

VERWITTERUNG DER BERNER SANDSTEINE

INAUGURALDISSERTATION

DER PHILOSOPHISCH-NATURWISSENSCHAFTLICHEN FAKULTAET
DER UNIVERSITAET BERN
ZUR ERLANGUNG DER DOKTORWUERDE

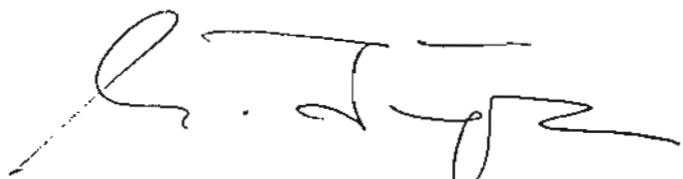
vorgelegt von

CHRISTINE BLAEUER
von Strättligen (BE)

Von der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät
auf Antrag von Herrn Prof.Dr.Tj.Peters angenommen.

Bern, den 18.Juni 1987

Die Dekanin:



Frau Prof.Dr.E.Jäger

VORWORT

Die vorliegende Arbeit wurde unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. Tj. Peters vom Min.-Petr. Inst. der Univ. Bern und Herrn Dr. A. Arnold vom Inst. f. Denkmalpflege der ETH-Zürich durchgeführt. Sie entstand in den Jahren 1984 bis 1987 und wurde durch die Stadt und den Kanton Bern als Diss.-Stipendium, finanziert.

Herrn Prof. Peters danke ich recht herzlich für die gebotene Möglichkeit, diese Arbeit in Angriff zu nehmen, sowie seine nachfolgende Unterstützung.

Zu besonderem Dank bin ich Herrn Dr. Arnold verpflichtet. Er hat mich in das Gebiet der Bausteinverwitterung eingeführt und mir immer wieder die nötige Anleitung, Hilfe, Kritik sowie fachliche und moralische Unterstützung gegeben. Gerne erinnere ich mich auch an viele anregende Diskussionen mit ihm.

Wichtig für mich war auch die Begleitung durch die Kommission bestehend aus den Herren: Dr. G. Dübendorfer (Stadtlabor Bern), PD Dr. I. Mercolli (Min.-Petr. Inst. Univ. Bern), Siegenthaler (Hochbauamt des Kantons Bern), R. Stoltz (Hochbauamt der Stadt Bern) und B. Strasser (Denkmalpflege der Stadt Bern). Diesen Herren sei an dieser Stelle dafür gedankt, dass sie die Arbeit als aufmerksame Kritiker verfolgt und mir Zugang zu manchen im Bau befindlichen Objekten verschafft haben.

Für Sandsteinproben sowie Zugang zu Steinbrüchen und Bauten, danke ich den Herren C. Bernasconi, von Dach, Gfeller und Hänni. Herrn Architekt M. Saurer danke ich herzlich für sein grosses Interesse, für manche angeregte Diskussion und für zur Verfügung gestellte Pläne.

Dem Stadtlabor Bern, insbesondere Herrn Dr. G. Dübendorfer und Herrn B. Bachmann bin ich für die Salzanalysen zu Dank verpflichtet. Herrn C. Félix von der EPF-Lausanne verdanke ich die Messungen der Ausdehnung bei Wasseraufnahme.

Herr Dr. D. Jeannette vom Geol. Inst. der Univ. Strasbourg, verhalf mir zu impaktierten Dünnschliffen und gab mir daneben manchen interessanten Hinweis.

Herr Dr. G. Kahr vom Tonmineralogischen Labor der ETH-Zürich war ein unermüdlicher Helfer bei den Quecksilberdruckporosimetrie-Messungen.

Herrn C. Scheidegger vom Syst.-Geobot. Inst. der Univ. Bern danke ich für die Bestimmung der Flechten.

Herrn F. Zweili vom Geol. Inst. und Herrn B. Wicki vom Physik. Inst. der Univ. Bern verdanke ich REM-Aufnahmen.

Mein besonderer Dank gilt auch den Herren H. Huber und J. Megert für das Herstellen von Dünnschliffen und die Erfüllung von Sonderwünschen.

Für die Korrektur der englischen respektive der französischen Zusammenfassung danke ich Thomas Armbruster und Dani Vuichard.

Weiter danke ich den folgenden Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Min.-Petr. und des Geol. Inst. Bern für kleinere und grössere Hilfeleistungen: L. Bobade, G. Friedel, H. Haas, F. Hofer, R. Mädler, M. Mange, F. Meyer, J. Pfister, U. Raz und B. Schär.

Ein herzliches Dankeschön verdienen auch all jene, die mich während meines Studiums fachlich und/oder privat unterstützt haben: Martin Bucher, Marco Buletti, Christoph Büeler, Stuart Burley, Hannes Dollinger, Urs Eggenthaler, die Herren Fischer und Funk vom städt. Hochbauamt, Beda Hofmann, Michael Hügi, Andreas Küng, Daniel Kurz, Paul-Otto Lutz, Bruno Martin, Jürg Meyer, Dan Motariu, Roli Oberhänsli, Huschang Oschidari, Tim Padfield, Dagmar Riessen, Kaarina Schenk, Franz Schenker, Niklaus Waber, Christoph Wenger, Konrad Zehnder und Christian Zurbrügg.

Danken möchte ich auch Chrigu, Gisela, Irene, Kurt, Nelli, Roland und meiner Mutter, denn ohne sie alle ginge gar nichts.

1	PROBLEMSTELLUNG	1	3.2.4	Porenanalyse	89
2	VERWITTERUNG,_VERWITTERUNGSFORMEN_UND_EXPOSITION	1	3.2.4.1	Bestimmung des Porenvolumens	89
2.1	Verwitterungseinflüsse	2	A absolute Porosität	89	
2.1.1	Das Berner Regionalklima und der Begriff der "Wetterseite"	2	B Wasseraufnahme unter Vakuum	90	
		2	C Wasseraufnahme durch langsames Eintauchen	90	
		2	D Wasseraufnahme durch kapillares Saugen	90	
		2	E Wasseraufstiegs geschwindigkeit an Bohrkernen	92	
2.2	Verwitterungsformen	7	3.2.4.2	Quecksilberdruckporosimetrie	93
2.2.1	Terminologie der Verwitterungsformen	7	3.2.4.3	Dünnenschliffporosimetrie	93
2.3	Schadenssituationen an Bauten	9	A Herstellung der imprägnierten Dünnenschlüsse	93	
2.4	Verwitterungssituationen in Naturaufschlüssen	77	B Point counter Analysen	94	
2.5	Zusammenfassung	82	3.2.4.4	REM – Untersuchungen	94
		82	3.2.4.5	Ausdehnung bei Wasseraufnahme	95
3	ARBEITSMETHODEN	4	4	EIGENSCHAFTEN DER BERNER SANDSTEINE	95
3.1	Felduntersuchungen	84	4.1	Geologischer Rahmen	95
3.1.1	Vergleich Naturaufschluss/Gebäude	84	4.2	Mineralogie-Petrografia	98
3.1.2	Probennahme	84	4.3	Geochemie	103
	A Unverwitterte Proben	84	4.3.1	Zusammenhang zwischen den wasserlöslichen Anteilen	104
	B Verwitterte Proben	85		und der Korngröße	104
3.2	Laboruntersuchungen	86	4.3.2	Wasserlösliche Anteile in frischen Proben	105
3.2.1	Mineralogie und Gesamtgesteinschemie	86	4.4	Physikalische Eigenschaften	107
3.2.2	Chemie der löslichen Anteile	86	4.5	Nomenklatur für die direkte Beschreibung von Porenräumen	108
3.2.2.1	Herstellung der Wasserauszüge	87	4.5.1	Nomenklatur für die direkte Beschreibung von Porenräumen	109
3.2.2.2	Quantitative Bestimmung der Ionen Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}	88	4.5.2	Indirekte (physikalische) Beschreibung der Poren	110
3.2.3	Bestimmung der löslichen Ausblühungssalze	89			

4.5.3	Wasser im Porenraum	111	5.1.3	Resultate der Untersuchungen an Bohrkernen	153
4.5.3.1	Kapillarbewegung in zylindrischen Röhren	112	5.1.4	Gegenüberstellung der verschiedenen Bohrkerne aus der Münsterplattform-Stützmauer	175
4.5.3.2	Kapillarbewegung in Röhren, deren Querschnitt periodisch ändert	115	5.1.5	Zusammenfassung	181
4.5.3.3	Kapillare Vorgänge in Porennetzwerken	118	5.2	Grosses Mätteschulhaus	184
4.5.4	Der Porenraum der Berner Sandsteine	121	5.2.1	Zustand der Fassaden und Bohrkernbeschreibungen	184
4.5.4.1	Bezeichnung und Bedeutung verschiedener Porositätsarten	121	5.2.2	Porositäten und wasserlösliche Anteile in den Bohrkernen	186
4.5.4.2	Vergleich der Resultate aus verschiedenen Porositäts- bestimmungsmethoden	124	5.2.3	Gegenüberstellung der verschiedenen Bohrkerne des Grossen Mätteschulhauses	196
4.5.4.3	Quecksilberdruckporosimetrie	127	5.2.4	Zusammenfassung	200
4.5.4.4	Kapillare Wasseraufnahme- und -eindring-Geschwindig- keit	132	5.3	Zusammenfassender Vergleich der Verwitterungsprofile	200
4.5.4.5	Ausdehnung bei Wasseraufnahme	135			
4.6	Zusammenfassung und Vergleich der Berner Sandsteine mit andern Molassesandsteinen des Schweizerischen Mittelandes	140	6	ZUR ENTSTEHUNG DER VERWITTERUNGSFORMEN	201
4.6.1	Gegenüberstellung der verschiedenen Berner Sandsteine	140	6.1	Die verschiedenen Einflüsse	201
4.6.2	Vergleich mit den Sandsteinen aus dem Burdigalien der Westschweiz	141	6.1.1	Einflüsse der Gesteinseigenschaften	201
4.6.3	Vergleich mit den Granitischen und den Plattsand- steinen	142	6.1.2	Antropogenen Einflüsse auf die Verwitterung	206
			6.1.2.1	Einflüsse der Umweltverschmutzung	207
			6.1.2.2	Unsachgemäße Behandlung von Bauten	208
			6.2	Verwitterungsformen und ihrer Ursachen	209
5	OBJEKTSTUDIEN (VERWITTERUNGSPROFILE)	144			
5.1	Münsterplattform-Stützmauer	144	7	VERMEIDUNG VON SCHÄDEN	213
5.1.1	Bau- und Renovationsgeschichte	144			
5.1.2	Schadenbilder, Zustand der Mauer und Bohrkern- beschreibung	145			

ZUSAMMENFASSUNG 8
RESUME 219
ABSTRACT 220

Verzeichnis der Figuren Seite, (Nr)

