zusammenhang zu veröffentlichen.

Die Untersuchungen begannen im Jahre 1945. Sie wurden auf der Geotechnischen Prüfstelle des Mineralogisch-Petrographischen Instituts der Eidg. Technischen Hochschule und der Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt Zürich ausgeführt. Mit den praktischen Bestimmungen befaßte sich zum weitaus größten Teil Fräulein V. JENNY. Diese waren nur möglich durch einen größeren Beitrag seitens der Eidg. Volkswirtschaftsstiftung, der wir dafür vielmals danken möchten. Auch die Schweiz. Geotechnische Kommission unterstützte die Arbeiten in weitgehendem Maß und übernahm das Manuskript zur Veröffentlichung in den Beiträgen. Unser besonderer Dank geht an die Herren Prof. P. NIGGLI, Direktor des Mineralogisch-Petrographischen Instituts der ETH, die ehemalige Direktion der EMPA, Prof. M. ROŠ und Prof. P. SCHLÄPFER, und die jetzige Leitung: Prof. E. AMSTUTZ, Direktionspräsident und Prof. E. BRANDENBERGER, Direktor der EMPA. Die letztgenannten ermöglichten die gleichzeitige Aufnahme der Arbeit als Bericht der EMPA.

Mithilfe durch Übermittlung von Untersuchungsmaterial wurde uns von verschiedenen Seiten zuteil. Eine große Serie von Molassesandsteinen (deren Untersuchung besonders auch für die allgemeineren Fragestellungen wertvoll waren), wurden uns von Herrn Arch. P. INDERMÜHLE in Bern übermittelt, im Zusammenhang mit der Frage der Steinbeschaffung für die Münsterrestauration in Bern. Weiter stellten uns verschiedene Stellen formatisierte Gesteinsproben zur Verfügung. Auch diesen sei bestens gedankt.

# 1. Tränkversuche.

Bei den Tränkversuchen wurden die Probekörper abwechselnd in Lösung getaucht (= Tränkung\*) und einer Trocknung ausgesetzt. Die Lösungen enthielten Salze verschiedener Art und Konzentration. Es kamen zur Anwendung: In erster Linie Lösungen von Natriumsulfat (als Standardsalz des „Kristallisierversuches“), daneben auch von Magnesiumsulfat, Kaliumsulfat, Calciumsulfat und Natriumchlorid, somit Salzen, die sich unter den Ausblühungen an Bauwerken der Stadt Zürich feststellen ließen (siehe Teil I).

Die Lagerung in der Lösung erfolgte normalerweise während 24 h, für einen Spezialversuch nur 5 Minuten. Die Trocknung dauerte normalerweise ebenfalls 24 h im Trockenschrank bei 100°. Einige Vergleichsproben wurden auch bei Zimmertemperatur (dann während 6 Tagen), und bei 50° und 150° im Trockenschrank behandelt.

Mit 24-stündiger Tränkung der Gesteine wird nach zahlreichen Versuchen 85–90% der totalen Sättigung erreicht; eine 24-stündige Lagerung im Trockenschrank bei 100° bringt den Stein auf einen Feuchtigkeitsgehalt der meist etwas unter dem lufttrockenen liegt. Die Temperatur von 100° erzeugte in den verwendeten Gesteinen kaum irreversible Veränderungen. Jedenfalls zeigten Proben der relativ leicht angreifbaren Sandsteine 5 und 15 nach 200 Tränkungen in Wasser (kalkhaltiges Leitungswasser oder destilliertes Wasser) und abwechselnder Trocknung bei 100° (je 24 h) keine äußerlichen Veränderungen.

Die Temperaturen der Lösungen schwankten etwas, entsprechend der Temperatur des Versuchsaumes (meist 16–23°; bei großer Hitze wurden die Gefäße mit den Versuchen mit Wasser gekühlt). Offensichtlich war der Einfluß der unterschiedlichen Lösungstemperatur auf die Versuche, trotz der damit verbundenen Unterschiede im Sättigungsgrad, nicht erheblich. Auch verschiedene Luftfeuchtigkeiten im Trockenschrank, dadurch verursacht, daß die Zahl der gleichzeitig behandelten Probekörper verschieden war, schienen von geringerem Einfluß als ursprünglich erwartet.

Als Probekörper wurden vorzugsweise gefräste Würfel gewählt, meist von 7 cm (vereinzelt auch 5, 6 oder 8 cm) Kantenlänge. In einigen Fällen handelt es sich auch um prismatische Körper oder um nicht maschinell zugeschnittene Handstücke, letztere sind indessen weniger empfehlenswert.

Zwei Ziele wurden mit diesen Versuchen angestrebt:

1. Die Ermittlung der Geschwindigkeit und der Form des Zerfalls der Gesteine durch die Salzeinwirkungen.
2. Untersuchungen über die Salzanreicherung im Gestein in Zusammenhang mit den Feststellungen unter 1. Diese sind im Abschnitt 4 zusammengestellt.

## A. Tränkversuche mit Natriumsulfatlösung.

Als Standardkonzentration wurde eine 10%ige Lösung gewählt. In der Literatur wird auch eine 14%ige Testlösung erwähnt (DE QUERVAIN 1941). Es erwies sich aber wegen der großen Schwankungen der Löslichkeit des Salzes in Abhängigkeit von der Temperatur als unzweckmäßig, höher als 10% zu gehen. Daneben wurden auch 1%ige und 1/4%ige Tränklösungen verwendet. Nach einer je nach der Zerfallsgeschwindigkeit kürzeren oder längeren Versuchsdauer wurde das abgefallene Material (praktisch erfolgte dies nur in der Lösung) bestimmt, und in Prozenten des Anfangsgewichtes des Probekörpers (bzw. in g pro 100 cm<sup>2</sup> Oberfläche des Probekörpers) angegeben. Gleichzeitig wurden die Veränderungen, welche die Körper in der Lösung oder nach dem Trocknen aufwiesen, notiert (z. B. Abrundungen, Risse, Schalen).

\* Im folgenden meist mit T. abgekürzt.

Tabelle 1

Normal-Tränkversuch mit 10%iger Natriumsulfatlösung

Sandsteine vom Bernertypus

(Diagramm 1, Petrographie S. 54)

Versuchs-Nr.	Varietäten (Reihenfolge nach steigender Porosität n) Würfel 7 cm	n	Gesteinsverlust * nach Trängung:							Bemerkungen	
			2	3	4	5	6	7	8		10
1	Sehr feinkörnig, fest (Nr. 1**) Probe 1	13,9		1,7 (4,6)		6,4 (17)		14 (37)		37 (102)	Absanden und Ablättern an Ecken, Kanten und Flächen, wurde aber nicht kugelig.
2	Probe 2			1,7 (4,5)		6,3 (17)		14 (37)		Z	
3	Feinkörnig, fest (3)	16,9	2,5 (6,8)	6,4 (17)	12 (33)	20 (54)	28 (76)	38 (103)	47 (128)		Absanden von Ecken, Kanten und Flächen.
4	Feinkörnig fest (2) Probe 1	16,9		4,8 (13)		12 (31)		32 (83)			Absanden und Ablättern, vor allem an Ecken und Kanten aber auch an der ganzen Oberfläche, wurde kugelig (Fig. 1).
5	Probe 2			5,1 (13)		17 (44)		Z			
6	Mittelkörnig (7) Probe 1	17,1		11 (29)	Z						Absanden und Ablättern, nach T. 5 bildeten sich Schalen, Probe ganz mürbe, zerfiel vollständig.
7	Probe 2			12 (32)	Z						
8	Mittelkörnig (9) Probe 1	17,7		8 (21)		25 (70)	Z				Absanden u. Ablättern, Ecken und Kanten abgerundet, kugelig.
9	Probe 2			7 (20)		22 (63)	Z				
10	Feinkörnig, normal (4)	18,0	3,4 (9)	9 (24)	28 (73)	56 (155)					Absanden an der ganzen Oberfl.; nach T. 5 fielen Schalen ab.
11	Feinkörnig, normal (5)	18,0	2,7 (7,4)	11 (29)	37 (102)						Absanden an der ganzen Oberfl.; nach T. 4 fielen Schalen ab.
12	Mittelkörnig (10) Probe 1	18,1	3,0 (8,2)	9 (24)	38 (102)						Starkes Absanden; bei T. 4 fielen dünne Schalen ab.
13	Probe 2		2,8 (7,6)	7 (20)	27 (73)						
14	Mittelkörnig (8)	18,4	2,9 (7,9)	9 (23)	19 (49)	32 (84)					Absanden, vor allem auch an Ecken und Kanten,
15	Grobkörnig (13)	21,0	4,5 (12)	Z							Sehr starkes Absanden. Risse. Nach T. 3 fielen Schalen ab. Probe vollständig mürbe.
16	Feinkörnig, normal (6)	21,4	5,3 (13)	19 (47)	Z						Starkes Absanden und Abbröckeln.
17	Mittelkörnig (11)	21,7	4,6 (12)	Z							Sehr starkes Absanden, bei T. 3 Bildung von Rissen und Schalen, sehr mürbe.
18	Mittelkörnig (12)	24,3	Z								Bei T. 2 zerfiel die Probe vollständig.

Z = starker Zerfall.

\* In Gewichtsprozent des Anfangsgewichtes (bezogen auf Oberfläche vor dem Versuch, g pro 100 cm<sup>2</sup>).

\*\* Gesteinsnummern des Abschnittes 7.

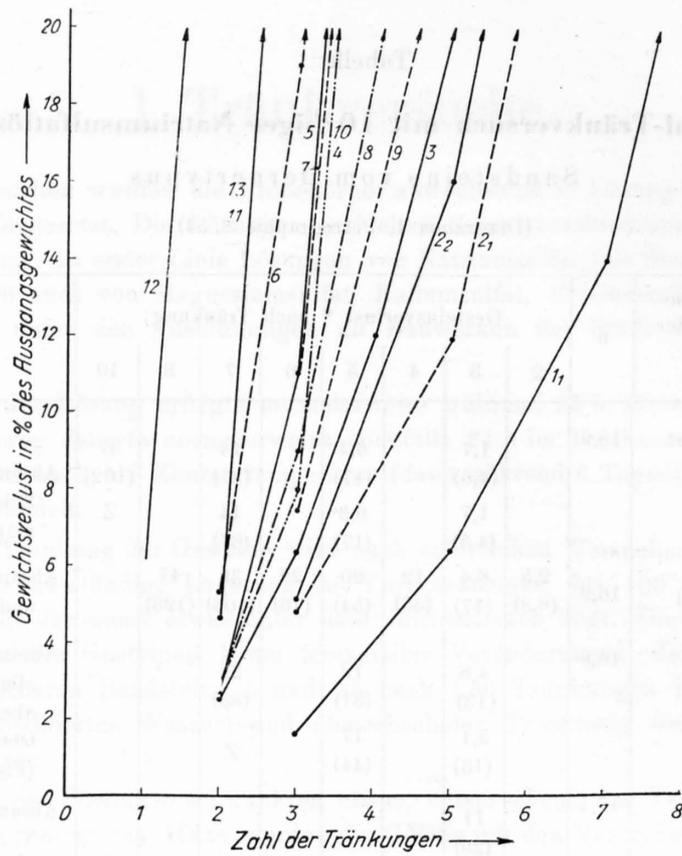


Diagramm 1.

Normaltränkversuch an Sandsteinen vom Bernertypus\*) (Tabelle 1).

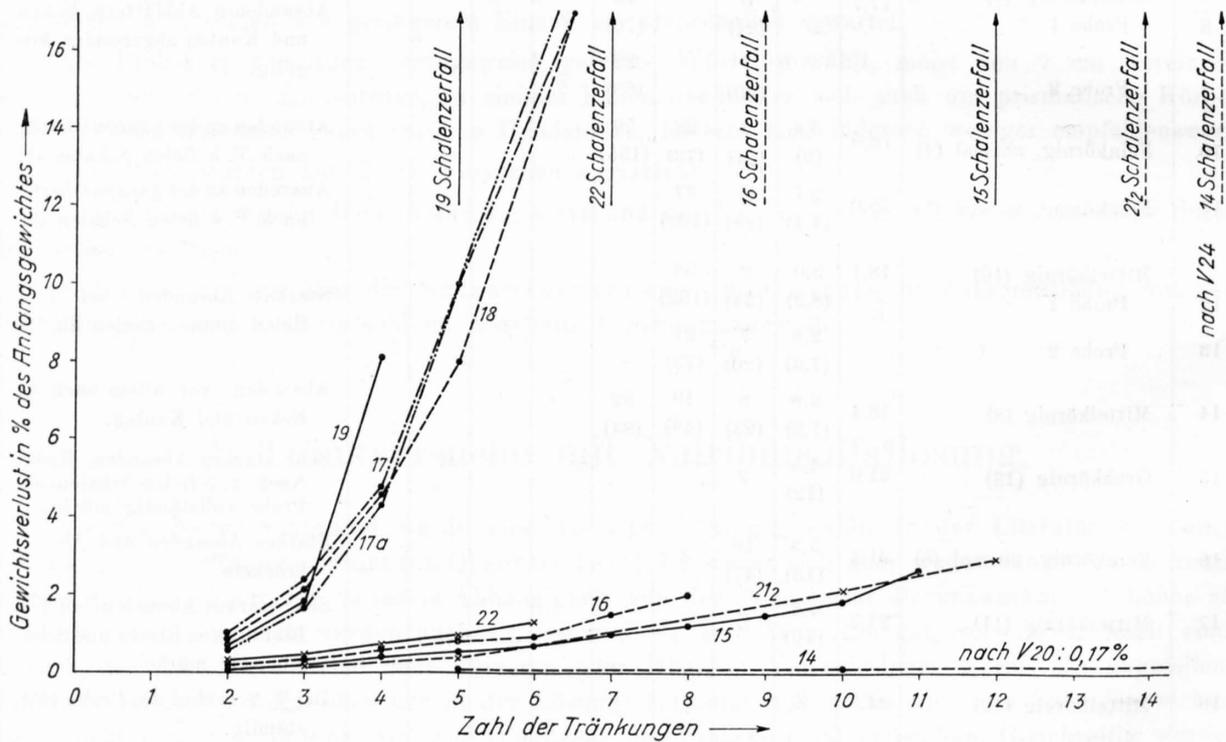


Diagramm 2.

Normaltränkversuch an granitischen Sandsteinen (●) und Plattensandsteinen (×) (Tabellen 2 und 3).

\*) Die Nummern in den Diagrammen und Figuren entsprechen den Gesteinsnummern (Abschnitt 7), nicht den Versuchsnummern.

### a) Der Normalversuch.

10<sup>0</sup>/<sub>o</sub>ige Natriumsulfatlösung, 24 h Lagerung in Lösung, 24 h Lagerung bei 100°.

Alle Gesteine wurden zum gegenseitigen Vergleich dem Normalversuch unterworfen. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 1 bis 10 aufgezeichnet und in den Diagrammen 1—6 dargestellt, wobei bei diesen infolge der sehr unterschiedlichen Zerfallsgeschwindigkeit verschiedene Maßstäbe angewandt werden mußten.

Tabelle 2

#### Normaltränkversuch mit 10<sup>0</sup>/<sub>o</sub>iger Natriumsulfatlösung

Granitische Sandsteine

(Diagramm 2, Petrographie S. 57)

Ver- suchs- Nr.	Varietäten (Reihen- folge nach steigender Porosität n) Würfel 7 cm	n	Gesteinsverlust * nach Tränkung:												
			2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	15	20	
19	Sehr fest und kompakt (14a) Probe 1	1,1										0,16 (0,55)		0,26 (1,5)	0,97 (4,8)
20	Probe 2											0,21 (0,73)		0,25 (1,5)	0,66 (3,9)
21	Sehr fest u. kompakt (14)	2,5				0,02 (0,07)						0,06 (0,21)		0,08 (0,28)	0,17 (0,56)
22	Mittelkörnig normal (16)	5,2	0,13 (0,42)	0,34 (1,1)	0,54 (1,7)	0,82 (2,5)	0,96 (3,0)	1,5 (4,7)	2,0 (6,1)						
23	Sehr feinkörnig (15) Probe 1	6,3	0,07 (0,21)	0,17 (0,53)	0,38 (1,2)	0,52 (1,6)	0,72 (2,2)	1,0 (3,2)	1,2 (3,8)	1,5 (4,6)	1,8 (5,7)	2,6 (8,0)			
24	Probe 2		0,08 (0,28)	0,17 (0,56)	0,29 (0,95)	0,37 (1,2)	0,46 (1,5)	0,6 (1,9)	0,72 (2,3)	0,92 (3,0)	1,2 (3,8)				
25	Grobkörnig (20) Probe 1	7,1				0,38 (1,1)									
26	Probe 2					0,52 (1,6)									
27	Grobkörnig (19)	8,2	0,68 (2,1)	1,8 (5,5)	8,1 (25)										
28	Mittelkörnig (17)	9,8	0,93 (2,5)	2,3 (6,2)	4,6 (12)	10 (27)	17 (45)	25 (67)							
29	Mittelkörnig (17a)		0,59 (1,8)	1,8 (5,3)	4,3 (13)	10 (31)	18 (54)	35 (105)							
30	Mittelkörnig (18)	10,1	0,80 (2,4)	2,1 (6,2)	4,6 (13)	8,0 (24)	17 (49)	29 (84)							

\* In Gewichtsprozent des Anfangsgewichtes  
(bezogen auf Oberfläche vor dem Versuch, g pro 100 cm<sup>2</sup>).

#### Bemerkungen zu Tabelle 2

Granitische Sandsteine

- 19 und 20 Sehr fest und kompakt (14a). Geringes Absanden. Nach T. 15 Andeutung von Rissen parallel den Kanten, ca. 1 cm Abstand. Nach T. 20 Risse verstärkt und teilweises Abfallen von Schalen (Fig. 4).
- 21 Sehr fest und kompakt (14). Nach T. 23 Andeutung von Rissen. Nochmals in Lösung fielen 1/2 cm dicke Schalen ab.
- 22 Mittelkörnig, normal (16). Absanden; bei T. 8 zeigte sich ein Riß, bei T. 9 löst sich am Boden eine 1 1/2 cm dicke Schale ab.

- 23 und 24 Sehr feinkörnig (15). Zuerst leichtes Absanden. Bei T. 9 zeigten sich Risse. Nach T. 11 resp. 10 bildeten sich 1 cm dicke Schalen, die abfielen (Fig. 3).
- 25 und 26 Grobkörnig (20). Absanden vor allem an Ecken und Kanten. Nach T. 6 Ecken ganz mürbe. Nach T. 7 Risse und Ausbildung ganz mürber Schalen (Fig. 2).
- 27 Grobkörnig (19) Starkes Absanden, bei T. 5 vollständiger Zerfall.
- 28 Mittelkörnig (17). Starkes Absanden, vor allem auch an Ecken und Kanten, kugelig werdend (Fig. 1).
- 29 Mittelkörnig (17a). Starkes Absanden, Abrunden von Ecken und Kanten.
- 30 Mittelkörnig (18). Starkes Absanden, vor allem an Ecken und Kanten, kugelig werdend.

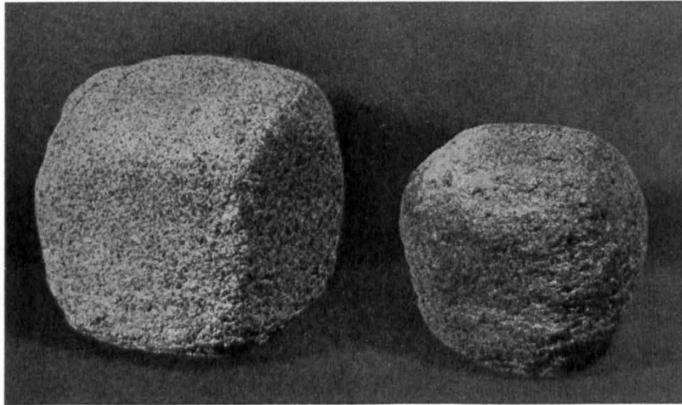


Fig. 1. Absandung vorwiegend an Ecken und Kanten. Links granitischer Sandstein (17) nach T. 7, rechts Bernersandstein (2) nach T. 8. Zerfallstyp A (Tabelle 28).

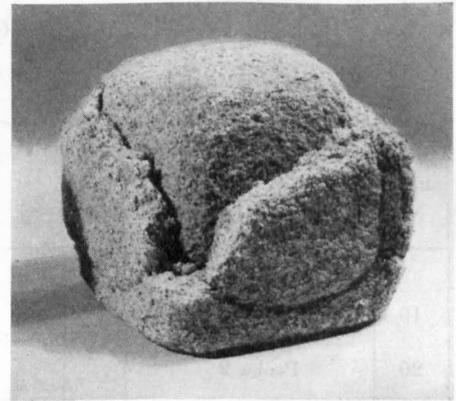


Fig. 2. Kombinierte Absandung und Schalenbildung. Grobkörniger granitischer Sandstein (20) nach T. 7.

Tabelle 3

### Normaltränkversuch mit 10 %iger Natriumsulfatlösung

#### Plattensandsteine und verwandte Sandsteine

(Diagramm 2, Petrographie S. 57).

Versuchs-Nr.	Würfel 7 cm	n	Gesteinsverlust * nach Trängung:							Bemerkungen	
			2	3	4	5	6	10	12		
31	Plattensandstein (21) Probe 1	5,9	0,22 (0,7)			0,59 (1,9)			2,0 (6,4)	2,5 (8,0)	Leichtes Absanden. Nach T. 13 starke Risse. Nach T. 14 fielen 1/2 cm dicke Schalen ab.
32	Probe 2	5,9	0,22 (0,7)			0,53 (1,7)			2,2 (7,1)	2,9 (9,3)	
33	Plattensandstein (22)	7,4	0,20 (0,56)	0,33 (0,91)	0,58 (1,6)	0,87 (2,4)	1,48 (6,2)				Leichtes Absanden. Nach T. 7 fielen 1 1/2 cm dicke Schalen ab.
34	Sandstein (23) Probe 1	6,0				0,25 (0,77)					Nach T. 5 Andeutung von Rissen parallel Kanten im Abstand von ca. 5 mm. Risse blieben z. T. auf Kanten beschränkt, die sich nach T. 9 leicht abbrechen ließen; z. T. lösten sich auch Schalen ab.
35	Probe 2	6,0				0,26 (0,84)					

\* In Gewichtsprozent des Anfangsgewichtes (bezogen auf Oberfläche vor dem Versuch, g pro 100 cm<sup>2</sup>).

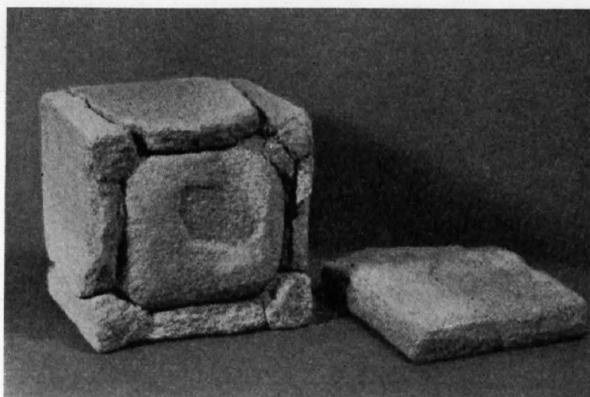


Fig. 3. Allseitige Schalenbildung mit Aufreißen parallelen Kanten an feinkörnigem granitischem Sandstein (15) nach T. 10. Zerfallstyp C.

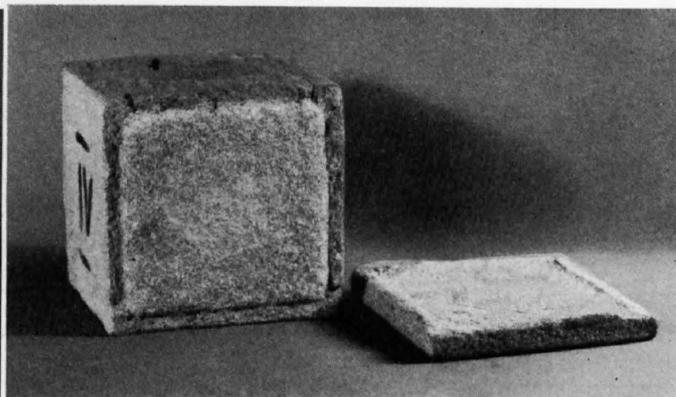


Fig. 4. Schalenbildung an sehr kompaktem, festem granitischem Sandstein (14a) nach T. 20.

Tabelle 4

**Normaltränkversuch mit 10%iger Natriumsulfatlösung**  
**Verschiedene Sandsteine**  
 (Diagramm 4, Petrographie S. 58)

Ver- suchs- Nr.	Form	n	Gesteinsverlust * nach Trängung:					
			10	15	20	30	40	50
36	Verrucanosandstein (24) Handstück 10×10×3 cm	1,4		0,15 (0,27)	0,16 (0,37)	0,33 (0,73)	0,90 (2,0)	0,97 (2,1)
37	Geschieferter Sandstein (25) Würfel 7 cm	1,1			1,27 (4,0)			
38	Glaukonitsandstein (26) Pflasterstein Würfel 8 cm	0,7	0,01 (0,03)		0,02 (0,09)	0,04 (0,17)	0,05 (0,20)	0,06 (0,23)
39	Flyschsandstein (27) Pflasterstein Würfel 8 cm	0,7	0,07 (0,23)	0,12 (0,42)	0,20 (0,70)	0,24 (0,81)	0,34 (1,1)	0,41 (1,4)
40	Kalkreicher Sandstein (28) Probe 1 Würfel 7 cm	1,5	0,07 (0,28)	0,13 (0,46)	0,26 (0,91)			
41	Probe 2 Würfel 7 cm		0,09 (0,35)	0,16 (0,60)	0,26 (0,95)		0,46 (1,6)	0,68 (2,4)
42	Wealdensandstein (29) Würfel 7 cm	16,5	7,1 (18)		11,9 (33)	17,3 (45)	18 (46)	

\* In Gewichtsprozent des Anfangsgewichtes (bezogen auf Oberfläche vor dem Versuch, g pro 100 cm<sup>2</sup>).

**Bemerkungen zu Tabelle 4**

Verschiedene Sandsteine

- 36 Verrucanosandstein (24). Nach T. 20 noch keine Veränderung. Nach T. 50 leichtes Absanden und leichte Rißbildung parallel der Schieferung.
- 37 Geschieferter Sandstein (25). Starke Rißbildung parallel der Schieferung, geringes Absanden auf den Flächen, besonders senkrecht zur Schieferung (Fig. 5).
- 38 Glaukonitsandstein (26). Nach T. 50 noch keine Veränderung.
- 39 Flyschsandstein (27). An einzelnen Stellen leichte Auflockerung der Oberfläche.
- 40 und 41 Kalkreicher Sandstein (28). Nach T. 20 keine Veränderung. Nach T. 50 leichte Auflockerung der Oberfläche, aber keine Schalenbildung.
- 42 Wealdensandstein (29). Unregelmäßiges Absanden an Flächen und Kanten, Ecken blieben erhalten (Fig. 6).

Tabelle 5

**Normal-Tränkversuch mit 10 %iger Natriumsulfatlösung**

Muschelkalksteine der Molasse und Kalktuffe

(Diagramme 3 und 4, Petrographie S. 59)

Ver- suchs- Nr.		Form	n	Gesteinsverlust * nach Tränkung:													
				2	4	5	6	8	10	13	15	16	20	25	30	40	50
43	Muschelkalkstein, kalkreich (30)	Prisma 11×10×5 cm	14,3						2,8 (7,7)		3,7 (10,3)		6,1 (17,4)	12,5 (35)	21,7 (60)		
44	Muschelkalkstein, sandreich (31) Probe 1	Würfel 7 cm	6,9			0,42 (1,3)			1,4 (4,5)		4,5 (14,3)	6,2 (19,4)					
45	Probe 2	Würfel 7 cm	6,9			0,67 (2,2)			2,9 (9,5)		11,6 (38)	18,4 (60)					
46	Muschelkalkstein, feinsandig (32)	Würfel 5 cm	12,2		0,45 (0,86)				1,9 (3,8)		5,4 (10,9)		6,5 (13,1)		19,1 (36)		
47	Muschelkalkstein, feinbrecciös (33)	Würfel 7 cm	16,9	1,3 (3,4)	4,9 (12)		9,0 (24)	13,3 (33)			21 (51)						
48	Kalktuff, mäßig löcherig (34)	Prisma 9×7×4 cm	26,8						0,07 (0,16)				0,44 (0,99)	0,53 (1,2)		2,1 (4,7)	4,7 (10,6)
49	Kalktuff, stark löcherig (35)	Prisma 7×7×5 cm	28,9		0,63 (1,1)				3,9 (7,0)		4,6 (8,2)		5,0 (8,9)		12,2 (23)	24 (42)	
50	Kalktuff, extrem löcherig (36)	Würfel 7 cm	46					1,0 (1,5)					2,7 (4,1)		2,8 (4,2)	10,9 (17)	22 (34)

\* In Gewichtsprozent des Anfangsgewichtes  
(bezogen auf Oberfläche vor dem Versuch, g pro 100 cm<sup>2</sup>).

Bemerkungen zu Tabelle 5

Muschelkalksteine der Molasse und Kalktuffe

- 43 Muschelkalkstein kalkreich (30). Ziemlich gleichmäßiges Abblättern an Flächen und Kanten. Keine Risse, Stein blieb fest.
- 44 und 45 Muschelkalkstein sandreich (31). Die beiden petrographisch ähnlichen Proben blättern von Anfang an verschieden stark ab (vorwiegend auf Flächen). Nach T. 15 traten Risse auf (Fig. 7) und starkes Abbröckeln bei Versuch 45.
- 46 Muschelkalkstein feinsandig (32). Teilweises Abbröckeln an Ecken und Kanten. Keine durchgehenden Risse.
- 47 Muschelkalkstein feinbrecciös (33). Lagenweise verschieden intensives Abblättern, keine Risse, Stein blieb fest (Fig. 6).
- 48 Kalktuff mäßig löcherig (34). Nach T. 25 erst spurenweise Absplitterung, sich bis T. 50 etwas verstärkend.
- 49 Kalktuff stark löcherig (35). Zerfiel nach T. 14 in zwei Teile, ab T. 25 starkes Ausbröckeln. Probe blieb fest.
- 50 Kalktuff extrem löcherig (36). Allmähliches Ausbröckeln mürber Partien, Stein blieb bis T. 50 fest, auch an Ecken und Kanten (Fig. 7).

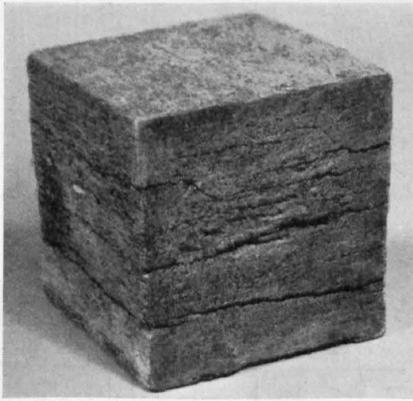


Fig. 5.

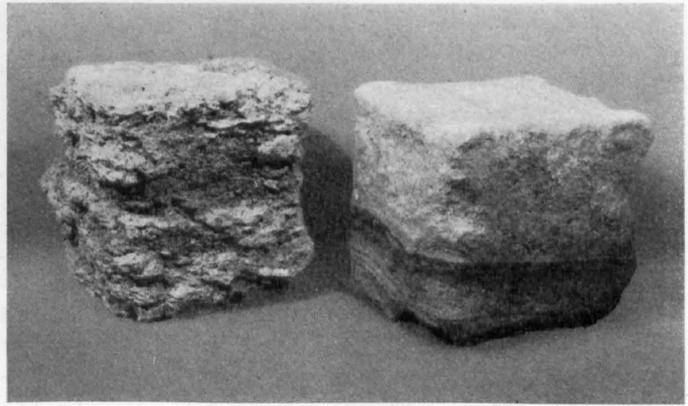


Fig. 6.

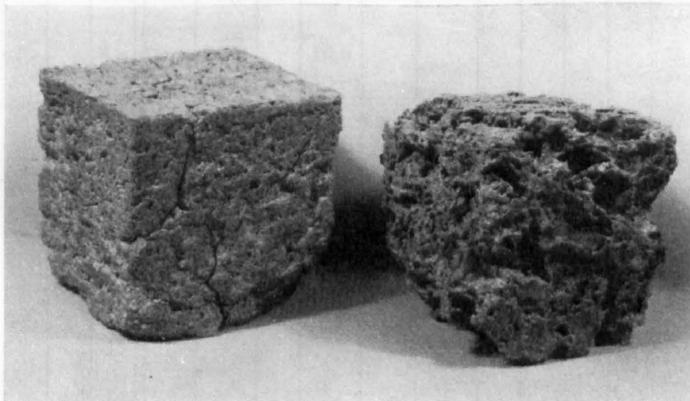


Fig. 7.

