

BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ
GEOTECHNISCHE SERIE

herausgegeben von der

Schweizerischen Geotechnischen Kommission
(Organ der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft)

MATÉRIAUX POUR LA GÉOLOGIE DE LA SUISSE
SÉRIE GÉOTECHNIQUE

publiés par la

Commission Géotechnique Suisse
(Organe de la Société Helvétique des Sciences Naturelles)

Lieferung 61

Konrad Zehnder

Verwitterung von Molassesandsteinen an Bauwerken und in Naturaufschlüssen

1982

In Kommission bei Kümmerly & Frey AG, Geographischer Verlag, Bern
Druck: Helioprint AG, Zürich

Vorwort der Schweizerischen Geotechnischen Kommission

An der Sitzung vom 21. Januar 1982 beschloss die Kommission die Dissertation von Herrn Dr. K. Zehnder "Verwitterung von Molassesandsteinen an Baudenkmalern und in Naturaufschlüssen" unter dem neuen, leicht abgeänderten Titel "Verwitterung von Molassesandsteinen an Bauwerken und in Naturaufschlüssen" in die Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, aufzunehmen.

Die Untersuchung, die ein aktuelles Problem der technischen Petrographie anhand von zwei ausgewählten Molassesandstein-Typen gründlich behandelt, zeigt, dass bei einer möglichst umfassenden Berücksichtigung der zahlreichen, oft voneinander abhängigen Parameter eine Aussage über das Verwitterungsverhalten der Sandsteine möglich ist.

Dank grossen Restaurierungsarbeiten am Hauptbahnhof Zürich und an der Hauptpost St. Gallen stand dem Autor ein ausserordentlich vielfältiges Beobachtungsmaterial zur Verfügung und ermöglichte zudem eine enge Zusammenarbeit mit Architekten, Bau- und Restaurierungspraktikern. Die Laboruntersuchungen erfolgten am Institut für Kristallographie und Petrographie und am Institut für Denkmalpflege der ETH.

Die Kommission dankt dem Verfasser für diesen wertvollen Beitrag zur komplexen Problematik der Bausteinverwitterung.

Die Kommission verdankt namhafte Druckkostenbeiträge dem Jubiläumsfonds 1930 der ETH und den Schweizerischen Bundesbahnen.

Für den Inhalt von Text und Figuren ist der Autor allein verantwortlich.

Für die Schweizerische Geotechnische Kommission

Der Präsident:

V. Trommsdorff

*Il y a une grotte qui perce l'île
de part en part*

B. Cendrars

Vorwort des Verfassers

Diese Arbeit konnte 1977 bis 1981 als Dissertation im Rahmen eines ETH-Forschungsprojektes entstehen, wofür ich den Projektleitern Dr. A. Arnold, Prof. M. Weibel und Prof. G. Bayer und der Schulleitung danken möchte. Ganz besonders danke ich meinem herzlich verehrten, eigentlichen Lehrer bei dieser Aufgabe, Herrn Dr. Andreas Arnold, für seine unermüdliche Anleitung, Kritik und Hilfe von A bis Z. Mit einführender Sicherheit hat er mir, dem oft Unsicheren, den Weg gezeigt. Mein herzlicher Dank geht auch an Herrn Prof. F. de Quervain für sein grosses Interesse, seine anregende Kritik und ermutigende Beratung während der ganzen Arbeit. Zahlreiche Ergänzungen verdanke ich seiner kritischen Durchsicht des Manuskriptes für den Druck. Herrn Prof. M. Weibel danke ich speziell für Ratschläge bei der chemischen Analytik und stilistische Manuskriptkorrekturen. Viele Mitarbeiter der ETH waren mir behilflich: Herr Dr. B. Ayranci und Herr Z. Fejér bei chemischen Analysen, Herr Dr. G. Kahr bei der Quecksilberporometrie, Herr F. Pirovino, Herr E. Schärli und Herr T. Willi mit Tips bei Probenahmen und der Herstellung von Dünnschliffen, Herr Dr. R. Schmid bei der Methodik zu Dünnschliffuntersuchungen, Herr P. Wägli mit der Ausführung von REM-Aufnahmen, Herr J. Neher bei der Bestimmung von Organismen, Herr Dr. A. Gautschi mit verschiedenen Ratschlägen, Frau Dr. M. Hering, Frau Dr. B. Sigel und Frl. M. Jakobsson mit gutem Rat und administrativer Tätigkeit, sowie zahlreiche Personen, die mich in meinem Studium förderten und denen allen ich dafür herzlich danken möchte. Übrigens setzte mir Herr Dr. Martin Müller (ETH) den Verwitterungsfloh hinter's Ohr. Den Architekten Herrn H. Spirig (Zürich), Herrn R. Mathys (Zürich) und den Herren O. Jenny und F. Zai (St. Gallen) danke ich für die Erlaubnis zu Probenahmen an Gebäuden. Verschiedenen Steinbruchunternehmern, so u.a. den Gebrüdern F. und H. Müller (Schmerikon), verdanke ich Informationen im Steinbruch. Herr B. Romer (Beinwil a.S.) stellte für diese Arbeit einige vorzügliche Dünnschliffe her. Herrn Prof. A. Zehnder (Neuenhof) danke ich für Algenbestimmungen, Herrn W. Negretti (Neuhausen a.R.) für Hinweise zur Bestimmung atmosphärischer Staubpartikel. Nun möchte ich auch meinen Eltern herzlich danken, da sie mir diese Ausbildung ermöglichten. Und obwohl ich weiss, dass meiner Frau Rosemarie mit derartigen Dankesworten nur sehr beschränkt gedient ist, möchte ich erwähnen, dass ihr, die mich in der vergangenen wechselvollen Zeit mit grosser Kraft und grossem Herzen unterstützte, mein innigster Dank gilt.

Die Druckkosten dieser Arbeit konnten aus grosszügigen Spenden der Schweizerischen Geotechnischen Kommission, des Jubiläumsfonds 1930 der ETH sowie der Schweizerischen Bundesbahnen beglichen werden.

Inhaltsverzeichnis

	Seite		Seite
Vorwort der Geotechnischen Kommission	3	5.4 Ergänzende Beobachtungen an verschiedenen Objekten	45
Vorwort des Verfassers	4	5.4.1 Wechselnde Schalendicken	45
Verzeichnis der Textfiguren und Tabellen	6	5.4.2 Verwitterungen am Plattensandstein	46
Kurzfassung	9	5.4.3 Verwitterung im Grundfeuchtebereich	48
Abstract	10	5.4.4 Verwitterungen an pyritreichen Quadern	48
1. Einführung	11	5.5 Zusammenfassung	49
1.1 Grundlegende Problematik	11	6. Verwitterungserscheinungen in Naturaufschlüssen	51
1.2 Problemstellung	11	6.1 Einleitung	51
2. Untersuchungsgebiet, Gesteine und Untersuchungsobjekte	12	6.2 Martinsbrugg	51
2.1 Geographischer Rahmen	12	6.2.1 Geologisch-petrographische Beschreibung	51
2.2 Geologischer Rahmen	12	6.2.2 Verwitterungserscheinungen	52
2.3 Gesteine	14	6.2.3 Zellenverwitterung im Martins-tobel	57
2.4 Bauwerke	14	6.3 Uznaberg	58
2.5 Naturaufschlüsse	17	6.3.1 Geologisch-petrographische Beschreibung	58
3. Untersuchungsmethoden	18	6.3.2 Verwitterungserscheinungen	59
3.1 Felduntersuchungen	18	6.4 Ergänzende Beobachtungen in weiteren Aufschlüssen	63
3.1.1 Vergleich zwischen Bauwerk und Naturaufschluss	18	6.4.1 Chatzenrietli	63
3.1.2 Probenahmen	19	6.4.2 Fuchsloch	63
3.1.3 Immissionsmessungen	19	6.5 Zusammenfassung	64
3.2 Laboruntersuchungen	20	7. Die typischen Verwitterungserscheinungen	66
3.2.1 Chemische Analysen	20	7.1 Einleitung	66
3.2.1.1 Herstellung der Wasserauszüge	20	7.2 Schalen	67
3.2.1.2 Analyse von S	21	7.2.1 Ausbildung	67
3.2.1.3 Analyse von Na, K, Mg und Ca	21	7.2.2 Sulfatanreicherungen	69
3.2.2 Bestimmung der löslichen Salze	21	7.3 Abblättern und Abbröckeln	74
3.2.3 Porenanalyse	21	7.3.1 Ausbildung	74
3.2.3.1 Einleitung	21	7.3.2 Sulfatanreicherung	74
3.2.3.2 Quecksilber-Porometrie	23	7.4 Aufblättern	78
3.2.3.3 Dünnschliff-Porometrie	23	7.5 Absanden	78
3.2.3.4 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen	24	7.5.1 Ausbildung	78
3.2.4 Analyse der Niederschläge	24	7.5.2 Sulfatanreicherung	80
4. Verwitterungsterminologie	24	7.6 Krusten	82
4.1 Einleitung	24	7.6.1 Ausbildung	82
4.2 Verwitterungserscheinungen	25	7.6.2 Sulfatanreicherung	84
4.2.1 Grundlagen	25	7.7 Ausblühungen	85
4.2.2 Eigene Terminologie	26	7.7.1 Übersicht	85
4.3 Verwitterungsbereiche	27	7.7.2 Gips	86
4.3.1 Exposition	27	7.7.3 Natriumsulfat und Magnesiumsulfat	88
4.3.2 Verwitterungsbereiche an Bauwerken und Naturaufschlüssen	28	7.8 Zusammenfassung	89
5. Verwitterungserscheinungen an Bauwerken	29	8. Porenraum	89
5.1 Einleitung	29	8.1 Granitische Sandsteine	90
5.2 Hauptbahnhof Zürich	29	8.1.1 Porometrie	90
5.2.1 Baugeschichte	29	8.1.2 Struktur und Inhalt des Porenraums	95
5.2.2 Verwitterungserscheinungen	29	8.2 Plattensandsteine	101
5.3 Hauptpost St. Gallen	42	8.2.1 Porometrie	101
5.3.1 Baugeschichte	42		
5.3.2 Verwitterungserscheinungen	43		

	Seite		Seite
8.2.2 Struktur und Inhalt des Porenraums	101	10.3 Exposition, Sulfatanreicherung und Verwitterungsform	116
8.3 Zusammenfassung	104	10.3.1 Einleitung	116
9. Immissionsmessungen	105	10.3.2 Absanden, Krusten und Ausblühungen	116
9.1 Messresultate	105	10.3.3 Abblättern und Abbröckeln	118
9.1.1 SO ₄ -Gehalte	105	10.3.4 Schalen	119
9.1.2 Na-, K-, Mg- und Ca-Gehalte	105	10.3.5 Zusammenfassung	120
9.1.3 pH-Werte	105	10.4 Herkunft der Sulfate	121
9.2 Zusammenfassung und Vergleiche	105	10.4.1 Gestein	121
10. Zur Genese der Verwitterungserscheinungen	112	10.4.2 Atmosphäre	122
10.1 Einleitung	112	10.5 Gesteinseigenschaften und Verwitterungsverhalten	122
10.2 Rolle der leichtlöslichen Sulfate und des Gipses	112	10.5.1 Problemstellung	122
10.2.1 Grundlagen zur Salzsprengung	112	10.5.2 Granitische Sandsteine	123
10.2.2 Löslichkeit und Anreicherungs-tiefe	114	10.5.3 Plattensandsteine	124
		11. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	125
		Literaturverzeichnis	127

Verzeichnis der Textfiguren und Tabellen

	Textfiguren	Seite
Fig. 1	Geographisch-geologische Übersicht	13
Fig. 2	Typische Dünnschliffbilder eines Granitischen Sandsteins (a) und eines Plattensandsteins (b)	14
Fig. 3	Hauptbahnhof Zürich, Grundriss mit Probenahmestellen	30
Fig. 4	Hauptbahnhof Zürich, Ansichtsplan der Süd- und Ostfassaden	31
Fig. 5	Hauptbahnhof Zürich, Ausschnitt aus der Ostfassade mit typischen Verwitterungserscheinungen a) Skizze b) Foto	33 34
Fig. 6	Hauptbahnhof Zürich, Schalen an Pfeilerbasis aus Granitischem Sandstein (Skizze)	35
Fig. 7	Hauptbahnhof Zürich, Schalen am Südostturm in Granitischem Sandstein (Foto)	35
Fig. 8	Hauptbahnhof Zürich, schematischer Querschnitt durch Läuferstein mit Schalen unterschiedlicher Dicke	36
Fig. 9	Hauptbahnhof Zürich, Quaderfläche mit absandenden Vertiefungen und "schalenbildenden" Höckern (Foto)	37
Fig. 10	Schematischer Quaderschnitt mit absandenden Vertiefungen und "schalenbildenden" Höckern	37
Fig. 11	Schematischer Quaderschnitt mit flächenhaften Gipskrusten	37
Fig. 12	Hauptbahnhof Zürich, Detail einer Sickerwasserstelle (Foto)	38
Fig. 13	Hauptbahnhof Zürich, Detail mit dicken Gipskrusten (Foto)	39
Fig. 14	Hauptbahnhof Zürich, abbröckelndes Relief mit flächenhafter Gipskruste (Foto)	40
Fig. 15	Hauptbahnhof Zürich, Ausschnitt aus der Südfassade mit starken Schäden über Gurtgesims (Foto)	40
Fig. 16	Schematischer Querschnitt durch Gurtgesims mit typischen Verwitterungserscheinungen	41
Fig. 17	Hauptbahnhof Zürich, Fensterverdachung mit Schalen und Gipskrusten (Foto)	41
Fig. 18	Hauptpost St. Gallen, Grundriss mit Probenahmestellen	42
Fig. 19	Hauptpost St. Gallen, Teilansicht der Nordfassade mit unterschiedlich abwitternden Quadern	43

	Seite	
Fig. 20	Schematischer Querschnitt durch grob behauenen Quader mit a) dicker und b) dünner Schale	44
Fig. 21	Schienhutgasse (Zürich), Mauer aus Granitischem Sandstein mit ausdünnender Schale (Skizze) . . .	45
Fig. 22	Konservatorium (Zürich), Gesimse aus Granitischem Sandstein mit unterschiedlich dicken Schalen (Skizze)	46
Fig. 23	Quellenstrasse (Zürich), Gesims aus Plattensandstein mit Schalen und Aufblätterungen (Skizze) . .	47
Fig. 24	Leonhardshalde (Zürich), Mauer aus Plattensandstein mit typischen Verwitterungserscheinungen (Foto)	47
Fig. 25	Bürgerasyl (Zürich), Sockelzone aus Granitischem Sandstein mit Abwitterungen im Grundfeuchtebereich (Foto)	48
Fig. 26	Archäologisches Institut (Zürich), Quader mit stark verwitterter pyritreicher Zone (Foto)	49
Fig. 27	Auf der Mauer (Zürich), a) zurückgewitterter Quader mit b) farblosen Gipskrusten (Fotos)	50
Fig. 28	Martinsbrugg, Lageskizze	51
Fig. 29	Martinsbrugg, geologisches Profil	52
Fig. 30	Martinsbrugg, a) Ansicht der Steinbruchwand mit b) Skizze der Verwitterungserscheinungen	53
Fig. 31	Martinsbrugg, Schale an beregneter Felsnase (Foto)	54
Fig. 32	Martinsbrugg, a) Sickerwasserstelle mit b) Detail mit Ausblühungen und Abblätterungen (Fotos) . .	56
Fig. 33	Martinsbrugg, abblätternde Felsoberfläche (Foto)	57
Fig. 34	Martinstobel, Felswand mit Zellenverwitterung (Foto)	58
Fig. 35	Uznaberg, Lageskizze	59
Fig. 36	Uznaberg, geologisches Profil	59
Fig. 37	Anschliff eines Granitischen Sandsteins mit Kohle- und Pyriteinlagerungen (Zeichnung)	60
Fig. 38	Uznaberg, Teilansicht des Steinbruches	60
Fig. 39	Uznaberg, schematische Darstellung unterschiedlicher Benetzungsmuster der Steinbruchwand	61
Fig. 40	Uznaberg, Sickerwasserstelle mit Schalenbildung (Foto)	62
Fig. 41	Uznaberg, Sickerwasserstelle auf absandendem Fels (Foto)	63
Fig. 42	Chatzenrietli, Teilansicht einer Steinbruchwand	64
Fig. 43	Chatzenrietli, a) Felsüberhang mit Sickerwasserstellen und b) dicken Gipskrusten (Fotos)	65
Fig. 44	Fuchsloch, östliche Abbaufäche des Steinbruches	66
Fig. 45	Querschnitt durch Schalenoberfläche in Granitischem Sandstein (Dünnschliffzeichnung)	67
Fig. 46	REM-Aufnahme von angelöstem Calcit im Bereich der Schalenoberfläche	68
Fig. 47	Risse bei beginnender Schalenbildung (Skizze einer Bohrkernwand)	68
Fig. 48	Element-Verteilungen im Wasserauszug Probe H 24A (Schale)	70
Fig. 49	Element-Verteilungen im Wasserauszug Probe H 38A (Schale)	71
Fig. 50	Element-Verteilungen im Wasserauszug Probe B 9 (Schale)	72
Fig. 51	Element-Verteilungen im Wasserauszug Probe H 40B (keine Schalenbildung)	73
Fig. 52	Element-Verteilungen im Wasserauszug Probe B 11 (Abblättern)	76
Fig. 53	Element-Verteilungen im Wasserauszug Probe H 46A (kein Abbröckeln)	77
Fig. 54	Querschnitt durch absandende Oberfläche (Dünnschlifffoto)	78
Fig. 55	Gefügeriss mit teilweiser Gipsfüllung (Dünnschliffzeichnung)	79
Fig. 56	Element-Verteilungen im Wasserauszug Probe H 47A (Absanden)	80
Fig. 57	Element-Verteilungen im Wasserauszug Probe W 11A (Absanden)	81
Fig. 58	Entwicklung einer Gipskruste (schematische Skizze)	82
Fig. 59	Gipskrusten-Querschnitt (Dünnschliffzeichnung)	83
Fig. 60	Element-Verteilungen im Wasserauszug Probe H 8A (Krustenbildung)	85
Fig. 61	Typische Porengrößenverteilungskurve und ihre Charakterisierung mit Messgrößen	90
Fig. 62	Porengrößenverteilungen in Granitischen Sandsteinen	91
Fig. 63	Porengrößenverteilungen in Granitischen Sandsteinen vom Hauptbahnhof	92
Fig. 64	Porengrößenverteilungen in Granitischen Sandsteinen von der Hauptpost	93
Fig. 65	Effektive Porosität/Druckfestigkeit-Verhältnis bei Granitischen Sandsteinen	95
Fig. 66	Porenraum Granitischer Sandsteine mit a) starker, b) mässiger und c) schwacher Makroporosität (Dünnschlifffotos)	96
Fig. 67	Porenfüllungen in Granitischem Sandstein (Dünnschliffzeichnung)	97
Fig. 68	Tonmineralrasen und Calcit in Zwickelpore eines Granitischen Sandsteins (REM-Aufnahme)	99
Fig. 69	Tonmineralrasen, Calcit und Tonmineralwürmer in Zwickelpore eines Granitischen Sandsteins (REM-Aufnahme)	99
Fig. 70	Tonmineralwurm und "Silikathülle" in Zwickelpore eines Granitischen Sandsteins	99
Fig. 71	Porengrößenverteilungen in Plattensandsteinen	102
Fig. 72	Porenraum von Plattensandsteinen mit a) schwacher und b) keiner sichtbaren Makroporosität (Dünnschlifffotos)	102
Fig. 73	Tonmineralrasen und Calcit in Zwickelpore eines Plattensandsteins (REM-Aufnahme)	104
Fig. 74	Sulfat-Gehalte im Niederschlag	107
Fig. 75	Natrium-Gehalte im Niederschlag	108
Fig. 76	Kalium-Gehalte im Niederschlag	109
Fig. 77	Magnesium-Gehalte im Niederschlag	110
Fig. 78	Calcium-Gehalte im Niederschlag	111

Tabellen

Seite

Tab. 1	Makroskopische Eigenschaften der Granitischen Sandsteine und Plattensandsteine	15
Tab. 2	Petrographische Charakterisierung der Granitischen Sandsteine und Plattensandsteine	15
Tab. 3	Technische Eigenschaften der Granitischen Sandsteine und Plattensandsteine	16
Tab. 4	Verwendung einiger petrographischer und petrophysikalischer Begriffe	16
Tab. 5	Verzeichnis der beschriebenen Lokalitäten	17
Tab. 6	Untersuchte Steinbrüche ohne Erwähnung im Text	18
Tab. 7	Porengrößen-Kategorien	22
Tab. 8	Genetische Begriffe der Verwitterungsterminologie	26
Tab. 9	Korrelation der eigenen Verwitterungsterminologie mit gebräuchlichen Begriffen	27
Tab. 10	Verwitterungsbereiche am Hauptbahnhof Zürich	32
Tab. 11	Verwitterungsbereiche im Steinbruch Martinsbrugg	54
Tab. 12	Verwitterungsbereiche im Steinbruch Uznaberg	61
Tab. 13	Element-Verteilungen im Wasserauszug Probe H 24A (Schale)	69
Tab. 14	Element-Verteilungen im Wasserauszug Probe H 38A (Schale)	70
Tab. 15	Element-Verteilungen im Wasserauszug Probe B 9 (Schale)	73
Tab. 16	Element-Verteilungen im Wasserauszug Probe H 40B (keine Schalenbildung)	74
Tab. 17	Element-Verteilungen im Wasserauszug Probe B 11 (Abblättern)	75
Tab. 18	Element-Verteilungen im Wasserauszug Probe H 46A (kein Abbröckeln)	77
Tab. 19	Gefügelockerung und Gipsanreicherung beim Absanden	79
Tab. 20	Element-Verteilungen im Wasserauszug Probe H 47A (Absanden)	81
Tab. 21	Element-Verteilungen im Wasserauszug Probe W 11A (Absanden)	82
Tab. 22	Element-Verteilungen im Wasserauszug Probe H 8A (Krustenbildung)	85
Tab. 23	Ausblühungssalze	86
Tab. 24	Fundstellen und Art der Ausblühungen	87
Tab. 25	Porositäten in Granitischen Sandsteinen	91
Tab. 26	Porositäten in Granitischen Sandsteinen vom Hauptbahnhof	92
Tab. 27	Porositäten in Granitischen Sandsteinen von der Hauptpost	93
Tab. 28	Porenraum Granitischer Sandsteine im Dünnschliff (Anordnung und Streuung poröser Bereiche)	97
Tab. 29	Gefüge und Porenraum Granitischer Sandsteine von der Hauptpost	100
Tab. 30	Porositäten in Plattensandsteinen	102
Tab. 31	Sulfat-Gehalte im Niederschlag	107
Tab. 32	Natrium-Gehalte im Niederschlag	108
Tab. 33	Kalium-Gehalte im Niederschlag	109
Tab. 34	Magnesium-Gehalte im Niederschlag	110
Tab. 35	Calcium-Gehalte im Niederschlag	111
Tab. 36	Löslichkeiten von Gips, Epsomit und Mirabilit bei verschiedenen Temperaturen	115
Tab. 37	Anreicherungstiefen der Salze durch Kombination verschiedener Benetzungs- und Austrocknungsbedingungen	117
Tab. 38	Zusammenhang zwischen Exposition, Sulfatanreicherung und Verwitterungsform	120

Kurzfassung

An zwei historischen Bausteinen der Ostschweiz, dem Granitischen Sandstein und dem Plattensandstein, werden Verwitterungserscheinungen an Bauwerken untersucht und mit der Verwitterung dieser Gesteine in Naturaufschlüssen verglichen. Durch die bessere Kenntnis einiger Verwitterungsprozesse soll diese Arbeit zu einer Grundlage für geeignete Konservierungsmassnahmen an den lokalen Steinbauten beitragen.

Felduntersuchungen werden u.a. am Zürcher Hauptbahnhof und in Steinbrüchen zwischen Luzern und St. Margrethen durchgeführt. Ausserdem werden Immissionen in Niederschlägen gemessen. Die Laboruntersuchungen umfassen mineralogisch-petrographische und chemische Analysen von Verwitterungsprofilen (Bohrkerne).

Die an Bauwerken typischen Verwitterungserscheinungen sind Schalen, Abblättern und Abbröckeln, Aufblättern, Absanden, Krusten und Ausblühungen. Diese Erscheinungen finden sich analog ausgebildet und exponiert an sulfatreichen Felswänden. Die Verwitterungserscheinungen werden hauptsächlich auf Anreicherungen von Gips, z.T. vermischt mit Magnesium- und Natriumsulfat, in charakteristischer Tiefe des Verwitterungsprofils zurückgeführt: Die Sulfatanreicherung im Profil deckt sich mit der Zone maximaler Gefügelockerung und kann hier schon vor dem sichtbaren Zerfall nachgewiesen werden. Mineralauflösungen treten einerseits an der Oberfläche von Schalen, anderseits in Gipskrusten auf, sie fehlen aber in der Lockerzone des Profils.

In den Naturaufschlüssen leiten sich die Sulfate aus Pyritanreicherungen im umgebenden Felsverband ab. An Bauwerken in städtischer Umgebung stammen sie aufgrund von Immissionsmessungen grossenteils aus der Atmosphäre.

Beziehungen zwischen Gefügeeigenschaften und dem beobachteten Verwitterungsverhalten einzelner Quader weisen darauf hin, dass eine grosse Makroporosität die Wetterbeständigkeit der untersuchten Sandsteine generell erhöht. Der Einfluss diverser Zemente bleibt weitgehend fraglich.

Abstract

Weathering phenomena from two molasse sandstones of Northeastern Switzerland, the Granitic sandstone and the Platten sandstone, are described on monuments in urban areas and on natural outcrops in rural areas. The purpose is to obtain a better understanding of some decay mechanisms which may lead to improvements in building conservation.

Buildings, including the main railway station in Zürich, and quarries situated between Luzern and St. Margrethen have been investigated. Air pollution has been measured from rain water analyses. In the laboratory, petrographic and chemical alterations have been analysed in sampled weathering profiles (drill cores).

The common phenomena on buildings are contour scaling, exfoliation, spalling, granular disaggregation and formation of crusts and efflorescences. On natural outcrops, similar phenomena form in analogous exposures where sulphates are concentrated in the rocks. Thus in both environments the considered phenomena may be attributed to accumulations of gypsum, magnesium-sulphate and sodiumsulphate at characteristic depths in the weathering profile. The sulphate accumulations are established in the crumbling zone of the profile, and that before the onset of visual decay. Mineral dissolutions are restricted to the surface of contour scales and stone fragments in gypsum crusts but they are absent in the disintegration zone.

On outcrops, the sulphates are largely derived from pyrite in the surrounding rock. On buildings however, the atmosphere is an important sulphate source.

Relations between the stone structure and the observed weathering intensity suggest that among other features a large macroporosity results in a good durability of the considered sandstones. The influence of various cements is largely unknown.

1. Einführung

1.1 Grundlegende Problematik

Der Zerfall von Bauwerken aus Stein hat sich seit dem letzten Jahrhundert durch veränderte Umwelteinflüsse bis heute stark beschleunigt. Die viele hundert Jahre alten Baudenkmäler werden nun innert weniger Jahrzehnte wesentlich beschädigt, was vor allem Denkmalpfleger und Bauämter vor grosse Probleme stellt. Eine vielerorts verbreitete Ratlosigkeit angesichts dieser Entwicklung ist u. a. durch die fehlende Kenntnis der Bausteinverwitterung bedingt, womit eine der Voraussetzungen für geeignete Erhaltungsmassnahmen fehlt. Vorliegende Untersuchungen sollen einige wichtige Verwitterungsprozesse an zwei historischen Bausteinen der Ostschweiz, nämlich dem "Granitischen Sandstein" und dem "Plattensandstein", zu klären versuchen und damit zu einer Grundlage für gezieltere Konservierungsmassnahmen an den lokalen Sandsteinbauten beitragen.

Wissenschaftliche Arbeiten über die komplexe Thematik der Bausteinverwitterung kommen aus sehr verschiedenen Fachrichtungen wie Architektur, Materialwissenschaften, Geologie, Klimatologie und Biologie. Die Forschung ist entsprechend unkoordiniert, und die Kenntnisse sind trotz zahlreicher neuerer Arbeiten sehr lückenhaft. Für die Schweiz bildet der sogenannte *Bausteinband* (1915) das grundlegende Werk über Verwendbarkeit und Witterungsverhalten einheimischer Bausteine, das DE QUERVAIN & GSCHWIND (1934) und DE QUERVAIN (1969) mit den "Nutzbaren Gesteinen der Schweiz" fortsetzten. Die bisher einzigen Publikationen, die sich eingehend mit der Verwitterung von Granitischen Sandsteinen und Plattensandsteinen befassten, stammen von DE QUERVAIN (1945) und DE QUERVAIN & JENNY (1951). In den letzten 10 Jahren wurde die Verwitterungsforschung wegen dem alarmierenden Zustand vieler Baudenkmäler international stark vorangetrieben. Wichtige Impulse kamen aus Frankreich, wo PAULY (1972, 1975a, b, c) neuartige Klimamessungen an Bauwerken durchführte. Die Bedeutung der Salze, auf die z.B. KAISER (1907), SCHMOELZER (1936) und DE QUERVAIN (1945) bereits hingewiesen hatten, wurde zunehmend erkannt (WINKLER & WILHELM, 1970; ARNOLD, 1976). Um den Zusammenhang zwischen der beschleunigten Verwitterung im Stadtklima und der Luftverschmutzung quantitativ zu erfassen, entwickelte LUCKAT (1972) eine neue Immissionsmesstechnik.

1.2 Problemstellung

Die Aufgabe dieser Arbeit liegt im Vergleich zwischen der Verwitterung von Granitischen Sandsteinen und Plattensandsteinen an Bauwerken in städtischer Umgebung und deren Verwitterung in Naturaufschlüssen. Dies geschieht durch entsprechende Feld- und Laboruntersuchungen. Mit der Analyse unterschiedlicher bzw. ähnlicher Umgebungseinflüsse sind einige Ursachen der Verwitterungsprozesse zu klären. In diesem Rahmen bildet die Untersuchung von Zusammensetzung, Herkunft und Wirkungsweise der im Verwitterungsprofil angereicherten Sulfate einen Schwerpunkt. Parallel zu den Felduntersuchungen sollen durchgeführte Immissionsmessungen Anhaltspunkte über die Herkunft dieser Stoffe aus der Atmosphäre liefern. Überdies sind nach Möglichkeit petrographische Eigenschaften zu ermitteln, die das Verwitterungsverhalten wesentlich beeinflussen.

2. Untersuchungsgebiet, Gesteine und Untersuchungsobjekte

2.1 Geographischer Rahmen

Die Granitischen Sandsteine und Plattensandsteine werden in einem wenige Kilometer breiten Streifen am Südrand des schweizerischen Mittellandes zwischen dem Entlebuch und dem Bodensee abgebaut. Vom Mittelalter bis zu Beginn dieses Jahrhunderts waren es die wichtigsten Bausteine der Ostschweiz, da sie leicht gewinn- und bearbeitbar sind und zudem günstige Transportwege in die Siedlungsgebiete bestanden: Luzern und St. Gallen liegen in unmittelbarer Nähe von Abbaustellen, Zürich ist auf dem Wasserweg erreichbar. Weil sich die Sandsteine sowohl als Quadersteine wie für Bildhauerarbeiten eignen, wurden sie für viele Repräsentativbauten verwendet. Beispiele in Zürich sind das Grossmünster (12. – 13. Jh.), der Hauptbahnhof (19. Jh.) und die Universität (20. Jh.) aus Granitischem Sandstein sowie das Rathaus (17. Jh.) aus Plattensandstein (DE QUERVAIN, 1979a, b). In dieser Arbeit werden einerseits Bauwerke in Zürich und St. Gallen, andererseits Abbaustellen im Gebiet zwischen Luzern und St. Margrethen untersucht (Fig. 1a und b).

2.2 Geologischer Rahmen

Die regionale Geologie des Abbaubereiches der Granitischen Sandsteine und Plattensandsteine ist aus folgenden wichtigsten Arbeiten bekannt: STUDER (1825 und 1853), KAUFMANN (1872), GUTZWILLER (1877), RENZ (1937), TANNER (1944), HABICHT (1945), BUECHI & HOFMANN (1945), BUECHI (1950), SCHUPPLI (1952) und HOFMANN (1957), (vgl. Fig. 1).

Die *Molasseablagerungen* bildeten sich während der Hebung der Alpen im Oligozän (Fig. 1e) bis Pleistozän und bestehen aus dem Schutt, der in den Alpen erodiert und ihrem Vorland, dem Molassebecken, wieder abgelagert wurde. Eine im Stampian (oberes Oligozän) beginnende starke Hebung der Alpen bewirkte den Rückzug des Meeres aus dem Gebiet des heutigen Mittellandes und leitete den Beginn der Unteren Süsswassermolasse (USM) ein. Die nach N vorstossenden Schuttfächer – in der Zentral- und Ostschweiz waren es der Rigi- und Speerfächer – bestehen im S aus mächtigen Konglomeratlagen, die gegen N in dünne Sand- und Mergellagen übergehen. Im Aquitanian (früheres Unter-Miozän) überlagerte ein nach E entwässertes Flusssystem die N-Schüttungen. Dabei gelangte kristallinreiches, "granitisches" Material aus dem Napf- und Hohronefächer ins Gebiet zwischen Zürich- und Bodensee, wo es nördlich des Kronberg- und Gäbrischfächer als Granitische Molasse abgelagert wurde (Fig. 1c). Im Burdigalian (unteres Miozän) wurde das Molassebecken erneut vom Meer überflutet, es bildeten sich die Ablagerungen der Oberen Meeresmolasse (OMM). Durch küstenparallele Strömungen wurde feinsandig-siltiger Detritus vom Napffächer ostwärts verfrachtet und in flachen, wattenähnlichen Meeresbuchten der Gegend um Luzern und des Bodensees als spätere Plattensandsteine wieder abgesetzt (Fig. 1d). Östlich des Zürichsees bis westlich St. Gallen fehlen Plattensandsteine, weil hier das Meer vom Hörnliedelta zurückgedrängt wurde.

Die *Tektonik* des Abbaubereiches wird vom Alpenrand im S geprägt. Nördlich der alpinen Randüberschiebung, zu der alle regionalen Strukturen parallel laufen, beginnt die Zone der subalpinen Molasse. Sie ist im S durch steil S-fallende Schubflächen, im N durch Falten und Überschiebungen kompliziert gegliedert. Mit zunehmender Entfernung vom Alpenrand fallen die Schichten immer flacher gegen N ein und gehen in die Zone der mittelländischen Molasse über. Beide Sandsteine liegen im nördlichen Grenzbereich der subalpinen Molasse: die Granitischen Sandsteine im steilgerichteten bis überschobenen, die Plattensandsteine im nördlich anschliessenden flacheren Abschnitt (Fig. 1f).

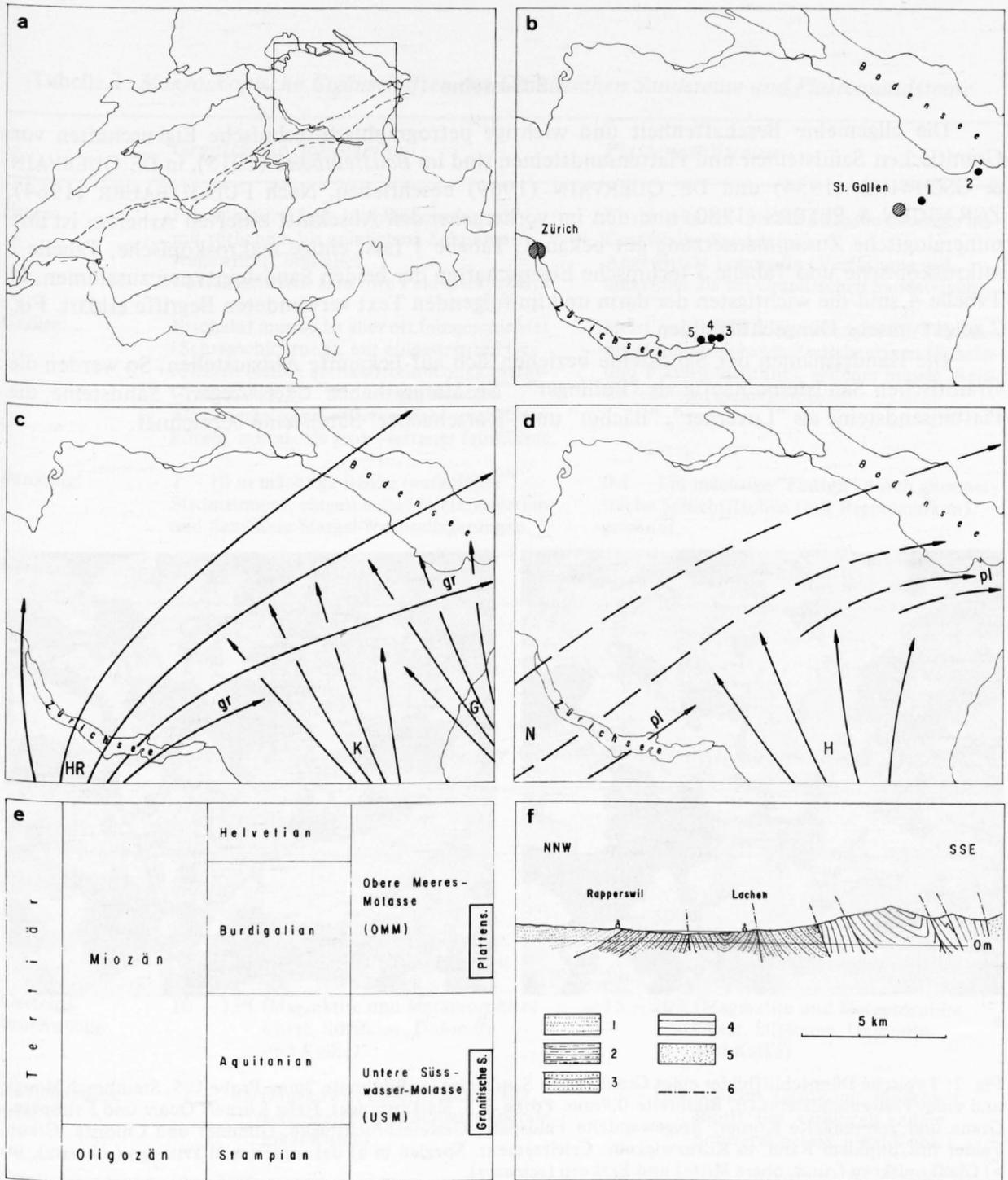


Fig. 1: Geographisch-geologische Übersicht.

- a) Lage des Untersuchungsgebietes. Gestrichelte Linien: N- und S-Grenze der subalpinen Molasse (nach SCHUPPLI, 1952).
- b) Untersuchungsgebiet mit Lokalitäten 1) Martinsbrugg, 2) Fuchsloch, 3) Uznaberg, 4) Goldberg und 5) Chatzenrietli.
- c) Paläogeographie im Aquitanian (nach HOFMANN, 1957). Ausgezogene Pfeile: fluviale Strömungen; HR: Hohronefächer mit Schüttung der Granitischen Molasse (gr); K: Kronbergfächer; G: Gäbrisfächer.
- d) Paläogeographie im Burdigalian (nach HOFMANN, 1957). Gestrichelte Pfeile: Meeresströmungen; N: Napfschüttung mit Plattensanden (pl); H: Hörnlifächer.
- e) Zeittafel mit ungefährender Ausdehnung der Granitischen Sandsteine und Plattensandsteine.
- f) Querprofil durch den Molasse-Südrand beim oberen Zürichsee (nach RENZ, 1937). 1) Helvetian und Tortonian, 2) Burdigalian, 3) Aquitanian, 4) Stampian, 5) Flysch, 6) Aufschiebungen und Antiklinalen.

2.3 Gesteine

Die allgemeine Beschaffenheit und wichtige petrographisch-technische Eigenschaften von Granitischen Sandsteinen und Plattensandsteinen sind im *Bausteinband* (1915), in DE QUERVAIN & GSCHWIND (1934) und DE QUERVAIN (1969) beschrieben. Nach FUECHTBAUER (1964), ZGRAGGEN & PETERS (1980) und den im vorhergehenden Abschnitt zitierten Arbeiten ist ihre mineralogische Zusammensetzung gut bekannt. Tabelle 1 fasst einige makroskopische, Tabelle 2 mikroskopische und Tabelle 3 technische Eigenschaften der beiden Sandsteintypen zusammen. In Tabelle 4 sind die wichtigsten der darin und im folgenden Text verwendeten Begriffe erklärt. Fig. 2 zeigt typische Dünnschliffbilder.

Die Handelsnamen der Sandsteine beziehen sich auf bekannte Abbaustellen. So werden die Granitischen Sandsteine häufig als "Bollinger", "St. Margrethener" oder "Aegeri-" Sandsteine, die Plattensandsteine als "Luzerner", "Bächer" und "Rorschacher" Sandsteine bezeichnet.

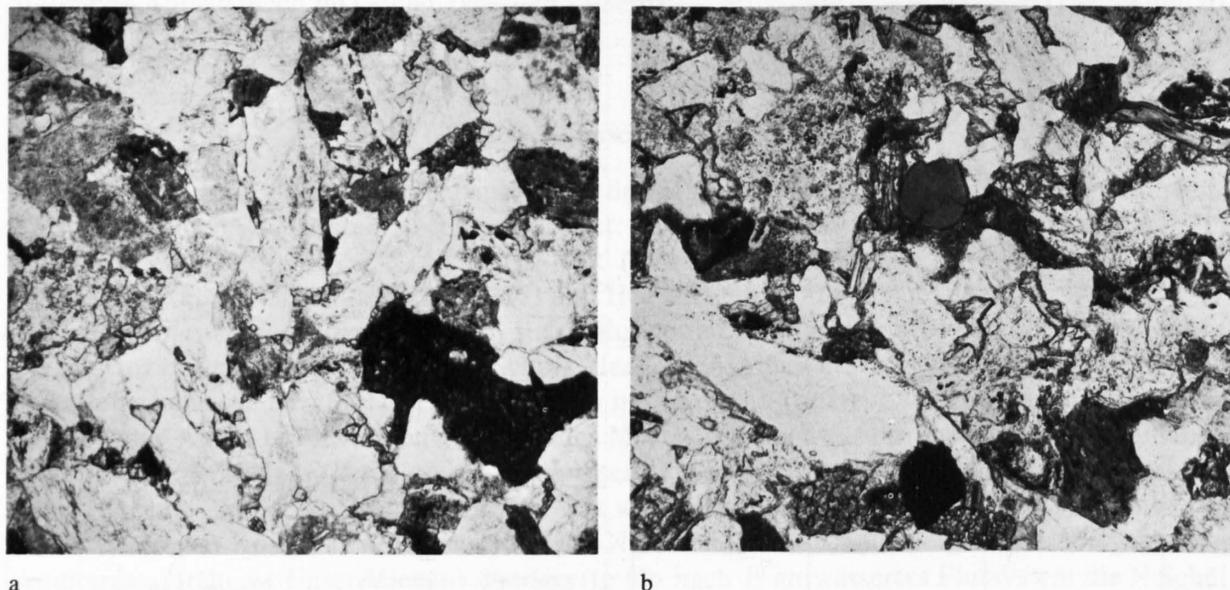


Fig. 2: Typische Dünnschliffbilder eines Granitischen Sandsteins (a, Bildbreite 2mm, Probe U 5, Steinbruch Moos) und eines Plattensandsteins (b, Bildbreite 0,9mm, Probe B 8, Martinsbrugg). Helle Körner: Quarz und Feldspäte. Graue und gesprenkelte Körner: umgewandelte Feldspäte, Gesteinsbruchstücke, Glimmer und Chlorite. Graue Felder mit dunklem Rand, in Kornzwickeln: Calcizement. Speziell in a) deformiertes Mikritkorn (schwarz), in b) Glaukonitkorn (rund, obere Mitte) und Erzkorn (schwarz).

2.4 Bauwerke

Für eingehende Untersuchungen war die Auswahl auf wenige in Restaurierung befindliche und dadurch zugängliche Bauwerke beschränkt. Der Hauptbahnhof Zürich dient als Modellfall. An der Hauptpost St. Gallen konnten unterschiedlich witterungsbeständige Varietäten des Granitischen Sandsteins miteinander verglichen werden. Verschiedene Objekte in Zürich ergänzen die Dokumentation an Bauwerken (Tabelle 5). An zahlreichen weiteren Objekten – u.a. am Grossmünster und der Antoniuskirche in Zürich – wurden kleinere Untersuchungen gemacht und z.T. Proben entnommen. Abgesehen von der Reiterfigur am Grossmünster werden sie nicht einzeln behandelt, bilden aber als Dokumentationsbasis einen Bestandteil dieser Arbeit.

Tabelle 1: *Makroskopische Eigenschaften der Granitischen Sandsteine und Plattensandsteine*

	<i>Granitische Sandsteine</i>	<i>Plattensandsteine</i>
<i>Farbe:</i>	Frisch neutral hell- bis bläulichgrau, z.T. mit rötlichem bis grünlichem Schimmer. Angewittert bräunlich. Charakteristisch sind rote Feldspatkörner.	Frisch grünlich- bis bläulichgrau (dunkler als Granitische Sandsteine). Angewittert braungrün (Verfärbung viel langsamer als bei Granitischen Sandsteinen).
<i>Gefüge:</i>	Erscheint massig, ist aber oft feingeschichtet (Schrägschichtung), mit eingestreuten Gerölllagen (selten als Sandstein-Konglomerat-Gradierung), z.T. mit unregelmässigen siltig-mergeligen Schlieren. Sehr ungleichkörnig, mittel- bis grob-, seltener feinkörnig.	Meist horizontal feingeschichtet mit feinsandig-glimmerreicheren Zwischenlagen (Schräg- und Flaserschichtung), seltener massig. Relativ fein- und gleichkörnig.
<i>Bankung:</i>	2 – 10 m mächtige Bänke (aufgefüllte Stromrinnen), eingeschaltet in Mergelserien und Sandstein-Mergel-Wechsellagerungen.	0.1 – 1 m mächtige "Platten" durch glimmerreiche Schichtflächen (mit Rippelmarken) getrennt.
<i>Gewinnungsform:</i>	Blöcke beliebiger Grösse.	10 – 60 cm dicke Platten.

Tabelle 2: *Petrographische Charakterisierung der Granitischen Sandsteine und Plattensandsteine*

	<i>Granitische Sandsteine</i>	<i>Plattensandsteine</i>
<i>Mineralbestand:</i>		
Quarz	30 – 50%	40 – 50%
Feldspat	25 – 40% (Kalifeldspat und Plagioklas, frisch bis stark umgewandelt)	15 – 20% (Kalifeldspat und Plagioklas, frisch bis stark umgewandelt)
Gesteinsbruchstücke	10 – 25% (Magmatite und Metamorphite, Chert, Siltsteine, Dolomite und Kalke)	15 – 20% (Magmatite und Metamorphite, Chert, Siltsteine, Dolomite und Kalke)
Nebengemengteile	2 – 8% (Muskowit, Chlorit, Biotit, Erz, vereinzelt andere Schwerminerale, lokal Kohle)	3 – 10% (Chlorit, Glaukonit, Muskowit, Biotit, Erz, vereinzelt andere Schwerminerale, lokal Kohle)
Calcit	1 – 10%	5 – 15%
<i>Gefüge:</i>		
mittlere Korngrösse	0.2 – 0.3 mm	0.1 – 0.2 mm
Sortierung	sehr schlecht	mässig bis gut
Rundung	meist eckige bis kantengerundete, selten gut gerundete Körner	eckige bis kantengerundete, z.T. gut gerundete Körner
Zemente	Calcit, Tonminerale und "silikatischer" Zement (vgl. Kap. 8.1.2)	Calcit, Tonminerale und "silikatischer" Zement (vgl. Kap. 8.2.2)

Tabelle 3: Technische Eigenschaften der Granitischen Sandsteine und Plattensandsteine

	Granitische Sandsteine	Plattensandsteine
Raumgewicht ¹⁾	2.35 – 2.51 g/cm ³	2.45 – 2.59 g/cm ³
totale Porosität ¹⁾	7 – 11%	4 – 8%
effektive Porosität ²⁾	5.5 – 9%	3 – 5%
effektive Porosität ³⁾	4 – 13%	5 – 8%
Wasseraufnahme ¹⁾	2.5 – 3.5%	1 – 2.5%
Druckfestigkeit ¹⁾		
– trocken	500 – 1000 kg/cm ²	800 – 1100 kg/cm ²
– nass	400 – 700 kg/cm ²	600 – 900 kg/cm ²

1) nach DE QUERVAIN (1969)

2) nach DE QUERVAIN (1969), mit Wasseraufnahme bei Atmosphärendruck bestimmt und als "scheinbare Porosität" bezeichnet

3) nach eigenen Messungen mit Quecksilber-Druckporosimeter (vgl. Kap. 8.1.1 und 8.2.1)

Tabelle 4: Verwendung einiger petrographischer und petrophysikalischer Begriffe

Zement	diagenetische Ausscheidung im Porenraum
Sparit	mikro- bis makrokristallines Karbonatgestein
Mikrit	kryptokristallines Karbonatgestein
Korngrößen:	
Sand	60 – 2000 µm
Silt	2 – 60 µm
Ton	kleiner 2 µm
Kristallgrößen:	
makrokristallin	größer 100 µm
mikrokristallin	10 – 100 µm
kryptokristallin	kleiner 10 µm
Porenvolumen:	
effektive Porosität	eigentlich das offene Porenvolumen eines Gesteins. In dieser Arbeit das vom Quecksilber im Druckbereich 1 – 1000 at gefüllte Porenvolumen (in % des totalen Gesteinsvolumens).

2.5 Naturaufschlüsse

Die zu untersuchenden Naturaufschlüsse wurden nach orientierenden Feldaufnahmen gewählt, wobei im ganzen Spektrum natürlicher Verwitterungserscheinungen mit der Bausteinverwitterung vergleichbare Formen lokalisiert wurden. Es handelt sich um die Steinbrüche in Martinsbrugg bei St. Gallen, Uznaberg und Chatzenrietli bei Schmerikon, sowie Fuchsloch bei Staad (Fig. 1b, Tabelle 5). Analog zu den Bauwerkuntersuchungen wird Martinsbrugg als Modellfall beschrieben, während die übrigen Aufschlüsse zur Ergänzung dienen. In 28 weiteren, über das ganze Abbaugebiet verstreuten Steinbrüchen wurden meist kleinere, im Text nicht erwähnte Untersuchungen durchgeführt (Tabelle 6). Eine grössere Zahl von Aufschlüssen wurde kurz besichtigt.

Tabelle 5: *Verzeichnis der beschriebenen Lokalitäten*
(Reihenfolge ihrer Beschreibung in Kapitel 5 und 6)

<i>Bezeichnung im Text</i>	<i>Lokalität</i>	<i>Probenbezeichnung</i>
<i>Bauwerke</i>		
Hauptbahnhof	Zürich, Hauptbahnhof	H
Hauptpost	St. Gallen, Hauptpost	Q
Schienhutgasse	Zürich, Schienhutgasse 7	
Konservatorium	Zürich, Städtisches Konservatorium, Florhofgasse 6	
Quellenstrasse	Zürich, Quellenstrasse 36	
Leonhardshalde	Zürich, Leonhardshalde 7	
Bürgerasyl	Zürich, Städtisches Bürgerasyl, Leonhardstrasse 16	
Archäologisches Institut	Zürich, Archäologisches Institut der Universität, Rämistrasse 73	
Auf der Mauer	Zürich, Auf der Mauer vis-à-vis Haus Nr. 15	
<i>Naturaufschlüsse</i>		
Martinsbrugg	Koord. 750.220/256.330	B
Uznaberg	Koord. 715.050/232.625	W
Chatzenrietli	Koord. 712.040/231.760	T
Fuchsloch	Koord. 759.750/261.100	A

Tabelle 6: *Untersuchte Steinbrüche ohne Erwähnung im Text*

Luzern, Gletschergarten	(P)	Koord.	666.250/212.300
Dierikon, Widacker*	(P)	Koord.	671.650/216.700
Unterägeri, Waldheim	(G)	Koord.	685.900/222.000
Bäch, Bächerwald	(P)	Koord.	698.150/228.650
Bäch, Weid	(P)	Koord.	699.050/228.800
Bäch, Freienbach*	(P)	Koord.	699.200/229.100
Etzel	(G)	Koord.	700.900/226.050
Bollingen, Untere Stafflen	(G)	Koord.	708.700/230.900
Bollingen, Tschuepis	(G)	Koord.	709.900/230.850
Bollingen, Risi	(G)	Koord.	709.900/231.100
Bollingen, Rain	(G)	Koord.	710.400/231.250
Bollingen, Moos*	(G)	Koord.	710.800/231.600
Nuolen, Guntliweid*	(G)	Koord.	711.400/229.400
Bollingen, Weid	(G)	Koord.	711.450/231.550
Bollingen, Weierriet	(G)	Koord.	711.800/231.700
Bollingen, Lourdes Grotte	(G)	Koord.	712.200/231.750
Tuggen, Bätzimatt	(G)	Koord.	713.300/230.150
Schmerikon, Bürgital	(G)	Koord.	713.300/232.200
Eschenbach, Bürstli* ¹⁾	(G)	Koord.	714.200/232.600
Uznaberg, Döltsch	(G)	Koord.	714.600/232.300
Aabachschlucht	(G)	Koord.	715.350/232.650
Teufen, Lochmühle	(G)	Koord.	746.550/249.900
Trogen, Niederen	(G)	Koord.	752.300/252.750
Unterbilchen	(P)	Koord.	756.900/258.400
Staad, Kreien	(P)	Koord.	758.500/259.900
Berneck, Tobel	(G)	Koord.	763.600/255.800
Walzenhausen, Heldstadel	(G)	Koord.	764.350/256.900
St. Margrethen*	(G)	Koord.	764.950/258.000

* im Betrieb

(G) Granitischer Sandstein

(P) Plattensandstein

1) befindet sich in der Gemeinde Eschenbach,
Handelsbezeichnung ist aber "Uznabergler"

3. Untersuchungsmethoden

3.1 Felduntersuchungen

3.1.1 Vergleich zwischen Bauwerk und Naturaufschluss

Mit den Felduntersuchungen sollen typische Verwitterungserscheinungen der Granitischen Sandsteine und Plattensandsteine an Bauwerken beschrieben und mit der Verwitterung dieser Gesteine in Naturaufschlüssen verglichen werden. Das Bauwerk kann in diesem Zusammenhang als ein spezieller Aufschluss betrachtet werden, bei dem grundsätzlich ähnliche Verwitterungsprozesse wie an der natürlichen Erdoberfläche wirken. Aus seiner besonderen Struktur und Lage ergeben sich jedoch wesentliche Unterschiede:

Bauwerk

- mehrseitige Bewitterung
- Mauerinneres häufig trocken
- künstliches Relief mit vorwiegend vertikalen und horizontalen Flächen
- bearbeitete Gesteine
- kleinere Schäden auffällig
- gesteinsfremdes Material in unmittelbarer Umgebung des Werksteines
- Verwitterung in städtischer Umgebung durch anthropogene Immissionen stark beeinflusst

Naturaufschluss

- einseitige Bewitterung
- Felsinneres konstant feucht
- durch langzeitige Verwitterung bedingtes natürliches Relief, vertikale Flächen selten, horizontale Flächen meist schutt- oder bodenbedeckt
- unbearbeitete Gesteine
- kleinere Schäden unauffällig
- Gestein im natürlichen Verband
- Verwitterung in ländlicher Umgebung durch anthropogene Immissionen schwach beeinflusst

Zu den speziellen Verwitterungsbedingungen eines Bauwerkes gehören ausserdem Belastungen durch Raumheizung, Reinigungs- und Konservierungsmittel, Streusalz, Erschütterungen, usw. . Dieser Verschiedenartigkeit der beiden Milieus entsprechen – im allgemeinen – stark abweichende Verwitterungserscheinungen. Einleitende Feldaufnahmen zeigten nämlich, dass die verbreitetsten Verwitterungsformen des anstehenden Gesteins, wie allmähliche Auflockerung des kompakten Felses (oberflächennahe Klüftung) und Bodenbildung im engeren Sinn (GSCHWIND & NIGGLI, 1931), nicht oder nur ausnahmsweise (bei Ruinen) am Bauwerk auftreten.

In einigen Aufschlüssen wurden jedoch gut vergleichbare Erscheinungen beobachtet, und zwar an senkrechten, teilregengeschützten Felswänden, wie sie beispielsweise in Steinbrüchen vorkommen. Solche Stellen sind auch vom Relief her am ehesten mit Bauwerkfassaden vergleichbar. Die systematischen Untersuchungen, die sich natürlich auf leicht zugängliche Stellen beschränken, setzten folglich hier an. – Die Arbeitsweise war an Bauwerken und in Naturaufschlüssen gleich: Verwitterungserscheinungen wurden in ihrer spezifischen Umgebung dokumentiert und Proben für Laboruntersuchungen entnommen. Die Naturaufschlüsse konnten während zwei Jahren periodisch kontrolliert und so zeitliche Veränderungen erfasst werden. Für Fassadenaufnahmen stand dagegen nur die kurze Zeitspanne zwischen Gerüstbau und Fassadenreinigung zur Verfügung.

3.1.2 Probenahmen

Die Untersuchung von Gestein, das durch Verwitterung gelockert ist, verlangt eine sorgfältige Probenahme. Die Probenmenge ist an Gebäuden aus denkmalpflegerischen Gründen oft sehr beschränkt. Verwitterungsprofile (Gesteinsproben senkrecht zur Oberfläche) wurden deshalb mit einem Kernbohrgerät (Diamant-Hohlbohrer, Durchmesser 3.7 cm) entnommen. Um die wasserlöslichen Anteile unverändert zu erhalten, wurde die Bohrung mit Pressluft gespült. Normale Handstücke sowie Oberflächenproben von gelockertem Gesteinsmaterial, Krusten und Ausblühungen ergänzten die Bohrkerne.

3.1.3 Immissionsmessungen

Mit Immissionsmessungen sollen Informationen über die Menge schädlicher Stoffe gewonnen werden, die aus der Atmosphäre auf den Stein gelangen. Die gängigsten Verfahren gliedern sich in Konzentrationsmessungen, Messungen im Niederschlag und Messungen auf einer spezifischen Oberfläche. Da sich Verunreinigungen aus Regen und Luft im Gestein wie in einem Schwamm anreichern können (LUCKAT, 1972; PAULY 1975c), vermag die Messung von Immissionsraten (Summe der über längere Zeiträume anfallenden Schadstoffe) die Belastung eines Steines besser zu erfassen als punktuelle Messungen wechselnder Schadstoffkonzentrationen. Die Immissionsmessung im Niederschlag mit *Bergerhoff-Geräten* bot sich als geeignete und einfachste Methode an. Dabei werden flüssige und feste Niederschläge in einem Topf gesammelt (VDI-Norm 2119) und hernach deren chemische Zusammensetzung bestimmt. Weil dieses Verfahren einer Konzen-

trationsmessung im Regenwasser entspricht, wie es beispielsweise die MZA (*Schweizerische Meteorologische Zentralanstalt*) und EAWAG (*Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz*) praktizieren (ZOBRI& STUMM, 1979), sind die Resultate entsprechend gut mit in- und ausländischen Daten vergleichbar. Die Messungen mussten wegen zeitlichem Aufwand auf drei Punkte beschränkt werden. Um städtische und ländliche Niederschläge in möglichst unmittelbarer Nähe von untersuchten Gebäuden bzw. Naturaufschlüssen miteinander vergleichen zu können, wurden zwei Messstellen im Zentrum von Zürich und eine bei Schmerikon am oberen Zürichsee eingerichtet (vgl. Fig. 1b):

- 1) *ETH Zürich*, Dach des NW-Gebäudes, Clausiusstrasse 25 (3 Töpfe),
- 2) *Hauptbahnhof Zürich*, Dach der Aufnahmehalle (je 1 Topf an der SW- und NW-Ecke),
- 3) *Goldberg bei Schmerikon*, Koord. 713.600/232.250, Wiesland (3 Töpfe im Abstand von 10 m).

Die Messungen wurden vom August 1978 bis März 1980 nach folgender Methode durchgeführt (modifiziert nach DEUBER, 1969):

Die Gefässe (1000 ml – Polypropylen-Weithalsflaschen, Halsdurchmesser 69 mm) werden mit einer Flüssigkeitsvorlage versehen und offen auf 2 m hohen Stangen montiert. Nach der Expositionszeit von 30 ± 1 Tagen werden sie verschlossen zur Analyse ins Labor transportiert. Als Flüssigkeitsvorlage dient entionisiertes Wasser mit einem Zusatz von Aethylenglykol-Monomethyläther p.a. (verhindert den Algenwuchs und erniedrigt den Gefrierpunkt), und zwar 750 ml 5%-ige Lösung in den Monaten Mai bis September und 500 ml 7%-ige Lösung von Oktober bis April.