- Berechnung der kapillaren Wasseraufnahme und Wassereindringkoeffizienten 234
 - Tabelle der in ppm umgerechneten Chemie der löslichen Auszüge: 236
 - Münsterplattform-Stützmauer 236
 - Grosses Matteschulhaus 238
 - Resolution der Vereinigung der Schweizer Denkmalpfleger über den Umgang mit geschädigten Steinen vom 14. November 1986 240
 - Liste der verwendeten Symbole und Abkürzungen 241
- LITERATURVERZEICHNIS**
- ANHANG** 234
- Berechnung der kapillaren Wasseraufnahme und Wassereindringkoeffizienten 234
 - Tabelle der in ppm umgerechneten Chemie der löslichen Auszüge: 236
 - Münsterplattform-Stützmauer 236
 - Grosses Matteschulhaus 238
 - Resolution der Vereinigung der Schweizer Denkmalpfleger über den Umgang mit geschädigten Steinen vom 14. November 1986 240
 - Liste der verwendeten Symbole und Abkürzungen 241

- Figur 1:** Verteilung der Niederschlagsmengen in Abhängigkeit der Bodenwindrichtung (1.5.73 - 31.10.74), nach Maurer et al. (1975). 3
- Figur 2:** a) Monatstemperatur für die Stadt Bern, gemessen über die Jahre 1953-1962 nach Schüepp (1967).
b) Monatswerte der relativen Luftfeuchtigkeiten (R.F.) in der Stadt Bern, für die Jahre 1930-1960 nach Schüepp und Urfer (1970). 4
- Figur 3:** Turm der Pauluskirche nach einem starken Regen am 24. 1. 86. 6, (1)
- Figur 4:** Westecke des Anatomischen Instituts (Bühlstrasse 26) nach einer Stunde starken Regens am 22. April 86. 6, (2)
- Figur A1.1:** Schnitt durch das Sockelgesims der N-Fassade der Heiliggeistkirche. 13, (3)
- Figur A1.2:** Sockelgesims der Heiliggeistkirche, E-Fassade. 14, (3)
- Figur A1.3:** Fensterbänke an wetterabgewandten Fassaden 16
 - a) Muesmattschulhaus, SE-Fassade, Parterre. (4)
 - b) Anatomisches Institut, Bühlstrasse 26, SE-Fassade, 1. OG. (2)
- Figur A1.4:** Fensterbänke an Wetterfassaden des Anatomischen Instituts, Bühlstrasse 26. 17, (2)
 - a) SW-Fassade, 1. OG
 - b) NW-Fassade, 1. OG
 - c) NW-Fassade, Parterre
 - d) Erklärungsskizze
- Figur A2.1:** Minerva-Statue auf dem Wasserschloss am Thunplatz 20, (5)
 - a) Rückansicht von Osten her
 - b) Detail des Kopfes von vorne (Westen)
 - c) Detail der Beine mit Hahn von vorne

Figur A2.2: Veranda, Falkenhöhenweg 12. 22, (6)

Figur A3.1: N- und E-Mauer des Schlosshaldenfriedhofs 23, (7)

- a) Schnitt durch die Mauer beim NE-Eingang.
- b) Schnitt durch den östlichen Teil der N-Mauer.
- c) Ansicht der N-Mauer von aussen her, etwa 20 m vom Haupteingang.

Figur A3.2: Geländerpfosten auf der Kleinen Schanze, SE-Ecke. 26, (8)

Figur A4.1: Ansicht des Gurtes an der SW-Ecke im 2. OG des Lorraineschulhauses. 27, (9)

Figur A4.2: Rechter Pfeiler des südlichen Seitenportals 28, (10) an der W-Fassade des Münsters (Haupteingang)

Figur A4.3: Übersichtsfoto (a) und Schadenskizze (b) der südlichen Ecklisenen der W-Fassade im 3.OG der Hauptpost am Bollwerk mit Erklärungsskizzzen c) und d).

Figur A5.1: Bundeshaus Ostflügel, W-Fassade des zentralen Gebäudeteils. 31, (12a)

Figur A5.2: Rathaus, Westfassade. 32, (13)

Figur A6.1: Lisenen W-Fassade Lorraineschulhaus, 2. OG. 33, (9)

Figur A6.2: Lisenen an der SW-Ecke der Hauptpost am Bollwerk. 34, (11b)

Figur A7.1: Relief am Schlussstein des südlichen Arkadenbogens am Bahnhofplatz 5 (Gewerbekasse). 35, (14)

Figur B1.1: Detailfotos aus wetterabgewendeten Fassaden. 36
 a) Lisenen Hauptpost, NE-Fassade.
 b) Lisenen Hauptpost, SE-Fassade.
 c) Länggassstrasse 25, N-Fassade.

Figur C1.1: Rückseite des Wasserschlusses am Thunplatz. 38, (5)

Figur C1.2: Säule an der Westseite (Vorderseite) des Wasserschlusses. 39, (5)

- Figur C1.3: Kirche Peter und Paul, N-Fassade 40, (16)
 - a) Übersichtsskizze der N-Fassade.
 - b) Foto der Detailsituation am Fenster.

Figur D1.1: Evangelisches Vereinshaus, Zeughausgasse, 1. OG. 41, (17)

- Figur D2.1: Warenhaus ABM, Spitalgasse, 3. OG, Nordfassade. 42, (18)
- Figur D2.2: Warenhaus ABM, Spitalgasse, 3. OG, Nordfassade. 42, (18)
- Figur D2.3: Warenhaus ABM, Spitalgasse, 3. OG, Nordfassade. 42, (18)
- Figur D2.4: Warenhaus ABM, Spitalgasse, 3. OG, Nordfassade. 42, (18)

- Figur E1.1: Fensterbank 1. OG, S-Fassade, Polizeihauptwache (ehem. Knabenwaisenhaus). 43, (19)
- Figur E1.2: Schematischer Schnitt durch eine Fensterbank 44 mit Blumentopf. 44
- Figur E1.3: Fensterbänke: 45
 - a) Nägelgasse 1., 1. und 2. OG, N-Fassade (20)
 - b) Gübelin, Neuengasse, 1. OG, N-Fassade (21)

- Figur E2.1: Gurt 2. OG an der S-Fassade des Lorraine-schulhauses. 46, (9)
- Figur E2.2: SBB-Generaldirektion, Hochschulstrasse 6, 47, (22)
- Figur E3.1: Details aus der N-Fassade des Hauses Aarber-gergasse 33. 48, (23)
- Figur E3.2: Wasserläufe unterhalb einer Leuchtreklame. 48, (23)
 - a) Erklärungsskizze zu a).
 - b) Wasserläufe unterhalb einer Leuchtreklame.
 - c) Kanalisation des Wassers durch Kabel

- Figur E4.1: Ansicht und Schnitt eines Fensters der Bun-deshaus-S-Fassade im 1. OG. 49, (12b)
- Figur E4.2: Fenster an der Westfassade, am Westflügel des Bundeshauses. 50, (12c)

- Figur E4.3: Gurt an der Stadttheater-E-Fassade. 51, (24)
- Figur F1.1: Kaffgesims an der Südfront der Französischen Kirche, Zeughausgasse; erster Strebe-
pfeiler vom Kornhaus aus gesehen. 52, (25)
- Figur F2.1: Durchgang Bundesstrasse Bärenplatz, auf der Westseite des Bundeshauses. 53, (12d)
- Figur F2.2: Treppe von der Kleinen Schanze nach dem Bundesrain. 54, (26)
- Figur F3.1: Schlosshalden-Friedhofmauer, Nordmauer etwa 40 m östlich des Pförtnerhauses. 56, (7)
- a) Strassenseite (Nord)
b) Friedhofseite (Süd) 57, (27)
- Figur F4.1: Eckhaus Waisenhausplatz – Spitalgasse, Par-
terre, Ostfassade. 57, (27)
- Figur G1.1: Grundfeuchteaufstieg an einem Arkadenpfeiler
an der Münstergasse 4. 58, (28)
- Figur G1.2: Gerberngasse 12. 59, (29)
- Figur G1.3: Rappenthalstrasse 78, Erdgeschoss, Stdfassaa-
de. 60, (30)
- Figur G2.1: Bundesterrassen-Stützmauer gegen Minzrain,
Südseite.
a) schematischer Schnitt durch die Mauer
b) Ansicht der Mauer von Osten her
c) Detailaufnahme von Quadern mit Alveolar-
verwitterung 61, (31)
- Figur G2.2: Bärengraben. 63, (32)
- Figur H1.1: Käfiggässchen, Rückseite des Restaurants
Gfeller am Bärenplatz. 64, (33)
- Figur H2.1: Steinwespenlöcher in einem Gesims am Wasser-
schloss. 65, (5)

- Figur H3.1: Stützmauer beim Nydeggerhof, unterhalb der Treppe links der WC-Anlagen. 66, (34)
- Figur H3.2: Detailschnitt A – A aus Figur H3.1. 67
- Figur H3.3: Details d und e aus Figur H3.1. 68
- Figur H3.4: Westmauer des Schlosshaldenfriedhofs 69, (7)
- a) Schematischer Schnitt
b) Ansichtsfoto Friedhofinnenseite
- Figur H4.1: Türsturz der Wirtschaft zur Traube, Genfer-
gasse. 71, (35)
- Figur H7.1: Senkrecht zum Lager versetzte Steine. 72
- a) Wasserschloss am Thunplatz.
(5)
b) Muesmattschulhaus, Nw-Fassade.
(4)
- Figur S1.1: Kirche Peter und Paul, N-Fassade. 73, (16)
- Figur S1.2: Münster, Westfassade, unter der ersten Gale-
riee. 77, (10)
- Figur S1.3: Detailansicht aus Steinbruch Nr 15. Die Jahr-
zahl 1795 ist noch gut zu erkennen. 77
- Figur 5: Ansicht des südexponierten Aufschlusses Nr 5. 79
- Figur 6: Ansicht des südexponierten Aufschlusses Nr 5. 79
- Figur 7: Aufschluss 7, a) nördlicher und b) südlicher Teil. 80
- Figur 8: Steinbruch vom Gurten, Grundrisskizze und Profil. 81
- Figur 9: Skizze des Aufschlusses 12 am Ostermundigen-
berg. 82
- Figur 10: Stratigrafische Zuordnung der Berner Sand-
steine. (nach Gerber, 1982) 96
- Figur 11: Paläogeografische Übersichtskarte der Schweiz zur Zeit der Oberen Meeres Molasse.
(nach Trümpy, 1980) 97
- Figur 12: Paläogeografische Skizze der Region Bern zur 98

Zeit der Ablagerung der Oberen Eocene-Schichten.
(nach Gerber, 1982)

Figur 24: Wasseraufnahme nach 24 Stunden (W24hk) und nach 32 Tagen (WS1), verglichen mit der Wasseraufnahme unter Vakuum. 126

Figur 13: Vergleich der Pointcounter-Analysen mit den umgerechneten Diffraktometerdaten in Volumen-%

Figur 14: Einfluss der Mahleinheit der Proben auf die ^{13C}-spektroskopische Anteilsspektren der Karbonate.

Figur 15: Zusammenhang zwischen Alkaliionen und Tonlogischen Anteile.

Figur 16: Zusammenhang zwischen Alkalionen und Feldspäten.
mineralien.

Figur 17: Fotografie eines Dünnschiffes der unter Luftdruck mit Harz gefüllt wurde.