Fig. 5. Ribbildung parallel Schieferung nach T. 20 in geschiefertem Sandstein (25) aus Bündnerschiefern.

Fig. 6. Links feinspreccioser Muschelkalkstein (Randengrobkalk) (33) nach T. 13 mit schichtigen Ausbröckelungen. Rechts Wealdensandstein (29) nach T. 40 erheblich abgesandet, aber Ecken relativ erhalten. Zerfallstyp B.

Fig. 7. Links Ribbildung an Muschelkalkstein (31) mit Ausbröckelung nach T. 16. Rechts extrem löcheriger Kalktuff (36) nach T. 50 mit starken Ausbröckelungen. Zerfallstyp D.

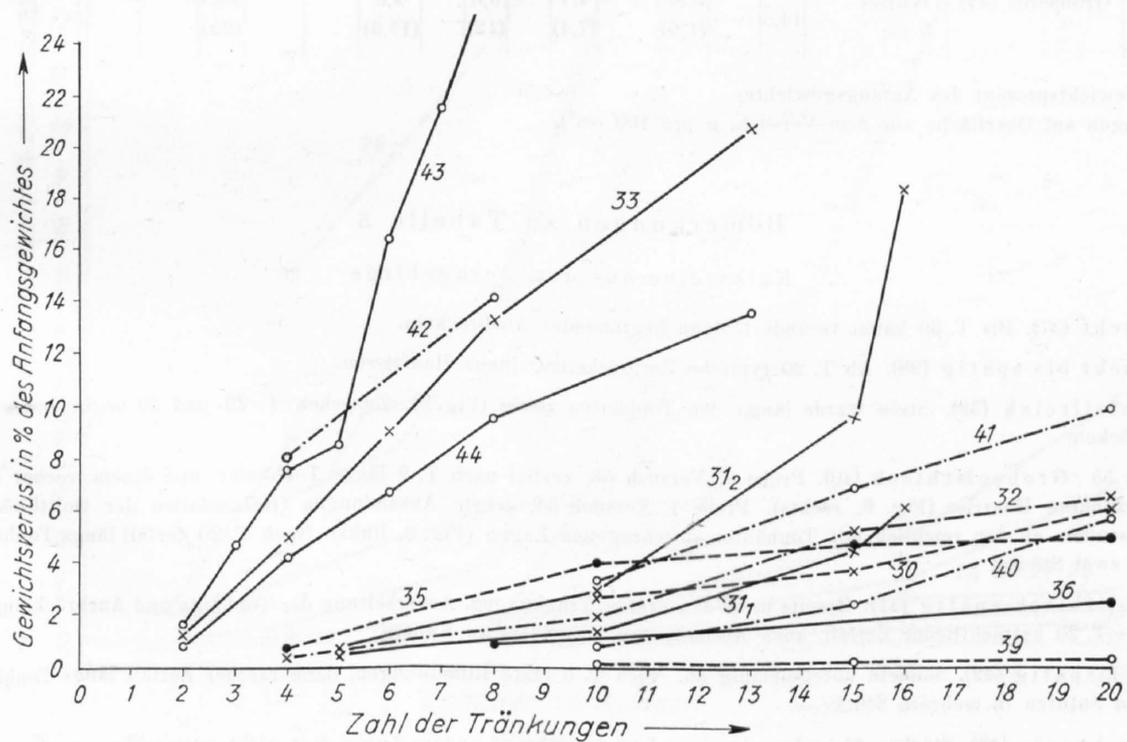


Diagramm 3.

Normaltränkversuch an Muschelkalksteinen (×), Kalktuffen (●) und Jura-Kalksteinen (○) (Tabellen 5 und 6).

Tabelle 6

**Normal-Tränkversuch mit 10%iger Natriumsulfatlösung**

**Kalksteine aus dem Juragebirge**

(Diagramme 3 und 4, Petrographie S. 60)

Ver- suchs- Nr.		Form	n	Gesteinsverlust * nach Tränkung																
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	13	15	20	30	40	50	
51	Dicht (37)	Würfel 8 cm	1,8														0,02 (0,08)		1,24	3,13
52	Dicht bis spätig (38)	Handstück	2,2					0,08							0,39		1,6	14,1		
53	Fossilreich (39)	Würfel 8 cm	1,4											0,01 (0,06)		0,08 (0,29)	0,37 (1,4)	6,6 (21)		
54	Groboolithisch (40) Probe 1	Würfel 8 cm	3,3											0,9 (3,1)		2,4 (8,3)	5,6 (19,7)			
55	Probe 2	Würfel 8 cm											0,7 (2,5)							
56	Oolithisch-spätig (41)	Prisma 7×6×5 cm	4,9											3,3 (8,8)		7,0 (18,7)	10,0 (26,1)			
57	Feinspätig (42)	Würfel 7 cm	7,7				7,9 (23)													13,9 (39)
58	Grobporös (43)	Würfel 7 cm	18,0	0,23 (0,8)	1,6 (5,3)	4,6 (15,8)	7,6 (26)	8,4 (29)	16,4 (60)	22 (73)	27 (93)	34 (116)								
59	Grobporös (44)	Würfel 5 cm	14,3		0,88 (1,6)		4,1 (7,4)		6,6 (12)		9,6 (17,3)					13,6 (25)				

\* In Gewichtsprozent des Anfangsgewichtes  
(bezogen auf Oberfläche vor dem Versuch, g pro 100 cm<sup>2</sup>).

**Bemerkungen zu Tabelle 6**

**Kalksteine aus dem Juragebirge**

- 51 Dicht (37). Bis T. 30 kaum verändert, dann beginnendes Ausbröckeln.
- 52 Dicht bis spätig (38). Ab T. 20 typische Zerbröckelung längs Haarrissen.
- 53 Fossilreich (39). Stein wurde längs den Tonhäuten rissig (Fig. 8). Zwischen T. 20 und 30 beginnendes Ausbröckeln
- 54 und 55 Groboolithisch (40). Probe 2, Versuch 55, zerfiel nach T. 9 längs Tonhäuten und einem vorher kaum sichtbaren Haarriss (Fig. 9, rechts). Probe 1, Versuch 54, zeigte Absandungen (Herausfallen der Oolithkörner), besonders an den reichlich mit Tonhäuten durchzogenen Lagen (Fig. 9, links). Nach T. 20 Zerfall längs Tonhäuten in zwei Stücke.
- 56 Oolithisch-spätig (41). Bereits nach den ersten Tränkungen, Ausarbeitung der Tonhäute und Ausbröckelungen. Bis T. 20 beträchtlicher Zerfall, auch Absonderung, besonders an Kanten.
- 57 Feinspätig (42). Sandete unregelmäßig ab. Nach T. 5 erste Ribbildungen, dann rascher Zerfall längs Tonhäuten und Suturen in mehrere Stücke.
- 58 Grobporös (43). Starkes Absanden einzelner Lagen, während andere Lagen fast nicht angegriffen wurden. Stein blieb fest, trotz großem Materialverlust.
- 59 Grobporös (44). Ähnliches lagiges Absanden, nach T. 13 Zerfall in zwei Stücke längs Tonhaut (Fig. 10).

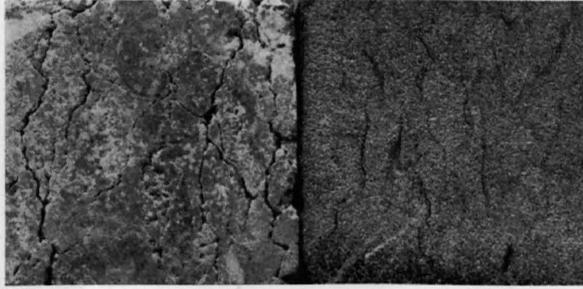


Fig. 8. Links Jura-Kalkstein (39) mit Ribbildungen längs ursprünglichen Tonhäuten nach T. 30. Rechts alpiner Kalkstein (45) mit nicht angegriffenen Tonschieferhäuten nach T. 50.

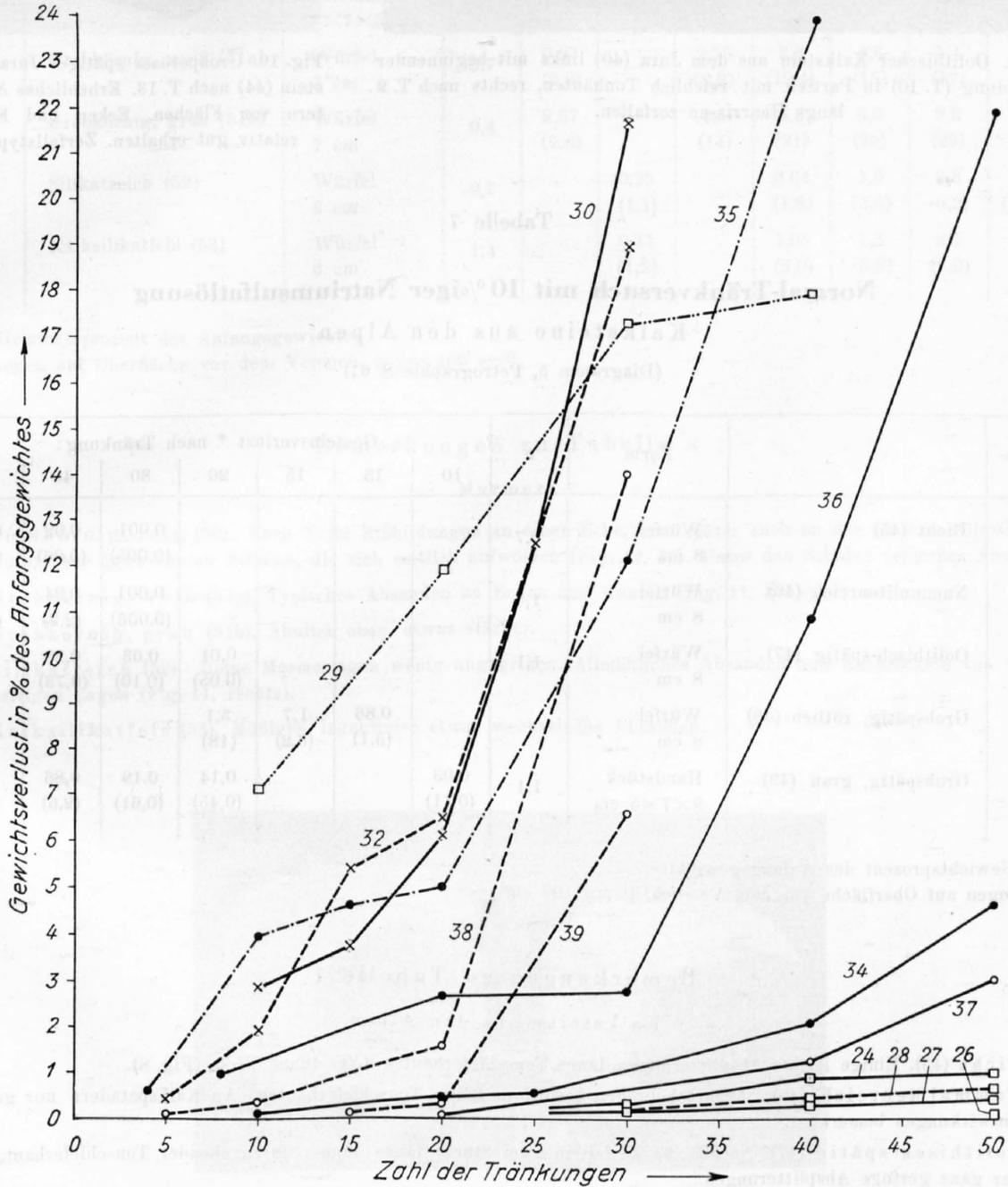


Diagramm 4.

Normaltränkversuche an verschiedenen Sandsteinen (□), Muschelkalksteinen (×), Kalktuffen (●) und Jura-Kalksteinen (○) (Tabellen 4 bis 6).

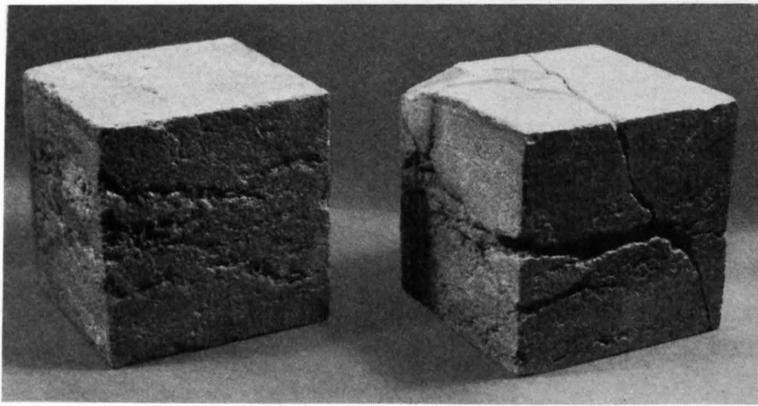


Fig. 9. Oolithischer Kalkstein aus dem Jura (40) links mit beginnender Absandung (T. 10) in Partien mit reichlich Tonhäuten, rechts nach T. 9 längs Haarrissen zerfallen.

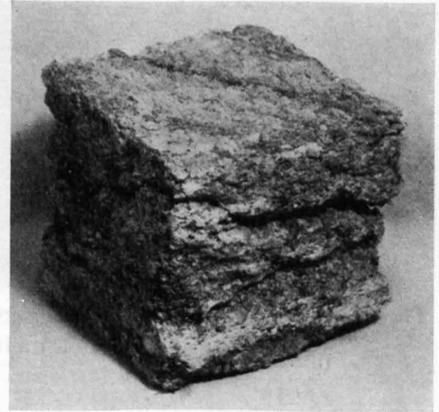


Fig. 10. Grobporöser spätker Jura-Kalkstein (44) nach T. 13. Erhebliches Abblättern von Flächen. Ecken und Kanten relativ gut erhalten. Zerfallstyp B.

Tabelle 7

**Normal-Tränkversuch mit 10%iger Natriumsulfatlösung**

**Kalksteine aus den Alpen**

(Diagramm 5, Petrographie S. 61)

Ver- suchs- Nr.		Form	n	Gesteinsverlust * nach Trängung:						
				10	13	15	20	30	40	50
60	Dicht (45)	Würfel 8 cm	0,7					0,001 (0,005)	0,02 (0,06)	0.19 (0,7)
61	Nummulitenreich (46)	Würfel 8 cm	1,4					0,001 (0,003)	0,94 (2,2)	3,8 (8,9)
62	Oolithisch-spätig (47)	Würfel 8 cm	1,1				0,01 (0,05)	0,03 (0 10)	0,20 (0,73)	
63	Grobspätig, rötlich (48)	Würfel 8 cm			0,86 (3,1)	1,7 (6,2)	5,1 (18)			
64	Grobspätig, grau (49)	Handstück 9×7×5 cm	1,1	0,03 (0,11)			0,14 (0,45)	0,19 (0,61)	0,86 (2,6)	3,5 (10)

\* In Gewichtsprozent des Anfangsgewichtes  
(bezogen auf Oberfläche vor dem Versuch, g pro 100 cm<sup>2</sup>.)

**Bemerkungen zu Tabelle 7**

**Kalksteine aus den Alpen**

- 60 Dicht (45). Einige leichte Absplitterungen, längs Tonschieferhäuten z. T. dünne Risse (Fig. 8).
- 61 Nummulitenreich (46). Ansbröckelungen besonders längs Tonschieferhäuten. An Kalkspatadern nur geringe Einwirkungen bemerkbar.
- 62 Oolithisch-spätig (47). Nach T. 39 Zerfall in zwei Stücke längs dünner durchgehender Tonschieferhaut, sonst nur ganz geringe Absplitterungen.
- 63 Grobspätig rötlich (48). Rasch einsetzendes Absanden an Kanten (z. T. auch an Ecken). Herausarbeiten einer Suture.
- 64 Grobspätig grau (49). Erheblicheres Absanden erst nach T. 30 mit deutlichem Ausarbeiten einer Tonschieferhaut.

Tabelle 8

**Normal-Tränkversuch mit 10 %iger Natriumsulfatlösung**

**Marmore**

(Diagramm 5, Petrographie S. 62)

Ver- suchs- Nr.		Form	n	Gesteinsverlust * nach Trängung:						
				12	15	17	20	30	40	50
65	Feinkörnig, rein (50)	Prisma 7×7×5 cm	0,7						1,4 (4,0)	2,3 (7,1)
66	Grobkörnig, weiß (51a)	Würfel 7 cm	0,7	0,87 (2,8)		2,75 (8,8)	3,6 (12,4)	4,6 (15)	5,4 (17)	11 (34)
67	Grobkörnig, grau (51b)	Würfel 7 cm	0,4	2,37 (7,6)		4,5 (14)	6,8 (21)	8,0 (25)	9,2 (29)	16 (50)
68	Silikatreich (52)	Würfel 6 cm	0,7		0,39 (1,1)		0,64 (1,8)	1,3 (3,6)	2,3 (6,2)	6,7 (18,4)
69	Kalksilikatfels (53)	Würfel 6 cm	1,4		0,41 (1,2)		1,05 (3,0)	1,3 (3,8)	2,1 (6,0)	5,3 (15)

\* In Gewichtsprozent des Anfangsgewichtes  
(bezogen auf Oberfläche vor dem Versuch, g pro 100 cm<sup>2</sup>).

**Bemerkungen zu Tabelle 8**

**Marmore**

- 65 Feinkörnig, rein (50). Nach T. 32 Ribbildungen an einer Ecke, erst später auch an den andern. Allmähliches Aufbrechen ganz dünner Schalen, die sich seitlich aufwölben (Fig. 12, 13). Unter den Schalen typisches Absanden.
- 66 Grobkörnig, weiß (51a). Typisches Absanden an Ecken und Kanten (Fig. 11, links).
- 67 Grobkörnig, grau (51b). Ähnlich oben, etwas stärker.
- 68 Silikatreich (52). Reine Marmorlagen wenig angegriffen. Allmähliches Absanden und Ausbröckeln von silikat-haltigen Lagen (Fig. 11, rechts).
- 69 Kalksilikatfels (53). Mäßiges, lagenweise etwas wechselndes Absanden.

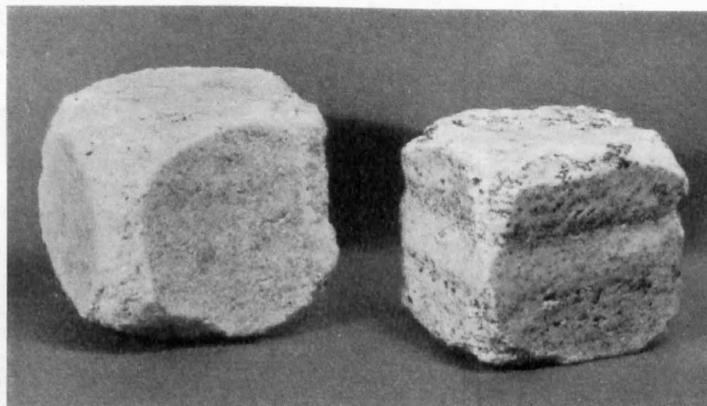


Fig. 11. Links grobkörniger Marmor (51a) mit Absanden von Ecken und Kanten nach T. 40. Rechts Silikatmarmor nach T. 40 mit Abblätterung besonders an silikathaltigen Lagen (52).

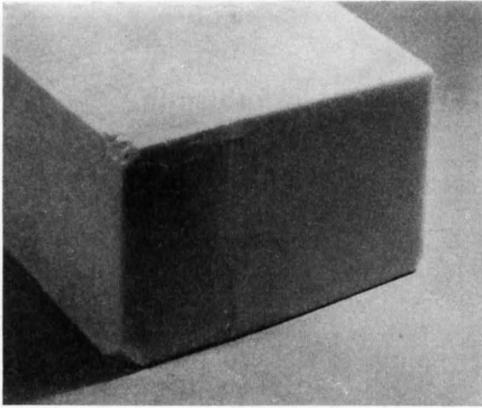


Fig. 12. Feinkörniger Marmor (50) nach T. 32 mit beginnender Ribbildung an Ecken.

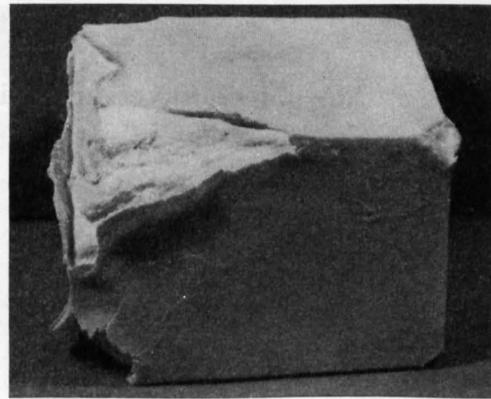


Fig. 13. Feinkörniger Marmor (50) nach T. 50. Erhebliches Absanden und Bildung dünner Schalen.

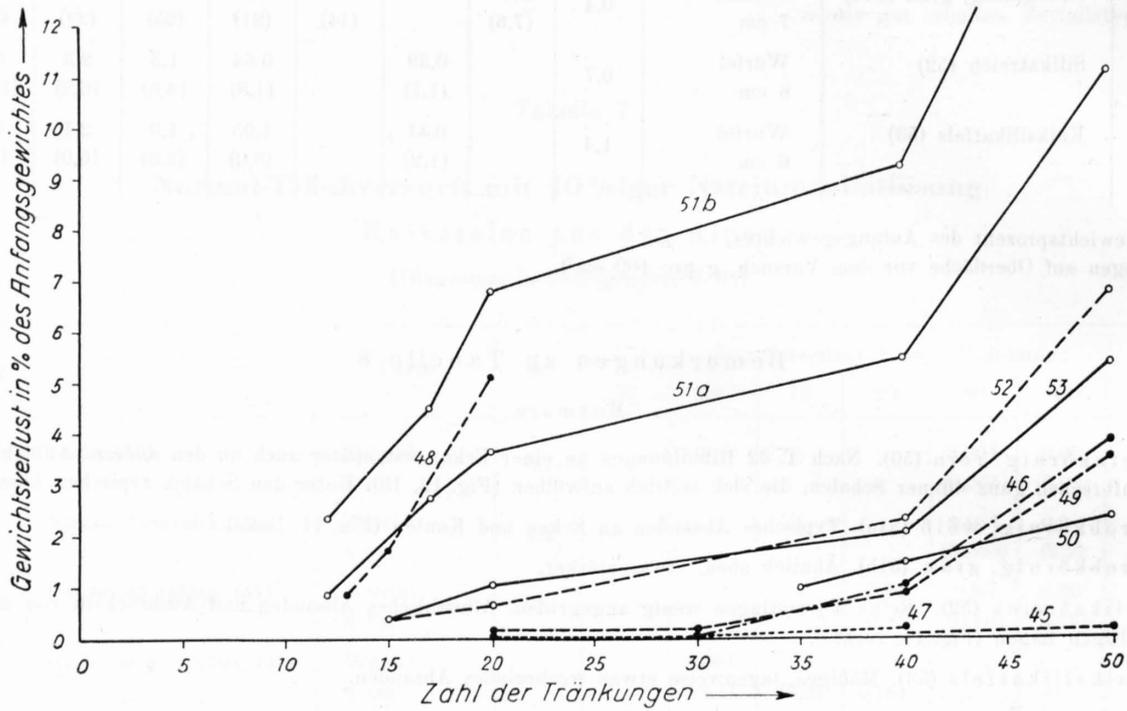


Diagramm 5.

Normaltränkversuch an alpinen Kalksteinen (●) und Marmoren (○) (Tabellen 7 und 8).

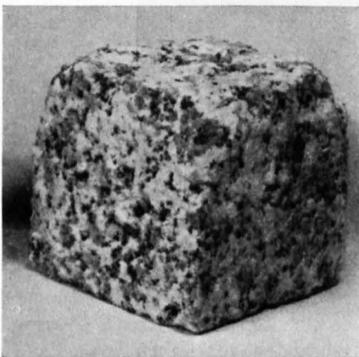


Fig. 14. Mont-Blanc-Granit (55) mit Absandung an den oberen Ecken und Kanten nach T. 50.

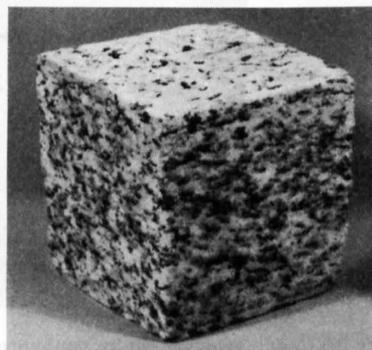


Fig. 15. Verzasca-Granitgneis (59) nach T. 50 mit geringfügigen Abblätterungen. Zerfallstyp E.

Tabelle 9

**Normal-Tränkversuch mit 10%iger Natriumsulfatlösung**

**Kristalline Gesteine**

(Diagramm 6, Petrographie S. 63)

Ver- suchs- Nr.		Form	n	Gesteinsverlust * nach Trängung:					
				10	15	20	30	40	50
70	Aaregranit, feinkörnig aplitisch (54)	Pflasterstein 8 cm	1,5	0,19 (0,70)	0,66 (2,4)	1,58 (5,7)	2,4 (8,7)	3,0 (11)	3,2 (11,5)
71	Montblanc-Granit, mittel- bis grobkörnig (55)	Würfel 8 cm	2,9	0,47 (1,7)	0,96 (3,7)	1,5 (5,6)	1,7 (6,3)	3,1 (12)	4,3 (16)
72	Fibbiagranitgneis (56)	Handstück 7×6×3 cm	1,1	0,11 (0,26)	0,92 (2,1)	2,8 (6,6)	(25)4,3 (10)	8,6 (20)	10,7 (28)
73	Quarzdiorit (57)	Handstück 10×8×3 cm	1,1	0,08 (0,22)	0,17 (0,44)	0,31 (0,82)			
74	Granophyr (58)	Würfel 8 cm	2,0	0,10 (0,33)	0,14 (0,47)	0,23 (0,79)	0,37 (1,1)	0,62 (2,1)	0,66 (2,2)
	Tessinergranitgneise								
75	Verzascatypus (59)	Würfel 6,3 cm	2,2			0,02 (0,06)	0,13 (0,32)	0,22 (0,60)	0,26 (0,72)
76	Feinkörniger, dunkler Typus (60)	Würfel 8 cm	1,8	0,03 (0,12)	0,04 (0,13)	0,23 (0,83)	0,26 (0,96)	0,31 (1,2)	0,34 (1,3)
77	Bodiotypus (61)	Würfel 7 cm	1,1	0,07 (0,22)	0,22 (0,63)	0,60 (1,8)	0,88 (2,6)	1,0 (3,0)	1,1 (3,2)
78	Crescianotypus (62)	Würfel 7 cm	1,8			0,27 (0,72)	0,38 (1,2)	0,42 (1,3)	0,46 (1,4)
	Granitporphyrgneis (63)								
79	(Roffnagneis) Probe 1	Handstück 8×8×6 cm	0,7	0,16 (0,53)	0,35 (1,2)	0,76 (2,5)			
80	Probe 2	Würfel 6 cm	0,7		0,27 (1,0)	0,72 (2,9)	1,35 (5,1)	2,4 (9,1)	2,5 (9,3)
81	Phengit-Plattengneis (Adula) (64)	Würfel 7 cm	2,6		0,85 (2,7)	1,69 (5,4)			
82	Antigoritserpentin (65)	Würfel 8 cm	0,4						0,01 (0,04)

\* In Gewichtsprozent des Anfangsgewichtes  
(bezogen auf Oberfläche vor dem Versuch, g pro 100 cm<sup>2</sup>).

**Bemerkungen zu Tabelle 9**

**Kristalline Gesteine**

- 70 Aaregranit, feinkörnig, aplitisch (54). Absplitterungen und Absandungen an Ecken und Flächen.  
 71 Mont-Blanc-Granit, mittel- bis grobkörnig (55). Absanden vor allem an den obern Ecken (Fig. 14).  
 72 Fibbiagranitgneis (56). Absanden und leichteres Ausbröckeln besonders an Ecken.  
 73 Quarzdiorit (57). Leichtes Absanden.  
 74 Granophyr (58). Oberflächliche Absplitterungen.  
 Tessinergranitgneise.  
 75 Verzascatypus (59). Geringes Abblättern auf Lager und an Kanten (Fig. 15).  
 76 Feinkörniger, dunkler Typus (60). Geringes Abblättern am Lager, Glimmerlagen z. T. etwas aufgelockert.  
 77 Bodiotypus (61). Geringe Absplitterungen auf Lager, schwaches Ansarbeiten der Glimmerlagen.  
 78 Crescianotypus (62). Wie oben.

Granitprophyrgneis.

- 79 und 80 Roffnagneis (63). Bei beiden Proben Absandungen sowohl auf Flächen senkrecht wie parallel zur Schieferung. Ausarbeiten der Glimmerlagen (Fig. 16).  
 81 Phengit-Plattengneis (Adula) (64). Absandung und Abblätterung auf Lager und an den Kanten (Fig. 17).  
 82 Antigoritserpentin (65). Kaum verändert.

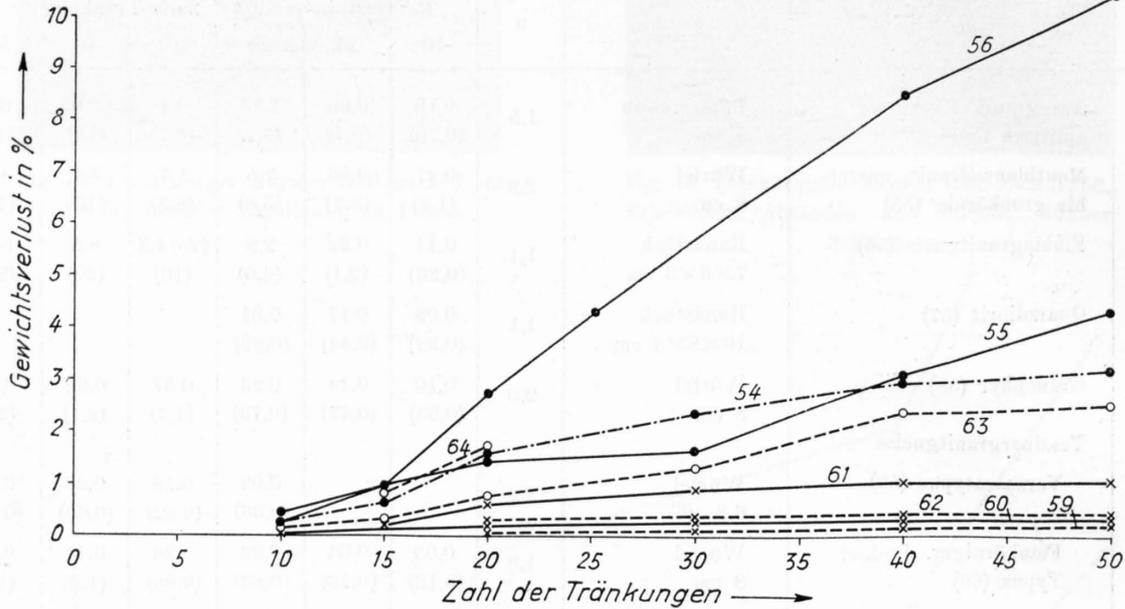


Diagramm 6.

Normaltränkversuch an kristallinen Gesteinen. Massivgranite (●) Tessinergranitgneise (×) und weitere kristalline Gesteine (○) (Tabelle 9).

Tabelle 10

**Normal-Tränkversuch mit 10 %iger Natriumsulfatlösung**  
 Mörtelproben

Ver- suchs- Nr.		Gesteinsverlust * nach Tränkung:					Bemerkungen
		5	10	15	20	40	
83	A Normensand EMPA 0/6 mm, 1 : 6	0,59 (1,10)	0,88 (1,60)	5,28 (9,60)	10,6 (19,0)		Nach T. 25 fast vollständiger Zerfall der Probe (Fig. 18).
84	B Normensand Müriken 0/6 mm, 1 : 3	0,07 (0,13)	0,10 (0,20)	0,18 (0,33)	0,38 (0,74)	0,45 (0,87)	Geringes Abbröckeln. Nach T. 15 Auftreten von Rissen von oben nach unten, die sich bis T. 40 nur langsam verstärken (Fig. 19, links).
85	C Normensand Oberdieß- bach, einkörnig, 1 : 3	0,16 (0,30)	1,12 (1,90)	2,0 (3,3)	2,8 (4,7)	3,4 (5,7)	Absanden vor allem an Ecken. Ribbildung auf Flächen (Fig. 19, rechts).