3.2 Laboruntersuchungen

Die Gesteinskerne wurden für Laboruntersuchungen trocken zersägt und gebrochen, wobei ca. 1/3 der Probe als Reserve und Belegstück bleibt. Es wurden folgende Analysen durchgeführt:

- 1) *Chemische Analysen* des Gesamt-S und der wasserlöslichen Anteile an S, Na, K, Mg und Ca (nasschemisch),
- 2) *Bestimmung der löslichen Salze* (mikroskopisch, mikrochemisch und röntgenographisch),
- 3) *Porenanalyse* (mit Quecksilber-Druckporosimeter, mikroskopisch und elektronenoptisch) verbunden mit allgemein petrographischer Charakterisierung des Gesteins.

3.2.1 Chemische Analysen

3.2.1.1 Herstellung der Wasserauszüge

Um Anreicherungen der leichtlöslichen Sulfate und des Gipses im Verwitterungsprofil zu erfassen, sollen diese Anteile – möglichst ohne Lösung der schwerlöslichen Komponenten – im Wasserauszug quantitativ gelöst und darin die Elemente S, Na, K, Mg und Ca bestimmt werden. Auf zusätzliche Bestimmungen von Cl, NO_x, PO₄ und CO₂ musste aus zeitlichen Gründen verzichtet werden. Zur Herstellung der Wasserauszüge erwies sich nach Vorversuchen mit verschiedenen Rührmethoden und Wassertemperaturen das kurzzeitige Schütteln des Gesteinspulvers in kaltem Wasser als geeignetste Methode.

Vorgehen:

- 1g trockenes Gesteinspulver (Analysenwaage) in 100 ml – Polypropylen-Weithalsflasche geben,
- 100 ml entionisiertes Wasser zugeben und Flasche schliessen,
- 2 Min. von Hand kräftig schütteln.
- Suspension filtrieren (Schleicher-Schuell Filter Nr. 576 spezialgereinigt, SOVIREL-Filtrierkolonne aus Glas mit Teflon-Dichtung).

Die ideale Schüttelzeit ergab sich aus der Ermittlung des maximalen S-Gehaltes einer gipsreichen Probe bei verschiedenen Schüttelzeiten: Nach zwei Minuten sind die Gehalte innerhalb der Reproduzierbarkeit von $\pm 3\%$ konstant (wobei der Gipsgehalt weit unterhalb der maximalen Löslichkeit liegt). Bei längerem Schütteln steigt der Ca-Gehalt stark an, was auf unvollständige Calcitlösung zurückzuführen ist (mit CaCO₃-Pulver experimentell bestätigt). Die zu erwartende Lösung weiterer schwerlöslicher Gesteinskomponenten (u.a. Dolomit und Silikate) kann hier nicht quantitativ erfasst werden, zumal die kleine Auswahl der analysierten Elemente keine Bilanzbetrachtungen zulässt.

3.2.1.2 Analyse von S

Die kleinen Probenmengen (einige g) und niedrigen Elementkonzentrationen (ppm) erfordern im μg -Bereich reproduzierbare Bestimmungsmethoden. Deshalb wurden die S-Gehalte an Wasserazügen und Gesteinsproben mit der von GEILMANN & TOELG (1960) entwickelten Apparatur bestimmt. Diese Methode hat den Vorteil, chemisch störungsfrei zu sein. Die Arbeitsvorschrift nach TOELG (1968, S. 133 – 138) wurde teilweise geändert und an grössere S-Mengen angepasst (ZEHNDER, 1981, S. 18 – 20). Bei einer Reproduzierbarkeit von $\pm 3\%$ ergaben sich wegen Probeninhomogenitäten oft grössere Schwankungen. Die Analysenwerte beruhen auf mindestens zwei Messungen, die gemittelt wurden, wenn sie um höchstens 10% voneinander abwichen.

3.2.1.3 Analyse von Na, K, Mg und Ca

Die Elemente Na, K, Mg und Ca wurden mit einem Atomabsorptionsspektrometer (Perkin-Elmer 420) mit Luft-Acetylen-Flamme gemessen. An den Lösungen beträgt die Reproduzierbarkeit $\pm 2\%$; sie wird durch die Probeninhomogenität auf $\pm 10\%$ herabgesetzt. Die Ca-Bestimmung wird bei Anwesenheit von Sulfat stark gestört: Im linearen Absorptionsbereich der Ca-Eichkurve beträgt die gemessene Ca-Konzentration einer Gipslösung $30 - 50\%$ vom wahren Wert. Deshalb wurden für Ca im Bereich der S-Anreicherungen zu tiefe Werte gemessen. Sie wurden in den Tabellen eingeklammert und in den Diagrammen als punktierte Linien gezeichnet.

3.2.2 Bestimmung der löslichen Salze

Die ausblühenden oder als Krusten angereicherten Salze wurden mikroskopisch, mikrochemisch und röntgenographisch (Diffraktometer oder Gandolfi-Kamera) identifiziert, wobei die ersten zwei Bestimmungen oft genügten. Da sich die Salze im Raumklima z.T. sehr rasch umwandeln (Änderungen der Hydratstufe), musste ihre Bestimmung möglichst kurz nach der Probenahme erfolgen.

3.2.3 Porenanalyse

3.2.3.1 Einleitung und Grundbegriffe

Verwitterungsprozesse sind mit dem Austausch von Stoffen (Gase, Lösungen, Wasser) zwischen dem Gestein und seiner Umgebung verbunden. Während bei unporösen Gesteinen der Austausch auf die Oberfläche beschränkt ist, ermöglicht der Porenraum eine Stoffzirkulation im Innern, was die Verwitterung stark beeinflussen kann. Gesteinstypen mit schwankenden Porositäten, wie es die untersuchten Sandsteine sind, zeigen sehr unterschiedliche Verwitterungsverhalten, die mit den unterschiedlichen Porenverhältnissen zusammenzuhängen scheinen. Der Einfluss des Porenraumes auf den Gang der Verwitterung ist im Detail vor allem aus zwei Gründen weitgehend unklar:

1) Der Porenraum ist ein geometrisch kompliziertes, schwer quantifizierbares Gebilde.

2) Er ist ein Teil des gesamten Gefüges. Wird er ohne Bezug zu den übrigen Gefügeeigenschaften betrachtet, gehen wichtige Zusammenhänge verloren.

In dieser Arbeit wurde der Porenraum mit den zur Verfügung stehenden Mitteln qualitativ und quantitativ charakterisiert durch

- das *effektive Porenvolumen* (Quecksilber-Druckporosimeter),
- die *Porengrössenverteilung* (Quecksilber-Druckporosimeter und Lichtmikroskop) und
- die *Porenmorphologie* (Lichtmikroskop und REM).

Dabei ergänzte die Porenanalyse eine allgemein petrographische Untersuchung. Vor der Beschreibung der eigenen Methodik sind anschliessend einige Begriffe für diese Arbeit zu definieren.

Ein Sandsteingefüge setzt sich aus dem Gerüst von Sandkörnern, einem oder mehreren Zementen und einem Netz von Hohlräumen oder Poren zusammen. Der ursprüngliche, bei der Ablagerung entstandene Porenraum wurde während der Diagenese durch zunehmende Sedimentüber-

lagerung zusammengedrückt, durch Mineralauflösungen teilweise vergrößert und durch Ausscheidungen (Zemente) verkleinert. Das ursprünglich lockere Sandgefüge wurde dabei zunehmend verfestigt. *Diagenetische Bildungen*, die den Porenraum stark modifizieren, werden in die Porenanalyse einbezogen.

Von vielen Möglichkeiten zur Bestimmung des *Porenvolumens* wird hier das Quecksilber-Druckporosimeter verwendet. Dabei entspricht die *effektive Porosität* (n^*) dem Porenvolumen, das im Druckbereich 1 – 1000 at mit Quecksilber gefüllt wird (in % des totalen Gesteinsvolumens).

In der Porometrie bezeichnet der *Porenradius* den scheinbaren (errechneten oder sichtbaren) Halbmesser einer idealisierten Pore. Er bezieht sich nämlich auf das Modell von kugelförmigen oder zylindrischen Poren, das beispielsweise der Auswertung von Kapillardruckkurven in "Porengrößenverteilungen" zugrunde liegt. Optische Porenuntersuchungen zeigen aber, dass der Hohlraum in Kornzwickeln und im Innern von Körnern ein kompliziert gegliedertes, weitgehend kommunizierendes Netz bildet. Porenerweiterungen sind durch enge Porenhälse miteinander verbunden, deren Querschnitte nicht röhren-, sondern eher rissförmig sind. Da es in diesem Rahmen nicht möglich ist, ein realistischeres Porenmodell zu entwickeln, wird der Begriff im konventionellen Sinn verwendet.

Die sinnvolle Einteilung der Poren in verschiedene *Größenkategorien* ist eine nicht a priori und allgemein zu lösende Frage. Sie hängt einerseits von der Messmethode, andererseits von den charakteristischen Porengrößen des untersuchten Gesteins ab. Tabelle 7 zeigt verschiedene mögliche Einteilungen.

Tabelle 7: Porengrößen-Kategorien

Porenradius	0.01	0.1	1	10	100	1000	μm
DE QUERVAIN (1967)		Mikro-(Poren)		5 Fein-	200 Grob-	2000 Gross-	
CHOQUETTE & PRAY (1970)		Mikro-		31	Meso-	2000 Mega-	
PITTMAN (1971, 1979a)		Mikro-	0.5		Makro-		
GONI, RAGOT & SIMA (1968)	Infra-	0.03 Mikro-		7.5	Makro-		
ASHURST & DIMES (1977)		Mikro-	2.5		Makro-		
BOUSQUIE (1979)	Infra-	0.01 Mikro-	1	5	Makro-		
diese Arbeit		Mikro-	1	2.5	Makro-		

– Grenze bei Quecksilber-Porometrie oder nicht spezifiziert
 = Grenze bei Dünnschliff-Porometrie und REM-Untersuchungen

Aus messtechnischen Gründen zieht BOUSQUIE (1979) die Grenze zwischen Makro- und Mikroporen bei der mikroskopischen Untersuchung anders als bei der Druckporometrie. Im Mikroskop ergibt sie sich nämlich aus der (vor allem durch die Schliffdicke begrenzten) optischen Auflösung, die bei 2 – 5 μm liegt. In der Druckporometrie lässt sich die Grenze jedoch über eine grosse Spannweite beliebig ziehen und so den spezifischen Größenverteilungen anpassen. BOUSQUIE (id.) setzt sie bei einem Porenradius von 1 μm . Für diese Arbeit erwies sich eine analoge Trennung zwischen *Makro-* und *Mikroporen* bei 2.5 μm im Mikroskop und bei 1 μm in der Druckporometrie als sinnvoll (vgl. Kap. 8.1.1).

Zur Beschreibung der *Porenmorphologie* werden in der Literatur verschiedene Porentypen unterschieden, wobei neben morphologischen Kriterien (Grösse, Form und Anordnung der Poren) auch genetische (Bildungsprozess und Bildungszeitpunkt) gelten. Die von CHOQUETTE & PRAY (1970) für Karbonatgesteine entwickelte umfangreiche Klassifikation kann für Sandsteine wegen ihrem einfacheren Gefüge reduziert werden (SCHOLLE, 1979; PITTMAN, 1979a). In dieser Arbeit basiert die Beschreibung der Porenmorphologie ausschliesslich auf Dünnschliff-Untersuchungen, wobei filgende fünf Porentypen unterschieden werden:

Intergranulare Poren: Hohlraum in Kornzwickeln (Zwickelporen) und Kornfugen (Fugenporen).

Intragranulare Poren: Hohlraum in Mineral- oder detritischen Gesteinskörnern.

Submikroskopische Poren: Hohlraum in kryptokristallinen Bereichen, aus einem feinmaschigen Netz von Poren bestehend, deren Radien meist unter $0.5 \mu\text{m}$ liegen.

Auflösungsporen: Geometrisch komplizierter, aber charakteristischer Hohlraum, der durch Auflösung entstanden ist.

Rissporen: Hohlraum mit parallelen Begrenzungsflächen, der durch mechanische Auflockerung entstanden ist.

3.2.3.2 Quecksilber-Porometrie

Mit dem Quecksilber-Druckporosimeter (Carlo Erba 60) wurde das offene Porenvolumen und eine idealisierte Porengrössenverteilung bestimmt. Form und räumliche Verteilung der Poren bleiben dabei unbekannt. Beim automatischen Messvorgang werden im Druckbereich 1 – 1000 at die Poren mit Äquivalentradien $7.5 - 0.0075 \mu\text{m}$ (Kontaktwinkel 140°) mit Quecksilber gefüllt (Äquivalentradius = Radius einer zylindrischen Pore, die beim gemessenen Druck mit Quecksilber gefüllt würde). Neueste Messtechniken mit Rückzugs- und wiederholten Injektionskurven nach PELLERIN (1978, 1980) und BOUSQUIE (1979) konnten aus apparativen oder zeitlichen Gründen nicht mehr berücksichtigt werden.

Im Diagramm der Porengrössenverteilung wird das Porenvolumen (in ml/g Probe) als Funktion des Porenradius (in μm) dargestellt (vgl. Fig. 61). Die Volumenangabe in ml/g wird gegenüber Volumen-% vorgezogen, weil das Probengewicht sehr genau, das Volumen aber nur ungenau aus dem Gewicht des verdrängten Quecksilbers bestimmt werden kann. In den Tabellen wird die effektive Porosität (das bei 1000 at mit Quecksilber gefüllte Porenvolumen) in Volumen-% beige-fügt (vgl. Tabelle 25). Für die Interpretation der Resultate ist wesentlich, dass die gemessenen Radien eigentlich Eingangsradien sind, da Poren hinter einer Verengung erst bei dem der Verengung entsprechenden Druck gefüllt werden.

3.2.3.3 Dünnschliff-Porometrie

Für Gefügeuntersuchungen im Lichtmikroskop müssen gelockerte Proben möglichst störungs-frei fixiert werden; zudem soll der Porenraum bei unverwitterten und verwitterten Proben im Dünnschliff sichtbar sein. Die Proben wurden deshalb vor dem Dünnschleifen mit gefärbtem Kunstharz imprägniert (Prinzip nach VOGLER, 1967; eigene Methodik modifiziert nach J. Sell, EMPA Dübendorf, und Ch. Angst, Institut für Strassen-, Eisenbahn- und Felsbau, ETH Zürich):

- Evakuieren der trockenen Proben im Vakuum-Druck-Autoklav während 1 Std. auf 20 mtorr (Millitorr),
- langsames Zugeben der Harzmischung Araldit DY 026 (100 Gewichts-%), Laromin C 260 (50%) und Fluorol 5 G (0.1%), wobei das Vakuum auf ca. 50 mtorr reguliert wird (Härter verflüchtigt sich bei geringerem Druck zu rasch),
- nach 15 Min. Autoklav belüften und während 1 Std. unter Druck von 10 at setzen.
- Probe bei Raumtemperatur ca. 1 Woche aushärten lassen.
- Bei gipshaltigen Proben wird in Petrol geschliffen.

Unter dem Mikroskop ergibt sich im reflektierten Blaulicht (z.B. Xenon-Hochdrucklampe 450 W, Zeiss Erregerfilter BG 12, Sperrfilter K 490) ein guter Kontrast zwischen gelb leuchten-

dem Porenraum und dunkelblauen unporösen Bereichen. Die Grösse der exakt ausmessbaren Poren ist begrenzt durch die Schliffdicke, die Transparenz und Korngrösse der Mineralien und die mikroskopische Auflösung. Deshalb erscheinen Poren mit Durchmessern kleiner $5\ \mu\text{m}$ zunehmend verschwommen. Für eine quantitative Auswertung des Dünnschliffbildes sind möglichst klar definierbare Bereiche zu unterscheiden, nämlich:

Makroporöse Bereiche: hell, Poren mit Durchmessern grösser $5\ \mu\text{m}$. Es handelt sich praktisch ausschliesslich um Intergranularporen neben vereinzelt Auflösungs-poren in Feldspäten. Im verwitterten Bereich kommen Rissporen und Auflösungs-poren in weiteren Gesteinskomponenten dazu.

Mikroporöse Bereiche: diffus aufgehellt oder im μm -Bereich gesprenkelt. Es handelt sich um feinschichtige Porennetze in kryptokristallinen Gesteinskomponenten und verwitterten Feldspäten, deren Einzelporen submikroskopisch sind.

Unporöse Bereiche: dunkel bis schwach aufgehellt. Es sind optisch nicht oder sehr schwach mikroporöse Gesteinskomponenten.

In Wirklichkeit gehen diese Bereiche stufenlos ineinander über, was ihre Abgrenzung neben der Konturenschärfe zusätzlich erschwert. Auswertungsversuche mit einem elektronischen Bildanalysator (Quantimet 720) scheiterten. Deshalb wurden die Flächenanteile der makroporösen, mikroporösen und unporösen Bereiche mit einem mechanischen Integrationstisch (Leitz Wetzlar, Baujahr ca. 1930) ermittelt: Auf einer $2 \times 2\ \text{cm}$ grossen Fläche wurden normalerweise 8 Linien im Abstand $2\ \text{mm}$ ausgemessen. Wegen der Probeninhomogenität und erwähnten Interpretationsschwierigkeiten können sich innerhalb eines Schliffes grössere Abweichungen ergeben, wobei charakteristische Porositätsunterschiede zwischen den Proben jedoch klar zum Ausdruck kommen.

3.2.3.4 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen

In Ergänzung zu den lichtmikroskopischen Untersuchungen wurden mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) Strukturen im Porenraum untersucht und z.T. deren chemische Zusammensetzung mit elektronendispersiver Röntgenanalyse (EDAX) bestimmt. Die kleine Auswahl der Proben wurde nach eingehenden Dünnschliffuntersuchungen getroffen.

3.2.4 Analyse der Niederschläge

An den Niederschlagsproben wurde das Flüssigkeitsvolumen, der pH-Wert und die Konzentrationen der Elemente S, Na, K, Mg und Ca bestimmt (nasschemische Analysen analog Wasserauszügen). Ein während der Expositionszeit verschlossen im Labor aufbewahrtes Gefäss mit der gleichen Flüssigkeitsvorlage diente als Nullprobe.

4. Verwitterungsterminologie

4.1 Einleitung

Wie jede Gesteinsumwandlung ist die Verwitterung eine Wechselwirkung zwischen Stein und Umgebung. In diesem Zusammenhang sind es Atmosphäre, Hydrosphäre und Biosphäre, die sich in einem Energie- und Stoffaustausch mit dem verwitternden System befinden. Um beispielsweise die im Grössenbereich des Werksteines ablaufenden Verwitterungsprozesse zu verstehen, dürfen wir deshalb nicht nur den isolierten Werkstein, sondern müssen auch seine Umgebung als Ganzes erfassen. Es können in ihr abgestufte Grössenbereiche unterschieden werden:

1. Umgebung des Bauwerkes bzw. Naturaufschlusses,
2. Bauwerk bzw. Naturaufschluss,
3. Stein- bzw. Felsverband,
4. einzelner Werkstein,
5. Mineralkornverband,
6. einzelnes Mineralkorn.

Für Verwitterungsprozesse, die z.B. mit der Anreicherung leichtlöslicher Salze verbunden sind, spielt die Umgebung des Bauwerkes (Naturaufschlusses) bis hinunter zum Stein(Fels-)verband vor allem als Salzquelle eine Rolle. Dabei darf nicht vergessen werden, dass witterungsbedingte Veränderungen der Umgebung die Wegsamkeit der Salzwässer erhöhen. Die hier untersuchten Verwitterungserscheinungen liegen vorwiegend in den Grössenbereichen des Werksteines, Mineralkornverbandes und Mineralkornes; die formgebenden Prozesse müssen sich also hier abspielen.

4.2 Verwitterungserscheinungen

4.2.1 Grundlagen

Ein Blick in die Literatur zeigt, dass Verwitterungserscheinungen sehr uneinheitlich nach genetischen, deskriptiven oder bautechnischen Kriterien beschrieben werden. Dazu einige Beispiele:

- Die gebräuchlichen Grundbegriffe für Verwitterungsvorgänge, wie „physikalische“, „chemische“ und „biologische“ Verwitterung, werden häufig herangezogen, um Verwitterungsformen zu beschreiben.
- Nach französischer Konvention wird zwischen „Krustenzerfall“ (desquamation) und „sandigem Zerfall“ (alvéolisation) unterschieden (DE BEAUCOURT & JATON, 1975).
- Im Zusammenhang mit der Bausanierung werden Verwitterungsschäden beispielsweise als „völlig gestörte“, „teilweise gestörte“ und „gesunde“ Steine klassifiziert (HOSEK & SKUPIN, 1979).
- In geomorphologischen Arbeiten werden spezifische Begriffe wie „Schattenverwitterung“ oder „Kernverwitterung“ (KNETSCH & REFAI, 1955) neben allgemein gebräuchlichen wie „Krustenbildung“ mit spezieller Bedeutung (HABERLAND, 1975) verwendet.

Die wichtigsten Gründe für diese verwirrende Terminologie sind:

- 1) Die Unterscheidungskriterien können je nach Optik des Betrachters (geologische, geomorphologische oder denkmalpflegerische Problemstellung) völlig verschieden sein.
- 2) Die Verwitterung bildet geometrisch komplizierte, ineinander übergehende Erscheinungsformen, die von Ort zu Ort und von Gestein zu Gestein variieren.

Damit drängt sich eine klare und möglichst umfassende Begriffsbestimmung auf. Weil eine Beschreibung nach genetischen Kriterien (Tabelle 8) die Kenntnis der Verwitterungsprozesse voraussetzt, ist sie für Felduntersuchungen grundsätzlich nur sehr bedingt geeignet. Zudem können genetisch verschiedene Prozesse und deren Kombinationen analoge Erscheinungen verursachen (z.B. Schalen, die durch Frost und/oder Salzsprengung entstehen). Deshalb wird eine Beschreibung der an Bauwerken typischen Verwitterungserscheinungen nach morphologischen Kriterien angestrebt, wobei genetische Implikationen nicht ganz zu vermeiden sind. Eine umfassende, international korrelierte Terminologie wird z.Z. von der Gruppe „Petrographie“ des ICOMOS/UNESCO ausgearbeitet. Die hier verwendeten Begriffe stützen sich weitgehend auf DE QUERVAIN (1945) und wurden auf den provisorischen Stand der ICOMOS-Terminologie abgestimmt. In Tabelle 9 sind sie mit gebräuchlichen deutschsprachigen, englischen und französischen Begriffen korreliert.

Tabelle 8: Genetische Begriffe der Verwitterungsterminologie (vereinfacht)

	Faktoren:	Wirkungen:
<i>Physikalische Verwitterung:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – induzierte Spannungen, Setzungen, Frost, Salzanreicherungen, Feuchtigkeits- und Temperaturschwankungen – fließendes Wasser – Wind 	<ul style="list-style-type: none"> – mechanische Gefügelockerung – Abrasion – Abrasion
<i>Chemische Verwitterung:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – Wasser, Lösungen – Gase 	<ul style="list-style-type: none"> – Hydrolyse, Auflösung, Oxidation – Oxidation
<i>Biologische Verwitterung:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – höhere Pflanzen und Tiere – Moose, Pilze, Algen, Flechten, Mikroorganismen 	<ul style="list-style-type: none"> – mechanische Gefügelockerung, Abrasion, Auflösung – Auflösung, Oxidation

4.2.2 Eigene Terminologie

Schalenbildung: Hinter der scheinbar intakten Oberfläche bildet sich zwischen weniger als 1 mm bis ca. 20 mm Tiefe eine Lockerzone, wodurch eine oberflächenparallele Schicht (Schale) vom Gesteinskern getrennt wird. Schalenbildung kann in Abblättern übergehen.

Abblättern: Oberflächenparallele, weniger als 1 mm bis gegen 3 mm dicke Gesteinsschichten (Blätter) lösen sich einzeln oder locker zusammenhängend von der Unterlage ab. Ihre Oberflächen sind meist aufgeraut und absandend.

Aufblättern: Absonderung in mm- bis cm-dicke Lagen (Blätter, Platten) parallel zur Schichtung oder Schieferung.

Abbröckeln: Eigentlich Zerfall in kompakte, mehr oder weniger isometrische Gesteinstrümmer (Bröckchen), wie er an dichten Kalken verbreitet ist. Bei den untersuchten Sandsteinen fehlt diese Form des Abbröckelns. Hier entstehen meist schuppige und in sich gelockerte Bröckchen. Derartiges Abbröckeln geht in starkes Absanden über. Grössere (über 1 cm) und relativ kompakte Brocken können sich an vorspringenden Reliefstellen bilden.

Absanden: Zerfall des Gesteins in Einzelkörner oder stark gelockerte Kornaggregate. Die Gefügelockerung ist auf die äusserste Kornschicht beschränkt oder greift bis mehrere mm (im Extremfall cm) tief und geht damit in Auflockerung über. Durch verstärktes Absanden in Vertiefungen entstehen Aushöhlungen, was in Zellenverwitterung (Alveolisation, Tafonibildung) überleitet.

Auflockerung: Tiefgründiger Zusammenbruch des Gesteinsgefüges durch extreme Porenerweiterung und/oder ein feinmaschiges Netz von Rissen.

Kruste: Oberflächliche Anlagerung einer kompakten Schicht, deren Substanz vom darunterliegenden Gestein verschieden ist. Bei den untersuchten Krusten handelt es sich fast ausschliesslich um Gipskrusten, die in städtischer Umgebung durch eingelagerte Staubpartikel meist dunkel, in Naturaufschlüssen jedoch hell erscheinen. Die Bedeckung und Imprägnation der äussersten Gesteinsschicht mit Gips führt – bei Sandsteinen und anderen porösen Gesteinen – im allgemeinen zu deren Ablösung und der Zerstörung der Gesteinsoberfläche. – In Naturaufschlüssen treten neben Gipskrusten auch Epsomitkrusten auf.

Ausblühung: Lockere kristalline Aggregate leichtlöslicher Salze (inklusive Gips) auf der Gesteinsoberfläche (Effloreszenz) oder unmittelbar darunter (Subfloreszenz).

Verfärbung: Veränderungen des Farbtones, der Farbintensität oder des Glanzes (der dafür gebräuchliche Ausdruck „Patina“ wird nicht verwendet).

Mikrokarst: Durch chemische Gesteinsauflösung entstandene oberflächliche Vertiefungen im mm-Bereich analog zur Karstbildung. (Diese Form tritt nur bei Kalksteinen auf.)

Tabelle 9: Korrelation der eigenen Verwitterungsterminologie mit gebräuchlichen Begriffen (vereinfacht)

ASHURST & DIMES (1977) u.a.	PELLERIN (1978)	KIESLINGER (1932)	DE QUERVAIN (1945)	eigene Terminologie
Contour scale	Plaque	Innenkruste (Schale)	Schale	Schale
Exfoliation	Exfoliation (Croûte, Pellicule)		Zerbröckeln und Abblättern	Abblättern
Spalling	Effritement			Abbröckeln
Disintegration along bedding and cleavage planes	Délitage		Schicht- und schieferungsparalleles Abblättern	Aufblättern
Granular dis-aggregation	Décomposition sableuse (poudreuse)	Korrosion (Absanden)	Absanden	Absanden
Case hardening (Sulphate skin)	Croûte (Pellicule)	Aussenkruste (Zäpfchensinter)	Kruste	Kruste
Efflorescence (Subflorescence)	Efflorescence (Subflorescence)	Ausblühung	Ausblühung	Ausblühung
Mikrokarst			Chemische Gesteinsauflösung	Mikrokarst

4.3 Verwitterungsbereiche

4.3.1 Exposition

Der Begriff *Exposition* bedeutet im Zusammenhang mit Verwitterung die Ausgesetzttheit gegenüber den direkten und indirekten Witterungseinflüssen, nämlich

- Sonneneinstrahlung,
- Niederschlag (Regen, Schnee, Nebel, Tau, Kondensation),
- Wind,
- Immissionen,
- Sickerwasser und Grundfeuchte.

Nicht einbezogen sind „innere“ Einflüsse des Stein- oder Felsverbandes, wie Gesteins- und andere Materialeigenschaften. PAULY (1975b) unterscheidet in der Exposition eines Bauwerkteiles

- die Lage in Bezug auf Sonneneinstrahlung (astronomischer Faktor),
- die Lage in Bezug auf Regen und Wind (atmosphärische Störungen) sowie
- die Lage in Bezug auf Immissionen (Lokalklima und lokale Verschmutzungsquellen).

Das Zusammenwirken dieser Faktoren führt im Bereich der Steinoberfläche zu bestimmten Temperaturen, Befeuchtungs- und Austrocknungsverhältnissen, die unter dem Begriff Mikroklima zusammengefasst werden. Weil das expositionsbedingte Mikroklima vom (regionalen) Makroklima stark abweichen kann – es sei an die Analogie zwischen Verwitterung am Bauwerk und Wüstenverwitterung erinnert (KAISER, 1930) – ist die Exposition für den Verwitterungsprozess wesentlich. Auch wenn Teile der Exposition messbar sind, ist sie als Gesamtheit nicht quantitativ erfassbar. In dieser Arbeit wird sie mit einfachen Beobachtungen der normalen Bewitterungsverhältnisse sowie klar ersichtlicher Einflüsse der Umgebung rein qualitativ charakterisiert. Dazu gehören:

Benetzungsverhältnisse: Sie sind durch Art und Intensität (Menge, Dauer und Häufigkeit) der Wasserzufuhr definiert. Da sich beliebig viele Kombinationsmöglichkeiten ergeben, sind wir auf pauschale Sammelbegriffe angewiesen: beregnete oder regengeschützte Exposition, durch Sickerwasser lang- oder kurzzeitig, stark oder schwach benetzter Bereich, befeuchteter oder trockener Bereich. Die Begriffe „benetzt“ (nass) und „befeuchtet“ bezeichnen einen graduellen Unterschied der Wassersättigung (die nicht nur von der Wasserzufuhr, sondern auch von der Gesteinsporosität abhängt) und sind in ihrer qualitativen Bedeutung allgemein verständlich.

Austrocknungsverhältnisse: Sie hängen u.a. von der Luftzirkulation, -temperatur und -feuchtigkeit ab und sind beispielsweise als Sonnen- oder Windexposition wahrnehmbar. Die Austrocknungsverhältnisse werden hier meist relativ charakterisiert durch den Vergleich benachbarter Flächen, die rasch (stark) bzw. langsam (schwach) austrocknen.

Bei dieser Beschreibung fällt der Einfluss von Tagesschwankungen und extremen Wetterlagen (z.B. Gewitter) natürlich ausser Betracht. Sie erweist sich jedoch als genügend differenziert, um einzelne Bereiche mit unterschiedlichen Verwitterungserscheinungen klar zu trennen.

4.3.2 *Verwitterungsbereiche an Bauwerken und Naturaufschlüssen*

An jedem grösseren, stark gegliederten Bauwerk, wie auch an teilregengeschützten Felswänden lassen sich vier Grundtypen von Verwitterungsbereichen unterscheiden:

- 1) Beregnete Bereiche,
- 2) regengeschützte Bereiche,
- 3) Bereiche mit oberflächlichem Sickerwasser,
- 4) Bereiche mit durchsickerndem Wasser.

Entscheidend ist damit in erster Linie die Exposition eines Bereiches gegenüber den Einwirkungen des Wassers. Am Beispiel eines Gebäudes ist das Dach ein beregneteter Bereich (1), während die Dachuntersicht und daran angrenzende Teile regengeschützte Bereiche (2) sind. Bereiche mit oberflächlichem Sickerwasser (3) sind Stellen, an denen Wasser oberflächlich abfließt, wie etwa Sickerwasserstellen („Wasserschnäuze“) seitlich Fenstergesimsen oder Terrassen. Bereiche mit durchsickerndem Wasser (4) sind schliesslich jene Bauteile, wo Wasser vom Mauerinnern durch Kapillarwanderung an die Oberfläche gelangt. Hiezu gehört als weitaus wichtigster Spezialfall der Grundfeuchtebereich.

Diese Gliederung ist als stark vereinfachtes Schema zu verstehen, das in Wirklichkeit durch Zwischenstufen (z.B. zwischen beregneten und regengeschützten Bereichen) und Kombinationen in viele Spezialbereiche aufgefächert ist. Näheres dazu folgt in den Kapiteln 5 und 6.

5. Verwitterungserscheinungen an Bauwerken

5.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden besonders typische Verwitterungserscheinungen in ihrer spezifischen Umgebung an Bauwerken aus Granitischen Sandsteinen und Plattensandsteinen beschrieben. Weil die Zusammenhänge ebenso wichtig sind wie die Einzelphänomene, ist es sinnvoll, die Verwitterungsformen an den einzelnen Lokalitäten (vgl. Tabelle 5) nach Verwitterungsbereichen zusammenzufassen. Die Erscheinungen selbst werden hier kurz charakterisiert und in Kap. 7 ausführlich beschrieben. Der Hauptbahnhof Zürich wird als Modellfall studiert, wobei selbstverständlich ist, dass praktisch jedes Bauwerk aus den entsprechenden Sandsteinen in Zürich und benachbarten Städten analoge Verwitterungsformen aufweist. Am Beispiel der Hauptpost St. Gallen wird das Verhalten unterschiedlich witterungsbeständiger Varietäten des Granitischen Sandsteins in gleicher Exposition untersucht. Schliesslich werden an verschiedenen Objekten in Zürich ergänzende Verwitterungsbeispiele beschrieben.

5.2 Hauptbahnhof Zürich

5.2.1 Baugeschichte

Das architektonische Konzept stammt von Gottfried Semper, der endgültige Bau wurde in den Jahren 1865–1871 nach Plänen von Jakob Friedrich Wanner ausgeführt (Fig. 3 und 4). 1898–1901 und 1929–1931 wurden im Zusammenhang mit Umbauten die Fassaden teilweise umgestaltet und repariert; über die konkreten Massnahmen existieren jedoch nur spärliche Dokumente. Die jüngste Restaurierung von 1976–1980 folgte auf eine jahrzehntelange Periode zunehmender Vernachlässigung des Gebäudes. Sein Verwitterungszustand wurde vor den Restaurierungsarbeiten in Zusammenarbeit des Instituts für Denkmalpflege (ETH) mit dem Architekturbüro P. Bridel & H. Spirig (heute H. Spirig & T. Kask, Zürich) ausführlich dokumentiert (ARNOLD, 1978).

Die Fassaden sind grösstenteils aus Granitischem Sandstein (1) erbaut (vgl. Fig. 5). Er wurde angeblich in Aegeri gewonnen, die Herkunft aus zahlreichen Brüchen ist für eine derart grosse Baustelle jedoch wahrscheinlich. Als Sockelsteine wurden dichte Kalke von St. Triphon (2) verwendet. Gesimse und Fensterbänke sind aus Plattensandstein (3) von Rorschach (*Bausteinband*, S. 383). Der witterungsempfindliche Bernersandstein (4) ist heute nur noch unter dem Dachgesims der Aufnahmehalle und in einigen geschützten Fassadenbereichen der Seitentrakte vorhanden. (Im Bau von 1865/71 bestanden die zwei bahnseitigen Ecktürme aus Bernersandstein; sie wurden 1930 abgebrochen.) Für Akroterien über der S-Fassade wurden Kalke von Savonnières (5), für Baluster und einige Figuren Kunststeine (6) unbekanntes Alters verwendet. Während der früheren Restaurierungen sind an Gesimsen und anderen exponierten Stellen zahlreiche Aufmodellierungen (7) aus Zementmörtel angebracht worden, die auf damalige Schäden hinweisen. Der *Bausteinband* (S. 383 f.) bestätigt dies mit der Erwähnung starker Abwitterungen und besonders von Schalenbildungen an Gesimsen und berechneten Mauerflächen.

5.2.2 Verwitterungserscheinungen

Am Hauptbahnhof als einem Beispiel für reich gegliederte Fassadenarchitektur des 19. Jahrhunderts sind witterungsbedingte Schäden an den Fassaden entsprechend kompliziert verteilt. Dennoch lassen sich die typischen Verwitterungserscheinungen übersichtsmässig bestimmten Fassaden und Fassadenteilen zuordnen: Schalen treten gehäuft und flächenhaft an den „Wetterseiten“ des Gebäudes, d.h. den S- und W-Fassaden auf (in Zürich ist die Hauptwind- und -niederschlagsrichtung WSW). Sie sind zudem auf regenexponierten Flächen wie Gesimsen und freistehen-

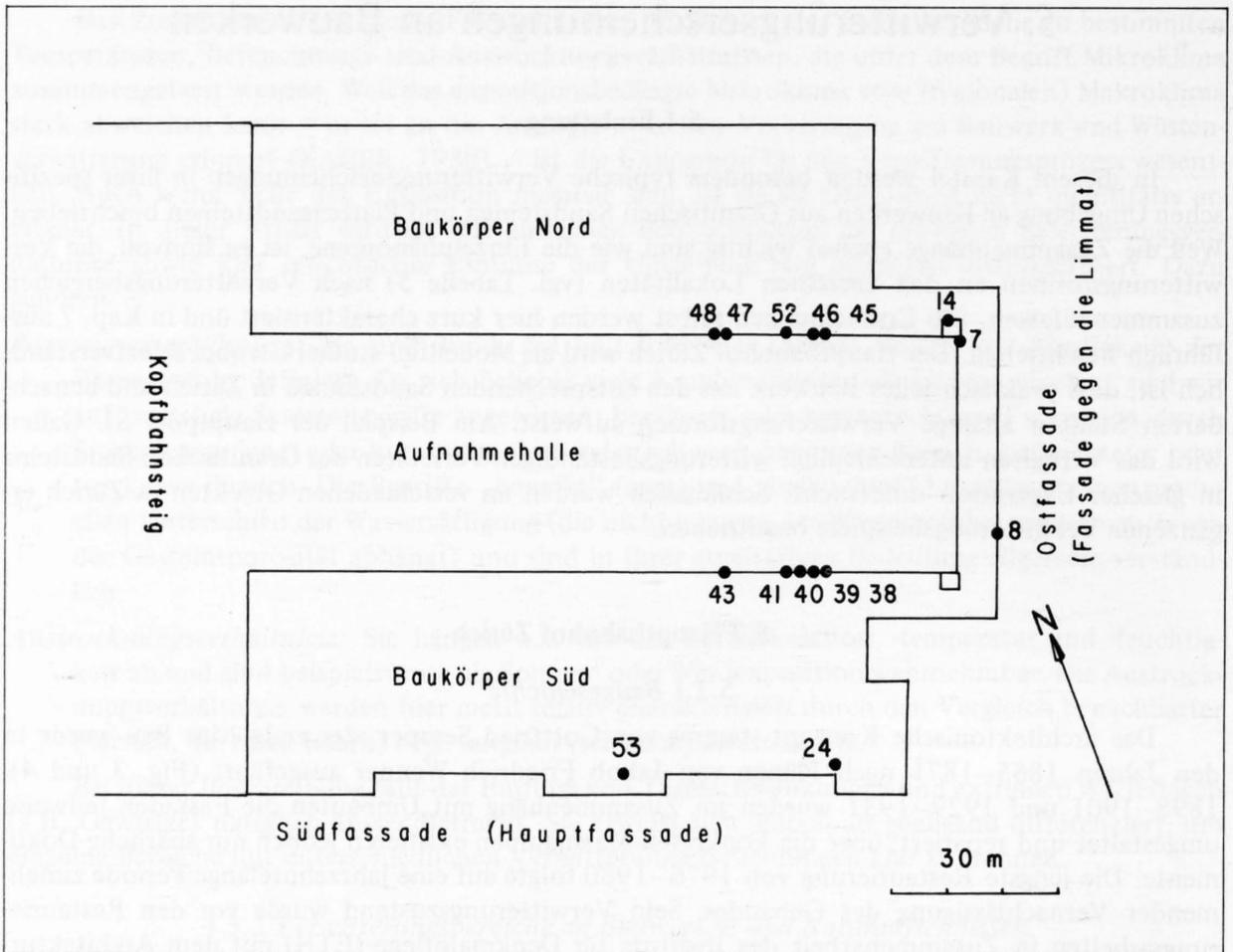


Fig. 3: Hauptbahnhof Zürich. Vereinfachter Grundriss mit Probenahmestellen (vgl. Fig. 4. Alle Proben in Granitischen Sandsteinen, Probenbezeichnung H 7 ff.)

den Gebäudeteilen aller Fassaden verbreitet. An den vorwiegend regengeschützten N-Fassaden, Teilen der E-Fassaden und Innenhof-Fassaden wird flächenhaftes Absanden kombiniert mit Krustenbildungen beobachtet. Diese Bauteile erscheinen durch abgelagerten Staub schmutzig bis dunkelgrau. Starke Krustenbildungen, verbunden mit Ausblühungen, starkem Absanden und Abbröckeln, sind auf Gesimsuntersichten der E-, S- und W-Fassaden, generell auf regengeschützte Bereiche mit durchsickerndem Wasser konzentriert. Wie bereits im *Bausteinband* (S. 384) und von ARNOLD (1978) betont wird, sind solche auf durchsickerndes Wasser zurückzuführende Schäden hier wie an zahlreichen Bauten des 19. Jahrhunderts sehr häufig, da konstruktiv „vorprogrammiert“: Statt die Wasserabläufe konsequent vom Bau wegzuleiten, wurden sie nämlich im Mauerinnern angelegt. Dort sind sie aber nicht kontrollierbar und verstopfte oder undichte Stellen schwer zu beheben.

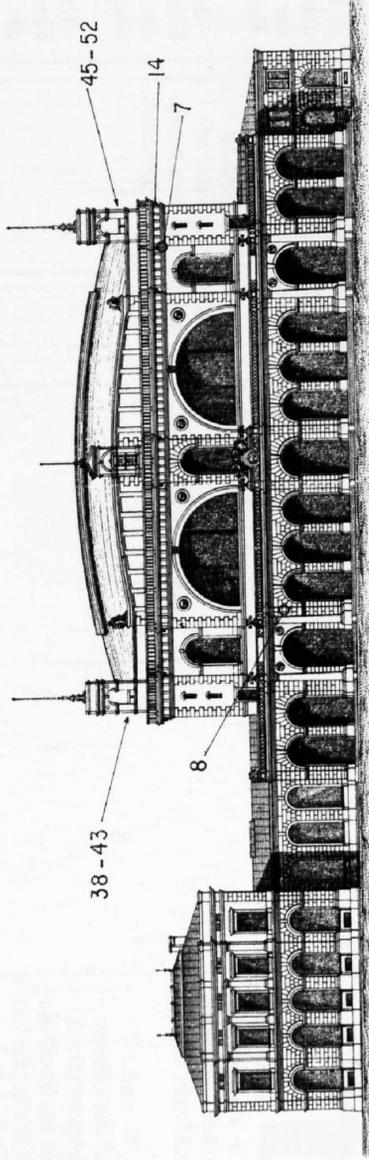
Die einzelnen Verwitterungsbereiche, ihre zugeordneten Erscheinungen und die Orte ihres Auftretens am Bauwerk sind in Tabelle 10 zusammengestellt und werden im folgenden Text erläutert. Sofern nichts anderes vermerkt wird, beziehen sich Beschreibungen auf Granitische Sandsteine.

Beregnete Bereiche

Während die Regenexposition z.B. eines Daches keiner Erklärung bedarf, ist sie an senkrechten Mauern schon komplexer. Die Übergänge zwischen stark beregneten und regengeschütz-

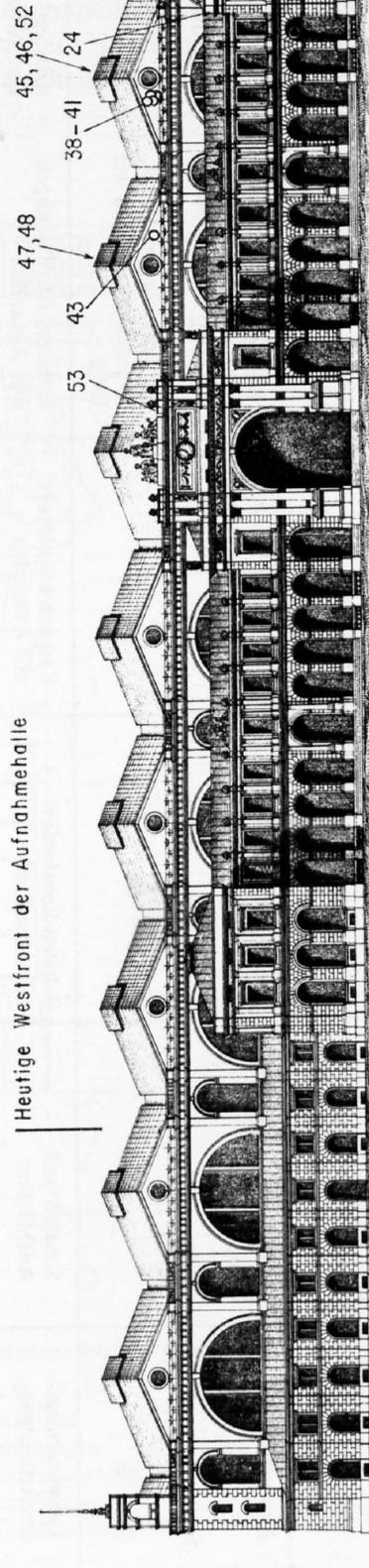
ZÜRICH.

Verwaltungsgebäude.



Façade gegen die Linmat (Ost)

Heutige Westfront der Aufnahmehalle



Hauptfassade. (Süd)

30 m

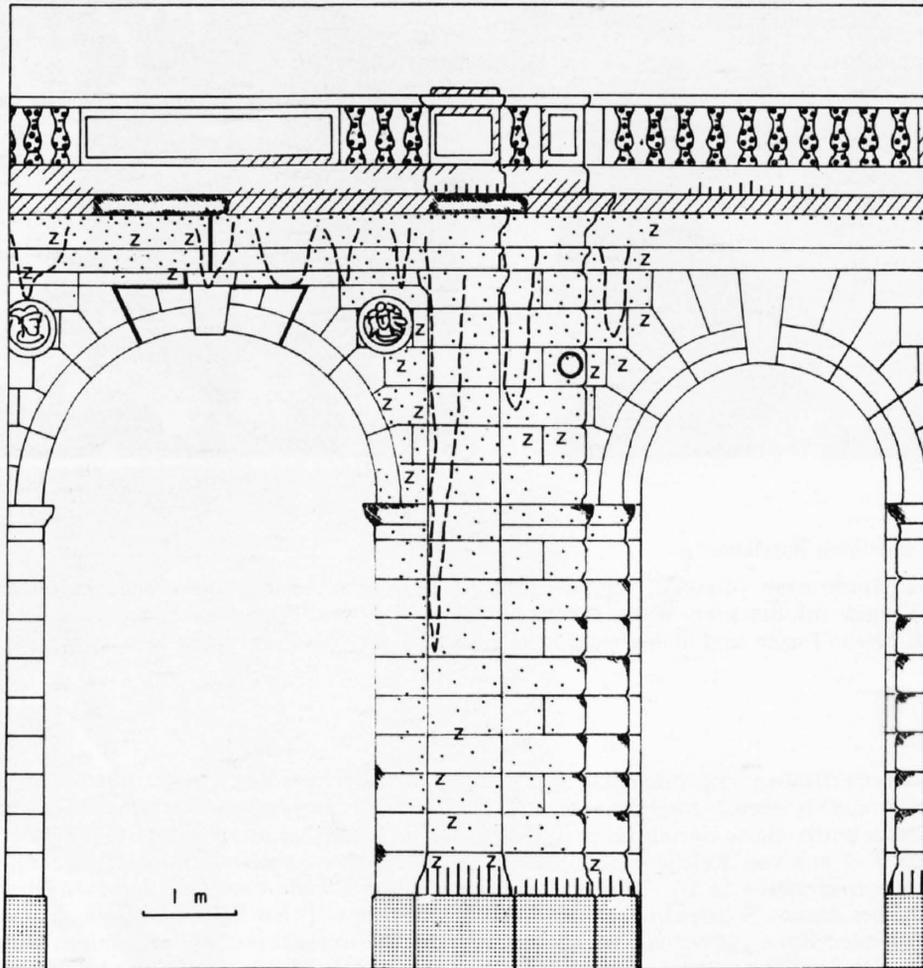
Tabelle 10: Verwitterungsbereiche am Hauptbahnhof Zürich

	Beregnete Bereiche		Regengeschützte Bereiche	Bereiche mit oberflächlichem Sickerwasser	Bereiche mit durchsickerndem Wasser
	a) stark beregnete Bereiche	b) schwach beregnete Bereiche			
<i>Exposition</i>	dem direkten Regen ausgesetzt.	dem Sprüh- und Nieselregen ausgesetzt.	bleiben bei Normalregen relativ trocken.	durch oberflächlich abfließendes Wasser (Wasserläufe) benetzt oder befeuchtet. In beregneten Bereichen wie dort, in regengeschützten wie folgt.	infolge durchsickerndem Wasser langfristig stark durchfeuchtet.
<i>Verwitterungserscheinungen</i>	Schalen und Aufblättern	Schalen kombiniert mit Absanden	Krusten kombiniert mit Absanden	Krusten, Ausblühungen und Absanden	Krusten, Ausblühungen, Absanden, Abbröckeln und Aufblättern
<i>Stellen am Bauwerk</i>	<ul style="list-style-type: none"> - aufgehendes Mauerwerk der S- und W-Fassaden Baukörper Süd, - oberste Fassadenteile der E-, S- und W-Fassaden Aufnahmehalle und Baukörper Süd, - E-, S-, W- und z.T. N-Seiten der oberen Turmbereiche, Dachbalustraden, Dachfiguren und ähnlichen Gebäudeteilen, - Gurtgesimse, Fensterbrüstungen und -verdachungen, Pfeilerbasen, etc. auf E-, S- und W-Fassaden. 	<ul style="list-style-type: none"> - oberste Teile der N-Fassade Aufnahmehalle, - untere Teile der S-Fassade Aufnahmehalle. 	<ul style="list-style-type: none"> - N- und E-Fassaden Baukörper Nord, - untere Teile der N- und E-Fassaden Aufnahmehalle und Baukörper Süd, - Innenhof-Fassaden. 	<ul style="list-style-type: none"> - zahlreiche Sickerwasserstellen unter Gurtgesimsen, Dachgesimsen und Balustraden aller Fassaden, - Wasserläufe entlang vertikaler Kanten, besonders zwischen beregneten und regengeschützten Flächen. 	<ul style="list-style-type: none"> - Untersichten der Gurt- und Dachgesimse an E-, S- und W-Fassaden sowie Untersichten der Dachbalustrade Aufnahmehalle, - Bereiche unmittelbar über dem Gurtgesims der E-, S- und W-Fassaden Baukörper Süd, - Untersichten der Fensterverdachungen der E-, S- und W-Fassaden Baukörper Süd, - Mauerflächen vor undichten Wasserabläufen im Innern, speziell im Arkadengeschoss der E-Fassade.

ten Bereichen können hier fließend sein, was sich in der Ausbildung der Verwitterungserscheinungen klar äußert. Mit einer zweckmäßigen Vereinfachung muss deshalb zwischen direkt oder stark bzw. schwach beregneten Bereichen unterschieden werden.

a) *Stark beregnete Bereiche*

Ausgeprägt regenexponierte Bereiche sind häufig stärker sonnenexponiert (S- und W-Seiten!) und zugleich stärker windexponiert als ihre Umgebung, weshalb sie nach einer Benetzung oberflächlich rasch austrocknen. Die typischen Verwitterungserscheinungen sind *Schalen* und *Aufblättern*.

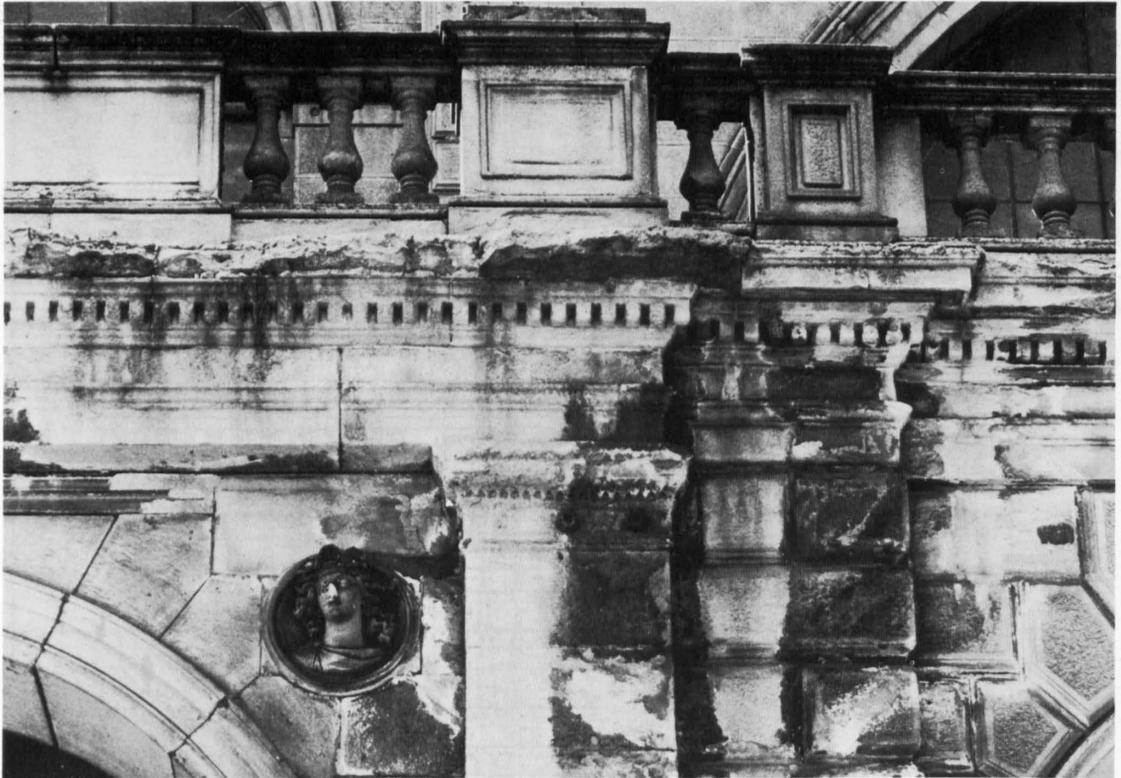


	1		8		12
	2		9		13
	6		10		14
	7		11		

Fig. 5: Hauptbahnhof, Ausschnitt aus dem Arkadengeschoss der E-Fassade.

a) Skizze nach Schadendokumentation (ARNOLD, 1978):

- | | |
|------------------------------|---------------------------|
| 1) Granitischer Sandstein | 10) Gipskrusten |
| 2) Kalkstein von St. Triphon | 11) Ausblühungen |
| 6) Kunststein | 12) Sickerwasserstelle |
| 7) Aufmodellierung | 13) Setzungsrisse |
| 8) Schalen | 14) Probenahmestelle H 8. |
| 9) Abbröckeln | |



b) Ansicht des mittleren Bereiches:

Flächenhafte Gipskrusten (dunkel), randlich von Natriumsulfat-Ausblühungen bedeckt (weiss, z.B. rechts Frauenkopf), sind auf defekten Wasserablauf im Pfeilerinnern zurückzuführen. Sickerwasserstellen (Wasser dringt durch offene Fugen und über abgebrochene Kanten der Gesimse) bilden helle (gewaschene) Striemen.

Schalen:

Die Schalenoberflächen sind bräunlich bis rostbraun, in extremen Wetterexpositionen (Brüstungen, Dachfiguren u.ä.) gelbbraun bis intensiv rostbraun verfärbt. Im Vergleich mit frischen Bruchflächen erscheinen Schalenoberflächen stärker porös. Harte Gerölle (Granit, Quarz) stehen gegenüber den übrigen Steinoberflächen 1–2 mm, über Kanten um 3–4 mm vor. Weiche Einschlüsse (Mergelgerölle) sind als Vertiefungen ausgehöhlt. Die Lockerzone bildet sich normalerweise in 10–20 mm, seltener in 1–3 mm Tiefe hinter der intakten Oberfläche. Sie besteht aus einem (bei dünnen Schalen) oder mehreren oberflächenparallelen Rissen, die sich zu einer bröckelnden bis sandig zerfallenden Zone ausweiten. Die Rissflächen sind oft von weissen, punktförmigen Gipsausblühungen besetzt. Mittlere Schalendicken sind 1–1.5 cm (im aufgehenden Mauerwerk, Fig. 7); hinter vorspringenden Kanten wachsen sie gegen 3–4 cm an (Fig. 6). An extrem wetterausgesetzten Bauteilen zeigen obere und N-exponierte Flächen 1–3 mm dicke Schalen (Fig. 8). An Oberseiten liegen sie z.T. mehrfach übereinander, was in ein spezielles Abblättern übergeht.

Einzelne Flächen in stark regenexponierten Bereichen sind mit einem *Farbanstrich* bedeckt (z.B. SW-Ecke oberhalb Dachgesimses Baukörper Süd). Hier werden nur 1–2 mm dicke Schalen (aus der Farbschicht und anhaftendem Gesteinsmaterial) beobachtet, während sie in analogen Expositionen an ungestrichenen Flächen (die bei Regen mehr Wasser aufnehmen und es beim Austrocknen rascher abgeben) 1–2 cm dick sind.

Im homogenen Mauerwerk liegen unregelmässig verteilt *intakte* Quader neben solchen mit Schalen. An gut zugänglichen Stellen (S-Fassade Aufnahmehalle oberhalb Dachbalustrade) sind etwa 50% aller Quader teilweise bis vollständig mit Zementmörtel überzogen. Sie weisen auf entsprechende Schalenbildungen zu einem früheren Zeitpunkt hin.

Aufblättern:

Gesimse aus Plattensandstein blättern von den Stirnseiten her und parallel zu glimmerreicheren Lagen in cm- bis mm-dicke Schichten auf (vgl. Fig. 23). Bei Granitischen Sandsteinen sind Aufblätterungen sehr vereinzelt und undeutlich, da entsprechende Feinschichtungen im allgemeinen fehlen.

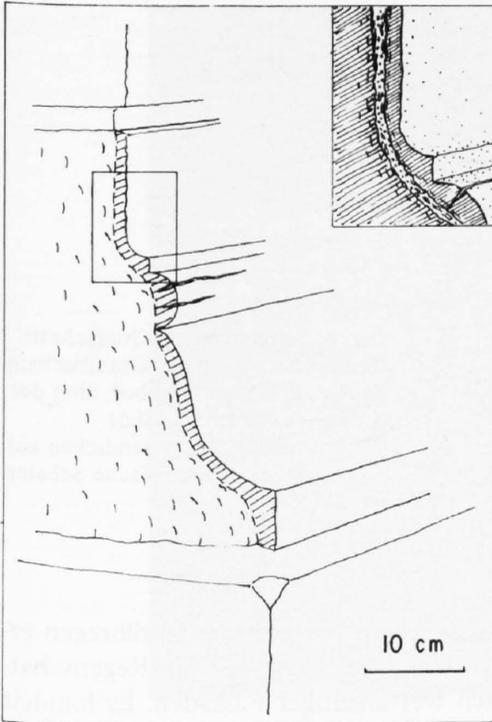


Fig. 6: Detail aus Fig. 5 a.
Pfeilerbasis aus Granitischem
Sandstein mit Schale (schematisch).

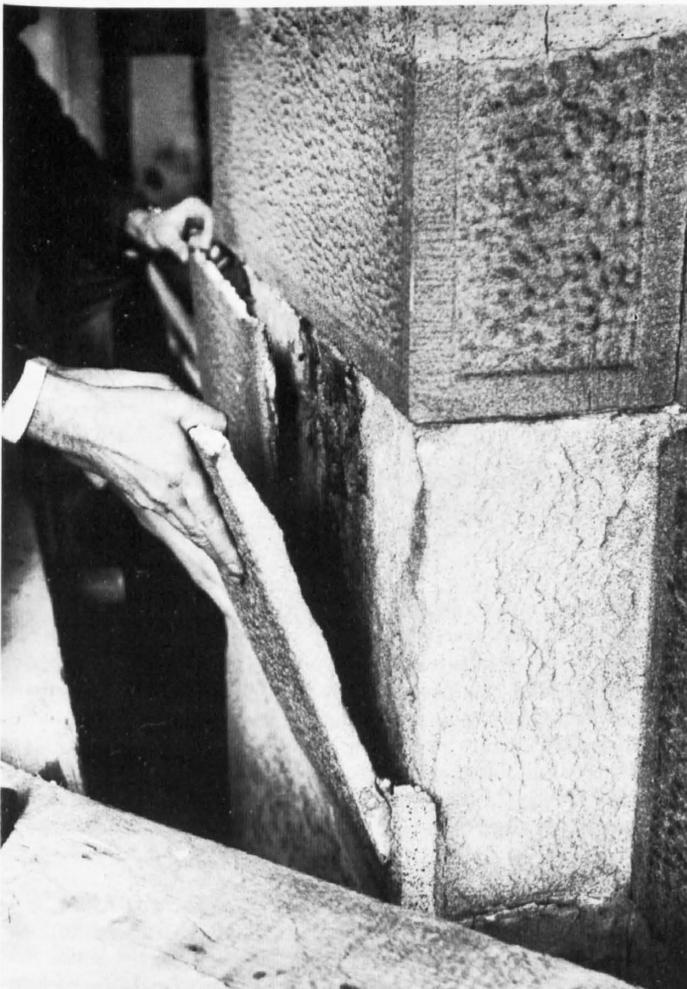


Fig. 7: Schalen im Granitischen
Sandstein (Hauptbahnhof, W-Seite
des SE-Turmes).