Figur 18: Schema zur Erklärung der Kapillarkraft. 112

Figur 19: Einfaches Modell für ein Kapillarrohr mit zwei abwechselnden Radien r und R . Steighöhen:
a) in Rohr mit Radius r ; 116

b) in Rohr mit Radius R;
c) in Rohr mit abwechselnden Radien.

Figur 20: Einfluss der Häufigkeit eines Kapillarradius auf die maximale Steighöhe.

Figur 21: Mechanismen, welche zum Einschliessen von Luftblasen, beim kapillaren Eindringen von Flüssigkeiten, unter Luftdruck führen.

- a) nach Bousquière (1979)
- b) nach Seker und Recordon (1984)

Figur 22: Absolute Porosität (pa) verglichen mit der Vakuum-Porosität (pv). 124

Figur 23: Mit dem Quecksilberdruckporosimeter bestimmte offene Porosität (top) und mittels Pointcounting ermittelte Porosität (Poro), verglichen mit der tatsächlichen Porosität (bottom).

Figur 24: Wasseraufnahme nach 24 Stunden (W24hk) und nach 32 Tagen (Ws1), verglichen mit der Wasseraufnahme unter Vakuum.

Figur 25: Vergleich der Wasseraufnahme durch langsame
Eintauchen mit der Wasseraufnahme durch kapillärer
Gastric Saugen

Figur 26: Porenradien-Porenvolumensummenkurven der unverwitterten Berner Sandsteinproben. 129-

Figur 27: Offene Grob- (ogr), Makro- (omap) und Mikro-
Porositäten (omip).

Figur 28: Offene Grobporosität (ogr) verglichen mit der offenen Makroporosität (oman)

Figur 29: Steighöhe der Wasserfront, abgetragen gegen die Quadratwurzel der Zeit Sandrichtung senk-
der Ortein Einheit Fakultät (Vomay), 134

Figur 30. Gewichtszunahme beim kanillaren Sonden aufgrund der adoratswirker der Zelle. Zeigtzunahme durch
reicht zur Schichtung.

tragen gegen die Quadratwurzel der Zeit. Säulen senkrecht zur Schichtung.

Figur 31: Wassereindringkoeffizienten B gegen die Wasseraufnahmekoeffizienten A aufgetragen.

Figur 32: Ausdehnung bei Wasseraufnahme nach 72 Stunden senkrecht zur Schichtung verglichen mit den

Figur 33: Ausdehnung der Berner Sandsteine durch Wasser- 138 Tonmineralegehalten.

Figur 34: Wasseraufnahmekoeffizient A verglichen mit der 139
Durchflusshöhe bei Wasseraufnahme nach 30 Minuten

Ausdehnung bei Wasseraufnahme nach 30 Minuten,
respektive nach 3 Tagen.

Figur 33: Doppelsichtloch der SW-Ecke der Münsterplatz-
form-Stützmauer

- c) Porengrößenverteilung in Proben aus verschiedenen Mauertiefen
in der Lockerzone.
- Figur 37: Aufsicht auf die oberflächliche Gipskruste des Kerns 5s. 150
- Figur 38: Hinterer Teil des Bohrkerns 9s. (Angebohrter Hohlrbaum). 152
- Figur 39: Bohrkern 1s (und Bohrkern 3 von 1984)
a) Feucht/Trockengrenze auf der Kernoberfläche nach bestimmten Saugzeiten (nach Arnold und Küng, 1984).
b) Ionenverteilungen im Wasserauszug.
c) Porengrößenverteilung in Proben aus verschiedenen Mauertiefen. 157
- Figur 40: Bohrkern 2w (und Bohrkern 1 von 1984)
a) Feucht/Trockengrenze auf der Kernoberfläche nach bestimmten Saugzeiten (nach Arnold und Küng, 1984).
b) Ionenverteilungen im Wasserauszug.
c) Porengrößenverteilung in Proben aus verschiedenen Mauertiefen. 159-160
- Figur 41: Bohrkern 3s (und Bohrkern 4 von 1984)
a) Feucht/Trockengrenze auf der Kernoberfläche nach bestimmten Saugzeiten (nach Arnold und Küng, 1984).
b) Ionenverteilungen im Wasserauszug.
c) Porengrößenverteilung in Proben aus verschiedenen Mauertiefen. 162-163
- Figur 42: Bohrkerne 4s und 5s
a) Feucht/Trockengrenze auf der Kernoberfläche nach bestimmten Saugzeiten
b) Foto des Kern 4s nach dem Wasseraufsaugversuch. 165-166
- c) Porengrößenverteilung in Proben aus verschiedenen Mauertiefen
- Figur 43: Bohrkerne 6w und 7w
a) Feucht/Trockengrenze auf der Kernoberfläche nach bestimmten Saugzeiten
b) Ionenverteilungen im Wasserauszug.
c) Porengrößenverteilung in Proben aus verschiedenen Mauertiefen 168
- Figur 44: Bohrkern 8w (und Bohrkern 2 von 1984)
a) Feucht/Trockengrenze auf der Kernoberfläche nach bestimmten Saugzeiten (nach Arnold und Küng, 1984).
b) Ionenverteilungen im Wasserauszug.
c) Porengrößenverteilung in Proben aus verschiedenen Mauertiefen 169-170
- Figur 45: Bohrkern 9s (und Bohrkern 5 von 1984)
a) Feucht/Trockengrenze auf der Kernoberfläche nach bestimmten Saugzeiten (nach Arnold und Küng, 1984).
b) Ionenverteilungen im Wasserauszug.
c) Porengrößenverteilung in Proben aus verschiedenen Mauertiefen 171-172
- Figur 46: Bohrkern 10s (und Bohrkern 6 von 1984)
a) Feucht/Trockengrenze auf der Kernoberfläche nach bestimmten Saugzeiten (nach Arnold und Küng, 1984).
b) Ionenverteilungen im Wasserauszug.
c) Porengrößenverteilung in Proben aus verschiedenen Mauertiefen 173-174
- Figur 47: Anionenkonzentrationen in den Wasserauszügen aus Kernen der Münsterplattform-Stützmauer:
a) Chloridverteilung
b) Nitratverteilung
c) Sulfatverteilung 178

d) Hydrogenkarbonatverteilung.

Figur 48: Alkali- und Ammoniumkonzentrationen in den Wasserauszügen aus Kernen der Münsterplattform-Stützmauer:
 a) Natriumverteilung
 b) Kaliumverteilung
 c) Ammoniumverteilung

Figur 49: Erdalkalikonzentrationen in den Wasserauszügen aus Kernen der Münsterplattform-Stützmauer:
 a) Magnesiumverteilung
 b) Kalziumverteilung

Figur 50: Foto der Situation beim lecken Dachablaufrohr an der Nordfassade wo die Kerne 7A, 7B und 7C erbohrt wurden.

Figur 51: Ionenverteilung im Wasserauszug aus Bohrkern 1.

Figur 52: Ionenverteilungen im Wasserauszug der Bohrkerne 2A und 2B.

Figur 53: Ionenverteilung im Wasserauszug des Bohrkerns 3.

Figur 54: Ionenverteilung im Wasserauszug der Bohrkerne 4A und 4B.

Figur 55: Ionenverteilung in den Wasserauszügen der Bohrkerne 7A, 7B und 7C.

Figur 56: Ionenverteilung im Wasserauszug des Bohrkerns 8.

Figur 57: Anionenkonzentrationen in den Wasserauszügen aus Bohrkernen des Grossen Matteschulhauses.
 a) Chloridverteilung,
 b) Nitratverteilung,
 c) Sulfatverteilung,
 d) Hydrogenkarbonatverteilung.

d) Kationenkonzentrationen in den Wasserauszügen aus Bohrkernen des Grossen Matteschulhauses. 199

a) Natriumverteilung,
 b) Kaliumverteilung,
 c) Magnesiumverteilung,
 d) Kalziumverteilung. 216

Figur 58: Kationenkonzentrationen in den Wasserauszügen aus Bohrkernen des Grossen Matteschulhauses. 179
 a) Natriumverteilung in der Spitalgasse. Sie wurden durch eine Baugutachterfirma in viermal der gleichen Exposition erbohrt. 216

Figur 59: Vier verschiedene Bohrlöcher an der Nordfassade des ABM-Warenhauses in der Spitalgasse. Sie wurden durch eine Baugutachterfirma in viermal der gleichen Exposition erbohrt. 216

Figur 60: Normierung der Messwerte für die Berechnung der Wassereindringkoeffizienten (B). 235

Figur 58: Kationenkonzentrationen in den Wasserauszügen aus Bohrkernen des Grossen Matteschulhauses. 199

a) Natriumverteilung, 216

b) Kaliumverteilung, 216

c) Magnesiumverteilung, 216

d) Kalziumverteilung, 216

Figur 59: Vier verschiedene Bohrlöcher an der Nordfassade des ABM-Warenhauses in der Spitalgasse. Sie wurden durch eine Baugutachterfirma in viermal der gleichen Exposition erbohrt. 216

Figur 60: Normierung der Messwerte für die Berechnung der Wassereindringkoeffizienten (B). 235

Verzeichnis der Tabellen

Seite	Tabelle	Inhalt	Seite	Tabelle	Inhalt
11	Tabelle 1: Verwitterungsbereiche an Gebäuden aus Berner Sandstein.		142	Tabelle 15: Zusammenstellung einiger Eigenschaften der Berner-, Platten- und Granitischen Sandsteine.	
78	Tabelle 2: Untersuchte Steinbrüche und Naturaufschlüsse.		154	Tabelle 16: Resultate der Quecksilberdruckporositäts-Messungen an Bohrkernen der Münsterplattform-Stützmauer.	
85	Tabelle 3: Die verschiedenen momentan erhältlichen Typen von Berner Sandstein.		155	Tabelle 17: Chemie der wasserlöslichen Anteile in den Bohrkernen der Münsterplattform-Stützmauer. Angaben in $\mu\text{mol/g}$.	
87	Tabelle 4: Resultate der Vorversuche zur Herstellung der Wasserauszüge, durchgeführt an einer Probe vom Münster.		185	Tabelle 18: Beschreibung der untersuchten Bohrkerne vom Grossen Matteschulhaus.	
99	Tabelle 5: Einfluss des $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ -Verhältnisses auf die Farbe der Berner Sandsteine.		187	Tabelle 19: Resultate der Quecksilberdruckporositäts-Messungen an Bohrkernen des Grossen Matteschulhauses.	
100	Tabelle 6: Mineralogische und chemische Zusammensetzung der fünf frischen Berner Sandsteinproben und von KM und KR.		188	Tabelle 20: Wasserlösliche Anteile in den Bohrkernen des Grossen Matteschulhauses. Angaben in $\mu\text{mol/g}$.	
101	Tabelle 7: Pointcounter-Resultate zur Ermittlung des Bindemittel-Anteils am Gesamtgestein.		202	Tabelle 21: Vergleich der Eindringkoeffizienten B zweier Magnesiumsulfatlösungen mit demjenigen von Wasser bei 20 °C.	
103	Tabelle 8: Chemie der löslichen Auszüge aus frischen Proben von Berner Sandstein. Werte in $\mu\text{mol/g}$.		236-237	Tabelle 22: Chemie der löslichen Auszüge der Proben von der Münsterplattform-Stützmauer, in ppm.	
108	Tabelle 9: Raum- und spezifische Gewichte (RG respective SG) der frischen Berner Sandsteine.		238-239	Tabelle 23: Chemie der löslichen Auszüge der Proben vom Grossen Matteschulhaus, in ppm.	
118	Tabelle 10: Wassereindringkoeffizienten und zugehörige Porenradien bezogen auf ein glattes, zylindrisches Kapillarröhr.		123	Tabelle 11: Zusammenstellung der an den frischen Proben bestimmten Porositätswerte.	
			128	Tabelle 12: Porositäten der unverwitterten Berner Sandsteine, gemessen mittels Quecksilberdruckporosimetrie.	
			133	Tabelle 13: Wasseraufnahme- und eindringkoeffizienten der unverwitterten Berner Sandsteine.	
			136	Tabelle 14: Werte für die Ausdehnung bei Wasseraufnahme nach 3 Tagen und bei Versuchsabbruch.	