\* In Gewichtsprozent des Anfangsgewichtes (bezogen auf Oberfläche vor dem Versuch, g pro 100 cm<sup>2</sup>).

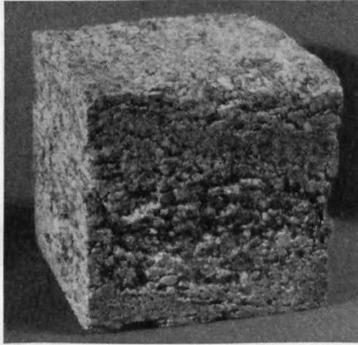


Fig. 16. Granitporphyrgneis (63) mit Ausbröckelungen auf Flächen nach T. 50.

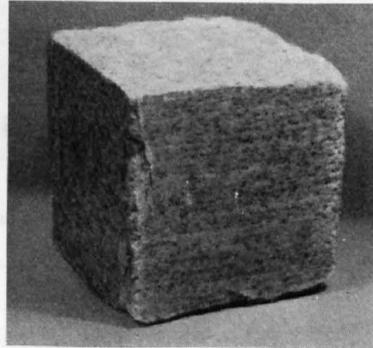


Fig. 17. Feinlagig-schieferiger Gneis (Adula) (64) mit kleinen Ausbröckelungen an Ecken und Kanten nach T. 20.

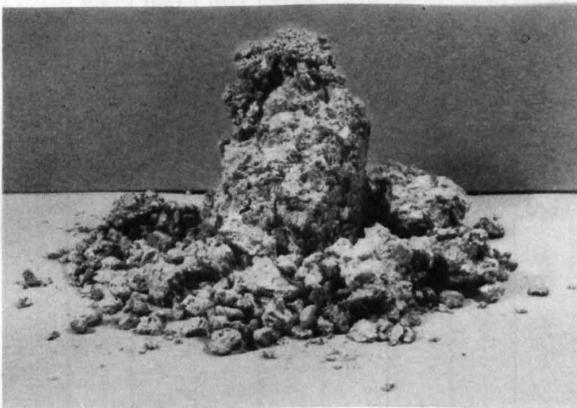


Fig. 18. Mörtel 1:6 (A) nach T. 25

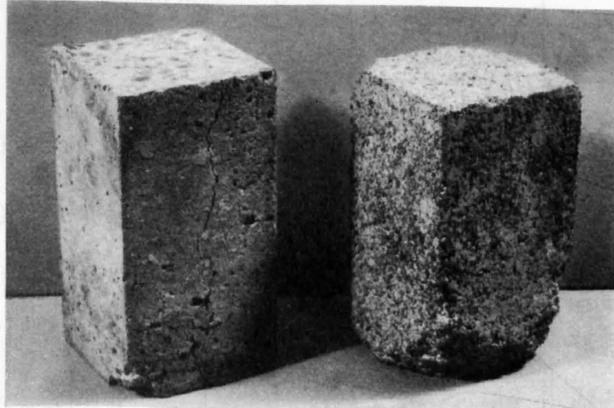


Fig. 19. Links Mörtel 1:3 (B) nach T. 40 (Rißbildung), rechts Mörtel 1:3 (C) nach T. 40 (Absanden).

### b) Versuche mit 5-Minuten-Tränkung.

Bei einigen stark wassersaugenden Sandsteinen wurden zur Ermittlung der Einwirkungen der nur oberflächlichen Lösungsaufnahme Tränkungen von jeweils nur 5 Minuten Dauer, bei sonst gleichen Bedingungen vorgenommen (siehe die Tabellen 11, 12 und das Diagramm 7).

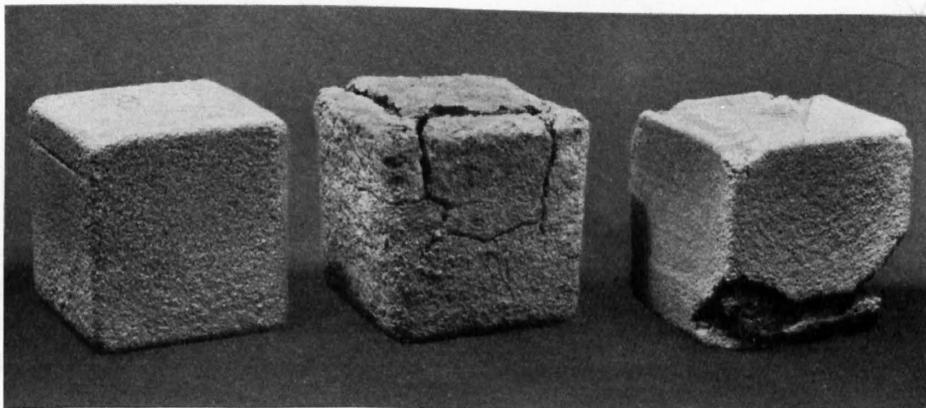


Fig. 20. Bernersandsteinproben nach 5-Minuten-Versuch. Links Nr. 9 nach T. 5, Mitte Nr. 13 nach T. 3, rechts Nr. 5 nach T. 5.

Tabelle 11

**Versuch mit 5-Minuten-Tränkung mit 10%iger Natriumsulfatlösung**

**Sandsteine vom Bernertypus**

(Diagramm 7, Petrographie S. 54)

Versuchs-Nr.	Würfel 7 cm Varietäten	n	Gesteinsverlust * nach Tränkung:													
			2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
86	Sehr feinkörnig (1)	13,9		0,01 (0,02)	0,02 (0,04)		0,03 (0,11)	0,07 (0,21)	0,1 (0,42)	0,2 (0,7)	0,3 (1,0)	0,5 (1,4)	0,7 (2,0)	1,0 (2,9)	1,3 (3,7)	7,3 (21)
87	Feinkörnig (3)	16,9		0,06 (0,18)	0,1 (0,31)	0,2 (0,63)	0,4 (1,2)	0,8 (2,2)	1,3 (3,4)	1,9 (5,0)	3,0 (8,2)	4,0 (11)	6,0 (16)	8,6 (23)	11,1 (30)	
88	Feinkörnig (2)	16,9		0,06 (0,18)	0,2 (0,5)	0,4 (1,2)	1,0 (2,8)	1,9 (5,3)	3,7 (10,3)	7,6 (21)	14,3 (40)	22 (60)	29 (80)			
89	Mittelkörnig (7)	17,1	0,2 (0,4)	0,6 (1,5)	2,0 (4,9)	Z										
90	Mittelkörnig (9)	17,7	0,02 (0,07)	0,1 (0,28)	0,2 (0,6)	0,5 (1,5)	1,2 (3,7)	1,5 (4,4)	3,1 (9,0)	Z						
91	Feinkörnig (4)	18,0	0,2 (0,56)	0,5 (1,4)	1,2 (3,4)	2,3 (6,4)	7,9 (21)	Z								
92	Feinkörnig (5)	18,0	0,18 (0,46)	0,3 (0,95)	0,5 (1,4)	1,2 (3,2)	7,5 (20)	Z								
93	Mittelkörnig (10)	18,1	0,1 (0,21)	0,4 (1,0)	1,2 (3,2)	2,7 (7,2)	14,5 (39)	Z								
94	Mittelkörnig (8)	18,4	0,1 (0,18)	0,2 (0,63)	0,4 (1,2)	0,7 (1,9)	2,0 (5,0)	4,5 (12,7)	Z							
95	Grobkörnig (13)	21,0	0,6 (1,7)	2,7 (7,3)	Z											
96	Feinkörnig (6)	21,4	0,3 (0,84)	0,5 (1,2)	0,9 (2,1)	3,9 (9,2)	Z									
97	Mittelkörnig (11)	21,7	0,3 (0,8)	1,2 (3,2)	3,3 (8,6)	Z										
98	Mittelkörnig (12)	24,3	1,8 (4,7)	3,8 (9,7)	Z											

Z = starker Zerfall.

\* In Gewichtsprozent des Anfangsgewichtes  
(bezogen auf Oberfläche vor dem Versuch, g pro 100 cm<sup>2</sup>).

**Bemerkungen zu Tabelle 11**

**Sandsteine vom Bernertypus**

- 86 Sehr feinkörnig (1). Nach T. 15 Bildung von dünnen (2—3 mm) Schalen.
- 87 Feinkörnig (3). Absanden, nach T. 14 oben Bildung von Schalen.
- 88 Feinkörnig (2). Starkes Absanden. Kern festbleibend.
- 89 Mittelkörnig (7). Nach T. 5 starke Risse und vollständiger Zerfall der Probe.
- 90 Mittelkörnig (9). Zuerst leichtes Absanden. Bei T. 8 Abfallen der Ecken und Andeutung von Schalenbildung (Fig. 20, links).
- 91 Feinkörnig (4). Absanden. Bei T. 6 Abfallen der Ecken und z. T. der senkrechten Kanten, Andeutung von Schalen.
- 92 Feinkörnig (5). Absanden, bei T. 6 teilweises Abfallen von Ecken und Kanten, dann Schalenbildung (Fig. 20, rechts).

- 93 Mittelkörnig (10). Starkes Absanden. Bei T. 6 Abfallen der senkrechten Kanten.
- 94 Mittelkörnig (8). Zuerst leichtes Absanden. Bei T. 7 Abfallen der Ecken, Andeutung von Schalen.
- 95 Grobkörnig (13). Absanden. Bildung von Rissen und dicken Schalen (Fig. 20, Mitte).
- 96 Feinkörnig (6). Nach T. 5 Kanten und Ecken z. T. abbrechend.
- 97 Mittelkörnig (11). Absanden. Bei T. 4 Bildung von Rissen und Schalen.
- 98 Mittelkörnig (12). Probe bei T. 4 vollständig auseinanderfallend.

Tabelle 12

**Versuch mit 5-Minuten-Tränkung mit 10%iger Natriumsulfatlösung**  
**Granitische und Platten-Sandsteine**  
 (Diagramm 7, Petrographie S. 57)

Versuchs-Nr.	Varietäten Würfel 7 cm	n	Gesteinsverlust * nach Tränkung:								
			5	9	12	14	16	18	20	22	24
99	Sehr feinkörnig (15)	6,3	0,01 (0,04)	0,02 (0,06)	0,03 (0,09)	0,04 (0,14)	0,07 (0,21)	0,10 (0,28)	0,12 (0,39)	0,27 (0,88)	0,44 (1,4)
100	Grobkörnig (19)	8,2	0,01 (0,04)	0,04 (0,13)	0,25 (0,77)	0,57 (1,80)	1,75 (5,3)	2,2 (6,9)	3,6 (11,1)	4,9 (15)	7,0 (21)
101	Mittelkörnig (17)	9,8	0,02 (0,07)	0,05 (0,14)	0,84 (2,30)	1,3 (3,4)	1,8 (4,8)	2,8 (7,7)	5,8 (16)	9,0 (25)	12,2 (34)
102	Mittelkörnig (17a)	9,8	0,03 (0,09)	0,05 (0,16)	0,83 (2,50)	2,2 (6,6)	3,1 (9,2)	4,8 (14)	8,7 (26)	11 (33)	18 (52)
103	Mittelkörnig (18)	10,1	0,01 (0,04)	0,04 (0,12)	0,76 (2,20)	1,3 (3,8)	1,8 (5,0)	2,5 (7,2)	5,9 (17)	9,7 (28)	14,3 (42)
104	Plattensandstein (22)	7,4	0,01 (0,03)	0,02 (0,07)	0,03 (0,14)	0,09 (0,25)	0,13 (0,32)	0,15 (0,46)	0,24 (0,70)	0,43 (1,3)	0,83 (2,4)

\* In Gewichtsprozent des Anfangsgewichtes  
 (bezogen auf Oberfläche vor dem Versuch, g pro 100 cm<sup>2</sup>).

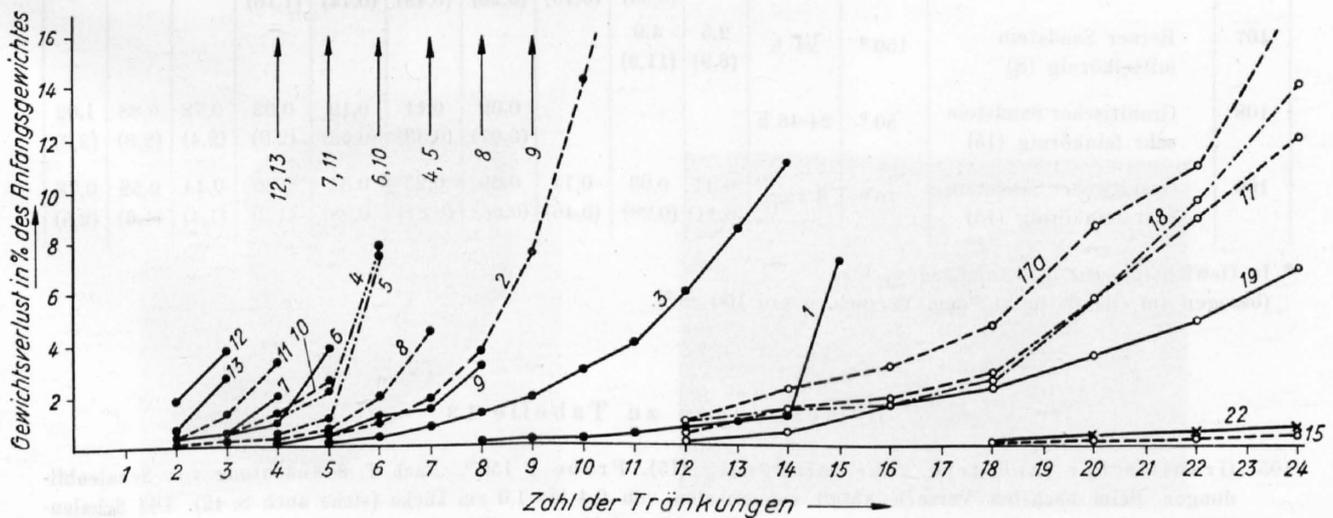


Diagramm 7.

Versuch mit 5-Minuten-Tränkung in 10%iger Natriumsulfatlösung an verschiedenen Sandsteinen der Molasse. Berner-sandsteine (●), granitische Sandsteine (○) und Plattensandsteine (×) (Tabellen 11 und 12).

Bemerkungen zu Tabelle 12

Granitische und Platten-Sandsteine

- 99 Sehr feinkörnig (15). Geringes Absanden. Nach T. 25 an Ecken dünne Schalen abgebrochen, ebenso unten Andeutung einer dünnen Schale.
- 100 Grobkörnig (19). Absanden. Andeutung einer dünnen Schale, die bei den letzten Tränkungen partienweise ausbrach.
- 101 Mittelkörnig (17). Absanden, Ecken und Kanten ausbrechend.
- 102 Mittelkörnig (17a). Starkes Absanden. Abrundung der Ecken und Kanten.
- 103 Mittelkörnig (18). Absanden. Ecken und Kanten abgerundet.
- 104 Plattensandstein (22). Geringes Absanden. Nach T. 24 unten Andeutung einer dünnen Schale, deren Ecken und Kanten abbrachen.

c) Versuche mit anderen Trocknungsbedingungen.

In Tabelle 13 und Diagramm 8 sind einige Vergleichsversuche an Sandsteinen aufgezeichnet, deren Trocknung einerseits bei höherer Temperatur (150°), also rascher, andererseits bei tieferen Temperaturen (50° und Zimmertemperatur), also langsamer erfolgte als beim Normalversuch. Beim letzteren Versuch dauerte die Trocknung jeweils 6 Tage.

Tabelle 13

Versuche mit andern Trocknungsbedingungen

24 h Lagerung in 10%iger Natriumsulfatlösung, Trocknung nach Angabe

Ver- suchs- Nr.		Tempe- ratur	Zeit Trocknung	Gesteinsverlust * nach Trängung:										
				2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
105	Granitischer Sandstein sehr feinkörnig (15) Probe 1	150°	24 h		0,10 (0,36)	0,16 (0,53)	0,29 (0,97)	0,45 (1,10)	0,56 (1,80)	0,82 (2,60)				
106	Probe 2				0,01 (0,04)	0,03 (0,10)	0,09 (0,28)	0,16 (0,49)	0,24 (0,74)	0,36 (1,10)				
107	Berner Sandstein mittelkörnig (8)	150°	24 h	2,5 (6,9)	4,0 (11,3)									
108	Granitischer Sandstein sehr feinkörnig (15)	50°	24-48 h				0,02 (0,07)	0,11 (0,35)	0,19 (0,63)	0,62 (2,0)	0,72 (2,4)	0,88 (2,8)	1,02 (3,3)	
109	Granitischer Sandstein sehr feinkörnig (15)	16°	6 Tage	0,03 (0,11)	0,09 (0,28)	0,14 (0,46)	0,20 (0,68)	0,25 (0,81)	0,31 (0,98)	0,36 (1,2)	0,44 (1,4)	0,52 (1,6)	0,78 (2,5)	

\* In Gewichtsprozent des Anfangsgewichtes  
(bezogen auf Oberfläche vor dem Versuch, g pro 100 cm<sup>2</sup>).

Bemerkungen zu Tabelle 13

- 105 Granitischer Sandstein, sehr feinkörnig (15). Probe 1 150°. Nach T. 8 Andeutung von Schalenbildungen. Beim nächsten Versuch Abfall von Schalen von 0,4 bis 1,0 cm Dicke (siehe auch S. 42). Die Schalenbildung erfolgte somit etwas rascher als beim Normalversuch.
- 106 Granitischer Sandstein, sehr feinkörnig (15). Probe 2 150°. Nach T. 8 wurde der Stein in zwei Hälften zerschlagen, dabei lösten sich durch die Einwirkung der Schläge von selbst auf allen Seiten Schalen von 0,5 cm Dicke ab. Bei erneuter Trängung des innern Teiles der Probe lösten sich 1—2 weitere Schalen ab.

- 107 Bernersandstein, mittelkörnig (8). Bei T. 4 bildeten sich durchgehende Diagonalrisse, gleichzeitig lösten sich 1 cm dicke Schalen vom Innern ab (Fig. 21).
- 108 Granitischer Sandstein, sehr feinkörnig (15) 50°. Bei T. 12 bilden sich allseitige Schalen von ca. 1,2 cm Dicke, somit etwas später als beim 100° und 150° Versuch.
- 109 Granitischer Sandstein, sehr feinkörnig (15) 16°. Im Gegensatz zu allen Versuchen bei höherer Temperatur bedeckte sich die Probe beim Trocknen mit weißen Ausblühungen. Nach T. 8 erste Andeutung von Schalen (Risse). Nach T. 11 ließen sich leicht nur 2 mm dicke Schalen ablösen (Fig. 22).

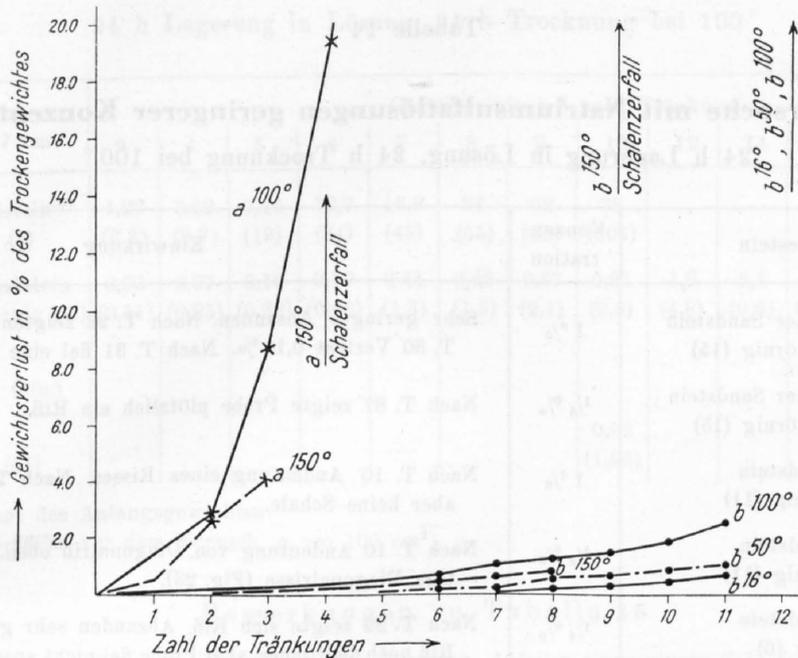


Diagramm 8.

Tränkversuche (10%ige Natriumsulfatlösung) mit verschiedenen Trocknungstemperaturen. a Bernersandstein, mittelkörnig (8), b granitischer Sandstein, sehr feinkörnig (15) (Tabelle 13).

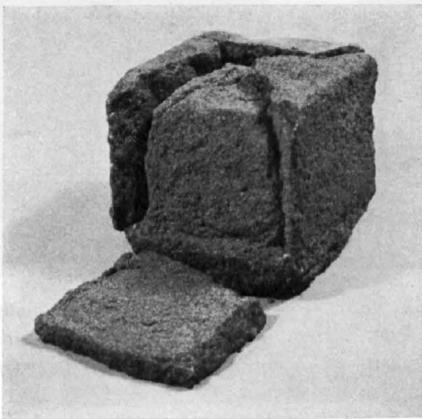


Fig. 21. Bernersandstein (8) nach T. 4 (Trocknung bei 150°) mit Schalen und Diagonalrisse auch im innern Teil.

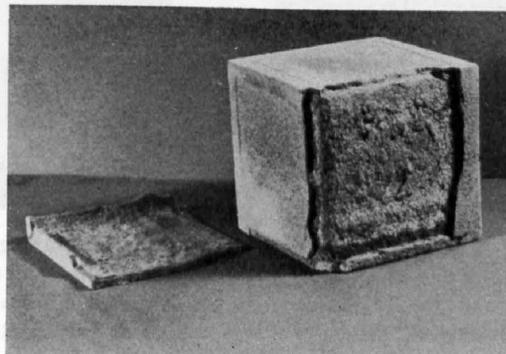


Fig. 22. Dünne Schalenbildung an sehr feinkörnigem granitischem Sandstein (15) nach T. 11, Trocknung bei Zimmertemperatur. Oberfläche der Probe mit Ausblühungen bedeckt.

**d) Versuche mit Lösungen geringerer Konzentration.**

In der Tabelle 14 werden einige Versuche aufgezeichnet, bei denen die Proben (Sandsteine) in Lösungen der Konzentration 1 0/0 und 1/4 0/0 lagerten (Trocknung bei 100°). Wie zu erwarten, machten sich erst nach wesentlich längerer Zeit Einwirkungen bemerkbar; diese wiesen überdies auch ganz andere Formen (siehe auch S. 34) auf.

Tabelle 14

**Tränkversuche mit Natriumsulfatlösungen geringerer Konzentration**

24 h Lagerung in Lösung, 24 h Trocknung bei 100°

Versuchs-Nr.	Gestein	Konzentration	Einwirkung
110	Granitischer Sandstein sehr feinkörnig (15)	1 0/0	Sehr geringes Absanden. Nach T. 22 zeigten sich Risse. Nach T. 30 Verlust 0,10 0/0. Nach T. 31 fiel eine Ecke ab.
111	Granitischer Sandstein sehr feinkörnig (15)	1/4 0/0	Nach T. 87 zeigte Probe plötzlich ein Riß.
112	Bernersandstein mittelkörnig (11)	1 0/0	Nach T. 10 Andeutung eines Risses. Nach T. 13 Diagonalriß aber keine Schale.
113	Bernersandstein mittelkörnig (11)	1/4 0/0	Nach T. 10 Andeutung von Diagonalriß oben. Nach T. 13 richtige Diagonalrisse (Fig. 23).
114	Bernersandstein feinkörnig (6)	1/4 0/0	Nach T. 22 zeigte sich Riß, Absanden sehr gering. Nach T. 24 Riß noch deutlicher, aber Probe fiel nicht auseinander (Fig. 24).

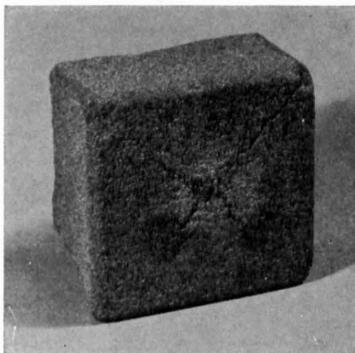


Fig. 23. Typische Diagonalrisse ohne Schalen an Bernersandstein (11) nach 13 Tränkungen in 1/4 0/0iger Natriumsulfatlösung.

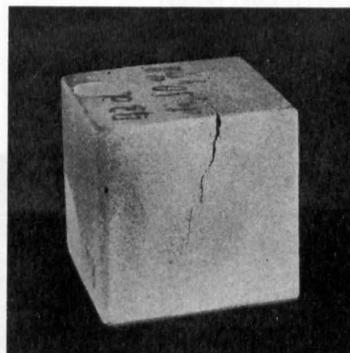


Fig. 24. Durchgehender Riß im Bernersandstein (6) nach 25 Tränkungen in 1/4 0/0iger Natriumsulfatlösung.

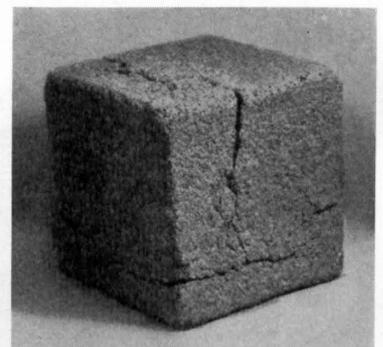


Fig. 25. Granitischer Sandstein (16) nach T. 29 in Natriumchloridlösung mit charakteristischen Querrissen.

## B. Tränkversuche mit Lösungen weiterer Ausblühungssalze.

Die Versuchsreihe mit den weitem Salzen wurde nur an einer Auswahl von Gesteinen durchgeführt, aus praktischen Gründen an einigen leicht angreifbaren Sandsteinen und Jurakalksteinen. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 15 bis 17 und zum Teil im Diagramm 9 zusammengestellt.

Tabelle 15

### Tränkversuche mit 10%iger Magnesiumsulfatlösung

24 h Lagerung in Lösung, 24 h Trocknung bei 100°

Versuchs-Nr.	Gestein, Würfel 7 cm	Gesteinsverlust * nach Tränkung:													
		3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	15	20	30	40
115	Bernersandstein feinkörnig (4)	1,26 (3,4)	3,62 (9,7)	7,16 (19)	12,7 (34)	16,9 (45)	24 (65)	32 (85)	39 (104)						
116	Granit. Sandstein sehr feinkörnig (15)	0,03 (0,11)	0,07 (0,25)	0,10 (0,32)	0,19 (0,60)	0,41 (1,3)	0,49 (1,5)	0,67 (2,1)	0,91 (2,8)	1,6 (4,8)	3,1 (9,6)	3,40 (10,7)			
117	Kalkstein groboolith. (40a)													0,01 (0,03)	
118	Kalkstein grobporös (44)								0,92 (1,90)				3,4 (6,8)	8,4 (17)	

\* In Gewichtsprozent des Anfangsgewichtes (bezogen auf Oberfläche vor dem Versuch, g pro 100 cm<sup>2</sup>).

### Bemerkungen zu Tabelle 15

- 115 Bernersandstein, feinkörnig (4). Starkes Absanden, Abfallen einer ganzen Ecke, im Innern Probe aber fest.
- 116 Granitischer Sandstein, sehr feinkörnig (15). Absanden an Ecken, Kanten und Flächen. An der Fläche oben Bildung einer 3 mm dünnen Schale.
- 117 Kalkstein groboolithisch (40a). Nach T. 30 fast ohne Veränderung.
- 118 Kalkstein grobporös (44). Allmähliche Bildung von Rissen mehr oder weniger parallel der Schichtung verbunden mit leichteren Absandungen vor allem an Kanten und Ecken (Fig. 26).

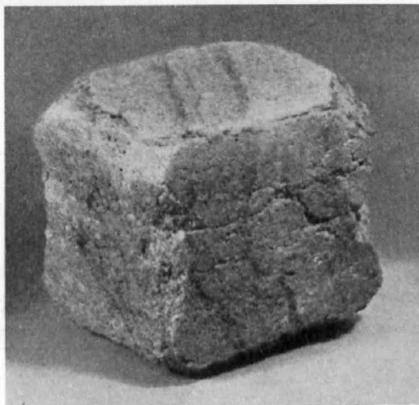


Fig. 26. Grobporöser spätiger Jurakalkstein (44) nach T. 30 in Magnesiumsulfatlösung. Abblättern an Ecken und Kanten und Hervortreten der dünnen Tönhäute.

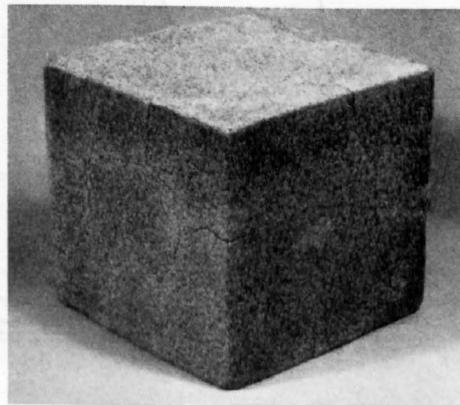


Fig. 27. Sehr feinkörniger granitischer Sandstein (15) nach 46 Tränkungen in Kaliumsulfatlösung.

Tabelle 16

**Tränkversuche mit 10%iger Natriumchloridlösung**

24 h Lagerung in Lösung, 24 h Trocknung bei 100°

Versuchs-Nr.	Gestein, Würfel 7 cm	Gesteinsverlust * nach Tränkung:											
		3	4	5	7	10	12	15	17	20	22	25	29
119	Bernersandstein grobkörnig (13)	1,31 (3,60)	3,2 (8,5)	9,7 (26)									
120	Granitischer Sandstein sehr feinkörnig (15) Probe 1			0,10 (0,32)	0,20 (0,63)	0,31 (0,98)	0,44 (1,30)	0,66 (2,0)	1,02 (3,1)	1,51 (4,7)			
121	Probe 2	0,04 (0,14)	0,07 (0,23)	0,10 (0,32)	0,15 (0,49)	0,26 (0,81)	0,33 (1,05)	0,47 (1,5)	0,65 (2,0)	0,81 (2,5)	1,01 (3,0)	1,3 (3,9)	
122	Granitischer Sandstein mittelkörnig (16)												2,0 (6,1)
123	Granitischer Sandstein mittelkörnig (17)					0,82 (2,3)							6,6 (17)

\*In Gewichtsprozent des Anfangsgewichtes (bezogen auf Oberfläche vor dem Versuch, g pro 100 cm<sup>2</sup>).

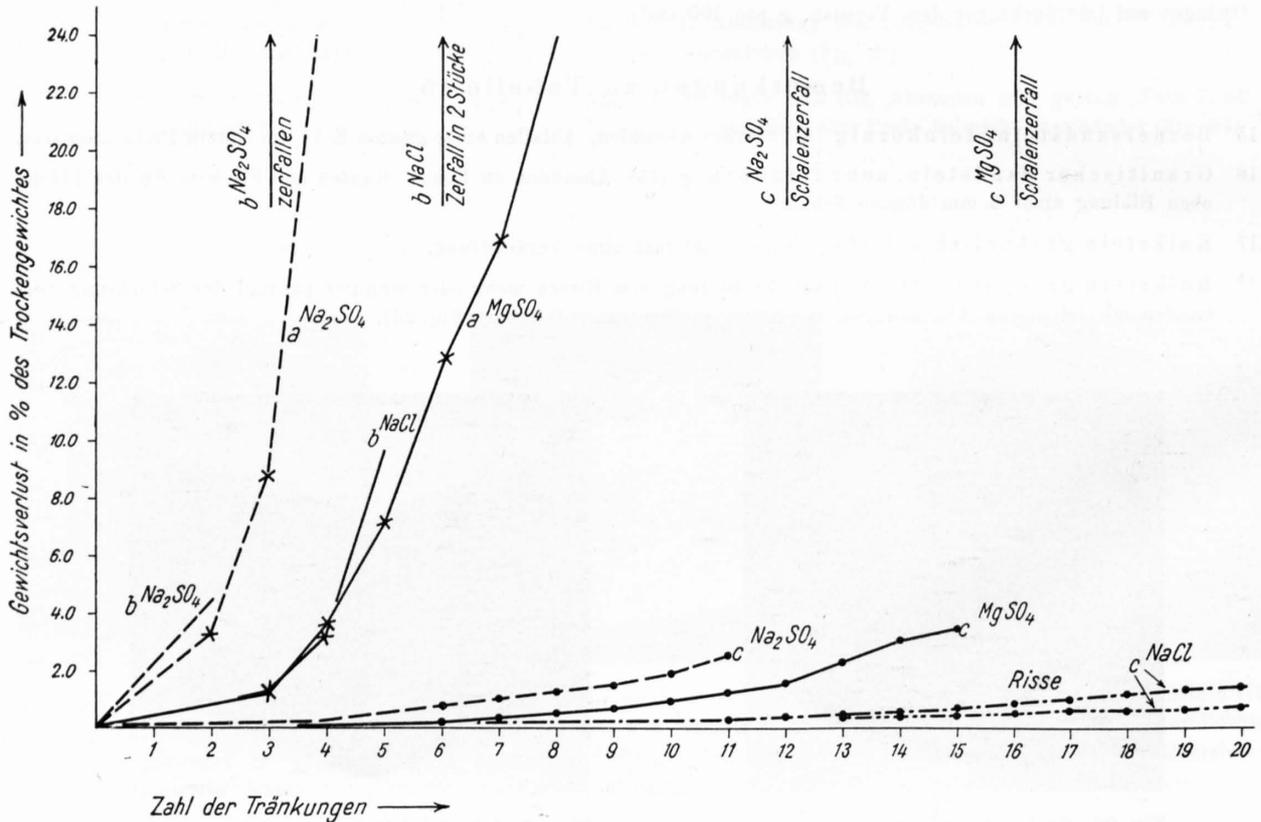


Diagramm 9.