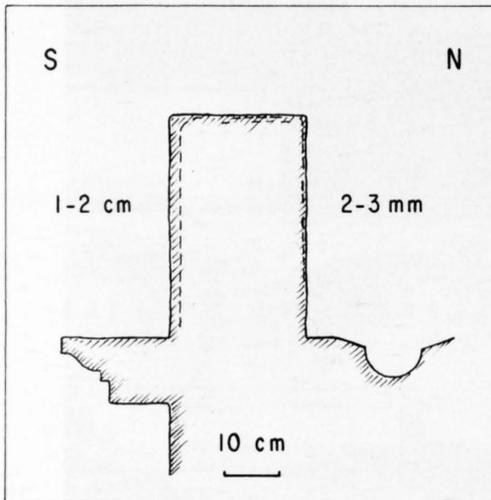


Fig. 8: Schematischer Querschnitt durch Läuferstein aus Granitischem Sandstein (Hauptbahnhof, über der S-Fassade Baukörper Süd). Unterschiedliche Schalendicken auf N- und S-Seiten, mehrfache Schalen auf Oberseite.

b) Schwach berechnete Bereiche

Diese Zonen werden bei normalen bis starken Regenfällen von Niesel- oder Sprühregen erreicht und damit viel schwächer benetzt als direkt regengetroffene. Sie liegen z.B. im Regenschatten unterhalb von Dachkanten oder im bodennahen Bereich wetterseitiger Fassaden. Es handelt sich um einen nicht scharf abgrenzbaren Zwischenbereich zwischen direkt berechneten und regengeschützten Bereichen. Die typischen Verwitterungsformen sind *Kombinationen von Schalen und Absanden*, die in Abbröckeln übergehen.

Schalen kombiniert mit Absanden:

An Quaderflächen sanden nur die Vertiefungen der Bearbeitung ab. Höcker bleiben dagegen oberflächlich intakt und sind rostbraun verfärbt wie in berechneten Bereichen. Sie bröckeln als ca. 3 mm dicke, im Querschnitt linsenförmige "Schalen" ab (Fig. 9 und 10). Die darunterliegenden Rissflächen sind von weissen Gipspunkten besetzt.

Im gleichen Bereich sind einzelne Quader viel stärker angegriffen. Ihre bis 1 cm zurückgewitterte Oberfläche *sandet stark ab*. Sie ist von feinsten (z.T. mikroskopischen) *Gipsausblühungen* bedeckt. An einer gut zugänglichen Stelle (N-Fassade Aufnahmehalle oberhalb Dachbalustrade) sind ca. 35% aller Quader teilweise oder vollständig mit Zementmörtel überzogen, was auf entsprechende frühere Abwitterungen schliessen lässt. Unmittelbar daneben finden sich auch *intakte* Quader, die, abgesehen von der oberflächlich braunen Verfärbung, keine Verwitterungserscheinungen aufweisen. Die Übergänge zwischen unterschiedlichen Verwitterungsgraden sind fließend.

Regengeschützte Bereiche

Die der Wetterseite abgewandten oder durch Bauteile regengeschützten Fassadenflächen bleiben bei normalen Regenverhältnissen trocken. Hier bilden sich

Krusten kombiniert mit Absanden:

Das Mauerwerk ist flächenhaft von dünnen (unter 1 mm) Gipskrusten bedeckt. An windexponierten Gebäudeteilen (z.B. N-Fassade Baukörper Nord) sind sie dunkelgrau und etwas dicker als an windgeschützten (z.B. Innenhof-Fassaden), wo sie hellgrau sind. Die Krusten sitzen fest in Vertiefungen der Bearbeitung und beginnen sich an Höckern, Kanten und vorspringenden Profiltteilen blasenartig zu lösen (Fig. 11). Unter abgelösten Krusten sandet die Gesteinsoberfläche ab, wobei sie durch feinste Gipsausblühungen weisslich erscheint.

Neben dieser Verwitterungsform finden sich in unregelmässiger Verteilung an den Fassaden gleichmässig *stark absandende Quader* – wegen der fehlenden Gipskruste und einem sehr diffusen *Überzug von Gipsausblühungen* erscheinen sie im Mauerverband heller als ihre unmittelbare Umgebung – und *intakte* Quader, die gleichmässig von festsitzenden Krusten überzogen sind. Die drei Verwitterungsformen gehen ineinander über.

Bereiche mit oberflächlichem Sickerwasser

Viele Bauteile werden durch oberflächlich abfließendes Regenwasser benetzt. Häufig wird das Wasser auf Gesimsen gestaut (verstopfte Abläufe!), von wo es durch offene Fugen und über abge-



Fig. 9: Quader (Granitischer Sandstein) mit absandenden Vertiefungen und als "Schalen" abfallenden Höckern der Bearbeitung. Kanten im Bereich der (harten) Zementfugen abgesplittert. Bildbreite 1 m. (Hauptbahnhof, N-Fassade der Aufnahmehalle oberhalb Dachbalustrade).

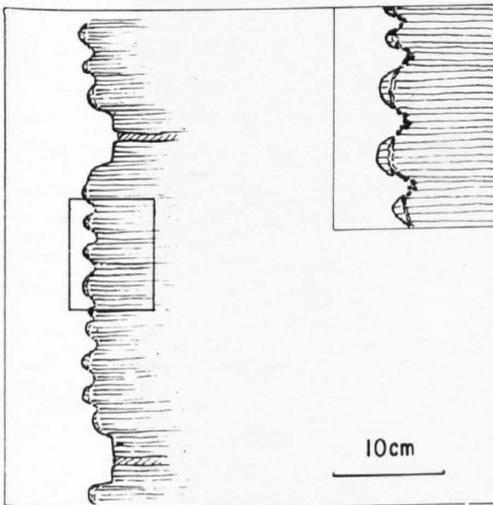


Fig. 10: Absanden in Vertiefungen kombiniert mit "Schalen" an Höckern der Bearbeitung (schematischer Quaderquerschnitt).

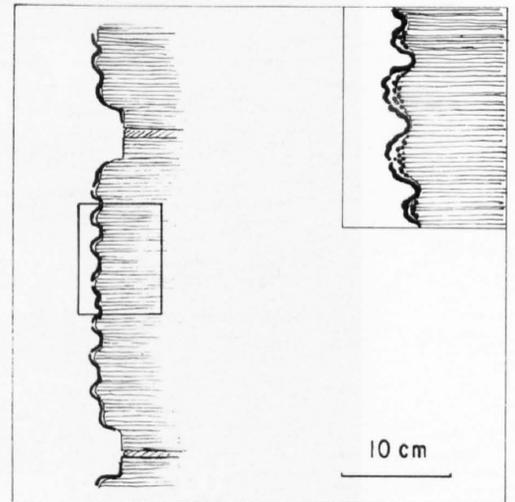


Fig. 11: Flächenhafte Gipskrusten lösen sich an Höckern der Bearbeitung, darunter Absanden (schematischer Quaderquerschnitt).

brochene Kanten auf die darunterliegende Mauer gelangt (vgl. Fig. 5). An regenexponierten und damit gleichmässig benetzten Flächen bilden Sickerwasserstellen keinen gesonderten Verwitterungsbereich. In regengeschützten Bereichen sind sie jedoch markant von *Krusten*, *Ausblühungen* und *Absanden* begleitet, wobei von innen nach aussen folgende Zonen unterschieden werden (Fig. 12):

- 1) *Überspülte Zone*: Die zentral intakte Oberfläche beginnt nach aussen leicht abzusanden und wechselt an der (mittleren) Benetzungsgrenze abrupt zu
- 2) *Gipskrusten*: Sie sind am inneren Rand dick (über 1 mm) und z.T. stark aufgewölbt (vgl. Fig. 58), gegen aussen werden sie dünner und sitzen fest auf der Unterlage. Übergang in
- 3) *Starkes Absanden* kombiniert mit *Natriumsulfat-Ausblühungen*: Die Zone ist mehrere mm bis 1 cm zurückgewittert. Ausblühungen (in Form von Mirabilit oder Thenardit, oft beide nebeneinander) erscheinen periodisch in Säumen und Flecken (Fig. 5). Gegen aussen geht die Zone in den allgemein regengeschützten Bereich mit flächenhaften Gipskrusten und schwachem Absanden über.

Die Zonen 1 – 3 können je nach Grösse der Sickerwasserstelle zusammen wenige cm bis über 1 m breit sein. Häufig abweichende Zonierungen sind: 1 – 3 – 2 – 3 (breite Sickerwasserstellen), 1 – 2 oder 1 – 3 (schmale Sickerwasserstellen). Da die abfliessende Wassermenge je nach Witterung (Regenstärke und -dauer, Schneeschmelze, etc.) stark variieren kann, entspricht die beobachtete Breite einer Sickerwasserstelle wahrscheinlich der mittleren Benetzung. Vom Normalfall abweichende Zonierungen ergeben sich vermutlich durch periodisch ändernde Benetzungsverhältnisse.



Fig. 12: Oberflächliche Sickerwasserstelle in regengeschütztem Bereich (E-Fassade des Hauptbahnhofes). Überspülte Zone (rechts) nach aussen (links) übergehend in krustenbedeckte (dunkel) und stark absandende (hell) Zone mit Ausblühungen. Skala 1 m.

Bereiche mit durchsickerndem Wasser

Von innen durchfeuchtete Bauteile finden sich am Hauptbahnhof um stagnierendes Wasser (Gesimse) und vor undichten Wasserabläufen im Mauerinnern. Der im allgemeinen vorherrschende Grundfeuchtebereich fehlt hier. Die typischen Verwitterungserscheinungen sind

Krusten, Ausblühungen, Absanden und Abbröckeln:

Im regengeschützten Bereich unter Gesimsen und Balustraden, auf denen Wasser stagniert, bilden sich bis mehrere mm dicke *Gipskrusten* (Fig. 13). An Stellen, die oberflächlich stark austrocknen (z.B. sonnenexponierte S-Seiten), *bröckeln* Kanten und vorspringende Relieftteile ab (Fig. 14). Der Stein ist lokal bis mehrere cm tief aufgelockert. Um aufmodellerte Ecken und Kanten aus Zementmörtel (frühere Restaurierungen!) bilden sich Höfe von *Natriumsulfat-Ausblühungen*. Gegen unten gehen die Krusten entweder in

- a) *starkes Absanden* kombiniert mit Ausblühungen (bei starker Durchfeuchtung des oberen Bereiches, analog Zone 3 seitlich oberflächlicher Sickerwasserstellen), in
- b) *flächenhafte Gipskrusten* kombiniert mit Absanden (allgemein regengeschützter Bereich) oder in
- c) *Schalen* (beregneten Bereich) über.

Unmittelbar über den Gesimsen ist das Mauerwerk 10 – 20 cm hoch bis mehrere cm zurückgewittert und zerbröckelnd (Fig. 15, 16). Zahlreiche Zementmörtelflicke belegen, dass die starken Schäden dieser Zone mehrfach überholt worden sind (gute Zugänglichkeit von Fenstern und Terrassen aus!). Darüber bilden sich je nach Exposition die Übergänge a), b) und c) analog zum unteren Grenzbereich der Durchfeuchtung.

Auch an regenexponierten Gesimsen, Fensterverdachungen, etc., auf denen kein Wasser stagniert, sind die Unterseiten von dicken Krusten bedeckt, während die Oberseiten Schalen bilden (Fig. 17; zumindest bei schwach porösen Gesteinen gehört diese Erscheinung in den Bereich mit oberflächlichem Sickerwasser).

Verstopfte bzw. undichte Wasserabläufe im Mauerinnern verursachen an der Maueroberfläche in regengeschützten Bereichen flächenhaft dicke Gipskrusten kombiniert mit Natriumsulfat-Ausblühungen und starkem Absanden (Fig. 5).

Aufblättern:

Gesimse aus Plattensandstein zeigen in stark durchfeuchteten Bereichen (wie auch in stark beregneten Bereichen) besonders intensive Aufblättern. Die meisten dieser Gesimse wurden bei früheren Restaurierungen mit Zementmörtel aufmodelliert oder durch Granitische Sandsteine ersetzt. An vielen Stellen sind Ecken und Kanten bereits wieder abgefallen oder stark gelockert.



Fig. 13: Dicke, mehrfache Gipskrusten am NE-Turm, Hauptbahnhof (Probe H 14). Bildbreite 50 cm.



Fig. 14: Ornamente von flächenhaften Gipskrusten bedeckt, wobei vorspringende Teile abbröckeln (Granitischer Sandstein). Hauptbahnhof, unterhalb Dachgesims S-Fassade Baukörper Süd.



Fig. 15: Hauptbahnhof, Ausschnitt aus der S-Fassade. Fensterbrüstung über Gurtgesims, auf dem Wasser stagniert, stark abbröckelnd und schalenbildend (Granitischer Sandstein).

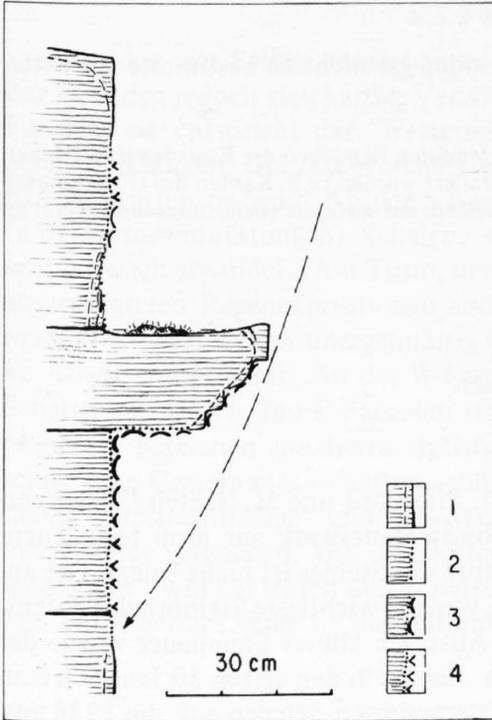


Fig. 16: Querschnitt durch Gurtgesims, auf dem Wasser stagniert (schematisch, vgl. Fig. 15). Starke Abwitterungen an oberhalb angrenzender senkrechter Fläche und an Gesimsuntersicht.
 1) Schalen und Abbröckeln
 2) Absanden
 3) Gipskrusten
 4) Ausblühungen
 Pfeil: Berechnungsgrenze.



Fig. 17: Fensterverdachung mit Schale an Profilober- und Stirnseite und Gipskrusten an Profilunterseite (Granitischer Sandstein). Hauptbahnhof, W-Fassade, W-Flügel Baukörper Süd.

Sonstige Verwitterungserscheinungen und Risse

Einige häufige Bauschäden sind erst in zweiter Linie oder gar nicht an bestimmte Verwitterungsbereiche gebunden:

Risse um rostendes Eisen entstanden in allen beregneten oder feuchten Bereichen der Fassaden und Dächer. Sie sind sehr verbreitet bei Aufmodellierungen, die mit Eisendraht armiert wurden (z.B. Kanten der Gurtgesimse).

Risse im Steinverband sind unabhängig von Exposition und Gestein auf statische (belastungs- und setzungsbedingte) Spannungen zurückzuführen (vgl. Fig. 5).

5.3 Hauptpost St. Gallen

5.3.1 Baugeschichte

Die Hauptpost wurde 1912-1913 nach Plänen von O. Pflughard und M. Haefeli (Zürich) erbaut. Einer tragenden Stahlbetonkonstruktion ist ein Bossen-Mauerwerk aus grob behauenen, Granitischen Sandsteinen vorgeblendet. Die genaue Herkunft des Steines ist nicht belegt. Der angebliche Gewinnungsort Teufen (AR) ist unwahrscheinlich, weil der wichtigste Steinbruch Teufens, die Lochmühle, zur Bauzeit ausser Betrieb stand. Nach Aussagen älterer Steinhauer wurde der Sandstein in mehreren Brüchen der Ostschweiz gewonnen. Bereits in den ersten 30 Jahren traten an der W-Fassade, der W-Seite des Turmes sowie auf Fenstergesimsen Schalen auf, die 1938 und 1947 aus Sicherheitsgründen teilweise abgeschlagen wurden. Vermutlich 1938 wurden einzelne stark beschädigte Stellen mit Kunststein aufmodelliert. Reparaturen von 1971/72 beschränkten sich auf die Reinigung und Überarbeitung von Ornamenten und Figuren. Bei der seit 1979 laufenden Restaurierung werden alle Fassaden instandgesetzt.

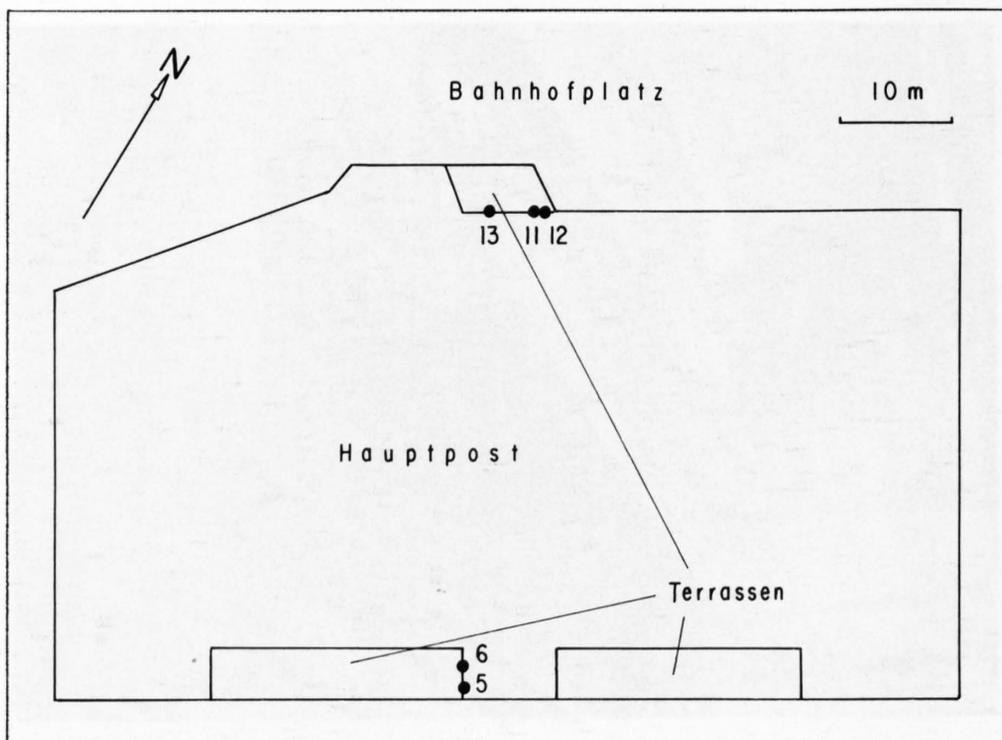


Fig. 18: Hauptpost St. Gallen. Grundriss mit Probenahmestellen (Probenzeichnung Q 5 ff.).

5.3.2 Verwitterungserscheinungen

An den vier Seiten des Gebäudes (Fig. 18) sind von weitem deutlich verschiedene, innerhalb der Fassaden jedoch gleichartige Verwitterungsformen erkennbar: Die W-Fassade (eigentlich WSW-Fassade, sie entspricht der "Wetterseite" des Gebäudes) ist regengewaschen und zeigt massive Schalenbildungen. Die regengeschützten N- und E-Fassaden sind schmutziggrau und von flächenhaften Krusten bedeckt. An der S-Fassade bilden sich in vorgelagerten und beregneten Bauteilen (z.B. Terrassenbrüstungen) Schalen, während das aufgehende und regengeschützte Mauerwerk sehr schwach absandet. (Am Turm, der hier nicht berücksichtigt wird, sind die Verhältnisse wegen ausgeprägteren Regenexpositionen anders.) – Innerhalb dieses von der generellen Exposition geprägten Musters weisen unregelmäßig verteilte helle Quader an W-, N- und E-Fassaden relativ starke Abwitterungen auf: An der W-Fassade sind es Quader mit abgefallenen oder abgeschlagenen Schalen, an den N- und E-Fassaden stark absandende Quader (Fig. 19). Da sie in gleichmäßig exponierten Bereichen annähernd statistisch verteilt sind, lässt ihre stärkere Verwitterung auf unterschiedliche Gesteinseigenschaften schließen. Um diesen Zusammenhang abzuklären, werden "anfällige", "mittelanfällige" und "resistente" Quader innerhalb gleich exponierter Fassadenbereiche miteinander verglichen. Die drei Kategorien entsprechen einer Vereinfachung der Wirklichkeit, indem alle Zwischenstufen der Verwitterungsintensität vorkommen (vgl. Quaderschattierungen in Fig. 19). Überdies kann die Beschaffenheit auch im gleichen Quader variieren.



Fig. 19: Ausschnitt aus der N-Fassade der Hauptpost: helle, stark absandende Quader sind unregelmäßig in der generell dunklen, krustenbedeckten Mauerfläche verteilt.

Beregnete Bereiche

Die W-Fassade sowie W-exponierte Teile der S-Fassade (Proben Q5 und Q6 in Fig. 18) sind direktem Regen ausgesetzt. Hier bilden sich *Schalen* in unterschiedlicher Ausprägung.

"Anfällige" Quader – Schalen:

Die Schalenoberflächen sind intakt, d.h. der Bossenschlag ist scharfkantig erhalten. Die oberflächlich rostbraune Verfärbung ist an vorspringenden Höckern intensiver als in Vertiefungen. Hinter abgefallenen (abgeschlagenen) Schalen ist die helle Gesteinsoberfläche abbröckelnd bis stark sandend. Schalendicken variieren im gleichen Quader um wenige mm bis über 1 cm, indem die Lockerzone hinter der Bossenkontur relativ eben verläuft (Fig. 20a). Bei dünneren Schalen lösen sich Höcker als einzelne Schollen, während Vertiefungen stark absanden (Fig. 20b).

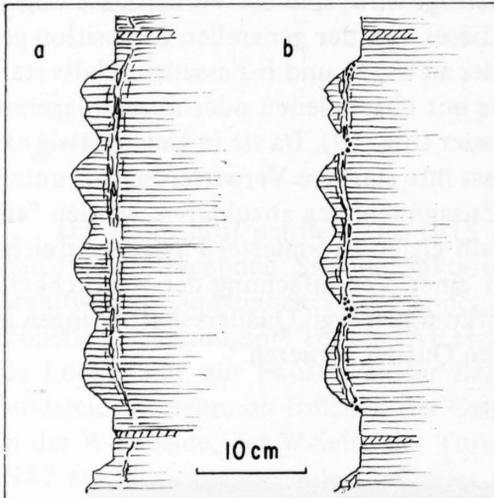


Fig. 20: Schalenquerschnitte durch grob behauene Quader (schematisch); a) dicke und durchgehende Schale, b) dünne, schollenförmige Schalen.

"Mittelanfällige" Quader – Partielle Schalen:

Die Oberflächenbeschaffenheit ist wie bei "anfälligen" Quadern, es haben sich jedoch nur ansatzweise Schalen gebildet.

"Resistente" Quader – Keine Schalen:

Abgesehen von der oberflächlich rostbraunen Verfärbung zeigen diese Quader keine Verwitterungserscheinungen.

Regengeschützte Bereiche

Die N- und E-Fassaden bleiben bei normalen Regenverhältnissen trocken. An diesen Flächen werden *Krusten kombiniert mit Absanden* beobachtet.

"Anfällige" Quader – Absanden:

Die Oberfläche sandet gleichmässig und stark ab, wobei sich vorspringende Ecken und Kanten abrunden. Das absandende Material ist von weissen, sandkorngrossen Gipsaggregaten durchsetzt, was der Quaderfläche einen hellen Anflug verleiht. Vertiefungen sind z.T. von sehr dünnen (um 0.1 mm), braungrauen Gipskrusten bedeckt, die in feinen Flocken abfallen.

"Mittelanfällige" Quader – Krusten kombiniert mit Absanden:

Die Vertiefungen sind von festsitzenden, braun- bis schwarzgrauen Gipskrusten bedeckt. An vorspringenden Ecken und Kanten beginnen sie sich zu lösen und als ca. 1 mm dicke Krusten abzufallen (vgl. Fig. 11). Die darunterliegende Gesteinsoberfläche ist von feinsten Gipsausblühungen bedeckt und sandet ab. Wegen der hellen Höcker und dunklen Vertiefungen erscheint die Quaderoberfläche aus Distanz gesprenkelt.

"Resistente" Quader – Krusten:

Die Oberflächen sind von gleichmässig festsitzenden schwarzgrauen Gipskrusten überzogen.

5.4 Ergänzende Beobachtungen an verschiedenen Objekten

Aus zahlreichen, meist kleineren Untersuchungen im Gebiet der Stadt Zürich werden einige typische Verwitterungsbeispiele herausgegriffen, die am Hauptbahnhof und der Hauptpost weniger deutlich oder unter anderen Bedingungen (der Exposition oder des Materials) auftraten, sowie Erscheinungen, die an genannten Objekten nicht vorkamen. Im einzelnen werden

- *wechselnde Schalendicken* am Granitischen Sandstein (Lokalitäten Schienhutgasse und Konservatorium),
- *Verwitterungen am Plattensandstein* (Quellenstrasse und Leonhardshalde),
- *Verwitterung im Grundfeuchtebereich* (Bürgerasyl) und
- *Verwitterungen an pyritreichen Quadern* (Archäologisches Institut und Auf der Mauer)

beschrieben (genaue Ortsangaben s. Tabelle 5). Es versteht sich von selbst, dass die angeführten Bauwerke in diesem Rahmen nicht systematisch behandelt werden können.

5.4.1 Wechselnde Schalendicken

An der *Schienhutgasse* ist die freistehende Mauer aus Granitischem Sandstein teilweise regenexponiert und sickerwasserbenetzt (Fig. 21). An den stark beregneten Pfosten und horizontalen Gesimsflächen bildeten sich 1 – 2 cm dicke Schalen. Sie dünnen an der südseitigen Mauerfläche gegen unten allmählich aus und gehen im Bereich der Benetzungsgrenze in graue Gipskrusten und Absanden über.

Das Beispiel veranschaulicht den Übergang von beregneten zu regengeschützten Bauteilen, der sich beim Granitischen Sandstein in einer ausdünnenden Schale äussert.

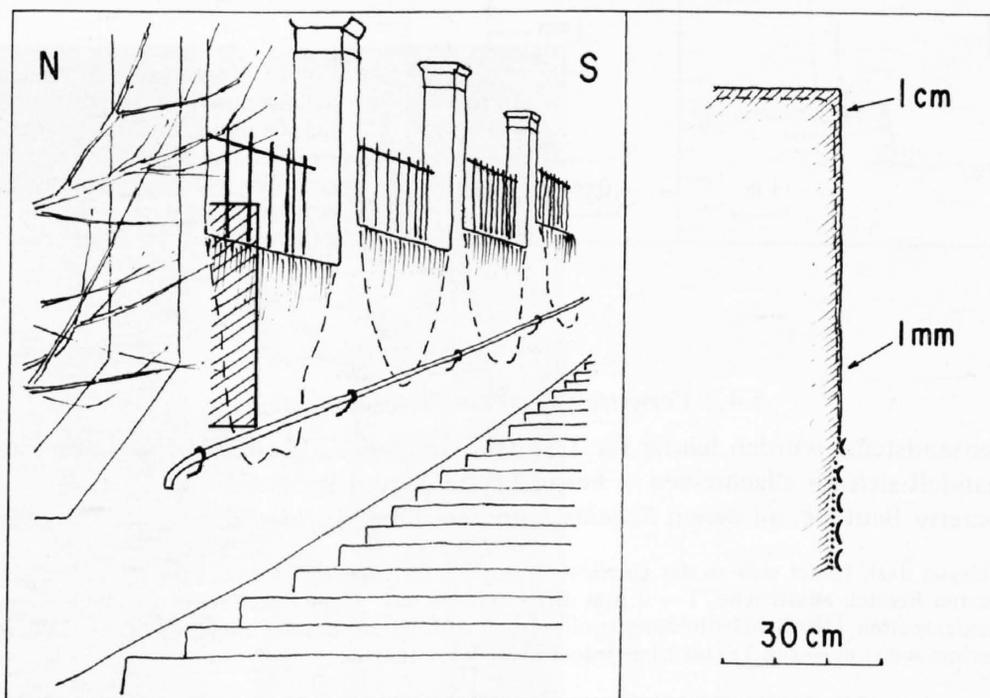


Fig. 21: Schienhutgasse. Mauer aus Granitischem Sandstein bildet an regen- und sickerwasserbenetzten Flächen Schalen, die im Bereich der Benetzungsgrenze (gestrichelte Linie) in Gipskrusten und Absanden übergehen.

Das *Konservatorium* ist aus Granitischem Sandstein erbaut. Im unteren Bereich der SE-Fassade, wo sie von Bäumen beschattet wird, sind das Gurtgesims und darüberliegende Fensterbrüstungen regenexponiert (Fig. 22). An den schwach geneigten, bei Regen stärker benetzten Gesimsflächen bilden sich 1 – 2 cm dicke Schalen. Sie gehen an den senkrechten, schwach benetzten Flächen in ca. 1 mm dicke Schalen über (gleiches Werkstück!). – Im Unterschied dazu sind an der stark beregneten W-Fassade Schalen an Ober- und Stirnseiten der Gesimse um 1 – 2 cm dick.

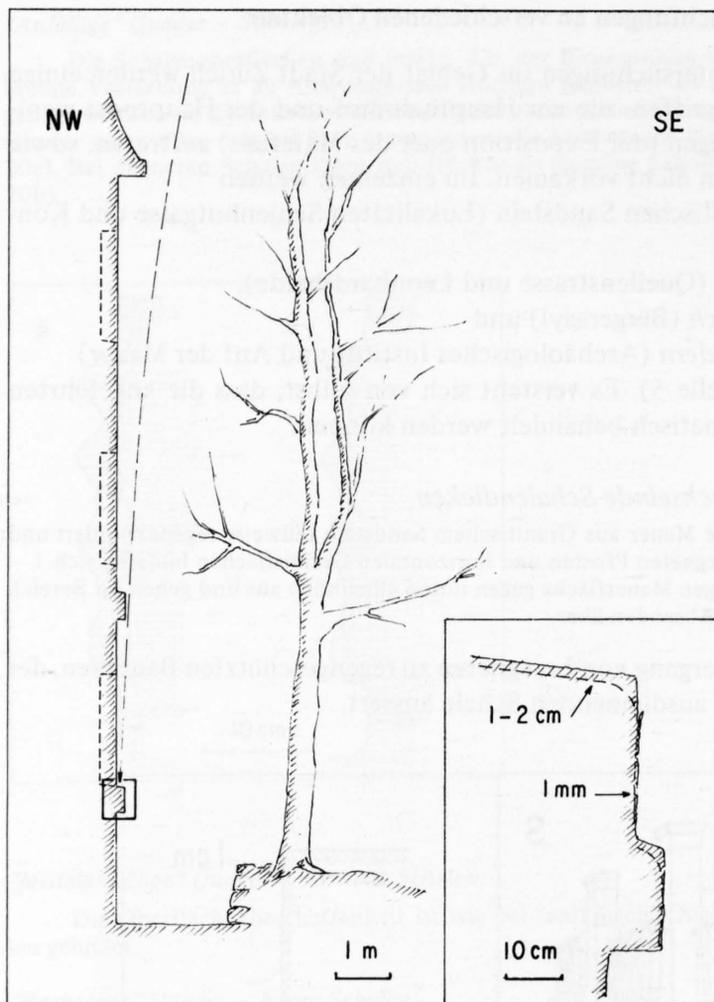


Fig. 22: Konservatorium. Schematischer Schnitt durch die SE-Fassade. An Gesimsen (Granitischer Sandstein), die von steil einfallendem Regen (gestrichelter Pfeil) getroffen werden, bilden sich dicke Schalen an schwach geneigten und dünne an senkrechten Flächen.

5.4.2 Verwitterungen am Plattensandstein

Plattensandsteine wurden häufig für Treppen, Gesimse u.ä. verwendet (vgl. am Hauptbahnhof). Es handelt sich im allgemeinen – besonders an S- und W-Seiten von Gebäuden – um stark regenexponierte Bauteile, an denen *Schalen kombiniert mit Aufblätterungen* beobachtet werden.

Ein Beispiel dazu findet sich an der *Quellenstrasse* (Fig. 23): Die 0.5 – 2 cm dicken Schalen – z.T. weisen sie im äussersten Bereich zusätzliche, 1 – 2 mm dicke Schalen auf – sind durch schichtparallele Risse quer zum Schalenriss aufgespalten. (Mit Schalenbildung kombiniertes Aufblättern kommt auch beim Granitischen Sandstein vor. Wegen seiner meist massigen Textur ist es jedoch hier viel seltener.)

Während im Grenzbereich zwischen beregneten und regengeschützten Flächen an Granitischen Sandsteinen Schalen meist direkt in Absanden übergehen, zeigen Plattensandsteine *Schalen, Abblättern* und *Absanden*.

Dieser Übergang ist an Mauern aus grob behauenen Quadern häufig am selben Werkstück zu beobachten, wie ein Beispiel an der *Leonhardshalde* verdeutlicht (Fig. 24). Die W-exponierte Stützmauer aus Plattensandstein ist teilweise beregnet und sickerwasserbenejzt. Vorspringende, stärker benejzte Stellen sind algenbewachsen und oberflächlich intakt. Hier bilden sich um 0.5 cm dicke Schalen. In Grenzbereichen oberflächlicher Benetzung dünnen die Schalen aus und gehen in Abblättern (0.5 mm dicke Schichten), dann in starkes Absanden über. Das absandende Material ist von weissen Gipsausblühungen durchsetzt.

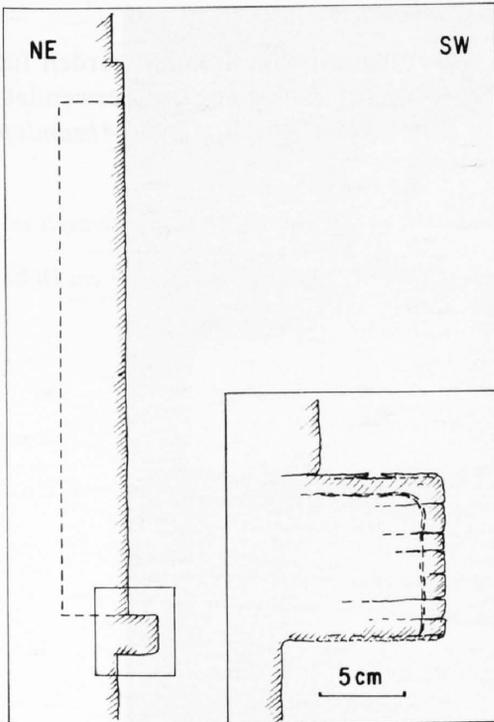


Fig. 23: Quellenstrasse. Schematischer Querschnitt durch Fenstereinfassung aus Plattensandstein. Am Gesims Schalen mit Aufblättern kombiniert.

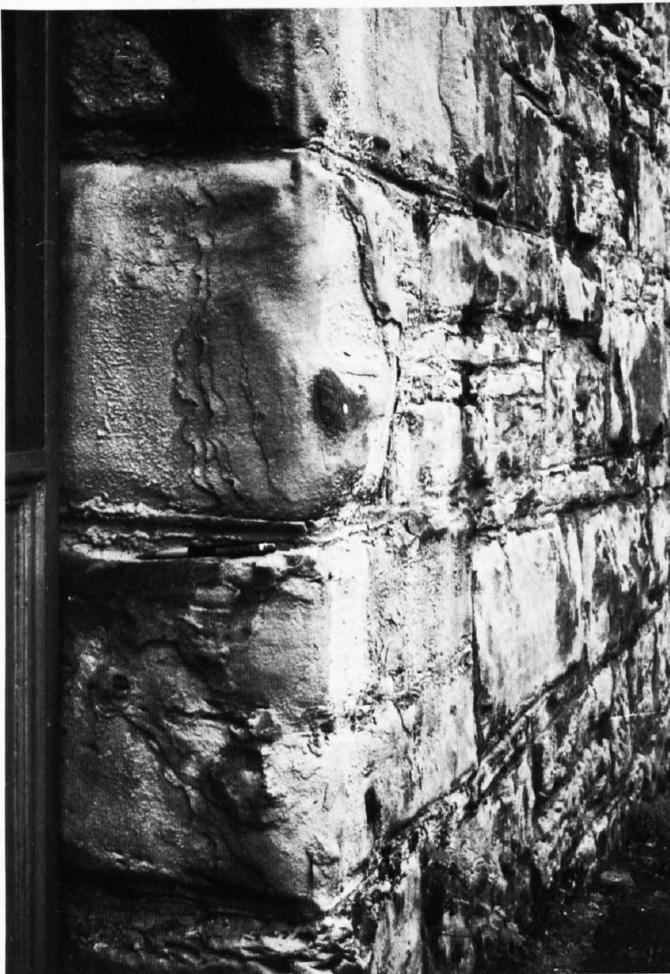


Fig. 24: Leonhardshalde. Detail einer Stützmauer aus Plattensandstein. Beregnete und sickerwasserbenetzte Stellen algenbewachsen (dunkel) und schalenbildend. Im Übergang zu schwach befeuchteten Stellen abblättern, dann stark absandend (hell wegen Gipsausblühungen).

5.4.3 Verwitterung im Grundfeuchtebereich

Vom Boden durchfeuchtete Bauteile sind besonders witterungsanfällig; deshalb wurden für die Sockelzone meist harte und wetterfeste Gesteine wie Gneise, dichte Kalksteine etc. verwendet. Die untersuchten Molassesandsteine verwittern im Grundfeuchtebereich durch starkes *Absanden* und *Abblättern*, in Regenexposition zusätzlich durch *Schalen*.

Die als Beispiel angeführten Sockelsteine aus Granitischem Sandstein an der W-Fassade des *Bürgerasyls* zeigen von unten nach oben (Fig. 25):

- starkes Absanden, verbunden mit Gipsausblühungen, unmittelbar über dem Boden bis 10 – 20 cm Höhe, übergehend in
- Abblättern (1 – 3 mm dicke Schichten) in 10 – 30 cm Höhe, übergehend in
- Schalen (0.5 – 1 cm dick) bis 1.5 m Höhe (Sockelhöhe).

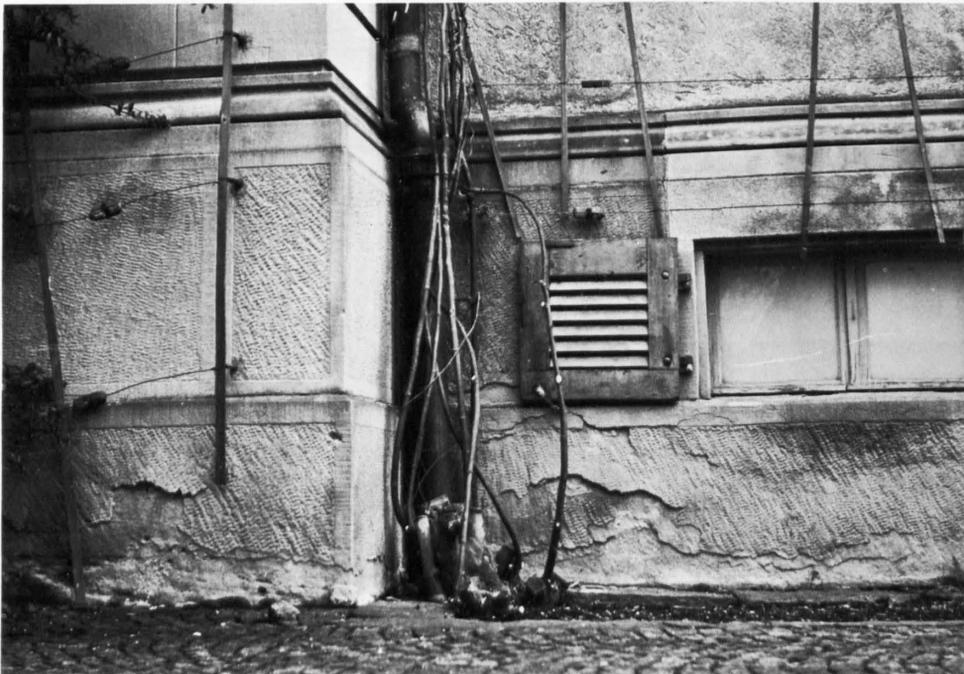


Fig. 25: Bürgerasyll. Ausschnitt aus der Sockelzone der W-Fassade (Bildbreite 2.5 m). Im bodenfeuchten Bereich von unten nach oben Absanden, Abblättern und Schalen (Granitischer Sandstein).

5.4.4 Verwitterungen an pyritreichen Quadern

In einem homogen bewitterten Mauerwerk zeichnen sich pyritreiche Quader durch ausserordentlich starke Verwitterungserscheinungen aus, wofür zwei Beispiele gegeben werden.

In einem regengeschützten Bereich der E-Fassade des *Archäologischen Institutes* zeigt ein einzelner Quader (Granitischer Sandstein) intensive Verwitterungen in Form von *Abblättern*, *Absanden* und *Ausblühungen* (Fig. 26): Die mit Ausblühungen – es handelt sich um Magnesiumsulfat und Gips – bedeckte Stelle ist ca. 10 cm zurückgewittert und rostbraun verfärbt. Die ganze Quaderoberfläche ist von braunen Punkten durchsetzt.

Im Anschliff einer Gesteinsprobe wurde 1 – 2% Pyrit in Form von meist 5 – 20 μm grossen Kügelchen entlang Kornfugen festgestellt (sog. "Himbeerpyrite", LOVE & AMSTUTZ, 1966, vgl. Fig. 37). Vereinzelt sind etwa sandkorn-grosse Kohlesplitter eingestreut, die gegen 50% Pyrit enthalten. Ihre Umgebung ist durch amorphes bis kryptokristallines Eisenhydroxid rostbraun verfärbt, was den makroskopisch sichtbaren braunen Punkten entspricht. Neben Pyrit findet sich untergeordnet Markasit in gleicher Ausbildung.



Fig. 26: Archäologisches Institut. Pyritreicher Quader aus Granitischem Sandstein zeigt lokal (Bildmitte) intensive Ausblühungen (Magnesiumsulfat und Gips) sowie starkes Absanden und Abblättern. Vom Ausblüher greifen die Zerstörungen auf den oben angrenzenden Quader über.

An der Lokalität *Auf der Mauer* ist ein Quader im berechneten Bereich der Stützmauer aus Granitischem Sandstein lokal stark zurückgewittert (Fig. 27a). Die vertiefte Stelle enthält Überreste von Kohleschmitzen, deren Umgebung intensiv rostet und von Gipsausblühungen bedeckt ist. Unterhalb des Quaders bildeten sich *Gipskrusten* aus verästelten Aggregaten *farbloser Kristalle* (Fig. 27b). Diese Krusten werden bei Regen benetzt und die Kristalle dabei stark angelöst; beim Austrocknen rekristallisieren sie als Dendriten.

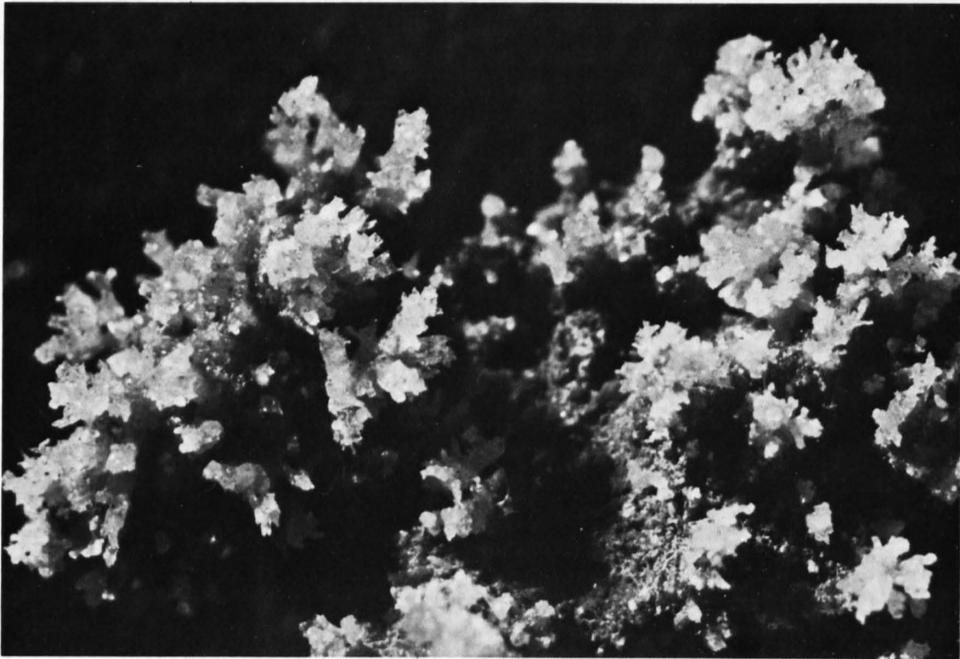
Derartige Gipskrusten wurden sonst nirgends beobachtet. Sie unterscheiden sich nach Ausbildung und Lage wesentlich von den "normalen", dunklen Gipskrusten, welche sich ausschliesslich in regengeschützten Bereichen (z.B. unter der Mauerabdeckung 50 cm oberhalb des Quaders) bilden.

5.5 Zusammenfassung

Die typischen Verwitterungserscheinungen der Granitischen Sandsteine und Plattensandsteine an Bauwerken in städtischer Umgebung sind Schalen, Abblättern und Abbröckeln, Aufblättern, Absanden, Gipskrusten sowie Ausblühungen von Gips, Natriumsulfat und Magnesiumsulfat. Diese Erscheinungen lassen sich bestimmten Verwitterungsbereichen zuordnen: Schalen bilden sich in berechneten oder durch oberflächliches Sickerwasser kurzzeitig stark benetzten Bereichen, die oberflächlich rasch austrocknen. Absanden, Krusten und Ausblühungen finden sich generell in regengeschützten Bereichen und speziell dort, wo sie durch Sickerwasser oder Bodenfeuchte oberflächlich lange feucht bleiben. Mit Absanden verbundene Gipskrusten bedecken regengeschützte Fassaden jedoch auch flächenhaft. Abblättern und Abbröckeln werden einerseits zusammen mit starkem Absanden und starker Krustenbildung, andererseits in Übergangsbereichen zwischen berechneten und regengeschützten Flächen beobachtet. Aufblättern bilden sich dagegen in allen Feuchtbereichen an Sandsteinen, die glimmerreiche bis siltige Lagen enthalten. In gleich exponierten Fassadenteilen lassen unterschiedlich stark verwitterte Quader auf unterschiedliche Verwitterungsresistenzen schliessen, die petrographisch noch zu begründen sind. Pyritreiche Quader heben sich durch intensive Abwitterungen von ihrer Umgebung im Mauerwerk ab.



a



b

Fig. 27: Auf der Mauer. a) Detail einer Stützmauer aus Granitischem Sandstein mit lokal stark zurückgewittertem Quader. Darunterliegende Fläche rostbraun verfärbt (dunkel). Entlang senkrechten Fugen unterhalb des Quaders Gipskrusten aus farblosen Aggregaten. b) Makroaufnahme der Gipskruste (Bildbreite 9 mm).

6. Verwitterungserscheinungen in Naturaufschlüssen

6.1 Einleitung

Wie bereits erwähnt, wurden die Naturaufschlüsse nach ihrer Vergleichbarkeit mit den untersuchten Bauwerken ausgewählt (Kap. 2.5 und 3.1.1). Analog zu Kap. 5 werden nun die Verwitterungserscheinungen in den einzelnen Aufschlüssen nach Verwitterungsbereichen zusammengefasst und kurz charakterisiert, während ihre ausführliche Beschreibung in Kap. 7 folgt. – Im Plattensandsteinbruch Martinsbrugg sind die meisten der an untersuchten Bauwerken typischen Verwitterungserscheinungen sehr ähnlich ausgebildet. Der Steinbruch Uznaberg (Granitischer Sandstein) zeigt analoge Erscheinungen in teilweise abweichenden Expositionen. In den Steinbrüchen Chatzenrietli (Granitischer Sandstein) und Fuchsloch (Plattensandstein) werden ergänzend einzelne Formen beschrieben, die hier besonders deutlich oder unter speziellen Bedingungen ausgeprägt sind. Die genauen Ortsangaben zu den Aufschlüssen wurden in Fig. 1b und Tabelle 5 zusammengestellt.

6.2 Martinsbrugg

6.2.1 Geologisch-petrographische Beschreibung

Der Steinbruch Martinsbrugg liegt über der "oberen Seelaffe", die südlich der Brücke das Martinstobel quert, im Niveau der "mittleren Plattensandsteine" (BUECHI & HOFMANN, 1945). Die Schichten fallen mit 20° nach NW (Fallazimut 320°) ein. Im untersuchten Abschnitt (Fig. 28) ist folgendes Profil aufgeschlossen (Fig. 29):

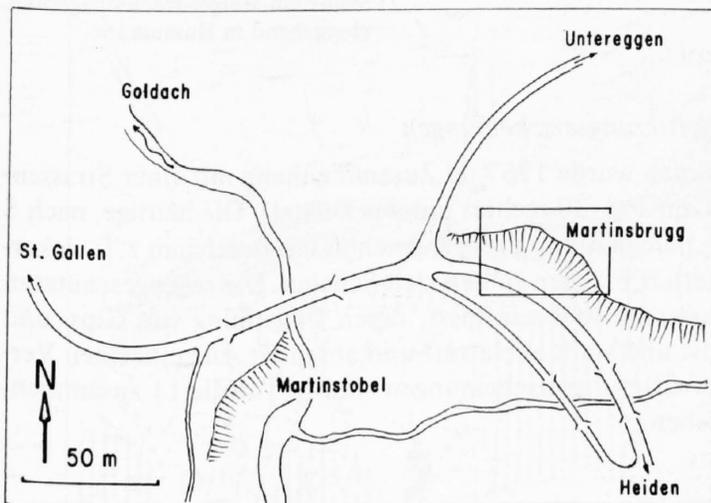


Fig. 28: Martinsbrugg, Lageskizze. Geologisches Profil und Detailuntersuchungen an der markierten Stelle.

Über dem Strassenniveau

1. 7 m grünlichgrauer Sandstein (abgebautes Lager). Relativ feinkörnige (um 0.1 mm) und grobkörnigere (um 0.2 mm) Lager ergeben horizontale und schräge Feinschichtungen. Im cm- bis dm-Bereich treten mm-mächtige, glimmerreich-siltige Lagen auf, die verkohlten Pflanzenhäcksel in oft feinsten Verteilung enthalten. Sie bilden Schichtflächen mit Rippelmarken. Im unteren Teil ist die Bankung undeutlich, da die spärlichen Siltlagen seitwärts im dm- bis m-Bereich auskeilen, gegen oben wird sie ausgeprägter. In einem Dünnschliff sind eckige bis abgerundete Körner (mittlere Korngrösse 0.1 – 0.15 mm, vereinzelt bis 0.6 mm) relativ gut sortiert, wobei feinere und gröbere Lagen auftreten. Sie werden durch 10% sparitischen Calcit zementiert. Mineralbestand (Detritus): 50% Quarz, 15% Feldspäte (Kalifeldspäte und Plagioklase, frische bis stark umgewandelte Körner), 20% Gesteinsbruchstücke (Magmatite, Metamorphite, Chert, Siltsteine, Dolomite und Kalke), 5% Nebengemengteile (Chlorit, Glaukonit, Muskowit, seltener Biotit und Erz).

Übergang in

2. 3 m Sandstein-Mergel-Wechselagerung. Sandsteinlagen (wie 1.) wiegen im unteren Teil gegenüber mm- bis cm-mächtigen, braungrauen, sandig-siltigen Mergellagen vor und treten gegen oben allmählich zurück. Mergellagen sind reich an winzigen Kohleschmitzen, deren Umgebung rostet und von punktförmigen Gipsausblühungen bedeckt ist. (Chemische Analysen einer Mergel- und einer Kohlenprobe ergaben je 4% Gesamtschwefel.). Sickerwasseraustritte im mittleren Teil sowie sickerwasserbenetzte, regengeschützte Stellen im Liegenden sind von Gips- und Magnesiumsulfat-Ausblühungen umgeben.

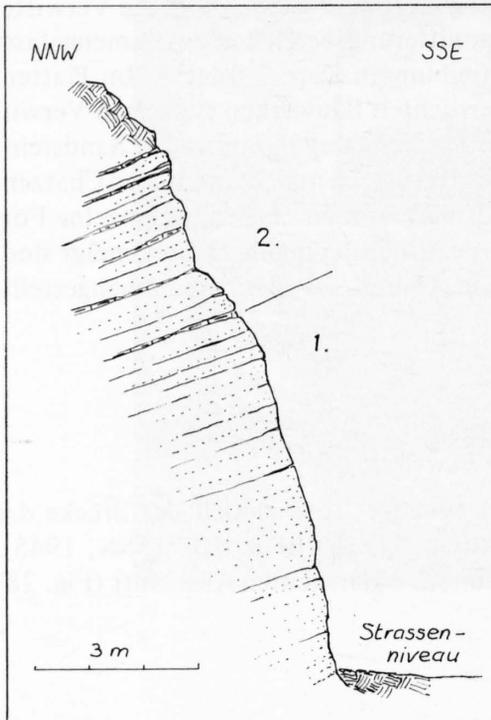


Fig. 29: Martinsbrugg, geologisches Profil.

- 1) Sandstein (abgebautes Lager),
- 2) Sandstein-Mergel-Wechselagerung, übergehend in Humuszone.

6.2.2 Verwitterungserscheinungen

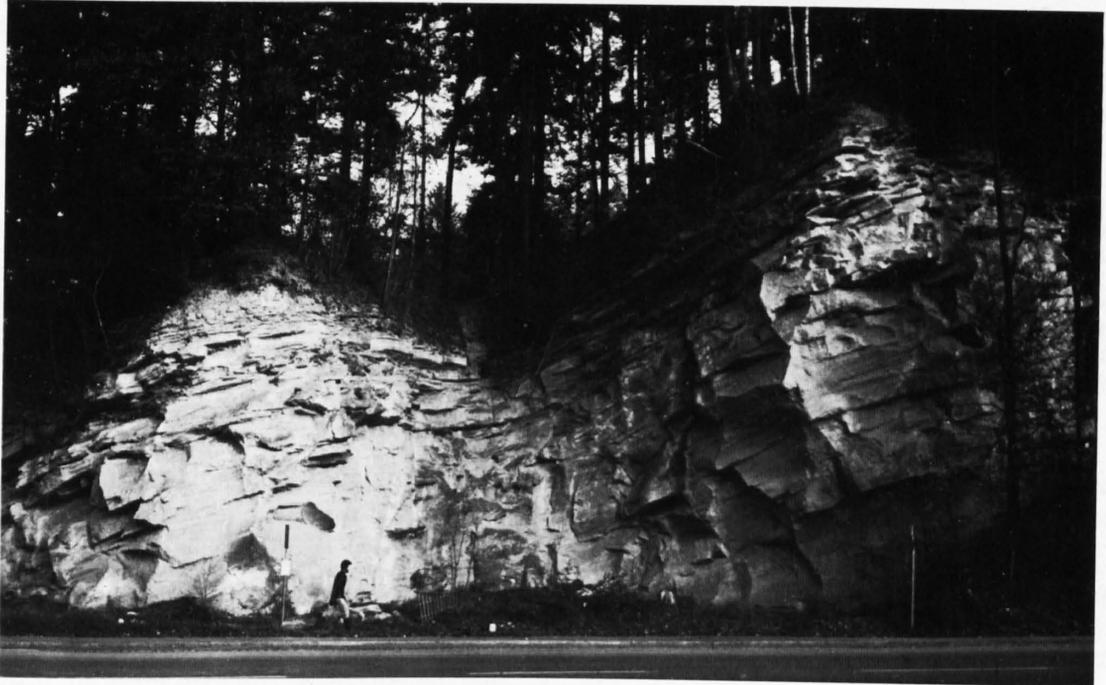
Der seit ca. 1900 aufgelassene Steinbruch wurde 1967 im Zusammenhang mit einer Strassen-erweiterung stellenweise neu abgesprengt (in Fig. 30 rechtes unteres Drittel). Die heutige, nach S bis W exponierte Steinbruchwand ist z.T. beregnet und in regengeschützten Bereichen z.T. sickerwasserbenetzt (Fig. 30). An regenexponierten Flächen bilden sich Schalen. Die regengeschützten Bereiche sind grösstenteils von Sickerwasserstellen beeinflusst, deren Umgebung von Gips- und Magnesiumsulfat-Ausblühungen bedeckt ist und stark abblättert und absandet. Die einzelnen Verwitterungsbereiche und zugeordneten Verwitterungserscheinungen sind in Tabelle 11 zusammengestellt und werden anschliessend beschrieben.

Beregnete Bereiche

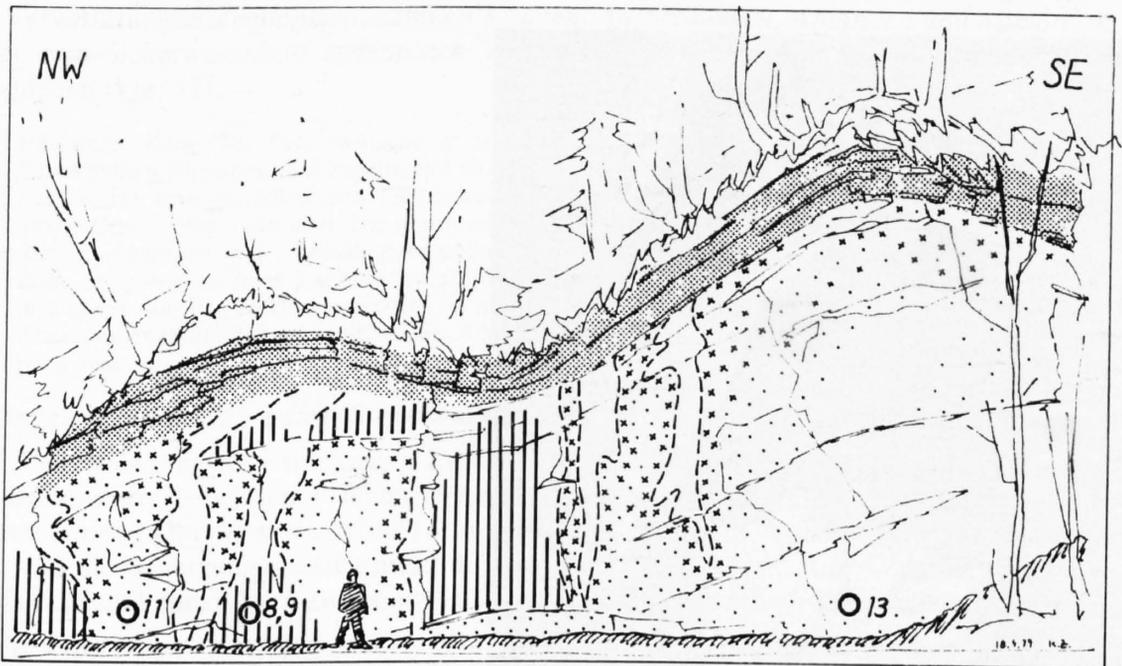
An allen vorstehenden und regenexponierten Felspartien entstanden *Schalen*. Diese Stellen liegen an der S- bis W-exponierten, unbeschatteten Wand. Deshalb trocknen sie nach einer Benetzung oberflächlich rasch aus.

Schalen:

Die Felsoberfläche ist scharfkantig und intakt (eingemeisselte Jahreszahl 1899, Fig. 31). Sie wird von schwarzbraunen Algen bewachsen (Blualgen der Klasse Chroococcales, untergeordnet Grünalgen und Pilze). Die Schalen sind meist 0.5 – 2 cm, z.T. bis 3 cm dick (im zentralen Bereich der in Fig. 31 abgebildeten Felsnase). Gegen regengeschützte Bereiche dünnen sie aus und gehen in Absanden und Abblättern über. Die Lockerzonen sind weniger als 1 mm (bei dünnen Schalen) bis über 1 cm mächtig und zerfallen in schuppige Bröckchen und Sand. Schalenninnenseite, lockeres Material und darunterliegende Gesteinsoberfläche sind von punktförmigen, weissen Gipsausblühungen durchsetzt.



a



b

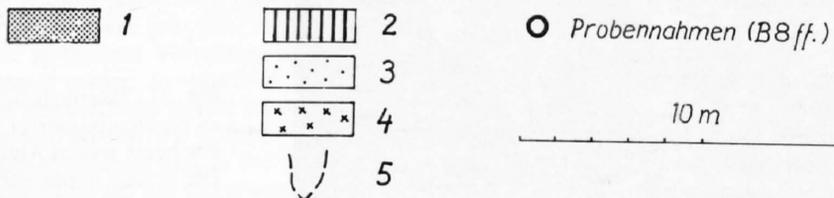


Fig. 30: Martinsbrugg. a) Ansicht der Steinbruchwand (aufgenommen am 23.11.78). b) Skizze nach a) mit 1) Sandstein-Mergel-Wechsellagerung (Schicht 2), 2) Schalen, 3) Abblättern und Absanden, 4) Ausblühungen und 5) Sickerwasserstellen.