Verzeichnis der bearbeiteten Objekte

Objekt	Objekt	(Nr.) , Seite	(Nr.) , Seite
Aarbergergasse 33	Muesmattschulhaus	(23) , 48	(4) , 16, 17
Aarbergergasse 40	Münster	(40) , 99	(10) , 28, 74, 75, 76, 85, 98, 142, 206
ABM-Warenhaus	Münsterplattform-Stützmauer	(18) , 42, 215, 216	(28) , 58
Alter Aargauerstalden 30	Münzrain	(38) , 85	(41) , 144-183, 200-201, 209
Altes Schlachthaus	Nägelligasse 1	(39) , 98	(31) , 61
Anatomisches Institut	Nydegerhof, Nydeggstalden	(2) , 6, 16, 17, 18, 19	(20) , 45
Bärengraben	Pauluskirche	(32) , 63	(34) , 66, 67, 68
Bahnhofplatz 5	Polizeihauptwache, Waisenhausplatz	(14) , 35	(1) , 6
Bahnhofplatz 11, Gübelin	Rabbentalstrasse 78	(21) , 45	(19) , 43
Bollwerkpost	Rathaus	(11) , 29, 30, 34, 36	(30) , 60, 98
Bundeshaus	SBB-Generaldirektion, Hochschulstr. 6	(12) , 31, 49, 50, 53	(13) , 32
Bundesrain/Taubenstrasse	Schiffbau 3 + 16, Matteschuhhäuser	(26) , 54	(22) , 47
Bühlstr. 26	Schossaldenfriedhof	(2) , 6, 16, 17, 18, 19	(36) , 85, 184-201
Chriskatholische Kirche	Spitalgasse 3	(16) , 40, 73, 85	(7) , 23, 24, 25, 56, 69, 70
Erlacherhof, Junkerngasse 47	Spitalgasse/Waisenhausplatz	(42) , 208	(18) , 42, 215, 216
Evangelisches Vereinshaus	Sprünglinfassade	(17) , 41	(27) , 57, 85
Falkenhöheweg 12	stadttheater	(6) , 22	(5) , 20, 21, 38, 39, 65, 72
Französische Kirche, Zeughausgasse	Taubenstrasse/Bundesrain	(25) , 52	(26) , 54
Genfergasse, Wirtschaft zur Traube	Thunplatz, Wasserschloss	(35) , 71	(5) , 20, 21, 38, 39, 65, 72
Gerbergasse 12	Traube Wirtschaft zur, Genfergasse	(29) , 59	(35) , 71
Gübelin, Bahnhofplatz 11	Waisenhausplatz, Polizeihauptwache,	(21) , 45	(19) , 43
Hauptpost am Bollwerk	Waisenhausplatz/Spitalgasse	(11) , 29, 30, 34, 36	(27) , 57, 85
Heiliggeistkirche	Wasserschloss, Thunplatz	(3) , 13, 14, 15	(5) , 20, 21, 38, 39, 65, 72
Hochschulstrasse 6	Zeughausgasse, Evang. Vereinshaus	(22) , 47	(17) , 41
Junkerngasse 47, Erlacherhof	Zeughausgasse, Französische Kirche	(42) , 208	(25) , 52
Käfiggässchen	Kleine Schanze	(33) , 64	
Kirche Peter und Paul, Brunngasshalde	Längassstrasse 25	(37) , 85	
Kirche Peter und Paul, Brunngasshalde	Lorraineschulhaus	(16) , 40, 73, 85	
Käfiggässchen/Marktgasse	Marktgasse/Käfiggässchen	(37) , 85	
Kirche Peter und Paul, Brunngasshalde	Mattheschulhäuser, Schiffbau 3 + 16	(36) , 85, 184-201	

1 PROBLEMSTELLUNG

Beschleunigter Zerfall der Berner Sandsteine durch Luftverschmutzung, in Verbindung mit natürlicher Verwitterung und unsachgemässen Renovationen, stellt Bauämter und Denkmalpflege heute vor Probleme, die es früher in diesem Ausmass nicht gab. Wenn die originale Bausubstanz aus Sandstein erhalten werden soll, müssen geeignete Konservierungsmöglichkeiten zur Verfügung stehen. Eine gezielte Konservierung ist aber nur möglich, wenn bei den Ursachen eingegriffen werden kann. Es ist Aufgabe dieser Arbeit hiefür Grundlagen zu schaffen.

Es geht dabei darum zu erfassen, welche Veränderungen die Berner Sandsteine vom frischen Zustand im Bruch bis zum Zerfall am Bauwerk auf Grund welcher Ursachen und Bedingungen erfahren.

Eine Zusammenstellung der an Bauten, Fassaden und Bauteilen anzutreffenden Verwitterungssituationen und die am Einzelbeispiel zu diskutierenden Ursachen und Sanierungsmöglichkeiten, soll den am Bau Beschäftigten helfen, Entscheidungen zu treffen.

Im weiteren geht es darum, die petrografischen und technischen Eigenschaften der verschiedenen Berner Sandsteine und etwaige Unterschiede zu erarbeiten, da deren Kenntnis eine Voraussetzung für die erfolgreiche Anwendung jeglicher Konservierungsmethoden ist.

2 VERWITTERUNG, VERWITTERUNGSFORMEN UND EXPOSITION

Die Verwitterung eines Bausteins beginnt nicht erst ab dem Moment, in dem dieser fertig eingebaut ist, sondern dann, wenn der Stein in Kontakt mit den Atmosphärieren tritt. So betrachtet zeigen die bläulichen Berner Sandsteine eine unverwitterte Farbe, die gelben dagegen eine Verwitterungsfarbe (Kapitel 4.2). Oder um noch weiter zu gehen; die Berner Sandsteine selber sind ein Verwitterungsprodukt, bestehen sie doch aus dem Schutt der aufgefalteten Alpen (Kapitel 4.1).

Wird aber, wie hier, von der Verwitterung von Bausteinen gesprochen, so wird der Beginn der Verwitterung in der Regel mit dem Zeitpunkt des Einbaus des Werkstücks gleichgesetzt. Wenn also im

folgenden von "unverwitterten" Steinen gesprochen wird, so sind solche frisch ab Steinbruch gemeint.

1.1 BESCHLEUNIGTER ZERFALL DURCH LUFTVERSCHMUTZUNG

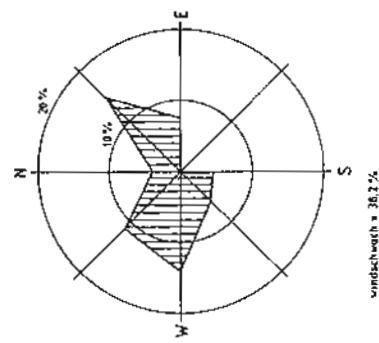
Die in einem Gebäude oder Denkmal eingebauten Steine sind genauso den verschiedensten direkten und indirekten Verwitterungseinflüssen ausgesetzt, wie Steine im Naturaufschluss. Die Ausgesetztheit gegen über diesen Einflüssen wird Exposition genannt (Zehnder, 1982). Zu den Verwitterungseinflüssen gehören zum Beispiel die Eigenschaften der Steine selber, die Art wie die Steine verbaut worden sind, ihre Nachbaumaterialien, der Baugrund und das Regionalklima, um nur einige zu nennen.

Die Eigenschaften der unverwitterten Berner Sandsteine werden im Kapitel 4 ausführlich dargestellt. Einige Fakten zum Berner Regionalklima folgen im nächsten Abschnitt. Andere Verwitterungseinflüsse werden im Situationenkatalog (Kapitel 2.3) anhand von konkreten Beispielen diskutiert.

2.1 VERWITTERUNGSEINFLÜSSE

Die Niederschlags-, Bessonnungs-, Temperatur- und Windverhältnisse in der Region Bern sind den folgenden Publikationen entnommen worden: Maurer et al. (1975), Mathys und Wanner (1975), Maurer (1976), Mathys (1976), Schüepp (1967) sowie Schüepp und Urfer (1970).

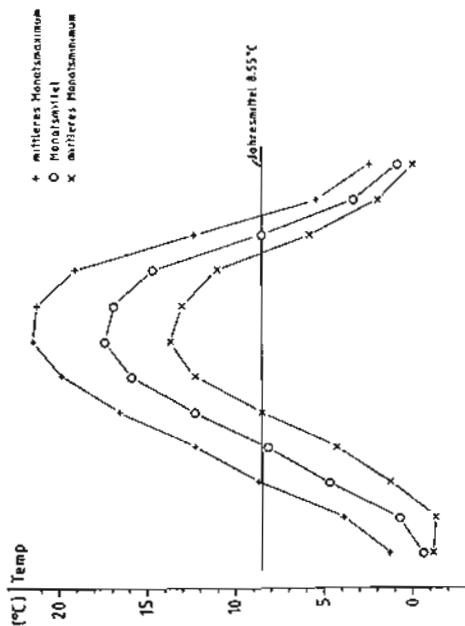
- mittlere Jahresniederschlagsmenge (1901-1970): 1000,34 mm
 - mittlere Anzahl Niederschlagstage:
 Dabei treten die grössten Niederschlagsmengen in den Monaten Juni bis August, die niedrigsten dagegen in den Monaten Januar und Februar auf. Rund 40 % des Niederschlags fallen in Bern an windschwachen Tagen. Die restlichen 60 % Niederschlag sind in Figur 1 als Regenwindrose dargestellt.



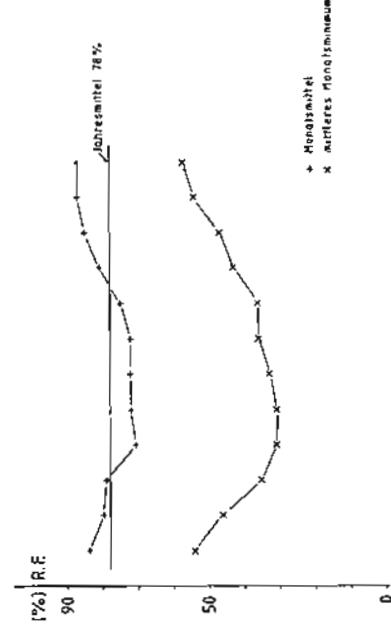
Figur 1: Verteilung der Niederschlagsmengen in Abhängigkeit der Bodenwindrichtung (1.5.73 - 31.10.74), nach Maurer et al. (1975).