Vergleich der Einwirkungen bei Tränkversuchen (10%ige Lösungen) mit verschiedenen Salzen. a Bernersandstein, feinkörnig (4), b Bernersandstein, grobkörnig (13), c granitischer Sandstein, sehr feinkörnig (15) (Tabellen 15 und 16).

Bemerkungen zu Tabelle 16

- 119 Bernersandstein, grobkörnig (13). Absanden, nach T. 5 Zerfall in zwei Stücke und starkes Abbröckeln.  
 120 und 121 Granitischer Sandstein, sehr feinkörnig (15). Bei beiden Proben geringes Absanden und charakteristische Risse senkrecht über die Kanten.  
 122 Granitischer Sandstein, mittelkörnig (16). Geringes Absanden. Nach T. 15 erster Riß. Bis T. 29 Verstärkung der Risse senkrecht zu den Kanten (siehe Fig. 25). Probe fiel aber nicht auseinander.  
 123 Granitischer Sandstein, mittelkörnig (17). Von Anfang an leichtes Absanden, besonders auf der oberen Horizontalfäche. Von T. 20 an leichte, aber charakteristische Rißbildung senkrecht über die Kanten.

Tabelle 17

Tränkversuche mit weiteren Salzlösungen

24 h Lagerung in Lösung, 24 h Trocknung bei 100°

Versuchs-Nr.		Gesteinsverlust * nach Tränkung:			Einwirkungen
		9	20	30	
124	Kaliumsulfatlösung (10%) Granitischer Sandstein (15) sehr feinkörnig (Würfel 7 cm)		0,11 (0,35)		Sehr geringes Absanden, bei T. 28 zeigten sich leichte Risse, langsame Verstärkung der Risse und Aufwölbung der Flächenmitten. Fig. 27 nach T. 46.
125	Bernersandstein feinkörnig, fest (2) Würfel 7 cm		3,41 (9,30)	4,7 (12,7)	Absanden an Ecken, Kanten und Flächen, aber keine Risse.
126	Kalkstein, grobporös (44) Würfel 5 cm		0,52 (1,0)	2,2 (4,3)	Mäßiges Absanden, zerfiel parallel der Schichtung bei T. 23 längs eisenschüssiger Tonhaut in zwei Stücke.
127	Gesättigte Calciumsulfatlösung (0,2%). Bernersandstein, mittelkörnig (10), Würfel 7 cm			0,04 (0,11)	Nach T. 35 unregelmäßige Risse. T. 39 Verstärkung derselben.
128	Gemisch von Natriumsulfat- und Natriumchloridlösung (je 5%). Granitischer Sandstein, sehr feinkörnig (15), Würfel 7 cm	0,33 (1,10)			Sehr geringes Absanden. Nach T. 9 oben Andeutung einer Schale, an den Flächen viele unregelmäßige Risse. Beim Halbieren der Probe Riß auch im Innern, der aber nicht bis an die Oberfläche reichte.

In Gewichtsprozent des Anfangsgewichtes  
(bezogen auf Oberfläche vor dem Versuch, g pro 100 cm<sup>2</sup>).

## 2. Aufsaugversuche.

Beim Aufsaugversuch lagerte die Probe in einer Schale mit einer Salzlösung von  $\frac{1}{2}$  cm Tiefe. Die Beanspruchung des Steines erfolgte durch die nach kapillarem Aufstieg an der Oberfläche oder im Innern des Steines durch das Verdunsten der Lösung aus- oder umkristallisierenden Salze. Die verdunstende Lösung wurde täglich durch Wasser ersetzt, so daß im Versuch stets die gleiche Salzmenge (natürlich nur teilweise in Lösung) blieb. Die Steine wurden somit nicht wie beim Tränkversuch abwechselnd getränkt und bei  $100^{\circ}$  getrocknet, sondern blieben ohne weitere Beeinflussung den normalen Feuchtigkeits- und Temperaturverhältnissen des Versuchsraumes ausgesetzt. Selbstverständlich konnten diese im Verlauf der wochenlangen Versuche nicht konstant gehalten werden. So schwankten die Temperaturen meist zwischen  $18$  und  $23^{\circ}$  (extreme Werte  $16$  und  $28^{\circ}$ ), die Feuchtigkeit zwischen  $55$  und  $90\%$ . Ein Teil des Salzes kristallisierte auch während der wärmeren Tage in der Schale aus, wurde aber jeweils durch den Wasserzusatz wieder in Lösung gebracht.

Um die Angriffe sichtbar zu machen und das Gelockerte zu bestimmen, wurden die Proben von der Salzkruste durch Abspritzen befreit. Das dabei in Lösung gehende Salz wurde bei der Fortsetzung des Versuches wieder in die Schale zurückgegeben. Nach 2-4 Wochen Versuchsdauer wurden die durch die Salzwirkung abgefallenen oder beim Abspritzen sich ablösenden Gesteinsmengen gewogen und in Prozenten bezogen auf die beim Versuch durch Aufsaugen befeuchtete Oberfläche der Probe (bei den meisten Proben mit ausreichender Genauigkeit feststellbar) angegeben. Als ebenso charakteristisch erwiesen sich aber die Formen des Gesteinsangriffes, die deshalb näher beschrieben und meist noch photographisch festgehalten wurden, wovon eine Auswahl Bilder hier beigegeben ist.

Die Hauptserien wurden mit Natriumsulfatlösung durchgeführt, daneben wurde bei Vergleichsversuchen Magnesiumsulfat, Kaliumsulfat, Natriumchlorid, Kaliumchlorid, Kaliumbromid, Kaliumjodid, Kaliumnitrat angewandt, letztere Salze besonders zur Feststellung der Einflüsse von Salzen sehr verschiedener Wasserlöslichkeit.

### A. Die Versuche mit Natriumsulfatlösung.

Die Resultate sind in den Tabellen 18 bis 20 zusammengestellt. Tabelle 18 umfaßt die Versuche an Würfeln von verschiedenartigen Gesteinen.

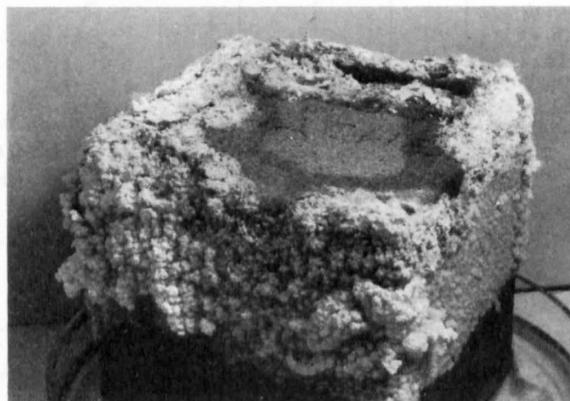


Fig. 28. Aufsaugversuch an granitischem Sandstein (16) in Natriumsulfatlösung. Starke Ausblühung mit Angriff der Gesteinsoberfläche nach 6 Tagen.



Fig. 29. Wie Fig. 28. Aufwölbung der Horizontalfläche nach 3 Wochen.

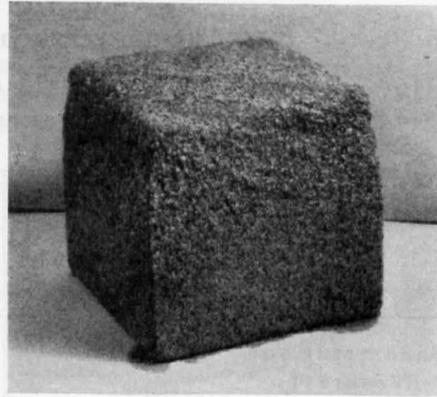


Fig. 30. Wie Fig. 28. Probe nach 5 Wochen, nach dem Abwaschen der Ausblühungen.

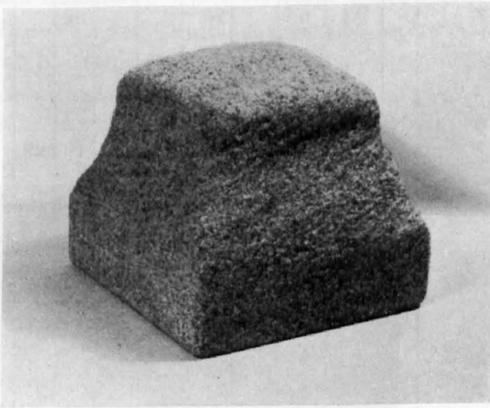


Fig. 31. Wie Fig. 28. Probe nach 18 Wochen, nach dem Abwaschen.

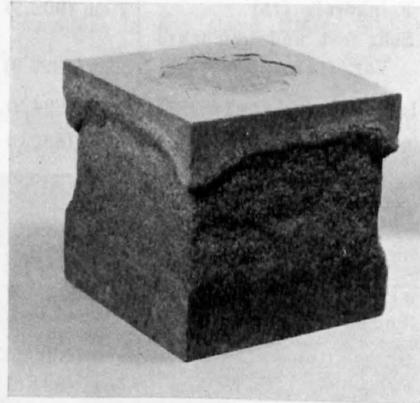


Fig. 32. Plattensandstein (21) nach Beendigung des Aufsaugversuches (abgewaschen).

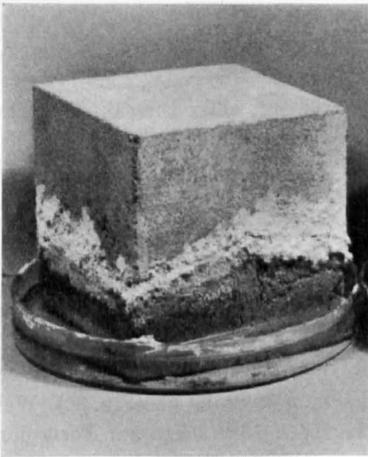


Fig. 33. Oolithischer Jurakalkstein (40) im Aufsaugversuch (nach 7 Wochen).

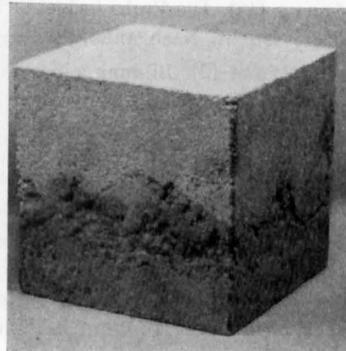


Fig. 34. Wie Fig. 33, abgewaschen.

Tabelle 18

**Aufsaugversuche mit Natriumsulfatlösung**

Probe in 10%ige Natriumsulfatlösung (1/2 cm hoch) gestellt und täglich verdunstete Flüssigkeit mit Wasser auf 1/2 cm ergänzt.

Ver- suchs- Nr.	Gestein	Dimension der Würfel Gewicht g	Befeuchtete Oberfläche in cm <sup>2</sup>	Mittlere Höhe des sichtbaren Feuchtigkeits- aufstieges in cm	Gesteinsverlust nach Anzahl Wochen bezogen auf befeuchtete Oberfläche, g pro 100 cm <sup>2</sup> :															
					2	3	5	7	9	11	12	13	15	18	20					
	Sandsteine vom Bernertypus																			
129	Mittelkörnig (12)	7 cm (717,8)	222	7		1,0														
130	Feinkörnig, fest (2)	7 cm (762,2)	222	7		1,0														
	Granitische Sand- steine																			
131	Grobkörnig (19)	7 cm (868,6)	222	7		7,5	10		23		24		26							29
132	Mittelkörnig (16)	7 cm (854,2)	222	7		13	31		75				99							118
133	Feinkörnig (15)	7 cm (902,5)	185	7		2,1	6,2		20				32							45
134	Sehr fest und kompakte Var. (14)	8 cm (1327,3)	168	6,5		1,3		11			19									27
135	Plattensandstein (21)	7 cm (894,2)	120	6,5		1,1	4,1		12,8				23							27
136	Sandstein (23)	7 cm (880,0)	220	7		1,6	3,2		9				19	29						32
137	Wealden-Sandstein (29)	7 cm (738,9)	230	7		0,48														
138	Muschelkalkstein (31)	7 cm (900,3)	170	6,5		0,6		1,5		4,1										4,7
	Kalksteine aus dem Juragebirge																			
139	Groboolithisch (40)	8 cm (1329,5)	130	5,5		0,39		1,8				3,7								4,5
140	Feinspätig (42)	7 cm (824,0)	230	7		1,3	4,5		12,5		19,5		25							33
141	Grobporös (44)	6 cm (294,4)	110	6	5,1			13		16										20
	Granitgneis																			
142	Porphyrisch (62)	7 cm (907,5)	110	4																0,1

**Bemerkungen zu Tabelle 18**

Sandsteine vom Bernertypus.

129 Mittelkörnig (12). Die Probe bedeckte sich im obersten Drittel rasch mit einer kompakten Salzkruste, darunter blieb der Stein feucht. Nach anfänglichem lokalem Absanden keine Veränderung mehr.

130 Feinkörnig, fest (2). Bildung einer kompakten Salzkruste. Im Anfangsstadium lokal leichtes Absanden, dann keine Veränderung des feucht bleibenden Steines mehr.

Granitische Sandsteine.

131 Grobkörnig (19). Am Anfang starke Ausblühungen im oberen Viertel mit Absandungen (Ecken, Flächen und Kanten). Nach 9 Wochen wurde die Salzkruste kompakt und der Stein veränderte sich darunter kaum mehr.

132 Mittelkörnig (16). Rasche Bildung (nach wenigen Tagen) von starken Ausblühungen in der oberen Hälfte, jedoch vorerst nicht in der Mitte der Horizontalfläche. Diese begann sich nach etwa einer Woche gegen den Rand aufzuwölben (Fig. 28, 29) und löste sich in dünnen Blättern vom Stein ab (Fig. 30). Weiterhin ständig starkes Absanden im Bereich der Ausblühungen, bis sich der Stein nach 18 Wochen zur Form der Fig. 31 abgetragen hatte.

133 Sehr feinkörnig (15) Ausblühungen anfänglich vorwiegend im Bereich 1,5–3 cm (nur lokal bis an den obern Rand) mit Absandungszonen in diesem Bereich. Später stieg das Salz allgemein höher, bis zur Horizontalfläche, diese aber nur randlich bedeckend. Entsprechend stieg auch der Absandungsbereich.

- 134 Sehr feste und kompakte Varietät (14). Ausblühungen anfänglich vorwiegend zwischen ca. 1,5 und 4 cm, verbunden mit Absanden. Später stiegen Ausblühungen und Absandungen bis gegen 6 cm; darüber war keine Veränderung im Stein feststellbar.
- 135 Plattensandstein (21).  
Ähnlich granitischem Sandstein, sehr feinkörnig (15). Absandung blieb etwas geringer und berührte obere Ecken und Kanten nicht. Gegen den Schluß stellte sich Abblättern in der Mitte der Horizontalfläche ein als Anzeichen, daß hier im Steininnern stärkerer Lösungsaufstieg erfolgte als randlich (Fig. 32).
- 136 Sandstein (23).  
Starke Ausblühung von unten bis über die oberen Kanten mit Absanden. Horizontalfläche blieb in der Mitte unangegriffen.
- 137 Wealden-Sandstein (29).  
Bildete rasch kompakte Salzkruste über den ganzen Würfel. Darunter blieb der Stein feucht. Abgesehen von einigen ganz dünnen Abblätterungen am Anfang traten keine Veränderungen auf.
- 138 Muschelkalkstein, sandreich (31).  
Ausblühungen anfänglich in der untern Hälfte, später bis an die Oberkanten steigend. Dazu mäßige (an Kanten stärker als an Flächen) Absplitterungen im Ausblühungsbereich.  
Kalksteine aus dem Juragebirge.
- 139 Groboolithisch (40). Unregelmäßige Ausblühungen in der untern Hälfte (Fig. 33) der Probe mit kleinen Absplitterungen, stärker parallel als senkrecht zur Schichtung (Fig. 34).
- 140 Feinspätig (42). Ausblühungen bis an obere Kante mit anfänglich geringen Absplitterungen. Nach neun Wochen wurden von der Horizontalfläche ganz dünne Blätter (ca.  $\frac{1}{2}$  mm) abgehoben (Fig. 35, 36). Nachher weiter starkes Abblättern, wobei die obere Ecken relativ gut erhalten blieben (Fig. 37).
- 141 Grobporös (44). Ausblühungen und starke Abbröckelungen besonders in der oberen Hälfte inkl. Horizontalfläche. Im Gegensatz zur feinspätigen Varietät (42) wurden die Ecken stark angegriffen.
- 142 Granitgneis, porphyrisch (62).  
Oberflächliche Salzkruste in der untern Hälfte. Minime Abblätterungen nach 20 Wochen feststellbar.

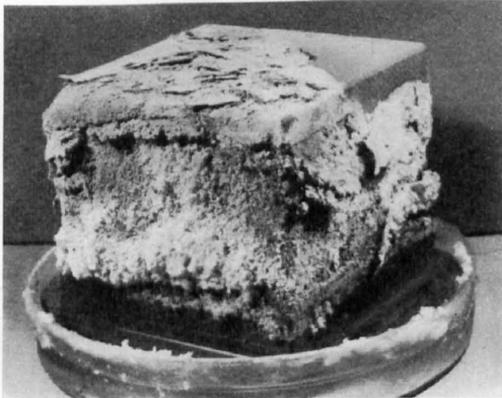


Fig. 35. Feinspätiger Jurakalkstein (42) im Aufsaugversuch nach 9 Wochen.



Fig. 36. Wie Fig. 35. Nach dem Abwaschen hebt sich eine dünne Gesteinshaut von der Horizontalfläche.



Fig. 37. Feinspätiger Jurakalkstein (42). Endstadium nach 20 Wochen Lagerung im Aufsaugversuch.

Tabelle 19 umfaßt einige Vergleichsversuche an größeren Prismen von Sandsteinen.

Tabelle 19

**Aufsaugversuche an Prismen**

(entsprechend Tabelle 18)

Versuchs-Nr.	Gestein	Größe	Gesteinsverlust * nach Wochen:			
			3	5	10	14
143	Bernersandstein	20×20×5		6,7	} Wegen zu geringen Veränderungen } Versuch nicht mehr fortgesetzt.	
144	Bernersandstein	20×20×5		6,3		
145	Bernersandstein	20×20×5		23,5		41
146	Sandstein von Echarlens	20×10×5	4 8		19	

\* Bezogen auf befeuchtete Oberfläche (g pro 100 cm<sup>2</sup>).

Alle Prismen wurden mit einer Schmalfläche in Lösung gestellt. Die drei Bernersandsteinproben waren nach ca. 12 bis 24 Stunden bis oben feucht und begannen Salz auszuscheiden. Zwei Proben Vers.-Nr. 143 und 144 (1 und 2) wurden in der Lösung belassen; sie zeigten in den ersten Wochen lokale Aufbrüche mit Absandung; allmählich wurden die Salzkrusten kompakter und die Absandungen hörten fast auf.

Die Probe 3 (Vers.-Nr. 145) wurde je zwei bis vier Tage in die Lösung gestellt und außerhalb der Lösung bei Zimmertemperatur gelagert. Diese Probe zeigte viel stärkeres Absanden und Abblättern. Dieses erfolgte vorwiegend während der Trocknungsperioden, bei welchen auch die Salzkruste unter Wasserverlust locker wurde und abfiel.

Der weniger poröse Stein von Echarlens (Vers.-Nr. 146) wurde nur auf 4—10 cm Höhe feucht (mit Salzausblühungen). Er zeigte dementsprechend die Aushöhlungen in diesem Bereich (Fig. 38, 39) ähnlich dem Sandstein 23 (Tabelle 18).

Eine weitere Vergleichsserie betraf Prismen (7×4×4 cm) von Mörtel.

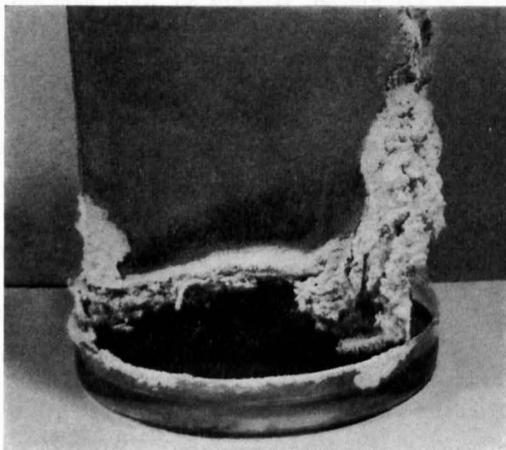


Fig. 38. Prisma aus Molassesandstein im Aufsaugversuch nach 7 Wochen.

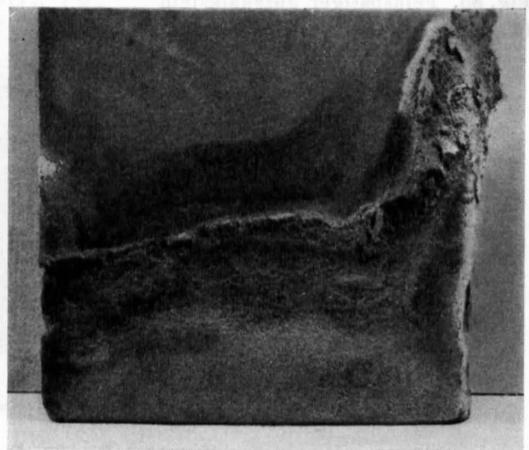


Fig. 39. Wie Fig. 38 nach dem Abwaschen der Ausblühungen.

Tabelle 20

**Aufsaugversuch an Mörtelproben**

(entsprechend Tabelle 18)

Ver- suchs- Nr.	Mörtel	Befeuchtete Oberfläche in cm <sup>2</sup>	Gesteinsverlust nach An- zahl Wochen bezogen auf befeuchtete Oberfläche, g pro 100 cm <sup>2</sup> :				Bemerkungen
			3	5	12	20	
147	A Normensand EMPA 0/6 mm, 1:6	80	2,6	4,9	7,5	8,1	Ausblühen auf einer Seite nur im Be- reich 0—2 cm, auf den and. bis zur obern Kante steigend, stellenweise mit Absprengung der dünnen Ober- flächenzementhaut (Fig. 40). Hauptabsandung in 3—4 cm Höhe (Fig. 41).
148	B Normensand Möriken 0/6 mm, 1:3	70	0,43	1,4	2,0	2,1	Ausblühungen nur bis ca. 3 cm mit geringem Absanden.
149	C Normensand Ober- dießbach einkörn., 1:3	70	0,43	1,1	1,4	1,6	Ausblühungen bis ca. 3 cm, geringes Absanden.

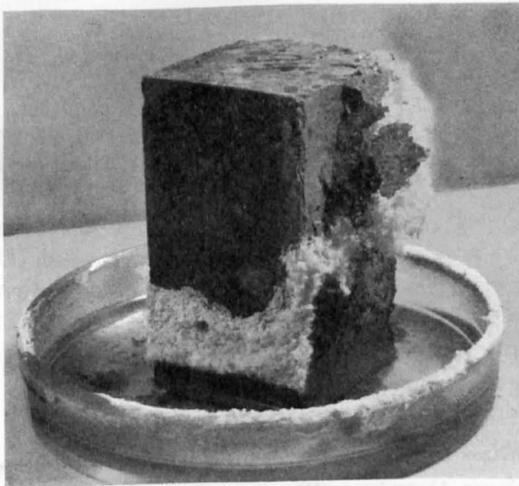


Fig. 40. Mörtelprobe (A) im Aufsaugversuch. Deutlich das Wegschieben dünner Blätter von der Oberfläche (nach 9 Tagen).



Fig. 41. Mörtelprobe (A) nach 12 Wochen Lagerung im Aufsaugversuch (abgewaschen).

**B. Versuche mit andern Salzen.**

In der Tabelle 21 ist eine Versuchsserie an Prismen des sehr feinkörnigen granitischen Sandsteines (15) aufgezeichnet, die mit 8 Salzen verschiedener Löslichkeit und Struktur durchgeführt wurde. Dabei wurden in allen Fällen anfänglich die gleichen Salz mengen (aequivalent) in 50 ccm Wasser gelöst zugesetzt. Es wurde von einer Kaliumsulfatmenge (als schwerlöslichem Salz) ausgegangen, die mit 50 ccm Wasser eine gesättigte Lösung ergibt. Die andern Salzlösungen wiesen dabei natürlich sehr unterschiedliche Sättigungen auf.

Die Versuche mit KNO<sub>3</sub> und KCl wurden wiederholt mit einer Salzmenge (aequivalent), die einer 44%igen Sättigung (der 50 ccm Lösung) entspricht (= der Sättigung der Natriumsulfatlösung in der obigen Reihe).

Tabelle 21

**Aufsaugversuch mit äquivalenten Mengen verschiedener Salze an Prismen des sehr feinkörnigen granitischen Sandsteines (15)**

Probe in Lösung ( $\frac{1}{2}$  cm hoch) gestellt und täglich mit Wasser auf  $\frac{1}{2}$  cm ergänzt

Versuchs-Nr.	Salz	Gewicht g	Konzentration %	Sättigung %	Gesteinsverlust nach Anzahl Wochen bezogen auf befeuchtete Oberfläche g pro 100 cm <sup>2</sup> :		
					4	12	21
150	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4,0	8	44	1,1	11	42 (zerfällt)
151	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4,9	9,8	98	0,32	—	0,85
152	MgSO <sub>4</sub>	3,38	6,76	27	0,33	13,2 (zerfällt)	
153	KCl	2,08	4,16	12,2	Kein meßbarer Verlust		
154	KBr	3,32	6,64	10,2	Kein meßbarer Verlust		
155	KJ	4,67	9,34	6,6	Kein meßbarer Verlust		
156	KNO <sub>3</sub>	2,84	5,68	18,9	Kein meßbarer Verlust		
157	NaCl	1,63	3,26	9,05	0,09	—	0,85
158	KNO <sub>3</sub>	6,61	13,22	44	Kein meßbarer Verlust		
159	KCl	7,5	15	44	Kein meßbarer Verlust		

Bemerkungen zu Tabelle 21

- 150 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Analoges Verhalten wie beim Würfelversuch. Ausblühungen zuerst auf den Seitenflächen, nach einigen Wochen auch auf Horizontalfläche, verbunden mit Absanden (Fig. 44, rechts, 46). Nach ca. 21 Wochen verlor die Probe eine innen gewölbte dünne Kappe. Eigenartig ist die auf allen Kanten und Flächen feststellbare Einbuchtung ca. 1 cm über der Basis (Fig. 45, rechts).
- 151 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Die Probe zeigte nur wenig sichtbare Salzausblühungen, erhielt aber allmählich 1—2 mm dicke, runzelige Schalen. Diese verstärkten sich nur langsam und fielen auch nach 21 Wochen nicht von selbst ab (Fig. 47, links).
- 152 MgSO<sub>4</sub>. Rasche Bildung von beulenartigen Ausbrüchen, zuerst in der Mitte (Fig. 43), nach 12 Wochen oben (Fig. 44, links) gleichzeitig Zerfall der Probe in zwei Stücke mit gewölbten Trennflächen (Fig. 45, links).
- 153 KCl. Bildung einer gleichmäßigen dünnen Salzkruste fast ohne Absanden.
- 154 KBr. Bildung einer Salzkruste ohne nennenswerte Veränderungen am Stein.
- 155 KJ. Bildung einer Salzkruste ohne Veränderung (Stein bleibt feucht).
- 156 KNO<sub>3</sub>. Die Probe erhielt oberhalb von 1,5 cm Salzkrusten, doch zeigte sich kein Angriff des Gesteins.
- 157 NaCl. Kruste im mittleren Teil der Probe mit geringer Absandung (Fig. 47, rechts).
- 158 Auch die höhere Salzkonzentration zeigte keine Einwirkung.
- 159 Der Versuch mit höherer Konzentration zeigte nach acht Wochen Ansätze einer Schalenbildung unter der Horizontalfläche.

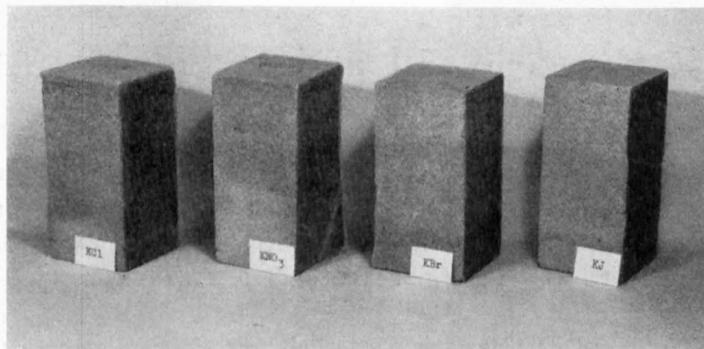


Fig. 42. Aufsaugversuch in Kaliumchlorid, Kaliumnitrat, Kaliumbromid und Kaliumjodid. Fast keine merklichen Einwirkungen.



Fig. 43. Prisma von granitischem Sandstein (15). Aufsaugversuch mit Magnesiumsulfatlösung nach 8 Wochen.

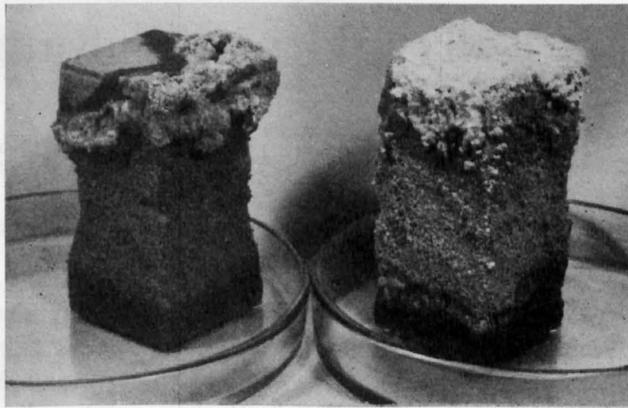


Fig. 44. Links Prisma in Magnesiumsulfatlösung nach 12 Wochen, rechts Prisma in Natriumsulfatlösung nach 12 Wochen.

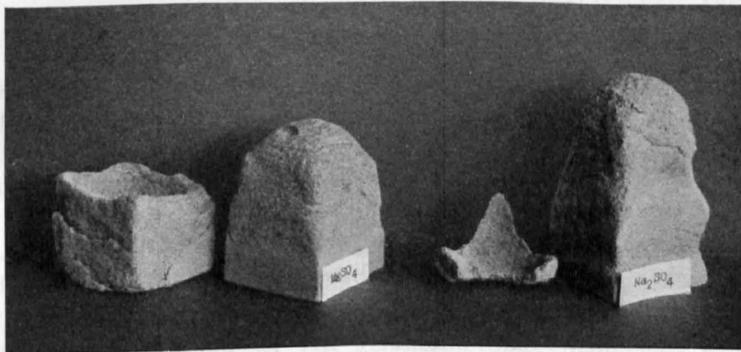


Fig. 45. Links Prisma nach Aufsaugversuch in Magnesiumsulfatlösung (12 Wochen), rechts in Natriumsulfatlösung (21 Wochen). Deutlich die Ausbildung einer innen gewölbten Trennfläche.