Tabelle 11: *Verwitterungsbereiche im Steinbruch Martinsbrugg*

	<i>Beregnete Bereiche</i>	<i>Regengeschützte Bereiche allgemein</i>	<i>Regengeschützte Bereiche mit oberflächlichem Sickerwasser</i>		<i>Bodenfeuchter Bereich</i>
			<i>a) Langzeitig stark benetzte Sickerwasserstelle</i>	<i>b) Kurzzeitig schwach benetzte Sickerwasserstellen</i>	
<i>Exposition und Stellen im Aufschluss</i>	dem direkten Regen ausgesetzt (Fig. 30, Signatur 2).	bleiben bei Normalregen relativ trocken (Fig. 30, rechts unten)	durch austretendes Kluftwasser langzeitig und stark benetzt (Fig. 30a, dunkle Sickerwasserstelle Mitte rechts).	durch oberflächlich abfließendes Regenwasser und austretendes Kluftwasser kurzzeitig schwach benetzt (Fig. 30b, Signaturen 3, 4 und 5).	vom Boden durchfeuchtet (bis 1 m hohe Zone am Fuss der Felswand).
<i>Verwitterungsercheinungen</i>	Schalen	(Absanden)	Krusten, Ausblühungen, Abblättern und Absanden	Abbröckeln, Abblättern, Absanden und Ausblühungen	

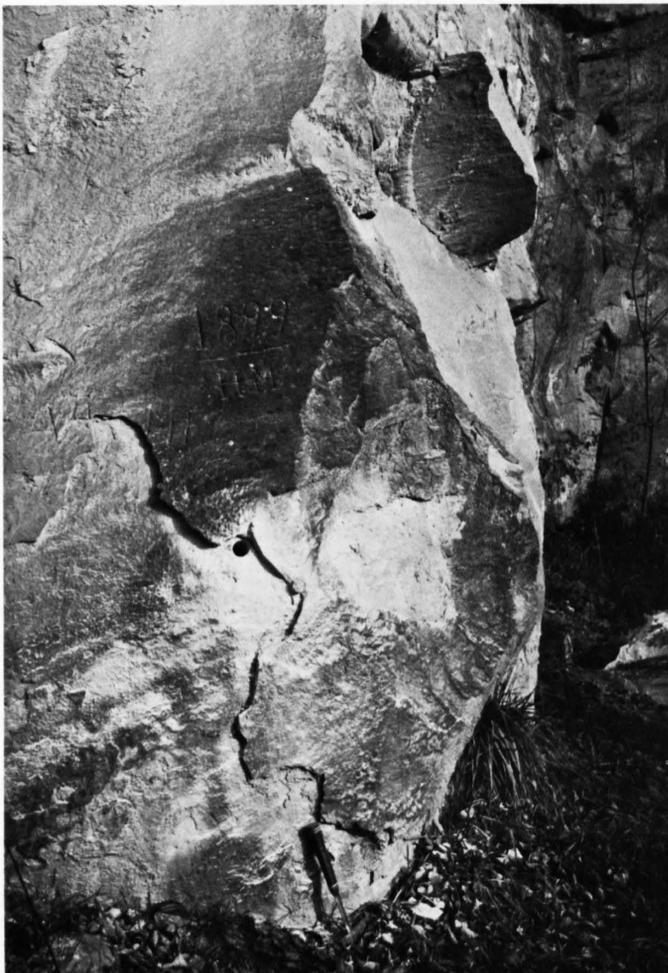


Fig. 31: Martinsbrugg. Schalenbildung an regenexponierter Felsoberfläche (sie erscheint wegen Algenbewuchs dunkel). Die Schale dünnt gegen den regengeschützten Bereich (links oben) aus und geht in Absanden über. In die Schalenoberfläche eingemeisselte Jahrzahl 1899 (obere Mitte) ist gut erhalten. Im Zentrum Probenahmestellen B8 und B9. Aufnahmedatum 10.8.78.

Regengeschützte Bereiche

Sie sind durch Felsüberhänge vom direkten Regen geschützt. Ausserhalb des Einflussbereichs oberflächlicher Sickerwässer oder der Bodenfeuchte ist die Felsoberfläche unverwittert bis *schwach absandend*.

In einem 1967 durch Sprengung freigelegten Teil beginnt sich eine 1 – 4 mm dicke, oberflächlich intakte Gesteinsschicht schalenartig zu lösen. Ob es sich dabei um eine echte Verwitterungserscheinung oder eine Spätfolge der Sprengung handelt, konnte nicht eindeutig geklärt werden. Im Profil senkrecht zur Oberfläche wurde eine dem Absanden vergleichbare Sulfatanreicherung festgestellt: An der Oberfläche war der wasserlösliche S-Gehalt mit 7240 ppm maximal – er entspricht etwa 4% Gips – und fiel bis 4 cm Tiefe auf ein Grundniveau von ca. 70 ppm im Innern. Damit ist ein mindestens zusätzlicher witterungsbedingter Einfluss auf diese besondere Schalenbildung wahrscheinlich.

Regengeschützte Bereiche mit oberflächlichem Sickerwasser

Innerhalb der regengeschützten Bereiche heben sich Zonen, die von Sickerwässern benetzt oder befeuchtet werden, durch meist stärkere Verwitterungen von ihrer Umgebung ab. Dabei ist die Wasserführung – sie kann bei Kluftwasseraustritten (Quellen) u.a. stärker sein und länger dauern als bei direkt abfliessendem Regenwasser – für Ausbildung und Anordnung der Verwitterungserscheinungen wesentlich:

a) Langzeitig stark benetzte Sickerwasserstelle

Dieser Kluftwasseraustritt wurde unabhängig von der Wetterlage meist in nassem Zustand angetroffen. Vor allem im Spätsommer und Herbst konnte er jedoch auch längere Zeit trocken sein. Die Verwitterungserscheinungen, nämlich *Krusten*, *Ausblühungen*, *Absanden* und *Abblättern*, sind zonar zum Sickerwasserlauf angeordnet. Es werden von innen nach aussen folgende Zonen unterschieden (Fig. 32):

- 1) *Überspülte Zone*: Die Felsoberfläche ist zentral algenbewachsen und *intakt*, gegen aussen sandet sie bei schwächerem Algenbewuchs zunehmend ab. An der Benetzungsgrenze abrupter Wechsel zu
- 2) *Gipskrusten und -ausblühungen*: Gelblichweisse, dünne (unter 1 mm) Gipskrusten gehen nach aussen in weisse Gipsausblühungen über. Der darunterliegende Fels sandet ab. Übergang in
- 3) *Starkes Absanden und Abblättern* kombiniert mit *Magnesiumsulfat-Ausblühungen*: Die Ausbildung dieser Zone ist analog zu Zone 3 seitlich kurzzeitig schwach benetzter Sickerwasserstellen (s. unten). In ca. 1 – 3 m Distanz von der Sickerwasserstelle (je nach Felsmorphologie) geht die Zone in gleichmässig schwaches Absanden ohne deutliche Ausblühungen, d.h. in den vom Sickerwasser unbeeinflussten regengeschützten Bereich über.

b) Kurzzeitig schwach benetzte Sickerwasserstellen

Sie wurden meist in trockenem Zustand angetroffen. Bei Wasserführung variieren Lage und Ausdehnung der benetzten Flächen je nach Witterung (direkt abfliessendes Regenwasser!) und Wetterperiode (Kluftwasseraustritte!) sehr stark. Da sich zudem verschiedene Wasserläufe überlappen, sind die Benetzungsgrenzen meist diffus ausgebildet. *Krusten*, *Ausblühungen*, *Absanden* und *Abblättern* sind zonar (vom Zentrum des Sickerwasserlaufes nach aussen) angeordnet:

- 1) *Überspülte Zone*: Bei stärkerer oder häufiger Benetzung *sandet* die Felsoberfläche relativ schwach, bei schwächerer oder seltener Benetzung mässig bis stark ab. Ein Algenbewuchs fehlt. Gegen aussen zunehmendes Absanden und Abblättern geht über in
- 2) *Gipsausblühungen*: In feinsten Verteilung sind es punktförmige Ausblühungen, die der Felsoberfläche einen weisslichen Schimmer geben; in stärkeren Anreicherungen bis 1 mm dicke, pulverige, weisse Überzüge. Die darunterliegende Felsoberfläche sandet leicht ab. Übergang in
- 3) *Starkes Absanden und Abblättern* kombiniert mit *Magnesiumsulfat-Ausblühungen* und *-Krusten*: Die Felsoberfläche ist stark absandend und in 0.5 – 1 mm dicken Schichten abblättern (Fig. 33). Die Blätter beginnen sich oft mehrlagig auf der sickerwasserzugewandten Seite zu lösen (vgl. Fig. 32b). In einer 1967 freigelegten Felspartie stehen einzelne Gerölle bis 2 cm vor. Vertiefungen und Nischen sanden und blättern stark, während vorspringende Rippen schwächer bis nicht absanden. Dadurch wird ein gegebenes Relief akzentuiert, und es entstehen bis mehrere cm tiefe *Alveolen* (Aushöhlungen. Diese Erscheinung wird als beginnende Zellenverwitterung aufgefasst, vgl. Fig. 34.) Nach Trockenperioden sind Rippen ausgetrocknet (erscheinen heller, Fig. 33), während Vertiefungen länger feucht bleiben.

Stark absandende und abblätternde Flächen, besonders Vertiefungen, sind von Epsomit-Ausblühungen und -Krusten bedeckt. Ausblühungen bilden sehr dünne Überzüge bis flaumige, 1 – 5 mm mächtige Salzpolster. Sie erscheinen seltener (vorwiegend bei trockener Witterung) auf sonnenbeschienenen Flächen, häufiger bis ganzjährig auf feucht-schattigen und in Vertiefungen. Innert weniger Monate fallen die meist lockeren, sandbeladenen Aggregate ab. In feucht-schattigen Bereichen verdichten sie sich zu festen, bis 1 mm dicken Krusten, die wie Gesteinsblätter abfallen (fliessende Übergänge zwischen sandbeladenen Krusten und salzimpregnierten Gesteinsblättern). Im Unterschied zu Vertiefungen sind Rippen von Gipsausblühungen bedeckt, werden aber von Magnesiumsulfat gemieden. – Mit zunehmender Entfernung von der Sickerwasserstelle (wenige dm bis über 1 m) werden Ausblühungen spärlicher, wobei die Zone in den allgemein regengeschützten Bereich mit schwachem Absanden übergeht.



Fig. 32: Ausschnitt aus langfristig stark benetzter Sickerwasserstelle in Martinsbrugg (fotografiert am 5.9.78).
a) (Bildbreite 2 m): Überspülte Zone algenbewachsen (dunkel), umrahmt von Ausblühungen (weiss).
b) Detail aus Zentrum a) (Bildbreite 30 cm): v.l.n.r.

- 1) algenbewachsene Zone,
- 2) mit Gipsausblühungen bedeckte und schwach sandende Zone (flächig weiss) und
- 3) stark abblätternde Zone mit Magnesiumsulfat-Ausblühungen.

Bodenfeuchter Bereich

Die bodenfeuchte Zone am Fuss der Felswand bildet einen gesonderten Verwitterungsbereich mit *Abbröckeln*, *Abblättern*, *Absanden* und *Ausblühungen*:

Unmittelbar über dem Boden ist der Fels wenige mm tief aufgelockert und stark abbröckelnd. An beregneten Flächen stellen sich knapp 1 dm ab Boden zerbröckelnde und schliesslich typische Schalen ein. In regengeschützten Bereichen sandet und blättert die Oberfläche bis einige dm hoch stark ab. Ausblühungen von Magnesium- und Natriumsulfat vermischt mit Gips finden sich in bodenparallelen Säumen bis ca. 1 m Höhe. An einer Stelle wurde Thenardit zusammen mit wenig Hexahydrat nachgewiesen.

In allen Feuchtbereichen, d.h. in beregneten, sickerwasserbenetzten oder -befeuchteten und in bodenfeuchten Bereichen, ist *Aufblättern* mit den beschriebenen Erscheinungen kombiniert, wo die Felsoberfläche subparallel zur Schichtung verläuft.



Fig. 33: Abblätternde Felsoberfläche (Martinsbrugg). Unter den sich abrollenden Blättern ist sie mit Magnesiumsulfat-Ausblühungen bedeckt. Im Zentrum Probenahmestelle B 11A. Die etwas hellere (ausgetrocknete) Rippe links bleibt in gelockertem Zustand erhalten (Probenahmestelle B 11B). 22.11.78.

6.2.3 Zellenverwitterung im Martinstobel

Als Ergänzung der in Martinsbrugg beobachteten Erscheinungen sei hier ein Beispiel von schön ausgebildeter *Zellenverwitterung* erwähnt. Die Stelle befindet sich ca. 100 m westlich von Martinsbrugg an einer SE-exponierten Felswand im Martinstobel (vgl. Fig. 28). Der Sandstein (obere Seelaffe) zeigt von weitem ausgeprägte Kreuzschichtungen. Im unteren Bereich der Wand sind Kohlenester mit rostigen, von Ausblühungen bedeckten Höfen erkennbar. Die Zellenverwitterungen liegen in einem ca. 100 m² grossen, regengeschützten, unzugänglichen Bereich (Fig. 34):

Grossalveolen, die gegen 2 m breit und einige dm tief sind, werden durch häufig schichtungsparallele Rippen voneinander getrennt. An Untersichten ist z.T. ein feinmaschigeres Netz von wenige cm grossen, runden bis schichtparallel länglichen Kleinalveolen ausgebildet. Die (z.T. freistehenden!) Rippen sind nach längeren Trockenperioden ausgetrocknet (erscheinen hell), während Vertiefungen feucht bleiben. Weisse Striemen im Bereich der Aushöhungen deuten auf die Anwesenheit von Salzen.

Es wird vermutet, dass diese Zellenverwitterung einem fortgeschrittenen Stadium des in Martinsbrugg beobachteten ungleichmässigen Absandens entspricht. Vögel, die in einzelnen Höhlen Nester bauen, bewirken möglicherweise eine zusätzliche Abrasion.



Fig. 34: Martinstobel. Zellenverwitterung im regengeschützten Bereich der SE-exponierten Wand (31.10.78).

6.3 Uznaberg

6.3.1 Geologisch-petrographische Beschreibung

Am Nordrand des oberen Zürichsees bildet die Granitische Molasse einen WSW-ENE gestreckten Hügelzug, auf dem bis zur Jahrhundertwende Dutzende von Steinbrüchen – worunter Uznaberg – im sogenannten "Bollingersandstein" angelegt waren. (Heute sind noch zwei Stellen, nämlich Moos und Bürstli, in Abbau.) Die "Zone des granitischen Sandsteins" (TANNER, 1944) gliedert sich in zahlreiche, 10 – 20 m mächtige Sandsteinbänke (Stromrinnenablagerungen) zwischen Mergelserien (Überschwemmungsablagerungen). Wegen der steil einfallenden Schichtung bilden die nicht abgebauten Mergel zwischen abgebauten Sandsteinen künstliche Geländerippen. In einem der aufgelassenen Steinbrüche von Uznaberg (Fig. 35) wurde folgendes Profil aufgenommen (Fig. 36):

Über künstlicher Aufschüttung

1. 4 m *Mergel und Mergelsandsteine*. Graugrüne bis bunte Mergel alternieren mit Mergelsandsteinen. Die Schichtflächen sind gewellt (mittlerer Fallwinkel 60° Richtung 320°). Scharfer Kontakt zu
2. 5 m grauer *Sandstein* mit Geröllschnüren, Mergellinsen und Kohleschmitzen (abgebautes Lager). Der im frischen Bruch scheinbar homogene Sandstein lässt auf absandender Fläche Feinschichtungen erkennen. In einem Dünnschliff sind die eckigen bis gerundeten Körner (mittlere Grösse 0.3 mm) sehr schlecht sortiert. Es treten grobkörnige Bereiche mit 50% Körnern grösser 0.5 mm auf. Der sparitische Calcizement ist spärlich (um 1%). Mineralbestand (Detritus): 30% Quarz, 35% Feldspäte (Kalifeldspat und Plagoklas, meist trüb), 30% Gesteinsbruchstücke (Magmatite, Metamorphite, Chert, Dolomite und Kalke, Siltsteine), ca. 3% Nebemengenteile (Chlorit, Muskowit, Biotit, Erz, Granat).

Von der Basis zieht eine wenige dm mächtige Gerölllage in geschwungenen Schnüren in den Sandstein hinein. Mergel (sogenannte "Lebern") bilden unregelmässige Schlieren, Linsen und Geröllnester. Vereinzelt, cm- bis dm-mächtige Kohleschnitzen (vgl. Fig. 41) sind von mm- bis cm-breiten Rosthöfen umgeben. Die Kohlen sind pyritreich:

In einem Anschliff sind 5 – 40 µm grosse Pyritkugeln ("Himbeerpyrite") einzeln bis unregelmässig gehäuft innerhalb der Kohle und entlang Kornfugen im umgebenden Sandstein sichtbar (Fig. 37). Die Pyrite zeigen alle Stadien von frisch (stark reflektierend) über schwach oxidiert (matt) bis vollständig zu Limonit umgewandelt (rostbraun). Der Porenraum des Sandsteins ist durch amorphes Eisenhydroxid intensiv braun verfärbt.

Die Bank ist von subhorizontalen Klüften im dm- bis m-Abstand durchzogen (oberflächennahe Entlastungsklüfte, Fig. 38). Um Kluftflächen ist der Sandstein braun verfärbt. An zahlreichen Stellen treten Sickerwässer aus, deren Umgebung von Gips- und Magnesiumsulfat-Ausblühungen bedeckt ist.

Übergang in

3. 2 m Mergelsandstein-Mergel-Wechselagerungen (wie 1.). Übergang in Vegetationszone.

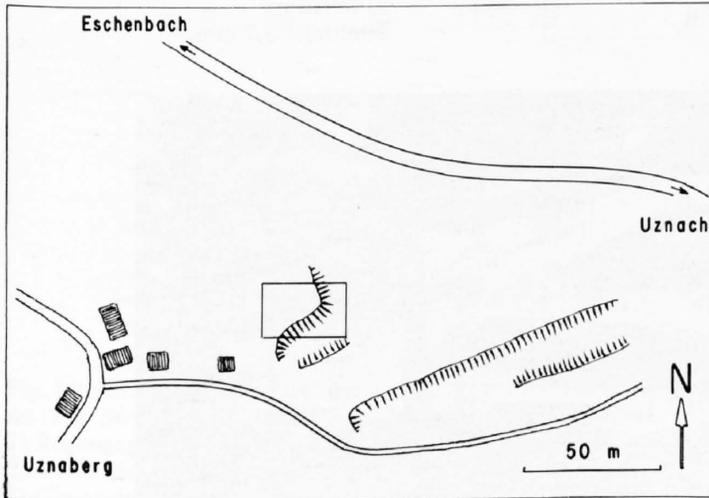


Fig. 35: Uznaberg, Lageskizze. Geologisches Profil und Detailaufnahme an der markierten Stelle.

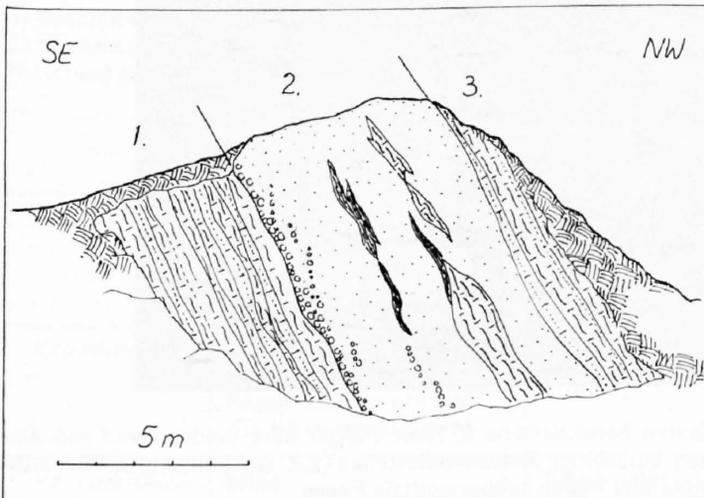


Fig. 36: Uznaberg, geologisches Profil.
 1) Mergel und Mergelsandsteine
 2) Sandstein mit Geröllschnüren, Kohle- und Mergel einlagerungen (abgebautes Lager),
 3) Mergelsandsteine und Mergel, übergehend in Vegetationszone.

6.3.2 Verwitterungserscheinungen

Der Steinbruch war bis ca. 1910 in Abbau, heute ist das Gelände bewaldet. In einem beregneten, nach NE exponierten Teil der Sandsteinbank ist die Felsoberfläche moos-, flechten- und algenbewachsen; hier fehlen deutliche Verwitterungserscheinungen. Auf der SE-exponierten, regengeschützten Fläche (Fig. 38), die fast vollständig im Einflussbereich oberflächlicher Sickerwässer liegt, werden dagegen Schalen, Abblättern, Absanden, Ausblühungen und Krusten beobachtet. Diese Erscheinungen lassen sich wiederum bestimmten Verwitterungsbereichen zuordnen (Tabelle 12). Einige Bemerkungen zu Bereichen und Erscheinungen mögen die Zusammenhänge erläutern.

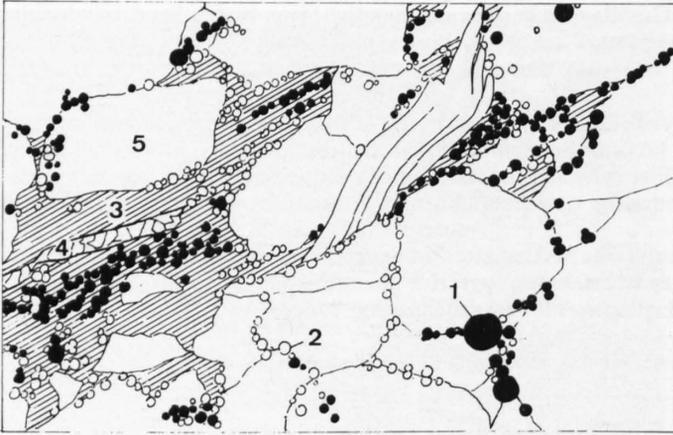


Fig. 37: Anschliff eines Granitischen Sandsteins mit kohligter Einlagerung (Probe W 12, vgl. Fig. 41).

- 1) Frischer bis schwach oxidierter Pyrit,
 - 2) stark oxidierter Pyrit,
 - 3) Kohle mit chalcedon-verheiltem Riss (4),
 - 5) Detritus.
- Bildbreite 0.7 mm.

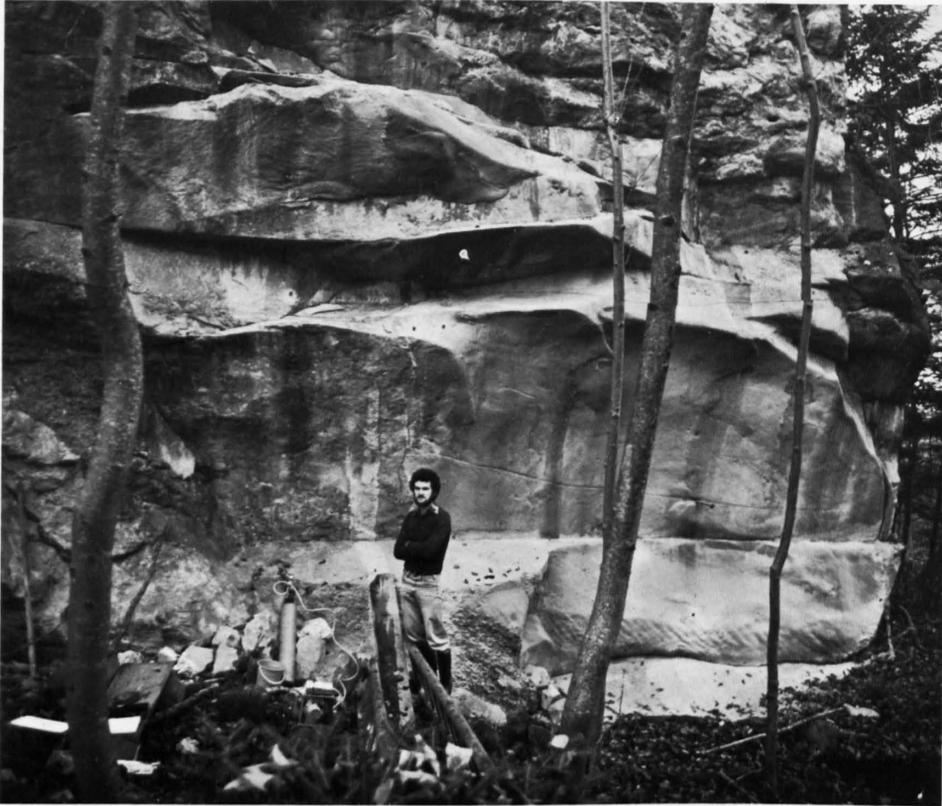


Fig. 38: Uznaberg. Teilansicht des regengeschützten Bereiches von S. Helle Fläche stark sandend und von Ausblühungen bedeckt. Dunklere Striemen markieren kurzzeitige Sickerwasserstellen (z.Z. trocken, Aufnahmedatum 14.11.78). Entlastungsklüfte bilden subhorizontale Fugen.

Regengeschützte Bereiche mit oberflächlichem Sickerwasser

Im oberen Teil des regengeschützten Bereiches überwiegt direkt abfließendes Regenwasser, im unteren austretendes Kluftwasser. Die Sickerwässer überstreichen von Ausblühungen bedeckte Kohleschmitzen und verteilen so die Salze im tieferen Bereich. Wie Fig. 39 anhand von vier unterschiedlichen Situationen zeigt, kann das Benetzungsmuster durch Sickerwässer je nach Art und Dauer der Nassperiode (Regen oder Schneeschmelze) grossen Schwankungen unterworfen sein. Dennoch lassen sich aufgrund ihrer durchschnittlichen Wasserführung zwei Typen von Sickerwasserstellen unterscheiden, die sich in unterschiedlicher Ausbildung und Anordnung der Verwitterungserscheinungen äussern:

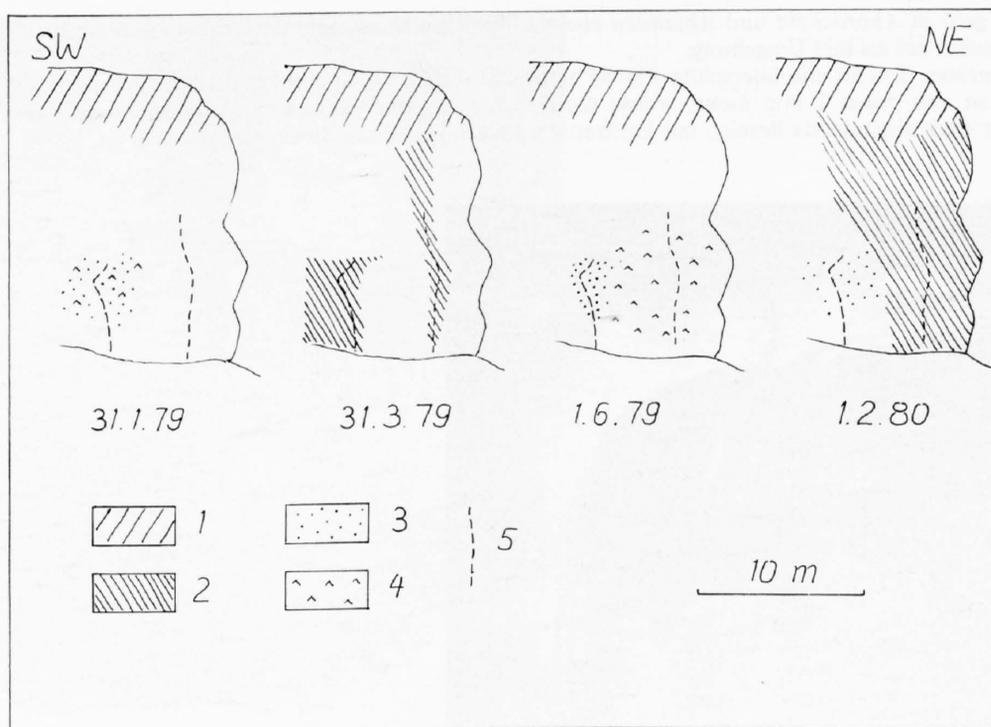


Fig. 39: Uznaberg. Schematische Darstellung unterschiedlicher Benetzungsmuster auf der SE-Seite des Aufschlusses (Fig. 38 entspricht der unteren Hälfte dieses Ausschnitts).

- 1) Regenexponierter Bereich,
- 2) durch Sickerwasser benetzt,
- 3) Gipsausblühungen,
- 4) Epsomitausblühungen,
- 5) markante Sickerwasserstellen.

Witterung am 31.1.79: trockener Neuschnee; 31.3.79: Regen; 1.6.79: trocken und warm; 1.2.80: Schnee und Regen.

Tabelle 12: Verwitterungsbereiche im Steinbruch Uznaberg

	Beregnete Bereiche	Regengeschützter Bereich mit oberflächlichem Sickerwasser	
		a) Kurzzeitig stark benetzte Sickerwasserstelle	b) Kurzzeitig schwach benetzte Sickerwasserstellen
Exposition	dem direkten Regen sowie direkt abfließendem Regen- und Tropfwasser von Bäumen ausgesetzt.	durch Kluftwasseraustritt relativ häufig benetzt.	durch direkt abfließendes Regen- und austretendes Kluftwasser kurzzeitig schwach benetzt.
Verwitterungserscheinungen	keine	Schalen, Absanden, Krusten und Ausblühungen	Abblättern, Absanden, Krusten und Ausblühungen

a) Kurzzeitig stark benetzte Sickerwasserstelle

Es handelt sich um einen Kluftwasseraustritt, der bei Regen relativ rasch und stark Wasser führt. Diese Stelle wird deshalb häufig (möglicherweise auch während längerer Zeit) und stark benetzt.

Um die vorspringende Felskante im oberen Teil der überspülten Fläche ist eine *Schale* ausgebildet (Fig. 40). Ihre Dicke beträgt im zentralen Bereich um 1 cm, an der Felskante gegen 1.5 cm. Die Schalenoberfläche ist algenbewachsen und intakt. In der wenige mm mächtigen, sandig zerfallenen Lockerzone sind Gips und Magnesiumsulfat als pulverige Ausblühungen auf Rissflächen angereichert. Randlich gegen die Benetzungsgrenze dünnt die Scha-

le aus und geht in *Abbröckeln* und *Absanden* über. – Nach gleichmässiger Benetzung trocknet die Schale oberflächlich rascher aus als ihre Umgebung.

Im unteren Teil ist die überspülte Fläche schwach absandend und abbröckelnd. Entlang der Benetzungsgrenze bilden sich gegen 1 mm dicke, weisse *Gipskrusten*, die nach aussen in *Gipsausblühungen* übergehen. Es schliesst der stark absandende Bereich mit kurzzeitig schwach benetzten Sickerwasserstellen an.



Fig. 40: Kurzzeitig stark benetzte Sickerwasserstelle mit Schalen um obere Felskante. Im unteren Bereich Gipskrusten und -ausblühungen (weiss) seitlich der überspülten Flächen, nach rechts in stark sandende Zone übergehend. Uznaberg, 21.7.78.

b) Kurzzeitig schwach benetzte Sickerwasserstellen

Die zahlreichen kleinen Sickerwasserstellen (vgl. Fig. 38) überlappen sich vielfach, weshalb ihre Benetzungsgrenzen meist sehr undeutlich erscheinen.

Die Felsoberfläche *sandet* im ganzen Bereich *gleichmässig und stark ab* (Fig. 41). Sie ist zeitweise von *Gips-* und/oder *Magnesiumsulfat-Ausblühungen* bedeckt (Fig. 39). Magnesiumsulfat, in Form von Epsomit, bildet bis mm-dicke Salzpolster, die sich innert weniger Monate zu *Epsomitkrusten* verdichten (der ganze Bereich liegt im Schatten von Bäumen!) und zuerst in Vertiefungen, dann um vorspringende Kanten abfallen. Die Salze erscheinen während Trockenperioden, wobei keine jahreszeitlichen Tendenzen feststellbar sind.

Eine durchschnittlich stärker und häufiger benetzte Stelle *blättert* um vorspringende Partien in 1 – 2 mm dicken Schichten ab, die darunterliegende Felsoberfläche ist von Gips- und Epsomitausblühungen bedeckt. Die Blätter trocknen nach einer Benetzung rascher aus als ihre Umgebung.



Fig. 41: Kurzzeitig schwach benetzte Sickerwasserstellen (Uznaberg). Durch gleichmässig starkes Absanden der Felsoberfläche stehen Gerölle vor und werden Zweispitzkerben verwischt (unten). Ausblühungen (weiss) werden durch austretendes Kluftwasser (Zentrum) wieder gelöst. Mitte links Kohleschmitzen, Probenahmestelle W 12, 3.1.80.

6.4 Ergänzende Beobachtungen in weiteren Aufschlüssen

6.4.1 Chatzenrietli

Der aufgelassene Steinbruch Chatzenrietli liegt im heute bewaldeten Abbaugbiet Granitischer Sandsteine nördlich der Schiffswerft von Oberbollingen. Die geologische Situation entspricht derjenigen von Uznaberg. Eine ca. 10 m mächtige, steil NNW-fallende Sandsteinbank wurde von E und W her bis auf eine rund 15 m starke Zwischenwand abgebaut, an der lokal dm-mächtige, intensiv rostende Kohleschmitzen auftreten. Wahrscheinlich wegen des hohen Salzgehaltes im Stein – von Steinhauern als "salpeterndes Lager" bezeichnet – dürfte der Abbau an dieser Stelle noch im letzten Jahrhundert eingestellt worden sein.

Fig. 42 zeigt einen Ausschnitt der nach W exponierten Steinbruchwand. Der stark absandende, mit Gips- und Magnesiumsulfat-Ausblühungen bedeckte, regengeschützte Bereich wird flankiert von beregneten, moosbedeckten Bereichen ohne deutliche Verwitterungserscheinungen. An sicker- und tropfwasserbenetzten Flächen innerhalb des regengeschützten Bereiches bildeten sich Schalen.

An der gegenüberliegenden, nach E exponierten Steinbruchwand ist eine regengeschützte Stelle von einer mehrere mm dicken *Gipskruste* bedeckt (Fig. 43). Ihre höckerig-feinverästelte Oberfläche und die wulstige Ablösung von der Unterlage erscheinen sehr ähnlich ausgebildet wie bei dicken Gipskrusten in städtischer Umgebung (vgl. Fig. 13); im Unterschied zu diesen ist ihre Farbe jedoch weiss.

6.4.2 Fuchsloch

Der Steinbruch Fuchsloch bei Staad liegt geologisch im Niveau der "unteren Plattensandsteine" unter der "oberen Seelaffe" (BUECHI & HOFMANN, 1945). Die Schichten fallen mit 10° nach N (Fallazimut 350°). Siltige, glimmerreiche Lagen im Sandstein bewirken seine ausgesprochen plattige Absonderung im dm-Bereich. Gelegentlich sind rostende Kohleschmitzen eingestreut. An der frisch abgebauten Wand sind cm-mächtige, hellere und dunklere Lagen erkennbar, die seitwärts im m-Bereich auskeilen (Fig. 44). Die dunkleren Zonen sind gegenüber den hellen etwas reicher an dunklen Gemengteilen (vorwiegend Chlorit, Glaukonit und Glimmer, total um 5%).



Fig. 42: Chatzenrietli. Regengeschützter Bereich (hell) mit Ausblühungen bedeckt und stark absandend. Beregnete und tropfwasserbenetzte Stellen (z.Z. schneebedeckt) sind algenbewachsen und oberflächlich intakt. 3.1.80.

Nach einer gleichmässigen Benetzung der Wand (sie ist W- und regenexponiert) bleiben einzelne *Lagen* länger feucht als die unmittelbar angrenzenden Schichten. Hier bilden sich beim Austrocknen *Magnesiumsulfat-Ausblühungen*, wobei die Felsoberfläche stark absandet: An einer vier Monate alten Abbaufäche entstand bereits eine 2 mm tiefe, lockere Schicht aus Sand, vermischt mit Epsomit. Es ist keine deutliche Beziehung zwischen den magnesiumsulfatreichen Lagen und der petrographisch bedingten Hell-Dunkel-Streifung erkennbar. (An einer Probe des frischen Sandsteins wurden die S-Gehalte bestimmt. Dabei war der wasserlösliche S mit 150 ppm deutlich tiefer als der Total-S von 500 ppm, was auf feinverteilten Pyrit hinweist.)

Die seit einigen Jahrzehnten bewitterten Abbaustellen im westlichen Teil des Steinbruches zeigen an vorspringenden, regen- und sonnenexponierten Flächen um 1 cm dicke Schalen. Regengeschützte, von Sicker- und Tropfwasser befeuchtete Flächen sanden stark ab (die Tendenz zum Abblättern ist hier schwächer als in Martinsbrugg). Sie sind von Gips- und Magnesiumsulfat-Ausblühungen bedeckt. Unmittelbar unter rostenden Kohleschmitzen entstanden lokal 1 mm dicke Gipskrusten.

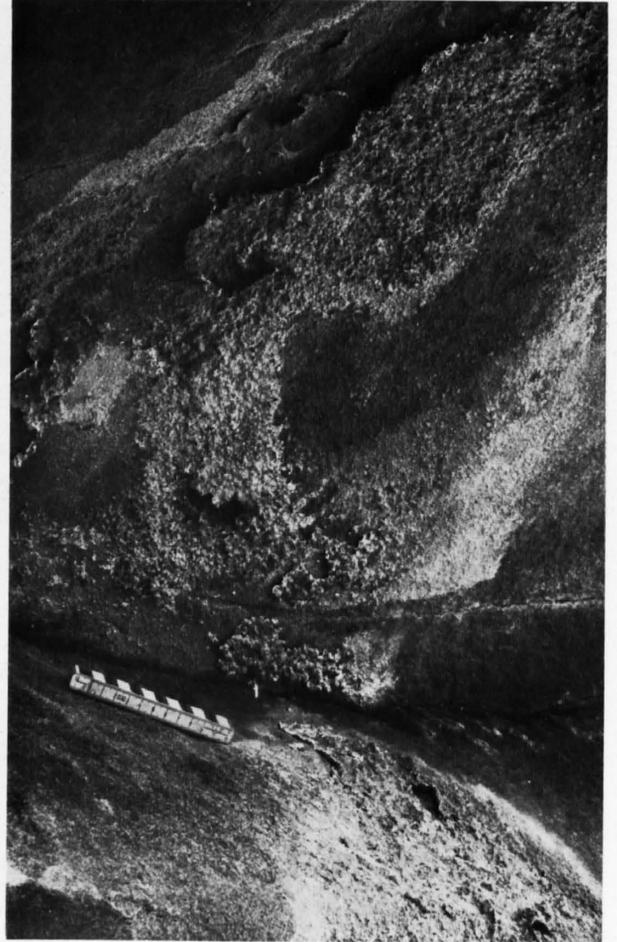
6.5 Zusammenfassung

Die an Bauwerken in städtischer Umgebung typischen Verwitterungserscheinungen der Granitischen Sandsteine und Plattensandsteine finden sich in Naturaufschlüssen, in denen Sulfate angereichert sind, analog ausgebildet und exponiert: In beregneten bzw. kurzzeitig stark benetzten Bereichen, die oberflächlich rasch austrocknen, entstehen Schalen. In regengeschützten Bereichen,

die von oberflächlichen Sickerwässern, Berg- und Bodenfeuchte beeinflusst werden, bilden sich Abblättern, Abbröckeln, Absanden, Gips- und Epsomitkrusten sowie Ausblühungen von Gips, Magnesiumsulfat und Natriumsulfat. Während Gipskrusten in städtischer Umgebung dunkel bis schwarz erscheinen, sind sie in Naturaufschlüssen weiss. Die Zellenverwitterung zeichnet sich durch verstärktes Absanden in schattigen Vertiefungen aus, wo Magnesiumsulfat häufiger und langzeitiger oberflächlich angereichert ist als an umgebenden Felsrippen. Die Sulfatanreicherungen sind meist auf pyrithaltige Kohleschmitzen im umgebenden Felsverband zurückzuführen, können aber auch im frischen, scheinbar homogenen Sandstein eingelagert sein.



a



b

Fig. 43: Gipskrusten im Chatzenrietli (2.8.79).

- a) Am Felsüberhang ist der Bereich zwischen zwei Sickerwasserstellen von hellen Gipskrusten bedeckt.
- b) Detail der mehrere mm dicken Krusten. Sie lösen sich wulstig von der Unterlage ab.



Fig. 44: Fuchslotch. Ansicht der Abbaustelle von W (Aufnahme 13.6.78). In der zweitobersten Stufe schichtparallel angeordnete Magnesiumsulfat-Ausblühungen als helle Striemen erkennbar. Unmittelbar darüber erscheinen einzelne chloritreichere Streifen etwas dunkler.

7. Die typischen Verwitterungserscheinungen

7.1 Einleitung

In den Kapiteln 5 und 6 wurden die Verwitterungserscheinungen vor allem unter dem Aspekt ihres örtlichen Auftretens an Bauwerken und in Naturaufschlüssen beschrieben. Sie wurden deshalb in Gruppen nach bestimmten Verwitterungsbereichen zusammengefasst. Nun werden die einzelnen Erscheinungen, nämlich Schalen, Abblättern und Abbröckeln, Aufblättern, Absanden, Krusten und Ausblühungen, generell und im Zusammenhang beschrieben. Neben der Charakterisierung der Verwitterungsformen sind die mineralogischen und strukturellen Veränderungen sowie die Verteilung der Sulfate im Verwitterungsprofil wichtig. Dazu wurden die gewonnenen Bohrkerne petrographisch untersucht und chemisch analysiert. An einzelnen Proben werden Beziehungen zwischen beobachtetem Verwitterungsverhalten, Art der Sulfatanreicherung und Porosität festgestellt und damit einige Resultate der Porenuntersuchungen (Kap. 8) vorweggenommen.

7.2 Schalen

7.2.1 Ausbildung

Die Schalen bestehen aus einer weniger als 1 mm bis ca. 20 mm mächtigen, oberflächenparallelen, oberflächlich scheinbar intakten Gesteinsschicht, die sich durch eine Lockerzone vom Gesteinskern abhebt (u.a. Fig. 6, 7 und 31). Die Schalenbildung ist in allen Variationen besonders auffallend an Granitischen Sandsteinen. Bei Plattensandsteinen (und anderen Sandsteinen) kommt sie, wenn auch weniger ausgeprägt, ebenfalls vor.

Oberfläche und äusserste Gesteinszone: Die Schalenoberfläche ist "gewaschen" (Exposition: beregnete und periodisch überspülte Bereiche!) und erscheint intakt; ursprüngliche Oberflächenstrukturen sind nach vielen Jahrzehnten scharfkantig erhalten (Fig. 31). Beim Granitischen Sandstein verfärbt sie sich innert weniger Jahre bräunlich, beim Plattensandstein nach sehr viel längerer Zeit dunkler braungrün (DE OUERVAIN, 1979b). Schalen sind an Bauwerken häufig, in Naturaufschlüssen praktisch immer algenbewachsen. Am Hauptbahnhof und der Hauptpost sind Schalenoberflächen rostbraun verfärbt, was vorwiegend auf anfallenden Eisenstaub durch Bahn- und Tramverkehr zurückzuführen ist. Die Oberflächen erscheinen hier stark porös und sind in einem langsamen Zerfall begriffen: Am Hauptbahnhof stehen harte Gerölle in Granitischen Sandsteinen um 1 – 2 mm von der umgebenden Steinoberfläche vor, während weiche Einschlüsse (z.B. Mergelgerölle) ausgewaschen wurden. Daraus kann beim Granitischen Sandstein in Regenexpositionen und städtischer Umgebung mit einem oberflächlichen Abtrag von rund 1 – 2 mm/100 Jahre gerechnet werden. In einem Dünnschliff (Fig. 45) sind Kornfugen und poröse Gesteinskomponenten (Feldspäte und kryptokristalline Körner) bis etwa 1 mm Tiefe rostbraun verfärbt. Calcit und Dolomit sind im äussersten mm bis auf Relikte vollständig gelöst und bis 5 mm Tiefe deutlich angelöst (Fig. 46). Feldspatkörner sind im äussersten mm z.T. stark korrodiert, einzelne erscheinen jedoch frisch. Chertkörner zeigen ebenfalls Auflösungserscheinungen.

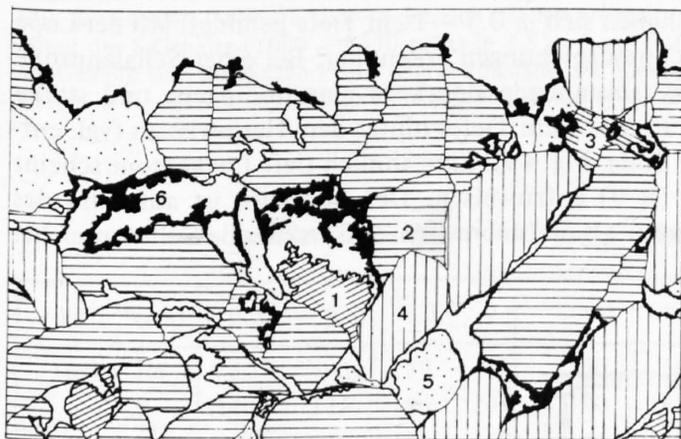


Fig. 45: Querschnitt durch eine Schalenoberfläche im Dünnschliff (Granitischer Sandstein, Probe H 53, Hauptbahnhof S-Fassade).

- 1) Calcit und Dolomit,
- 2) Feldspäte und feldspatreiche Gesteinsbruchstücke sowie
- 3) Chert sind deutlich angelöst.
- 4) Quarz und
- 5) übrige Gesteinsbruchstücke, Nebengemengteile und Tonmineralzement sind ohne Auflösungserscheinungen.
- 6) Amorphes Eisenhydroxid.

Weiss: Poren. Bildbreite 2 mm.



Fig. 46: REM-Aufnahme von ange-löstem Calcit (EDAX-Bestimmung) im Bereich der Schalenoberfläche (Probe H 53, vgl. Fig. 45). Seine Oberflächenbeschaffenheit entspricht den im Mikroskop beobachteten Auflösungsformen. Bildbreite 50 μm .

An Schalen in Naturaufschlüssen wird demgegenüber nur eine schwache Calcitlösung beobachtet; bei einer regenexponierten Schale in Martinsbrugg (Fig. 31) reicht sie jedoch bis knapp 1 cm tief (vgl. Fig. 71 und 72). Bei Plattensandsteinen ist der oberflächliche Zerfall oft stärker als bei Granitischen Sandsteinen und kann in leichtes Absanden überführen. – Anzeichen einer Stoffzufuhr fehlen in den untersuchten Schalen. Sie unterscheiden sich damit wesentlich von sogenannten "Diffusionsschalen" (KIESLINGER, 1932; DE BEAUCOURT & JATON, 1975).

Lockerzone: Sie besteht bei dünnen (um 1 – 3 mm) Schalen aus einem oberflächenparallelen Riss mit absandenden Flächen. Bei dicken Schalen bildet sich meist eine Serie von Rissen mit einem Hauptriss in 0.5 – 2 cm Tiefe, der die Schale vom Gesteinskern trennt. Die mehrere mm bis 1 cm mächtige Lockerzone zerfällt dabei in schuppige Bröckchen und Sand, der mit weissen, pulverigen Gipsaggregaten vermengt ist. Auflösungserscheinungen fehlen in der Lockerzone. Fig. 47 zeigt ein Beispiel von beginnender Schalenbildung: Deutliche, aber nicht zusammenhängende Risse sowie Schwärme von Haarrissen haben sich in 0.5 – 1 cm Tiefe gebildet. Mit der Lupe sind auf Rissflächen weisse, punktförmige Gipsausblühungen erkennbar. Bei einer Schalenprobe vom Hauptbahnhof (H 38) deutet der stark absandende Bohrkern eine homogene und starke Auflockerung in einer 4.5 cm breiten Zone (1.5 – 6 cm Tiefe) hinter dem Hauptriss an (vgl. entsprechend hohe Sulfatanreicherung in dieser Zone, Fig. 49). Eine ähnlich tiefe Lockerzone scheint auch eine Schalenprobe von Martinsbrugg (B 9) aufzuweisen: Der Bohrkern ist aufgrund des Ritzwiderstandes bis 6 cm Tiefe deutlich weicher als im Innern (vgl. entsprechende Sulfatanreicherung, Fig. 50).

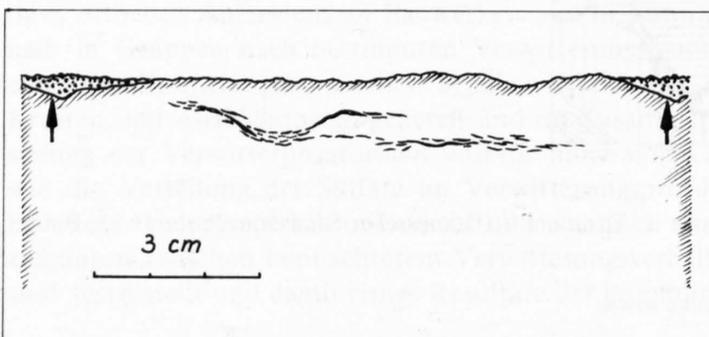


Fig. 47: Beginnende Schalenbildung. Darstellung der Risse auf abgewickelter Mantelfläche des Bohrkernes (Schalenoberfläche oben, Pfeile markieren gleiche Stelle des Umfangs. Probe Q 5B, Granitischer Sandstein, Hauptpost S-Fassade.

Schalendicke und Schalenmodifikationen: In stark berechneten Bereichen (z.B. Fenstergesimse und hochgelegene Mauerflächen in S- und W-Exposition) sind Schalen beider Sandsteintypen um 1 cm dick (0.5 – 1.5 cm, oft gegen 2 cm), wenn auch beim Plattensandstein in der Regel etwas dünner (Fig. 6, 7, 23 und 31). In geschützteren Lagen (schwächer benetzte und/oder langsamer austrocknende Bereiche) bilden sich generell dünnere, häufig um 1 mm dicke Schalen (Fig. 8, 21 und 22). Dünne Schalen gehen in Abblättern oder Absanden über, wobei die Grenze bis in den mm-Bereich scharf sein kann: Vorspringende (stärker benetzte) Höcker der Bearbeitung fallen als dünne "Schalen" ab, während Vertiefungen absanden (Fig. 9 und 10). Derartig partielle Schalenbildung sowie unter 1 mm dicke Schalen wurden nur bei Granitischen Sandsteinen beobachtet. Wie Fig. 20 zeigt, kann die Lockerzone hinter starkem Relief auch eben verlaufen. – Doppelte bis mehrfache Schalen kommen an beiden Sandsteintypen vor, und zwar häufig an horizontalen, stark berechneten Gesimsflächen (Fig. 8 und 23). Mehrfache dünne Schalen leiten in Abblättern über.

7.2.2 Sulfatanreicherung

Wie bereits aus der makroskopischen Beschreibung hervorging, werden Schalen von Sulfatanreicherungen in Form feinsten Gipsausblühungen in der Lockerzone begleitet. Diese Anreicherungen können nun anhand der wasserlöslichen S-Gehalte im Schalenprofil (Bohrkern) quantitativ dargestellt werden. Als Beispiele werden zwei Proben vom Hauptbahnhof (H 24A und H 38A, Lage am Bau s. Fig. 3 und 4) und zwei von Martinsbrugg (B 9A und B 9B, vgl. Fig. 30 und 31) beschrieben. Ein weiteres Profil vom Hauptbahnhof (Probe H 40B, unmittelbar neben H 38A entnommen) zeigt Elementverteilungen in einem analog exponierten Quader ohne Schalenbildung. Allen Profilen ist eine ausgeprägte *Sulfatanreicherung im Innern*, d.h. in 1 – 10 cm hinter der Oberfläche, und eine sehr niedrige Sulfatkonzentration an der Oberfläche gemeinsam.

Probe H 24A (Fig. 48, Tabelle 13): Der Sulfatgehalt (als wasserlöslicher S analysiert) ist maximal bei 1.5 cm Tiefe, d.h. innerhalb der Lockerzone. Dahinter fällt er bis 3 cm steil, dann bis 14 cm Tiefe zunehmend flacher ab (in den Diagrammen ist der Kurvenknick bei 1000 ppm skalabedingt). Sowohl im Innern als auch an der Gesteinsoberfläche ist der S-Gehalt niedrig. Der Total-S-Gehalt (wasserlöslicher und wasserunlöslicher Schwefel) ist in 14 cm Tiefe etwa gleich gross wie der wasserlösliche S-Gehalt, was darauf hinweist, dass der gesamte S-Anteil in wasserlöslicher Form vorliegt. Die mit S zusammengehende Anreicherung von Ca lässt auf die Verbindung Calciumsulfat schliessen, was durch mikroskopischen und mikrochemischen Nachweis von Gips in dieser Zone bestätigt wird (die gemessenen Ca-Werte sind im Bereich der S-Anreicherungen zu niedrig, vgl. Kap. 3.2.1.3). Damit sind aufgrund der S-Gehalte (1000 – 5330 ppm) in 1.5 – 4 cm Tiefe ca. 0.5 – 2.5% Gips angereichert. Die Na-, K- und Mg-Gehalte sind im ganzen Profil relativ konstant und niedrig. (Aufgrund von 8 gemessenen Porengrössenverteilungen in 0 – 13 cm Tiefe ist die Lockerzone hier auf 1 – 3 cm Tiefe beschränkt.)

Tabelle 13: *Element-Verteilungen im Wasserauszug, Probe H 24A*

Tiefe (cm):	0.2	0.8	1.5	2.5	3.2	4	5	6	8	10	12	14
(ppm) Na	50	45	50	55	50	50	50	55	50	60	55	60
K	140	125	190	205	190	180	165	175	165	190	165	180
Mg	70	55	125	150	140	120	100	100	95	90	70	75
Ca	(460)	(420)	(2400)	(650)	(550)	(530)	(370)	(420)	(350)	(350)	(360)	(380)
S	135	95	5330	1540	1270	1000	650	485	350	210	162	155
Total - S												155

(Werte in Klammern zu tief)

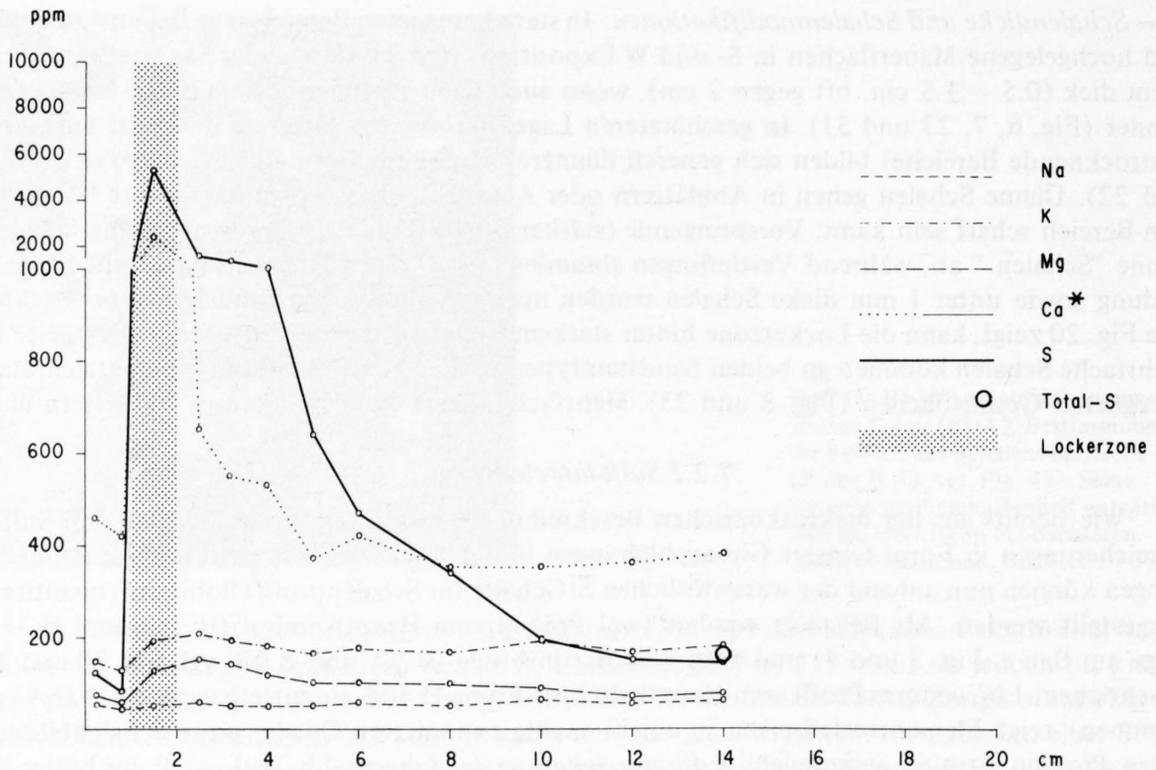


Fig. 48: Element-Verteilungen im Wasserauszug, Probe H 24A (vgl. Tabelle 13). Schale in Granitischem Sandstein, S-Fassade Hauptbahnhof. *Werte bei punktierter Linie zu tief.

Probe H 38A (Fig. 49, Tabelle 14): Die Element-Verteilungen, insbesondere die S- und Ca-Gehalte, sind analog zur Probe H 24A. Das S-Maximum von 2480 ppm bei 2 cm liegt hier unmittelbar hinter dem Hauptriss der Schale (in Fig. 49 als Lockerzone markiert). Die Sulfatanreicherung ist noch breiter als bei Probe H 24A und fällt erst in 5 cm Tiefe unter 1000 ppm S. Im Sand, der sich von der Bohrkernwand ablöst, konnte bis in 5.5 cm Tiefe mikrochemisch reichlich Gips nachgewiesen werden. Auffallend ist der extrem niedrige Sulfatgehalt an der Oberfläche und im Innern. Die Total-S-Gehalte liegen in der Größenordnung des wasserlöslichen S. Die Differenz im Innern weist auf einen möglichen wasserunlöslichen Anteil hin, könnte aber auch durch die grosse Probeninhomogenität, vorgetauscht sein. Der nach innen zunehmende Na-Gehalt weicht von der S-Verteilung stark ab, sodass eine entsprechende Sulfatverbindung ausgeschlossen scheint. Dies gilt auch für die stets geringen K- und Mg-Gehalte.

Tabelle 14: Element-Verteilungen im Wasserauszug, Probe H 38A

Tiefe (cm):	0.2	0.8	1.3	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18
(ppm) Na	70	70	110	150	190	190	270	310	320	360	390	340	390	340
K	165	110	110	120	130	130	220	240	235	220	220	125	220	175
Mg	70	50	80	110	110	80	110	110	80	70	70	50	60	60
Ca	225	235	(275)	(650)	(710)	(700)	(280)	(205)	(160)	(160)	(190)	(225)	(190)	(215)
S	20	35	545	2480	2230	1190	925	695	380	205	145	100	90	90
Total - S	40			2450										160

(Werte in Klammern zu tief)

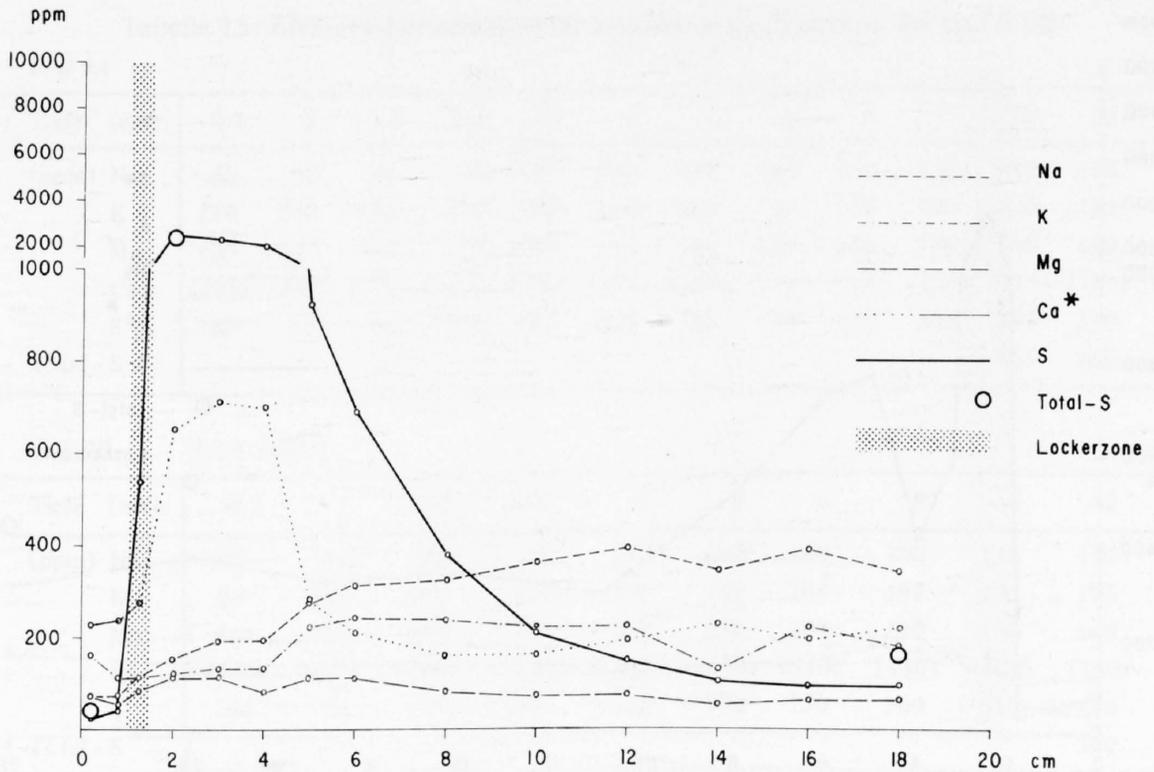


Fig. 49: Element-Verteilungen im Wasserauszug, Probe H 38A (vgl. Tabelle 14). Schale in Granitischem Sandstein, Hauptbahnhof, S-Fassade Aufnahmehalle. *Werte bei punktierter Linie zu tief.