Die Hauptregenwindrichtungen in Bern sind NE und W bis NW. Die Stadt Bern weist im Mittel 47 Nebeltage pro Jahr auf, am häufigsten während der Monate Oktober bis Januar.

Die mittlere Jahrestemperatur in Bern beträgt 8.55°C (Figur 2). Die Monatsmittel der Temperaturen betragen im Juli/August 17°C , bei mittleren täglichen Schwankungen von bis zu 9°C und im Dezember/Januar 0°C , bei mittleren Schwankungen von bis zu 3°C . Die mittlere Luftfeuchtigkeit beträgt 78% und kann bis 30% absinken (Figur 2).



J F M A M J J A S O N N O



J F M A M J J A S O N N O

- Figur 2: a) Monatstemperatur für die Stadt Bern, gemessen über die Jahre 1953-1962 nach Schüepp (1967).
 b) Monatswerte der relativen Luftfeuchtigkeiten (R.F.) in der Stadt Bern, für die Jahre 1930-1960 nach Schüepp und Urfer (1970).

Vor allem aus Figur 1 ist ersichtlich, dass die W-Fassaden zu Recht als Wetterfassaden gelten; allerdings darf ein einzelner Faktor nicht isoliert betrachtet werden, und es dürfen keine verallgemeinernden Schlüsse auf alle Wetterfassaden der Stadt gezo-

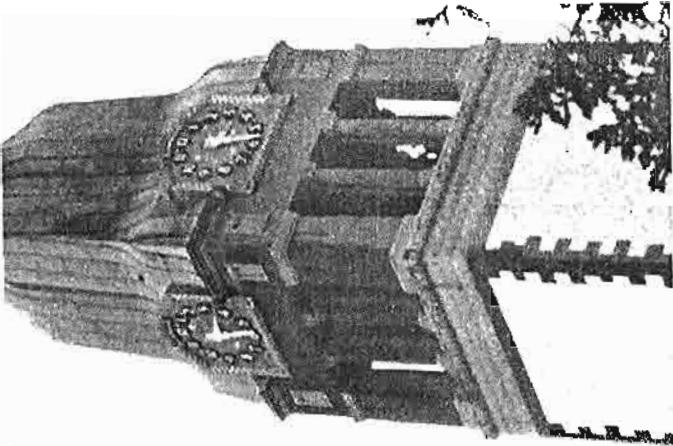
gen werden. Meist sind die Wetterfassaden am Bau für das geübte Auge sofort an ihrem Erscheinungsbild zu erkennen.

Das Klima um ein ganzes Gebäude oder um einen bestimmten Bauteil, werden nicht zuletzt auch durch die Form und Umgebung des Baus bestimmt (Oke, 1978). Windkanalversuche an Modellen zeigen, wie kompliziert diese Zusammenhänge im Einzelfall sind (Delgado Rodrigues und Gil Saraiva, 1985).

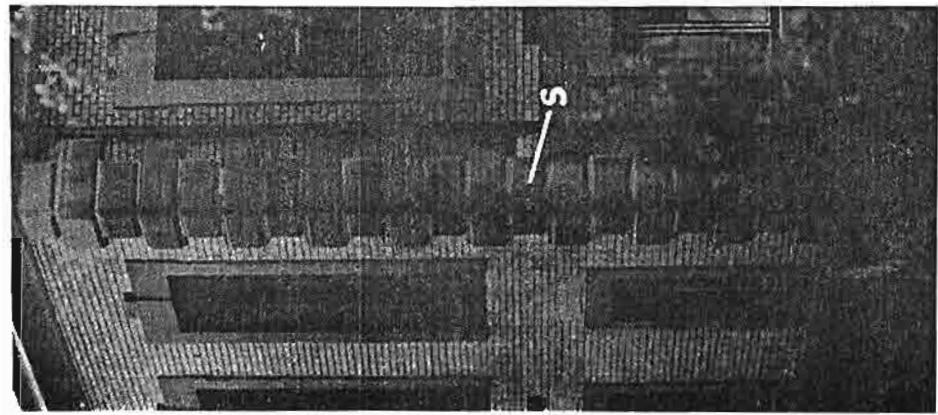
Die zwei folgenden Beispiele von regennassen Fassaden mögen dies etwas erläutern.

Figur 3 zeigt den freistehenden Turm der Pauluskirche am 24.1.86 nach einem kräftigen Regen. Die SW-Fassade ist, wo sie aus Berner Sandstein besteht, deutlich nass (dunkel), die SE-Fassade dagegen blieb mehr oder weniger trocken (hell). Hier zeigt sich also die SW-Seite als wetterseitige, die SE-Seite dagegen als wetterabgewandt. Dass aber sehr lokale Faktoren eine Rolle spielen können, zeigt Figur 4 von der Westecke der Alten Anatomie. Das Bild wurde am 22. April 1986 nach einer Stunde starken Regens aufgenommen. Die abgebildete Ecklisenen war damals erst einige Monate alt. Die ebenfalls auf dem Bild erkennbaren Fensterumrahmungen bestehen aus einem Kunststoff mit Sandbeschichtung.

Die Schutzwirkung des Daches hält die obersten ein bis zwei Steine trocken. Fast im ganzen ersten Stock sind die Steine nass. Weiter unten aber zeigt sich auf der SW-Seite ein senkrechter, etwa 15 cm breiter, trockener Streifen (S).



Figur 3:
Turm der Pauluskirche nach einem starken Regen am 24.1.86 (Erläuterungen im Text).



Figur 4:
Westecke des Anatomischen Instituts (Bühlstrasse 26) nach einer Stunde starken Regens am 22. April 86. Die Entstehung des trockenen Streifens (S) wird im Text beschrieben.

Es gibt folgende Erklärungsmöglichkeit für die Bildung des trockenen Streifens in Figur 4:

In der unteren Hälfte wird der Regenanteil von vorne (d.h. SW) durch einen, im Bild nicht sichtbaren, Baum, abgehalten. Da der Dachablauf das Wasser nicht nur innen, sondern auch an seiner Aussenseite ableitet, werden die Lisenensteinsteine von dort her benetzt. Unklar ist, warum auch die kleineren Quadere ohne Kontakt mit dem Ablaufröhr einen nassen Streifen aufweisen. Es bleibt hier noch anzumerken, dass der trockene Mittelstreifen (s) auch im Winter auftritt, wenn der Baum kein Laub trägt, und somit seine regenabschirmende Wirkung eingeschränkt ist.

Mit diesem Beispiel soll vor allem gezeigt werden, dass die Art der Bewitterung auf kleinstem Raum ändern kann, auch wenn kein unmittelbar zu erkennender Grund dazu vorliegt.

2.2 Verwitterungsformen

Zur Zeit ist eine international vereinheitlichte Terminologie der Verwitterungsformen durch die Gruppe "Petrographie" von ICOMOS/UNESCO in Bearbeitung.

Zehnder (1982) hat seine Verwitterungsterminologie auf den provisorischen Stand der ICOMOS-Terminologie abgestimmt, und er gibt auch eine Korrelation der gebräuchlichen deutschen mit den französischen und englischen Begriffen. In der vorliegenden Arbeit wird deshalb weitgehend Zehnders Terminologie verwendet, allerdings mit einigen Ergänzungen, welche sich durch das besondere Verhalten der Berner Sandsteine aufdrängen; so kommen die beiden Begriffe Aufblähen und Aufflocken bei Zehnder nicht vor.

2.2.1 Terminologie der Verwitterungsformen (ergänzt nach Zehnder, 1982)

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

mit Aufblähungen auftreten (Beispiele in den Figuren A4.1 und A5.1).

Aufblähen (swelling): Das Körnigefüge dehnt sich bis in eine bestimmte Tiefe aus, an Berner Sandsteinen bis 20 cm tief. An vorstehenden Quadern bildet sich dadurch in der Mitte der Außenflächen eine Art Bauch, welcher im fortgeschrittenen Stadium aufplatzt. Aufblähen kann in Schalenbildung übergehen (Beispiele in den Figuren A4.1 und A6.1).

Absanden (granular disaggregation): Zerfall des Gesteins in Einzelkörner oder stark gelockerte Kornaggregate (Beispiel H3.4). 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, Tafonibierung) überleitet (Beispiel in Figur G2.1). Starkes Absanden geht an regengeschützten Stellen oft in Aufflocken über.

Aufflocken (flaking): Die äusserste Sandschicht löst sich in blasenähnlichen Flocken vom Stein ab. Der Durchmesser der Flocken liegt meist zwischen 5 und 10 mm. Manchmal enthalten die Flocken etwas Gips. Aufflocken kann als Zwischenstufe von starkem Absanden und Abblättern betrachtet werden (Beispiel in Figur C1.1).

Abblättern (exfoliation, peeling): Oberflächenparallele, weniger als 1 mm bis gegen 3 mm dicke Gesteinsschichten (Blätter) lösen sich einzeln, oder locker zusammenhängend, von der Unterlage ab. Am Berner Sandstein sind diese Blätter meist so fragil, dass sie beim Berühren sofort zerfallen (Beispiel in Figur H3.3).

Aufblättern (disintegration along bedding and cleavage planes): Absonderung in mm- bis cm-dicke Lagen (Blätter, Platten) parallel zur Schichtung oder Schieferung (Beispiel in Figur H7.1).

Abbröckeln (spalling): Zerfall in kompakte, mehr oder weniger isometrische Gesteinstrümmer (Beispiel in Figur A4.1).

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

Kruste (crust formation): Oberflächliche Anlagerung einer kompakten Schicht, deren Substanz vom darunterliegenden Gestein verschieden ist. In städtischer Umgebung sind diese Krusten durch die Einlagerung von Staubpartikeln oft schwarz, in Naturaufschlüssen können sie jedoch auch hell sein. Bei den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Krusten, handelt es sich zum grössten Teil um Gipskrusten (Beispiel in Figur B1.1).

Ausblühung (efflorescence): Lockere kristalline Aggregate leicht-löslicher Salze (inklusive Gips) auf der Gesteinsoberfläche (Effloreszenz) oder unmittelbar darunter (Subflorenz). (Beispiele in Figur H3.3)

Verfärbung: Veränderung des Farbtones, der Farbintensität oder des Glanzes (Beispiel H4.1).

2.3 Schadensituationen an Bauten

Eine Schadensituation ist die Kombination bestimmter architektonischer Elemente mit den zugehörigen Verwitterungsformen.

Mit der folgenden Zusammenstellung der in Bern angetroffenen Schadensituationen soll versucht werden, das vollständige Spektrum der möglichen Veränderungen an Berner Sandsteinen zu erfassen und darzustellen, und nicht bloss die grossen, teuren Verwitterungsschäden.

Der nachfolgende Katalog von Verwitterungssituationen wird nach den verschiedenen Verwitterungsbereichen an Gebäuden geordnet (Tabelle 1). Die Unterteilungen in dieser Tabelle erfolgen wie bei Zehnder (1982), wobei noch einige zusätzliche Bereiche abgetrennt wurden. Die in der untersten Kolonne der Tabelle 1 angeführten Verwitter-

rungsformen beziehen sich ausschliesslich auf Berner Sandsteine.