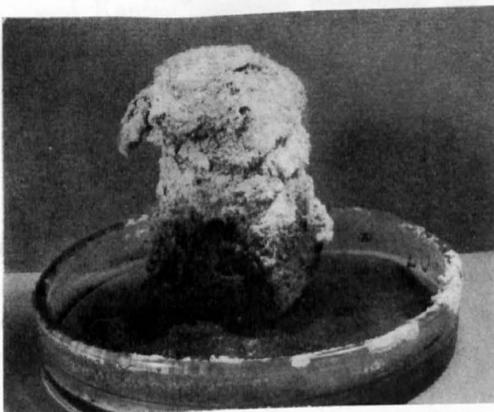


Fig. 46. Prisma aus granitischem Sandstein (15) in Natriumsulfatlösung nach 21 Wochen.

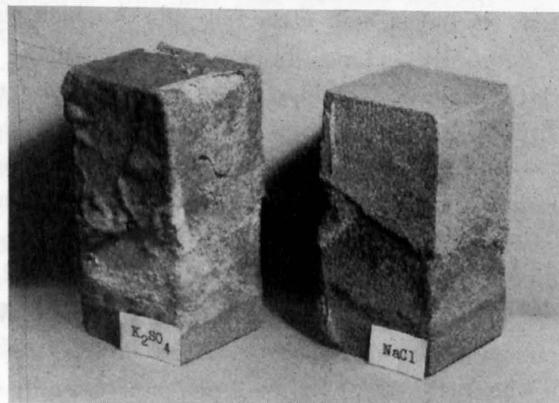


Fig. 47. Aufsaugversuch (21 Wochen) in Kaliumsulfat und Natriumchlorid (granitischer Sandstein, 15).

### 3. Übersicht der Einwirkungen bei den Tränk- und Aufsaugversuchen.

#### A. Die Formen des beobachteten Gesteinszerfalls.

Die bei den Tränk- und Aufsaugversuchen beobachteten Zerfallserscheinungen an den Probekörpern zeigten folgende charakteristische Ausbildungen.

1. **Absandung** = Zerfall des Gesteins in die Einzelmineral Körner oder in körnerartige Gesteinspartikel ähnlicher Größe (z. B. Oolithkörner). Verbreitete Zerfallsform bei Sandsteinen, spätigoolithischen Kalksteinen, Marmoren, kristallinen Silikatgesteinen und Mörtelproben. Die würfeligen oder prismatischen Probekörper aus homogenem Gestein zeigten die Hauptabsandung öfters in folgenden gegensätzlichen Bereichen:

a) Absandung vorwiegend an Ecken und Kanten unter Abrundung der Proben. Aus Würfeln entstanden im Endstadium Kugeln. Dieses Verhalten war charakteristisch für Sandsteine vom Bernertypus und für einige granitische Sandsteine.

b) Absandung vorwiegend auf den Flächen, die sich gegenüber Ecken und Kanten zurückerarbeiteten. Verhalten des Wealden-Sandsteins (Vers.-Nr. 42) und des grobporösen Kalksteins des Hauteriviens (Vers.-Nr. 58, 59).

Lagenweise inhomogene Proben zeigten ein schichtiges Aussanden (vor allem Kalksteine).

2. **Abblätterung** = Ablösung von kleinen, dünnen, blätterartigen Gesteinspartikeln. Fand sich verbreitet, oft zusammen mit der Absandung bei den gleichen Gesteinsarten. In typischer Form erfolgte das Ablösen der Blätter parallel zur Oberfläche der Probekörper (oft auch senkrecht zu Schichtung oder Schieferung).

3. **Abbröckelung** = Ausbrechen von unregelmäßigen Gesteinsbrocken. Handelt es sich um kleine scharfkantige Brocken, so wird von Absplitterung gesprochen (Übergang zu Abblätterung). Charakteristische Zerfallsform verschiedener Kalksteinarten und von Beton. Untergeordneter bei Sandsteinen und kristallinen Gesteinen. Eine besondere Art ist der Zerfall der Proben in wenige große Stücke.

4. **Schalenbildung** = allseitige Trennung einer meist 2—15 mm dicken Gesteinsschale (mit oft fast intakter äußerer Oberfläche) vom Gesteinsinnern. Charakteristische Zerfallsform bei zahlreichen Molassesandsteinen (besonders den granitischen Sandsteinen).

5. **Rißbildungen**. Solche waren bei zahlreichen Proben oder Versuchsanordnungen zu beobachten. Es ließen sich etwa folgende Ausbildungen auseinanderhalten:

a) Risse längs Inhomogenitäten (meist Schwächestellen) in den Proben, wie z. B. Tonhäute und Suturen in Kalksteinen, versteckte Klüftungen, glimmerreiche Lagen in Schiefeln. Erstes Stadium des Bröckelzerfalls.

b) Risse parallel den Kanten (im Innern der Würfel parallel den Seitenflächen). Hängen zusammen mit der Schalenablösung (siehe oben).

c) Unregelmäßige, meist kurze Risse bei homogenen Gesteinen. Typische Zerfallserscheinungen nach Tränkversuchen in Natriumchlorid- und Kaliumsulfatlösung.

d) Durchgehende Risse senkrecht zu Würfelkanten oder diagonal auf Würfelflächen bei homogenem Gestein. Bei Sandsteinen und Mörtel beobachtet und auf „Treiberscheinungen“ zurückgeführt (siehe Seite 47).

Diese Hauptformen des Gesteinszerfalles wurden häufig zur Hauptsache für sich allein, häufig aber auch kombiniert an einer Probe beobachtet.

## B. Übersicht der Einwirkung bei den Tränkversuchen.

Alle für diese Versuche verwendeten Salze zeigten nach kürzerer oder längerer Einwirkungsdauer Einwirkungen auf die Gesteinsproben. Diese waren aber nicht nur nach dem Ausmaß, sondern auch nach der Form sehr unterschiedlich.

Am stärksten wirkt ohne Frage eine Tränkung in Natriumsulfatlösung ein, in zweiter Linie steht Magnesiumsulfat, schwächer sind die Einwirkungen der Tränkung in Natriumchlorid- und Kaliumsulfatlösung. Auch die Tränkung in der sehr wenig konzentrierten Calciumsulfat-(Gips)-Lösung erwies sich als von einem gewissen Einfluß.

Die Hauptversuche mit Natriumsulfat ergaben zusammengefaßt folgendes:

Die Sandsteine des Bernertypus sandeten beim Normalversuch (Tränkung in 10%iger Lösung, Trocknung bei 100°, je 24 Stunden) stark ab, und zwar allgemein an Ecken und Kanten stärker als auf den Flächen der Würfel. Dadurch wurden die Proben allmählich kugelförmig (Fig. 1). Vereinzelt waren aber auch mürbe Schalen zu beobachten. Die Absandungsgeschwindigkeit ging einigermaßen parallel der Porosität, besser noch der Wasseraufnahme und der Geschwindigkeit des kapillaren Wasseraufstieges. Bis zu starkem Zerfall (ca. 20% Verlust) dauerte es 2—8 Tränkungen. Die Gewichtsverluste nahmen allgemein mit jeder Tränkung progressiv zu. Auch das Innere der Proben wurde mürbe und führte oft zu völligem Zerfall. Die Trocknung bei 150° ergab bei einer Bernersandsteinprobe typische Schalen, dazu Diagonalrisse nach 3 Versuchen. Bei Tränkungen in geringerer Konzentration (1% und  $\frac{1}{4}$ %) traten im Gegensatz zum Normalversuch Rißbildungen, jedoch nur geringes Absanden auf. Der 5-Minuten-Tränkversuch in 10%iger Lösung erzeugte gegenüber dem Normalversuch eine starke Tendenz zur Schalenbildung, kombiniert mit Absanden.

Bei den granitischen Sandsteinen zeigten die offensichtlich poröseren und weniger festen Varietäten anfänglich ein erheblicheres Absanden, das sich aber bald mit typischer Abschälung kombinierte (Fig. 2). Bei den festeren Arten waren stets Schalen in schönster Ausbildung zu beobachten, fast ohne vorheriges Absanden (näheres über den Vorgang der Schalenablösung siehe S. 42). Bei den Versuchen mit Trocknung bei höherer oder tieferer Temperatur (auch bei 6tägiger Trocknung bei Zimmertemperatur) traten ebenfalls reine Schalenbildungen auf, während beim 5-Minutenversuch sich nach entsprechend verlängerter Versuchsdauer zur Hauptsache Absandungen zeigten. Die Versuche in wenig konzentrierter Lösung ergaben auch hier stets Risse.

Die Plattensandsteine ergaben im Normalversuch nach mäßigem Absanden typische Abschälungen.

Vollständig anders als diese Sandsteine der Molasse verhielt sich der ebenfalls sehr poröse, petrographisch aber sonst sehr abweichend zusammengesetzte Wealdensandstein von Norddeutschland. Er zeigte zwar starkes Absanden schon nach kurzer Zeit; dieses blieb aber stets ziemlich gleichmäßig im Verlauf des Versuches. Zudem ergriff dieses Absanden ganz typisch nicht vor allem die Ecken und Kanten, sondern besonders die Flächenmitten. Dadurch trat hier eine gewisse Aushöhlung ein, während die Ecken hervorragten. Somit besteht ein großer Gegensatz zu den sich rundenden Bernersandsteinen von ähnlicher Porosität. Der Stein blieb auch im Innern völlig fest. (Fig. 6, rechts).

Die sehr festen und wenig porösen Sandsteine aus der subalpinen Molasse und aus den Alpen wurden nur in geringem Ausmaße angegriffen, mit Ausnahme eines bereits metamorphen, stark geschieferten Sandsteins der Bündnerschiefer, Vers.-Nr. 37, wo sich schöne Aufspaltungen längs glimmerreichen Lagen ergaben.

Die grobspätigen mehr oder weniger sandigen Muschelkalksteine unterschieden sich im Verhalten weitgehend von den Molassesandsteinen. Im Normalversuch zeigten sie einerseits ein langsam verlaufendes oberflächliches Abblättern und Abbröckeln, andererseits auch charakteristische tiefgreifende Risse, die zu einem ausgesprochenen Bröckelzerfall der ganzen Proben führten.

Relativ gering waren die Einwirkungen auf die drei untersuchten Kalktuffproben. Das gut verfestigte Kalkgerüst scheint bei diesen Gesteinen sehr wenig angegriffen zu werden. Die Gewichtsverluste betrafen hauptsächlich Partien geringerer Festigkeit, die dann stärker ausbröckelten.

Bei den Jurakalken zeigten sich geringe Einwirkungen auf kompakte Kalksteine. Sobald aber eine gewisse, wenn auch geringe Porosität festzustellen war, setzte ein zum Teil ziemlich rasch verlaufender absandungsartiger Zerfall (besonders bei oolithischen und feinspätigen Kalken) ein. Sehr intensiv waren die Einwirkungen auf Tonschieferhäute, die rasch herauswitterten (Fig. 8) und zu einem Zerfall der Proben führten. Feinste Haarrisse in dichten spröden Kalksteinen erweiterten sich allmählich und führten zu einem typischen Bröckelzerfall. Der hochporöse Schaumkalk des Hauterivien zeigte starkes Absanden (lagenweise allerdings sehr verschieden intensiv). Die Zerfallskurve zeigt hier Aehnlichkeit mit derjenigen des Wealdensandsteines.

An den Kalksteinen der Alpen waren zur Hauptsache Angriffe längs Tönhäuten zu beobachten, was zu Spaltungen der Proben führen kann. Immerhin können Tonschieferhäute auch sehr widerstandsfähig sein; beim dichten Kalkstein (Nr. 45) waren sie auch nach 50 Versuchen nur wenig angegriffen (Fig. 8). Die weißen Kalkspatadern wurden durch die Tränkversuche kaum beeinflusst. Einen absandungsartigen Zerfall zeigte eine durchgehend grobspätige, marmorartige Probe (48), Vers. Nr. 63; sie verhielt sich ähnlich wie die eigentlichen grobkörnigen metamorphen Marmore.

Einen typischen absandungsartigen Zerfall, von Ecken und Kanten ausgehend, erfuhren die untersuchten Marmore, rascher die sehr grobkörnigen, langsamer die feinkörnigen Proben. Bei ersteren, Vers. Nr. 66, 67, (und beim oben erwähnten Spatkalk, Vers. Nr. 63) spielt vielleicht die Lockerung des Gefüges durch die wechselnde Erwärmung auf  $100^{\circ}$  eine gewisse Rolle (große Differenz der Ausdehnung des Kalkspates senkrecht und parallel c). Die silikathaltigen Marmore, Vers. Nr. 68, und Kalksilikatfels, Vers. Nr. 69, zeigten ein gewisses Absanden und Abblättern besonders in silikatreichen Lagen (Fig. 11).

Die kristallinen Gesteine zeigten im allgemeinen nicht sehr erhebliche Einwirkungen. Sie äußerten sich in oberflächlichen Absplitterungen und Absandungen, teils eher an den Kanten der Würfel, teils eher auf Flächen. Bei geschieferten kristallinen Gesteinen war der Verlust auf dem Lager meist etwas größer (Absplitterungen längs Glimmerblättchen) als senkrecht dazu. Die geprüften Massivgranite wurden im allgemeinen stärker angegriffen als die Tessinergranitgneise; hier war deutlich die Einwirkung der alpinen Kataklase des Quarzes (Sandquarzbildung) bemerkbar. Gänzlich ohne Einwirkung blieb der untersuchte Antigoritserpentin, Vers. Nr. 82.

Die Tränkungen in Magnesiumsulfatlösung wirkten sich bei den verwendeten Sandsteinen und Kalksteinen in der Form zur Hauptsache ähnlich aus wie Natriumsulfatlösung; bei den granitischen Sandsteinen trat indessen das Absanden mehr in den Vordergrund, während die Schalenbildung weniger deutlich war. Bis zu einem ähnlichen Zerfallsstadium wurde bei porösen Gesteinen etwa die anderhalb- bis zweifache Zahl der Tränkungen notwendig, bei festen und kompakteren mehr als die zweifache.

Stark abweichend waren die durch die Trängung in Natriumchloridlösung erzeugten Einwirkungen auf drei Sandsteinproben. Der Bernersandstein erhielt nach nur mäßigem Absanden einen durchgehenden Riß. Bei den granitischen Sandsteinen traten nach ca. 15-20 Tränkungen ganz charakteristische Risse quer über die Kanten auf (pro Kante nur 1 bis 2), die sich langsam erweiterten (Fig. 25). Schalen fehlten vollständig.

Kaliumsulfat wirkte auf die Sandsteine zwar sehr langsam (etwa 5 mal langsamer als Natriumsulfat), aber allmählich doch auch zerstörend ein, beim Bernersandstein und dem porösen Jurakalk eine ziemlich normale Absandung, beim granitischen Sandstein Risse kombiniert mit oberflächlicher Schalenbildung erzeugend. Die gesättigte Calciumsulfatlösung (0,2 %ig) vermochte trotz der geringen Konzentration in einem Bernersandstein Risse zu erzeugen, in ähnlicher Art wie Natriumsulfatlösung von gleicher Konzentration.

## C. Übersicht über die Einwirkungen bei den Aufsaugversuchen.

Entsprechend den gänzlich verschiedenen Versuchsbedingungen unterschied sich das Verhalten der Gesteine in den Aufsaugversuchen stark vom Verhalten bei den Tränkversuchen. Aber auch hier wirkte von den angewendeten Salzen Natriumsulfat am intensivsten ein, gefolgt von Magnesiumsulfat, und mit Abstand von Natriumchlorid und Kaliumsulfat, während mit verschiedenen weiteren Salzen

keine Veränderungen erzielt wurden. Die Hauptversuche wurden auch hier mit Lagerung in Natriumsulfatlösung gemacht und ergaben zusammengefaßt folgendes:

Auf die sehr porösen Sandsteine mit starkem kapillarem Wasseraufstieg (Bernersandsteine, porösere granitische Sandsteine und Wealdensandstein) war die Einwirkung bei dieser Versuchsanordnung sehr gering. Die Steine wurden bald bis oben feucht und überzogen sich mit einer kompakten Salzkruste, unter der sich keine Veränderungen vollzogen. Ein Angriff trat hier nur ein, wenn die Proben zeitweise aus der Lösung herausgenommen wurden; mit dem Austrocknen an der Luft zerfiel die Salzkruste, und nach der erneuten Lagerung in der Lösung trat vorübergehend ein Absanden ein. Es wurde sofort deutlich, daß ein Angriff nur eintritt, wenn der Stein abwechselnd feucht wird und wieder austrocknet; dies wäre bei diesen Sandsteinen erst bei Proben viel größerer Höhe eingetreten.

Ein solcher Wechsel trat dagegen bei den angewandten Versuchskörpern dann ein, wenn der Feuchtigkeitsaufstieg nicht, oder nur in kleinem Ausmaß die obere Horizontalfläche erreichte. Dies war bei der Mehrzahl der verwendeten Gesteinsproben der Fall. Hier zeigten sich nun an Gesteinen, die sich sporadisch bis zur oberen Horizontalfläche befeuchteten, die größten zerstörenden Einwirkungen. Solche Proben bedeckten sich bis oben mit lockeren, oft wieder abfallenden Salzausblühungen, aber nicht mit einer kompakten Kruste. Gleichzeitig trat sehr lebhaftes Absanden und Abblättern ein. Im Verlaufe einiger Wochen erlangten die Proben durch diesen selbsttätigen Abtrag eine nach Gesteinsart etwas verschiedene Formgebung (siehe die Fig. 31). Diesem Absanden von oben her unterlagen granitische Sandsteine mittlerer Porosität und feinporöse Jurakalke. Bei kompakteren Sandsteinen, Muschelkalken, Jurakalken und in geringerem Ausmaße auch bei kristallinen Gesteinen beschränkte sich der Bereich des Wechsels feucht-trocken zur Hauptsache auf einen mittleren Bereich an den Probekörpern, hier die Ausblühungen und damit verbunden mehr oder weniger intensive Aushöhlungen erzeugend. Oefters wanderte dieser Bereich im Verlauf des Versuches allmählich nach oben. Gar nicht angegriffen wurden die ganz kompakten Gesteine wie einige Alpenkalke und kristalline Gesteine. Daß unter Umständen auch eine Wirkung im Gesteinsinnern eintreten kann, zeigte der Aufsaugversuch an einem Prismenkörper (feinkörniger granitischer Sandstein), der längs einer gewölbten Fläche die oberste, äußerlich intakte Partie verlor.

Die Versuchsserie mit Prismen aus granitischem Sandstein mit verschiedenen Salzen (in äquivalenten Mengen) ergab zusammenfassend: Intensive Wirkung von Magnesiumsulfat (ebenfalls mit Zerfall längs einer gewölbten Trennfläche, Fig. 45), langsamere Wirkung von Kaliumsulfat (dünne Schalen, Fig. 47) und Natriumchlorid (leichtes zonares Absanden), keine Wirkung aller Salze, bei denen der Stein stets feucht bleibt.

Eine allgemeine Eigentümlichkeit der Aufsaugversuche war die ungleichmäßige Einwirkung. Es wechselten Tage oder Wochen von scheinbarer Ruhe mit solchen eines intensiveren Angriffs. Dies war wohl dadurch mitbeeinflußt, daß es nicht möglich war, die Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse des Versuchsraumes konstant zu halten.

Probekörper	Material	Salz	Temperatur	Feuchtigkeit	Veränderung	Zeitpunkt	Notizen
101	Granit	MgSO <sub>4</sub>	18°C	feucht	intensive Wirkung	1. Tag	(1) intensive Wirkung
102	Granit	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	18°C	feucht	langsamere Wirkung	2. Tag	(2) langsame Wirkung
103	Granit	NaCl	18°C	feucht	leichtes Absanden	3. Tag	(3) leichtes Absanden
104	Jurakalk	MgSO <sub>4</sub>	18°C	feucht	intensive Wirkung	4. Tag	(4) intensive Wirkung
105	Jurakalk	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	18°C	feucht	langsamere Wirkung	5. Tag	(5) langsame Wirkung
106	Jurakalk	NaCl	18°C	feucht	leichtes Absanden	6. Tag	(6) leichtes Absanden
107	Alpenkalk	MgSO <sub>4</sub>	18°C	feucht	keine Wirkung	7. Tag	(7) keine Wirkung
108	Alpenkalk	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	18°C	feucht	keine Wirkung	8. Tag	(8) keine Wirkung
109	Alpenkalk	NaCl	18°C	feucht	keine Wirkung	9. Tag	(9) keine Wirkung
110	Alpenkalk	MgSO <sub>4</sub>	18°C	feucht	keine Wirkung	10. Tag	(10) keine Wirkung

## 4. Die Salzanreicherung in den Proben bei den Tränkversuchen.

Zur Ermittlung der Ursache der Vorgänge, die zum Gesteinszerfall bei den Tränkversuchen führten, wurden an einer Anzahl Proben Bestimmungen der bei den Versuchen aufgenommenen Salz- mengen durchgeführt. Es wurden dazu hauptsächlich homogene Sandsteine mit erheblicher Porosität gewählt. Die Bestimmungen geschahen in folgender Weise. Nach dem Auftreten eines charakteristischen Zerfallsstadiums wurden Probesplitter aus verschiedenen Bereichen des Steines (Würfelproben) entnommen und chemisch auf die in Frage stehenden Anionen untersucht. Als Bereiche wurden im allgemeinen gewählt: Die Randzone (ca. 0—10 mm, bei erkennbarer Schalenbildung bis zum Riß), eine mittlere Zone (ca. 10-20 mm vom Rand) und die zentrale Partie des Würfels. An einigen Beispielen wurde auch die Veränderung des Salzgehaltes im Randbereich im Verlaufe des Versuches verfolgt. Die Probenahme konnte praktisch nur nach der Trocknungszeit vorgenommen werden; an lösungsgetränkten Proben wären keine exakten Bestimmungen durchführbar gewesen. Die Splitter zur chemischen Untersuchung mußten mit dem Hammer abgeschlagen werden; ein Lossägen hätte wegen der notwendigen Befeuch- tung die Gehalte verändert. Die Splitter hatten natürlich nicht immer die gleiche Dicke und Form, umfaßten also nicht die genau gleichen Bereiche, was von gewissem Einfluß auf die Werte sein dürfte.

Tabelle 22

### Gehalt an Natriumsulfat in verschiedenen Bereichen einiger Sandsteinproben nach Abschluß des Tränkversuches

Tränkung mit 10%iger Lösung (bzw. 1%iger bzw. 1/4%iger Lösung)

Ver- suchs- Nr.		Trock- nung	Ver- ände- rung	Nach Trock- nung	Gehalt der Probe an (Gew.-%) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (bestimmt)			Gehalt der Probe an (Gew.-%) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10 H <sub>2</sub> O (berechnet)		
					RZ	MZ	Z	RZ	MZ	Z
	Tränkung mit 10%iger Lösung.									
	Granit. Sandsteine									
160	sehr fest und komp. (14)	100 °	S	23	0,62	0,40	0,04	1,40	0,90	0,09
161	sehr feinkörnig (15)	100 °	S	10	1,12	0,78	0,09	2,54	1,77	0,20
162	sehr feinkörnig (15)	100 °	S	9	0,90	2,10	0,30	2,04	4,76	0,68
163	sehr feinkörnig (15)	150 °	S	8	1,04	2,02	0,52	2,36	4,58	1,18
164	sehr feinkörnig (15)	50 °	S	11	1,04	0,81	0,31	2,36	1,83	0,70
165	sehr feinkörnig (15)	6 Tage 16 °	S	11	1,20	1,93	0,34	2,72	4,38	0,77
166	mittelkörnig (16)	100 °	S	9	0,96		0,78	2,18		1,77
167	Plattensandstein (21)	100 °	S	12	0,88	1,56	0,86	2,00	3,54	1,95
	Bernersandsteine									
168	mittelkörnig (7)	100 °	A	5	5,20		1,09	11,80		2,47
169	mittelkörnig (8)	150 °	S u. R.	4	3,15	2,23	1,80	7,15	5,06	4,08
170	mittelkörnig (11)	100 °	S	4	3,20	2,70	2,20	7,26	6,12	4,99
	Tränkung mit 1%iger Lösung									
	Granitischer Sandstein									
171	sehr feinkörnig (15)	100 °	R	31	0,38	0,40	0,46	0,86	0,91	1,04
172	Bernersandstein mittelkörnig (11)	100 °	R. u. A.	13	1,59	1,00	1,11	4,06	2,27	2,51

Fortsetzung von Tabelle 22.

Versuchs-Nr.	Trocknung	Veränderung	Nach Trocknung	Gehalt der Probe an (Gew.-%) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (bestimmt)			Gehalt der Probe an (Gew.-%) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10 H <sub>2</sub> O (berechnet)			
				RZ	MZ	Z	RZ	MZ	Z	
	Tränkung mit 1/4%iger Lösung									
173	100 °	R	87	0,03	0,48	0,79	0,07	1,08	1,79	
174	100 °	R	25	0,27	0,55	1,12	0,61	1,24	2,54	
175	100 °	R	13	0,05	0,03	0,38	0,11	0,06	0,86	

RZ = Randzone, MZ = Mittelzone, Z = Zentrum, S = Schale, R = Risse, A = Absanden.

Tabelle 23

**Gehalt an weiteren Salzen in verschiedenen Bereichen von Sandsteinproben nach Abschluß des Tränkversuches**

24 h Lagerung in Lösung, 24 h Trocknung bei 100 °

Versuchs-Nr.	Konzentration %	Veränderung	Nach Trocknung	Gehalt der Probe Gew.-% an MgSO <sub>4</sub> (bestimmt)		
				RZ	MZ	Z
176	10	A	10	6,86	3,27	2,45
177	10	S	16	1,92	1,62	0,04
178	0,2	R	39	0,30	0,80	0,83
179	10	R	20	1,44 *	3,0 *	0,84
	10	R	25	0,64	1,7	0,39
180	10	Abbröckeln Zerfall in zwei Stücke	5	0,92	1,92	0,39
	10			3,92	0,76	0,78
181	je 5 %	R	8	1,44 1,28	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> NaCl	1,39 2,27

\* Zwei Bestimmungen von verschiedenen Partien  
RZ = Randzone, MZ = Mittelzone, Z = Zentrum.

Tabelle 24

**Veränderung des Gehaltes an Natriumsulfat in verschiedenen Bereichen der Würfelfläche (Ecken, Kanten und Flächen) im Verlauf des Tränkversuches**

Ver- suchs- Nr.		Konzentration %	Nach Trock- nung	Ecken		Kanten		Flächen	
				Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Gew.-%	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10 H <sub>2</sub> O Gew.-%	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Gew.-%	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10 H <sub>2</sub> O Gew.-%	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Gew.-%	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10 H <sub>2</sub> O Gew.-%
182	Bernersandstein mittelkörnig (7)	10	1	5,20	11,80	7,03	15,95	3,52	7,99
			2	6,55	14,86	7,74	17,56	4,79	10,87
			3	7,76	17,61	4,69	10,64	6,16	13,98
			4	7,95	18,04	6,88	15,61	7,43	16,86
183	Bernersandstein mittelkörnig (11)	1	1	0,84	1,90	0,81	1,83	0,79	1,79
			3	1,29	2,92	0,70	1,58	0,79	1,79
			5	2,33	5,28	0,76	1,72	1,09	2,47
			10	3,14	7,12	2,72	6,17	1,38	3,13
184	Wealdensandstein (29)	10	10	2,83	6,42	3,97	9,00		
			20	2,64	6,00	2,88	6,54		
			30	1,90	4,31	2,01	4,56		
			40	1,92	4,36	3,45	7,83		

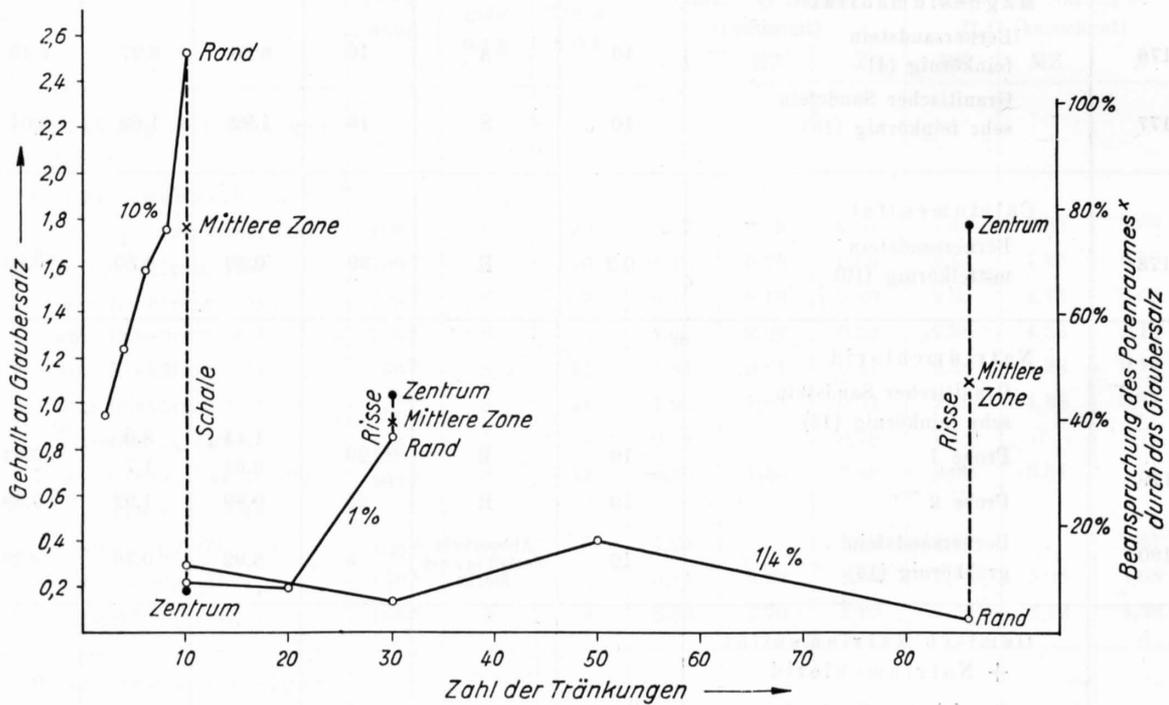


Diagramm 10.

Veränderung des Gehaltes an Natriumsulfat (berechnet als Glaubersalz) und Beanspruchung des Porenraumes (berechnet aus Wasseraufnahme in 24 Stunden) des granitischen Sandsteines Nr. 15 im Verlaufe des Tränkversuches in Lösungen von 10%, 1% und 1/4%.

Tabelle 25

**Veränderung des Salzgehaltes im Randbereich von Würfelproben  
im Verlauf des Tränkversuches**

Versuchs-Nr.		Konzentration %	Nach Trocknung	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Gew.-%	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 10 H <sub>2</sub> O Gew.-%
185	Natriumsulfat Granit. Sandstein, sehr fest (14a)	10	5	0,23	0,52
			10	0,32	0,72
			15	0,42	0,95
			20	0,57	1,29
			23	0,62	1,40
186	Granit. Sandstein, sehr feinkörnig (15)	10	2	0,42	0,95
			4	0,55	1,24
			6	0,70	1,58
			8	0,78	1,77
			10	1,12	2,54
187	Granit. Sandstein, sehr feinkörnig (15)	1	10	0,10	0,23
			20	0,09	0,20
			31	0,38	0,85
188	Granit. Sandstein, sehr feinkörnig (15)	1/4	10	0,13	0,29
			30	0,06	0,13
			50	0,18	0,40
			87	0,03	0,07
189	Bernersandstein, mittelkörnig (11)	1/4	5	0,13	0,29
			10	0,11	0,24
			13	0,05	0,11
190	Magnesiumsulfat Granit. Sandstein, sehr feinkörnig (15)	10	10	MgSO <sub>4</sub> Gew.-% 1,09	
			15	1,61	
			16	1,92	
191	Natriumchlorid Granit. Sandstein, sehr feinkörnig (15) Probe 1	10	10	NaCl Gew.-% 0,78	
			15	0,73	
			20	1,44; 0,64*	
192	Probe 2	10	5	0,81	
			10	0,57	
			16	0,81	
			20	0,92	
			25	0,92	

\* Zwei Bestimmungen von verschiedenen Partien des Würfels.

## 5. Die Deutung der gesteinszerstörenden Auswirkungen bei der Salzaufnahme.

### A. Beobachtungen über den Vorgang des Gesteinszerfalls.

Bei den Tränk- und Aufsaugversuchen ließen sich die Vorgänge des Gesteinszerfalles oft gut verfolgen, teilweise direkt von Auge beobachten. Am geeignetsten erwiesen sich dazu relativ leicht angreifbare Gesteinsarten (wie Sandsteine) bei Behandlung in Natriumsulfatlösung.