Probe B 9A (Fig. 50a, Tabelle 15a): Die Sulfatanreicherung in und hinter der Lockerzone – mit einem merkwürdigen Zwischentiefl bei 4 cm – entspricht einer mikroskopisch und mikrochemisch identifizierten Gipsanreicherung. Eine derartig doppelte Sulfatanreicherung wurde nur in diesem Profil festgestellt. Ab 11 cm Tiefe ist der S-Gehalt um 350 ppm konstant. Die gegenüber den wasserlöslichen etwas höheren totalen S-Gehalte im Innern deuten einen möglichen Anteil an wasserunlöslichem S an. Die Na-, K- und Mg-Werte sind im ganzen Profil sehr niedrig.

Probe B 9B (Fig. 50b, Tabelle 15b): Die Proben B 9A und B 9B wurden an der gleichen Stelle entnommen: A nach einer längeren Trockenperiode, B nach einer Nassperiode. Während der Sulfatanteil in 6 – 10 cm Tiefe beider Proben gleich verläuft, ist das Maximum bei B um rund 1.5 cm nach innen verschoben.

Diese Einwärtsverschiebung hängt vermutlich mit der Benetzung der Felsoberfläche zusammen. Dementsprechend könnte das Doppelmaximum in A z.B. durch aufeinanderfolgende, starke (tiefe Anreicherung!) bzw. schwache (oberflächennahe Anreicherung!) Benetzungs- und Austrocknungsverhältnisse bedingt sein.

Probe H 40B (Fig. 51, Tabelle 16): Der Quader liegt unmittelbar neben H 38, er weist jedoch keine Schale auf, und der entnommene Bohrkern ist durchgehend kompakt: Wie bei Schalen-Profilen fehlt Sulfat an der Oberfläche und ist im Innern stark angereichert. Verglichen mit H 38A ist das S-Maximum niedriger und um ca. 2 cm nach innen verschoben. Die negativen Differenzen zwischen Total-S und wasserlöslichem S in 6 cm und 8 cm Tiefe sind auf die Probeninhomogenität zurückzuführen.

Wie Fig. 63 zeigt, ist die effektive Porosität dieser Probe relativ hoch und ihre Makroporosität 2 – 3 mal grösser als bei H 24A und H 38A. Es wird vermutet, dass die gegenüber H 24A und H 38A abweichende S-Verteilung im Profil wie auch die ausbleibende Schalenbildung mit der grösseren Makroporosität dieser Probe zusammenhängen (Kap. 8.1.1).

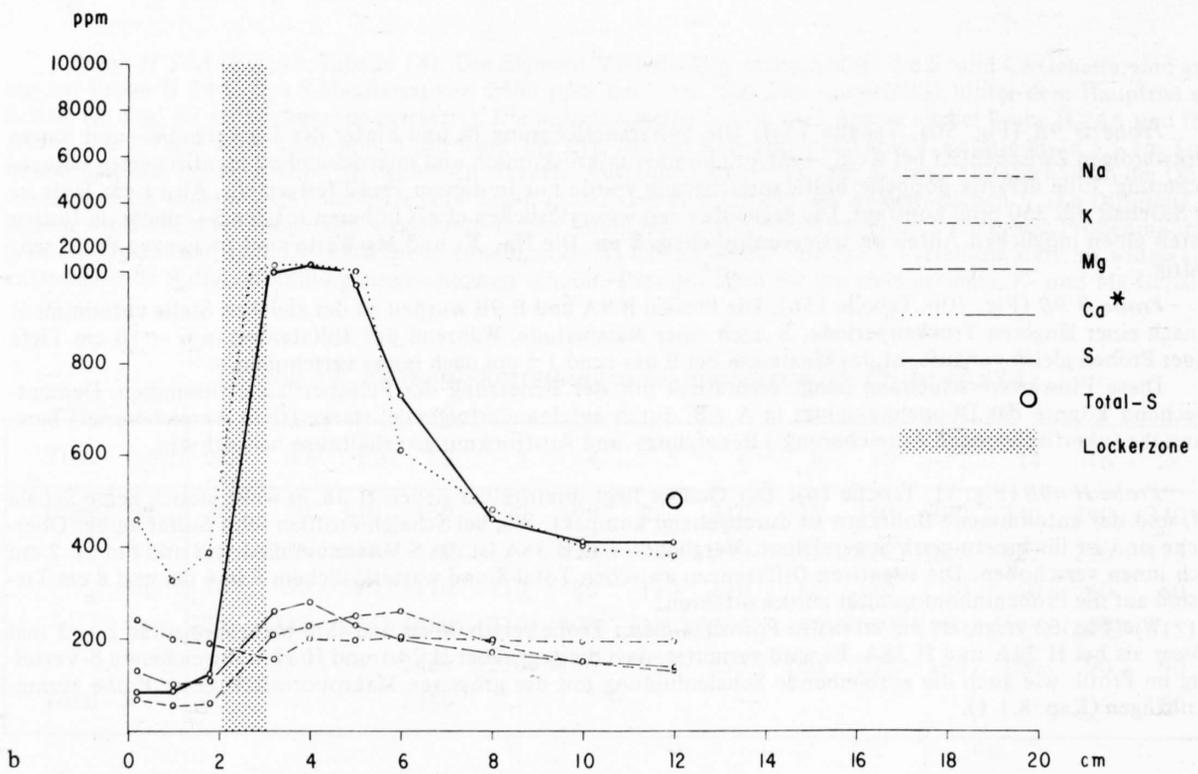
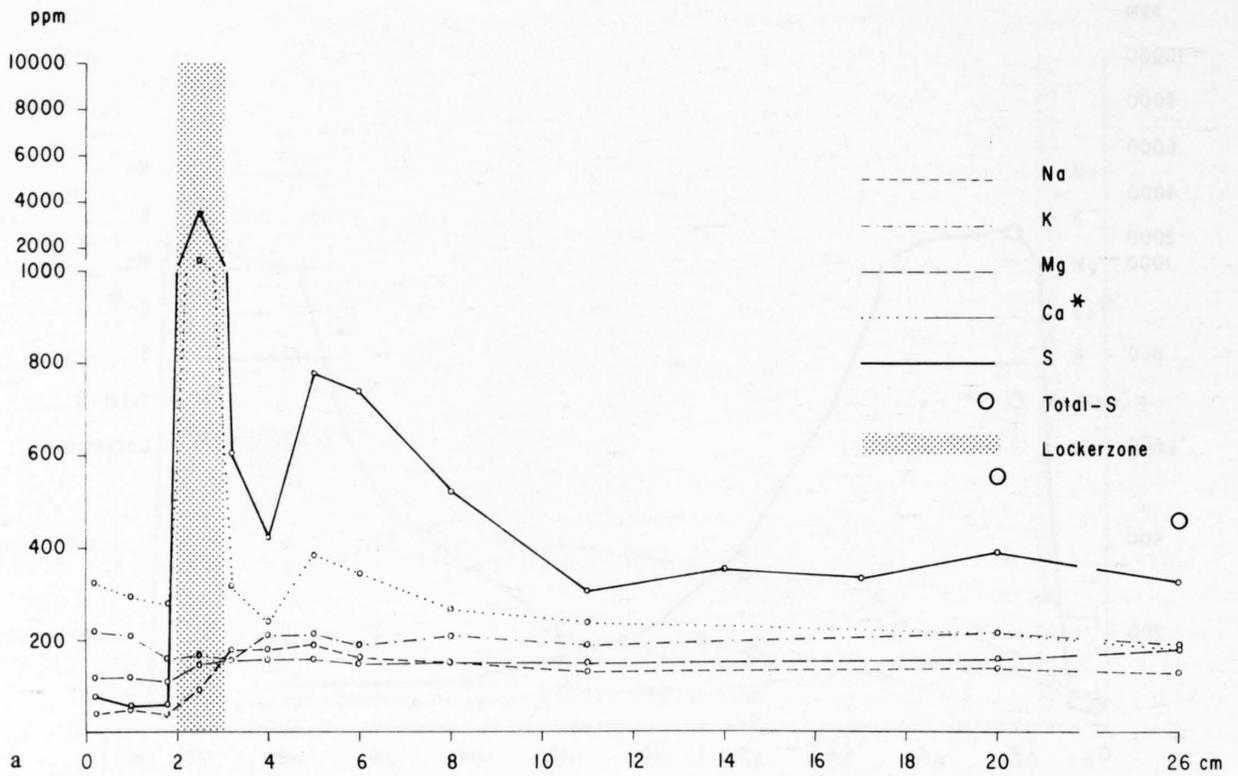


Fig. 50: Element-Verteilungen im Wasserauszug, Probe B 9 (vgl. Tabelle 15). Schale in Plattensandstein, Martinsbrugg (vgl. Fig. 31). Probe B 9A (a) wurde nach einer längeren Trockenperiode, Probe B 9B (b) an der gleichen Stelle nach einer Nassperiode entnommen. *Werte bei punktierter Linie zu tief.

Tabelle 15: Element-Verteilungen im Wasserauszug, Proben B 9A und B 9B

a) B 9A

Tiefe (cm):	0.2	1	1.8	2.5	3.2	4	5	6	8	11	20	26
(ppm) Na	40	50	40	90	180	180	190	160	150	130	140	130
K	220	210	165	170	160	210	215	190	210	190	220	190
Mg	120	120	110	150	160	160	160	150	150	150	160	180
Ca	(325)	(295)	(275)	(1550)	(320)	(235)	(385)	(345)	(265)	(235)	(215)	(185)
S	80	60	60	3590	605	420	780	740	525	305	395	330
Total - S											565	460

b) B 9B

Tiefe (cm):	0.2	1	1.8	3.2	4	5	6	8	10	12
(ppm) Na	70	55	60	210	230	250	260	190	150	130
K	240	200	190	155	200	195	205	195	195	195
Mg	130	100	110	260	280	230	200	170	150	140
Ca	(460)	(330)	(390)	(1310)	(1340)	(1030)	(610)	(480)	(400)	(380)
S	85	85	125	1080	1240	970	730	560	410	410
Total - S										500

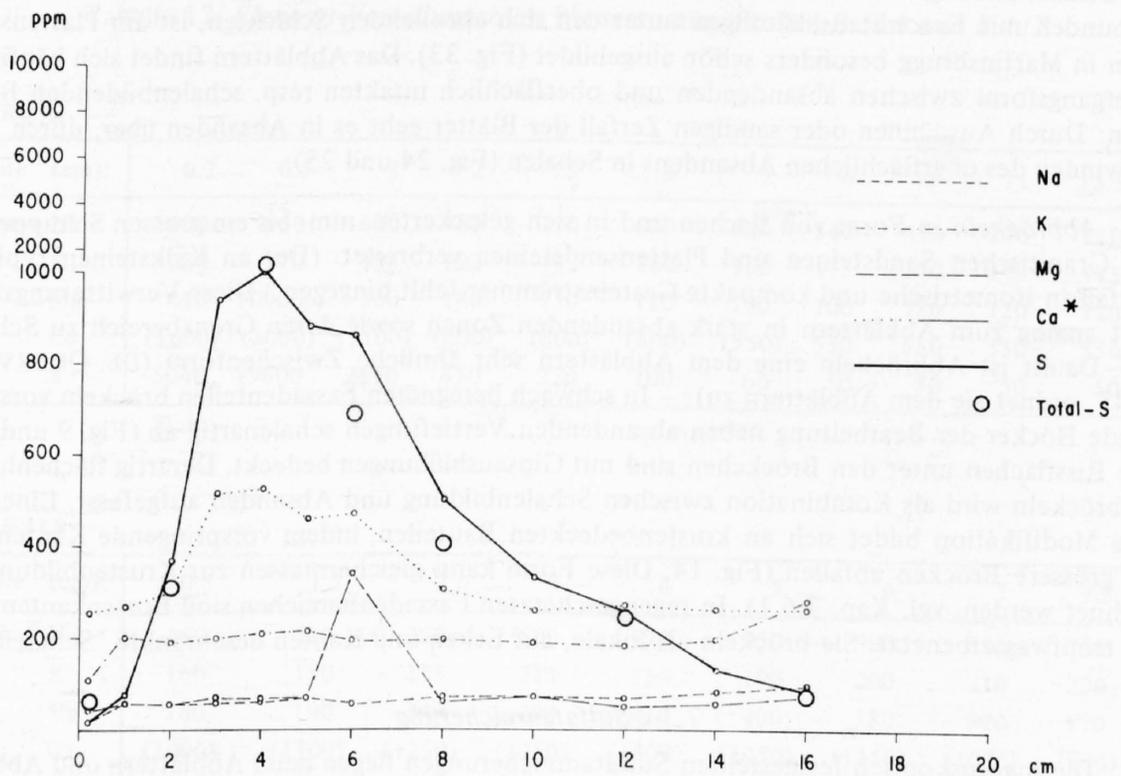


Fig. 51: Element-Verteilungen im Wasserauszug, Probe H 40B (vgl. Tabelle 16). Quader ohne Schalenbildung unmittelbar neben solchen mit Schalen (vgl. H 38). Granitischer Sandstein, Hauptbahnhof, S-Fassade Aufnahmehalle. *Werte bei punktierter Linie zu tief.

Tabelle 16: Element-Verteilungen im Wasserauszug, Probe H 40B

Tiefe (cm):	0.2	1	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16.3
(ppm) Na	20	60	55	55	60	70	55	70	70	65	80	95
K	110	200	190	200	215	215	195	195	190	185	200	280
Mg	45	60	60	70	70	70	340	60	70	50	55	70
Ca	255	(270)	(300)	(520)	(530)	(460)	(470)	(300)	(265)	(270)	(265)	(265)
S	20	80	370	945	1010	880	855	500	335	255	125	85
Total - S	60		310		1050		685	400		235		75

7.3 Abblättern und Abbröckeln

Die Verwitterungsformen des Abblätterns und Abbröckelns werden wegen ihrer ähnlichen Ausbildung und ihrem analogen Auftreten bezüglich der übrigen Verwitterungsformen zu einer Gruppe zusammengefasst.

7.3.1 Ausbildung

Abblättern in Form dünner, oberflächenparalleler Gesteinsblätter, die sich einzeln oder übereinanderliegend ablösen, sind beim Plattensandstein häufiger als beim Granitischen Sandstein. Die Dicke der einzelnen Schichten beträgt minimal eine Kornschicht, maximal 1 mm (Plattensandstein, Fig. 33) bis 3 mm (Granitischer Sandstein, Fig. 26). Das Abblättern ist – im Unterschied zur Schalenbildung – mit oberflächlich starkem Absanden kombiniert. Flächenhaftes Abblättern, verbunden mit Epsomitausblühungen unter den sich abrollenden Schichten, ist am Plattensandstein in Martinsbrugg besonders schön ausgebildet (Fig. 33). Das Abblättern findet sich häufig als Übergangsform zwischen absandenden und oberflächlich intakten resp. schalenbildenden Bereichen: Durch Ausdünnen oder sandigen Zerfall der Blätter geht es in Absanden über, durch Verschwinden des oberflächlichen Absandens in Schalen (Fig. 24 und 25).

Abbröckeln in Form von flachen und in sich gelockerten, mm- bis cm-grossen Schuppen ist bei Granitischen Sandsteinen und Plattensandsteinen verbreitet. (Der an Kalksteinen typische Zerfall in isometrische und kompakte Gesteinstrümmer fehlt hingegen.) Diese Verwitterungsform tritt analog zum Abblättern in stark absandenden Zonen sowie deren Grenzbereich zu Schalen auf. Damit ist Abbröckeln eine dem Abblättern sehr ähnliche Zwischenform (DE QUERVAIN, 1945, ordnet sie dem Abblättern zu). – In schwach beregneten Fassadenteilen bröckeln vorspringende Höcker der Bearbeitung neben absandenden Vertiefungen schalenartig ab (Fig. 9 und 10). Die Rissflächen unter den Bröckchen sind mit Gipsausblühungen bedeckt. Derartig flächenhaftes Abbröckeln wird als Kombination zwischen Schalenbildung und Absanden aufgefasst. Eine weitere Modifikation bildet sich an krustenbedeckten Bauteilen, indem vorspringende Kanten u.ä. als grössere Brocken abfallen (Fig. 14. Diese Form kann gleichermassen zur Krustenbildung gerechnet werden, vgl. Kap. 7.6.1). In regengeschützten Fassadenbereichen sind Bossenkanten häufig tropfwasserbenetzt. Sie bröckeln als lokale, auf Ecken und Kanten beschränkte "Schalen" ab.

7.3.2 Sulfatanreicherung

Die makroskopisch festgestellten Sulfatanreicherungen liegen beim Abblättern und Abbröckeln unmittelbar hinter der Oberfläche, d.h. an der Absonderungsfläche zwischen dem Gesteinskern und den Blättern bzw. Bröckchen. Abblättern ist jedoch zugleich mit Absanden und damit oberflächlichen Sulfatanreicherungen verbunden. Beim Abbröckeln krustenbedeckter Relieftteile

ist die oberflächliche Sulfatanreicherung in Form von Krusten ebenfalls offensichtlich. Die Sulfatverteilungen in den drei analysierten Profilen entsprechen dieser kombinierten Anreicherung: Die *Höchstkonzentrationen* liegen wie bei Schalen *im Innern*, im Unterschied zu diesen ist jedoch die *Gesteinsoberfläche* ebenfalls *sulfatangereicht*. Die Proben B 11A und B 11B stammen von einem abblätternen Bereich in Martinsbrugg (vgl. Fig. 33). Probe H 46A wurde in einem flächenhaft abbröckelnden Bereich am Hauptbahnhof entnommen.

Probe B 11A (Fig. 52a, Tabelle 17a): Die maximalen S-, Mg- und Ca-Anreicherungen in 0.5 cm Tiefe entsprechen den Ausblühungen von Epsomit vermischt mit Gips unter den sich ablösenden Blättern. Dahinter fällt der S-Gehalt sehr steil ab und erreicht in 6 cm Tiefe ein konstantes Grundniveau von 50 ppm. Die Mg- und Ca-Kurven verhalten sich analog. Na ist an der Oberfläche ebenfalls stark angereichert, fällt aber im Innern viel flacher ab als S. Deshalb scheint eine Natriumsulfat-Verbindung eher ausgeschlossen. K ist im ganzen Profil konstant und niedrig. Das hohe Ca-Grundniveau (550 ppm) ist auf Calcitlösung zurückzuführen (vgl. 3.2.1.1).

Probe B 11B (Fig. 52b, Tabelle 17b) wurde an der Felsrippe unmittelbar neben B 11A entnommen: Im Gegensatz zu A sind die S- und Ca-Anreicherungen hier sehr breit und tief liegend bei verhältnismässig niedrigen Mg-Gehalten. Die S-Gehalte liegen in 0 – 9.5 cm Tiefe über 1000 ppm mit einem Maximum von 3780 ppm bei 4 cm (entspricht ca. 2% Gips, der in Körnerpräparaten mikrochemisch reichlich nachgewiesen werden konnte. Wie Porengrößenverteilungen in Fig. 71 zeigen, geht dieser breiten Sulfatanreicherung eine entsprechende Auflockerung parallel: Der Bohrkern ist im äussersten Bereich stark und in 7 cm Tiefe gegenüber dem Innern bereits deutlich aufgelockert.) Na ist zwischen 2 cm und 9.5 cm Tiefe ebenfalls stark angereichert, wobei die Zuordnung zu einer bestimmten Verbindung fraglich bleibt. Wie in A sind die K-Gehalte relativ konstant und niedrig.

Damit wird klar, dass sich Verteilungen mobiler Salze im Felsprofil entsprechend dem Felsrelief auf kürzeste Distanz ändern können: Im zurückversetzten Bereich (Probe A) ist vorwiegend Magnesiumsulfat unmittelbar hinter der Oberfläche, im vorspringenden Bereich (Probe B) dagegen hauptsächlich Calciumsulfat in grösserer Tiefe angereichert.

Tabelle 17: *Element-Verteilungen im Wasserauszug, Proben B 11A und B 11B*

a) *B 11A*

Tiefe (cm):	0.2	0.5	1	2	3	4	5	6	8	11	15.5
(ppm) Na	1000	860	690	780	720	690	620	540	410	270	210
K	250	170	195	190	190	180	160	175	170	170	175
Mg	410	10000	300	180	130	110	100	100	110	120	120
Ca	(1600)	(3000)	(1100)	(600)	(600)	(600)	(550)	550	550	550	550
S	5040	19600	2610	450	220	100	60	50	50	50	50

b) *B 11B*

Tiefe (cm):	0.5	1.5	2	3	4	5	6	7	9.5
(ppm) Na	160	210	380	600	970	950	900	890	730
K	160	150	175	215	250	190	200	210	200
Mg	180	190	240	280	410	400	380	320	170
Ca	(1000)	(1100)	(1250)	(1250)	(1300)	(1250)	(1150)	(1000)	(600)
S	1670	2440	2910	3220	3780	3420	2850	2460	1250

(Werte in Klammern zu tief)

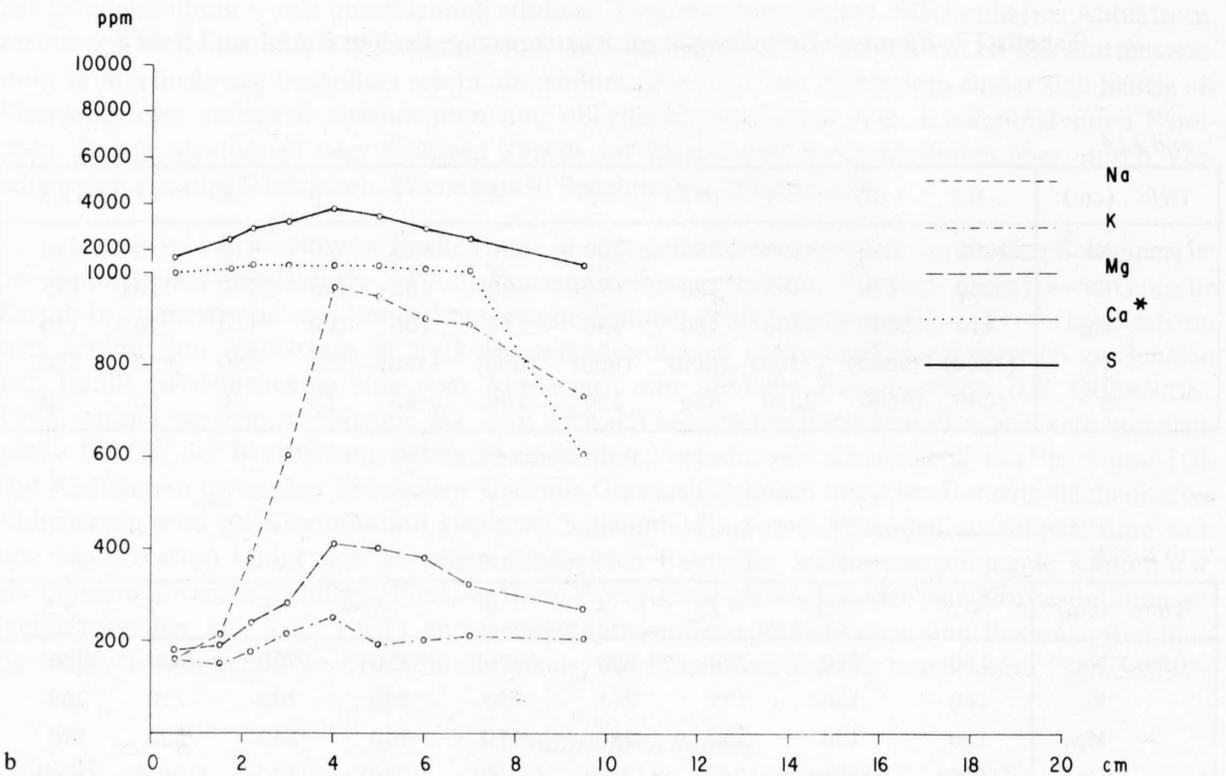
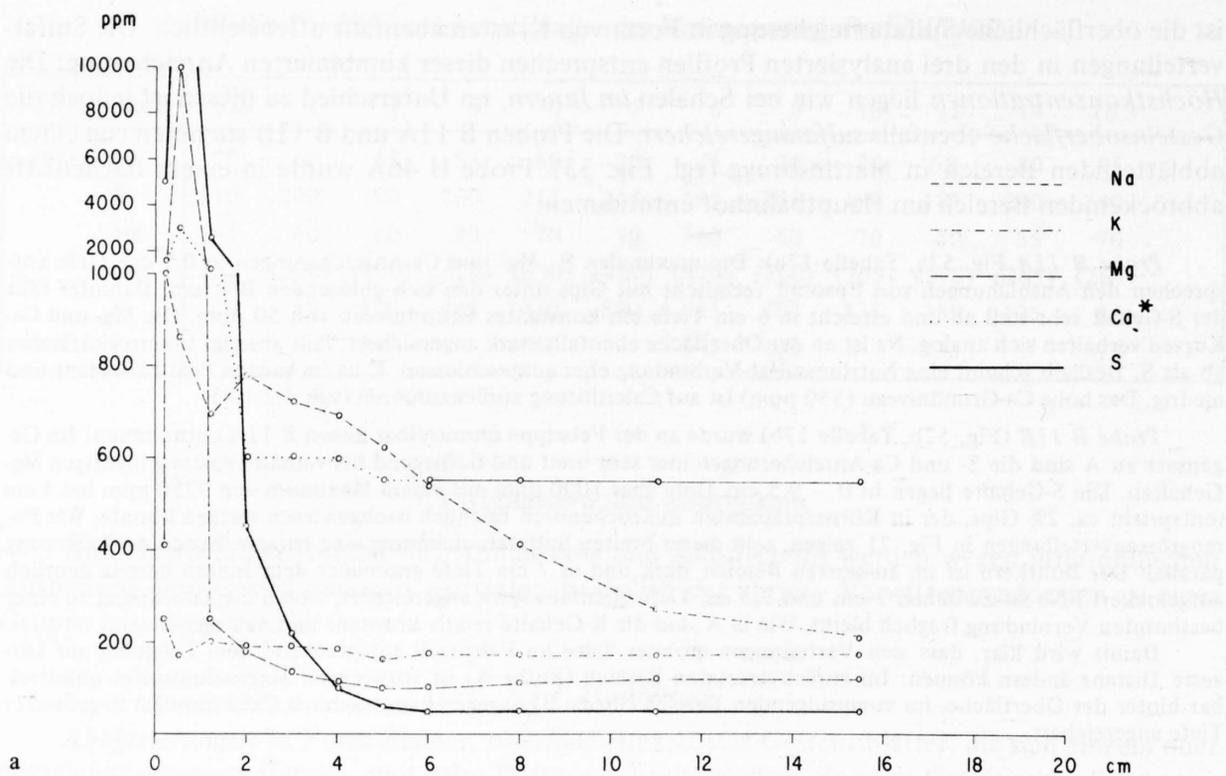


Fig. 52: Element-Verteilungen im Wasserauszug, Probe B 11 (vgl. Tabelle 17). Ablätternder Plattensandstein, Martinsbrugg (vgl. Fig. 33). Probe B 11A (a) wurde an flächenhaft stark abblätternder Stelle, Probe B 11B (b) an der Felsrippe unmittelbar daneben entnommen. *Werte bei punktierter Linie zu tief.

Probe H 46A (Fig. 53, Tabelle 18) stammt von einem intakten Quader unmittelbar neben flächenhaft abbröckelnden oder stark sandenden (vgl. H 47): Sehr hohe S- und Ca-Konzentrationen liegen in 0 – 3 cm Tiefe, während Na, K und Mg nicht angereichert sind. In einem Dünnschliff konnte Gips in Form von 20 – 50 µm grossen Aggregaten in den Zwickelporen festgestellt werden. (Der Gipsnachweis im Dünnschliff beruht auf der morphologischen Übereinstimmung der Aggregate mit Gipsausblühungen im Streupräparat, wo sie nach Zugabe von Salzsäure optisch identifiziert werden können.)

Die Verwitterungsresistenz dieses Quaders scheint analog zu Probe H 40B mit seiner grossen Makroporosität zusammenzuhängen (vgl. Fig. 63): Obwohl nämlich Gips in 1 cm Tiefe stark angereichert ist (5100 ppm S entsprechen ca. 2.5% Gips), füllt er die Makroporen nur teilweise aus.

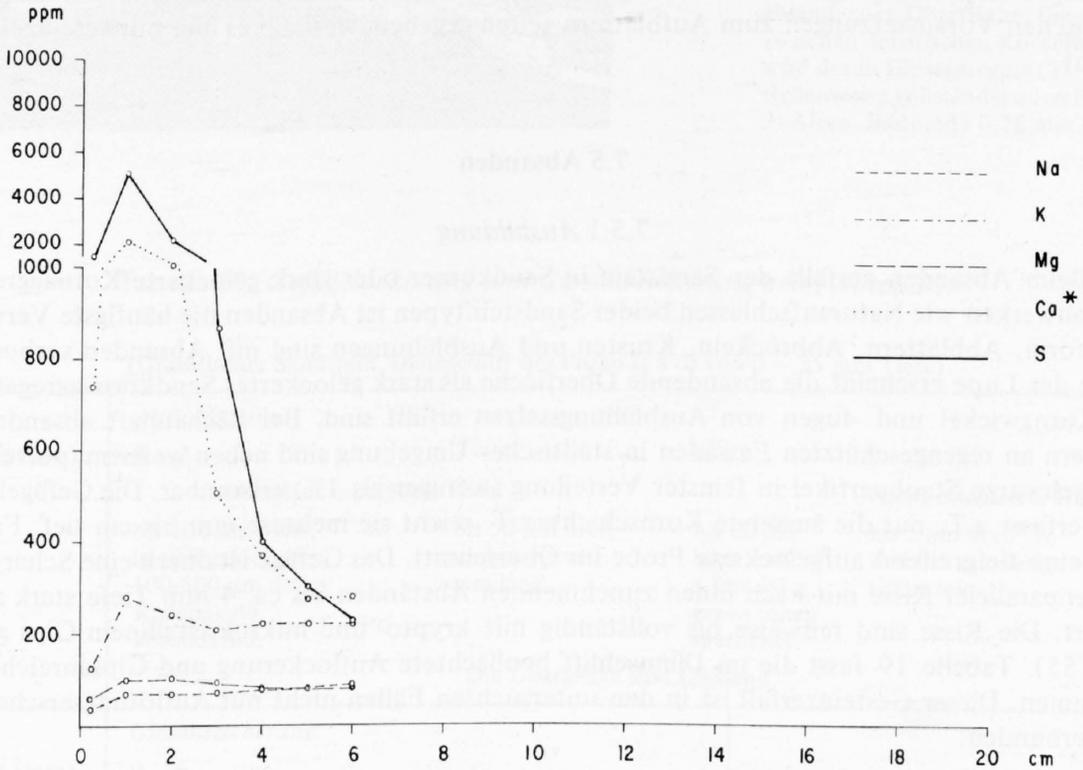


Fig. 53: Element-Verteilungen im Wasserauszug, Probe H 46A (vgl. Tabelle 18). Intakter Quader unmittelbar neben absandenden und -bröckelnden (vgl. H 47A). Granitischer Sandstein, Hauptbahnhof, N-Fassade Aufnahmehalle. *Werte bei punktierter Linie zu tief.

Tabelle 18: Element-Verteilungen im Wasserauszug, Probe H 46A

Tiefe (cm):	0.2	1	2	3	4	5	6
(ppm) Na	40	70	70	70	75	80	85
K	125	280	240	210	220	220	220
Mg	60	100	100	90	80	80	80
Ca	(740)	(2080)	(1070)	(510)	(370)	(275)	(280)
S	1500	5100	2200	870	395	295	225

(Werte in Klammern zu tief)

7.4 Aufblättern

Beim Aufblättern sondern sich mm- bis cm-mächtige Schichten parallel zu Mergellagen und anderen Unstetigkeitsflächen ab. Damit verlaufen die Trennflächen grundsätzlich unabhängig zur Gesteinsoberfläche, was diese Verwitterungsform wesentlich von der Schalenbildung und dem Abblättern unterscheidet. Die Sonderstellung des Aufblätterns kommt auch darin zum Ausdruck, dass es sowohl in oberflächlich benetzten als auch in feuchten (nicht aber trockenen) Bereichen entsteht und je nach Exposition mit weiteren Verwitterungsformen kombiniert sein kann. Wie sein Name andeutet, zeigt der Plattensandstein wegen der häufigen glimmerreich-siltigen Zwischenlagen eine ausgeprägte Aufblätterungstendenz. Beim Granitischen Sandstein sind die petrographischen Voraussetzungen zum Aufblättern selten gegeben, weshalb es hier nur vereinzelt vorkommt.

7.5 Absanden

7.5.1 Ausbildung

Beim Absanden zerfällt der Sandstein in Sandkörner oder stark gelockerte Kornaggregate. An Bauwerken wie Naturaufschlüssen beider Sandsteintypen ist Absanden die häufigste Verwitterungsform. Abblättern, Abbröckeln, Krusten und Ausblühungen sind mit Absanden verbunden. Unter der Lupe erscheint die absandende Oberfläche als stark gelockertes Sandkornaggregat, wobei Kornzwickel und -fugen von Ausblühungssalzen erfüllt sind. Bei flächenhaft absandenden Quadern an regengeschützten Fassaden in städtischer Umgebung sind neben weissem, pulverigem Gips schwarze Staubpartikel in feinsten Verteilung (weniger als 1%) erkennbar. Die Gefügelockering erfasst z.T. nur die äusserste Kornschicht, z.T. reicht sie mehrere mm bis cm tief. Fig. 54 zeigt eine tiefgreifend aufgelockerte Probe im Querschnitt. Das Gefüge ist durch eine Schar oberflächenparalleler Risse mit nach innen zunehmenden Abständen bis ca. 4 mm Tiefe stark aufgelockert. Die Risse sind teilweise bis vollständig mit krypto- und mikrokristallinem Gips gefüllt (Fig. 55). Tabelle 19 fasst die im Dünnschliff beobachtete Auflockerung und Gipsanreicherung zusammen. Dieser Gesteinzerfall ist in den untersuchten Fällen nicht mit Auflösungserscheinungen verbunden.

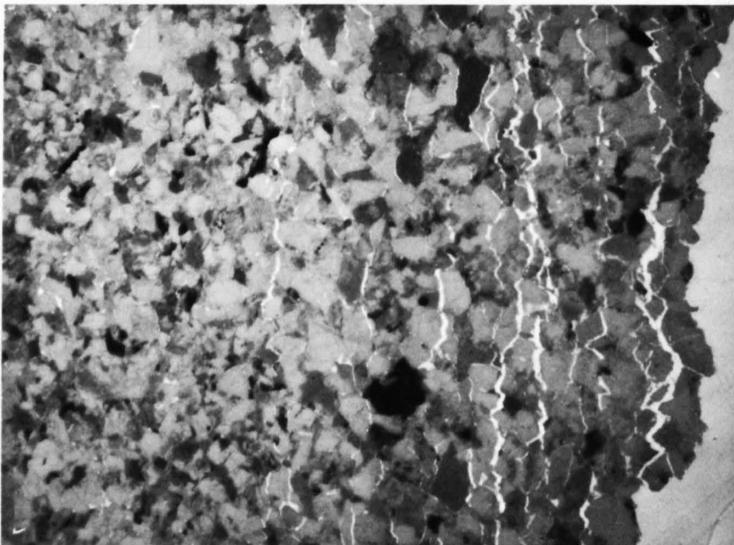


Fig. 54: Querschnitt durch stark absandende Oberfläche (Granitischer Sandstein, Probe H 47B, Hauptbahnhof, N-Fassade Aufnahmehalle). Der im Fluoreszenzlicht gesehene Dünnschliff zeigt gegen aussen (rechts) häufigere und breitere, oberflächenparallele Risse (hell). Bildbreite 7 mm.

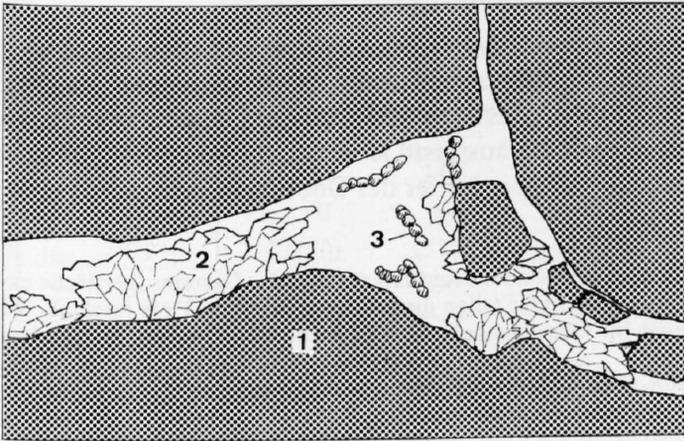


Fig. 55: Dünnschliffzeichnung eines Details aus Fig. 54, 1 mm hinter der absandenden Oberfläche. Ein Riss zwischen detritischen Körnern (1) wird durch Gipsaggregate (2) stellenweise vollständig ausgefüllt. 3) Algen. Bildbreite 0.28 mm.

Tabelle 19: Gefügelockerung und Gipsanreicherung beim Absanden

(Granitischer Sandstein, Dünnschliff der Probe H 47B von 0 – 35 mm Tiefe)

Tiefe (mm)	Auflockerung:	3 – 4	4 – 9	9 – 35
	0 – 3			
	Oberflächenparallele Risse			
	bis 100 μm breit; in sich gelockerte, 100-500 μm dicke Kornpakete absondernd.	bis 50 μm breit und mehrere mm lang.	bis 20 μm breit und 1 mm lang, gegen innen spärlicher.	Nicht orientierte Risse bis 5 μm breit und 0.5 mm lang, vereinzelt.
	Die Übergänge sind fließend.			
Tiefe (mm)	Gipsanreicherung:			
	0 – 6			
	Filzige Aggregate aus 10-50 μm langen Fasern, Risse und Kornzwickel lokal vollständig ausfüllend. Die Gipsaggregate sind an der Oberfläche bis 300 μm gross und häufig, im Innern kleiner und seltener.			
Tiefe (mm)	0 – 35			
	Rundliche, 10-150 μm grosse, kryptokristalline Klümpchen in Rissen und Zwickelporen. An der Oberfläche häufig, gegen innen kleiner und seltener.			

Ein gegebenes Relief wird durch flächenhaft gleichmässiges Absanden gerundet und eingeebnet (Fig. 41). Verstärktes Absanden in Vertiefungen akzentuiert die Unebenheiten und führt zu *Zellenverwitterung* (Fig. 33, 34), einer in Naturaufschlüssen häufigen, an den untersuchten Bauwerken jedoch nur ansatzweise beobachteten Verwitterungsform. An ebenen Mauerflächen können rinnenförmige Vertiefungen ebenfalls durch lokal verstärktes Absanden entstehen, so beispielsweise seitlich Sickerwasserstellen oder im Grenzbereich der Bodenfeuchte. Aushöhlungen und Rinnen zeichnen sich durch stärkere Anreicherungen und/oder häufigere Präsenz von Magnesium- oder Natriumsulfat an der Oberfläche dieser Stellen aus. Die unmittelbar umgebende Mauer- oder Felsfläche aber bleibt – wenn auch z.T. in sehr gelockertem Zustand (vgl. Kap. 7.3.2, Probe B 11B) – oberflächlich erhalten. Hier fehlen entsprechende Ausblühungen.

7.5.2 Sulfatanreicherung

Die beiden analysierten Absandungsprofile zeigen *oberflächliche Sulfatanreicherungen*, was sich mit der makroskopischen Feststellung von Ausblühungen deckt. Beim Absanden, das mit tiefgründiger Auflockerung verbunden ist, reicht die oberflächliche Sulfatanreicherung mehr als 3 cm tief (Probe H 47A, Hauptbahnhof). Bei der auf die äusserste Kornschicht beschränkten Auflockerung hingegen ist der Sulfatgehalt bereits unmittelbar hinter der Oberfläche sehr gering (Probe W 11A, Uznaberg).

Probe H 47A (Fig. 56, Tabelle 20): S und Ca sind in absandendem Material und der Gesteinsoberfläche extrem angereichert (4600 ppm S entsprechen 2.5% Gips). Dahinter fallen diese Kurven bis 3 cm Tiefe rasch ab. Sie entsprechen der bereits erwähnten Gipsanreicherung im Oberflächenbereich (Tabelle 19). Die Na-, K- und Mg-Werte liegen im ganzen Profil tief.

Interessant ist der Vergleich mit Probe H 46A (Fig. 53), die aus einem analog exponierten, aber intakten Quader stammt: Bei H 46A sind die fast identischen Element-Verteilungen wie bei H 47A um rund 1 cm nach innen verschoben. Die unterschiedlichen Anreicherungstiefen wie auch das unterschiedliche Verwitterungsverhalten der beiden Quader könnten mit deren grossen Porositätsdifferenz zusammenhängen (Fig. 63): bei der "anfälligen" Probe H 47 ist die Makroporosität 60% geringer als bei der "resistenten" Probe H 46.

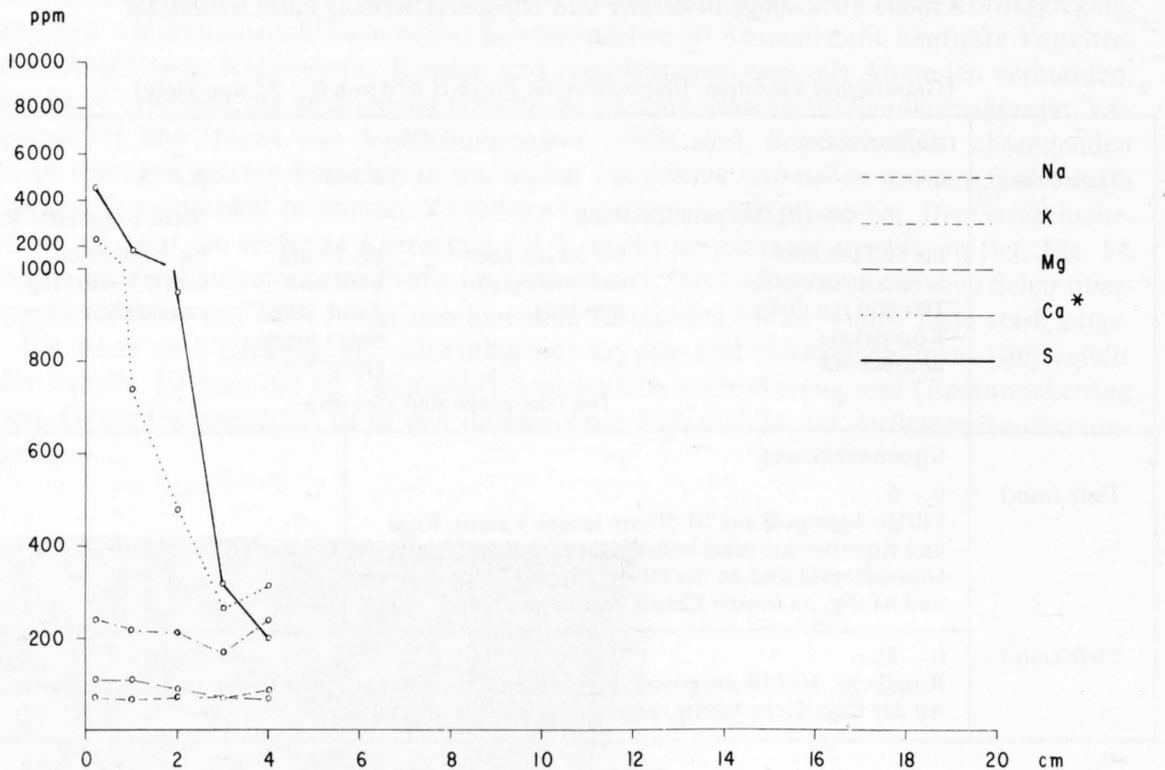


Fig. 56: Element-Verteilungen im Wasserauszug, Probe H 47A (vgl. Tabelle 20). Stark absandender Quader aus Granitischem Sandstein, Hauptbahnhof, N-Fassade Aufnahmehalle. *Werte bei punktierter Linie zu tief.

Tabelle 20: Element-Verteilungen im Wasserauszug, Probe H 47A

Tiefe (cm):	a	b	0.2	1	2	3	4
(ppm) Na	50	80	70	70	75	70	85
K	270	340	240	220	210	170	240
Mg	90	80	110	110	90	70	70
Ca	(2250)	(515)	(2280)	(740)	(480)	(270)	(315)
S	5650	890	4600	1850	950	325	205

a absandendes Material im Bereich der Quaderfuge
 b auf ganzer Quaderfläche gelockerte Bröckchen
 (Werte in Klammern zu tief)

Probe W 11A (Fig. 57, Tabelle 21): Im abfallenden Sand, der mit Gipsausblühungen durchsetzt ist, sind die S- und Ca-Konzentrationen entsprechend hoch. Die darunterliegende Felsoberfläche – sie erscheint kompakt wie der unverwitterte Fels – weist einen sehr niedrigen S-Gehalt auf, der bis 3 cm Tiefe auf ein konstantes Niveau von 20 ppm sinkt. Na, K und Mg sind an der Oberfläche sehr schwach angereichert.

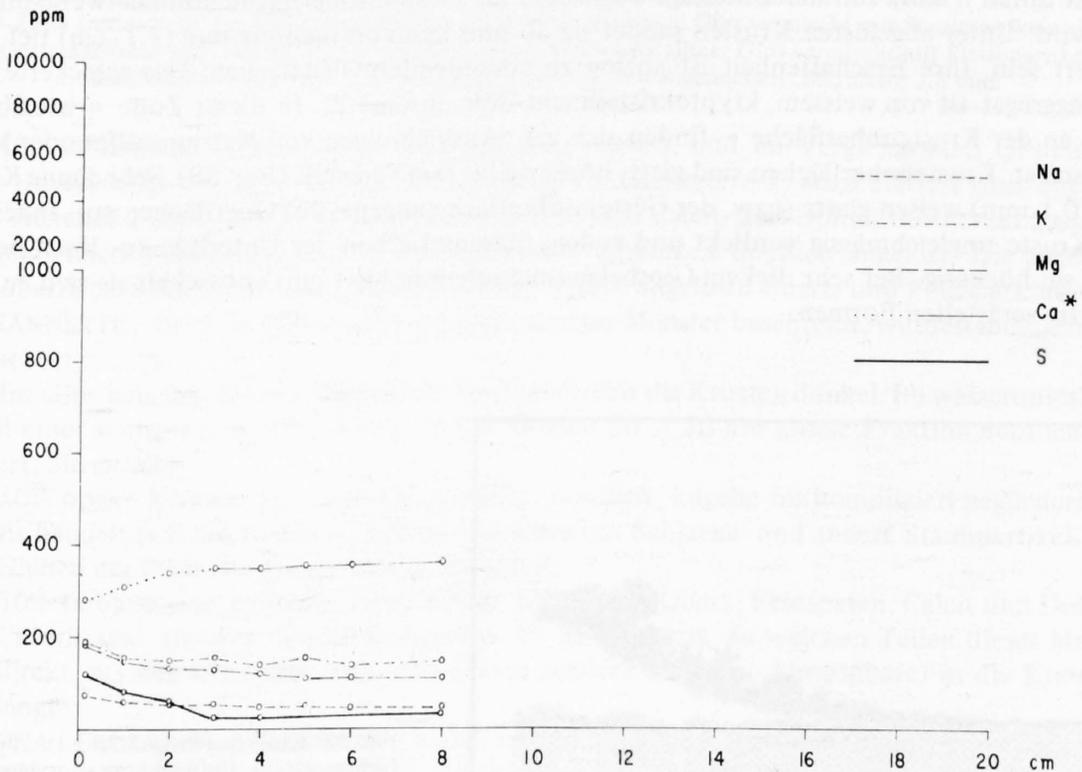


Fig. 57: Element-Verteilungen im Wasserauszug, Probe W 11A (vgl. Tabelle 21). Stark absandende Felsoberfläche in Uznaberg (Granitischer Sandstein). Die Auflockerung ist hier auf die äusserste Kornschicht beschränkt. *Werte bei punktierter Linie zu tief.

Tabelle 21: *Element-Verteilungen im Wasserauszug, Probe W 11A*

Tiefe (cm):	a	0.2	1	2	3	4	5	6	8
(ppm) Na	65	75	60	55	55	50	45	45	45
K	125	190	155	150	155	140	155	140	145
Mg	220	180	150	130	130	120	110	110	110
Ca	(5900)	(280)	(310)	(340)	350	350	355	355	360
S	13800	120	75	55	20	20			20

a absandendes Material

(Werte in Klammern sind zu tief)

7.6 Krusten

7.6.1 Ausbildung

a) Gipskrusten

Die Gipskrusten bestehen aus Gips vermischt mit wechselnden Anteilen an Gesteinskomponenten und gesteinsfremden Partikeln. In städtischer Umgebung erscheinen sie durch eingelagerten Staub meist grau bis schwarz (Fig. 13), in Naturaufschlüssen sind sie dagegen weiss (Fig. 43). Die anfänglich fest auf der Gesteinsoberfläche haftende Kruste löst sich mit zunehmender Dicke (meist unter 1 mm) von der Unterlage ab, wobei die Gesteinsoberfläche normalerweise mitgerissen wird. Unter abgelösten Krusten sandet sie ab und kann bis mehrere mm (z.T. cm) tief aufgelockert sein. Ihre Beschaffenheit ist analog zu absandenden Oberflächen: Das gelockerte Sandkornaggregat ist von weissem, kryptokristallinem Gips durchsetzt. In dieser Zone – wie übrigens auch an der Krustenoberfläche – finden sich z.T. Ausblühungen von Natriumsulfat oder Magnesiumsulfat. Krustenoberflächen sind glatt, höckerig bis fein verästelt (Fig. 58). Sehr dünne Krusten (um 0.1 mm) weisen glatte (bzw. der Gesteinsoberfläche angepasste) Oberflächen auf. Indem sich die Kruste ungleichmässig verdickt und zudem blasenartig von der Unterlage zu lösen beginnt, wird sie höckerig. Bei sehr dickem Gipsbelag (mehrere mm bis 1 cm) entwickelt sie sich zu koralenartig verästelten Formen.

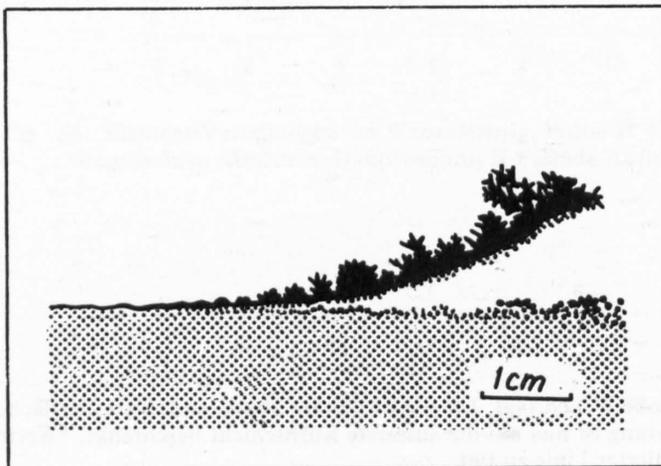


Fig. 58: Gipskrusten-Querschnitt (schematisch). Entwicklung vom dünnen, glatten Überzug bis zu dicken, verästelten Formen. Häufig in örtlicher Anordnung seitlich oberflächlicher Sickerwasserstellen zu finden (benetzte Fläche rechts vom Bild).

Der Aufbau von Gipskrusten ist sehr variabel. Ein dünner Gipsbelag (um 0.1 mm) kann mit einer mehrere mm mächtigen, von der Unterlage gelösten Gesteinsschicht verbunden sein, oder die mehrere mm dicke Kruste kann vorwiegend aus Gips bestehen. In einem Krustenquerschnitt finden sich (von innen nach aussen) oft alle Übergänge zwischen der äussersten Gesteinsschicht, deren Intergranularporen und Risse teilweise gipsgefüllt sind, bis zur Gipsmatrix mit isolierten Gesteinskomponenten.

Der Gips bildet im Krusteninnern einen Filz aus 10 – 20 μm langen, zu Kornoberflächen teilweise radial angeordneten Fasern. Gegen aussen wird er allmählich oder in abruptem Wechsel gröber kristallin. An der Oberfläche sind es oft über 100 μm (im Extremfall über 1 mm) lange Nadeln, die in Büscheln nach aussen gerichtet sind (Fig. 59).

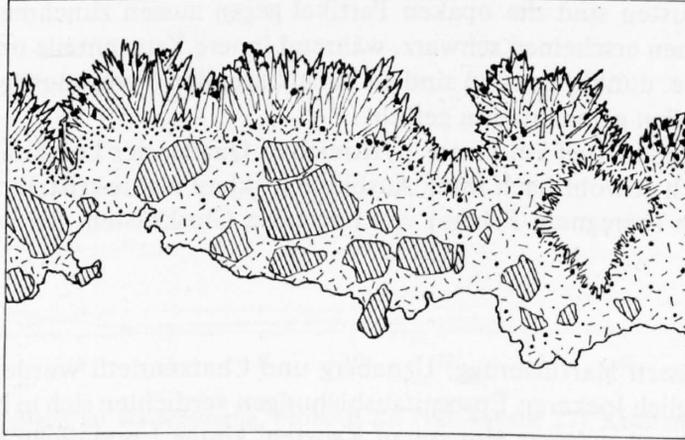


Fig. 59: Querschnitt durch eine abgelöste Gipskruste, Aussenseite oben (Dünnschliff von Probe H 14, vgl. Fig. 13). Innere Zone (unten): In der Matrix aus krypto- bis mikrokristallinem Gips vermischt mit Staubpartikeln sind isolierte Gesteinskörner eingebettet. Äussere Zone (oben): Makrokristalliner Gips vermischt mit Staubpartikeln. Die Staubpartikel sind im äusseren Bereich beider Zonen angereichert. Bildbreite 2.8 mm.

Die in Krusten eingelagerten *Gesteinskomponenten* sind im Vergleich zum Gesteinskern meist unverändert. Einzelne Körner sind zerbrochen, Glimmer z.T. aufgeblättert (mit quer zum Spalt stehenden Gipskristallen). Am Hauptbahnhof sind Calcit- und Dolomitkörner im äussersten Krustenbereich häufig, Quarz- und Feldspatkörner vereinzelt deutlich angelöst. Die angelösten Kornoberflächen sind oft nach aussen gerichtet. (Stark angelöste Quarz- und Feldspatkörner, wie sie JEANNETTE, 1979, in Gipskrusten am Strassburger Münster beschreibt, wurden indessen nicht beobachtet).

Im Gips eingelagerte *gesteinsfremde Partikel* färben die Krusten dunkel. Im wasserunlöslichen Anteil einer schwarzen Kruste (Probe H 14) ist eine 20 – 50 μm grosse Fraktion deutlich angereichert. Sie enthält

- 50% opake Körner, die eckig bis stengelig, rundlich, kugelig bis kompliziert gegliedert sind. Es handelt sich um Kohle- und Russ-, daneben um Schlacke- und andere Staubpartikel. Beim Glühen der Probe verbrennen sie grösstenteils.
- 50% farblose und gefärbte, meist eckige Körner aus Quarz, Feldspäten, Calcit und Dolomit, Chlorit und anderen Gesteinsmineralen. Es ist ungewiss, zu welchen Teilen dieses Material direkt aus der Unterlage bzw. von aussen (andere Bauteile, Atmosphäre) in die Kruste gelangte.

(FASSINA, LAZZARINI & BISCONTIN, 1976, fanden ähnliche Zusammensetzungen in Gipskrusten Venedigs.) – Weitere Komponenten in Gipskrusten sind Organismen, die hier allerdings nur sporadisch untersucht wurden: In Naturaufschlüssen sind Krusten häufig von Grünalgen besiedelt, am Hauptbahnhof wurden verschiedene Algenformen (u.a. Kieselalgen) festgestellt. Ober- und Unterflächen dicker Krusten waren hier von Pilzgeflechten überspannt.

Mit ca. 1% eingelagerter opaker Teilchen erscheinen die Krusten makroskopisch grau, ab ca. 10% dunkelgrau bis schwarz. Die *Schwärzung* variiert stark

- a) regional,
- b) im Grössenbereich der Fassade und
- c) im Krustenquerschnitt:

a) In städtischer Umgebung sind Gipskrusten generell dunkel, in Naturaufschlüssen dagegen weiss (durch Algen z.T. grünlich oder durch Eisenhydroxid bräunlich verfärbt).

b) Die dunkelsten Krusten bilden sich in ausgeprägten Windexpositionen (z.B. an Gesimsuntersichten von Aussenfassaden), während sie in windgeschützten Bereichen (z.B. Innenhoffassaden) heller grau bis farblos sein können. Helle Krusten scheinen generell einen sehr dünnen Gipsbelag aufzuweisen.

c) Bei dunklen Krusten sind die opaken Partikel gegen aussen zunehmend angereichert (Fig. 59). Krustenoberflächen erscheinen schwarz, während innere Krustenteile und Unterflächen weiss sind. Stark gegliederte, dunkle Krusten sind an herausragenden Verästelungen schwarz und an tieferliegenden Reliefstellen gelblichbraun gefärbt.

Die *farblosen Gipskrusten* bei einem pyritreichen Quader der Lokalität Auf-der-Mauer (Fig. 27) unterscheiden sich sowohl nach ihrer Ausbildung (klare makrokristalline Aggregate) als auch nach ihrer Exposition (beregnete Fläche) von normalen Gipskrusten. Sie wurden hier als Einzelfall beobachtet.

b) *Epsomitkrusten*

In den Aufschlüssen Martinsbrugg, Uznaaberg und Chatzenrietli wurden Epsomitkrusten beschrieben: Die anfänglich lockeren Epsomitausblühungen verdichten sich in Nischen und an feuchtschattigen Flächen innert weniger Monate zu Krusten. Unter 1 mm dicke Krusten lösen sich blasenartig von der Unterlage ab. Dickere (um 1 mm) Krusten enthalten oft überwiegend Gesteinsand und lösen sich wie Gesteinsblätter. Bereiche mit Epsomitkrusten sanden zugleich stark ab. Auf Plattensandstein (Martinsbrugg) gehen Epsomitkrusten in Abblättern über. – Ähnliche Bildungen wurden an Bauwerken nicht beobachtet.

7.6.2 *Sulfatanreicherung*

Die Sulfatverteilung hinter krustenbedeckter Oberfläche wurde an einem Profil untersucht. Es handelt sich um *Probe H 8A* vom Hauptbahnhof. Sie wurde an der in Fig. 5 abgebildeten Stelle entnommen, die vom Pfeilerinnern stark durchfeuchtet wird. Gipskrusten, die lokal von Natriumsulfat-Ausblühungen bedeckt oder unterlagert sind, lösen sich hier in 2 mm dicken Flocken. Beim Zerkleinern der Probe erwies sich das Gestein bis 2 cm Tiefe sehr brüchig und bis 5 cm Tiefe gegenüber dem Innern deutlich gelockert. Der Gipskruste entsprechend zeigt das Profil eine ausgeprägt *oberflächliche Sulfatanreicherung* (Fig. 60, Tabelle 22):

In der Kruste ist der S-Gehalt maximal (16000 ppm entsprechen 9% Gips). Er fällt bis 2 cm Tiefe sehr steil ab und erreicht bei 5 cm ein Grundniveau von 20 ppm. Damit ist Sulfat nur in der äussersten, stark gelockerten Zone angereichert. Die zu S analoge Ca-Anreicherung lässt vermuten, dass es sich um Calciumsulfat handelt, wobei die Bedeutung des grossen Ca-Überschusses in der Kruste fraglich ist. Der oberflächlich ebenfalls hohe Na-Gehalt (1140 ppm) könnte den makroskopisch festgestellten Natriumsulfat-Ausblühungen entsprechen. Verglichen mit S sinken Na und K gegen innen viel flacher ab und weisen in 11.5 cm Tiefe relativ hohe Gehalte um 300 ppm auf. Damit scheinen sie in Verbindungen vorzuliegen, deren Anionen hier nicht analysiert wurden. Die Mg-Gehalte sind im ganzen Profil gering.