Zudem handelt es sich um Verwitterungsscheinungen, welche auftreten können, aber nicht müssen. Wo mehrere Formen aufgeführt sind, können sie kombiniert, aber auch einzeln auftreten, und manche der Formen schliessen sich in der Regel sogar aus, wie zum Beispiel Bewuchs und Salzausblühungen. Die Figurenbezeichnungen im Katalog beziehen sich auf die Nummerierung der Verwitterungsbereiche in Tabelle 1.

Die generelle Legende zum Katalog findet sich auch als Laufzettel, ganz hinten in dieser Arbeit.
Am Schluss des Katalogs sind noch Beispiele von Situationen angeschlossen, die nicht mehr einem einzelnen Bereich zugeordnet werden können (Figurenbezeichnungen S...).

Als Grundlage für den Situationenkatalog dienten Detailaufnahmen

der Schäden an folgenden Bauten:

- W-Fassade Loraineschulhaus
- SW- und Teile der NW-Fassade des Anatomischen Instituts an der Bühlstrasse
- Wasserschloss am Thunplatz
- Teile der W-Fassade des Munsters
- Schossbaldenfriedhof-Mauer
- N-Fassade des Warenhauses ABM an der Spitalgasse
- Bärengraben
- Sockelmauer Rapenthalstrasse 78
- Stützmauer beim Nydegggerhof
- Münsterplattform-Stützmauer

Diese umfassenderen Untersuchungen wurden ergänzt durch viele Einzelbeobachtungen in der ganzen Stadt Bern.
Es wurde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, die Sanierungs möglichkeiten für alle darin beschriebenen Schadensituationen im Detail zu diskutieren. Deshalb werden solche Sanierungs möglichkeiten nur angedeutet. Im konkreten Fall müssen sie aber mit der Denkmalpflege, der Bauleitung und der Unternehmung diskutiert werden, um die optimale Lösung zu finden.

Tabelle 1: Verwitterungsbereiche an Gebäuden aus Berner Sandstein
 Die Einteilung der Bereiche wurde von Zehnder, 1982
 übernommen und erweitert.

A Stark beregnete r Bereich	B Schwach beregnete r Bereich	C Übergangs- bereich beregnet / regengeschützt	D Regen- geschützt	E Bereiche mit Oberflächlichem Sickerwasser	F Bereiche mit durchsetzendem Wasser	G Grundfeuchte- bereich	H Verschiedene Bereiche
Exposition der direkten Regen aussersetzt	den Sprüh- und Niesel- regen ausgesetzt	bleibt bei Normalregen rel. trocken		durch oberflächlich abfließendes Wasser betreut oder betreut	infolge durchdrückenden Wassers langzeitig stark durchfeuchtet	Bereiche die durch von unten einfliegendes Wasser langzeitig stark durchfeuchtet sind	1) Außenmauern von Feuchtrezeugen 2) Tiere + Pflanzen Mikro- und Makro-organismen 3) Kontakt mit anderen Materialien 4) besonders stark verschachteter Luft ausgesetzte Teile 5) Frost 6) Wind 7) falsch verarbeitete Steine 8) Stahl, WC-Anlagen 9) Statik
Stellen am Bauwerk	1) Burgtürme, Fensterbänke 2) Dächer, Bach- figuren, Balkone 3) freistehende Gartentürme 4) Bauteile direkt oberhalb vorspringender Teile 5) Mauerflächen an Wetterfassaden 6) Lisenen an Wetterfassaden 7) Reliefs an Wetterfassaden	1) aufgehängtes Kettwerk an Wetterfassaden im Grenzbereich beregnungs geschützt 2) Bauteile direkt oberhalb vorspringender Teile 3) Mauerflächen an Wetterfassaden 4) Lisenen an Wetterfassaden 5) Reliefs an Wetterfassaden	1) Orte die durch Bachvorsprünge oder andere vorstehende Teile geschützt sind 2) Reliefs an Wetterfassaden 3) Fassadengrund fläche geschützt (Laubenh.)	1) Säse unter Blattgefäßen 2) leite Dachrinnen und Ablaufröhre 3) Bereiche unterhalb Leucht- und anderen Reliefs oder ähnliches 4) Sickerwasserstellen an Ecken, Kanten und Fugen von vorspringenden Teilen	1) Unterseite vorspringender Stein teile 2) Kauerteile im Bereich von stagnierendem Wasser 3) Nähe von feuchten Materialien 4: Führtrich 5) Frost 6) Wind 7) falsch verarbeitete Steine 8) Stahl, WC-Anlagen 9) Statik	1) Mauersteile nahe in direktem Kontakt zur Grundfeuchte stehen 2) Stuetzmauern	1) Aussennägern von Feuchtrezeugen 2) Tiere + Pflanzen Mikro- und Makro-organismen 3) Kontakt mit anderen Materialien 4) besonders stark verschachteter Luft ausgesetzte Teile 5) Frost 6) Wind 7) falsch verarbeitete Steine 8) Stahl, WC-Anlagen 9) Statik
Verritterungsergebnisse - schaiben an Berner Sandsteinen (die Nummern 3) beziehen sich auf die Stellen am Bauwerk, wie oben)				1) Krusten, Brocken, Aufblättern 2) Schalen 3) Bewuchs 4) Blasen, die Schalen, Sanden 5) Sanden, Schalen, Blasen 6) Blasen, Schalen 7) Algen, Flechten, Sanden, Salze, Schalen, Krusten	1) Krusten, Flocken 2) Krusten, Sanden 3) Krusten, Sanden 4) Krusten, Flocken 5) Krusten, Sanden 6) Krusten, Sanden 7) Krusten, Abblättern 8) Krusten, Sanden 9) Krusten	1) Flocken, Krus ten, Sanden 2) Schalen, Abblättern, Krusten 3) Krusten, Sanden, Bewuchs 4) Krusten, Sanden, Abblättern, Krusten 5) Krusten, Sanden 6) Krusten, Sanden 7) Krusten, Abblättern 8) Krusten, Sanden 9) Krusten	1) Blättern, Flocken, Sanden, Abblättern, Flöz-krusten, Locher, Bewuchs 2) Risse, Krusten, Bewuchs 3) Risse, Verfärbungen, Salze, Sanden, Schalen 4) Verfärbungen 5) Schalen, Risse 6) Sanden 7) Aufblättern 8) Salze, Sanden 9) Risse

Legende

<u>Ansicht</u>	<u>Schnitt</u>
Absanden stark	
Absanden schwach	
Flocken	
Schale	
Abblättern	
Aufblättern	
Aufblähen	
Abbröckeln	
Ausschlüpfungen	
Krusten	
Algen, Flechten, Moos	
Risse	
Löcher	
aufgelockerte Zone hinter Schale oder Blähung	
Mörtelflick	
Vierung	
Fuge	
ursprüngliche Oberfläche	
Steinersatz	E
Verfärbung	F
Wasserläufe	G

Diese Legende findet sich auch als Einlageblatt im Anhang

Sockelgesimse (Al.1 und Al.2)

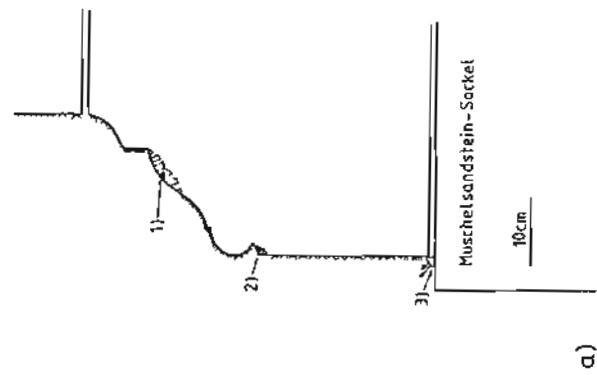
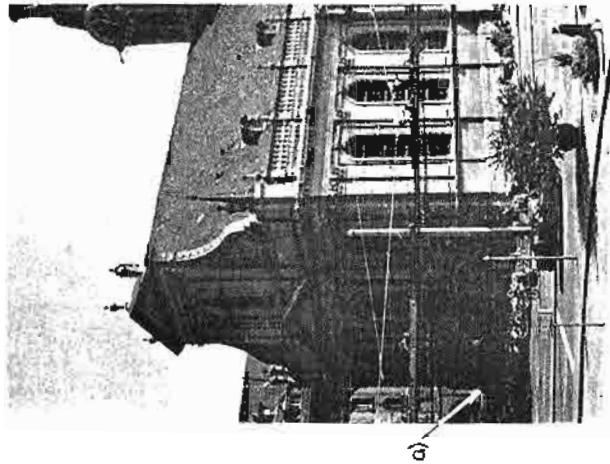


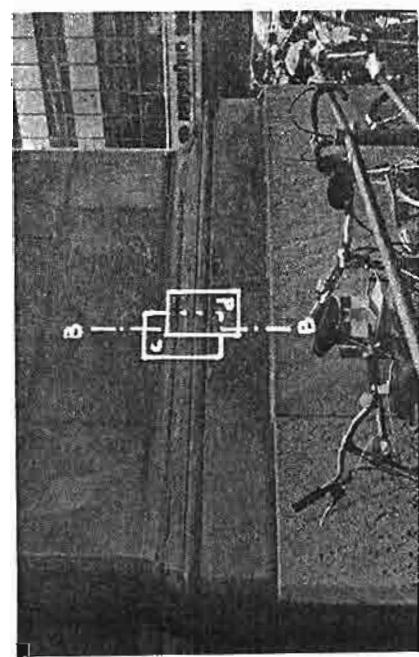
Figure Al.1: Schnitt durch das Sockelgesims der N-Passade der Heiliggeistkirche. (Letzte Außenrenovation 1952-62; Furrer, 1985)

- 1) Verwitterungsform zwischen Schale und Aufblättern im Karniesbogen
- 2) Kantschale
- 3) Moospölsterchen

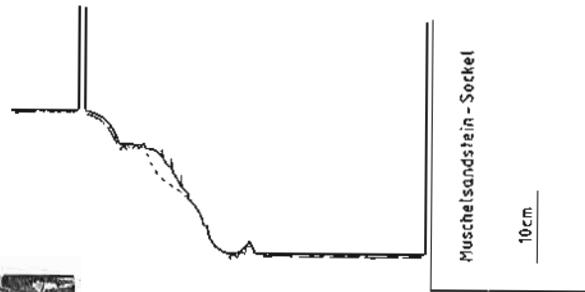
In den stark betroffenen Partien, wo das Wasser oberflächlich abfließt, ist der Stein dunkel durch Organismenbewuchs.

Am Übergang Berner- zu Muschelkalkstein staute sich das Regenwasser, so dass dort ein Moospölsterchen wächst.