Bei den Tränkversuchen erfolgte die Hauptveränderung der Proben (nach vorangegangener Salzanreicherung bei der Trocknung) unzweifelhaft in der Lösung. Ein Absanden oder Abblättern begann meist weniger als eine Minute nach dem Eintauchen und war bei weniger festen Gesteinen zur Hauptsache nach 15-30 Minuten beendet, bei festeren dauerte es länger. Es handelte sich ganz offensichtlich um ein aktives Wegschieben von Gesteinspartikeln durch einen Kristallisierungsvorgang mit Volumenzunahme, nicht durch ein Abfallen infolge Kohäsionsverlust in der Lösung. Am schönsten ließ sich der Zerfallsvorgang bei den Bernersandsteinen verfolgen, wo von der sich auflockernden Oberfläche die Sandkörner abfielen. Von bereits angerundeten Proben löste sich oft rasch ein dünnes gebogenes Blatt nach dem andern, um dann beim Absinken sich in einzelne Sandkörner aufzulösen. Auch ein plötzlich sich vollziehender völliger Zerfall konnte mehrfach beobachtet werden. So zeigte ein feinschichtiger Bernersandstein (1) kurz nach dem 9. Eintauchen in wenigen Minuten die schichtige Aufspaltung der Fig. 48, nachdem der Würfel vor der Tränkung erst ein geringes oberflächliches Absanden und wenige Andeutungen von Rissen gezeigt hatte. Eine andere Bernersandsteinprobe (2) zerbarst kurz nach dem 9. Eintauchen nach unregelmäßigen Rissen, wobei völlig lockerer Sand aus dem Innern der Probe ausfloß (Fig. 49).



Fig. 48. Sehr feinkörniger Bernersandstein (1) im Tränkversuch (T 9). Das schichtige Aufspalten erfolgte sichtbar in wenigen Minuten.



Fig. 49. Feinkörniger Bernersandstein (2) nach dem direkt beobachteten Zerbersten im Tränkversuch (T. 9).

Besonders schön konnte das Entstehen von Schalen an granitischen Sandsteinen und Platten-sandsteinen auf folgende Weise sichtbar gemacht werden. Nachdem durch Vorversuche feststand, wieviele Tränkungen (n) bei der bestimmten Gesteinsprobe bis zur Schalenablösung notwendig waren, wurde ein Würfel einer Tränkung weniger (n-1) unterworfen. Solche auf diese Art vorbehandelten Proben zeigten [bei entsprechend günstigen Gesteinen wie z. B. dem sehr feinkörnigen granitischen Sandstein (15)] äußerlich, abgesehen von einem geringen Absanden, keine Veränderung. Vor dem erneuten Eintauchen wurden die Proben dann mit dem Hammer und Meißel zur Freilegung einer Innenfläche



Fig. 50. Nach 10 Tränkungen (10% Natriumsulfat) in der Lösung sichtbar erfolgte plötzliche Schalenablösung an halbiertem Sandsteinwürfel (15). Anfangsstadium bei relativ dünner Schale (24 Stunden Lösungslagerung, erste Ribbildung bereits nach  $\frac{1}{4}$  Stunde).

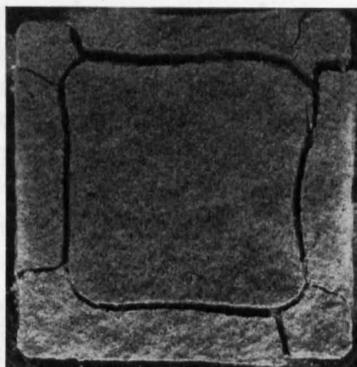


Fig. 51. Wie Fig. 50. Endstadium bei dicker Schale (erreicht bereits nach 24 Stunden, erste Ribbildung ebenfalls nach  $\frac{1}{4}$  Stunde).

gespalten. Auch die so erzeugten Bruchflächen zeigten keine sichtbaren Veränderungen, sie waren scheinbar durchgehend so fest wie solche an unbehandelten Proben; jede Andeutung eines Risses oder einer Lockerungszone fehlte. Wurde nun eine Hälfte mit der Bruchfläche nach oben in die Lösung gelegt, so bemerkte man auf dieser nach ca.  $\frac{1}{4}$  Stunde die erste Andeutung eines ganz feinen Risses (Fig. 52) parallel allen Seitenflächen (an den Würfelkanten gebogen). Dieser Riß erweiterte sich im

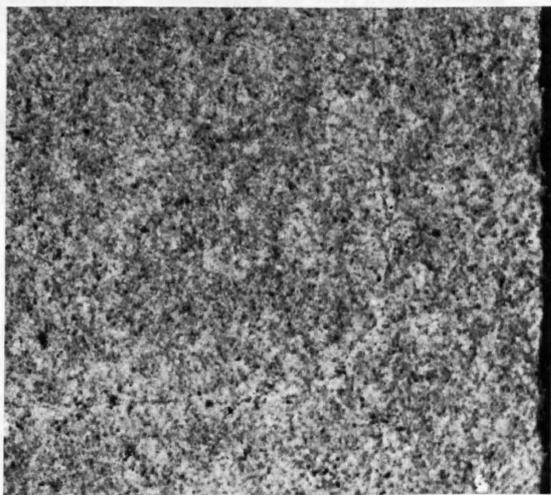


Fig. 52. Erste Andeutung eines Schalenrisses (nach  $\frac{1}{4}$  Stunde) an halbierter Probe vom granitischen Sandstein (15).

Verlaufe von Stunden allmählich, was bei dickeren Schalen meist mit einem Aufreißen parallel den (senkrechten) Kanten, da wo die Rundung einsetzt, verbunden war (Fig. 51). Eine Ribbildung gleicher Art trat natürlich auch parallel der auf dem Gefäßboden lagernden Fläche der Proben ein. Auch dann, wenn das prismatische Teilstück des vorbehandelten Würfels nur wenig dicker war als der Schale entsprach, trat die Trennung in der Lösung in genau der gleichen Weise ein. Es sah dann allerdings so aus, als ob eine dünne Gesteinshaut von der massiveren Randpartie der Probe sich abgelöst hätte. An ein und demselben Würfel waren die Schalen meistens annähernd gleich dick, nicht aber an verschiedenen Würfeln desselben Gesteins. Beim sehr feinkörnigen granitischen Sandstein (15) variierte die Schalendicke z. B. von ca. 4 bis 15 mm, ohne daß scheinbar die Versuchsbedingungen sich stärker unterschieden hätten. Offensichtlich ist der Abstand der Schalenribbildung von der Oberfläche direkt abhängig vom Gefälle der Salzkonzentration im Stein (Seite 38) und damit wie dieses von den feineren Bedingungen während der Trocknung. Erst in zweite Linie tritt die Gesteinsbeschaffenheit, d. h. die Korngrößen-Porositäts- und Festigkeitsverhältnisse.

Bei den Aufsaugversuchen erfolgte der Gesteinsangriff ganz offensichtlich im Bereich, in dem sich die Befeuchtung durch den kapillaren Lösungsaufstieg und die Austrocknung die Waage hielten. War der Lösungszustrom sehr stark (hohe Porosität), so lag diese Grenzzone bei Würfeln und Prismen außerhalb des Gesteins, es bildeten sich Salzkrusten, aber es trat kein Angriff ein. Bei schwächerer Zufuhr fiel dieser Bereich praktisch mit der Gesteinsoberfläche zusammen, wobei verbunden mit eigentlichen Ausblühungen sofort ein Abdrängen von Einzelpartikeln von der Probe, somit ein oberflächliches Absanden eintrat (Fig. 53, 54). Bei noch weniger porösen Sandsteinen verlegte sich



Fig. 53. Abdrängen der Sandkörner auf der Horizontalfläche eines granitischen Sandsteins im Aufsaugversuch mit Salzanreicherung unter der obersten Körnerschicht in der Grenzzone des Lösungsaufstieges. Vergrößerung 3 : 1.

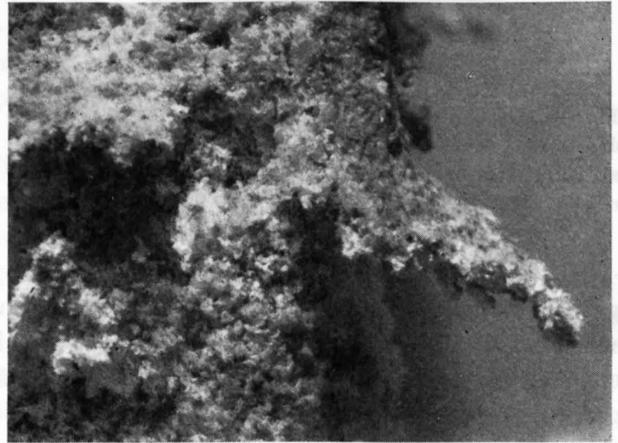


Fig. 54. Aktives Abdrängen von dünnen Blättern und Einzelkörnern von der Seitenfläche einer Würfelprobe aus granitischem Sandstein. Vergrößerung 3 : 1.

dieser Bereich etwas unter die Oberfläche der Probe, es trat in diesem Fall ein aktives Abstoßen dünner Gesteinshäute (oft nur von der Dicke einer Körnerschicht) bis Blätter ein (Fig. 29, 36). Besonders im obern Randbereich der äußerlich befeuchteten Gesteinspartie wurden diese Angriffe unmittelbar unter der Oberfläche beobachtet. Bei Versuchen an dünnen Prismen verlegte sich durch die stärkere Austrocknung als bei Würfeln dieser Uebergangsbereich feucht-trocken noch weiter ins Gesteinsinnere, hier dann eine eigentliche Lockerungszone erzeugend. Diese bewirkte die Abtrennung einer äußeren noch ganz intakten Gesteinspartie als dickere Schale. Noch deutlicher als ein Prisma in Natriumsulfatlösung zeigte dies ein Prisma in Magnesiumsulfatlösung (Fig. 45). Es handelt sich hier augenscheinlich um eine zweite Art der Schalenablösung, die sich von derjenigen im Tränkversuch stark unterscheidet. Bei dieser Zweiten tritt die Schalenablösung durch allmähliche Bildung einer Lockerungszone im Gesteinsinnern ein, im Grenzbereich von Kapillarfeuchtigkeit von innen und Austrocknen von außen.

## B. Die Beziehungen der Salzaufnahme im Gestein zu den Zerfallsformen.

Die Bestimmungen der aufgenommenen Salzmengen zeigten (Tabellen 22-25), daß im Verlaufe der wiederholten Tränkungen und Trocknungen die Salze in den Gesteinsporen sich anreicherten, d. h. im Porenraum sammelte sich mehr Salz an als der Lösungskonzentration entsprach. Je nach Salzart, Gesteinsporosität oder Lösungskonzentration erfolgte dies aber in sehr verschiedener Weise. Die Hauptversuche mit Natriumsulfatlösung ließen folgendes erkennen:

Bei hoher Lösungskonzentration (10<sup>0</sup>/oig) trat eine starke Anreicherung vor allem in der Randzone, öfters auch in der Zone unmittelbar darunter ein, während sie im Zentrum nicht, oder nur viel schwächer zu konstatieren war (Tabelle 22). Die Anreicherung in der Randzone vollzog sich stufenweise während des Versuchs; die größte Konzentration wurde jeweils vor der letzten Tränkung

(d. h. vor dem Zerfall) festgestellt (Versuch 185, 186, Tabelle 25). Am ausgesprochensten war die Differenz des relativen Salzgehaltes zwischen Rand und Zentrum bei den granitischen Sandsteinen von mäßiger bis mittlerer Porosität (14, 15), weit weniger deutlich bei den hochporösen Bernersandsteinen. Bei den granitischen Sandsteinen wurde eine Salzanreicherung in den äußeren Zonen gegenüber der Salzkonzentration in der Lösung bis zum 13fachen, gegenüber der Salzmenge im Zentrum etwa vom 4- bis zum 12fachen festgestellt.

Bei geringerer Lösungskonzentration (Tabelle 22, Versuch 171-175) wurde eine Anreicherung von Salz in der zentralen Partie der Proben festgestellt, noch wenig ausgesprochen bei der 1<sup>o</sup>/oigen, bei der 1/4<sup>o</sup>/oigen dagegen sehr deutlich. Diese Anreicherung war relativ um so größer, je länger der Versuch dauerte, d. h. je widerstandsfähiger das Gestein war. Bei den Bernersandsteinen erreichte die Anreicherung in der zentralen Partie gegenüber der Lösungskonzentration das 66fache, beim granitischen Sandstein ca. das 200fache (in 87 Tränkungen). Demgegenüber blieb die Anreicherung im Randbereich um 5 bis 25 mal geringer.

Eine starke Anreicherung von Salz in den Randzonen ging, wie aus den Tabellen 22 und 23 deutlich ersichtlich ist, ganz allgemein parallel mit einem typischen Schalenzerfall der Gesteine, wie dies besonders schön die granitischen Sandsteine zeigten. Die Bernersandsteine mit geringerer Anreicherung in der Randzone gegenüber dem Zentrum zeigten eine Schalenbildung nur in vereinzelt Fällen. Bei ihnen überwog ein absandungsartiger Zerfall. Bei der geringen Festigkeit von Korn zu Korn trat eben hier der Zerfall sehr rasch ein, bevor durch eine größere Zahl von Tränkungen eine zum Schalenzerfall führende Anreicherung von Salz in den Poren der Randzone realisiert werden konnte. Die Absandung führte bei den Bernersandsteinen meistens zu einer Rundung. Vergleichende Bestimmungen an Ecken, Kanten und Flächen der Würfelproben zeigten, daß sich tatsächlich Ecken und Kanten im Anfangsstadium stärker mit Salz durchsetzten; nach deren Abrundung war dann ein Unterschied kaum mehr festzustellen (Tabelle 24).

Die Proben mit Anreicherung von Salz in der zentralen Partie (aus Versuchen mit geringer Lösungskonzentration) zeigten ohne Ausnahme Rißbildungen, teils Diagonalrisse auf Flächen, teils direkt eine Spaltung in zwei Stücke. Eine Absandung hielt sich hier in engen Grenzen und Schalenbildungen konnte nicht beobachtet werden.

Die Salzbestimmungen an Proben, die dem Tränkversuch in Magnesiumsulfatlösung (10<sup>o</sup>/oig) unterworfen waren, zeigten weitgehende Übereinstimmung mit den Natriumsulfatversuchen: ausgesprochene Anreicherung an Salz in der Randzone bei dem granitischen Sandstein, weniger ausgeprägte beim Bernersandstein. Der erstere Stein erfuhr eine Schalenbildung, der letztere ein stärkeres Absanden (Versuche 176, 177, Tabelle 23). Versuche mit wenig konzentrierter Magnesiumsulfatlösung wurden nicht vorgenommen. Der Versuch mit der zwar gesättigten, aber nur ca. 1/5<sup>o</sup>/oigen Calciumsulfatlösung ergab wie beim Natriumsulfatversuch ähnlicher Konzentration bedeutend stärkere Salzanreicherung im zentralen Bereich als außen. In analoger Weise zeigte die Probe (Bernersandstein) Rißbildung (Versuch 178).

Abweichend scheint sich Natriumchlorid zu verhalten (Versuche 179, 180, Tabelle 23). Verschiedene Bestimmungen (nach Tränkversuchen in 10<sup>o</sup>/oiger Lösung) ergaben wohl eine Anreicherung aus der Lösung, aber kaum eine eindeutige Gesetzmäßigkeit in der Verteilung in den Proben. Auch innerhalb eines Bereiches ergaben Parallelbestimmungen starke Schwankungen. Eine ungleichmäßige Abscheidung bei der Trocknung ist offenbar für dieses Salz charakteristisch. Dieser Eigentümlichkeit steht das im Vergleich mit den Versuchen mit Natrium- und Magnesiumsulfat sehr abweichende Zerfallsverhalten gegenüber mit den charakteristischen Rißbildungen an Stelle von Absandungen oder Schalenbildungen in 10<sup>o</sup>/oigen Lösungen der andern Salze.

Bei den **Aufsaugversuchen** ließen sich keine quantitativen Bestimmungen der aufgenommenen Salzmengen durchführen. Eine große Salzkonzentrierung trat hier im Grenzbereich feucht-trocken ein, der sich je nach der Gesteinsporosität außerhalb der Proben (Krustenbildung) unmittelbar an der Oberfläche (Ausblühungen) oder unter der Oberfläche und dann von außen nicht sichtbar, einstellte. Eine Salzanreicherung unterhalb der Gesteinsoberfläche kann vielleicht in Parallele gesetzt werden mit der Eislinsenbildung durch kapillaren Wasseraufstieg in Frostböden. Eine völlige Analogie besteht natürlich wegen der Verschiedenheit der Vorgänge nicht.

## C. Zur Deutung der zerstörenden Vorgänge im Stein.

Über die Art und Weise, wie Gesteine durch den Wachstumsdruck auskristallisierender Salze (die sogenannte Kristallisationskraft) beansprucht werden, ist im Zusammenhang mit der Bausteinverwitterung oder Betonzerstörung schon viel diskutiert worden (z. B. FILLUNGER 1933, KIESLINGER 1933, VON MOOS-DE QUERVAIN 1948, SCHMÖLZER 1936). Vom allgemeinen Standpunkt aus hat sich mit dieser Frage neuerdings besonders C. W. CORRENS befaßt (1926, 1939, 1949), ferner H. RAMBERG (1947).

Auf eine erweiterte allgemeine Diskussion oder gar eine mathematische Behandlung der auf den Stein im Zusammenhang mit den Salz-Aus- und Umkristallisationen wirkenden Kräfte kann hier nicht eingetreten werden. Die Versuche waren nicht diesem besonderen Zwecke angepaßt. Es sollen nachstehend nur einige durch die Experimente gewonnene Einblicke erwähnt werden, welche das Verständnis der zerstörenden Vorgänge erleichtern, nicht nur im Laborversuch, sondern auch am Bauwerk.

Auseinanderzuhalten sind zweifellos die Einwirkungen der Salze, die unter den Versuchsbedingungen (und auch am Bauwerk) mit wechselndem Wassergehalt kristallisieren, also verschiedene Hydratstufen bilden, von denjenigen, die nur in einer Form (meist wasserfrei) in Betracht kommen. Wie die Beobachtungen zeigten, sind die Einwirkungen der Kristallisation unter Wasseraufnahme (Volumwirkung) vom reinen (linearen) Wachstumsdruck im Sinne von CORRENS nicht nur nach Intensität, sondern auch nach Ausbildung wesentlich verschieden. Von den Salzen mit verschiedenen Hydratstufen ist das Natriumsulfat\* mit seinen zwei im interessierenden Temperaturbereich stabilen Formen Thenardit (wasserfrei) und Glaubersalz (mit 10 H<sub>2</sub>O) das bekannteste. Wie die beschriebenen Versuche zeigten, eignet es sich tatsächlich am besten für einen Einblick in die Wirkungsweise der Kristallisationskräfte in einem solchen System mit drei Phasen: wasserfrei - wasserhaltig - Wasser, auf steinartige Stoffe.

Unter den zahlreichen Feststellungen bei Versuchen mit diesem Salz geben ohne Zweifel die S. 38 näher erläuterten Beobachtungen über die Salzanreicherungen bei Tränkversuchen mit verschiedenen Lösungskonzentrationen beim feinkörnigen granitischen Sandstein (15) und damit zusammenhängenden Zerfallserscheinungen besonders instruktive Aufschlüsse (Versuche 161, 171, 173). Anreicherung in der Randzone erzeugt Schalen, Anreicherung im Zentrum erzeugt Risse.

Im Falle der Anreicherung in der Randzone trat offensichtlich der plötzliche Schalenriß zeitlich dann ein, als die (während den Trocknungen vor sich gehende) Salzanreicherung (als Thenardit) in der Randzone so groß wurde, daß der notwendige Porenraum für das nach dem Wiedereintauchen in Lösung sich rückbildende Glaubersalz nicht mehr zur Verfügung stand.

Örtlich erfolgte der Riß, nach den Bestimmungen zu schließen, in der Grenzregion der Über- und Unterbesetzung des Porenraumes. Solange also die Anreicherung in der Randzone resp. die Beanspruchung des Porenraumes noch nicht ein gewisses Maß überschreitet, machen sich Kräfte noch nicht bemerkbar. Der Umwandlungsvorgang Thenardit→Glaubersalz (als völlige Neukristallisierung) verläuft ohne Behinderung unter der dieser Reaktion zukommenden Wärmeabgabe von 18,8 kgeal. Mol. Steht der Raum nicht mehr zur Verfügung, so ist die Rückbildung verhindert; es tritt analog wie beim Unterschreiten von 0° in einer wassergefüllten abgeschlossenen Gesteinspore Druckwirkung auf, die Randzone tritt in einen Spannungszustand, und durch die der Wärmetönung der Reaktion entsprechende Arbeit erfolgt die Absprengung der Schale.

Eine Berechnung der auftretenden Kräfte hätte zur Voraussetzung eine genaue Kenntnis darüber, von welcher Porenbesetzung an sich ein für die Ablösung wesentlicher Spannungszustand einstellt. Nach dem im Diagramm 10 dargestellten Versuch könnte man schließen, daß der kritische Zustand eintritt, sobald das Salzvolumen die scheinbare Porosität (berechnet aus 24 h Wasserlagerung) überschreitet. Bei andern Versuchen mit schönen Schalenabsprengungen lagen die gefundenen Salzmengen scheinbar tiefer. Zur Lösung dieser Frage waren die ausgeführten Versuche und Bestimmungen tatsächlich unzureichend. Es ist überdies sehr wahrscheinlich, daß der kritische Spannungszustand auch stark von der Porenweite abhängt; bei größeren Poren stellt er sich erst bei größerer Füllung mit

\* Chemische und physikalische Daten über die verwendeten Salze finden sich in den Tabellen 40 und 41, S. 65.

Salz ein, als bei feinen. Auch die Form der Poren dürfte von Einfluß sein. Für die Rißbildung ist dazu natürlich auch die Gesteinsfestigkeit maßgebend, und zwar die Zugfestigkeit. Bei den verwendeten Gesteinen ist diese nicht bestimmt worden; sie kann mit  $\frac{1}{10}$  bis  $\frac{1}{15}$  der Druckfestigkeit (siehe Abschnitt 7) veranschlagt werden.

Tabelle 26

**Übersicht der Schalendimensionen und der aufgenommenen Salzmengen bei Versuch 160 und Versuch 161 (nach 23, resp. 10 Tränkungen)**

	Versuch 160 Sandstein 14	Versuch 161 Sandstein 15
	5 mm	10 mm
Schale Dicke		
	127 cm <sup>3</sup>	218 cm <sup>3</sup>
Schale Volumen		
	335 g	550 g
Schale Gewicht		
	254 cm <sup>2</sup>	218 cm <sup>2</sup>
Schale Fläche		
Gesamtsalzmenge in Schale (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 10 H <sub>2</sub> O)	4,7 g	14 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

In der Tabelle 26 ist überschlagsmäßig die Salzmenge (Glaubersalz) berechnet worden, die sich bei zwei Versuchen (mit granitischen Sandsteinen 14 und 15) in der gesamten Schale angereichert hatte, ebenso die Glaubersalzmenge, für die kein Porenraum mehr (bezogen auf 24 h Wasserlagerung) zur Verfügung stand. Daraus lassen sich die ungefähren Salzmengen ersehen, welche diese Schalenabsprengungen zu erzeugen vermögen. Deutlich ergibt sich, daß die Salzmenge in der Schale beim viel weniger porösen Stein 14 viel geringer war als beim Stein 15, daß aber beim ersteren die den Porenraum übersteigende für die Absprengung maßgebende Salzmenge größer war, was in Übereinstimmung mit der viel größeren Festigkeit dieses Sandsteines stehen würde.

Im Falle der Anreicherung von Salz im Zentrum der Proben liegen offenbar die Verhältnisse im Prinzip gleich. Sobald in einer zentralen Partie (deren Ausdehnung durch die Untersuchungen nicht erfaßt werden konnte) die Porenbesetzung ein bestimmtes Ausmaß überschritt, trat der Spannungszustand ein, bei dem die Proben von innen zersprengt wurden, unter treibrißartigen Erscheinungen.

Beim Magnesiumsulfat mit den in den ausgeführten Tränkversuchen auftretenden Formen Kieserit (mit 1 H<sub>2</sub>O) und Bittersalz (mit 7 H<sub>2</sub>O) mit einer Wärmetönungsdifferenz bei der Hydratation von 17,1 kcal./Mol liegen die Verhältnisse offensichtlich im Prinzip gleich (Salzgehalte beim Versuch 177 mit typischer Schalenbildung). Am Bauwerk und möglicherweise auch im Aufsaugversuch sind z. T. andere Hydrate zu erwarten, vor allem statt Kieserit Hexahydrat (mit 6 H<sub>2</sub>O), möglicherweise auch weitere instabile Formen (siehe Seite 65). An Bauten sind natürlich auch die hier meist vorhandenen Lösungsgenossen auf die Bildungsbedingungen der verschiedenen Hydrate von Einfluß, ferner können sich ebenfalls hydratisierte Doppelsalze einstellen wie, bei Gegenwart von Natriumsulfat, Astrakanit (1:1, mit 4 H<sub>2</sub>O). Siehe darüber die Ausführungen von SCHMÖLZER (1936).

Die Versuche mit Salzen ohne Volumwirkung bei Lösungszutritt (Tränk- und Aufsaugversuche mit Natriumchlorid und Kaliumsulfat, Tabellen 16, 17, 21) gestatten noch keine nähere Deutung. Die bedeutend schwächeren, aber doch merklichen Einwirkungen auf den Stein sind offenbar in der Form im einzelnen stark von der Salzart abhängig, und zwar (abgesehen von den Versuchsvariablen) sehr wesentlich von deren stofflichen und strukturell bedingten individuellen Kristallisationseigenschaften. Zweifellos wäre es reizvoll die Beziehungen zwischen den Eigenheiten charakteristischer Kristallarten und den bei Ausscheidung in Gesteinsporen erzeugten Veränderungen einmal näher zu studieren.

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

## 6. Beziehungen zwischen den Versuchsergebnissen und der Gesteinsverwitterung am Bauwerk.

### A. Vergleich zwischen dem Zerfallsvorgang im Versuch und Bauwerk.

Die Beobachtungen an Bauwerken zeigen, daß besonders in den Städten die Verwitterungseinflüsse oft sehr ähnliche, ja in vielen Fällen praktisch gleiche Zerfallsformen an den Bausteinen bewirken, wie sie in den beschriebenen Tränk- und Aufsaugversuchen erzeugt wurden. Siehe die Übersicht der Tabelle 27; ferner wird auf einen Vergleich der hier beigegebenen Photos mit den Figuren im Teil I hingewiesen. In manchen Fällen besteht Übereinstimmung bis in alle Details. So zeigen z. B. die granitischen Sandsteine an Bauwerken Schalenbildungen, die beim selben Gestein unabhängig von der Größe und Form des Werkstückes oder Objektes die gleichen Dickenvariationen zeigen, wie sie auch im Tränkversuch konstatiert werden können.

Damit soll nicht gesagt werden, daß die Absandungen, Zerbröckelungen und Schalen am Bauwerk und im Experiment auf genau gleiche Weise entstehen. Bei der langen Expositionszeit im Freien waren die Einflüsse viel mannigfaltiger. Die Salzangriffe stellen am Bauwerk nur einen mehr oder weniger wichtigen Teil der Einwirkungen dar, es kommen dazu Frost (oft vorwiegend) und die verschiedenen andern in Teil I aufgeführten Einflüsse, die nicht alle wie die Salzlösungen der Versuche praktisch nur physikalisch auf den Stein wirken.

So mußten sich z. B. in den porösen, ein relativ lösliches kalkhaltiges Bindemittel führenden Molassesandsteinen mannigfache Umsetzungen (mit besonders wesentlichen Veränderungen der Porosität) abspielen, die in den wenigen Wochen dauernden Versuchen in keiner Weise auftreten können. Es ist deshalb doch recht erstaunlich, daß z. B. ein Steinobjekt aus granitischem Sandstein unter den normalen mitteleuropäischen Witterungsbedingungen (häufige starke Befeuchtung mit Austrocknung dazwischen) in einer Großstadt mit relativ rauchgasreicher Atmosphäre nach einigen Jahrzehnten mit vielleicht 2000 Wasserbenetzungen genau so zerfallen ist, wie wenn es 10 mal in einer 10<sup>0</sup>/oigen Natriumsulfatlösung getränkt und dazwischen bei 100° getrocknet worden wäre. Andere Sandsteinobjekte sind nach einer Reihe von Jahren so angegriffen, als ob sie ein paar Monate dem Aufsaugversuch ausgesetzt gewesen wären.

Wirklich verschieden sind nur die rein chemischen Einwirkungen durch aggressives Wasser, wie sie, allerdings in den meisten Fällen durchaus untergeordnet, am Bauwerk wirksam sein können. Durch sie werden an Karbonatgesteinen Auflösungsformen erzeugt, wie sie in den kurzen Versuchen natürlich nicht zu beobachten waren.

Tabelle 27

**Art der Einwirkung im Tränk- und Aufsaugversuch und Verwitterungsformen am Bauwerk**

Gestein	Tränkversuch	Aufsaugversuch	Bauwerk
Bernersandsteine	Absandung (Schalen)	—	Absandung (Schalen)
Granitische Sandsteine	Schalen (Absandung)	Absandung (Schalen)	Schalen (Absandung)
Plattensandsteine	Schalen (Absandung)	Abblätterung, Absandung	Abblätterung (Schalen)
Muschelkalksteine	Zerbröckelung, Abblätterung	Ausbröckelungen	Abblätterung, Zerbröckelung (Schalen)
Kalktuffe	Absplitterung	—	Absplitterung
Dichte Kalksteine	Zerbröckelung längs Rissen, Tonhäuten usw.	—	Zerbröckelung längs Rissen, Tonhäuten
Oolithische Kalksteine	Absandg., Zerbröckelung	Absandung	Absandung, Zerbröckelg.
Marmore	Absandung	—	Absandung
Granite, Gneise	Absandg., Abblätterung	Kleine Absplitterungen und Absandungen	Absandung, Abblätterung

**B. Der Normal-Tränkversuch als Prüfmethode für das Verhalten der Gesteine am Bauwerk.**

Die Verwandtschaft der wichtigsten Einwirkungsstoffe im Experiment und am Bauwerk bei der Großzahl der untersuchten Bausteinarten (es gilt dies auch für die Betonproben) lassen solche Versuche mit löslichen Salzen für eine allgemeinere Bewährungsbeurteilung der bei uns verwendeten Steinmaterialien als geeignet erscheinen. Seit einer Reihe von Jahren werden ja Kristallisierungsversuche in verschiedenen Ländern als Bestandteil der Bausteinprüfung angewandt (DE QUERVAIN 1941, mit weitem Literaturangaben). Die ausgeführten Experimente zeigen, daß auch für unsere Verhältnisse Tränkungen in Natriumsulfatlösung, und zwar in 10%iger mit Trocknung bei 100° (je 24 Stunden) für vergleichende Beurteilungen am zweckmäßigsten sind.

Die Verwendung von Magnesiumsulfatlösung, die an sich ebenso naheliegend wäre (Magnesiumsulfat und die damit verbundene Zerstörung ist im Mauerwerk eher verbreiteter als Natriumsulfat), verlängert die Versuchsdauer aber sehr stark und führt bei beständigeren Gesteinen nicht in praktisch vernünftiger Zeit zu einem Ziel. Zudem ist seine Einwirkungsart im Versuch offenbar im allgemeinen vom Natriumsulfat nur wenig verschieden. Die Tränkung in Natriumchloridlösung zeigt Einwirkungen auf einige Gesteinsarten, die von dem, was man an Bauwerken beobachtet, stärker abweichen, dazu würde es ebenfalls viel zu lange dauern, bis sich bei vielen Gesteinen charakteristische, zu einer Klassifikation brauchbare Zerfallerscheinungen bemerkbar machen würden. Dies gilt ebenfalls für die andern angewandten Salze. Die Versuche in Lösungen von Natriumsulfat von geringerer Konzentration, sowie der S. 17 beschriebene Kurzversuch kommen für eine Allgemeinprüfung nicht in Betracht. Die Aufsaugversuche sind trotz ihrer Analogie mit zahlreichen Bereichen am Bauwerk ebenfalls für eine Grundlage weniger geeignet. Einerseits, weil sie sich bei sehr porösen Gesteinen mit starkem Lösungsaufstieg an kleineren Proben gar nicht durchführen lassen, andererseits wegen viel zu langer Dauer an beständigerem Material. Sie geben aber wie der Kurzversuch interessante Hinweise auf das Verhalten in Einzelfällen. Sie sind als Ergänzung wertvoll, wenn z. B. Gesteinsarten zu beurteilen sind, die sich im Normalversuch wenig unterscheiden, oder wenn man über mögliche Zerfallsformen in bestimmten Baubereichen Auskunft erlangen will.