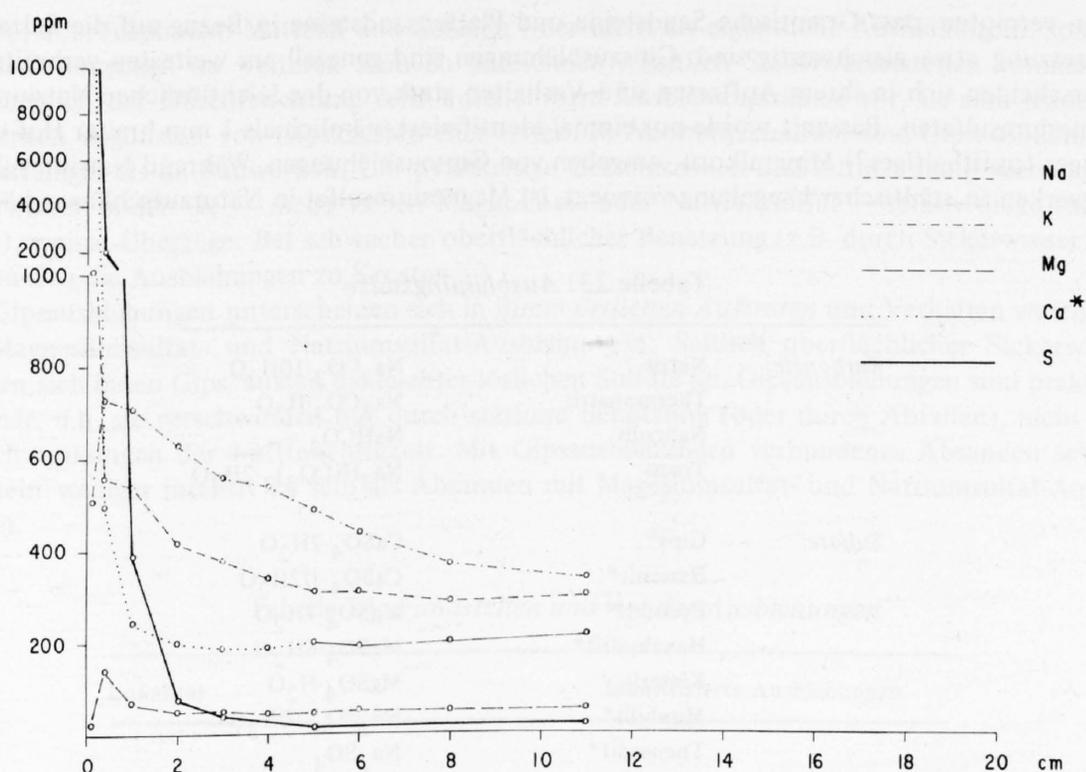


Fig. 60: Element-Verteilungen im Wasserauszug, Probe H 8A (vgl. Tabelle 22). Krustenbedeckter Quader (Granitischer Sandstein) aus einem Bereich mit durchsickerndem Wasser an der E-Fassade des Hauptbahnhofes (vgl. Fig. 5). *Werte bei punktierter Linie zu tief.

Tabelle 22: Element-Verteilungen im Wasserauszug, Probe H 8A

Tiefe (cm):	0.1	0.3	1	2	3	4	5	6	8	11
(ppm) Na	1450	560	540	420	380	340	310	310	290	300
K	510	730	710	630	560	540	490	440	370	340
Mg	20	140	70	50	45	45	45	45	45	55
Ca	(46100)	(500)	(245)	(200)	(190)	(190)	200	190	200	215
S	16000	2100	390	75	35		15			20

(Werte in Klammern zu tief)

7.7 Ausblühungen

7.7.1 Übersicht

Da die meisten der beschriebenen Gefügelockerungen mit Salzanreicherungen verbunden sind, wurden Ausblühungen bereits im Zusammenhang mit Schalen, Ablättern und Abbröckeln, Absanden und Krusten erwähnt. Es handelt sich dabei um Calcium-, Magnesium- und Natriumsulfat. In Tabelle 23 sind die nachgewiesenen Salze zusammengestellt. Zum Vergleich sind der Tabelle weitere in Mauerwerken wichtige Ausblühungssalze beigegefügt, die hier nicht festgestellt wurden. In Tabelle 24 sind die identifizierten Salze nach Lokalitäten geordnet. Diese Liste ist sicher unvollständig, da viele Lokalitäten nicht systematisch untersucht wurden. – Die Beobachtungen

lassen vermuten, dass Granitische Sandsteine und Plattensandsteine in Bezug auf die Salzzusammensetzung etwa gleichwertig sind. Gipsausblühungen sind generell am weitesten verbreitet. Sie unterscheiden sich in ihrem Auftreten und Verhalten stark von den leichtlöslichen Natrium- und Magnesiumsulfaten. Bassanit wurde nur einmal identifiziert, nämlich als 1 mm breiter Hof um ein rostiges (pyrithaltiges?) Mineralkorn, umgeben von Gipsausblühungen. Während Natriumsulfat an Bauwerken in städtischer Umgebung vorwiegt, ist Magnesiumsulfat in Naturaufschlüssen häufiger.

Tabelle 23: Ausblühungssalze

<i>Karbonate:</i>	Natrit	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
	Thermonatrit	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
	Nahcolit	NaHCO_3
	Trona	$\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
<i>Sulfate:</i>	Gips*	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	Bassanit*	$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$
	Epsomit*	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
	Hexahydrat*	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
	Kieserit	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
	Mirabilit*	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
	Thenardit*	Na_2SO_4
	Arcanit	K_2SO_4
	Astrakanit	$\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
	Picromerit	$\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
	Syngenit	$\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Glaserit	$\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$	
<i>Chloride:</i>	Halit	NaCl
	Sylvin	KCl
<i>Nitrate:</i>	Nitrocalcit	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
	Nitromagnesit	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
	Nitronatrit	NaNO_3
	Nitrokalit	KNO_3
	Ammonsalpeter	NH_4NO_3

* in dieser Arbeit nachgewiesen
 übrige: in Mauerwerken häufig, aus ARNOLD (1981)

7.7.2 Gips

Gipsausblühungen bestehen in feinsten Verteilung aus makroskopisch kaum sichtbaren weissen Punkten, in stärkeren Anreicherungen verleihen sie der Gesteinsoberfläche einen weisslichen Schimmer. Die lockeren Aggregate sind kryptokristallin. Als punktförmige Häufchen sitzen sie in Kornwickeln und Vertiefungen, die umgebenden Körner wegstossend; stärker angereichert bilden sie ein lockeres Aggregat aus Gips und Sandkörnern.

An *Bauwerken* sind Gipsausblühungen in feinsten Verteilung sehr häufig, so beispielsweise auf flächenhaft absandenden Quadern in regengeschützten Bereichen. Sie finden sich aber in gleicher Ausbildung auch auf der Rückseite und darunterliegenden Gesteinsoberfläche hinter Gips-

krusten, abbröckelndem Material und Schalen (hier nicht als eigentliche Ausblühungen, sondern als Subfloreszenzen im weiteren Sinn zu bezeichnen). Seitlich Sickerwasserstellen kommen im Grenzbereich der Durchfeuchtung sehr unscheinbare Ausblühungssäume vor, sie sind jedoch an Bauwerken zugunsten von Gipskrusten eher selten. In *Naturaufschlüssen* sind Gipsausblühungen viel auffälliger als an Bauwerken. Um pyrithaltige Gesteinszonen und seitlich damit verbundener Sickerwässer bilden sie – meist neben Magnesium- oder Natriumsulfat – relativ dicke (bis ca. 1 mm), weisse Überzüge. Bei schwacher oberflächlicher Benetzung (z.B. durch Sickerwasser) verdichten sich die Ausblühungen zu Krusten.

Gipsausblühungen unterscheiden sich in ihrem *örtlichen Auftreten* und Verhalten wesentlich von Magnesiumsulfat- und Natriumsulfat-Ausblühungen: Seitlich oberflächlicher Sickerwässer reichern sich innen Gips, aussen die leichter löslichen Sulfate an. Gipsausblühungen sind praktisch stationär, d.h. sie verschwinden nur durch stärkere Benetzung (oder durch Abfallen), nicht aber bei Schwankungen der Luftfeuchtigkeit. Mit Gipsausblühungen verbundenes Absanden scheint allgemein weniger intensiv zu sein als Absanden mit Magnesiumsulfat- und Natriumsulfat-Ausblühungen.

Tabelle 24: *Fundstellen und Art der Ausblühungen*

Lokalität		Identifizierte Ausblühungen					
		Gips	Bassanit	Epsomit	Hexahydrat	Mirabilit	Therardit
<i>Bauwerke:</i>							
Hauptbahnhof	(G)	X				X	X
Hauptpost	(G)	X					
Konservatorium	(G)			X			
Archäologisches Institut	(G)	X		X			
Zürich, Künstlergasse	(G, P)						X
Zürich, Auf der Mauer	(G)						X
<i>Naturaufschlüsse:</i>							
Martinsbrugg	(P)	X		X	X		X
Uznaberg	(G)	X		X			
Chatzenrietli	(G)	X		X			
Fuchsloch	(P)	X		X			
Nuolen, Guntliweid	(G)	X					
Bäch, Steinbruch	(P)	X				X	
Unterägeri, Waldheim	(G)	X				X	X
Luzern, Gletschergarten	(P)	X	X	X			

(G) auf Granitischem Sandstein
(P) auf Plattensandstein

7.7.3 Natriumsulfat und Magnesiumsulfat

a) Natriumsulfat

Mirabilit bildet Rasen aus nadeligen, farblosen Kristallen, *Thenardit* weisse, pulverige Überzüge (wohl meist durch Dehydratation aus *Mirabilit* entstanden). Oft werden beide Formen im dm-Bereich nebeneinander gefunden. *Mirabilit*nadeln verformen sich zu krummen Fäden und skelettartigen Aggregaten, im Raumklima zerfallen sie rasch zu kryptokristallinem *Thenardit*.

Natriumsulfat erscheint an *Bauwerken* häufig im Bereich von Fugenmörteln, Aufmodellierungen und anderen portlandzementhaltigen Stellen. Aufgrund zahlreicher Salzbestimmungen an Bauwerken aus verschiedenen Konstruktionsmaterialien ist es in der Region Zürich viel häufiger als Magnesiumsulfat (ARNOLD, 1975). DE QUERVAIN (1945) fand die beiden Salze im Stadtgebiet von Zürich unabhängig vom Gesteinstyp jeweils quartierweise dominierend. In *Naturaufschlüssen* wurde Natriumsulfat u.a. in einem bodenfeuchten Bereich (Martinsbrugg, hier zusammen mit Magnesiumsulfat), aber auch in unmittelbarer Umgebung pyrithaltiger Kohleschmitzen (Steinbruch Bäch) gefunden. Eine wenigstens teilweise Stoffzufuhr aus "künstlichen" Quellen (z.B. Sickerwasser von gesalzenen Strassen) ist dabei nicht auszuschliessen. – Das mit Natriumsulfat-Ausblühungen verbundene starke Absanden wurde beschrieben.

b) Magnesiumsulfat

Magnesiumsulfat liegt normalerweise als *Epsomit* vor. In Martinsbrugg wurde an einer Stelle zusammen mit *Thenardit* im Überschuss *Hexahydrit* gefunden, und zwar nach einer längeren Trockenperiode und in sonnenbeschienener SW-Exposition. *Epsomitausblühungen* erscheinen in feinsten Verteilung als mehliges Anflug, stärker angereichert als flaumiger Rasen stengelig-nadeliger, farbloser Kristalle. Sie verformen sich rasch zu körnigen und skelettartigen Aggregaten. In unmittelbarer Umgebung pyritreicher Gesteinszonen bilden sich bis mehrere mm mächtige, mit Sandkörnern durchsetzte Salzpolster. Sie sind hier oft gelbbraun verfärbt. In stärker durchfeuchteten Zonen verfestigen sich die Ausblühungen innert weniger Monate zu *Epsomitkrusten*.

An Bauwerken und in *Naturaufschlüssen* finden sich im Bereich *pyrithaltiger Gesteinszonen* meist Magnesiumsulfat-Ausblühungen. Damit wiegt Magnesium gegenüber Natriumsulfat in den untersuchten *Naturaufschlüssen* deutlich vor. An Bauwerken war die Quelle magnesiumsulfathaltiger Sickerwässer nicht immer ersichtlich. Im anstehenden Plattensandstein tritt Magnesiumsulfat auch lagenweise in scheinbar homogenen Bänken ohne deutliche Pyritanreicherungen auf (Fig. 44). Die Ausblühungen sind generell mit starkem Absanden oder (als Subfloreszenzen) Ablättern verbunden.

c) Mobilität der leichtlöslichen Sulfate

Magnesium- und Natriumsulfat sind entsprechend ihrer Löslichkeit sehr mobil. Sie erscheinen periodisch an der Mauer- bzw. Felsoberfläche, d.h. sie wandern im Profil und entlang der Oberfläche (ARNOLD, 1976). An *Bauwerken* treten die Ausblühungen bevorzugt zwischen Dezember und Mai bei trockener Witterung auf. Die Intensität der Ausblühungen schwankt sehr stark innerhalb einer Ausblühungsperiode (Oszillationen von Tagen bis Wochen) sowie von Jahr zu Jahr (DE QUERVAIN, 1945). In der Zeit vom Dezember 1976 bis Mai 1981 erschienen die Ausblühungen im Raum Zürich gesamthaft relativ schwach bis mässig (verglichen mit der starken Ausblühungsperiode Winter 1975/76, mündl. Mitt. Dr. A. Arnold). Sie traten an vielen Stellen gleichzeitig oder mit Differenzen von wenigen Tagen, und zwar jeweils schubweise hervor. In *Naturaufschlüssen* sind die am Bauwerk festgestellten jahreszeitlichen Tendenzen mehr oder weniger verwischt, da sie durch stärker schwankende Befeuchtungen (austretende Kluftwässer!) modifiziert sind. Auf rasch trocknenden, sonnenexponierten Flächen erscheinen die Magnesiumsulfat-Ausblühungen selten, in feuchtschattigen Bereichen z.T. ganzjährig.

7.8 Zusammenfassung

Am Bauwerk und im Naturaufschluss sind die meisten der untersuchten Verwitterungserscheinungen von Sulfatanreicherungen begleitet. Gips, z.T. vermischt mit Magnesium- und Natriumsulfat, reichert sich im Profil (senkrecht zur Oberfläche) dort an, wo das Gefüge des Sandsteins zerstört wird: Anreicherung an der Oberfläche führt zu Absanden, Krusten und Ausblühungen, Anreicherung im Innern zu Schalen, Anreicherung sowohl im Innern als auch an der Oberfläche zu Abblättern und Abbröckeln. Die Sulfatanreicherungen liegen generell in den äussersten 10 cm des Verwitterungsprofils. Unter dem Mikroskop sind Gipsanreicherungen in Form von krypto- bis mikrokristallinen Aggregaten im Porenraum erkennbar. Diese Anreicherungen werden in der entsprechenden Profilizone schon vor dem sichtbaren Zerfall beobachtet.

Beim Aufblättern verläuft die Gefügelockerung im Gegensatz zu den übrigen Verwitterungsformen nicht unbedingt oberflächenparallel, sondern parallel zu Unstetigkeitsflächen des Gesteins (meist siltigen oder glimmerreichen Lagen).

Während Gipskrusten in Naturaufschlüssen weiss sind, werden sie an Bauwerken in städtischer Umgebung durch Staubpartikel schwarz gefärbt. Gipsausblühungen sind an Bauwerken in feinsten Verteilung, in Naturaufschlüssen auch in stärkeren Anreicherungen weitverbreitet. Natriumsulfat erscheint an Bauwerken in städtischer Umgebung häufiger als Magnesiumsulfat, während in Naturaufschlüssen Magnesiumsulfat deutlich überwiegt.

Starke Mineralauflösungen sind auf die Oberflächenzone von Sandsteinen in beregneter Exposition und städtischer Umgebung beschränkt: Calcit und Dolomit werden im Verlaufe von Jahrzehnten bis 5 mm, Feldspäte und Chert bis ca. 1 mm Tiefe angelöst. Ausserdem sind Calcit-, Dolomit-, Feldspat- und Quarzkörner in Gipskrusten städtischer Umgebung z.T. deutlich angelöst.

Damit standen Sulfatanreicherungen bei der Beschreibung typischer Verwitterungserscheinungen an den untersuchten Bauwerken und Naturaufschlüssen im Vordergrund. Weitere Verwitterungsfaktoren, wie beispielsweise der Frost, können bei diesen Erscheinungen natürlich nicht ausgeschlossen werden.

8. Porenraum

Der Porenraum der Sandsteine wurde quecksilber-druckporosimetrisch sowie licht- und elektronenmikroskopisch untersucht (Methoden s. Kap. 3.2.3). Zum Vergleich mit üblichen Porositätsbestimmungen wurde an je einer Probe der beiden Sandsteintypen zusätzlich die totale Porosität (Pyknometer) und die effektive Porosität durch Wasseraufnahme ermittelt:

	<i>Granitischer Sandstein:</i> (Probe H 24A)	<i>Plattensandstein:</i> (Probe B 11A)
<i>totale Porosität</i>	13.1%	14.9%
<i>effektive Porosität</i>		
– durch Wasserimmersion	9.1%	6.0%
– mit Quecksilber-Druckporosimeter	10.0%	8.2%

Beide Proben weisen offenbar einen geschlossenen, d.h. weder wasser- noch quecksilber-zugänglichen Porenanteil auf. Mit der Annahme, dass sich geschlossene Poren nicht am Stoffaustausch mit der Atmosphäre beteiligen und damit für die Verwitterung relativ unbedeutend sind, kann der geschlossene Porenraum hier vernachlässigt werden. Die effektive Porosität erscheint aufgrund der Wasseraufnahme vermutlich deshalb kleiner als im Druckporosimeter, weil die Wassersättigung der Poren entsprechend der geringeren Druckdifferenz (Vakuum mit Wasserstrahlpumpe zu Atmosphärendruck) kleiner ist als die Quecksilbersättigung.

Ein zusammenfassender Vergleich der verschiedenen Kurven (Fig. 62 – 64) zeigt, dass sich der Porenanteil im Radienbereich $0.01 - 0.3 \mu\text{m}$ bei stark variierendem V_G vergleichsweise schwach ändert. Anders ausgedrückt ist die abnehmende Makroporosität M_q (Volumen im Radienbereich $1 - 7.5 \mu\text{m}$) nicht mit einer Zunahme der Mikroporosität m_q (Volumen im Radienbereich $0.0075 - 1 \mu\text{m}$) verbunden. Dafür gibt wieder das Dünnschliffbild die Erklärung: Bei stark makroporösen Proben sind die primären Zwickelporen leer, bei schwach makroporösen praktisch vollständig mit Calcizement gefüllt (vgl. 8.1.2). Abgesehen von der volumenmässig meist unbedeutenden Porenfüllung durch Tonminerale (8.1.2) beruht die *Reduktion der Porengruppe G*

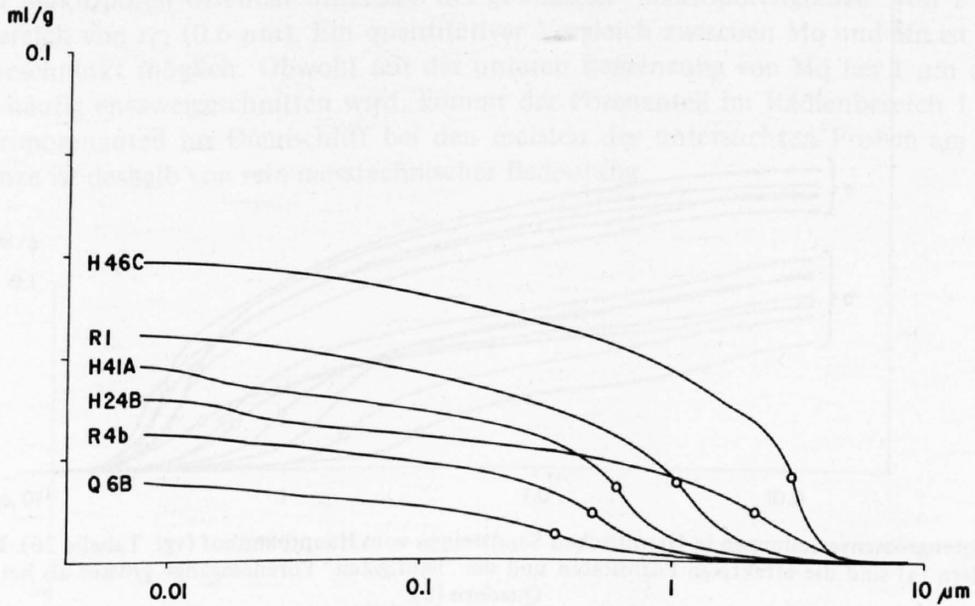


Fig. 62: Porengrössenverteilungen in Granitischen Sandsteinen (vgl. Tabelle 25). Stark schwankende effektive Porositäten sind hauptsächlich durch unterschiedliche Volumenanteile im Radienbereich $0.3 - 7.5 \mu\text{m}$ bedingt.

Tabelle 25: Porositäten in Granitischen Sandsteinen

Probe:	Quecksilber-Porometrie:						Dünnschliff-Porometrie:	
	effektive Porosität n^*	Makroporosität M_q	Mikroporosität m_q	"häufigster" Porenradius r_G	Volumen $r_G - 7.5 \mu\text{m}$ V_G	Makroporosität M_d	mikroporöse Bereiche m_d	
								(ml/g)
H 46C	0.058	13.6	8.7	4.9	3.0	3.9	6.3	6.7
R 1	0.044	10.7	4.0	6.7	1.1	3.6	4.4	8.2
H 41A	0.038	9.3	1.1	8.2	0.6	3.5	3.7	8.5
H 24B	0.032	7.7	4.1	3.6	2.1	2.4	4.1	3.1
R 4b	0.025	6.3	0.6	5.7	0.5	2.3	0.2	5.8
Q 6B	0.016	4.1	0.3	3.8	0.3	1.3	0.1	8.8

also auf zunehmender *Calcitzementation*. Da der Mikroporenanteil dabei annähernd konstant bleibt, kann geschlossen werden, dass dieser Calcizement allenfalls eine Porosität im Radienbereich grösser $0.3 \mu\text{m}$, jedoch keine Mikroporosität aufweist. Als Konsequenz aus dem unveränderten Mikroporenanteil wird die effektive Porosität hauptsächlich durch die Intergranularporosität modifiziert.

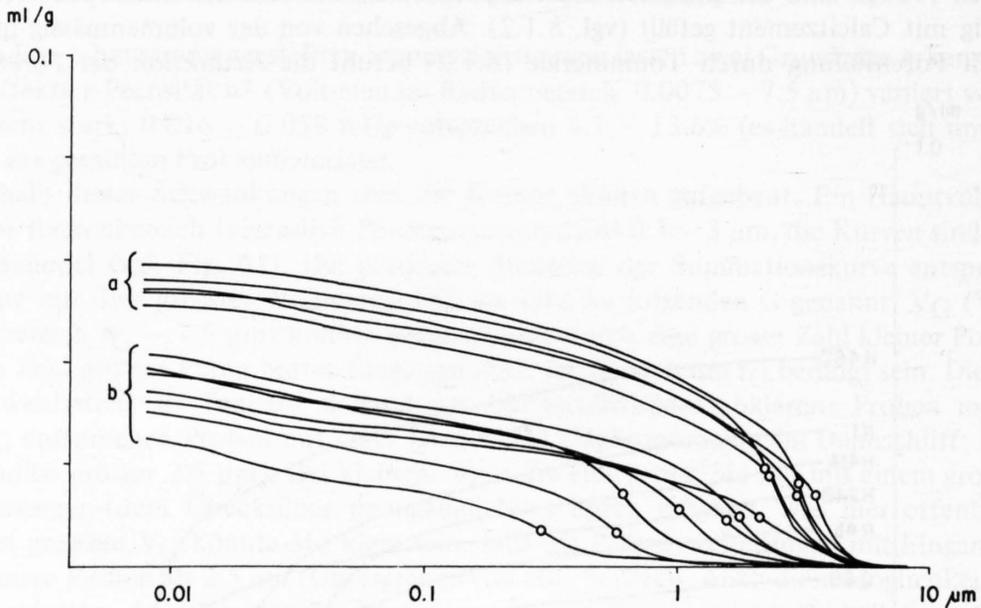


Fig. 63: Porengrößenverteilungen in Granitischen Sandsteinen vom Hauptbahnhof (vgl. Tabelle 26). Bei "resistenten" Quadern (a) sind die effektiven Porositäten und die "häufigsten" Poreneingänge grösser als bei "anfälligen" Quadern (b).

Tabelle 26: Porositäten in Granitischen Sandsteinen vom Hauptbahnhof

Probe:	Quecksilber-Druckporosimeter: ¹⁾						Dünnschliff: ¹⁾	
	n* (ml/g)	(%)	Mq (%)	mq (%)	r _G (μm)	V _G (%)	Md (%)	md (%)
a) "witterungsresistente" Quader:								
H 46C	0.058	13.6	8.7	4.9	3.0	3.9	6.3	6.7
H 43A	0.055	13.0	8.4	4.6	2.2	4.7	6.4	5.3
H 48B	0.054	12.6	7.7	4.9	3.0	3.5	6.5	7.5
H 52A	0.053	12.6	7.8	4.8	3.5	3.6	5.8	4.6
H 40B	0.050	11.9	7.0	4.9	2.3	4.1	9.5	3.3
b) "witterungsanfällige" Quader:								
H 24A	0.041	10.0	4.8	5.2	1.7	2.4	4.1	3.1
H 41A	0.038	9.3	1.1	8.2	0.6	3.5	3.7	8.5
H 47B	0.038	9.3	2.9	6.4	1.0	2.7	2.6	8.5
H 38A	0.035	8.6	3.9	4.7	1.5	2.2	3.2	9.7
H 24B	0.032	7.7	4.1	3.6	2.1	2.4		
H 39A	0.030	7.2	0.3	6.9	0.6	1.4	1.3	5.8
H 45B	0.025	6.3	0.3	6.0	0.3	1.8	0.5	3.5

¹⁾ Bedeutung der Symbole s. Tabelle 25

Eine Gegenüberstellung von Md und Mq lässt weiter erkennen, dass die mit verschiedenen Methoden gemessenen *Makroporositäten* bei den meisten Proben in der Grössenordnung übereinstimmen. Im Unterschied zu den von BOUSQUIE (1979) gemessenen Porositäten bei Kalksteinen weichen Mq und Md bei einzelnen Proben (z.B. H 41A) erheblich voneinander ab. Dies wird in erster Linie darauf zurückgeführt, dass bei den untersuchten Sandsteinen der Hauptporenanteil (G) um den Grenzbereich des lichtoptisch erfassbaren Porenspektrums streut. Damit fehlt für den Feinanteil von G eine optische Vergleichsmessung. Bei H 41A ist Mq viel kleiner als Md, V_G jedoch gut mit Md vergleichbar. In diesem Fall liegen die Poreneingänge zu den im Dünnschliff sichtbaren Makroporen offenbar unterhalb der gewählten "Makroporengrenze" von $1 \mu\text{m}$, nämlich im Bereich von r_G ($0.6 \mu\text{m}$). Ein quantitativer Vergleich zwischen Mq und Md ist also generell nur beschränkt möglich. Obwohl mit der unteren Begrenzung von Mq bei $1 \mu\text{m}$ die Porengruppe G häufig entzweigeschnitten wird, kommt der Porenanteil im Radienbereich $1 - 7.5 \mu\text{m}$ dem Makroporenanteil im Dünnschliff bei den meisten der untersuchten Proben am nächsten. Diese Grenze ist deshalb von rein messtechnischer Bedeutung.

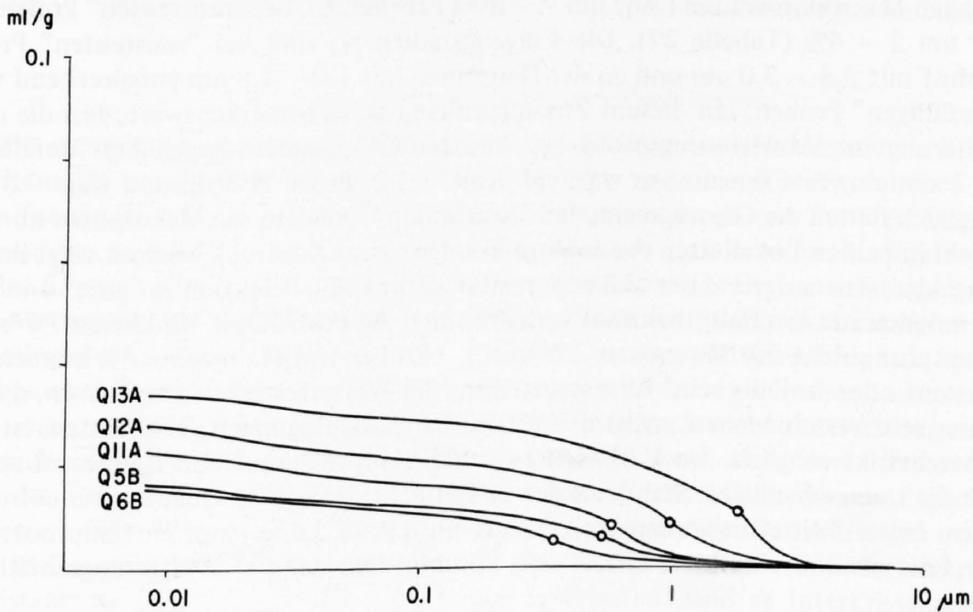


Fig. 64: Porengrößenverteilungen in Granitischen Sandsteinen von der Hauptpost (vgl. Tabelle 27). Die "resistenten" Proben Q12 und Q13 weisen grössere effektive Porositäten und "häufigste" Poreneingänge als die "anfälligen" Proben Q5, Q6 und Q11 auf.

Tabelle 27: Porositäten in Granitischen Sandsteinen von der Hauptpost

Probe:	Quecksilber-Druckporosimeter: ¹⁾					Dünnschliff: ¹⁾		
	n* (ml/g)	(%)	Mq (%)	m _q (%)	r _G (μm)	V _G (%)	Md (%)	md (%)
Q 13A	0.034	8.2	4.1	4.1	1.8	2.6	7.1	5.7
Q 12A	0.028	6.9	2.1	4.8	1.0	2.2	1.7	3.9
Q 11A	0.023	5.7	0.6	5.1	0.6	2.0	0.2	4.7
Q 5B	0.017	4.3	0.5	3.8	0.5	1.5	0.6	8.9
Q 6B	0.016	4.1	0.3	3.8	0.3	1.3	0.1	8.8

¹⁾ Bedeutung der Symbole s. Tabelle 25

Im Radienbereich $0.01 - 0.03 \mu\text{m}$ weisen einzelne Proben (z.B. H 24B und H 41A) eine zusätzliche, *mikroporöse Porengruppe* auf, die viel schwächer ist als G. Sie erscheint aufgrund von 22 Proben bei makroporenarmen häufiger und deutlicher ausgebildet als bei makroporenenreichen. Die Einzelporen dieser Gruppe sind im Dünnschliff nicht sichtbar und damit auch nicht interpretierbar. Insbesondere fehlt eine quantitative Beziehung zum Flächenanteil mikroporöser Bereiche (md). Die Porengruppe weist aber auf das Vorhandensein von Tonmineralen hin, die eine Mikroporosität in diesem Radienbereich besitzen (Tonmineralrasen, vgl. 8.1.2). Umgekehrt lässt sich daraus ableiten, dass die im Dünnschliff sichtbaren mikroporösen Bereiche über einen breiten Radienbereich gestreut sind.

Der Vergleich zwischen den Porengrößenverteilungen und dem beobachteten *Verwitterungsverhalten* der Quader lässt vermuten, dass die intergranulare Makroporosität einen wesentlichen Einfluss auf die Verwitterungsresistenz hat (Fig. 63 und 64, Tabelle 26 und 27): Je ausgeprägter die Intergranularporosität, d.h. je grösser M_q und r_G sind, desto grösser ist im allgemeinen die beobachtete Witterungsresistenz des Quaders. Bei "resistenten" Proben vom Hauptbahnhof liegen die gemessenen Makroporositäten (M_q) um 7 – 8% (Tabelle 26), bei "resistenten" Proben von der Hauptpost um 2 – 4% (Tabelle 27). Die Eingangsradien r_G sind bei "resistenten" Proben am Hauptbahnhof mit $2.3 - 3.0 \mu\text{m}$ und an der Hauptpost mit $1.0 - 1.8 \mu\text{m}$ entsprechend weiter als bei den "anfälligen" Proben. (In diesem Zusammenhang ist es bemerkenswert, dass die maximale Gipsanreicherung im Verwitterungsprofil bei "resistenten" Quadern gegenüber "anfälligen" um rund 1 – 2 cm einwärts verschoben war; vgl. Kap. 7.2.2, Probe H 40B, und Kap. 7.3.2, Probe H 46A. Zugleich füllten die Gipsaggregate bei "resistenten" Quadern die Makroporen nur teilweise aus.) Obwohl in beiden Lokalitäten die analoge Tendenz zum Ausdruck kommt, zeigt ihre Gegenüberstellung klar, dass aufgrund der Makroporosität allein keine Selektion in "gute" und "schlechte" Steine möglich ist: Am Hauptbahnhof verhalten sich die Proben mit M_q kleiner 7% "schlecht", an der Hauptpost solche mit M_q grösser 2% "gut", – Proben mit M_q um 2 – 5% können also witterungsresistent oder -anfällig sein! Eine Beurteilung der Wetterfestigkeit von Proben, die im Freien und unter sehr verschiedenen, nicht quantifizierbaren Bedingungen verwitterten, ist natürlich nur sehr beschränkt möglich. Im Vergleich zwischen Hauptbahnhof und Hauptpost spielt möglicherweise die unterschiedliche Standzeit der in Betracht gezogenen Quader eine entscheidende Rolle, indem heute "witterungsresistente" Quader an der 45 Jahre jüngeren Hauptpost nach Ablauf dieser Frist ebenfalls stark verwittert sein könnten und dann als "witterungsanfällig" eingestuft würden.

Die unbestimmte Bedeutung der Porengrößen dokumentiert eine Probe der *Reiterfigur* am Grossmünster eindrücklich (DE QUERVAIN & ZEHNDER, 1982): Dieser Stein ist nach fast 800 Jahren Standzeit praktisch unverwittert, – dabei liegt seine Porenverteilungskurve ungefähr in der Mitte zwischen extrem stark bzw. schwach makroporösen Proben (R 1, Fig. 62). Offenbar sind neben den Porenverhältnissen noch weitere Gefügeeigenschaften, wie Zementation, Festigkeit usw. entscheidend. Bei R 1 ist die Druckfestigkeit im Verhältnis zur effektiven Porosität relativ hoch, was auf starke Zemente schliessen lässt (Fig. 65). Die Druckfestigkeiten wurden bei Probe U 5 an 10 Würfeln und bei den übrigen an je 2 Würfeln von 1 cm^3 bestimmt). Im Vergleich dreier Proben zeigt diejenige der Reiterfigur denn auch eine relativ deutlich ausgebildete "silikatische" Zementation (vgl. Kap. 8.1.2), sodass deren günstiger Einfluss auf die Festigkeit und die Witterungsresistenz wenigstens vermutet werden kann. Ob und wie weit diese Indizien für das ausserordentliche Verhalten der Reiterfigur bestimmend sind, bleibt jedoch ungewiss. – Ein allgemein gültiges petrographisches Kriterium für die Beständigkeit der Granitischen Sandsteine wurde jedenfalls nicht gefunden.

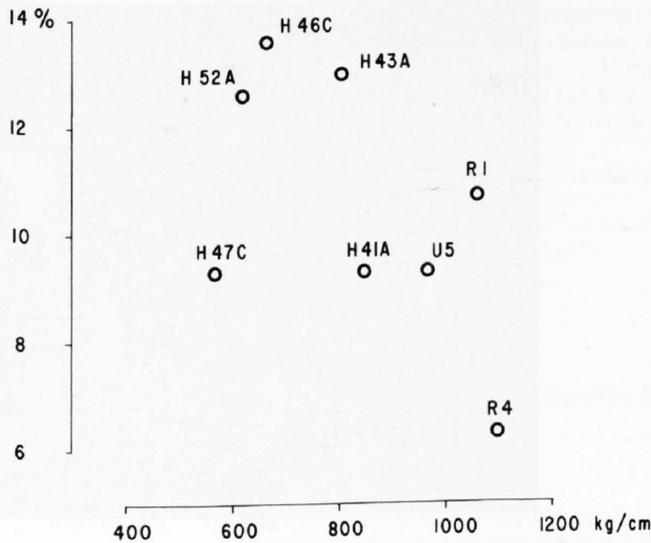


Fig. 65: Effektive Porosität (%) im Vergleich zur Druckfestigkeit (kg/cm^2) bei Granitischen Sandsteinen. Es ist eine Tendenz von stark porösen und wenig druckfesten zu schwach porösen und druckfesteren Proben angedeutet.

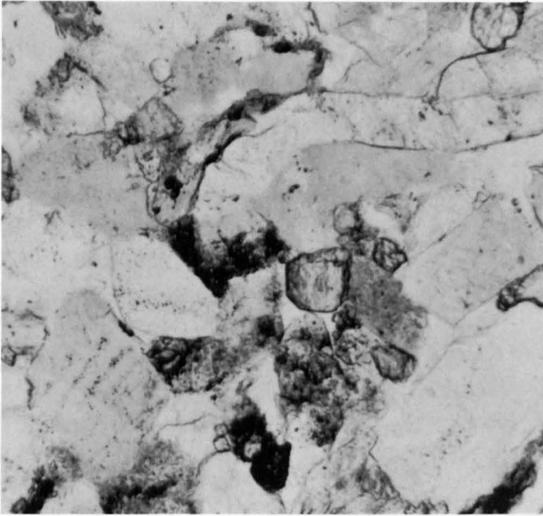
8.1.2 Struktur und Inhalt des Porenraums

Im Dünnschliff erscheint der Porenraum erstens als ein Netz von Makroporen in Kornzwickeln und zweitens als mikroporöse Bereiche, meist innerhalb einzelner Körner, seltener im Zement (Fig. 66, Tabelle 28). Die (makroporöse) *Intergranularporosität* ist von Stein zu Stein wie auch im Grössenbereich des Dünnschliffs grossen Schwankungen unterworfen. Korngrösse und Sortierung des Sandsteins bestimmen zwar die Grösse, nicht aber das Gesamtvolumen der Makroporen. Die Makroporosität hängt vielmehr vom Füllungsgrad des primären Porenraums mit Calcit- und Tonmineralzementen ab. Dies bedeutet praktisch, dass sowohl feinkörnige als auch grobkörnige Proben stark oder schwach makroporös sein können. – In allen Proben kommen unporöse bis stark *mikroporöse Körner* der gleichen, rein petrographisch nicht unterscheidbaren Kornart nebeneinander vor. Bei Feldspäten entspricht die Porosität meist nicht dem Umwandlungsgrad: Stark poröse Feldspäte – sie bestehen aus einem lockeren Mineralgerippe mit Zwischenräumen im μm -Bereich (Fig. 66b) – sind oft relativ schwach umgewandelt. Das Auftreten mikroporöser Bereiche in bestimmten Komponenten erlaubt Rückschlüsse auf die Art der Mikroporen: In kryptokristallinem Material (Mikrite, Chert und Tonklasten) sind es Interkristallporen (Poren zwischen den Kristallen), in Feldspäten Auflösungs- und Interkristallporen.

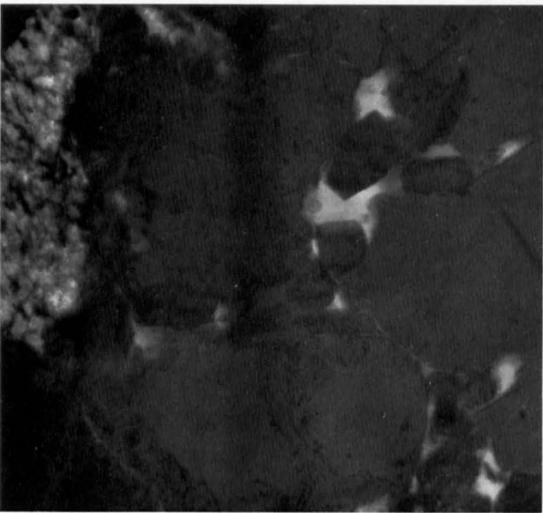
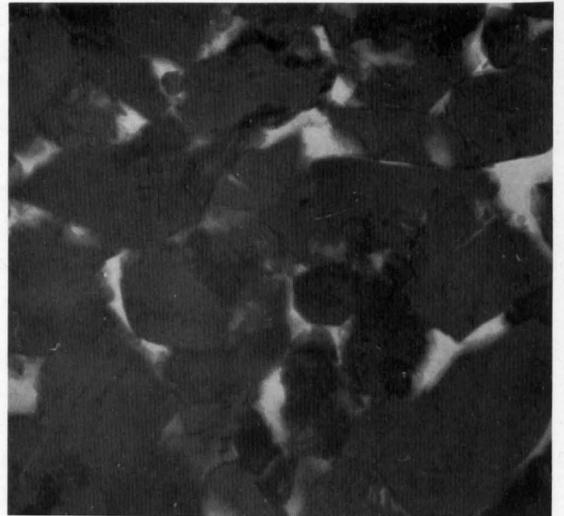
Im primären Porenraum können vier diagenetisch gebildete *Zemente* unterschieden werden (Fig. 67):

- 1) *Tonmineralrasen*,
- 2) *Calcit*,
- 3) *Tonmineralwürmer* und
- 4) "*Silikathüllen*".

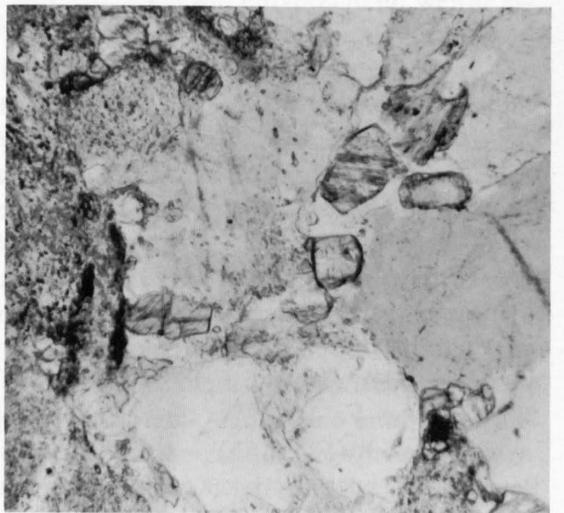
1) *Tonmineralrasen*: Im Dünnschliff erscheinen Tonminerale als 2 – 3 μm dicke, nadelig-körnige Anlagerungen an Zwickelporenwänden, wobei die Nadeln radial auf Kornoberflächen sitzen. Aufgrund ihrer Farbe (farblos bis leicht grünlich), Lichtbrechung (um 1.60) und Doppelbrechung (unter 0.01) handelt es sich wahrscheinlich um Chlorit. Bei einzelnen Proben scheint der etwas dickere (um 5 μm) Filz aus Nadeln und deutlich gebogenen Fäden zu bestehen. Seine Morphologie und etwas höhere Doppelbrechung (über 0.02) sprechen eher für Smectit. Proben mit hoher Intergranularporosität zeigen niedrige, chloritähnliche Anlagerungen, bei mittlerer bis schwacher Intergranularporosität sind sie dicker und smectitähnlich. In vollständig calcitgefüllten Zwickelporen scheinen die Anlagerungen zu fehlen oder sind sehr undeutlich ausgebildet (im Dünnschliff möglicherweise durch das hohe Calcitrelief verdeckt). In REM-Aufnahmen sind die Wände von



a



b



c



Fig. 66: Porenraum Granitischer Sandsteine im Dünnschliff. Ausschnitt links im weissen Durchlicht, rechts im reflektierten Fluoreszenzlicht, wobei Poren hell erscheinen. Bildbreiten 520 μm .

- a) Probe H 46C (Hauptbahnhof): stark makroporös. Kornzwickel (primäre Zwickelporen) leer oder teilweise mit Calcit gefüllt (Calcitkristalle im Bild links als graue Körner mit dunklem Rand erkennbar).
 b) Probe U 5 (Steinbruch Moos): mässig makroporös. Kornzwickel teilweise bis vollständig mit Calcit gefüllt. Rechts mikroporöses Feldspatkorn.
 c) Probe R 4 (Statue von Karl dem Grossen, Grossmünster): schwach makroporös. Kornzwickel praktisch vollständig mit Calcit gefüllt.

Tabelle 28: Porenraum Granitischer Sandsteine im Dünnschliff

Anordnung im Gefüge	Makroporöse Bereiche: von drei oder mehr Körnern umschlossene Porenerweiterungen (Zwickelporen) sind durch Verengungen und Kanäle entlang Kornfugen (Fugensporen) miteinander verbunden. Mittlere Grössen der Zwickelporen um 20 – 50 μm (mittlerer Durchmesser), oft gegen 100 μm , im Extremfall bis 500 μm lang. Kanäle selten über 10 μm breit.	Mikroporöse Bereiche: meist in detritischen Komponenten, wie Mikriten, Feldspäten (Fig. 66b), tonigen Gesteinsbruchstücken und Chert, selten in mikritischem oder tonigem Zement.
Streuungen von Probe zu Probe	Makroporosität gering (unter 2%) mittel (um 3%) gross (5 – 6%)	mikroporöse Bereiche selten (2 – 3%) mittel (4 – 8%) häufig (9 – 11%)
Streuungen im mm-Bereich	Zwickelporen selten bis fehlend (Fig. 66c). Zwickelporen in Nestern und unregelmässigen Schwärmen angeordnet, normale Schwankungen um 1 – 10% (Fig. 66b).	Zwickelporen gleichmässig und dicht verteilt (Fig. 66a). als detritische Komponenten entsprechend homogen verteilt, als Zement sporadisch auftretend.

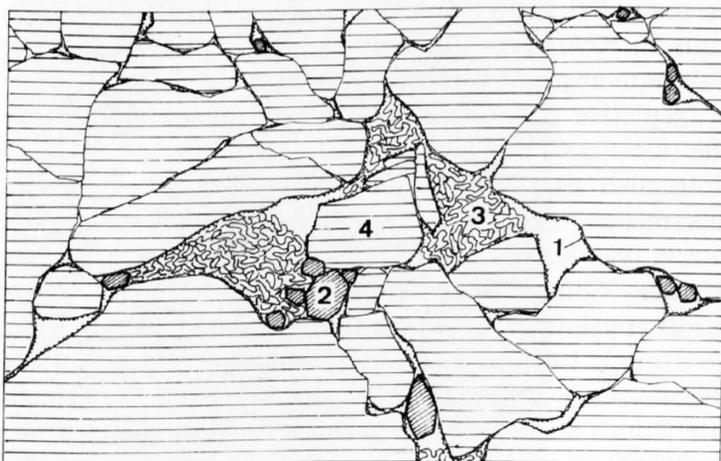


Fig. 67: Porenfüllungen in Granitischem Sandstein, Dünnschliffzeichnung (Probe R 1, Reiterfigur Grossmünster). Im primären Porenraum sind drei Zemente erkennbar, nämlich
 1) Tonmineralrasen,
 2) Calcit und
 3) Tonmineralwürmer.
 4) Detritus.
 Bildbreite 700 μm .

Zwickelporen mit zelligen Aggregaten gebogener Plättchen bedeckt (sogenannte Kartenhausstrukturen, Fig. 68 und 69). Neben und über Kartenhausstrukturen treten auch schuppige Anlagerungen auf. Nach EDAX-Analysen bestehen diese Strukturen aus Si, Al, Ca sowie wechselnden Anteilen von Mg und Fe. Eine sichere Bestimmung verschiedener Tonminerale erscheint daraus nicht möglich. Chlorit und Smectit treten wahrscheinlich einzeln und nebeneinander auf, Mixed-layer-Minerale sind nicht auszuschliessen. – Die Ausbildung und Anordnung der Tonminerale im Porenraum sprechen eindeutig für diagenetische Bildungen. Ihre Entstehung als Folge der Auflösung von Silikaten (HOLDREN & BERNER, 1979; PITTMAN, 1979b) kann hier vermutet, aber nicht nachgewiesen werden. Die schwache Porengruppe im Radienbereich $0.01 - 0.03 \mu\text{m}$ (Fig. 62) scheint mit der Porosität dieser Tonminerale zusammenzuhängen, zumal die Porengruppe bei Proben mit relativ dicken Tonmineralrasen deutlicher ausgebildet ist.

2) *Calcit*: Die primären Zwickelporen sind teilweise bis vollständig mit sparitischem Calcit gefüllt (Fig. 66 und 67). Bei teilweiser Füllung sind es im Mittel $20 - 50 \mu\text{m}$ grosse, hypidiomorphe Kristalle, die dem Tonmineralrasen auflagern (Fig. 68 und 69). In vollständig gefüllten Poren ist der Calcit häufig makrokristallin (ein Kristallindividuum je Zwickelpore). Hohe Intergranularporositäten sind durch vorwiegend schwache Calcitfüllung, niedrige durch vorwiegend starke bedingt. Bei mittleren Porositäten ist der Füllungsgrad im mm-Bereich sehr inhomogen (Tabelle 28). Die Verteilung des Calcitzements kann übrigens auch im m-Bereich wechseln: Im Steinbruch Guntliweid bei Nuolen sind $15 - 20 \text{ m}$ mächtige Sandsteinbänke von der Basis bis etwa 5 m hoch in "Guntliweider", darüber in "Buchberger" Qualität ausgebildet. Im Guntliweider Stein sind die Zwickelporen vollständig, im Buchberger teilweise calcitgefüllt. Dabei ändert sich zugleich die Ausbildung des Tonmineralzementes: Während im Guntliweider Stein ein Tonmineralrasen fehlt, erscheint er im Buchberger zunehmend deutlich. – Im Unterschied zum eigenen Befund soll dieser Zement nach ZGRAGGEN & PETERS (1980) aus Dolomit bestehen (vgl. Fig. 68).

3) *Tonmineralwürmer*: Die wurmförmigen Aggregate bestehen aus Stapeln von weniger als $1 \mu\text{m}$ dicken und $5 - 10 \mu\text{m}$, selten $20 \mu\text{m}$ breiten Plättchen, vereinzelt sind 6-eckige Umrisse erkennbar (Fig. 69 und 70). Nach Ausbildung und optischen Eigenschaften (Doppelbrechung kleiner 0.01) handelt es sich um Kaolinit oder Dickit. Da auch EDAX-Analysen keine eindeutige Bestimmung erlauben, bezeichne ich diese Tonminerale entsprechend ihrer Form als Tonmineralwürmer. Die Tonmineralwürmer lagern neben Calcit oder ihn umwachsend auf dem Tonmineralrasen (Fig. 67). In Proben mittlerer bis grosser Intergranularporosität treten sie scheinbar häufiger, jedoch auch hier meist sporadisch und als teilweise Porenfüllung auf; in einzelnen Varietäten füllen sie die Zwickelporen vorwiegend vollständig aus (z.B. in Uznaberg). Die Wurmstrukturen scheinen nach Dünnschliffbefund in stark calcitzementierten Proben zu fehlen. Anhand von REM-Aufnahmen konnten sie aber in der Guntliweider Varietät (s. oben) nachgewiesen werden. Vereinzelt sind die Strukturen pseudomorph nach Feldspat und hier als diagenetische Verdrängungen zu bezeichnen.

4) *"Silikathüllen"*: Detritische Körner sowie Calcit und Tonmineralwürmer in Zwickelporen sind teilweise von Häuten bedeckt, die nur im REM erkennbar sind (Fig. 70). Ihre Dicke beträgt weniger als $1 \mu\text{m}$. In Proben, die mit Salzsäure angeätzt wurden, erscheinen sie als aufgerissene Hüllen um Tonmineralwürmer und als "geplatze Schalen" um aufgelöste Calcitkristalle. Ihre Säureresistenz deutet auf eine silikatische (kieselige?) Substanz, ihre Lage im Porenraum auf eine spät-diagenetische Bildung, die ich im folgenden als "Silikathüllen" bezeichne. Im Vergleich zu zwei weiteren Proben scheinen die "Silikathüllen" beim Stein der Reiterfigur am Grossmünster (R 1) besonders deutlich ausgebildet zu sein (vgl. Kap. 8.1.1. Es ist deshalb denkbar, dass seine grosse Wetterbeständigkeit mit einer starken "Silikat"-Zementation zusammenhängt). – Diese Hüllen entsprechen möglicherweise dem oft erwähnten "kieseligen Bindemittel" (FRUEH, 1890; *Bausteinband* (1915); HOFMANN, 1957 u.a.m.). Umgewandelte und angelöste Feldspäte sowie verzahnte Säume von Quarz- und Feldspatkörnern lassen auf gelöste Kieselsubstanz schliessen. Ihre Ausscheidung im Porenraum könnte jedoch durch den Tonmineralrasen verhindert worden sein (LAND & DUTTON, 1978; TILLMAN & ALMON, 1979).

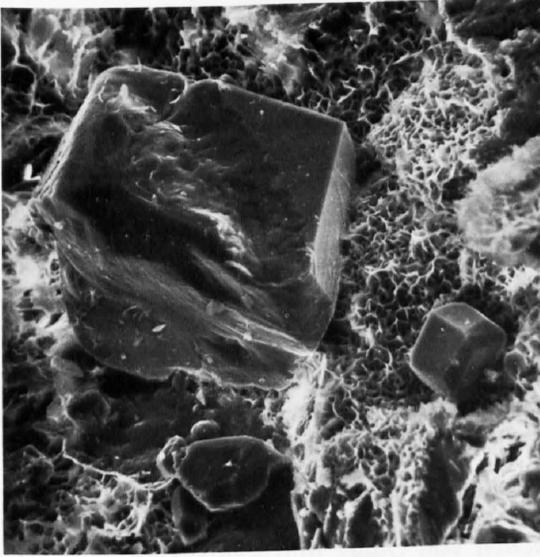


Fig. 68: Porenfüllungen in Granitischem Sandstein, REM-Aufnahme (Probe U 5, Steinbruch Moos). Wände einer Zwickelpore sind mit schwammigem Tonmineralrasen bedeckt, auf dem hypidiomorphe Calcitkristalle (EDAX-Bestimmung) sitzen. Bildbreite 200 μm .

(ZGRAGGEN & PETERS, 1980, bestimmen den Tonmineralrasen einer Probe der gleichen Lokalität als Montmorillonit und die auflagernden Kristalle als Dolomit.)



Fig. 69: Porenfüllungen in Granitischem Sandstein, REM-Aufnahme (Probe R 1, Reiterfigur am Grossmünster). Auf dem Tonmineralrasen (Porenwände bedeckend) lagern ein Calcitkristall (oben) und Tonmineralwürmer (Zentrum). Bildbreite 100 μm .

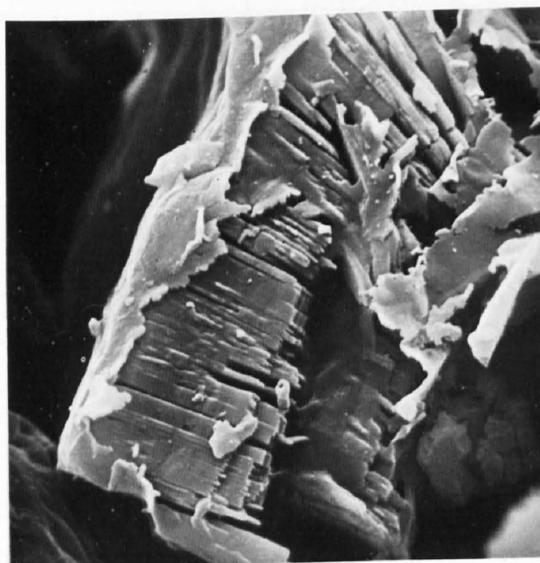


Fig. 70: Porenfüllungen in Granitischem Sandstein, REM-Aufnahme (Probe R 1 mit Salzsäure angeätzt, Reiterfigur Grossmünster). Plättchenstapel eines Tonmineralwurmes ist von teilweise abgerissenen Häuten ("Silikat-hüllen") bedeckt. Bildbreite 15 μm .

Die Anordnung dieser diagenetischen Ausscheidungen im Porenraum lässt auf folgende generelle *Bildungsabfolge* schliessen:

- 1) Tonmineralrasen (die glatten Porenwände bedeckend),
- 2) Calcit (dem Tonmineralrasen auflagernd), eventuell sich mit 1) überschneidend (keine oder undeutliche Tonmineralrasen bei starker Calcitzementation),
- 3) Tonmineralwürmer (den Calcit umschliessend), eventuell auch anstelle von 1) (Guntliweider Varietät),
- 4) "Silikathüllen" (die Tonmineralwürmer und den Calcit bedeckend),
- 5) eventuell zusätzliche Calcitzementation (als vollständige Porenfüllung weitere Zementationen verhindernd).

Weitere Strukturen im Porenraum sind:

- *kryptokristalline "Porenfüllungen"*, sporadisch auftretend (eventuell deformierte Klasten tonigen Materials),
- Risse in Feldspäten und angrenzenden Kornfugen, die mit *Serizit* und *Chlorit* verheilt sind,
- Risse in Kohleschmitzen, die mit *Chalcedon* verheilt sind (Fig. 37),
- in Zwickelporen leicht *aufgerauhte Kornoberflächen* von Quarz und Feldspäten, eine vom Porenraum ausgehende Silikatlösung andeutend.

Tabelle 29: *Gefüge und Porenraum in Granitischen Sandsteinen von der Hauptpost*

<i>Probe</i> (effektive Porosität)	<i>mittlere Korngrösse</i> Glimmer + Chlorit	<i>Grösse und Verteilung der Makroporen</i>	<i>Tonmineralrasen</i>	<i>Calcitzement</i>	<i>Tonmineralwürmer</i>
Q 13A (8.2%)	0.2 – 0.3 mm ca. 2%	im Mittel 30 – 50 μm grosse, häufig um 100 μm grosse Zwickelporen, relativ homogen verteilt	niedrig (um 2 μm)	ca. 3% Kornzwickel teilweise ausfüllend	relativ häufig (um 1%), Kornzwickel meist vollständig ausfüllend
Q 12A (6.1%)	0.2 – 0.3 mm 2.2%	im Mittel 20 – 50 μm grosse, oft gegen 100 μm grosse Zwickelporen, Verteilung relativ homogen	sehr niedrig (um 1 μm)	ca. 5% Kornzwickel teilweise ausfüllend	relativ häufig (um 1%), Kornzwickel meist vollständig ausfüllend
Q 11A (5.7%)	0.15 – 0.2 mm 4.9%	meist 10 – 30 μm grosse, selten gegen 100 μm grosse Zwickelporen, Verteilung sehr inhomogen	sehr dick (5 – 7 μm), kleinere Kornzwickel weitgehend ausfüllend	ca. 5% grössere Kornzwickel weitgehend bis vollständig ausfüllend	keine
Q 5B (4.3%)	0.25 – 0.3 mm ca. 2%	häufig 5 μm breite Fugen-, selten 10 – 30 μm grosse Zwickelporen	teilweise und relativ dick (2 – 5 μm)	ca. 5% Kornzwickel vollständig ausfüllend	sporadisch, Kornzwickel vollständig ausfüllend
Q 6B (4.1%)	feinkörnige Zonen (a): 0.05 – 0.1 m; grobkörnige (b): 0.15 – 0.2 mm	a) praktisch keine, b) 5 μm breite Fugen-, selten 5 – 10 μm grosse Zwickelporen	teilweise und sehr niedrig (1 – 2 μm)	5 – 7% Kornzwickel vollständig ausfüllend	keine

Wie Porositätsänderungen im gleichen Gesteinstyp von wechselnden Zementationsverhältnissen begleitet sind, zeigt auch eine *Probenserie* von der *Hauptpost* (Tabelle 29, vgl. Fig. 64): Die abnehmende Intergranularporosität ist in erster Linie durch eine zunehmende Calcitzementation, in zweiter Linie durch dickere Tonmineralrasen bedingt (Hauptunterschied zwischen Q 11 und Q 12). Tonmineralwürmer sind in stark und schwach porösen Proben vorhanden. In stark makroporösen Varietäten (Q 12 und Q 13) scheinen sie jedoch häufiger zu sein und hier eine deutliche Reduktion der Makroporosität zu bewirken. Es ist kein Zusammenhang zwischen der Korngrösse und den Zementationsverhältnissen ersichtlich. Ob und wie weit die Calcitzementation von der detritischen Mineralzusammensetzung abhängt, kann nicht entschieden werden. Abgesehen von kaolonitisierten Feldspäten (Pseudomorphosen) sind quantitative Beziehungen zwischen Detritus und Tonmineralneubildungen ebenfalls fraglich.

8.2 Plattensandsteine

Der Plattensandstein wird im Vergleich zum Granitischen Sandstein und weniger ausführlich beschrieben. Da fast keine Proben aus Bauwerken entnommen werden konnten, fehlt insbesondere die Möglichkeit, unterschiedlich verwitterungsresistente Proben miteinander zu vergleichen. Porengrössenverteilungen im Quecksilber-Druckporosimeter wurden an insgesamt 14 Proben, die Porosität im Dünnschliff an drei Proben bestimmt.

8.2.1 Porometrie

Die vorliegenden Porengrössenverteilungen sind in erster Näherung ähnlich wie bei Granitischen Sandsteinen (Fig. 71 und Tabelle 30, Bedeutung der Symbole s. Fig. 61 und Tabelle 25):

1) Die *effektiven Porositäten* n^* schwanken (in unverwittertem Gestein!) um 0.020 – 0.035 ml/g, d.h. um 5.0 – 8.7%. Bei Proben, deren Gefüge gelockert oder deren Porenraum durch Mineralauflösung erweitert wurde, sind die Porositäten entsprechend stark erhöht.

2) Die Summationskurven sind unimodal mit einem *Hauptvolumenanteil* im Radienbereich r_G um 0.3 – 0.7 μm (bei unverwitterten Proben!).