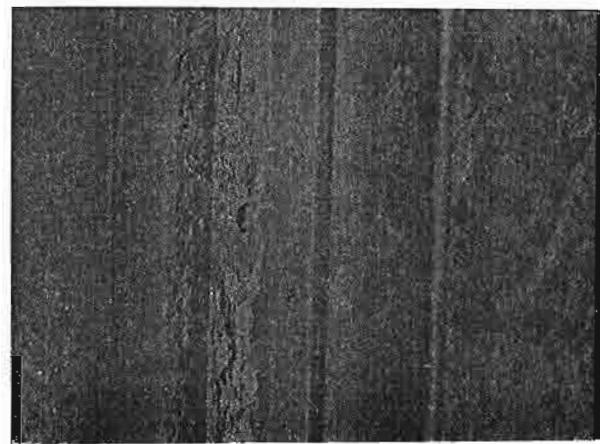
An der Unterseite des Wulstes und an den senkrechten Flächen flockt der Sandstein auf. Diese Orte sind nicht dem direkten Regen ausgesetzt und würden für sich genommen in die Bereiche F1 resp. Bl gehören.



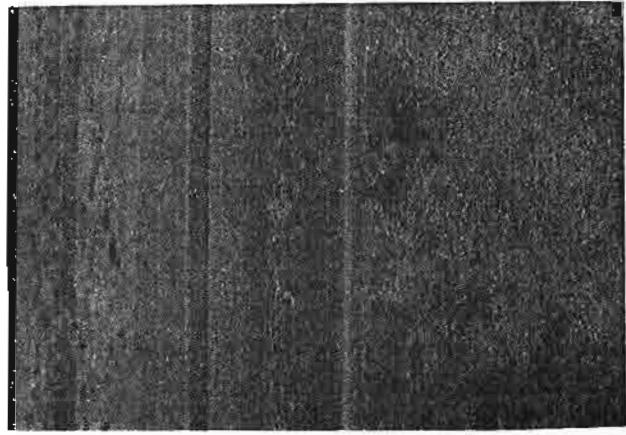
Schadensursache betrachtet werden. Die Feuchtigkeit die so regelmässig in den Stein eindringt, kann gefrieren oder sie kann Salze enthalten welche Schäden verursachen. Die Sanierung solcher Situationen ist nicht einfach. Um des Schadenfortschritts zu verzögern, kann der Stein aufmodelliert und gefestigt werden. Eine wasserabweisende Massnahme wäre zu überlegen. Ein gänzliches Belassen der gelockerte Oberflächenschicht ein immer tieferes Eindringen der Feuchtigkeit erlaubt.



b)



c)



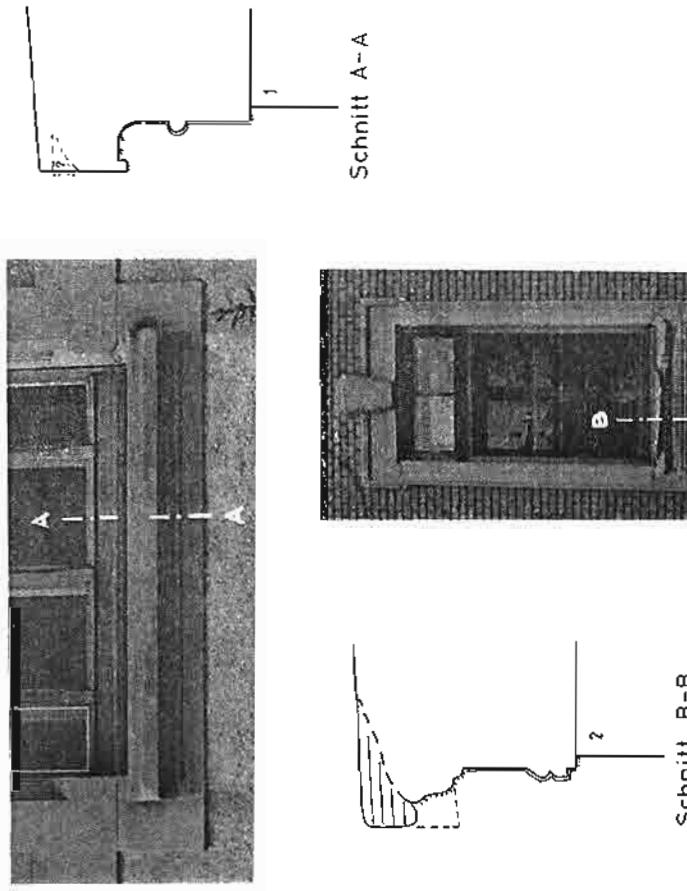
d)

Figur A1.2: Sockelgesimse der Heiliggeistkirche, E-Fassade.
(Figuren c und d auf der folgenden Seite)

Im Gegensatz zur Nordseite (Figur A1.1) ist hier die Schale bis Aufblätterung im Kernesbogen bereits abgefallen. Zudem sind die Steine kaum bewachsen und an den senkrechten Teilen treten Gipskrusten auf.

Sanierungsmöglichkeiten: Die direkte Benetzung des vorspringenden Sockelgesimses, durch Regen und Schnee, kann hier als hauptsächliche

Fensterbänke (Al.3 und Al.4)

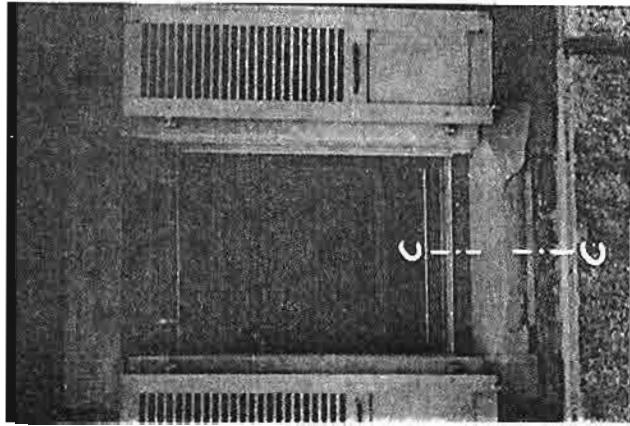


Figur Al.3: Fensterbänke an wetterabgewendeten Fassaden

- a) Muesmattschulhaus, SE-Fassade, Parterre
- b) Anatomisches Institut, Bühlstrasse 26, SE-Fassade, 1. OG, (heute renoviert)

1) verputztes Mauerwerk, 2) Sichtbacksteinmauerwerk

Selbst an wetterabgewendeten Fassaden gehören Fensterbänke zum stark betroffenen Bereich, wenn sie nicht durch Dachvorsprünge oder ähnliches vor Regen geschützt sind. Sie blättern dann meist auf und an ihrer Unterseite bilden sich Salzkrusten.
In a) könnte mit der Zeit ein ähnlicher Schaden wie in b) entstehen.

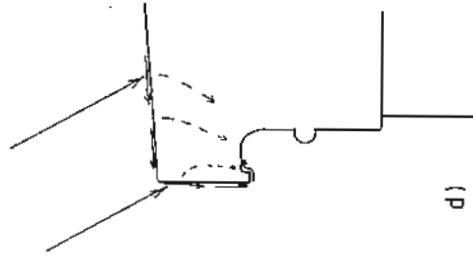
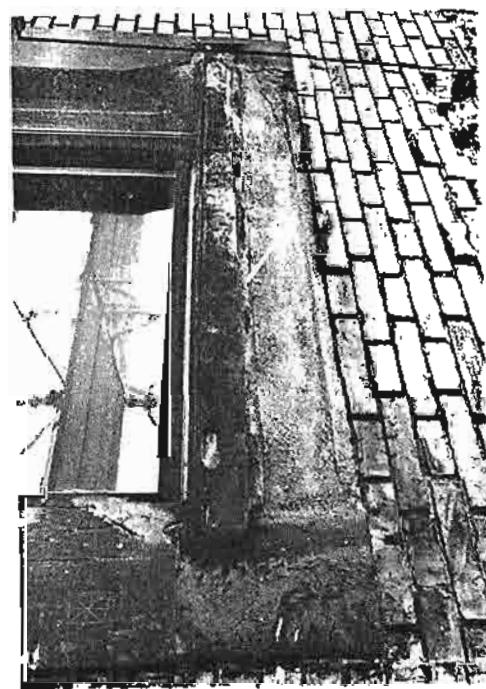


Figur Al.4: Fensterbänke an Wetterfassaden des Anatomischen Instituts, Bühlstrasse 26, (heute alle renoviert)

- a) SW-Fassade, 1.OG (siehe folgende Seite)
- b) NW-Fassade, 1.OG (siehe folgende Seite)
- c) NW-Fassade, Parterre
- d) Erklärungsskizze

E_P = Epsomit; G_i = Gips;

Der an den Stirn- und Oberseiten auftretende Organismenbewuchs ist an fein profilierten Fensterbänken an Wetterfassaden (a,b) häufig. An den Bankunterseiten blühen Salze aus. An senkrechten, geschützten Partien bilden sich dunkle Krusten oder der Stein sandet stark ab und es treten Salzausblühungen auf. Seitlich der Fensterbänke können Sickerstellen auftreten (s. a. unter E4). Wenig gegliederte Fensterbänke (c) zeigen in solcher Exposition oft Schalenbildung.

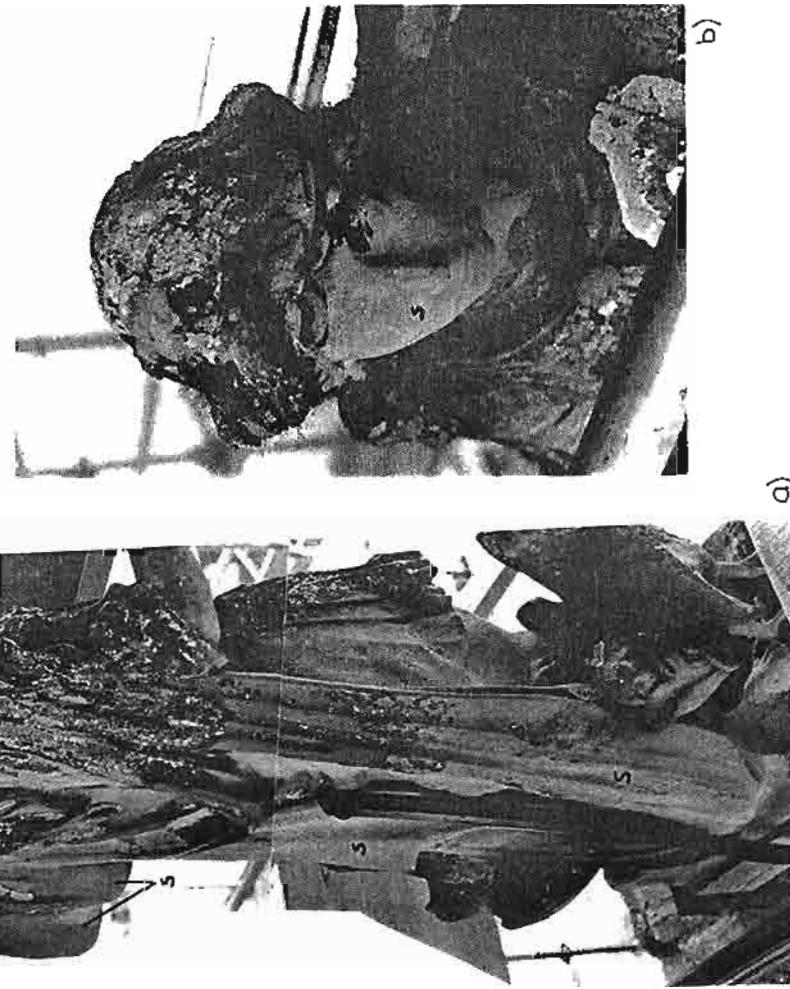


Das auf die Fensterbank auftreffende Regenwasser wird zu einem Teil vom Stein aufgesogen und zum andern Teil fliesst es oberflächlich ab. Vor allem wenn nur wenig Wasser abrintt, funktionieren die Tropfnasen nicht mehr, und an der Stelle wo die letzten Tröpfchen Wassers verdunsten treten Salzausblühungen auf und/oder es entsteht eine verdickte Gipskruste. Das tiefer in den Stein eingesogene Wasser kann irgendwo wieder an die Oberfläche kommen, verdunsten und die mitgebrachten Salze als Ausblühungen hinterlassen. An der Bankober- und Stirnseite werden solche Salze bereits beim nächsten Regen wieder weggewaschen; deshalb können Salzausblühungen in der Regel nur an den Unterseiten beobachtet werden. Weiter kann sich auf Fensterbänken Schnee ablagern, Schmelzwasser kann in die Steine eindringen und Frostspaltung verursachen.