In der Tabelle 30 wird versucht, die Beziehungen zwischen den Feststellungen beim normalen

Tränkversuch in Natriumsulfatlösung\* und den Beobachtungen über das Verhalten der Gesteine an der Witterung am Bauwerk darzustellen, als Grundlage für eine allgemeinere Bewertung der Wetterbeständigkeit der Bausteine, speziell der bei uns verwendeten Gesteinstypen. Es ist hier nicht möglich, die unzähligen Beobachtungen, die zu dieser Aufstellung führten, darzulegen; viele davon sind bereits im Teil I mitgeteilt.

Beim normalen Tränkversuch ist eine an sich naheliegende Beurteilung rein nach dem Gewichtsverlust wenig zweckmäßig. Denn ebenso wichtig wie absolute Materialverluste an Probekörpern sind die Formen der Einwirkungen, die sich zum Teil nicht als Gewichtsverluste angeben lassen. Dies gilt vor allem für Ribbildungen, aber auch ein Zerfall der Probe in wenige größere Stücke oder eine Schalenbildung läßt sich nicht in % Verlust ausdrücken. Die charakteristischen Erscheinungsformen beim Zerfall im normalen Tränkversuch wurden deshalb, z. T. in Kombination mit Gewichtsverlusten in verschiedene Typen gegliedert, die gemäß Tabelle 28 definiert werden.

Tabelle 28

### Typengliederung der Zerfallerscheinungen im Normal-Tränkversuch.

Typ A. Starkes Absanden und Abblättern von den ersten Versuchen an, sich progressiv verstärkend, unter Rundung von Würfelproben (Fig. 1). Bisweilen Bildung mürber Schalen. Probe auch im Innern sich auflockernd.

A 1 Gewichtsverlust von 20 % (oder Totalzerfall) nach T. 2, jedoch bis T. 5 eintretend.

A 2 Gewichtsverlust von 20 % nach T. 5 eintretend.

Typ B. Beträchtliches Absanden oder Abblättern von den ersten Versuchen an, jedoch kaum progressive Zunahme zeigend. Oft bleiben Kanten und Ecken des Würfels relativ gut erhalten. (Fig. 6, 10) Schalenbildung fehlt. Die Proben bleiben im Kern fest.

B 1 Verlust von 15 % bis T. 10 (meist nach T. 5).

B 2 Verlust von 15 % nach T. 10, aber vor T. 30.

Typ C. Typische Schalenbildungen, ohne vorhergehendes stärkeres Absanden (Fig. 3, 4).

C 1 Abfall der Schalen vor T. 15.

C 2 Abfall der Schalen nach T. 15 (meist vor T. 25).

Typ D. Auftreten von Rissen in den Proben (nicht parallel den Kanten). Zerfall (Ausbröckelungen) längs Haarrissen, Tonhäuten, Suturen, Glimmerlagen (Fig. 7, 8 links, 9). Gesteinsmasse innerhalb der Risse nicht oder wenig angegriffen.

D 1 Verlust über 15 % (oder Zerfall in wenige Stücke, resp. starke Ribbildung) vor T. 20

D 2 Verlust über 15 % nach T. 20, jedoch vor T. 40.

D 3 In T. 50 Verlust noch unter 15 %.

Typ E. Kleinere Absandungen, Abblätterungen oder Ausbröckelungen (ohne erheblichere Risse) an Proben, die in der Hauptmasse mindestens bis T. 30 erhalten bleiben (Fig. 14-17).

E 1 Verlust über 5 % vor T. 20.

E 2 Verlust über 5 % nach T. 20, jedoch vor T. 40.

E 3 In T. 50 Verlust 1-5 %.

Typ F. Keine nennenswerten Verluste (weniger als 1 %) bis T. 50. Keine Ribbildungen.

Die in Tabelle 28 aus dem Verhalten im Tränkversuch gewonnenen Typen sollen nun nicht direkt bestimmten Beständigkeitsklassen zugeordnet werden, wie dies seinerzeit etwa durch HIRSCHWALD (1912)

\* Die Gesteine werden am besten als Würfel (gefräst) von 7 cm dem Versuch unterworfen. Die Konzentration der Lösung soll während der ganzen Versuchsdauer 10 % ( $\pm 0,5$  %) betragen, die Lösungstemperatur  $18 \pm 2^\circ$ . Salz-entzug durch die Proben und Verdunstung verändern die Konzentration auf schwer kontrollierbare Weise. Am zweckmäßigsten werden deshalb die Proben nach 2-10 Tränkungen (je nach Porosität) in frische 10 %ige Lösung gebracht. Während den ersten Tränkungsstunden sollen die Proben etwa  $\frac{1}{2}$  cm aus der Lösung herausragen, dann sind sie völlig unterzutauchen. Die Stellung der Würfel ist von Tränkung zu Tränkung zu ändern, da die einzelnen Flächen je nach der Lage (horizontal oder vertikal, oben oder unten) etwas unterschiedlich angegriffen werden. Die Trocknung erfolgt im Trockenschrank mit guter Luftzirkulation bei  $100 \pm 5^\circ$ .

mit seinen aus mikroskopischen Untersuchungen erlangten Bewertungstypen vorgenommen wurde. Eine solche ganz allgemeine Klassifizierung der Wetterbeständigkeit von Bausteinen ist viel zu schematisch. Es ist hier (Tabelle 30) vielmehr der Versuch gemacht worden zu zeigen, welches Verhalten die in die Typen A-F eingereihten Gesteine an den nach Bereichen relativ einheitlichen Verwitterungsverhaltens gegliederten Bauwerken (Tabelle 29) in Berücksichtigung ihrer verschiedenen Standorte erwarten lassen. Dabei werden für jeden einzelnen Bereich, resp. für jedes Objekt vier Verhaltensgrade der Beständigkeit auseinandergehalten, die wie folgt definiert werden:

- 1 Geringe bis mäßige Beständigkeit.  
Erhebliche Verwitterung in einigen Jahren zu erwarten, nur in wenigen Fällen an Bauten genügend.
- 2 Mittlere Beständigkeit.  
Mit stärkerer Verwitterung muß in einigen Jahrzehnten gerechnet werden. Für zahlreiche Bauobjekte ist die Beständigkeit aber genügend.
- 3 Mittlere bis gute Beständigkeit.  
Stärkerer Angriff dürfte sich erst nach mehreren Jahrzehnten bemerkbar machen. Für viele Anwendungen völlig ausreichend.
- 4 Gute bis sehr gute Beständigkeit.  
Für größere Ansprüche.

Diese Bewertung gilt für normale, d. h. nicht außergewöhnlich ungünstige Umstände, wie z. B. unmittelbare Nachbarschaft von Kaminen mit starker Rauchgasentwicklung, direkte Imprägnation mit schädlichen Salzen (Streuen von Kochsalz; Soda aus Waschmitteln), Tränkung mit salz- und säurehaltigen Abwässern. Sie wurde für das Klima des schweizerischen Mittellandes aufgestellt.

Tabelle 29

### **Bereiche analogen Wetterbeständigkeitsverhaltens an Bauwerken.**

(aufgestellt nach den Beobachtungen von Teil I)

- I. Tiefbauarbeiten, die ständiger, oder oft wiederholter Wasserdurchtränkung ausgesetzt sind (Steinbetten, Schotter, Pflastersteine, Randsteine, Treppen im Freien, Wasserbauten aller Art).
- II. Bereiche der aufsteigenden Grund- und Bodenfeuchte (etwa bis 1 oder 2 m über den Boden).
  - IIa. Regelmäßig von Regen befeuchtet (z. B. Monumente, Pfosten; Mauern);
  - IIb. Nicht oder nur selten von direktem Regen getroffen (z. B. Gebäudesockel, Grundmauern).
- III. Vorspringende von Regen regelmäßig getroffene Bauobjekte oberhalb des Grundfeuchtenbereiches.
  - IIIa. Mit ausgesprochener „Unterseite“ (z. B. Gesimse, Fensterbänke).
  - IIIb. Ohne ausgesprochene „Unterseite“ (z. B. Statuen, Zierarbeiten verschiedener Art).
- IV. Glattes Mauerwerk oberhalb des Grundfeuchtenbereiches (oder gegen Grundfeuchte isoliert), von Schlagregen getroffen oder nicht.
  - IVa. Senkrechte Mauerung.
  - IVb. Mauerung mit Anzug.

In der Tabelle 30 sind im weitern für die Bauobjekte folgende **Standorte** auseinandergehalten (wo keine Standortsbezeichnung steht, wurde keine Unterscheidung gemacht).

- s in Großstädten mit viel Industrie (z. B. Zürich, Basel);
- k in mittleren Städten, oder auch kleineren industriereichen Orten (z. B. Bern, Freiburg, Solothurn, Neuchâtel);
- l in fast oder ganz ländlichen Bezirken.

Diese Unterscheidung darf nicht schematisch vorgenommen werden, sondern ist dem Lokalklima besonders der vorherrschenden Windrichtung und andern örtlichen Gegebenheiten anzupassen. So haben z. B. im Mittelland öfters Quartiere auf der Westseite einer Großstadt (s) Verhältnisse wie im allgemeinen kleinere Orte (k oder sogar l), befinden sich die obersten Partien von Türmen in großer Höhe (oberhalb 50 bis 60 m) in freier Lage auch in Städten meist unter ländlichen Verhältnissen (bereits sehr starke Verdünnung der Rauchgase) usw.

Tabelle 30

**Bewertung der Wetterbeständigkeit der Gesteine für verschiedenartige der Witterung ausgesetzte Bauobjekte auf Grund der Normalversuche mit Natriumsulfat**

Typen (Tabelle 28)	Bauobjekte oder -bereiche (Tabelle 29)						
	I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IVa	IVb
A 1	1	s 1 k 2 l 2	s 1 k 1 l 2	s 1 k 1 l 2	s 1 k 2 l 3	s 2 k 2 l 3	s 1 k 2 l 3
A 2	s 1 k 1 l 2	s 1 k 2 l 3	s 1 k 1 l 2	s 1 k 2 l 3	s 2 k 2 l 3	s 3 k 3 l 4	s 2 k 3 l 4
B 1	s 1 k 1 l 2	s 2 k 3 l 4	s 1 k 2 l 3	s 2 k 3 l 3	s 2 k 3 l 3	s 2 k 3 l 4	s 2 k 3 l 3
B 2	s 1 k 2 l 2	s 2 k 3 l 4	s 1 k 2 l 2	s 2 k 3 l 3	s 3 k 3 l 4	s 3 k 4 l 4	s 3 k 4 l 4
C 1	s 1 k 2 l 2	s 2 k 3 l 3	s 1 k 2 l 3	s 2 k 2 l 3	s 2 k 3 l 4	s 3 k 3 l 4	s 2 k 3 l 3
C 2	s 1 k 2 l 2	s 2 k 3 l 3	s 2 k 2 l 3	s 2 k 3 l 3	s 2 k 3 l 4	s 3 k 3 l 4	s 2 k 3 l 3
D 1	s 1 k 2 l 2	s 2 k 3 l 4	s 2 k 2 l 3	s 2 k 3 l 3	s 3 k 3 l 4	s 3 k 3 l 4	s 2 k 3 l 3
D 2	s 2 k 3 l 3	s 3 k 4 l 4	s 2 k 3 l 3	s 2 k 3 l 3	s 3 k 3 l 4	s 3 k 3 l 4	s 2 k 3 l 4
D 3	s 3 k 3 l 4	s 3 k 4 l 4	s 3 k 3 l 4	s 3 k 4 l 4	s 3 k 4 l 4	4	s 3 k 4 l 4
E 1	s 2 k 3 l 3	s 2 k 3 l 4	s 2 k 2 l 3	s 2 k 3 l 4	s 3 k 4 l 4	s 3 k 4 l 4	3
E 2	s 2 k 3 l 4	s 3 k 4 l 4	s 3 k 3 l 4	s 3 k 3 l 4	4	4	s 3 k 4 l 4
E 3	s 3 k 4 l 4	4	s 3 k 4 l 4	s 3 k 4 l 4	4	4	4
F	4	4	s 3 k 4 l 4	s 3 k 4 l 4	4	4	4

Standorte: s = in Großstädten  
 k = in mittleren Ortschaften  
 l = in ländlichen Bezirken

1 Geringe bis mäßige Beständigkeit  
 2 Mittlere Beständigkeit  
 3 Mittlere bis gute Beständigkeit  
 4 Gute bis sehr gute Beständigkeit

### Bemerkungen zu Tabelle 30

1. Selbstverständlich ist allgemeine Voraussetzung, daß die Probe dem wirklich verwendeten Material (wenigstens im Durchschnitt) entspricht. Es bezieht sich dies vor allem auf ein Auftreten von Tonhäuten, Suturen, Haarrissen, mergeligeren Lagen, Kalkgehalt im Bindemittel, Porositätsverhalten.
2. Ferner wird materialgerechte Behandlung des Steines (z. B. lagerhaftes Versetzen) angenommen.
3. Die Angaben für die Eignung für bestimmte Bauobjekte beziehen sich natürlich nur auf die Wetterbeständigkeit, unabhängig davon, ob das Gestein aus andern Gründen (Festigkeit, Härte, Abnützbarkeit, Bearbeitbarkeit usw.) dafür in Betracht kommt.
4. Für die Zuordnung der Gesteine ist noch folgendes zu berücksichtigen:
  - a) Poröse Gesteine verhalten sich sehr oft am Bauwerk oberhalb der Grundfeuchte besser als ihrer Typeneinreihung auf Grund der Tränkversuche entspricht. Sie sind fast immer wetterbeständiger als im Sulfatversuch sich analog verhaltende weniger poröse Gesteine und deshalb relativ günstiger zu beurteilen.
  - b) In sehr säurereichem Klima (in der Schweiz heute nur lokal in ganz industriereichen Stadtbezirken festzustellen) oder gegenüber sehr weichem oder CO<sub>2</sub>-reichem aggressivem Wasser verhalten sich kalkige Gesteine (Marmore, Kalksteine, kalkhaltige Sandsteine) ungünstiger als ihrer Einreihung entspricht.
  - c) Gesteine mit erheblichem Pyritgehalt (bei Sandsteinen, Kalksteinen und einzelnen kristallinen Gesteinen nicht selten) verhalten sich schlechter als den Versuchsergebnissen entspricht. Die Gesteinsangriffe durch Pyritzerersetzung kommen durch diese Kurzversuche nicht zur Auswirkung.
  - d) Oberflächenverfärbungen von Gesteinen können natürlich nicht erfaßt werden.

## 7. Petrographische Charakterisierung der untersuchten Gesteine.

Die petrographische Beschreibung beschränkt sich stichwortartig auf wesentliche Merkmale. Weitere Angaben über die Gesteinsbeschaffenheit finden sich in DE QUERVAIN-GSCHWIND (1949). An den untersuchten Proben wurden neu bestimmt, resp. berechnet: Spezifisches Gewicht ( $\gamma_s$ ), Raumgewicht ( $\gamma$ ), Absolute Porosität ( $n$ ), Wasseraufnahme bis zur Sättigung ( $w$ ), Wasseraufnahme in 24 h ( $w_{24h}$ ), scheinbare Porosität bezogen auf  $w$  ( $n^*$ ) und auf  $w_{24h}$  ( $n^*_{24h}$ ). In einigen Fällen wurden noch bestimmt: Geschwindigkeit der Wasseraufsaugung und Durchlässigkeit. An den untersuchten Gesteinen selbst wurden Festigkeitswerte (Druckfestigkeit ( $\beta_d$ , in  $\text{kg/cm}^2$ ) nur vereinzelt bestimmt. Von analogen Proben der gleichen Vorkommen sind aber meistens Druckfestigkeitswerte (Natürliche Bausteine 1915, DE QUERVAIN-GSCHWIND 1949) bekannt, hier mit  $\beta_d^*$  angegeben (trocken). Oft handelt es sich um Grenzwerte mehrerer Einzelbestimmungen. Die Prozentangaben hinter einigen Festigkeitswerten bedeuten den durchschnittlichen Festigkeitsabfall im wassergetränkten Zustande (nur angegeben, sofern erheblich). Daten über die für die Fragen dieser Untersuchung wesentliche Zugfestigkeit liegen keine vor. Die Zugfestigkeit beträgt im allgemeinen  $1/10$ — $1/15$  der Druckfestigkeit.

### A. Sandsteine.

#### Sandstein vom Bernertypus.

Allgemeine Eigenschaften: fein- bis mittelkörnig, homogen bis deutlich dünn-schichtig, grünlich-grau, bläulich-grau oder gelblich, deutlich feinporös, von geringer Festigkeit,  $\beta_d^*$  meist 250—400 (50—60%), vereinzelt höher. Vorkommen im Burdigalien der flachen Molasse der Umgebung von Bern und Freiburg.

Mikr.: Körner von Quarz gegenüber Feldspäten erheblich vorwiegend. Glimmergehalt etwas wechselnd. Zahlreiche Körner von Glaukonit, bei gelblichen Steinen zersetzt. Als Zwischenmasse mit nur teilweiser Bindung Kalkspat (18—28%), dazu pelitische Füllmasse in Poren.

Es konnten Versuche an zahlreichen Varietäten durchgeführt werden:

Sehr feinkörnige, feste Varietät, mittlere Korngröße 0,10 mm, ausgesprochen feinschichtig mit Lagen von etwas verschiedenem Korn, graubläulich, Probe aus dem alten Mauerwerk (15. Jahrhundert, genaue Herkunft nicht sicher), des Berner Münsters, Kalkgehalt 27% (Nr. 1).

Feinkörnige, feste Varietäten, mittlere Korngröße 0,15—0,2 mm, deutlich feinschichtig, graugrünlich bis graubläulich. Proben vom Steinbruch Wabern am Gurten, Kalkgehalt 23% (Nr. 2) und aus dem Mauerwerk (18. Jahrhundert) des Hauses Rüfenacht an der Spitalgasse Bern, Kalkgehalt 26% (Nr. 3).

Feinkörnige, normale Varietäten, mittlere Korngröße (0,12—0,2 mm, wenig schichtig, Proben von Utzigen, grau, Kalkgehalt 25% (Nr. 4), gelb, Kalkgehalt 28,5% (Nr. 5) und von Freiburg, Kalkgehalt 22,5% (Nr. 6).

Mittelkörnige Varietäten, mittlere Korngröße 0,25—0,32 mm, durchwegs homogen. Proben von Ostermundigen, blau, Kalkgehalt 22% (Nr. 7), grau, 20,5% Kalkgehalt (Nr. 8), gelb, Kalkgehalt 21,5% (Nr. 9), Krauchtal, olivengrün, Durchlässigkeit  $K_{10} = 1,53 \cdot 10^{-5} \text{ cm/sec}$ , Kalkgehalt 23,5% (Nr. 10), Stockeren, gelb, ab Steinbruch, Kalkgehalt 22% (Nr. 11), aus einem Mauerquader des Münsters [um 1900], Kalkgehalt 23,5% (Nr. 12).

Relativ grobkörnige Varietät, mittlere Korngröße 0,35—0,4 mm, homogen. Probe von Oberburg, blau, Kalkgehalt 18% (Nr. 13).

Die Tabelle 31 zeigt, daß die feinkörnigen Varietäten 1—3 sich von den andern deutlich unterscheiden, besonders fällt der alte Münsterstein (1) ganz aus der Reihe. Bei den andern Typen sind offenbar weder der Kalkgehalt noch die Korngröße oder die Färbung von eindeutigem Einfluß auf die Porositäts- und Wasseraufnahmeverhältnisse.

Bei der Bedeutung des kapillaren Wasseraufstieges bei den feinporösen Bernersandsteinen wurde die Geschwindigkeit der Wasseraufsaugung an den Probewürfeln bestimmt und im Diagramm 12 dargestellt (siehe auch die Fig. 55). Auch hier fällt der alte Stein vom Münster durch seine langsame Wasseraufsaugung ganz heraus, bei den andern geht sie einigermaßen aber nicht streng parallel der totalen Wasseraufnahme.

Tabelle 31

**Porosität und Wasseraufnahme der Sandsteine vom Bernertypus**  
(Diagramm 11)

Varietäten	$\gamma_s$	$\gamma$	n %	w %	w 24 h %	n* %	n* 24 h %
sehr feinkörnig (Nr. 1)	2,72	2,34	13,9	4,85	4,20	11,3	9,82
feinkörnig (2)	2,72	2,26	16,9	5,01	4,64	11,5	10,5
feinkörnig (3)	2,72	2,26	16,9	5,71	5,20	12,9	11,8
feinkörnig (4)	2,71	2,20	18,0	6,44	5,80	14,2	12,8
feinkörnig (5)	2,71	2,20	18,0	5,89	5,72	13,0	12,6
feinkörnig (6)	2,71	2,13	21,4	7,95	6,81	16,9	14,5
mittelkörnig (7)	2,69	2,23	17,1	6,50	—	14,5	—
mittelkörnig (8)	2,71	2,21	18,4	6,47	5,59	14,3	12,3
mittelkörnig (9)	2,70	2,22	17,7	6,13	5,37	13,7	11,9
mittelkörnig (10)	2,70	2,19	18,1	6,45	5,68	14,1	12,4
mittelkörnig (11)	2,71	2,12	21,7	7,50	6,47	15,9	13,7
mittelkörnig (12)	2,71	2,06	24,3	8,12	7,13	16,7	14,7
mittelkörnig (13)	2,71	2,14	21,0	6,65	6,16	14,2	13,1

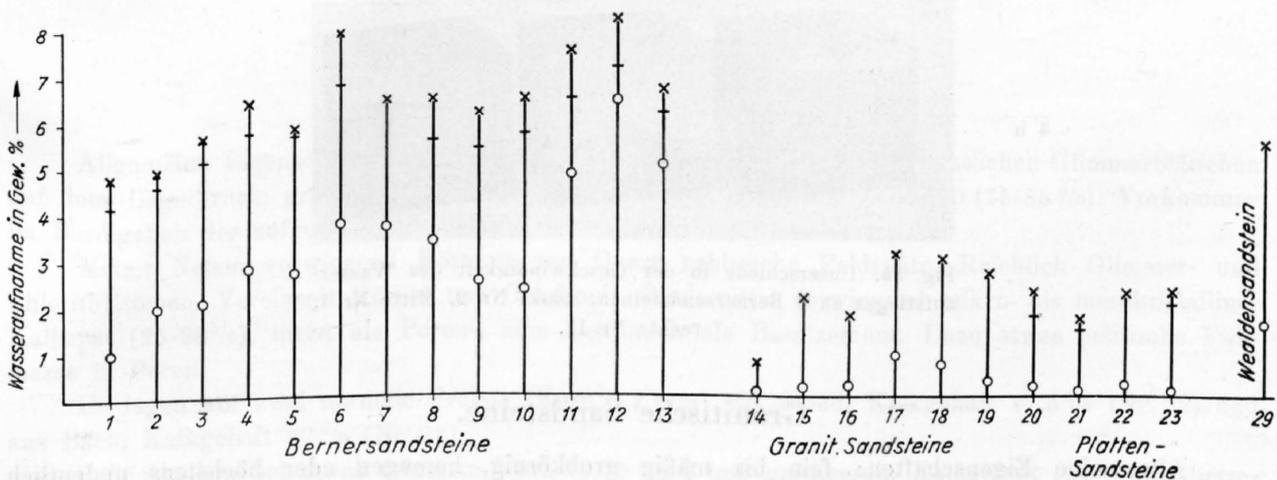


Diagramm 11.

Wasseraufnahme bei Sandsteinproben. × bis zur Sättigung, — in 24 Stunden, ○ in 5 Minuten.

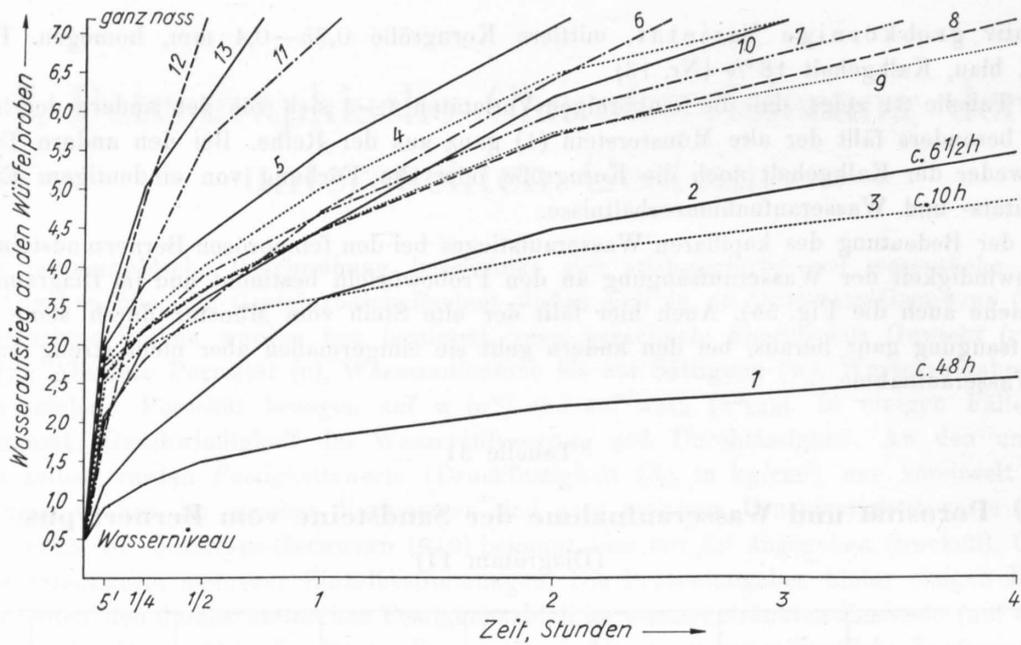
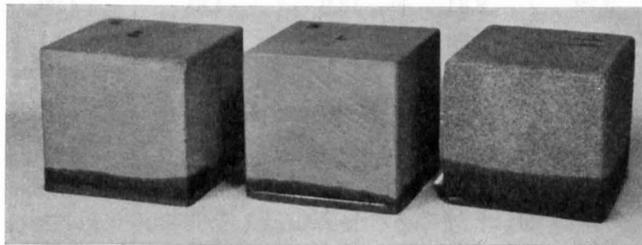


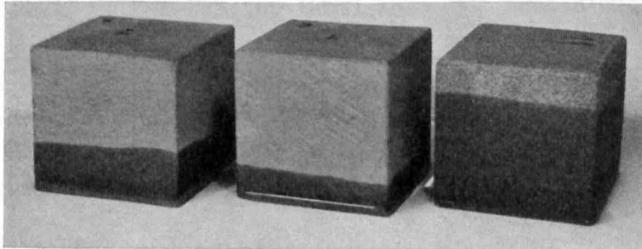
Diagramm 12.

Geschwindigkeit des kapillaren Wasseraufstieges an den untersuchten Bernersandsteinproben.

Nach: 5 min



1/2 h



4 h

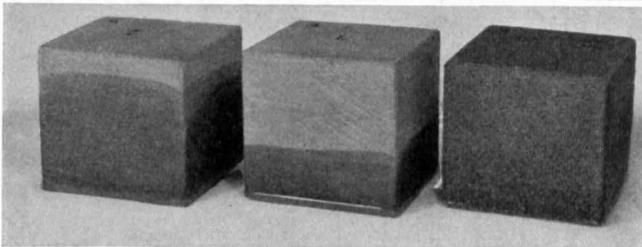


Fig. 55. Unterschiede in der Geschwindigkeit des Wasseraufstieges an 3 Bernersandsteinen. Links Nr. 2, Mitte Nr. 1, rechts Nr. 11.

### Granitische Sandsteine.

Allgemeine Eigenschaften: fein bis mäßig grobkörnig, homogen oder höchstens undeutlich schichtig, lichtgrau gefärbt mit rötlichen Körnern, mittlere Festigkeiten meist 500—1000 (70—80 %), vereinzelt höher. Vorkommen im Aquitan der subalpinen Molasse der Ostschweiz.

Mikr.: Als Körner Quarz (30-50 %) und reichlich Feldspäte (25-40 %), oft etwas zersetzt, dazu Chlorit und Glimmer (4-8 %) vereinzelt auch Kalkstein- und Dolomitmörner. Korngröße auch im gleichen Gestein sehr unterschiedlich. Bindemittel: grobkristalliner Kalkspat (meist 5—15 %, vereinzelt mehr), untergeordnet auch unmittelbare Kornbindung. Leere Poren meist häufig.

Es wurden Versuche mit folgenden Unterarten durchgeführt:

Sehr feste und kompakte Varietät, mittelkörnig, graurötlich, mit höherem Gehalt an Kalkbindemittel (25 %) und großer Festigkeit,  $\beta^*_{d}$  1589. Proben von Guntliweid bei Nuolen (Nr. 14 und 14a).

Sehr feinkörnige Varietät, mittlere Korngröße 0,2 mm, homogen, relativ fest. Durchlässigkeit  $K_{10}^{\circ}$   $1,09 \cdot 10^{-7}$  cm/sec. Kalkgehalt 16 %. Probe von St. Margrethen (Nr. 15).

Mittelkörnige Varietäten, mittlere Korngrößen 0,35—0,4 mm. Es standen zur Verfügung Proben von: Neuhaus bei Schmerikon, Kalkgehalt 12,5 % (Nr. 16), St. Margrethen, Kalkgehalt 9 % (Nr. 17), Ägeri, Kalkgehalt 6,5 % (Nr. 18).

Grobkörnige Varietäten, mittlere Korngröße 0,5—0,7 mm, Proben von Lothenbach, grau, Kalkgehalt 10 % (Nr. 19), blau, Kalkgehalt 7,5 % (Nr. 20).

Tabelle 32

**Porosität und Wasseraufnahme der granitischen Sandsteine**

(Diagramm 11)

Varietäten	$\gamma_s$	$\gamma$	n %	w %	w 24 h %	n* %	n* 24 h %
sehr fest und komp. (Nr. 14)	2,70	2,64	2,2	0,73	0,58	1,9	1,5
sehr fest und komp. (14a)	2,71	2,68	1,1	0,64	—	1,3	—
sehr feinkörnig (15)	2,69	2,52	6,3	2,17	—	5,8	—
mittelkörnig (16)	2,66	2,52	5,2	1,80	1,69	4,5	4,3
mittelkörnig (17)	2,64	2,38	9,8	3,11	—	7,4	—
mittelkörnig (18)	2,66	2,39	10,1	3,07	—	7,6	—
grobkörnig (19)	2,68	2,46	8,2	2,69	—	7,8	—
grobkörnig (20)	2,68	2,49	7,1	2,32	1,78	5,8	4,4

**Plattensandsteine und ähnliche.**

Allgemeine Eigenschaften: vorwiegend feinkörnig, dünn-schichtig mit deutlichen Glimmerblättchen auf dem Lagerbruch, grünlichgrau bis grau, mittlere Festigkeit  $\beta^*_{d}$  800-1100 (75-85 %). Vorkommen im Burdigalien der aufgerichteten Molasse der Zentral- und Ostschweiz.

Mikr.: Neben vorwiegend Körnern von Quarz zahlreiche Feldspäte. Reichlich Glimmer- und Chloritblättchen. Vereinzelt Körner von Glaukonit. Bindemittel vorwiegend mikro- bis mesokristalliner Kalkspat (25-28 %), meist als Poren-, zum Teil auch als Basalzement. Dazu etwas pelitische Füllmasse in Poren.

Es lagen vor zwei normale Proben (Korn 0,2 mm) aus Staad, Kalkgehalt 27,5 % (Nr. 22) und aus Bäch, Kalkgehalt 27 % (Nr. 21).

Sehr ähnlich, bei etwas feinerem Korn (0,15 mm) und geringerem Kalkgehalt (14 %) ist petrographisch die Probe von Echarlens (Grès de Bulle) aus dem Stampien der subalpinen Molasse der Westschweiz (Nr. 23).

Tabelle 33

**Porosität und Wasseraufnahme der Plattensandsteine und ähnlichen**

	$\gamma_s$	$\gamma$	n %	w %	w 24 h %	n * %	n 24 h %
Plattensandstein (Nr. 21)	2,71	2,55	5,9	1,70	1,47	4,3	3,8
Plattensandstein (22)	2,70	2,50	7,4	2,25	—	5,6	—
Sandstein (23)	2,68	2,52	6,0	2,28	1,98	5,7	5,0

**Verschiedene Sandsteine.**

Sandstein bis Breccie des Verrucano, geschiefert, rot, fest,  $\beta^*_d$  1210, Probe von Mels (Nr. 24).