Die Porengrössenverteilungen weichen in zwei Aspekten von denjenigen Granitischer Sandsteine ab:

1) Bei vergleichbarer effektiver Porosität liegt der "häufigste" Eingangsradius r_G im Plattensandstein deutlich tiefer (z.B. B 9A: 0.5 μm gegenüber H 38A: 1.5 μm , beide mit $n^* 0.035$ ml/g). Damit ist die Makroporosität zugunsten einer *Mikroporosität im Radienbereich 0.1 – 1 μm* reduziert. Dieser Unterschied verschwindet bei zunehmend schwachporösen Proben (G 2 ungefähr wie Q 6B). Es ist denkbar, dass die Verengung der Poreneingänge im Makrobereich und ihre breitere Streuung gegen unten mit der feineren Korngrösse und besseren Sortierung des Sandsteins zusammenhängen.

2) Eine zweite Porenhäufung im Radienbereich um 0.01 – 0.03 μm fehlt.

8.2.2 Struktur und Inhalt des Porenraums

Eine *Intergranularporosität* ist im Dünnschliff sehr schwach bis nicht zu erkennen, da die Kornzwickel weitgehend bis vollständig mit Calcit gefüllt sind (Fig. 72). In einer relativ stark porösen Probe (B 8, Schale: Calcizement teilweise herausgelöst!) finden sich neben wenige μm breiten Fugenporen vereinzelt 20 – 50 μm , selten gegen 100 μm grosse Zwickelporen. *Mikroporöse Bereiche* sind praktisch nur intragranular vorhanden und auf die gleichen Komponenten verteilt wie bei Granitischen Sandsteinen: Es handelt sich um Mikrite, Feldspäte und andere kryptokristalline Gesteinsbruchstücke. Wie aufgrund der detritischen Zusammensetzung (höherer Quarzgehalt) zu erwarten ist, liegt ihr Anteil etwas tiefer als in Granitischen Sandsteinen.

Im primären Porenraum können drei *Zemente* unterschieden werden:

1) *Tonmineralrasen*: Im Lichtmikroskop sind an Zwickelporenwänden 1 – 3 μm lange, radial angewachsene Nadeln sichtbar, die einen filzigen Belag bilden. In calcitgefüllten Kornzwickeln sind sie z.T. nicht erkennbar. Diese Anlagerung erscheint in REM-Aufnahmen als schwammige "Kartenhausstruktur" (Fig. 73). Sie ist aufgrund licht- und elektronenoptischer Daten mit den als Chlorit vermuteten Tonmineralrasen in Granitischen Sandsteinen vergleichbar.

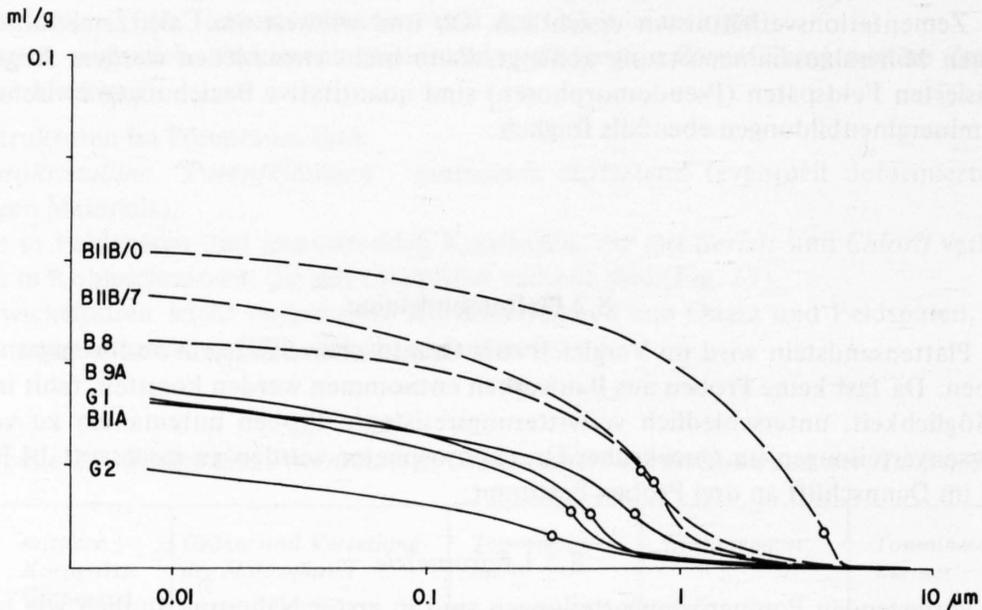


Fig. 71: Porengrößenverteilungen in Plattensandsteinen (vgl. Tabelle 30). Ausgezogene Kurven: unverwitterte Proben. B 9A und B 11A von Martinsbrugg, G 1 und G 2 vom Gletschergarten Luzern. Gestrichelte Kurven: verwitterte Proben. B 11B/0: äusserster Bereich einer stark aufgelockerten Felsrippe (Martinsbrugg, vgl. Fig. 33). B 11B/7: gleicher Bohrkern in 7 cm Tiefe, gegenüber unverwittertem Kern (B 11A) deutlich aufgelockert. B 8: Schale (Martinsbrugg, vgl. Fig. 31) mit durch Calcitlösung erweitertem Porenraum.

Tabelle 30: Porositäten in Plattensandsteinen

Probe:	Quecksilber-Druckporosimeter: ¹⁾						Dünnschliff: ¹⁾	
	n*	Mq	mq	r _G	V _G	Md	md	
	(ml/g)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
B 11B/0 ²⁾	0.061	14.3	9.2	5.1	3.8	1.9	11.6	6.5
B 11B/7 ³⁾	0.053	12.7	1.9	10.8	0.8	4.1		
B 8 ⁴⁾	0.044	10.7	2.4	8.3	0.7	4.6	3.2	3.8
B 9A	0.035	8.7	0.4	8.3	0.5	2.5		
G 1	0.034	ca. 8.7	1.3	7.4	0.7	3.1		
B 11A	0.033	8.2	0.5	7.7	0.4	2.7		
G 2	0.020	ca. 5.0	0.3	4.7	0.3	1.8		
B 13							0	1.7

¹⁾ Bedeutung der Symbole s. Tabelle 25

²⁾ Gefüge stark aufgelockert

³⁾ Gefüge mässig aufgelockert

⁴⁾ Porenraum durch Calcitlösung erweitert

2) *Calcit* füllt als sparitischer Zement die primären Zwickelporen weitgehend bis vollständig aus (Fig. 72 und 73). Da er den – teilweise vorhandenen – Tonmineralrasen überdeckt, ist er gleichzeitig bis später ausgeschieden worden.

3) "*Silikathüllen*": Sie sind nur in REM-Aufnahmen an Proben sichtbar, die mit Salzsäure angeätzt wurden. Die Häute scheinen ähnlich wie in Granitischen Sandsteinen den Calcitzement zu umhüllen. Es könnte sich also um eine jüngste diagenetische Bildung handeln.

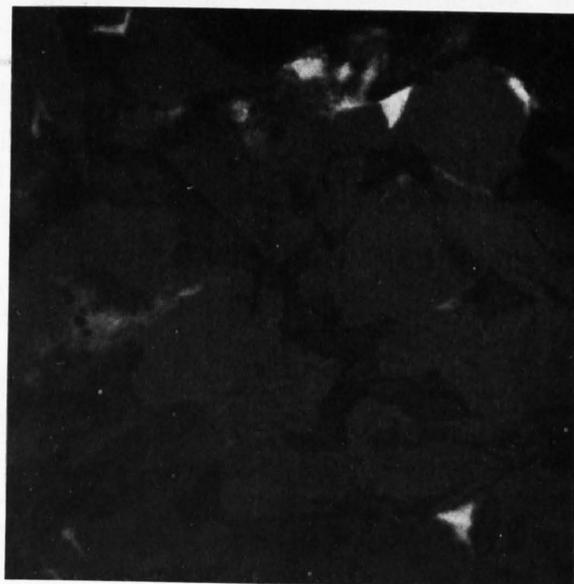
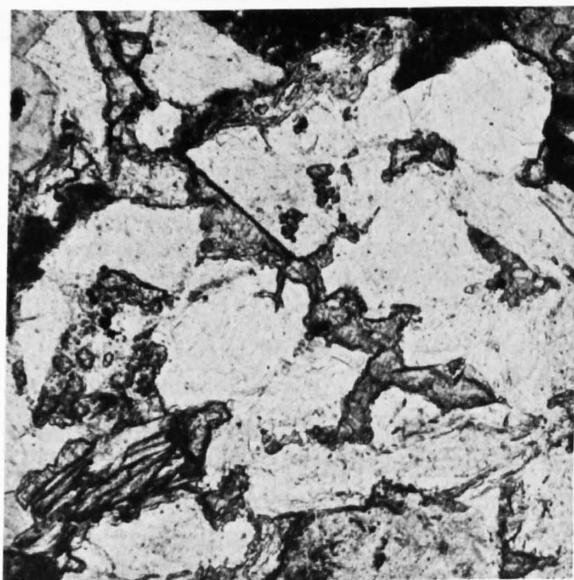


Fig. 72: Porenraum von Plattensandsteinen im Dünnschliff. Ausschnitt links im weissen Durchlicht, rechts im reflektierten Fluoreszenzlicht, wobei Poren hell erscheinen. Bildbreite 370 μm .

- a) Probe B 8 (Schale, Martinsbrugg): schwach makroporös. Vereinzelte Zwickelporen (oben und unten, durch Calcitlösung teilweise erweitert) neben vollständig calcitgefüllten Kornzwickeln (Zentrum, Calcit im Bild links als graue Felder mit dunklem Rand erkennbar).
- b) Probe B 13 (Martinsbrugg): keine sichtbare Intergranularporosität, da Kornzwickel vollständig calcitgefüllt sind. Mikroporöses Mikritkorn im Zentrum.

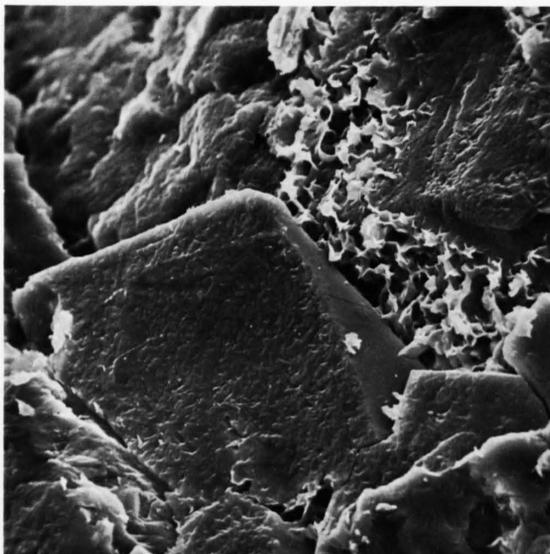


Fig. 73: Porenfüllungen in Plattensandstein, REM-Aufnahme (Probe B 9, Martinsbrugg). Schwammiger Tonmineralrasen bedeckt Wände einer Zwickelpore. Hypidiomorphe Calcitkristalle überlagern ihn und füllen die Pore weitgehend aus. Bildbreite 80 μm .

8.3 Zusammenfassung

An *Granitischen Sandsteinen* wurden mit dem Quecksilber-Druckporosimeter effektive Porositäten von 4.1 – 13.6% gemessen. Die Porengrößenverteilungskurven weisen eine Hauptporengruppe im Radienbereich 0.3 – 3 μm auf, die den Zwickelporen (Intergranularporosität) entspricht. Die starken Schwankungen der effektiven Porosität sind durch Änderung der Intergranularporosität bedingt, die in geringerem Mass durch Tonmineralzemente, in grösserem durch Calcit-zement reduziert wird. Die Ausscheidungsfolge der Zemente ist

- 1) Tonmineralrasen,
- 2) Calcit,
- 3) Tonmineralwürmer und
- 4) "Silikathüllen".

Aufgrund des Vergleiches zwischen beobachtetem Verwitterungsverhalten und Porosität scheint u.a. eine ausgeprägte Makroporosität die Wetterbeständigkeit generell zu erhöhen. Ein Grenzwert ("kritische Porosität") kann nicht gegeben werden, da sich Proben mit ähnlichen Porositäten scheinbar sehr unterschiedlich verhalten.

Bei den untersuchten *Plattensandsteinen* schwanken die effektiven Porositäten um 5.0 – 8.7%. Der Hauptvolumenanteil wird von den Zwickelporen bestimmt, deren Eingangsradien um 0.3 – 0.7 μm streuen. Im Vergleich zu Granitischen Sandsteinen ist diese Porengruppe nach unten verschoben; d.h. bei annähernd gleicher effektiver Porosität ist die Makroporosität zugunsten einer Mikroporosität im Radienbereich 0.1 – 1 μm reduziert. Schwach poröse Plattensandsteine zeigen analoge Porengrößenverteilungen wie schwach poröse Granitische Sandsteine. Als Zemente treten

- 1) Tonmineralrasen
 - 2) Calcit und
 - 3) "Silikathüllen" auf,
- wobei Calcit die Kornzwickel weitgehend ausfüllt.

9. Immissionsmessungen

9.1 Messresultate

Vom August 1978 bis März 1980 wurden an den Stationen ETH (1) und Hauptbahnhof (2) in Zürich sowie Goldberg (3) bei Schmerikon Niederschlagsproben gesammelt (Kap. 3.1.3). Darin wurden die Elemente S, Na, K, Mg und Ca und pH-Werte nach den in Kap. 3.2.4 beschriebenen Methoden bestimmt.

9.1.1 SO_4 -Gehalte

Die Sulfatgehalte im Niederschlag (als wasserlöslicher S bestimmt) sind in Fig. 74 und Tabelle 31 zusammengestellt. Die Kurven der Messstellen ETH (1) und Hauptbahnhof (2) zeigen ausgeprägt jahreszeitliche Schwankungen mit Höchstwerten in den Wintermonaten. Die Kurve vom Goldberg (3) schwankt dagegen ganzjährig um einen Mittelwert von der Grössenordnung der Minimalwerte in Zürich. Dementsprechend sind die Mittelwerte (in $mg\ m^{-2}\ Monat^{-1}$) der Periode Oktober – März für Zürich mit 797 (1) und 1073 (2) bedeutend höher als bei Schmerikon mit 381 (3), während die Mittelwerte der Periode April – September mit 651 (1), 684 (2) und 528 (3) nahe beieinander liegen. Die Gesamtmittel betragen an der ETH 739, am Hauptbahnhof 914 und im Goldberg 442, was einer jährlichen Menge von ca. 9 – 10 g in Zürich und ca. 5 g bei Schmerikon ($SO_4\ m^{-2}\ Jahr^{-1}$) entspricht.

9.1.2 Na-, K-, Mg- und Ca-Gehalte

Die erhaltenen Werte dieser Elemente sind in den Figuren 75 – 78 und den Tabellen 32 – 35 zusammengestellt. Auffallend sind die im Vergleich zu SO_4 sehr geringen Konzentrationen: Die Gesamtmittel (in $mg\ m^{-2}\ Jahr^{-1}$) liegen für Na, K und Mg in der Grössenordnung 10 – 30, für Ca um 50 – 80 (die Ca-Werte sind wegen der in Kap. 3.2.1.3 erwähnten Empfindlichkeitsreduktion zu tief). Deutlich jahreszeitliche Schwankungen analog zu den Sulfatgehalten fehlen. Am Hauptbahnhof (2) wurden für alle Elemente die höchsten Werte gemessen, im Goldberg (3) sind sie etwa halb so gross, an der ETH (1) meist intermediär. Bei Na, K und Ca liegen einzelne Gehalte weit über dem durchschnittlichen Kurvenverlauf, was auf lokale Verschmutzungsquellen hinweist.

9.1.3 pH-Werte

Die gemessenen pH-Werte liegen im sauren Bereich, und zwar um 3.5 – 5.5 in Zürich und um 3.8 – 6.5 bei Schmerikon.

9.2 Zusammenfassung und Vergleiche

Aussagen über die im Untersuchungsgebiet herrschenden Immissionen sind den wenigen Messstellen und der kurzen Messdauer entsprechend stark eingeschränkt. Die *Sulfatgehalte* der Niederschläge ergaben vom August 1978 bis März 1980 jährliche Mengen von ca. 9 – 10 $g\ m^{-2}$ in Zürich und 5 $g\ m^{-2}$ bei Schmerikon. Während sie in Zürich jahreszeitlich schwankten mit Spitzen von ca. 1.5 $g\ m^{-2}\ Monat^{-1}$ im Winter, lagen sie bei Schmerikon ganzjährig um 0.5 g, was etwa den Minimalwerten in Zürich entspricht.

Diese Resultate sind mit gesamtschweizerischen Messungen vergleichbar, die von der MZA (Schweizerische Meteorologische Zentralanstalt, Zürich) und der EAWAG (Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, Dübendorf) 1975 – 1978 durchgeführt wurden (ZOBRIST & STUMM, 1979): Eine typisch schweizerische, aus der Atmosphäre abge-

lagerte Sulfatmenge, beträgt $7.2 \text{ g SO}_4 \text{ m}^{-2} \text{ Jahr}^{-1}$, was etwa dem Mittel zwischen eigenen Messungen in Zürich und bei Schmerikon entspricht. DEUBER (1969) stellte in Niederschlägen der Stadt Zürich 1965 – 1967 $12.5 \text{ g SO}_4 \text{ m}^{-2} \text{ Jahr}^{-1}$ fest. Der gegenüber eigenen Messungen um 30% höhere Gehalt weist auf einen möglichen Rückgang der SO_4 -Immissionen in den letzten 10 Jahren hin, könnte aber ebensogut auf normalen jährlichen Schwankungen oder methodischen Unterschieden beruhen. Analog zu eigenen Messungen erhielt DEUBER (id.) jahreszeitlich schwankende SO_4 -Gehalte mit Spitzenwerten um $1.5 \text{ g m}^{-2} \text{ Monat}^{-1}$ im Winter, – dort sind sie jedoch über November bis April verteilt, während sie hier nur im November auftreten. Weil die stärksten SO_2 -Emissionen (durch Verbrennung von Heizöl und Kohle) im kältesten Monat Januar zu erwarten sind, erstaunt es, dass die eigenen Höchstwerte auf den November beschränkt sind und auch DEUBER's (id.) Messungen im Januar ein deutliches Zwischentief aufweisen. Zur Interpretation derartiger Kurvenverläufe müssten systematische klimatologische Analysen (u.a. zum Einfluss des Schnees anstelle von Regen) durchgeführt werden. – Aus der üppigen Literatur sei schliesslich LUCKAT (1975) zitiert, der 1973 – 1974 mit sogenannten IRMA's (Immissionsratenmessapparatur, die angewehten Staub und Aerosole sammelt) in Köln $85 - 111 \text{ mg SO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ (Jahresmittel, entspricht $47 - 61 \text{ g SO}_4 \text{ m}^{-2} \text{ Jahr}^{-1}$, mit Höchstwerten im Dezember/Januar und Tiefstwerten im Juli/August), auf Schloss Neuschwanstein hingegen nur $6 \text{ mg SO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ (entspricht $3 \text{ g SO}_4 \text{ m}^{-2} \text{ Jahr}^{-1}$) registrierte. Demnach wäre die Kölner Luft um fast eine Grössenordnung "schwefeliger" als die Zürcher Luft und die Neuschwansteiner um ebensoviele "sauber" als die Schmerikoner, wobei unterschiedliche Messzeiten und -methoden zu berücksichtigen sind.

Die *Na-, K-, Mg- und Ca-Gehalte* der Niederschläge waren in Zürich und bei Schmerikon viel geringer als die SO_4 -Gehalte, nämlich um $0.1 - 0.5 \text{ g m}^{-2} \text{ Jahr}^{-1}$ für Na, K und Mg und um $0.5 - 1 \text{ g}$ für Ca (Ca-Werte liegen wegen systematischer Fehler zu tief). Dabei wurden keine periodischen Schwankungen festgestellt. Diese Werte entsprechen etwa den von ZOBRIST & STUMM (1979) ermittelten schweizerischen Durchschnittsgehalten von $0.2 \text{ g Na (m}^{-2} \text{ Jahr}^{-1})$, 0.4 g K , 0.2 g Mg und 1.4 g Ca .

Die *pH-Werte* der Niederschläge lagen im sauren Bereich, d.h. um $3.3 - 5.5$ in Zürich und um $3.8 - 6.5$ bei Schmerikon. Damit streuten sie um den von ZOBRIST & STUMM (1979) angegebenen pH von 4.3 eines typisch schweizerischen Regenwassers. Nach DEUBER (1969) lag der mittlere pH in Zürcher Niederschlägen 1965 – 1967 mit 3.9 etwas tiefer. Eine Interpretation der Differenzen müsste auch hier auf systematischeren Daten beruhen.

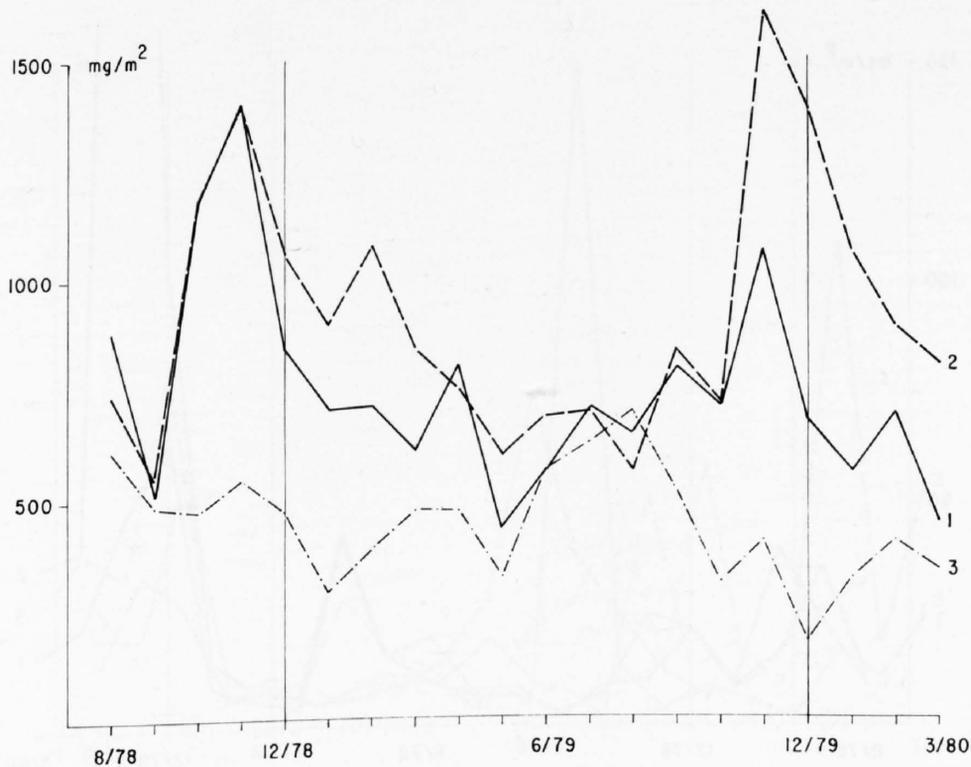


Fig. 74: SO_4 -Gehalte im Niederschlag (vgl. Tabelle 31, Mittelwerte). Messzeit August 1978 – März 1980. Messstellen: 1) ETH, 2) Hauptbahnhof, 3) Goldberg.

Tabelle 31: SO_4 -Gehalte im Niederschlag (in $mg\ m^{-2}\ Monat^{-1}$)

Messzeit Mt./Jahr	ETH (1)				Hauptbahnhof (2)			Goldberg (3)			
	1*	2	3	Mittel	1	2	Mittel	1	2	3	Mittel
8/78	774	787	797	786	744	731	738	454	699	699	617
9/78	456	497	598	517	522	578	550	494	474	494	487
10/78	1149	1201	1201	1184	1201	1173	1187	541	471	419	477
11/78	1321	1531	1321	1391	1323	1474	1399	564	517	554	545
12/78	877	909	748	845	1276	831	1054	413	433	584	477
1/79	688	696	728	704	983	809	896	241	238	394	291
2/79	720	699	710	710	1079	1071	1075	313	362	474	383
3/79	544	596	679	606	715	956	836	557	420	426	468
4/79	885	846	668	800	675	816	746	499	515	387	467
5/79	423	425	426	425	595	594	595	325	297	328	317
6/79	605	515	552	557	628	734	681	620	613	454	562
7/79	666	643	787	699	757	636	697	514	537	802	618
8/79	608	616	694	639	608	499	554	671	702	710	694
9/79	731	933	699	788	927	737	832	546	442	546	511
10/79	617	734	760	704	634	783	709	307	311	303	307
11/79	1338	913	928	1060	1543	1661	1602	351	441	411	401
12/79	700	671	651	674	1586	1180	1383	226	—	110	168
1/80	441	584	639	555	1126	984	1055	328	334	284	315
2/80	625	725	713	688	939	828	884	488	417	292	399
3/80	485	417	419	440	776	820	798	356	317	334	336
Gesamtmittel				739			914				442

*) Gefäss-Nr.

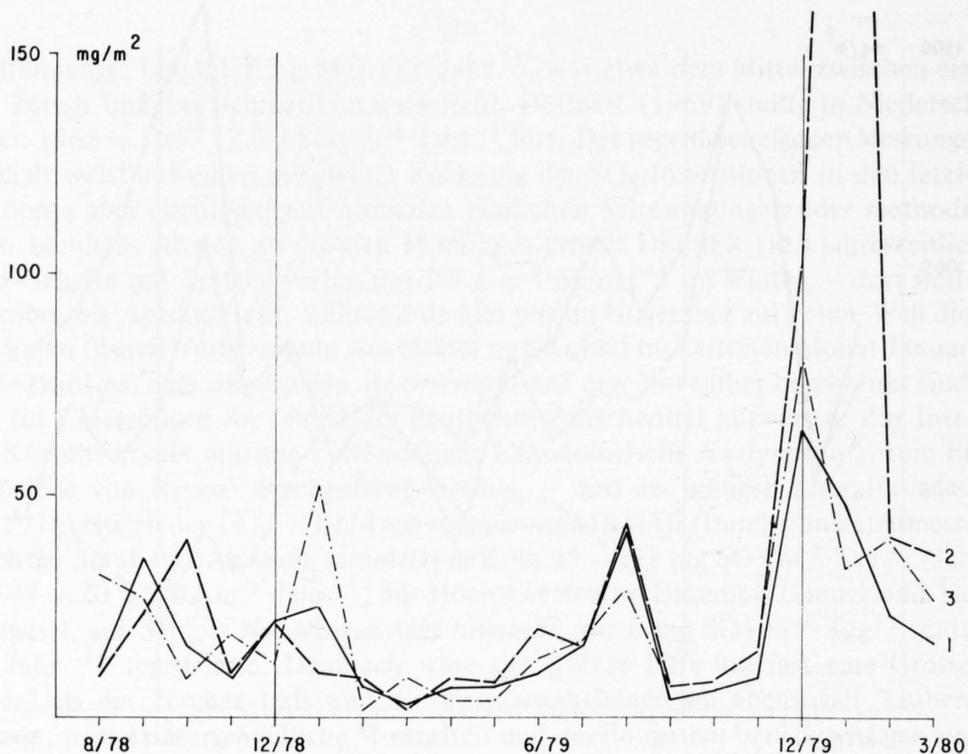


Fig. 75: Na-Gehalte im Niederschlag (vgl. Tabelle 32, Werte von Gefäss 1). Messzeit August 1978 – März 1980. Messstellen: 1) ETH, 2) Hauptbahnhof, 3) Goldberg.

Tabelle 32: Na-Gehalte im Niederschlag (in $\text{mg m}^{-2} \text{ Monat}^{-1}$)

Messzeit Mt./Jahr	ETH (1)				Hauptbahnhof (2)			Goldberg (3)			
	1*	2	3	Mittel	1	2	Mittel	1	2	3	Mittel
8/78	11	21	7	13	9	11	10	32	27	27	29
9/78	36	14	22	24	23	16	20	27	30	33	30
10/78	16	16	12	15	40	14	27	9	9	12	10
11/78	9	6	7	7	10	13	12	19	14	13	15
12/78	22				22			12			
1/79	25				10			52			
2/79	7				9			2			
3/79	3				2			9			
4/79	7				9			4			
5/79	7				8			4			
6/79	10				20			13			
7/79	16				16			17			
8/79	42				44			29			
9/79	4				7			7			
10/79	6				8			8			
11/79	9				15			15			
12/79	65				102			80			
1/80	48				359			34			
2/80	23				41			40			
3/80	17				37			27			
Mittel	19				40			22			

*) Gefäss-Nr.

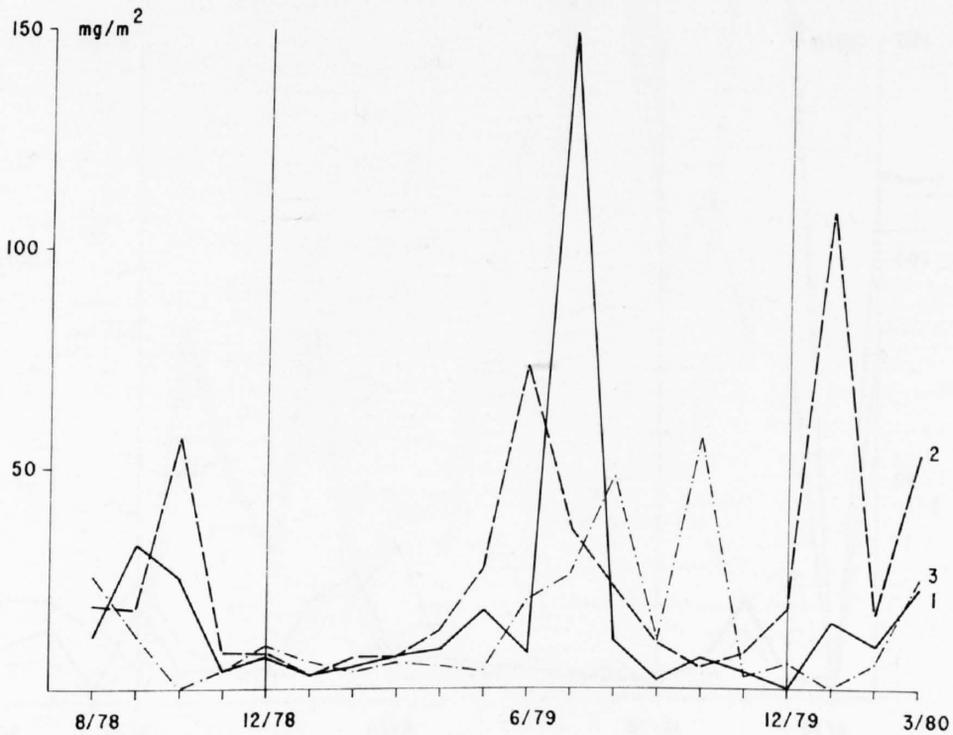


Fig. 76: K-Gehalte im Niederschlag (vgl. Tabelle 33, Werte von Gefäss 1). Messzeit August 1978 – März 1980. Messstellen : 1) ETH, 2) Hauptbahnhof, 3) Goldberg.

Tabelle 33: K-Gehalte im Niederschlag (in $mg\ m^{-2}\ Monat^{-1}$)

Messzeit Mt./Jahr	ETH (1)				Hauptbahnhof (2)			Goldberg (3)			
	1*	2	3	Mittel	1	2	Mittel	1	2	3	Mittel
8/78	12	45	25	27	19	18	19	26	55	30	37
9/78	33	9	9	17	18	12	15	12	12	19	14
10/78	25	16	23	21	57	16	37	0	0	6	2
11/78	4	5	0	3	8	4	6	4	4	1	3
12/78	7				8				10		
1/79	3				3				6		
2/79	5				7				4		
3/79	7				7				6		
4/79	9				13				5		
5/79	18				27				4		
6/79	8				73				20		
7/79	149				36				26		
8/79	11				23				48		
9/79	2				10				11		
10/79	7				5				57		
11/79	4				8				3		
12/79	0				18				6		
1/80	15				108				0		
2/80	10				17				6		
3/80	23				53				25		
Mittel	18				26				14		

*) Gefäss-Nr.

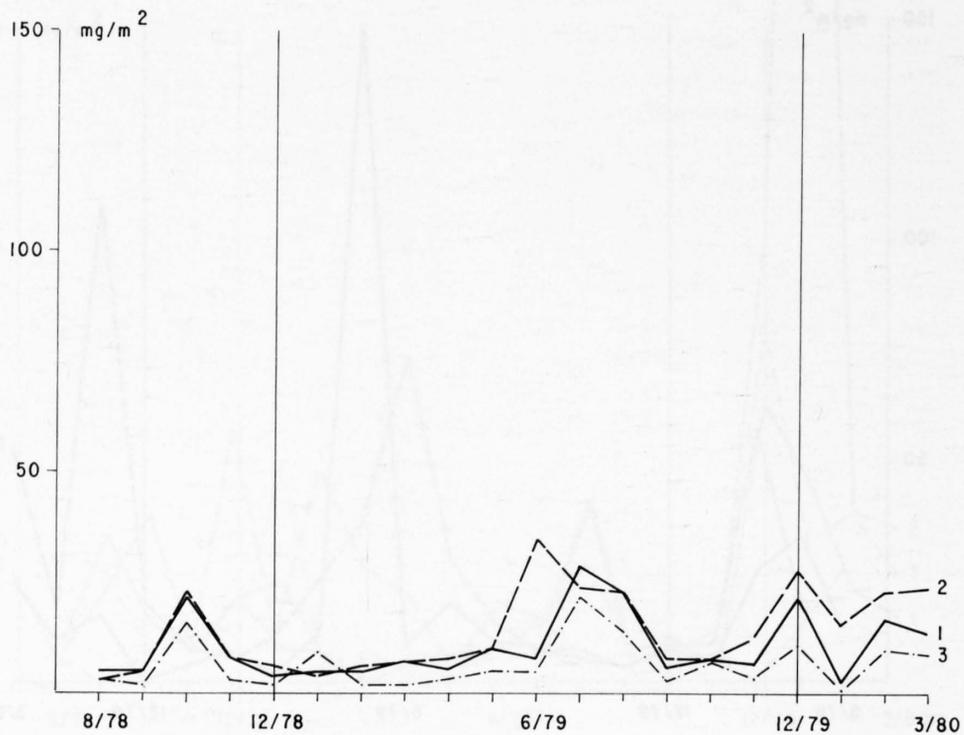


Fig. 77: Mg-Gehalte im Niederschlag (vgl. Tabelle 34, Werte von Gefäss 1). Messzeit August 1978 – März 1980. Messstellen: 1) ETH, 2) Hauptbahnhof, 3) Goldberg.

Tabelle 34: Mg-Gehalte im Niederschlag (in $\text{mg m}^{-2} \text{ Monat}^{-1}$)

Messzeit Mt./Jahr	ETH (1)				Hauptbahnhof (2)			Goldberg (3)			
	1*	2	3	Mittel	1	2	Mittel	1	2	3	Mittel
8/78	5	5	3	4	3	3	3	3	3	1	2
9/78	5	4	5	5	5	4	5	2	2	5	3
10/78	22	23	23	23	23	20	22	16	10	8	11
11/78	8	8	7	8	8	7	8	3	3	3	3
12/78	4				6			2			
1/79	5				4			9			
2/79	5				6			2			
3/79	7				7			7			
4/79	6				8			3			
5/79	10				10			5			
6/79	8				35			5			
7/79	29				24			22			
8/79	23				23			14			
9/79	6				8			3			
10/79	8				8			7			
11/79	7				13			4			
12/79	22				28			11			
1/80	3				16			1			
2/80	17				23			10			
3/80	14				24			9			
Mittel	11				14			7			

*) Gefäss-Nr.

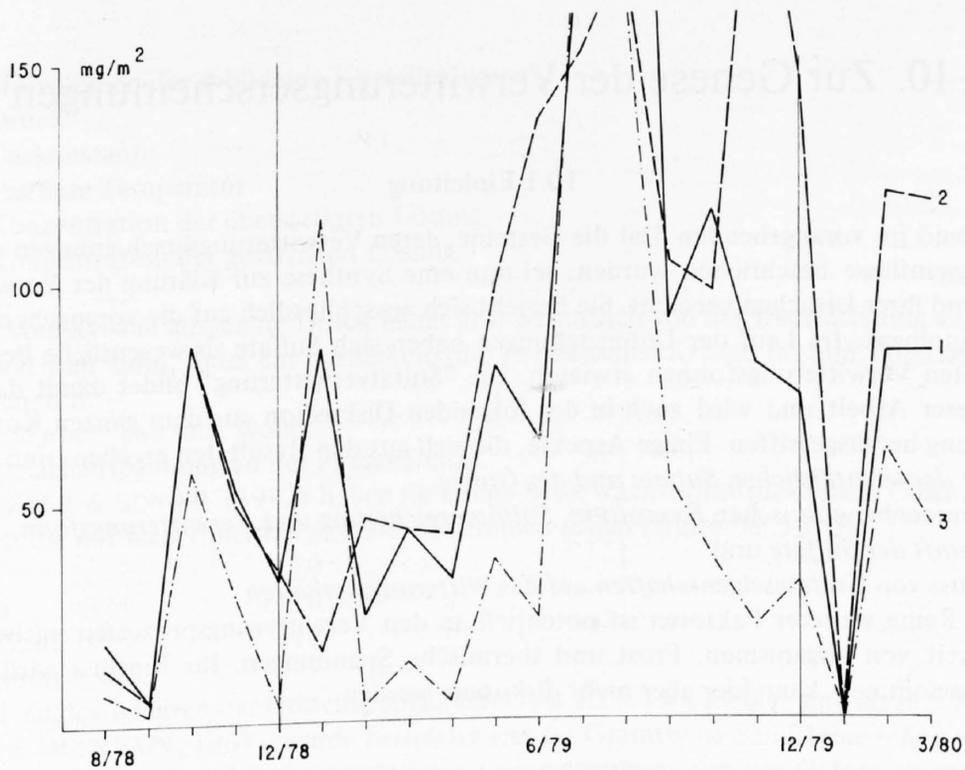


Fig. 78: Ca-Gehalte im Niederschlag (vgl. Tabelle 35, Werte von Gefäss 1, zu tief). Messzeit August 1978 – März 1980. Messstellen: 1) ETH, 2) Hauptbahnhof, 3) Goldberg.

Tabelle 35: Ca-Gehalte im Niederschlag (in $\text{mg m}^{-2} \text{ Monat}^{-1}$)

Messzeit Mt./Jahr	ETH (1)				Hauptbahnhof (2)			Goldberg (3)			
	1*	2	3	Mittel	1	2	Mittel	1	2	3	Mittel
8/78	19	14	9	14	13	13	13	7	2	2	4
9/78	5	4	5	5	5	4	5	2	2	5	3
10/78	86	72	100	86	86	86	86	57	29	29	38
11/78	53	43	49	48	50	52	51	29	20	20	23
12/78	32				35			4			
1/79	85				16			114			
2/79	24				46			3			
3/79	43				43			13			
4/79	32				42			4			
5/79	80				99			36			
6/79	63				136			23			
7/79	185				151			196			
8/79	292				174			170			
9/79	90				103			54			
10/79	115				97			36			
11/79	80				210			21			
12/79	73				145			31			
1/80	0				0			0			
2/80	83				119			61			
3/80	83				117			44			
Mittel	76				84			45			

*) Gefäss-Nr.

10. Zur Genese der Verwitterungserscheinungen

10.1 Einleitung

Während im vorangehenden Teil die Gesteine, deren Verwitterungserscheinungen und einige Umgebungseinflüsse beschrieben wurden, sei nun eine Synthese zur Klärung der Verwitterungsprozesse und ihrer Ursachen versucht. Sie bezieht sich ausschliesslich auf die vorangehend beschriebenen Phänomene. Im Lauf der Untersuchungen haben sich Sulfate als wesentliche Begleiter der beobachteten Verwitterungsformen erwiesen. Die "Sulfatverwitterung" bildet damit das zentrale Thema dieser Arbeit und wird auch in der folgenden Diskussion aus dem ganzen Komplex der Verwitterung herausgegriffen. Einige Aspekte, die sich aus den Resultaten ergeben, sind

- *Rolle der leichtlöslichen Sulfate und des Gipses,*
- *Zusammenhang zwischen Exposition, Sulfatanreicherung und Verwitterungsform,*
- *Herkunft der Sulfate und*
- *Einfluss von Gesteinseigenschaften auf das Witterungsverhalten.*

Eine Reihe weiterer Faktoren ist potentiell an den Verwitterungsprozessen mitbeteiligt, so die Tätigkeit von Organismen, Frost und thermische Spannungen. Ihr Einfluss wird zwar zur Kenntnis genommen, kann hier aber nicht diskutiert werden.

10.2 Rolle der leichtlöslichen Sulfate und des Gipses

10.2.1 Grundlagen zur Salzsprengung

Bereits *Brard* (DE THURY et al., 1828) hat mit aller Deutlichkeit auf die zerstörende Wirkung von Salzen hingewiesen und sie in einem Verfahren zur Prüfung der Wetterbeständigkeit von Gesteinen (Salzkristallisationsversuch) praktisch angewandt. Später lieferte das Studium der Wüstenverwitterung (WALTHER, 1900) neue Aspekte. Im Bereich der Bausteinverwitterung wurde die Salzsprengung lange Zeit unterschiedlich beurteilt: Während sie HIRSCHWALD (1908) nicht und KIESLINGER (1932) nur am Rande erwähnen, haben sie KAISER (1907), BEYER (1912), SCHAFFER (1932) u.a. immer wieder betont. Neuere Untersuchungen (SCHMOELZER, 1936; DE QUERVAIN, 1945) und Theorien (CORRENS, 1949) rückten die Bedeutung der Salze zunehmend in den Vordergrund. Heute werden sie allgemein zu den wichtigsten Verursachern von Bauschäden gerechnet (WINKLER, 1975; ARNOLD, 1976). EVANS (1970) fasste in seiner Bibliographie zur Salzverwitterung die theoretischen Kenntnisse zusammen, wonach die zerstörende Wirkung der Salze auf deren mechanische Sprengkraft durch

- 1) *Kristallwachstum,*
- 2) *Hydratation und*
- 3) *thermische Ausdehnung*

zurückgeführt wird. Daneben scheint die chemisch aggressive Wirkung der Salzlösungen vernachlässigbar; denn Auflösungserscheinungen im Zusammenhang mit Salzanreicherungen werden im Gegensatz zum mechanischen Zertrümmerungseffekt nur ausnahmsweise beobachtet.

1) *Kristallwachstum:* Zahlreiche Beobachtungen (ANDREE, 1912) und Experimente (CORRENS & STEINBORN, 1939) wiesen darauf hin, dass die Salzsprengung nicht auf einem Volumenzuwachs des Systems 'Salz + Lösung', sondern auf einem linearen (gerichteten) Wachstumsdruck beruhen müsse. Dazu lieferte CORRENS (1949) die grundlegende Theorie:

Das Kristallwachstum wird als umgekehrter Vorgang zur Drucklösung angesehen. In beiden Prozessen steht ein Kristall unter Druck im Gleichgewicht mit einer übersättigten Lösung:

$$vP = R T \ln c/c_s, \text{ wobei}$$

- v Molvolumen der gebildeten Kristalls substanz
- P Druck
- R Gaskonstante
- T absolute Temperatur
- c Konzentration der übersättigten Lösung
- c_s Konzentration der gesättigten Lösung.

Der vom Kristall ausgeübte Druck hängt also wesentlich von der Übersättigung ab. Damit der Kristall wachsen kann, muss ein Flüssigkeitsfilm (b) zwischen Kristall (a) und Unterlage (c) erhalten bleiben, d.h.

$$\sigma_{ac} > \sigma_{bc} + \sigma_{ab} \text{ sein, wobei}$$

σ Oberflächenspannung an der Phasengrenze.

WINKLER & SINGER (1972) haben für einige Salze Wachstumsdrucke nach CORRENS (1949) berechnet, die mit Experimenten gut übereinstimmen sollen (Werte bei 50°C):

c/c_s	2	10
Gips	334	1110 atm
Epsomit	125	415
Mirabilit	83	277

Weil Zugfestigkeiten der Gesteine allgemein etwa 10 – 15 x kleiner sind als ihre Druckfestigkeiten (DE QUERVAIN, 1967), würde beispielsweise für Granitische Sandsteine schon eine Kristallisation von Mirabilit aus 2-fach übersättigter Lösung genügen, um das Gefüge zu sprengen (vgl. Fig. 65).

WEYL (1959) konnte den Transport von Mineralsubstanz als Diffusionsvorgang im Lösungsfilm zwischen den Kristallen erklären. Eine Ablagerung (d.h. Kristallwachstum) findet statt, wenn die Diffusion einwärts gerichtet, d.h. $d\sigma/dx$ positiv ist, wobei

σ effektiver Normalstress, d.h. absoluter linearer Druck minus hydrostatischer Druck, zwischen den Kontaktflächen (entspricht der Oberflächenspannung δ_{ac} nach CORRENS, 1949)

x Radialkoordinate einer kreisförmigen Kontaktfläche.

Der Flüssigkeitsfilm hat Festkörpereigenschaften, da er einen linearen Druck übermitteln kann. Bei übersättigtem Lösungsfilm wächst der Kristall, solange

$$\Delta c/b > \bar{\sigma}, \text{ wobei}$$

Δc Übersättigung

b Stresskoeffizient der Löslichkeit (er ist positiv für Minerale, deren Kristallisation mit einer Volumen- und damit Druckzunahme des Systems verbunden ist)

$\bar{\sigma}$ mittlerer effektiver Normalstress.

Der Wachstumsdruck ist nach oben begrenzt und geht in Lösungsdruck über, sobald $\bar{\sigma}$ grösser wird als $\Delta c/b$. Der vom wachsenden Kristall ausgeübte bzw. überwundene lineare Druck steigt mit zunehmender Übersättigung und abnehmendem Stresskoeffizienten der Löslichkeit.

2) *Hydratation*: Während das Kristallwachstum bei Lösungsverdunstung, d.h. unter Wasserabgabe stattfindet, ist die Hydratation mit Wasseraufnahme verbunden. MORTENSEN (1933) verwendete zur Berechnung des Hydratationsdruckes folgende Gleichung:

$$vP = R T \cdot \ln p_0/p, \text{ wobei}$$

v Volumenzunahme des Salzes

P Druck

R Gaskonstante

T absolute Temperatur

p_0 Wasserdampf-Partialdruck der Luft

p Wasserdampf-Partialdruck des Hydrates.

Der Hydratationsdruck ist also vor allem von der Wasserdampf-Druckdifferenz zwischen Luft und Salz und damit von der Temperatur abhängig: Er steigt mit abnehmender Temperatur

und zunehmender Luftfeuchtigkeit, d.h. bei klimatischen Bedingungen, die der Evaporation entgegengesetzt sind.

WINKLER & WILHELM (1970) haben nach MORTENSEN(1933) folgende Hydratationsdrucke berechnet (unter idealen Bedingungen, d.h. geschlossenes Porensystem, unbeschränkter Feuchtigkeitszustrom, usw.):

Luftfeuchtigkeit		50%	90%
Bassanit → Gips:	20°C	575	1571 atm
	0°C	1072	2000
Hexahydrat → Epsomit:	20°C	19	103
	10°C	50	132
Thenardit → Mirabilit:	31°C	–	135
	20°C	–	331

ARNOLD (1976) weist anhand von Klimadaten nach, dass die Bedingungen zur Umwandlung Thenardit-Mirabilit im Raum Zürich von März bis September bei normalen täglichen Temperaturschwankungen gegeben sind. Übrigens wird in der Bausteinprüfung der Hydratationsdruck mit Salzsprengversuchen praktisch angewandt, wobei mit Natriumsulfat die raschesten und den Verwitterungserscheinungen am Bauwerk ähnlichsten Zerstörungen erzielt werden (Versuch nach Brard in DE THURY et al., 1828; DE QUERVAIN & JENNY, 1951).

3) *Thermische Expansion*: Weil der Expansionskoeffizient löslicher Salze im allgemeinen grösser ist als bei Gesteinen, kann ihre thermische Ausdehnung ebenfalls sprengend wirken (COOKE & SMALLEY, 1968): So dehnt sich z.B. Halit um mehr als das 3-fache von Granit aus. Dieser Effekt kommt zur Kristallisationskraft hinzu, indem sich das Gestein nach vollständiger Lösungsverdunstung rasch erhitzt.

Zusammenfassung: Beim Auskristallisieren und bei der Hydratation von Salzen sind Druckentwicklungen zu erwarten, welche grösser sind als die Zugfestigkeiten der Gesteine. Durch häufig wiederholtes Auskristallisieren bzw. Hydratisieren der Salze bei Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsänderungen können auch sehr kleine Sprengeffekte als Summe eine starke Gefügelockerung verursachen. Wenn die Lösungsverdunstung bei hoher Umgebungstemperatur geschieht, wirkt die thermische Ausdehnung der Salze nach abgeschlossener Verdunstung in gleicher Richtung wie der Wachstumsdruck. – Die Anreicherung von Gips, Magnesiumsulfat und Natriumsulfat im Porenraum der Sandsteine muss also deren mechanische Zerstörung zur Folge haben.

10.2.2 Löslichkeit und Anreicherungstiefe

Um die Beziehung zwischen Gefügezerstörung durch Salzanreicherungen und Verwitterungsform zu verstehen, müssen wir das Verhalten der verschiedenen Sulfate bei ihrer Anreicherung im Verwitterungsprofil kennen: Beim Verdunsten der im Gestein vorhandenen Lösungen werden die Salze entsprechend ihrer Löslichkeit in einer bestimmten Tiefe des Mauer- oder Felsprofils, die durch das Feuchtigkeitsprofil bestimmt wird, ausgeschieden.

In vereinfachter Darstellung werden die Salzlöslichkeiten vor allem von Druck, Temperatur und Lösungsgenossen beeinflusst. Weil über Kristallen, die im offenen Porenraum frei wachsen, der annähernd konstante *Atmosphärendruck* (ca. 1 atm) herrscht, kann er in diesem Zusammenhang vernachlässigt werden. (Dieser Umgebungsdruck ist nicht zu verwechseln mit dem oben erwähnten Kristallwachstumsdruck, der sich im Bereich der Einzelkristalle aufbaut). Hingegen ist die *Temperaturabhängigkeit* wichtig. Wie Tabelle 36 zeigt, ändert sich im normalen Temperaturbereich die Löslichkeit von Gips relativ schwach, von Magnesiumsulfat (Epsomit) mässig und von Natriumsulfat (Mirabilit) sehr stark: Mirabilit ist bei 30°C etwa 10 x löslicher als bei 0°C. Für dieses Salz ist deshalb eine erhöhte Kristallisationstendenz bei tiefen Mauertemperaturen, d.h. im Winter bis Frühling zu erwarten. Es ist überdies denkbar, dass die leichtlöslichen Sulfate bei tiefen

Ausstemperaturen wegen dem in der Mauer entstehenden Temperaturgefälle bevorzugt oberflächennah oder als Ausblühungen kristallisieren. Ihre beobachtete Ausblühungstendenz an kalten und trockenen Wintertagen könnte wenigstens teilweise damit zusammenhängen (Kap. 7.7.3). Durch zusätzliche *Lösungsgenossen* können die Salzlöslichkeiten stark verändert, und zwar durch fremde Ionen im allgemeinen erhöht und durch gleiche Ionen erniedrigt werden. So ist Gips in einer Lösung von 13% Natriumchlorid und 1% Natriumsulfat etwa 3 x löslicher als in reinem Wasser (BRAITSCH, 1962, S. 27). Löslichkeitsverminderungen sind beispielsweise für Gips bei Anwesenheit von Magnesiumsulfat (HIRSCHWALD, 1908, S. 13) oder für Magnesiumsulfat bei Anwesenheit in Chloriden (SCHMOELZER, 1936) bekannt. Die Lösungszusammensetzung beeinflusst zudem die Art der entstehenden Kristallphase, indem sich bei hohen Salzgehalten meist niedrigere Hydratstufen bilden: Das berechnete Gips-Anhydrit-Gleichgewicht verschiebt sich im eindampfenden Meerwasser von knapp 50°C auf unter 20°C bei gesättigter Natriumchloridlösung (FUECHTBAUER & MUELLER, 1977, S. 425). Der in Thenarditausblühungen nachgewiesene Hexahydrat (Kap. 6.2.2) ist möglicherweise auf eine entsprechende Gleichgewichtserniedrigung zwischen Epsomit und Hexahydrat durch Natriumsulfat zurückzuführen. SCHMOELZER (1936) erwähnt analoge Hexahydratbildungen an Mauern während der warmen Jahreszeit. – Wenn auch Löslichkeitsveränderungen bei einzelnen einfacheren Salzkombinationen bekannt sind, so lassen sich konkrete Wechselwirkungen einer grösseren Zahl von zudem meist unbekanntem Lösungsgenossen im Verwitterungsprofil doch nur zu einem kleinen Teil abschätzen.

Tabelle 36: Löslichkeiten von Gips, Epsomit und Mirabilit bei verschiedenen Temperaturen (g Salz/100 g Wasser)

Temperatur (°C)	0 ⁰	10 ⁰	20 ⁰	30 ⁰	40 ⁰
Gips	0.176		0.204		0.212
Epsomit		30.05	35.6		45.4
Mirabilit	4.56	9.14	19.08	40.87	

(nach Chemiker-Kalender, 1974)

Gips ist bei 20°C rund 100 x weniger löslich als die leichtlöslichen Magnesium- und Natriumsulfate (Tabelle 36). Er kann deshalb nicht zu den leichtlöslichen Salzen gerechnet werden. Bei der Anreicherung an der Gesteinsoberfläche und im Verwitterungsprofil verhält er sich dementsprechend anders als Natrium- und Magnesiumsulfat (Kap. 5.2.2 und 6.2.2; vgl. auch ARNOLD, 1976):

- Seitlich oberflächlicher Sickerwasserstellen reichert sich zunächst Gips und in grösserer Entfernung Natrium- bzw. Magnesiumsulfat an.
- Gipsausblühungen sind praktisch stationär, während Magnesium- und Natriumsulfat periodisch ausblühen und wieder verschwinden. In den beobachteten Fällen genügt also nur eine starke Benetzung durch Regen oder Sickerwasser – nicht aber Änderungen der Luftfeuchtigkeit –, um Gipsausblühungen wiederholt ins Gesteinsinnere zu transportieren.
- Im Verwitterungsprofil scheint sich hinter Schalen vorwiegend bis ausschliesslich Gips anzureichern, was auf selektive Anreicherung gegenüber den leichtlöslichen Sulfaten hinweist.

Zusammenfassung: Bei Lösungsverdunstung scheiden sich die Salze nach ihrer Löslichkeit in einer bestimmten Zone des Feuchtigkeitsprofils (parallel oder senkrecht zur Gesteinsoberfläche) aus. Die Löslichkeit eines Salzes wird in diesem Zusammenhang vor allem von Temperatur und Lösungsgenossen beeinflusst. Aufgrund der Löslichkeitserniedrigung bei tiefen Temperaturen kann eine erhöhte Kristallisationstendenz der leichtlöslichen Sulfate und speziell von Mirabilit im Winter bis Frühling erwartet werden. Der Einfluss von Lösungsgenossen ist nur beschränkt oder

gar nicht abzuschätzen, weil die genauen Lösungszusammensetzungen unbekannt sind. Da Gips viel weniger löslich ist als Natrium- und Magnesiumsulfat, verhält er sich bei der Anreicherung wesentlich anders als diese leichtlöslichen Sulfate.

10.3 Exposition, Sulfatanreicherung und Verwitterungsform

10.3.1 Einleitung

Aus der phänomenologischen Beziehung zwischen Art der Exposition, Ort der Sulfatanreicherung und Verwitterungsform lässt sich ein genetischer Zusammenhang ableiten: Bei den beschriebenen Verwitterungserscheinungen steuert die Exposition die Sulfatanreicherung und damit die Verwitterungsform. In Bezug auf die Anreicherungstiefe der Sulfate ergeben sich aus dem expositionsbedingten Zusammenspiel von Befeuchtung und Austrocknung theoretisch verschiedene Möglichkeiten, die in Tabelle 37 zusammengestellt sind: Die Benetzung geschieht im Fall A durch Niederschläge (Regen, Schnee, Tau, ev. Kondensation etc.) oder oberflächliches Sickerwasser von aussen. Im Fall B gelangt durchsickernde Lösung – sie kann direkt aus dem Stein (Bergfeuchte im Naturaufschluss) oder indirekt von aussen (Boden, gestautes atmosphärisches Wasser, ev. Kondensation) stammen – von innen an die Gesteinsoberfläche. Die Intensität der Benetzung und Austrocknung lässt sich hier nur grob als "stark" oder "schwach" angeben.

Im Fall von äusserer Benetzung (A) ist wesentlich, dass gelöste Sulfate nur mit tiefgreifender Wassersättigung, d.h. bei starker Benetzung ins Gesteinsinnere gelangen können (A1 und A2). Ist die nachfolgende Austrocknung stark, so verschiebt sich die Verdunstungsfront der Lösung – eigentlich das Gleichgewicht zwischen kapillarer Lösungswanderung im Innern (Hagen-Poiseuille-Gesetz) und Dampfdiffusion (Fick'sches Gesetz) im Bereich der Gesteinsoberfläche – ins Innere. Dadurch werden gelöste Stoffe im Innern ausgeschieden (A1). Bleibt jedoch die Verdunstungsfront wegen schwacher Austrocknung an der Oberfläche, wandern die Sulfate an die Oberfläche zurück und werden hier angereichert (A2). Bei schwacher Benetzung können die Sulfate gar nicht ins Gesteinsinnere dringen, sodass sie sich unabhängig von der Austrocknungsstärke oberflächlich anreichern müssen (A3 und A4).

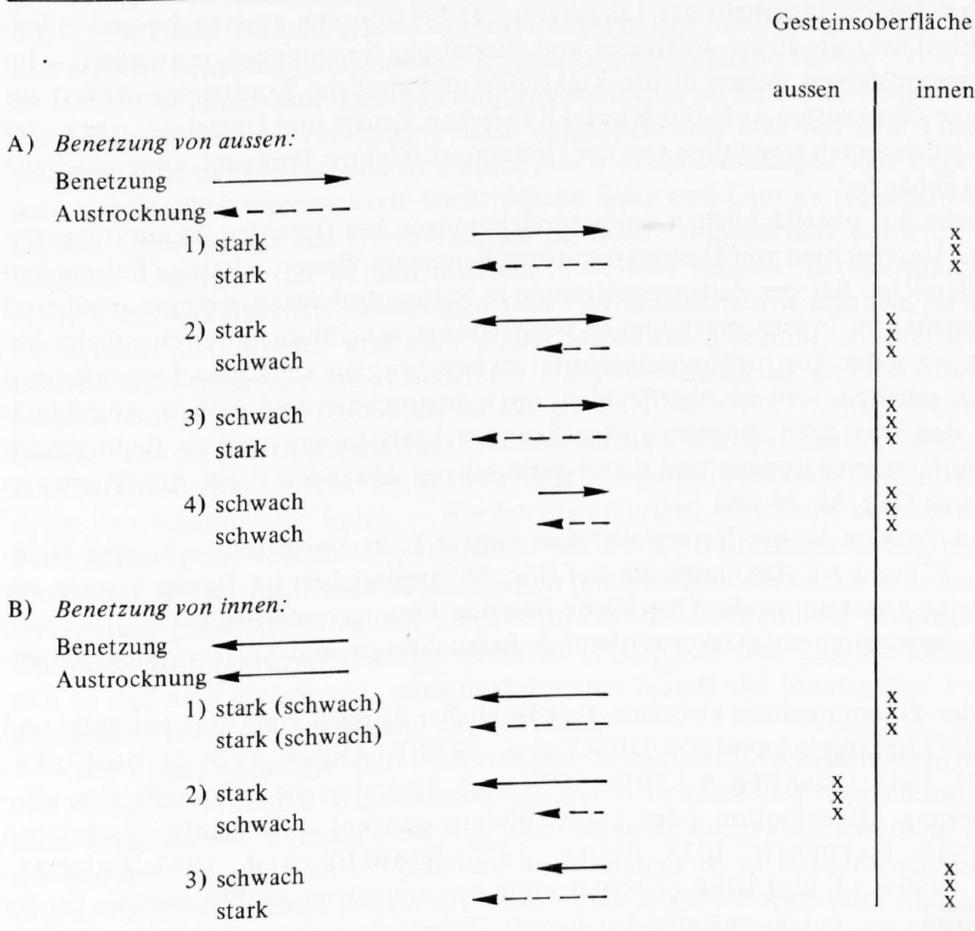
Im Fall von innerer Benetzung (B) wird die Anreicherungstiefe der Sulfate durch das Verhältnis von Lösungsnachschub zu Lösungsverdunstungsgeschwindigkeit bestimmt. Stellt sich ein Gleichgewicht an der Oberfläche ein, so reichern sich die Sulfate hier an (B1). Bei stärkerem Lösungsnachschub werden sie oberflächlich gelöst wegtransportiert (B2). Bei schwächerem Nachschub bzw. stärkerer Austrocknung verschiebt sich die Verdunstungsfront analog zu A1 ins Innere und es stellt sich bei konstanten Bedingungen ein Gleichgewicht in einer bestimmten Tiefe des Profils ein (B3). Variable Austrocknungsbedingungen (wie sie in einem Mauerwerk häufig zu erwarten sind), müssen bei konstantem, aber schwachem Lösungsnachschub eine stark schwankende Anreicherungstiefe zur Folge haben.

Es liegt auf der Hand, dass diese schematischen Kombinationen in Wirklichkeit durch fließende Übergänge und Querkombinationen eine unabsehbare Vielfalt bilden können. Darüber hinaus stellt die Gesteinsdurchlässigkeit eine weitere, hier nicht berücksichtigte Variable dar. Der Vergleich dieser Modellfälle mit der Beobachtung zeigt aber, dass sie trotz ihrer Vereinfachung auf die untersuchten typischen Verwitterungssituationen übertragbar sind.

10.3.2 Absanden, Krusten und Ausblühungen

Beim Absanden reichern sich die Sulfate ähnlich wie bei Krusten und Ausblühungen oberflächlich an, diese drei Erscheinungen sind entsprechend häufig miteinander kombiniert (u.a. Fig. 5, 41, 56 und 60). Sie bilden sich allgemein in Bereichen, die vor direktem Regen und starker oberflächlicher Sickerwasserbenetzung geschützt sind und besonders ausgeprägt in Bereichen mit durchsickerndem Wasser.

Tabelle 37: Anreicherungstiefen der Salze durch Kombination verschiedener Benetzungs- und Austrocknungsbedingungen



Die Verhältnisse an regengeschützten N- und E-Fassaden in städtischer Umgebung, wo sich flächenhaftes Absanden kombiniert mit Gipskrusten einstellt, entsprechen vermutlich den Fällen mit schwacher äusserer Benetzung (Tabelle 37: A3 und A4). Dabei werden von aussen zugeführte Sulfate (hier ausschliesslich als Gips nachgewiesen) oberflächlich angereichert, weil die schwache Benetzung ihr Eindringen ins Gesteinsinnere verhindert. Die Einlagerung von Staubpartikeln bei Gipskrusten bildet einen direkten Hinweis darauf, dass an diesen Stellen sowohl Russ und anderer Staub als auch gelöste oder feste Sulfate aus Aerosolen sedimentiert werden. Es sind überdies auch mässige Benetzungen während sporadischer, heftiger Regenfälle denkbar, wobei Krusten oberflächlich angelöst würden, die Gesteinsoberfläche aber relativ trocken bliebe. Radialstrahlige Aggregatformen mit z.T. quergelagerten Verunreinigungssäumen deuten jedenfalls auf Lösungs- und Rekristallisationszyklen hin.

Die Ablösung der Gipskrusten von ihrer Unterlage lässt sich noch nicht befriedigend erklären. Indessen deutet die beobachtete Struktur der Krusten auf eine Ablösung infolge Kristallwachstum: Gipskristalle sind radial zur Oberfläche von Gesteinskörnern und anderen Komponenten angeordnet. Wenn sie wachsen, muss sich die Kruste allseitig, also auch lateral ausdehnen und damit von der Unterlage ablösen. – DE QUERVAIN (1945) führt die Auflockerung unter Gipskrusten ausschliesslich auf Anreicherungen von Natrium- und Magnesiumsulfat in dieser Zone zurück. Eigene Beobachtungen weisen dort in die gleiche Richtung, wo Gipskrusten von solchen Ausblühungen bedeckt oder unterlagert sind. Abgesehen von der Mobilität und damit möglicherweise periodischen Abwesenheit der leichtlöslichen Sulfate, ist die Gesteinsoberfläche unter

Gipskrusten jedoch häufig nur von pulverigen Gipsausblühungen durchsetzt. Aufgrund der ähnlichen Ausbildung von Lockerzonen unter Gipskrusten, bei flächenhaftem Absanden und hinter Schalen in städtischer Umgebung vermute ich deshalb analoge Auflockerungsprozesse durch ausschliessliche Gipsanreicherung innerhalb der Lockerzone. Dabei könnten zusätzliche und individuell verschiedene Einflüsse, wie Frost, hygrische und thermische Spannungen, mitwirken. – Im Gegensatz zu Molassesandsteinen weisen dichte Kalksteine und ähnliche Kunststeine oft fest auf der Unterlage sitzende Gipskrusten auf. Der Kontakt zwischen Kruste und Unterlage – bzw. der Ablösungsprozess – ist also auch wesentlich von der Gesteinsart (Gefüge, Porosität, mineralogische Zusammensetzung?) abhängig!

Typische Bereiche mit oberflächlichen Sulfatanreicherungen bei Durchfeuchtung von innen (Tabelle 37: B1) sind Untersichten von Gesimsen mit stagnierendem Wasser, schattige Felsnischen und bodenfeuchte Bereiche. Bei der Zellenverwitterung in Naturaufschlüssen, wo eine annähernd gleichmässige Bergfeuchte im Innern angenommen werden muss, scheint die unterschiedliche Abwitterung auf Differenzen der Austrocknungsintensität zu beruhen: Die stark gelockerten Rippen bleiben oberflächlich erhalten, weil sie oberflächlich rasch austrocknen und deshalb Ausblühungen hier fehlen. In den schattigen, langsam austrocknenden Vertiefungen sind die Bedingungen für oberflächliche Sulfatanreicherungen und damit verbundenes Absanden (bzw. Abblättern) jedoch langfristig gegeben (Fig. 33, 34 und 52).

In absandenden Profilen wurde festgestellt, dass Gips z.T. in einem sehr schmalen Oberflächenbereich (Fig. 57) und z.T. bis einige cm tief (Fig. 56) angereichert ist. Daraus können wir im ersten Fall auf eine konstant an der Oberfläche liegende Lösungsverdunstung (bergfeuchter, schattiger Bereich!), im zweiten auf stärker variierende Befeuchtungs- und Austrocknungsverhältnisse schliessen.

Allgemein ist der Zusammenhang zwischen oberflächlicher Anreicherung löslicher Salze und dem Absanden aus der Literatur bekannt (DE THURY et al., 1828; KLANDER, 1926; SCHMOELZER, 1936; DE QUERVAIN, 1945; CHAROLA & LEWIN, 1979 u.a.). Besonders die Zellenverwitterung – auch Wabenverwitterung, Alveolisation oder Tafoni-Bildung genannt – ist häufig beschrieben worden (BEYER, 1912; HAEBERLE, 1915; PAULY, 1976; BRADLEY et al., 1978; FRENZEL, 1980; JEANNETTE, 1980 u.a.). WALTHER (1900) deutete den mikroklimatischen Einfluss bei der löcherigen Auswitterung an, indem er dafür den Begriff "Schattenverwitterung" prägte. PAULY (1975b) wies in Alveolen häufige Luftturbulenzen nach, welche die Sprengwirkung oberflächlich angereicherter hygroskopischer Salze (vor allem Natriumchlorid) fördern müssen. Ähnliche mikroklimatische Verhältnisse dürften auch bei den hier beobachteten Zellenverwitterungen existieren. – Abschliessend ist festzuhalten, dass die beschriebenen Absandungen nicht auf einer Bindemittelauflösung, sondern in erster Linie auf mechanischer Lockerung infolge Sulfatanreicherung beruhen. Eine zusätzliche Wirkung der chemisch aggressiven Salzlösung wäre allenfalls sekundär.

10.3.3 Abblättern und Abbröckeln

Als Abblättern und Abbröckeln werden hier oberflächenparallele Absonderungen am massigen Sandstein bezeichnet, die sich grundsätzlich vom schichtparallelen Aufblättern unterscheiden (Kap. 4.2.2). Sie werden als typische Übergangsformen zwischen Absanden und Krusten einerseits und Schalen andererseits aufgefasst: Die den Schalen vergleichbare innere Sulfatanreicherung ist oft mit einer oberflächlichen in Form von Krusten oder Ausblühungen kombiniert (Fig. 14, 32, 52 und 53). In der Randzone oberflächlich stark benetzter und stark austrocknender Bereiche entspricht diese doppelte oder variable Anreicherungstiefe wahrscheinlich der lokal "zwittrigen" Exposition mit abgeschwächter bzw. variabler Benetzung (Fig. 24; Tabelle 37: Kombination von A1 und A3). Beim Abbröckeln und Abblättern vorspringender Reliefstellen scheint hingegen die lokal stärkere bzw. variable Austrocknung – sie ist nach gleichmässiger Benetzung am rascheren Hellerwerden dieser Stellen erkenntlich – wesentlich zu sein (Fig. 14; Tabelle 37: Kombination von B1 und B3). In beiden Fällen sind Sulfatanreicherungen in einer breiten Profilzone zu erwarten.

10.3.4 Schalen

Bei der Schalenbildung reichert sich das Sulfat – in den untersuchten Profilen wurde ausschliesslich Gips nachgewiesen – im Innern an, während die Schalenoberfläche sulfatfrei ist (Fig. 48 – 50). Diese Verteilung lässt sich aus der typischen Schalenexposition, nämlich der oberflächlich starken Benetzung und raschen Austrocknung, erklären (Tabelle 37: A1). Bei der Benetzung ist es für eine innere Sulfatanreicherung entscheidend, ob im auftreffenden Wasser gelöste bzw. in der Schalenoberfläche vorhandene Salze weggespült oder aber mit dem Lösungsstrom ins Innere gelangen. PAULY (1975a und c) konnte durch In-situ-Messungen und Experimente nachweisen, dass oberflächlich angereicherte leichtlösliche Salze und Gips an regengetroffenen Flächen stark poröser Gesteine mit den ersten Tropfen ins Innere transportiert werden, bevor der Stein oberflächlich wassergesättigt ist und dort ein Spüleffekt beginnt. Beobachtungen an Fassaden und Mauern aus Granitischen Sandsteinen und Plattensandsteinen ergaben, dass bei Regen einzelne Flächenteile nass werden und dort Wasser abzufließen beginnt, welches jedoch meist in einem tieferen, schwächer oder nicht benetzten Mauerbereich wieder absorbiert wird. Dadurch würden oberflächlich angereicherte Sulfate an der gleichen Stelle oder wenig tiefer vom Stein aufgenommen. Bereits im Innern angereicherte Sulfate müssten sich aber mit der Lösungsfront einwärts verschieben. Weil dieser Effekt die Auswaschung von Salzen praktisch verhindert, hat er zwangsläufig deren Anreicherung zur Folge. – Wie bereits erläutert, verschiebt sich bei nachfolgender starker Austrocknung die Verdunstungsfront und mit ihr die Sulfatanreicherung ins Innere. Die je nach Exposition unterschiedlichen Schalendicken (am gleichen Werkstück, d.h. bei annähernd konstanten Gefügeeigenschaften) deuten darauf hin, dass die Schalendicke proportional zur Benetzungs- und/oder Austrocknungsintensität zunimmt (Fig. 8, 21 und 22): Im Beispiel von Fig. 8 bildet sich an der stark beregneten, sonnenexponierten S-Seite des Steines eine 1 – 2 cm dicke Schale gegenüber einer 2 – 3 mm dicken an der N-Seite.

Die Frage, weshalb an den beschriebenen Schalenprofilen ausschliesslich Gipsanreicherungen und keine Natrium- und Magnesiumsulfate wie in Krusten und Ausblühungen gefunden wurden, kann aufgrund der wenigen Analysen nicht schlüssig beantwortet werden. Zudem stellt sie sich am Bauwerk in städtischer Umgebung wohl anders als in Naturaufschlüssen. Einige mögliche Gründe für das scheinbare Fehlen der leichtlöslichen Sulfate seien kurz angeführt:

a) Magnesium- oder Natriumsulfate sind im Gestein vorhanden, waren aber in den untersuchten Proben "zufällig" nicht angereichert (vgl. die Mobilität dieser Salze!).

b) Sie wurden ausgewaschen, was bei gleichzeitiger Gipsanreicherung jedoch unwahrscheinlich ist.

c) Sie wurden weder zugeführt noch gebildet. Diese Möglichkeit scheint bei Schalenbildungen an städtischen Bauwerkfassaden, von wo die meisten der analysierten Proben stammen, am plausibelsten: Allein die Tatsache, dass Schalen wie Gipskrusten und im Gegensatz zu Natriumsulfat- und Magnesiumsulfat-Ausblühungen über ganze Fassaden flächenhaft auftreten, spricht für genetische Parallelen, indem bei Schalen wie bei Krusten hauptsächlich oder ausschliesslich Gips gebildet und angereichert werden könnte. In beiden Fällen muss eine vorwiegend atmosphärische Sulfatherkunft angenommen werden (vgl. Kap. 10.4.2). Den unterschiedlichen Expositionen entsprechend gelangt das Sulfat bei Gipskrusten wahrscheinlich in Aerosolen, bei Schalen hingegen im Regen auf den Stein. Die Immissionsmessungen weisen nun darauf hin, dass im Niederschlag neben Sulfat bedeutend mehr Calcium als Natrium und Magnesium anfällt und damit Calciumsulfat aus dieser Quelle überwiegt. Es ist weiter denkbar, dass das überschüssige Sulfat (Schwefelsäure) in erster Linie mit Calcit zu Gips und nur untergeordnet mit anderen Gesteinskomponenten (vor allem Dolomit) oder – wo vorhanden – mit Zement und anderen Baustoffen zu Magnesium- und Natriumsulfat reagiert.

Analog zum Absanden, Abblättern und Abbröckeln scheint somit auch die Schalenbildung im wesentlichen auf Sulfatanreicherungen zurückzuführen zu sein. Auch hier kommen vor allem Frost und thermische Spannungen als zusätzliche Faktoren in Frage. Die an Granitischen Sand-

steinen oft zu beobachtenden, irreversiblen Schalenverformungen lassen in der Schalenbildung eine besonders komplexe Erscheinung vermuten. In vielen Fällen könnten weitere, bisher nicht festgestellte Stoffwanderungen wesentlich mitbeteiligt sein. Das Fehlen von Auflösungserscheinungen in der Lockerzone spricht jedoch für einen vorwiegend mechanischen Ablösungsprozess. Da Gipsanreicherungen bereits vor der Gefügelockerung im unzerstörten Porenraum des Sandsteins beobachtet werden, gehören sie zu den Ursachen des Zerfalls und nicht zu dessen Folgeerscheinungen. – Damit wird die Ansicht von DE QUERVAIN (1945) bestätigt, der die Sulfatanreicherung als Hauptursache der Schalenbildung bei Granitischen Sandsteinen und Plattensandsteinen nennt. Auf die gleiche Ursache schlossen u.a. KAISER (1907) bei Schalen des Schlaitdorfer Sandsteins am Kölner Dom oder MILLOT & JEANNETTE (1975) bei Schalen an Buntsandsteinen des Strassburger Münsters. Entgegen dieser Auffassung werden Schalenbildungen häufig einer Auflösung des (meist kalkigen) Bindemittels im Innern und seiner Anreicherung in der entstehenden Schale zugeschrieben (nach KIESLINGER, 1932, sog. "Diffusionsschalen"; WINKLER, 1975, S. 130; DE BEAUCOURT & JATON, 1975). Eine kombinierte Ursache durch Bindemittelverstärkung in der Schale (Anreicherung von Eisenhydroxid und Kieselsäure) neben Gipsanreicherung in der Lockerzone vermuten KRAUS & JASMUND (1981) bei den von KAISER (1907) erwähnten Schalen am Kölner Dom.

10.3.5 Zusammenfassung

Aus den Beziehungen zwischen Art der Exposition, Ort der Sulfatanreicherung und Verwitterungsform lassen sich Schalen, Abblättern, Abbröckeln und Absanden auf gleichartige Verwitterungsprozesse zurückführen (Tabelle 38): Die Sulfate – es handelt sich stets um Gips, z.T. vermischt mit Magnesium- und Natriumsulfat – reichern sich je nach Exposition

- 1) an der Oberfläche (Absanden, Krusten und Ausblühungen),
- 2) variierend zwischen Oberfläche und dem Innern (Abblättern und Abbröckeln) oder
- 3) im Innern (Schalen) an.

In der Zone maximaler Sulfatanreicherung wird das Gefüge durch Salzsprengungen zerstört. Dabei könnten zusätzliche Einflüsse, besonders Frost und thermische Spannungen, mitbeteiligt sein.

Flächenhaft auftretende Gipskrusten und Schalen an Bauwerken in städtischer Umgebung weisen darauf hin, dass hier angereicherte Sulfate aus der Atmosphäre stammen, und zwar bei Krusten aus Aerosolen sedimentiert und bei Schalen mit dem Regen ins Gesteinsinnere geschwemmt werden.

Tabelle 38: Zusammenhang zwischen Exposition, Sulfatanreicherung und Verwitterungsform

<i>Exposition</i> →	<i>Sulfatanreicherung</i> →	<i>Verwitterungsform</i>
1) Regengeschützte Bereiche. a) Schwache Befeuchtung von aussen; b) Befeuchtung von innen, wobei oberflächliche Austrocknung langsam ist.	an der Oberfläche.	Absanden, Krusten, Ausblühungen.
2) a) Bereiche wie 1), jedoch rascher austrocknend. b) Übergangsbereich zwischen 1) und 3).	variierend zwischen Oberfläche und dem Innern.	Abblättern, Abbröckeln.
3) Beregnete oder von oberflächlichem Sickerwasser stark benetzte Bereiche. Austrocknung rasch.	im Innern.	Schalen.

10.4 Herkunft der Sulfate

Für die bei der Verwitterung angereicherten Sulfate kommen verschiedene Quellen in Frage, nämlich

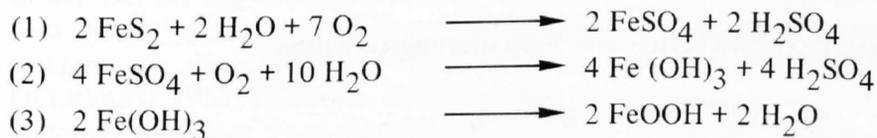
1. der Stein selbst.
2. die Umgebung des Steines, d.h.
 - die unmittelbare Umgebung im Mauerwerk bzw. Felsverband,
 - der Boden oder
 - die Atmosphäre.

Diese Quellen wären mit Isotopenmessungen eventuell nachzuweisen (LONGINELLI & BARTELLONI, 1978; SRAMEK, 1980). Hier müssen wir versuchen, die Herkunft der Sulfate aus der Situation abzuleiten, indem wir z.B. den Weg eines sulfathaltigen Sickerwassers zurückverfolgen. Auf diese Weise konnte in bestimmten Fällen ein Zusammenhang zwischen Sulfaten und Pyritanreicherungen im Sandstein oder dem umgebenden Felsverband erkannt werden. Ebenso deutlich scheinen die im Grundfeuchtebereich auftretenden Sulfate grösstenteils aus dem Boden zu stammen. An Bauwerken ist generell eine heterogene Sulfatherkunft aus Baustoffen, Reinigungsmitteln und anderen "künstlichen" Quellen wahrscheinlich. Immissionsmessungen weisen jedoch darauf hin, dass hier die Atmosphäre eine wesentliche Rolle spielt. Auf die beiden Hauptquellen, nämlich das Gestein und die Atmosphäre, sei im folgenden etwas näher eingegangen.

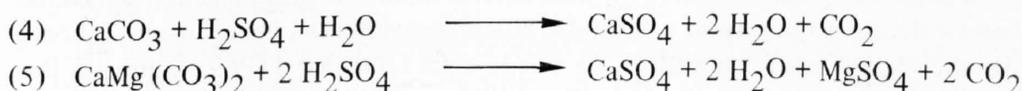
10.4.1 Gestein

Im Mauerwerk verbaute pyritreiche Quader zeigen im Vergleich zur unmittelbaren Umgebung sehr intensive und z.T. andersartige Verwitterungen (Kap. 5.4.4. Es sei erwähnt, dass manche Gesteine sehr verwitterungsresistenten Pyrit enthalten. Die Stabilitätsunterschiede dieses Minerals hängen vermutlich mit seinen mannigfaltigen Kristallmodifikationen zusammen.) Die beschriebenen Naturaufschlüsse sind im Grossen pyritreichen Quadern vergleichbar: Sie heben sich innerhalb der Formation durch starke und andersartige Verwitterungserscheinungen ab; zugleich finden sich ausgeprägte Pyritanreicherungen im Sandstein selbst oder in begleitenden Mergellagen. Nach Anschliffen handelt es sich in Quadern und Naturaufschlüssen um die Sulfidminerale Pyrit und Markasit, welche in Form kugeligter Kristallaggregate ("Himbeerpyrite") in und um Kohleschmitzen angereichert sind. Ihre Entstehung beim Zerfall organischen Materials ist weitgehend bekannt (CASAGRANDE et al., 1980). So enthalten schweizerische Molassekohlen bis 12% Schwefel (KUENDIG & DE QUERVAIN, 1953). Im *Bausteinband* wird übrigens auf Pyrit als "schädlichen Gemengteil" in Granitischen Sandsteinen und Plattensandsteinen hingewiesen.

An diesen Stellen sind Gips- und Magnesiumsulfatanreicherungen hauptsächlich auf die Sulfidverwitterung zurückzuführen. Aus der Vielzahl möglicher Reaktionen kann die Umwandlung von Pyrit bzw. Markasit in Sulfate vereinfacht folgendermassen dargestellt werden (modifiziert nach KELLER, 1957):



Das in (1) gebildete Eisensulfat reagiert zu stabilem Eisen-3-Hydroxid (2), das durch allmähliche Entwässerung in Limonit (Goethit oder Lepidocrocit) übergeht (3). Die in (1) und (2) freigesetzte Schwefelsäure kann z.B. mit Calcit und Dolomit zu Gips und Magnesiumsulfat weiterreagieren:



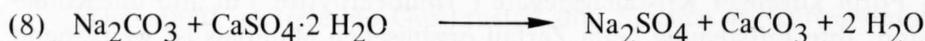
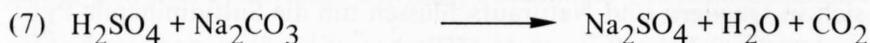
Ausserdem sind Reaktionen zwischen Dolomit und Sulfatwässern möglich, wobei Calcit und Magnesiumsulfat entstehen (Van-Morlot-Reaktion nach PELLERIN, 1976, entspricht der Rauh-wackenbildungsreaktion nach BRUECKNER, 1941):



Ein analoges Beispiel von Sulfatverwitterung im Zusammenhang mit Pyritanreicherungen im Stein beschreiben DE BEAUCOURT, PAULY & JATON (1975) in der Felsenkirche von Aubeterre. Sie führen die Pyritoxidation hauptsächlich auf Mikrobentätigkeit zurück.

10.4.2 Atmosphäre

An Bauwerken in städtischer Umgebung treten Sulfatanreicherungen einerseits als Gipskrusten und in Lockerzonen hinter Schalen über ganze Fassaden flächenhaft auf, ohne dass Pyrit in den Gesteinsproben nachgewiesen werden konnte. Andererseits bilden sich lokal Gipskrusten und Natriumsulfat-Ausblühungen um Stellen, wo Regenwasser durch- oder absickert. Derartige Verteilungen lassen vermuten, dass die Sulfate nicht nur durch Niederschläge mobilisiert werden, sondern auch zu einem grossen Teil in diesen enthalten sind. Aufgrund von Immissionsmessungen beträgt der atmosphärisch anfallende Sulfatanteil in Zürich ca. 10 g und bei Schmerikon ca. 5 g $\text{SO}_4 \text{ m}^{-2} \text{ Jahr}^{-1}$ (Kap. 9.1.1). Damit bildet die Atmosphäre wohl die wichtigste Sulfatquelle an Bauwerken zumindest in städtischer Umgebung. Ein zusätzlicher, vom Bauwerk selbst stammender Anteil kann indessen nicht ausgeschlossen werden. Weil die Summe der im Niederschlag anfallenden Na-, K-, Mg- und Ca-Gehalte das Sulfat nicht abzusättigen vermag – der pH liegt im sauren Bereich (Kap. 9.1.2 – 3) –, muss im Stein ein Neutralisationsprozess etwa nach den Reaktionen (4) und (5) des vorangehenden Abschnitts angenommen werden. Die starken Auflösungserscheinungen bei Calcit- und Dolomitmörnern an Schalenoberflächen und in Gipskrusten unterstützen diese Vermutung. Das in Städten häufige Natriumsulfat könnte durch Reaktion der Schwefelsäure mit Natriumcarbonat (7) aus Zementmörteln und anderen alkalischen Baustoffen oder Reaktion des Natriumcarbonates mit bereits gebildetem Gips (8) entstehen, wofür ARNOLD (1981) Beispiele gibt:



Als weitere Natriumquelle kommt im Winter tonnenweise verstreutes Natriumchlorid in Frage, das analog zu Natriumcarbonat reagieren würde. Vergewärtigen wir uns zum Schluss, dass die im Verwitterungsprofil angereicherten Sulfatmengen "erstaunlich" klein sind: In Lockerzonen hinter Schalen kann das Gefüge mit 1% Gips bereits zerstört sein. Um diese Menge (ca. 14 mg SO_4/cm^3) in 100 Jahren anzureichern, würden 14% des heute in Zürich pro cm^2 anfallenden Sulfates genügen!

10.5 Gesteinseigenschaften und Verwitterungsverhalten

10.5.1 Problemstellung

Allgemein existiert über die Beziehung zwischen petrographischen Eigenschaften und dem Witterungsverhalten der Gesteine eine Menge von Untersuchungen vor allem aus dem Gebiet der technischen Materialprüfung. Es wurden einerseits petrographisch-petrophysikalische Kriterien (mineralogische Zusammensetzung, Durchlässigkeit, Porosität, Festigkeit usw.), andererseits praktische Testmethoden (u.a. Frost- und Salzkristallisationsversuche) zur Prüfung der Wetterbeständigkeit von Gesteinen aufgestellt. HIRSCHWALD (1908) lieferte dazu eine grundlegende Methodik. Von allen möglichen Gesteinseigenschaften, welche das Witterungsverhalten beeinflussen, gehören Porosität und Kornbindung zu den prägendsten. So wurde nach GERARD (1969) – um ein Bei-

spiel aus dem französischen Sprachraum zu nennen – die "Frostempfindlichkeit" eines Gesteins aus seiner Porengrößenverteilung (Quecksilberporometrie) abzuschätzen versucht: Ein Material, bei dem 10% der effektiven Porosität im Porendurchmesserbereich über $3\ \mu\text{m}$ liegen (sogenannter D_{10} grösser $3\ \mu\text{m}$), sei im allgemeinen frostfest. Weil das Verhalten jedes Gesteins durch zahlreiche weitere, quantitativ nicht erfassbare und individuelle Eigenschaften bestimmt wird, sind allgemeine Aussagen aufgrund von nur einem Kriterium entsprechend fragwürdig.

Zur Wetterbeständigkeit der Granitischen Sandsteine und Plattensandsteine ist aus der Literatur schon einiges bekannt (*Bausteinband*; DE QUERVAIN & GSCHWIND, 1934; DE QUERVAIN, 1945 und DE QUERVAIN & JENNY, 1951). Im *Bausteinband* steht u.a., dass "feinporige" Sandsteine frostempfindlicher und damit witterungsanfälliger sind als "grobporige". DE QUERVAIN (1967) weist auf das sehr variable Witterungsverhalten beider Sandsteintypen hin, wobei Granitische Sandsteine von mittlerer bis guter, Plattensandsteine von häufig schlechterer Beständigkeit seien. – Im folgenden sollen die in Kap. 8 festgestellten Poren- und Zementationsverhältnisse und deren mögliche Einflüsse auf das beobachtete Verwitterungsverhalten am Bau kurz diskutiert werden. Damit wird die Frage der Wetterbeständigkeit sicher nicht eingehend behandelt, sondern nur aus einer bestimmten Perspektive gestreift.

10.5.2 Granitische Sandsteine

Am Hauptbahnhof und an der Hauptpost wiesen Quader in gleicher Exposition – d.h. unter annähernd gleichen Witterungsbedingungen – unterschiedlich starke Schäden auf. Porenuntersuchungen ergaben, dass bei "witterungsbeständigen" Proben die effektiven Porositäten, speziell aber die *Makroporositäten* und die "häufigsten" Eingangsradien grösser sind als bei "witterungsanfälligen" (Kap. 8.1.1. Die Mikroporosität ändert sich bei stark schwankender Makroporosität verhältnismässig schwach und ist in diesem Zusammenhang unwesentlich.) So liegen die mit dem Druckporosimeter gemessenen Makroporositäten (M_q) bei "resistenten" Proben am Hauptbahnhof um 7 – 8% (Tabelle 26), an der Hauptpost um 2 – 4% (Tabelle 27). Da jedoch Proben mit M_q grösser 2% an der Hauptpost "resistent" und solche mit M_q kleiner 7% am Hauptbahnhof "anfällig" sind, ergibt die Makroporosität allein noch kein verbindliches Kriterium für "gute" oder "schlechte" Steine. Überdies liegt die Porenverteilung einer Probe der ausserordentlich wetterbeständigen Reiterfigur am Grossmünster ungefähr in der Mitte zwischen extrem stark bzw. schwach porösen Proben (Fig. 62). Das tendenziell bessere Verhalten der stark makroporösen Proben bestätigt jedenfalls die Feststellung im *Bausteinband*, wonach "grobporige" Sandsteine häufig frostbeständiger sind als "feinporige". Auch die von PANCSA & LAUTRIDOU (1973) an verschiedenen schweizerischen Molassegesteinen durchgeführten Frostversuche zeigen, dass stark makroporöse Sandsteine der Oberen Meeresmolasse (effektive Porosität um 15%, "häufigster" Porenradius um $2\ \mu\text{m}$) relativ frostbeständig sind. Bei der Frostverwitterung wird dieser Umstand darauf zurückgeführt, dass grobporige Gesteine über genügend leeren (wasserungesättigten) Porenraum verfügen, in den das Eis bei Volumenzunahme ausweichen kann (HIRSCHWALD, 1908). Es ist naheliegend, dass dieser Vorgang nicht nur vom Sättigungswert (freiwillige/grösstmögliche Wasseraufnahme), sondern vor allem auch von der Porenform abhängt (HIRSCHWALD, 1908; *Bausteinband*; DE QUERVAIN, 1967; FITZNER, 1970). – Auf die bekannte Analogie zwischen der Resistenz eines Materials gegenüber Frost und Salzsprengung sei hier lediglich hingewiesen. Indessen ergeben sich aus den Beziehungen zwischen gemessenen Porositäten und den im Verwitterungsprofil vorgefundenen Sulfatverteilungen einige Bemerkungen:

- Die Makroporen sind bei stark makroporösen Proben in der Anreicherungszone nur teilweise gipsgefüllt. Damit wird die Wahrscheinlichkeit, dass sich Kristalle im Porenraum frei ausdehnen können und folglich das Gefüge nicht zerstören, grösser (Analogie zum Sättigungswert beim Frostversuch).
- Die ausgeprägte Makroporosität bewirkt eine gegenüber schwach makroporösen Proben deutlich tieferliegende Gipsanreicherung (vgl. Fig. 53 und 56). Dieser Zusammenhang belegt,

dass stark makroporöse (d.h. stark durchlässige!) Proben nach einer Benetzung rascher austrocknen, wobei sich die Verdunstungsfront tiefer ins Gesteinsinnere zurückzieht. Dort ist die Tendenz zu oberflächenparalleler Rissbildung möglicherweise geringer, da gleichgerichtete statische Spannungen sowie der Einfluss thermischer Spannungen und anderer klimatischer Schwankungen vermutlich kleiner sind als an der Oberfläche.

Die Zemente beeinflussen das Verwitterungsverhalten u.a. durch

- Erhöhung der Festigkeit,
- Verminderung der Intergranularporosität (und Permeabilität) und
- ihre aktive Beteiligung am Verwitterungsprozess (Wasseradsorption, Ionentausch, Keimbildung bei Salzkristallisation usw.).

Abgesehen von der Porositätsverminderung bleiben diese Zusammenhänge weitgehend unbekannt. Zur Bedeutung der einzelnen Zemente sind folgende Feststellungen möglich (Kap. 8.1.2):

Der *Tonmineralrasen* ist in stark makroporösen (d.h. "witterungsresistenten") Proben niedrig und chloritähnlich, in schwach makroporösen ("witterungsanfälligen") dagegen dick und smectitähnlich. Damit scheint mindestens ein Zusammenhang zwischen Porosität und Tonmineralausbildung zu bestehen. Es ist überdies denkbar, dass quellbare Tonminerale (z.B. Smectit) eine Gefügelockerung fördern oder auslösen, während nicht quellbare (z.B. Chlorit) als stabile Zemente die Festigkeit erhöhen. Auf diese Weise könnten die Tonminerale das beobachtete "gute" bzw. "schlechte" Verhalten unterstützen.

Der *Calcizement* ist beim normalen Granitischen Sandstein dem Tonmineralrasen aufgelagert und wirkt in erster Linie als Porenfüllung: Je stärker die Calcizementation, desto geringer ist die Makroporosität und desto grösser im allgemeinen die Witterungsanfälligkeit des Sandsteins (Fig. 62 – 64, Tabelle 29). – Die stark calcizementierte "Guntliweider" Varietät besitzt eine viel höhere Festigkeit als normale Granitische Sandsteine, und ihre Witterungsresistenz scheint aufgrund von Salzkristallisationsversuchen wie bei sehr dichten und festen Gesteinen relativ gut zu sein (DE QUERVAIN & JENNY, 1951). Ein möglicher Grund für die hohe Druckfestigkeit und das abweichende Verhalten dieser Varietät könnte u.a. im vollständigen Fehlen eines Tonmineralrasens liegen, sodass der Calcizement hier fest mit den Körnern verbunden ist.

Die meist sporadisch als Porenfüllung auftretenden *Tonmineralwürmer* (Kaolinit?) haben wohl keinen Einfluss auf die Festigkeit, bewirken aber eine in der Regel unbedeutende Reduktion der Makroporosität. Damit könnten sie die Wetterbeständigkeit tendenziell herabsetzen.

Ein "*silikatischer*" Zement, der im Stein der Reiterfigur am Grossmünster besonders deutlich erscheint, dürfte die Witterungsresistenz insofern steigern, als er die Druckfestigkeit bei geringer Porositätsreduktion erhöht (vgl. Fig. 65) und überdies als bedingt säureresistente Schutzhülle um die Gesteinskörner wirkt.

10.5.3 Plattensandsteine

Der Plattensandstein gilt im Vergleich zum Granitischen Sandstein trotz seiner höheren Festigkeit allgemein als witterungsanfälliger (DE QUERVAIN, 1979a). Mangels Probenmaterial war es hier nicht möglich, unterschiedlich resistente Qualitäten miteinander zu vergleichen. Vorliegende Gefügeuntersuchungen weisen jedoch darauf hin, dass die Porenverhältnisse ein generell ungünstiges Verhalten bewirken (Kap. 8.2);

- Bei den untersuchten Plattensandsteinen ist die *Makroporosität* trotz ähnlichem Gesamtvolumen deutlich geringer als bei Granitischen Sandsteinen; die *Mikroporosität* ist also relativ grösser.
- Die Porenverteilung einer schwach porösen Probe ist sehr ähnlich wie diejenige eines schwach porösen Granitischen Sandsteines. Entsprechend ähnlich sind auch die *Zementationsverhältnisse*: Der Tonmineralrasen ist spärlich, die primären Kornzwickel sind praktisch vollständig mit Calcizement ausgefüllt.

Damit scheinen Plattensandsteine gefügemässig den schwach makroporösen Granitischen Sandsteinen, die sich als witterungsanfällig erweisen, vergleichbar zu sein.

11. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

1. Verwitterungserscheinungen der Granitischen Sandsteine und der Plattensandsteine an Bauwerken in städtischer Umgebung werden mit der Verwitterung dieser Sandsteine in Naturaufschlüssen verglichen. Damit sollen einige der an lokalen Baudenkmalern häufigsten Verwitterungsprozesse geklärt werden.

2. Die wichtigsten untersuchten Bauwerke sind der Hauptbahnhof Zürich und die Hauptpost St. Gallen neben weiteren, vor allem in Zürich. Sie werden mit vorwiegend aufgelassenen Steinbrüchen im Abbaugelände zwischen Luzern und St. Margrethen, insbesondere mit Martinsbrugg bei St. Gallen, Uznaberg und Chatzenrietli bei Schmerikon sowie Fuchsloch bei Thal verglichen.

3. Die Untersuchungsmethodik umfasst

a) die Beschreibung der Verwitterungserscheinungen in ihrer spezifischen Umgebung (Feldaufnahmen) und

b) die Analyse der Verwitterungserscheinungen anhand von mineralogisch-petrographischen und chemischen Untersuchungen. Im Vordergrund stehen die Analyse wasserlöslicher Sulfatanreicherungen im Verwitterungsprofil (quantitative Analyse von S, Na, K, Mg und Ca im Wasserauszug sowie mikroskopische, mikrochemische und röntgenographische Identifizierung der Ausblühungs-salze), die Analyse damit verbundener Gefügeänderungen (Mikroskopie) und die Porenanalyse (Quecksilber- und Dünnschliff-Porometrie).

Daneben sollen Immissionsmessungen im Niederschlag (Bergerhoff-Geräte) Anhaltspunkte über den Anteil der im Gestein festgestellten Sulfate aus der Atmosphäre liefern.

4. Die typischen Verwitterungserscheinungen der Granitischen Sandsteine und Plattensandsteine an Bauwerken in städtischer Umgebung sind Schalen, Abblättern und Abbröckeln, Absanden, schwarze Gipskrusten sowie Ausblühungen von vorwiegend Gips und Natriumsulfat neben untergeordnet Magnesiumsulfat.

5. Während die häufigsten Verwitterungsformen in Naturaufschlüssen (Auflockerung des Felsverbandes und Bodenbildung) von denen an Bauwerken stark abweichen, werden in bestimmten Aufschlüssen vergleichbare Erscheinungen gefunden. Es handelt sich um teilregengeschützte Felswände mit ausgeprägten Sulfatanreicherungen. An diesen Stellen bilden sich Schalen, Abblättern, Absanden, weisse Gipskrusten, Epsomitkrusten sowie Ausblühungen von vorwiegend Gips und Magnesiumsulfat neben untergeordnet Natriumsulfat.

6. An Bauwerken wie in Naturaufschlüssen sind diese vergleichbaren Erscheinungen an analoge Expositionen gebunden: Schalen entstehen in beregneten oder kurzzeitig stark benetzten Bereichen, die oberflächlich rasch austrocknen. Absanden, Krusten und Ausblühungen bilden sich generell in regengeschützten Bereichen und speziell dort, wo starke Durchfeuchtung von innen herrscht. Abblättern und Abbröckeln sind sowohl nach Ausbildung als auch nach Exposition intermediäre Formen zwischen Schalen und Absanden bzw. Krusten.

7. Die beschriebenen Verwitterungsformen sind an Bauwerken und in Naturaufschlüssen von Sulfatanreicherungen in einer charakteristischen Tiefe des Verwitterungsprofils begleitet. Dabei lassen sich drei Gruppen unterscheiden:

1) Anreicherung an der Oberfläche (Absanden, Krusten und Ausblühungen),

- 2) Anreicherung variierend zwischen der Oberfläche und dem Innern (Abblättern und Abbröckeln) und
- 3) Anreicherung im Innern (Schalen).

Die Sulfatanreicherungen liegen generell in den äussersten 10 cm des Verwitterungsprofils. Im Innern bestehen sie fast ausschliesslich aus Gips, während oberflächlich (in Ausblühungen) Gips mit Natrium- und Magnesiumsulfat vermischt ist. In der Zone maximaler Sulfatanreicherung wird das Gefüge zerstört. Dabei zerfällt es durch mechanische Auflockerung in Sand, ohne dass Auflösungserscheinungen beobachtet werden. Die Gipsanreicherung wird in der entsprechenden Zone schon vor dem sichtbaren Zerfall nachgewiesen und gehört damit zu dessen Ursachen. Obwohl die Gefügelockerung hauptsächlich auf Sulfatanreicherung zurückgeführt wird, sind unterstützende Einflüsse von Frost und thermischen Spannungen wahrscheinlich.

8. Starke Mineralauflösungen an Calcit, Dolomit, Feldspäten und Chert werden nur in der Oberflächenzone bis wenige mm Tiefe an Sandsteinen in beregneten Expositionen und städtischer Umgebung beobachtet. Deutliche Auflösungserscheinungen an Calcit und Dolomit, Feldspäten und Quarz finden sich zudem in Gipskrusten in städtischer Umgebung.

9. Aus der Beziehung zwischen Exposition, Sulfatanreicherung und Verwitterungsform lässt sich ableiten, dass die Exposition den Ort der Sulfatanreicherung im Verwitterungsprofil und damit die Verwitterungsform steuert.

10. In den untersuchten Naturaufschlüssen und in einzelnen Quadern an Bauwerken können die Sulfate auf Pyritanreicherungen im Stein bzw. Felsverband zurückgeführt werden. An Bauwerken in städtischer Umgebung, wo diese Quelle weitgehend fehlt, stammen die Sulfate hauptsächlich aus der Atmosphäre: Im Niederschlag gemessene Sulfatmengen betragen in Zürich ca. 10 g, bei Schmerikon ca. $5 \text{ g m}^{-2} \text{ Jahr}^{-1}$. Zusätzliche bauseitige Sulfatquellen können allerdings nicht ausgeschlossen werden.

11. Bei Granitischen Sandsteinen variieren die gemessenen effektiven Porositäten (Porenvolumen, das bei 1000 at mit Quecksilber gefüllt wird) um 4 – 13%. Die grossen Schwankungen sind durch unterschiedliche Makroporositäten bedingt, die den Intergranularporositäten entsprechen. Die primäre Intergranularporosität wurde in unterschiedlichem Mass durch folgende Zemente reduziert:

- 1) Tonmineralrasen (wahrscheinlich Chlorit und Smectit, ev. weitere Tonminerale)
- 2) Calcit
- 3) Tonmineralwürmer (wahrscheinlich Kaolinit) und
- 4) "Silikathüllen".

Bei den untersuchten Plattensandsteinen schwanken die effektiven Porositäten um 5 – 8%. Analog zu Granitischen Sandsteinen werden sie durch unterschiedliche Makroporositäten modifiziert. Als Zemente treten

- 1) Tonmineralrasen,
- 2) Calcit und
- 3) "Silikathüllen" auf.

12. Aus der Beziehung zwischen Porosität und beobachtetem Verwitterungsverhalten am Bauwerk scheint u.a. eine grosse Makroporosität (Porenradien grösser $1 \mu\text{m}$ bzw. $2.5 \mu\text{m}$) die Wetterbeständigkeit des Sandsteins generell zu erhöhen.

Literaturverzeichnis

- ANDREE, K. (1912): Die geologische Bedeutung des Wachstumsdrucks kristallisierender Substanzen. – Geol. Rdsch., 3, 7 – 15.
- ARNOLD, A. (1975): Soluble salts and stone weathering. – The conservation of stone, 1, Proc. int. Symp., Bologna, 133 – 135.
- (1976): Behaviour of some soluble salts in stone deterioration. – 2nd int. Symp. Deterior. Build. Stones, Athen, 27 – 36.
- (1978): Documentation sur l'altération et la conservation des monuments en pierre. – UNESCO-RILEM Colloq. int. Altér. Protect. Monum. Pierre, Paris, sect. 1.2, 31 S.
- (1981): Salzmineralien in Mauerwerken. – Schweiz. mineral. petrogr. Mitt., 61, 147 – 166.
- ASHURST, J. & DIMES, G. (1977): Stone in building. – The architect. Press, London.
- Bausteinband* (1915): Die natürlichen Bausteine und Dachschiefer der Schweiz. – Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser., 5. (Autoren: NIGGLI, P., GRUBENMANN, U., JEANNET, A., MOSER, R. u.a.)
- BEAUCOURT, F. DE & JATON, C. (1975): Les types d'altérations des roches calcaires. – Monum. hist. France, no. hors sér., 14 – 26.
- BEAUCOURT, F. DE, PAULY, J. P. & JATON, C. (1975): L'église monolithe d'Aubeterre-sur-Dronne. – Monum. hist. France, no. hors sér., 48 – 65.
- BEYER, O. (1912): Alaun und Gips als Mineralneubildungen und als Ursachen der chemischen Verwitterung in den Quadersandsteinen des sächsischen Kreidegebiets. – Z. dtsch. geol. Ges., 63 (1911), 429 – 467.
- BLANCK, E. & EVLIA, H. (1932): Ein Beitrag zur Frage nach der Herkunft der im Gestein und Boden zirkulierenden sulfathaltigen Lösungen, sowie zum Kreislauf des Schwefels in der Natur. – Chem. Erde, 7, 298 – 319.
- BOUSQUIE, P. (1979): Texture et porosité de roches calcaires. – Thèse doct., Ecole natl. sup. Mines Paris, Paris.
- BRADLEY, W. C., HUTTON, J. T. & TWIDALE, C. R. (1978): Role of salts in development of granitic tafoni, South Australia. – J. Geol., 86, 647 – 654.
- BRAITSCHE, O. (1962): Entstehung und Stoffbestand der Salzlagerstätten. – Springer, Berlin.
- BRUECKNER, W. (1941): Über die Entstehung der Rauhacken und Zellendolomite. – Eclogae geol. Helv., 34, 117 – 134.
- BUECHI, U. P. (1950): Zur Geologie und Paläogeographie der südlichen mittelländischen Molasse zwischen Toggenburg und Rheintal. – Diss. Univ. Zürich.
- BUECHI, U. P. & HOFMANN, F. (1945): Die obere marine Molasse zwischen Sitter-Urnäsch und dem Rheintal. – Eclogae geol. Helv., 38, 175 – 194.
- BUECHI, U. P. & WELTI, G. (1951): Zur Geologie der südlichen mittelländischen Molasse der Ostschweiz zwischen Goldingertobel und Toggenburg. – Eclogae geol. Helv., 44, 183 – 206.
- BUTTERWORTH, B. (1955): Les efflorescences sur les maçonneries en briques. – Silicates ind., 1955, 255 – 258, 309 – 312.
- CASAGRANDE, D. J., GRONLI, K. & SUTTON, N. (1980): The distribution of sulfur and organic matter in various fractions of peat: origins of sulfur in coal. – Geochim. cosmochim. Acta, 44, 25 – 32.
- CHAROLA, A. E. & LEWIN, S. Z. (1979): Efflorescences on building stones – SEM in the characterization and elucidation of the mechanisms of formation. – Scan. Electr. Microsc., 1979, 379 – 387.
- Chemiker-Kalender* (1974). Ed.: VOGEL, H. U. VON. – Springer, Berlin.
- CHOQUETTE, P. W. & PRAY, L. C. (1970): Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. – Amer. Assoc. Petroleum Geol. Bull., 54, 207 – 250.
- COOKE, R. U. & SMALLEY, I. J. (1968): Salt weathering in deserts. – Nature (London), 220, 1226 – 1227.
- CORRENS, C. W. (1949): Growth and dissolution of crystals under linear pressure. – Discuss. Faraday Soc., 5, 267 – 271.
- CORRENS, C. W. & STEINBORN, W. (1939): Experimente zur Messung und Erklärung der sogenannten Kristallisationskraft. – Z. Kristallogr., 101, 117 – 133.
- DEUBER, A. (1969): Methodik zur Durchführung von Staubbiederschlagsmessungen. – Diss. ETH Zürich Nr. 4296.
- EVANS, I. S. (1970): Salt crystallization and rock weathering: a review. – Rev. Géomorph. dyn., Jg. 19, 153 – 177.
- FASSINA, V., LAZZARINI, L. & BISCONTIN, G. (1976): Effects of atmospheric pollutants on the composition of black crusts deposited on venetian marbles and stones. – 2nd int. Symp. Deterior. Build. Stones, Athen, 201 – 211.
- FITZNER, B. (1970): Die Prüfung der Frostbeständigkeit von Naturbausteinen. – Diss. TH Aachen.
- FRENZEL, G. (1980): Natriumchlorid im Tafoni-Granit. – Chem. Erde, 39, 158 – 169.
- FRUEH, J. J. (1890): Beiträge zur Kenntnis der Nagelfluh der Schweiz. – N. Denkschr. schweiz. natf. Ges., 30.
- FUECHTBAUER, H. (1964): Sedimentpetrographische Untersuchungen in der älteren Molasse nördlich der Alpen. – Eclogae geol. Helv., 57, 157 – 298.
- FUECHTBAUER, H. & MUELLER, G. (1977): Sedimentpetrologie Teil 2: Sedimente und Sedimentgesteine. – Schweizerbart, Stuttgart.

- GEILMANN, W. & TOELG, G. (1960): Beiträge zur Mikrosilikatanalyse II: Die Bestimmung des Sulfatgehaltes. — *Glastech. Ber.*, 33, 332 — 338.
- GERARD, D. R. (1969): Détermination de la résistance au gel des matériaux de construction par la porométrie au mercure. — *Cent. sci. tech. Constr. (CSTC) Rev.*, 1969, 6 — 15.
- GONI, I., RAGOT, J. P. & SIMA, A. (1968): Méthode d'étude du champ microfissural des minéraux et des roches et possibilités d'application en géologie. — *Bur. Rech. géol. min. (BRGM) Bull.*, sér. 2, sect. 2, no. 4, 51 — 92.
- GSCHWIND, M. & NIGGLI, P. (1931): Untersuchungen über die Gesteinsverwitterung in der Schweiz. — *Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser.*, 17.
- GUTZWILLER, A. (1877): Molasse und jüngere Ablagerungen. — *Beitr. geol. Karte Schweiz*, 14.
- HABERLAND, W. (1975): Untersuchungen an Krusten, Wüstenlacken und Polituren auf Gesteinsoberflächen der nördlichen und mittleren Sahara (Libyen und Tschad). — *Berliner geogr. Abh.*, 21.
- HABICHT, K. (1945): Geologische Untersuchungen im südlichen sanktgallischen-appenzellischen Molassegebiet. — *Beitr. geol. Karte Schweiz, N.F.*, 83.
- HAEBERLE, G. (1915): Die gitter-, netz- und wabenförmige Verwitterung der Sandsteine. — *Geol. Rdsch.*, 6, 264 — 285.
- HANTKE, R. (1967): Geologische Karte des Kantons Zürich und seiner Nachbargebiete. — *Vjschr. natf. Ges. Zürich, Jg.* 112, 91 — 122.
- HIRSCHWALD, J. (1908): Die Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihre Wetterbeständigkeit. — Ernst, Berlin.
- HOFMANN, F. (1957): Untersuchungen in der subalpinen und mittelländischen Molasse der Ostschweiz. — *Ecol. geol. Helv.*, 50, 289 — 322.
- HOLDREN, G. R. & BERNER, A. (1979): Mechanism of feldspar weathering. I. Experimental studies. II. Observations of feldspars from soils. — *Geochim. cosmochim. Acta*, 43, 1161 — 1186.
- HOSEK, J. & SKUPIN, L. (1979): Sanierung des Plänermauerwerks der Teinkirche in Prag. — *D. Kunst Denkmalpfl.*, Jg. 36, 107 — 126.
- JEANNETTE, D. (1979): Les pellicules d'altération des grès. — 3rd int. Symp. Deterior. Protect. Stones, Venedig (im Druck).
- (1980): Les grès du château du Landsberg: exemple d'évolution des "grès vosgiens" au milieu rural. — *Sci. géol. Strasbourg Bull.*, 33, 111 — 118.
- KAISER, E. (1907): Über Verwitterungserscheinungen an Bausteinen, I. — *N. Jb. Mineral. Geol. Paläont.*, 1907, 2, 42 — 64.
- (1930): Über eine Grundfrage der natürlichen Verwitterung und die chemische Verwitterung der Bausteine im Vergleich mit der in der freien Natur. — *Chem. Erde*, 4, 290 — 342.
- KAUFMANN, F. J. (1872): Gebiete der Kantone Bern, Luzern, Schwyz und Zug. — *Beitr. geol. Karte Schweiz*, 11.
- KELLER, W. D. (1957): The principles of chemical weathering. — Lucas, Columbia Missouri, (Druck 1968).
- KIESLINGER, A. (1932): Zerstörungen an Steinbauten. — Deuticke, Leipzig.
- KLANDER, F. (1926): Über die im Buntsandstein wandernden Verwitterungslösungen in ihrer Abhängigkeit von äusseren Einflüssen. — *Chem. Erde*, 2, 49 — 82.
- KNETSCH, G. & REFAI, E. (1955): Über Wüstenverwitterung, Wüsten-Feinrelief und Denkmalzerfall in Aegypten. — *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.*, 101, 227 — 256.
- KRAUS, K. & JASMUND, K. (1981): Verwitterungsvorgänge an Bausteinen des Kölner Domes. — *Kölner Dombl.*, 46, 175 — 190.
- KUENDIG, E. & DE QUERVAIN, F. (1953): Fundstellen mineralischer Rohstoffe in der Schweiz. — Kümmerly und Frey, Bern.
- LAND, L. S. & DUTTON, S. P. (1978): Cementation of a pennsylvanian deltaic sandstone: isotopic data. — *J. Sedimentol. Petrol.*, 48, 1167 — 1176.
- LONGINELLI, A. & BARTELLONI, M. (1978): Atmospheric pollution in Venice, Italy, as indicated by isotopic analysis. — *Water, Air, Soil Pollution*, 10, 335 — 341.
- LOVE, L. G. & AMSTUTZ, G. C. (1966): Review of microscopic pyrite (from the Devonian Chattanooga Shale and Rammelsberg Bänderz). — *Fortschr. Mineral.*, 43, 273 — 308.
- LUCKAT, S. (1972): Ein Verfahren zur Bestimmung der Immissionsrate gasförmiger Komponenten. — *Staub Reinhalt. Luft*, 32, 484 — 486.
- (1975): Stone deterioration at the Cologne Cathedral due to air pollution. — The conservation of stone, 1, Proc. int. Symp. Bologna, 37 — 43.
- MILLOT, G. & JEANNETTE, D. (1975): Altérations des grès. — *Monum. hist. France*, no. hors sér., 33 — 35.
- MORTENSEN, H. (1933): Die "Salzsprengung" und ihre Bedeutung für die regionalklimatische Gliederung der Wüsten. — *Petermanns Mitt.*, 79, 130 — 135.
- PANCZA, A. & LAUTRIDOU, J. P. (1973): Gélifraction artificielle sur quelques Molasses du Moyen-Pays Suisse. — *Bull. Soc. neuchât. Géogr.*, 18, 89 — 99.
- PAULY, J. P. (1972): Relations entre les conditions climatologiques et les altérations dans l'église monolithe d'Aubeterre. — 1er Colloq. int. Détérior. Pierres Oeuvre, La Rochelle, 217 — 227.

- (1975a): Maladie alvéolaire: conditions de formation et d'évolution. – The conservation of stone, 1, Proc. int. Symp., Bologna, 55 – 80.
- (1975b): Climatologie et pollution. – Monum. hist. France, no. hors sér., 38 – 47.
- (1975c): Etude sommaire du bilan hydrologique d'un mur. – Lithoclastia, 1, 53 – 82.
- (1976): Le rôle des chlorures dans les maladies alvéolaire et desquamante. – 2nd. int. Symp. Deterior. Build. Stones, Athen, 79 – 91.
- PELLERIN, F. M. (1976): Influence de la dolomite dans un cas d'altération de tunnel ferroviaire. – 2nd int. Symp. Deterior. Build. Stones, Athen, 67 – 78.
- (1978): Les altérations des maçonneries carbonatées de tunnels ferroviaires anciens. – Thèse doct., Ecole natl. sup. Mines Paris, Paris.
- (1980): La porosimétrie au mercure appliquée à la géologie de l'ingénieur. – Bull. liais. Lab. Ponts Chaussées, 106, 105 – 116.
- PITTMAN, E. D. (1971): Microporosity in carbonate rocks. – Amer. Assoc. Petroleum Geol. Bull., 55, 1873 – 1881.
- (1979a): Porosity, diagenesis and productive capability of sandstone reservoirs. – Soc. econ. Paleont. Mineral., spec. publ., 26, 159 – 173.
- (1979b): Recent advances in sandstone diagenesis. – Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 7, 39 – 62.
- POLLACK, V. (1923): Verwitterung in der Natur und an Bauwerken. – Tech. Praxis, 30, Klemm, Leipzig.
- QUERVAIN, F. DE (1945): Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz, Teil 1. – Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser., 23.
- (1967): Technische Gesteinskunde. – Birkhäuser, Basel.
- (1969): Die nutzbaren Gesteine der Schweiz. – Kümmerly und Frey, Bern, (3. Aufl.).
- (1979a): Zwei Molassesandsteine an historischen Anwendungen der Zentral- und Ostschweiz. In: F. DE QUERVAIN: Steine schweizerischer Kunstdenkmäler, 73 – 76. – Manesse, Zürich.
- (1979b): Der Stein in der Baugeschichte Zürichs. In: F. DE QUERVAIN: Steine schweizerischer Kunstdenkmäler, 117 – 129. – Manesse, Zürich.
- QUERVAIN, F. DE & GSCHWIND, M. (1934): Die nutzbaren Gesteine der Schweiz. – Huber, Bern.
- QUERVAIN, F. DE & JENNY, V. (1951): Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz, Teil 2. – Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser., 30.
- QUERVAIN, F. DE & ZEHNDER, K. (1982): Der Reiter am Grossmünster. – Z. schweiz. Archäol. Kunstgesch., 39, 142 – 144.
- REICHEL, H. (1975): Die Natursteinverwitterung an Bauwerken als mikroklimatisches und edaphisches Problem in Mitteleuropa. – Tübinger geogr. Stud., 62.
- RENZ, H. H. (1937): Die subalpine Molasse zwischen Aare und Rhein. – Eclogae geol. Helv., 30, 87 – 214.
- SAXER, F. (1965): Geologischer Atlas der Schweiz, Atlasblatt Nr. 45 (Bl. 1075 Rorschach). – Kümmerly und Frey, Bern.
- SCHAFFER, R. J. (1932): The weathering of natural building stones. – Build. Res. spec. Rep., 18, H. M. Sta. Off., London.
- SCHMOELZER, A. (1936): Zur Entstehung der Verwitterungsskulpturen an Bausteinen. – Chem. Erde, 10, 479 – 520.
- SCHOLLE, P. A. (1979): Constituents, textures, cements, and porosities of sandstones and associated rocks. – Amer. Assoc. Petroleum Geol., Mem. 28.
- SCHUPPLI, H. M. (1952): Erdölgeologische Untersuchungen in der Schweiz, Teil 4. – Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser., 26/4.
- SRAMEK, J. (1980): Determination of the source of surface deterioration on tombstones at the old Jewish cemetery in Prague. – Stud. Conserv., 25, 47 – 52.
- STUDER, B. (1825): Beiträge zu einer Monographie der Molasse, oder Geognostische Untersuchungen über die Steinarten und Petrefakten, die zwischen den Alpen und dem Jura gefunden werden; mit besonderer Rücksicht auf den Canton Bern und die angrenzenden Theile von Freyburg, Luzern und Solothurn. – Jenni, Bern.
- (1853): Geologie der Schweiz, Band 2. – Stämpfli, Bern, Schulthess, Zürich.
- TANNER, H. (1944): Beitrag zur Geologie der Molasse zwischen Ricken und Hörnli. – Mitt. thurg. natf. Ges., 33.
- THURY, H. DE, et al. (1828): Sur le procédé proposé par M. Brard pour reconnaître, immédiatement, les pierres qui ne peuvent pas résister à la gelée, . . . – Ann. Chim. Phys., 38, 160 – 192.
- TILLMAN, R. W. & ALMON, W. R. (1979): Diagenesis of Frontier formation offshore bar sandstones, Spearhead Rancho Field, Wyoming. – Soc. econ. Paleont. Mineral., spec. publ., 26, 337 – 378.
- TOELG, G. (1968): Chemische Elementaranalyse mit kleinsten Proben. – Chemie, Weinheim.
- TRAUTMANN, L. (1976): Petrographische Untersuchungen an Sandsteinen des Freiburger Münsters. – Ber. natf. Ges. Freiburg i. Br., 66, 95 – 107.
- VOGLER, H. (1967): Nachweis von Kapillarrissen in Strassenbaugesteinen durch Fluoreszenzmikroskopie. – Strasse Autobahn, 18, 115 – 117.

- WALTHER, J. (1900): Das Gesetz der Wüstenbildung in Gegenwart und Vorzeit. – Reimer, Berlin.
- WEYL, P. K. (1959): Pressure solution and the force of crystallization – a phenomenological theory. – J. geophys. Res., 64/2, 2001 – 2025.
- WINKLER, E. M. (1975): Stone: properties, durability in man's environment. – Springer, Wien.
- WINKLER, E. M. & WILHELM, E. J. (1970): Salt burst by hydration pressures in architectural stone in urban atmosphere. – Geol. Soc. Amer. Bull., 81, 567 – 572.
- WINKLER, E. M. & SINGER, P. C. (1972): Crystallization pressure of salts in stone and concrete. – Geol. Soc. Amer. Bull., 83, 3509 – 3514.
- ZEHNDER, K. (1981): Verwitterung von Molassesandsteinen an Baudenkmalern und in Naturaufschlüssen. – Diss. ETH Zürich Nr. 6890.
- ZGRAGGEN, P. & PETERS, T. (1980): Verwertbarkeit karbonathaltiger Molassesandsteine als Rohstoffe für dampfgehärtete Baustoffe. – Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser., 59.
- ZOBRIST, J. & STUMM, W. (1979): Wie sauber ist das Schweizer Regenwasser? – N. Zürcher Ztg., 27.6.79.

Bildnachweis:

Architekturbüro Spirig & Kask: Fotos Fig. 5b, 7, 15, 17

Dr. A. Arnold: Foto Fig. 9