Mikr.: Körner sehr wechselnder Größe (0,5 bis mehrere mm) von Quarz, Feldspäten, Muskowit, auch Gesteinen (Quarzporphyren, Graniten, Keratophyren, Quarziten) in reichlich sehr feinkristallinen serizitisch-quarzitischen Bindemitteln (Basalzement) mit deutlich gerichteter Textur.

Kalkiger Sandstein, stark geschiefert, dünnlagig, grau, fest, Probe von Chur, aus Bündnerschiefern, vermutlich Lias (Nr. 25).

Mikr.: Wechselnde Lagen von vorwiegend Quarzkörnern (0,1—0,3 mm) (teils direkt verwachsen, teils mit grobkristallinem Kalkspat verbunden) und dünnen ziemlich durchgehenden schwach welligen Serizithäuten. Kalkgehalt 22 %.

Glaukonitsandstein der mittleren Kreide, sehr feinkörnig, schwärzlich, sehr fest,  $\beta_d$  3325. Probe von Sevelen (Nr. 26).

Mikr.: Quarzkörner ca. 70—75 % von einheitlicher Größe (0,1—0,2 mm) teils direkt verwachsen, teils mit Bindemittel von Glaukonit (10—15 %) und einer feinfaserigen äußerst feinen Mineralsubstanz, in Poren etwas Kalkspat.

Mittel- bis grobkörniger Sandstein des Flysches, grau, kompakt und fest,  $\beta^*_d$  1921—2631. Probe von Alpnach (Nr. 27).

Mikr.: Körner sehr wechselnder Größe (0,2 bis über 2 mm) von vorwiegend Quarz, untergeordnet Feldspäten und Glimmer in einem reichlichen, grobkristallinen Bindemittel von Kalkspat (Poren bis Basalzement).

Kalkreicher Sandstein des Stampien der Molasse, grau, mittelkörnig, fest und kompakt  $\beta^*_d$  2279. Probe von Krummenau (Nr. 28).

Mikr.: Körner (Größe 0,3—0,8 mm) vorwiegend aus feinkristallinen gerundeten Kalksteinen und Dolomiten, untergeordnet aus Quarz, Hornstein, Feldspäten, in reichlicher mesokristalliner Zwischenmasse aus Kalkspat (meist Basalzement). Karbonatgehalt 84 %.

Quarzreicher Sandstein des Wealden (Untere Kreide), feinkörnig, lagig, gelblich-braun, porös aber fest,  $\beta^*_d$  417—741. Probe von Obernkirchen (Hannover) (Nr. 29).

Mikr.: Körner weit vorwiegend Quarz (0,1 mm), ziemlich einheitlich, wenig Feldspat. Körner meist direkt miteinander verwachsen oder durch kieseligen Kontaktzement. Zahlreiche Poren in Körnerlücken.

Tabelle 34

**Porosität und Wasseraufnahme der weiteren Sandsteine**

Varietäten	$\gamma_s$	$\gamma$	n %	w %	w 24 h %	n* %	n* 24 h %
Sandstein bis Breccie des Verrucano (Nr. 24)	2,73	2,69	1,4	0,35	0,28	0,9	0,8
Kalkiger Sandstein stark geschiefert (25)	2,78	2,75	1,1	0,56	—	1,5	—
Glaukonitsandstein (26)	2,71	2,69	0,7	0,18	—	0,5	—
Flyschsandstein (27)	2,66	2,64	0,7	0,29	—	0,7	—
Kalkreicher Sandstein (28)	2,76	2,72	1,5	0,53	—	1,4	—
Quarzreicher Sandstein (29)	2,66	2,22	16,5	5,48	4,87	12,2	10,8

**B. Kalksteine und Marmore.**

**Muschelkalksteine (marine Molasse).**

Kalkreiche Varietät, gelblichgrau. Breccie von Muschelschalentrümmern, schichtige Textur, mit sehr spärlichen Sandeinlagerungen. Zahlreiche grobe Poren. Probe von Neuenhof (Nr. 30).

Mikr.: Dicht gepackte Muschelschalentrümmer (von meist grobkristalliner, bisweilen auch faseriger Struktur), durch eine spärliche mikrokristalline Kalkmasse verkittet. Quarzkörner ganz vereinzelt eingestreut. Zahlreiche Hohlräume, oft konkave Partien der Muscheltrümmer. Kalkgehalt 95 %.

Sandreiche Varietät, bläulichgrau. Breccie von Muschelschalentrümmern mit reichlich eingelagerten sandsteinartiger Zwischenmasse.  $\beta^*_d$  455. Probe von Würenlos (Nr. 31).

Mikr.: Muschelschalen locker eingelagert in reichlich mikrokristalline Kalkmasse voller Körner (0,1—1 mm) von Quarz, Hornstein, Feldspäten, Chlorit. Vereinzelt grüne Glaukonitkörner. Zahlreiche Poren, fein bis grob. Kalkgehalt 56 %.

Feinsandige Varietät, bläulichgrau. Muschelschalen (oft ganz) zerstreut in reichlicher Zwischenmasse vom Charakter eines feinkörnigen Sandsteins. Poren in Form großer Löcher (Hohlräume im Innern der Muscheln). Probe von Estavayer (Nr. 32).

Mikr.: Vereinzelt mikro- bis mesokristalline Muschelschalen. Zwischenmasse aus mikro- bis kryptokristallinem Kalkspat, erfüllt von sehr feinen (0,2—0,05 mm) Körnern von Quarz, reichlich gerichteter Glimmer und Chlorit. Große, langgestreckte Hohlräume. Kalkgehalt 60 %.

Feinbrecciöse Varietät (Randengrobkalk), bräunlich, feinkörnige Breccie von Schalentrümmern (Muscheln und Schnecken) mit schichtiger Textur. Partienweise mit grober Sandeinlagerung. Stark porig. Probe von Altorf (Schaffhausen) (Nr. 33).

Mikr.: Gerüst von mikrokristallinen Schalen. Sehr spärliche Zwischenmasse. Eingelagert stellenweise reichlich Körner (0,3—1 mm) von Quarz. Durchsetzt von größeren Poren. Kalkgehalt 64 %.

**Kalktuffe**

Mäßig löcherige Varietät (Travertinartig) fest,  $\beta^*_d$  225. Probe von Corpataux (Nr. 34).

Mikr.: Gerüst von vorwiegend rundlichen Kalkspatkörnern (mikro- bis makrokristallin), oft mit Poren in den Zwickeln. Zahlreiche größere Hohlräume.

Stark löcherige Varietät, größtenteils gut verfestigt, in Löchern z. T. mäßig feste Kalkmasse,  $\beta^*_d$  96. Probe von Libingen (Toggenburg) (Nr. 35).

Mikr.: Kalkmasse weit vorwiegend mikrokristallin. Oft konzentrisch schalige Anordnung, besonders um die Hohlräume.

Extrem löcherige Varietät, stellenweise Kalkmasse auf dünnes Gerüst beschränkt, aber fest. Probe vom Wallis (Nr. 36)

Mikr.: Kalkmasse meist mikrokristallin z. T. kryptokristallin.

Tabelle 35

**Porosität und Wasseraufnahme der Muschelkalksteine und Kalktuffe**

Varietäten	$\tilde{\gamma}_s$	$\tilde{\gamma}$	n %	w %	n* %
Muschelkalkstein, kalkreich (Nr. 30)	2,72	2,33	14,3	3,26	7,4
Muschelkalkstein, sandreich (31)	2,72	2,53	6,9	0,34	0,9
Muschelkalkstein, feinsandig (32)	2,71	2,39	12,2	—	—
Muschelkalkstein, feinbrecciös (33)	2,72	2,16	20,6	5,88	12,7
Kalktuff, mäßig löcherig (34)	2,72	1,97	27,6	} nicht bestimmbar	
Kalktuff, stark löcherig (35)	2,72	1,76	35,3		
Kalktuff, extrem löcherig (36)	2,72	1,45	46,7		

**Juragebirge.**

Dichter Kalkstein, kompakt, mit muscheligen Bruch, ohne erkennbare Tonhäute, dagegen mit zackiger Suture.  $\beta^*_d$  1398—1720. Probe von Dielsdorf aus den Wangenerschichten des Sequans (Nr. 37).

Mikr.: Weit vorwiegend kryptokristallin ( $< 0,001$  mm), mit zahlreichen isolierten mikrokristallinen Fossilresten (0,01—0,1 mm). Kalkgehalt 93 %. Rest Kieselpartikel, Tonmineralien.

Dichter bis schwach spätiger Kalkstein, in der Masse sehr kompakt aber von zahlreichen feinsten Haarrissen und wenigen Suturen durchzogen. Probe von Istein (Baden) aus dem Rauracien (Nr. 38).

Mikr.: Grundmasse kryptokristallin, zahlreiche mikro-, meso- bis makrokristalline Einlagerungen (z. T. undeutliche Fossilreste). Aderfüllungen von grobkristallinem Kalkspat.

Fossilreicher Kalkstein, erfüllt von großen Nerineen und Echinodermenbruchstücken, von zahlreichen dünnen Tonhäuten durchzogen, vereinzelt große Poren, sonst kompakt,  $\beta^*_d$  1062—1662. Probe von Solothurn aus dem Kimeridgien (Nr. 39).

Mikr.: Grundmasse kryptokristallin, voller grobkristalliner Schalenreste, vereinzelt Poren (oft im Innern von Schalen).

Groboolithischer Kalkstein, mit makroskopisch erkennbaren Ooiden (bis mehrere mm) in ziemlich kompakter Zwischenmasse. Proben lagenweise von ganz dünnen Tonhäuten durchzogen  $\beta^*$  902—1589 (70—95 %). Probe von Laufen aus dem Sequan (Nr. 40).

Mikr.: Kryptokristalline Ooiden ( $< 0,5$ —3 mm) und grobkristalline Fossilreste derselben Größe (meist Echinodermen) sind durch mikro- bis mesokristallinen Kalkspat verbunden.

Oolithisch-spätiger Kalkstein, nicht völlig kompakt, von einzelnen dünnen Tonhäuten durchzogen. Probe von Merdingen (Baden) aus dem Hauptrogenstein des Doggers (Nr. 41).

Mikr.: Kryptokristalline Ooide ( $< 0,4$ —2 mm) und grobe Fossiltrümmer (mit faseriger oder grobkristalliner Innenstruktur) in ziemlich spärlicher mikrokristalliner Zwischenmasse.

Feinspätiger Kalkstein, sandiger Bruch, nicht völlig kompakt, von unregelmäßigen Tonhäuten durchzogen.  $\beta^*_d$  824 (74 %). Probe vom Kornberg bei Frick aus den Macrocephalussschichten des Callovien (Nr. 42).

Mikr.: Hauptmasse Echinodermenbruchstücke und andere Fossilien, meist 0,1—0,2 mm, vereinzelt bis 0,5 mm. Untergeordnet rundliche kryptokristalline Gebilde. Vereinzelt Quarzkörner (wenige %) 0,05—0,2 mm. Netzartige, unregelmäßige Imprägnierung mit gelber eisenschüssiger Tonmasse. Zahlreiche rundliche Hohlräume 0,05—0,1 mm. Vereinzelt größere langgestreckte Löcher. Kalkgehalt 85 %, Rest Quarz,  $Fe_2O_3$  und Tonmineralien.

Grobspätiger, grobporöser Kalkstein (Schaumkalk), mit reichlich undeutlichen Tonhäuten.  $\beta^*_d$  215—323 (69—87 %). Proben aus dem Hauterivien östlich Neuchâtel (Nr. 43, 44).

Mikr.: Hauptmasse grobe Fossilreste bis mehrere mm (vorwiegend Echinodermenbruchstücke), daneben rundliche kryptokristalline Ooidenkörner. Zwischenmasse mesokristalliner Kalkspat. In Fossilien und Zwischenmasse ist unregelmäßig eisenschüssige Tonsubstanz eingelagert. Viele rundliche oder gestreckte Hohlräume < 0,1 bis über 1 mm. Zahlreiche oolithische Körner sind von Poren umgeben und fallen leicht heraus. Kalkgehalt 92 %, Rest etwas Quarz und Kieselsubstanz, Eisenhydroxyd, Tonminerale.

Tabelle 36

**Porosität und Wasseraufnahme der Kalksteine aus dem Juragebirge**

Varietäten	$\gamma_s$	$\gamma$	n %	w %	n* %
Dichter Kalkstein (Nr. 37)	2,70	2,65	1,8	0,55	1,5
Dichter, schwach spätiger Kalkstein (38)	2,72	2,66	2,2	0,22	0,6
Fossilreicher Kalkstein (39)	2,72	2,68	1,4	0,31	0,8
Groboolithischer Kalkstein (40)	2,71	2,62	3,3	0,65	2,5
Oolithisch-spätiger Kalkstein (41)	2,70	2,58	4,4	0,96	2,6
Feinspätiger Kalkstein (42)	2,72	2,51	7,7	3,03	7,6
Grobspätiger, grobporöser Kalkstein (43)	2,72	2,23	18,0	4,87	10,9
Grobspätiger, grobporöser Kalkstein (44)	2,73	2,34	14,3	4,89	11,5

**Kalksteine der Alpen.**

Dichter Kalkstein, grauschwarz, kompakt, mit dünnen, schwarzen, gewellten Tonschieferhäuten im Abstand von wenigen cm. Vereinzelt dünne Kalkspatadern.  $\beta^*_d$  1184—1537. Probe von St. Triphon aus der Trias der Klippendecke (Nr. 45).

Mikr.: Hauptmasse fein mikrokristallin (um 0,01 mm), in Nestern gröbere Partien (bis mesokristallin).

Nummulitenkalkstein, grauschwarz, kompakt, mit undeutlichen Tonschieferhäuten und zahlreichen bis mehrere mm breiten Kalkspatadern.  $\beta^*_d$  1146. Probe von Ragaz (Eocän) (Nr. 46).

Mikr.: Hauptmasse wird von Nummuliten und andern Foraminiferen (bis mehrere mm groß) eingenommen (meist mit feinfaserigem Bau). Spärliche Zwischenmasse mikrokristallin.

Oolithisch-spätiger Kalkstein, grauviolett, kompakt, mit vereinzelt rötlichen Tonschieferhäuten.  $\beta^*_d$  1890—2102. Probe von Collombey aus dem Hauterivien der autochthonen helvetischen Serie (Nr. 47).

Mikr.: Kryptokristalline Ooide und grobkristalline Echinodermenbruchstücke durch teils reichliche, teils spärliche mikrokristalline Zwischenmasse verbunden. Vereinzelt Einlagerungen von Quarzkörnchen bis 0,2 mm (wenige %). Hervortreten von dünnen eisenschüssigen Tonschieferhäuten.

Grobspätiger Kalkstein (Echinodermenbreccie), rötlich, kompakt, mit spärlichen Suturen und undeutlichen Tonschieferlagen.  $\beta^*_d$  1029. Probe von Villeneuve aus dem Lias der Klippendecke (Nr. 48).

Mikr.: Grobkristalline (vorwiegend 0,5—2 mm) Kalkspatindividuen (oft im Innern pigmentiert, organische Struktur undeutlich) vorwiegend direkt verbunden, oft mit glatten Kontaktflächen. Partienweise auch feinere Strukturen (mesokristallin). Lückenhafte Tonschieferhäute.

Grobspätiger Kalkstein, grau, kompakt, mit lückenhaften Tonschieferhäuten.  $\beta^*_d$  1375—1628. Probe von Villeneuve aus dem Lias der Klippendecke (Nr. 49).

Mikr.: Wechsolvollere Struktur als rötliche Varietät. Reichlich mikro- bis mesokristalline Partien zwischen den groben Echinodermenbruchstücken. Lückenhafte Tonschieferhäute.

Tabelle 37

**Porosität und Wasseraufnahme der Kalksteine aus den Alpen**

Varietäten	$\gamma_s$	$\gamma$	n %	w %	n* %
Dichter Kalkstein (Nr. 45)	2,73	2,71	0,7	0,03	0,1
Nummulitenkalkstein (46)	2,74	2,70	1,4	0,13	0,4
Oolithisch-spätiger Kalkstein (47)	2,74	2,71	1,1	0,16	0,4
Grobspätiger Kalkstein, rötlich (48)	2,72	2,71	0,4	0,14	0,4
Grobspätiger Kalkstein, grau (49)	2,75	2,72	1,1	0,16	0,4

**Marmore und Kalksilikatfelse.**

Feinkörniger Marmor, vollkommen rein, weiß, ungerichtet.  $\beta^*_d$  1125. Probe von Carrara (statuario) (Nr. 50).

Mikr.: Struktur mesokristallin, Korngröße vorwiegend 0,1—0,2 mm, auch unter 0,1 mm. Die größeren isometrischen Körner sind teils direkt, teils durch ein mörtelartiges feinerkristallines Kalkspatgewebe verbunden.

Grobkörnige Marmore, weiß und grau, mit undeutlich gerichteter Textur (an lückenhaften Phlogopitzügen sichtbar).  $\beta^*_d$  910. Proben von Val Peccia (metamorphe Triaskalke der penninischen Region) (Nr. 51a, b).

Mikr.: Ausgesprochen makrokristalline Struktur, Korngröße ziemlich gleichmäßig 1—2 mm (vereinzelt darüber) mit teils glatten, teils wenig buchtigen Kontaktflächen der Kalkspatkristalle. Spärliche Einlagerungen von rundlichen Quarzkörnern und Phlogopitblättchen. Dazu ganz untergeordnet weitere Silikate und gelegentlich kleinste Pyritkörnchen.

Silikatmarmor, streifig, mit silikatreicheren und silikatärmeren Lagen von je ca. 1—2 cm.  $\beta^*_d$   $\perp$  1175, // 972. Probe von Castione (metamorphes Mesozoikum der Wurzelzone) (Nr. 52).

Mikr.: Vorwiegend makrokristalline Struktur (0,5—2 mm) mit teils glatten, teils buchtigen Kontaktflächen der Kalkspatindividuen. In hellen Lagen nur wenig Quarzkörner und Phlogopitblättchen, in dunkeln reichlicher Silikate, darunter auch Diopsidkörner bis mehrere mm. Zahlreiche Nebengemengteile, darunter kleinste Pyritkörnchen. Kalkgehalt 60 %.

Kalksilikatfels, von gerichteter gestreckter Textur.  $\beta^*_d$  1769. Probe von Castione (metamorphes Mesozoikum der Wurzelzone) (Nr. 53).

Mikr.: Sehr mineralreiches Gestein mit reichlich Kalkspat, Quarz, Plagioklas, Biotit, Diopsid, Granat, untergeordnet zahlreiche weitere Mineralien. Helle (stengelartige) Lagen führen vorwiegend Quarz, Kalkspat und Plagioklas, grüne Lagen vorwiegend Diopsid, braune vorwiegend Biotit. Rote Granate ziemlich regelmäßig verteilt. Alle Gemengteile sich gegenseitig stark durchwachsend. In kleinsten Körnchen fein verteilt Magnetkies. Kalkgehalt 13 %.

Tabelle 38

**Porosität und Wasseraufnahme der Marmore und Kalksilikatfelse**

Varietäten	$\gamma_s$	$\gamma$	n %	w %	n* %
Feinkörniger Marmor (Nr. 50)	2,72	2,70	0,7	0,23	0,6
Grobkörniger Marmor, weiß (51a)	2,72	2,70	0,7	0,12	0,3
Grobkörniger Marmor, grau (51b)	2,74	2,73	0,4	0,16	0,4
Silikatmarmor (52)	2,73	2,71	0,7	0,11	0,3
Kalksilikatfels (53)	2,86	2,82	1,4	0,23	0,7

## C. Kristalline Gesteine.

Aaregranit, feinkörnig, aplitische Varietät, frisch und kompakt, nur undeutlich gerichtet.  $\beta^*_d$  1924—2498. Probe aus der Schöllenen (Nr. 54).

Mikr.: Mikroklinperthit (30—40%), Oligoklas (20%), etwas mit Epidot und Serizit gefüllt, Quarz (30—35%) als Mörtelquarz, Biotit und Muskowit (5—10%) in Schlieren und Flecken gehäuft oft mit Epidot. Korn: 0,5—2 mm, kaum porphyrisch.

Mont Blancgranit, normaler, mittel- bis grobkörniger Typus, frisch, massig.  $\beta^*_d$  1360—1688. Probe von Monthey (Abbaustellen in Findlingen) (Nr. 55).

Mikr.: Mikroklinperthit (40—50%), Oligoklas (20%), mit etwas Serizit erfüllt, Quarz (30%) oft undulös, mit Mörtelrändern, Biotit (10—15%) zerdrückte Aggregate in Flecken, oft mit Epidot und Titanit. Korn 1—10 mm, schwach porphyrisch.

Fibbiagranitgneis, normale porphyrische Ausbildung mit deutlicher Schieferung und von Auge sichtbarem Sandquarz.  $\beta^*_d$  2127. Probe vom Gotthardpaß (Nr. 56).

Mikr.: Mikroklinperthit (30—40%) als Einsprenglinge bis über 2 cm, Oligoklas (erfüllt von Zoisit und Serizit), Quarz (30%) als feinkörniger lockerer Mörtel (Korn 0,1 mm), Schlieren bildend. Biotit, Muskowit und Epidot in gestreckten Aggregaten.

Quarzdiorit des Berninagebietes, fein bis mittelkörnig, massig. Probe von Brusio (Nr. 57).

Mikr.: Plagioklas (50—60%), fast vollständig erfüllt von Zoisit-Serizitaggregaten, meist idiomorph; Quarz (20—25%) als Zwischenmasse, wenig kataklastisch. Hornblende und Biotit relativ spärlich, frisch. Korn 1—3 mm.

Granophyr, rot, mit spärlichen miarolithischen Hohlräumen, sonst fest und kompakt, massig.  $\beta^*_d$  1926. Probe von Cuasso al Monte (58).

Mikr.: Orthoklas (40—50%), Plagioklas (15—20%), beide mit Quarz (30%) typisch grobgranophyrisch verwachsen. Biotit sehr spärlich. Korn 0,6—3 mm, nicht porphyrisch.

Zweiglimmerplagioklasgneis, vom Verzascatypus, fein bis mittelkörnig, nur wenig gerichtet, schwach dreihäuptig.  $\beta^*_d$  1571—1931. Probe von Val Verzasca (Nr. 59).

Mikr.: Oligoklas (50—60%), Kalifeldspat spärlich, Quarz (25—30%), Biotit und Muskowit (10—15%) in meist isolierten Blättern (nicht in Lagen), mäßig gut geregelt. Korn 0,5—3 mm. Alle Bestandteile frisch.

Biotit-Plagioklasgneis, sehr feinkörnig, dunkel, mit linearer Textur (dreihäuptig). Probe von Lodrino. Dunkler Typus der Leventinagneise (Nr. 60).

Mikr.: Plagioklas (40—50%), Quarz (20%), Biotit (25—30%) teils in Lagen angereichert (nicht durchgehend), teils isoliert. Vereinzelt Hornblende. Korn 0,2—0,8 mm.

Zweiglimmer-Granitgneis, porphyrisch, gerichtet (deutlich dreihäuptig).  $\beta_d \perp 1787, // 1703$ . Probe von Bodio. Bodiotypus der Leventinagneise (Nr. 61).

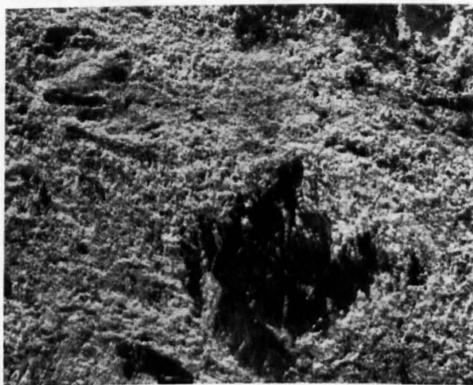


Fig. 56. Natriumsulfatausblühungen an Fibbiagranit (56) mit ausgesprochenem Sandquarz, ca. 2,5 : 1 (nach T. 25).

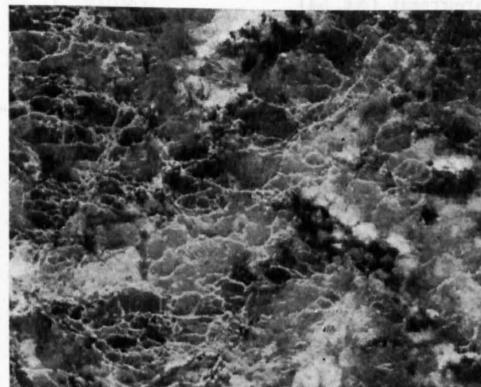


Fig. 57. Natriumsulfatausblühungen an Bodiotypus (61) ca. 5 : 1 (nach T. 25).

Mikr.: Mikroklin (um 40 %) in Einsprenglingen bis über 2 cm, saurer Plagioklas (25 %), Quarz (25 %) in Schlieren angereichert. Glimmer (10 %) schlecht idiomorph in dünnen, nicht durchgehenden Zügen angereichert.

Zweiglimmer-Plagioklasgneis, fein bis mittelkörnig, flaserig-schieferig (deutlich dreihäufig).  $\beta^*_d \perp 1494-2183, // 1529-2026$ . Probe von Osogna. Crescianotypus der Leventinagneise (Nr. 62).

Mikr.: Oligoklas (40—50 %), wenig Orthoklas, Quarz (20—25 %), Glimmer (15—20 %). Wechsel von etwas gewellten Lagen mit vorwiegend Glimmer und mit vorwiegend hellen Gemengteilen. Korn: 0,5—3 mm, nicht porphyrisch.

Granitporphyrgneis, grün, mäßig gerichtet, mittelkörnig. Probe von Andeer. Massige Varietät der Roffnaporphyrgneise (Nr. 63).

Mikr.: Ausgesprochen porphyrisch mit reichlich Einsprenglingen (bis 3 mm) von Orthoklas, Albit und Quarz. Zwischenmasse sehr feines granoblastisches Quarz-Feldspatgewebe mit Zügen von feinblättrigem, grünem Phengit.

Phengitgneis, feinkörnig, feinlagig-schieferig.  $\beta^*_d 2396$ . Probe von San Bernardino. Platten- gneis der Aduladecke (Nr. 64).

Mikr.: Saurer Plagioklas (30—40 %), Kalifeldspat (wenig), Quarz (30—40 %) in Lagen ange- reichert. Blaßgrüner Glimmer meist gut gerichtet, vereinzelte Querglimmer teils in nicht durchgehenden Zügen, teils isoliert. Vereinzelt Granatkörner, poikiloblastisch. Korn 0,1—1 mm, ziemlich heteroblastisch.

Serpentin, schwärzlichgrün, geschiefert.  $\beta^*_d 2372$ . Probe von Selva bei Poschiavo (Nr. 65).

Mikr.: Serpentin als blättriger Antigorit (um 50—60 %) in oft gefalteten Zügen. Olivin in zahlreichen Reliktörnern, Diallag (um 20—25 %) in größeren Körnern (mehrere mm), oft ausgewalzt. Reichlich Magnetit.

Tabelle 39

**Porosität und Wasseraufnahme der kristallinen Gesteine**

Varietäten	$\gamma_s$	$\gamma$	n %	w %	n* %
Aaregranit (Nr. 54)	2,65	2,61	1,5	0,34	0,9
Mont-Blanc-Granit (55)	2,69	2,61	2,9	0,53	1,4
Fibbiagranitgneis (56)	2,67	2,64	1,1	0,54	1,4
Quarzdiorit (57)	2,82	2,79	1,1	0,29	0,8
Granophyr (58)	2,60	2,54	2,3	0,90	2,3
Zweiglimmer-Plagioklasgneis (59)	2,68	2,62	2,2	0,31	0,7
Biotit-Plagioklasgneis (60)	2,75	2,70	1,8	0,32	0,9
Zweiglimmer-Granitgneis (61)	2,67	2,64	1,1	0,34	0,9
Zweiglimmer-Plagioklasgneis (62)	2,71	2,66	1,8	0,60	1,6
Granitporphyrgneis (63)	2,70	2,68	0,7	0,12	0,3
Phengitgneis (64)	2,67	2,60	2,6	0,28	0,7
Serpentin (65)	2,79	2,78	0,4	0,05	0,1

## Anhang.

### Physikalisch-chemische Daten der verwendeten Salze.

(Nach Landolt-Börnstein-Tabellen)

Tabelle 40

#### A. Gleichgewichte zwischen Lösung und Salz bei verschiedenen Temperaturen

	Salzgehalt der gesättigten Lösung in % bei:							Bodenkörper (stabil)
	0°	10°	15°	20°	25°	30°	40°	
Natriumsulfat	4,2	8,2	11,7	16,0	21,9	29,1	32,5	< 32,5° Glaubersalz > 32,5° Thenardit
Magnesiumsulfat	21,2	23,6		26,2		29,0	31,3	< 48° Bittersalz 48—68° Hexahydrat > 68° Kieserit
Kaliumsulfat	6,8	8,5		10,1		11,5	13,0	
Natriumchlorid	26,3	26,3		26,4		26,5	26,7	

Beim Natriumsulfat besteht außer Glaubersalz (Mirabilit) mit 10 H<sub>2</sub>O und Thenardit (wasserfrei) noch ein instabiles Salz mit 7 H<sub>2</sub>O.

Beim Magnesiumsulfat bestehen außer Bittersalz (Epsomit) mit 7 H<sub>2</sub>O, Hexahydrat mit 6 H<sub>2</sub>O und Kieserit mit 1 H<sub>2</sub>O noch instabile Hydrate mit 5, 4, 2 und 5/4 H<sub>2</sub>O, ferner das wasserfreie Salz.

Tabelle 41

#### B. Physikalische Daten der festgestellten Salze

	$\gamma_s$	Mol. Gew.	Mol. Vol.	Hydratationswärme kcal/Mol
Thenardit (orth.)	2,66	142,0	53,5	—
Glaubersalz (mkl.)	1,46	322,2	220,5	18,82
Bittersalz (orth.)	1,68	246,5	145,8	24,08
Kieserit (mkl.)	2,57	148,4	57,8	6,98
Kaliumsulfat (orth.)	2,66	174,2	65,5	—
Natriumchlorid (kub.)	2,17	58,5	29,9	—

## Literatur.

- CORRENS, C. W.: Über die Erklärung der sogenannten Kristallisationskraft. — Sitz.-Ber. Preuß. Akad. Wiss. 11 (1926) 81.
- CORRENS, C. W.: Growth and Dissolution of Crystals under linear Pressure. — Disc. of the Faraday Society, n<sup>o</sup> 5 (1949) 267—271.
- CORRENS, C. W. und STEINBORN, W.: Experimente zur Messung und Erklärung der sogenannten Kristallisationskraft. Zeitschr. Kristallogr. 101 (1939) 117—133.
- Die natürlichen Bausteine und Dachschiefer. Beitr. Geol. Schweiz, Geotechn. Serie. 5 (1915).
- FILLUNGER, P.: Über Verwitterung durch Kristallisationsdruck. Geologie und Bauwesen. 5 (1933) 1—13.
- HIRSCHWALD, J.: Handbuch der bautechnischen Gesteinsprüfung. Berlin (1912).
- KIESLINGER, A.: Zerstörungen an Steinbauten. Leipzig und Wien (1932).
- KIESLINGER, A.: Kristallisationsdruck, Quellung und Verwitterung. Geologie und Bauwesen. 5 (1933) 49—63.
- VON MOOS, A. und DE QUERVAIN, F.: Technische Gesteinskunde. Birkhäuser, Basel (1948).
- DE QUERVAIN, F.: Prüfung der Wetterbeständigkeit der Gesteine. Handbuch der Werkstoffprüfung. 3, Berlin (1941) 188—203.
- DE QUERVAIN, F.: Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz. Teil I. Beitr. Geol. Schweiz, Geotechn. Serie. 23 (1945).
- DE QUERVAIN, F. und GSCHWIND, M.: Die nutzbaren Gesteine der Schweiz. Zweite völlig umgearbeitete Auflage von F. de Quervain. — Geotechnische Kommission (1949).
- DE QUERVAIN, F. und JENNY, V.: Versuche zur Deutung der Einwirkung leicht löslicher Salze auf Gesteine. Schweiz. Min. Petr. Mitt. 28 (1948) 540—554. — Beitr. Geol. Schweiz, Kleinere Mitt. 14.
- RAMBERG, H.: The force of crystallisation as a well definable property of crystals. — Geol. Fören. Förh. 69 (1947).
- SCHMÖLZER, A.: Zur Entstehung von Verwitterungsskulpturen an Bausteinen. Chemie der Erde. 10 (1936) 479—520.