Zur Sanierung von Fensterbänken kann die Ansicht vertreten werden, dass es sich bei diesem Bauteil um einen Verschleisteil handelt, der demzufolge in regelmässigen Abständen ersetzt werden muss. Es kann aber auch versucht werden den, Schadensfortschritt durch geeignete Massnahmen zu verzögern. Dies kann, wo dies möglich ist, durch eine Abdeckvorrichtung geschehen. Auch in dieser Situation gibt es kein Patentrezept und die Massnahmen müssen dem Einzelfall angepasst werden.

Sanierungsmöglichkeiten: Fensterbänke gehören zu den am meisten ausgesetzten Teilen eines Gebäudes. Dies soll anhand der Skizze d) erläutert werden:

freistehende Plastik



Figur A2.1: Minerva-Statue auf dem Wasserschloss am Thunplatz
(heute renoviert)

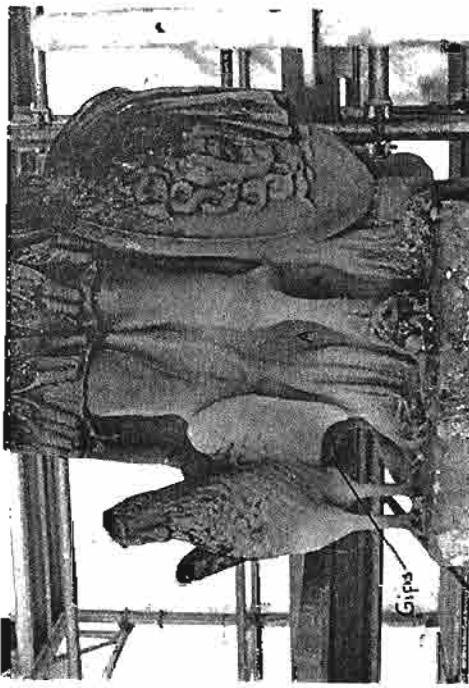
- a) Rückansicht von Osten her
- b) Detail des Kopfes von vorne (Westen)
- c) Detail der Beine mit Hahn von vorne (siehe folgende Seite)

Das Original der Minerva-Statue, von J.F. Funk 1773 geschaffen, befindet sich im Schloss Jegenstorf (de Quervain, 1984). Die hier

abgebildete Minerva wurde 1939 vom Steinbildhauer Etienne Perincioli geschaffen (Hofer, 1947, Seite 331).

Dachfiguren sind oft sehr feingegliedert und weisen dadurch auf kleinstem Raum alle möglichen Expositionen von stark bereget bis regengeschützt auf. Da sie aber eine künstlerische Einheit bilden, sollen sie auch hier als Ganzes betrachtet werden.
So ist die Minerva überall, wo sie dem direkten Regen ausgesetzt ist, dunkel durch Bewuchs. Die Grenze zu den schwach beregeten Teilen ist deutlich durch diese Bewuchsgrenze gekennzeichnet. In den Übergangszenen zu den regengeschützten Teilen sandet der Sandstein oberflächlich stark ab (s.).

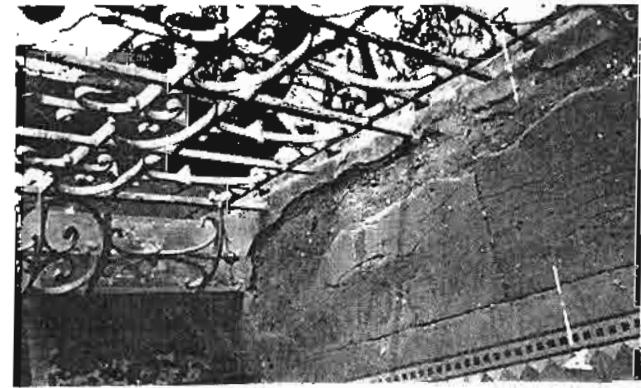
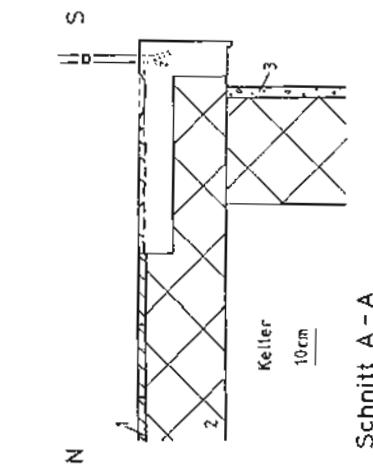
An den Beinen, welche etwas vor Regen geschützt sind, tritt Alveolarverwitterung (A) auf, welche vermutlich durch periodisches Ausblühen von Salzen hervorgerufen wird. Unter dem linken Flügel des Hahns fanden sich Gipsausblühungen.



Sanierungsmöglichkeiten: Es ist zu erwarten, dass vor allem in der Beinpartie der Minerva noch lösliche Salze im Stein vorhanden sind. Der Vorgang des Aufkonzentrierens der Salze dürfte an dieser leicht regengeschützten Stelle analog zu demjenigen in Figur A3.2 ablaufen. Beim Entscheid über Sanierungsmaßnahmen muss die Möglichkeit vorhandener Salze mitberücksichtigt werden.

Veranda

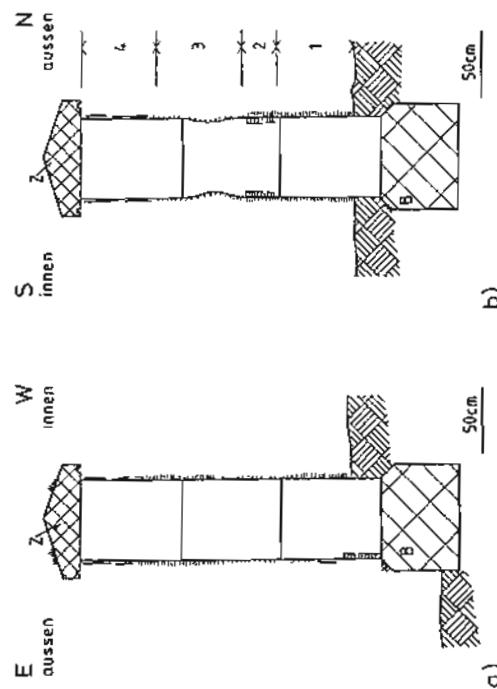
Freistehende Mauern



Figur A2.2: Veranda, Falkenhöhenweg 12, (heute renoviert) (Schnitt A-A zusammengestellt mit Hilfe von Architekt M. Saurer)

- 1) Plättliboden; 2) Stampfbeton; 3) Verputz

Die obersten ein bis zwei cm des Abschlussteins blättern auf, und diese Blätter reissen der Länge nach auf. Es handelt sich also um eine Verwitterungsform zwischen Aufblättern und Abröckeln. Sanierungsmöglichkeiten: In dieser Situation wurde ausgerechnet das schwächste Glied (Sandsteinabschluss) am exponiertesten Ort eingesetzt. Zudem vertragen sich Sandstein und Beton nicht, weshalb hier ein Ersatz mit einem geeigneteren Material angebracht ist.



Figur A3.1: N- und E-Mauer des Schlosshaldenfriedhofs

- a) Schnitt durch die Mauer beim NE-Eingang
 - b) Schnitt durch den östlichen Teil der N-Mauer
 - c) Ansicht der N-Mauer von aussen her, etwa 20 m vom Haupteingang (siehe folgende Seite)
- Z = zementgebundener Kunstsstein; B = Betonfundament; innen= Friedhofseite; aussen=Strassenseite;

Wenn die Mauer in direktem Kontakt zum Erdreich steht, kann ein Grundfeuchtetransport in und durch die Mauer stattfinden. In a) wo die Mauer nur innen im Kontakt mit dem Erdreich steht, hat sich auf der Aussenseite eine Schale gebildet. Als Ursache kann ein horizontaler Grundfeuchtetransport angenommen werden. Wenn die Sandsteine, wie in b), beidseitig in direktem Kontakt mit der Grundfeuchte stehen, so findet vor allem ein Feuchtetransport von unten nach oben statt. Ab einer bestimmten Höhe wird die Wirkung der Grundfeuchte durch den Einfluss von ablaufendem Regen- oder Schmelzwasser abgelöst und/oder überlagert.

- In b) und c) können vier Bereiche unterschieden werden:
- 1) Mauer stark bewachsen, sie wirkt oberflächlich trocken;
 - 2) 1-2 cm dicke Schalen mit etwas Organismenbewuchs, sie wirkt oberflächlich nass;
 - 3) starkes, nach oben schwächer werdendes Absanden;
 - 4) Dunkle, zum Teil abfallende Gipkrusten.

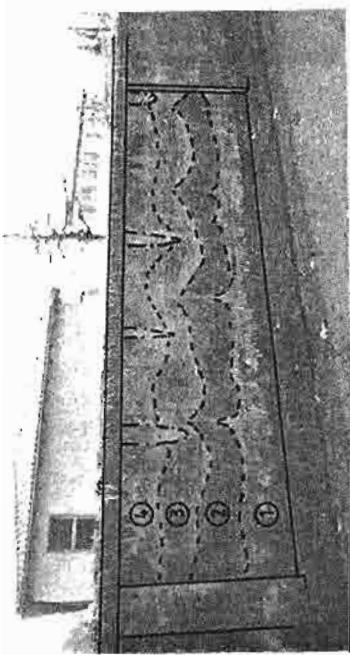
In diesem Bereich treten sandnde Wasserläufe unterhalb von Fugen oder Fehlstellen in den Abdeckplatten auf.

An den vertikalen Fugen in c) sind die Grenzen zwischen den vier Bereichen etwas nach oben verschoben, was auf ein anderes Wasser-transport-Verhalten des Fugenmörtels gegenüber demjenigen des Sandsteins hindeutet.

Zwischen Magazin und Pförtnerhaus reicht das Fundament wieder über das Bodenniveau hinauf. Etwa 15 m vom Magazin entfernt fanden sich die einzigen frischen Salzausblühungen der ganzen N-Mauer. Auf einem Quader der untersten Reihe wurden am 8.4.86 Thenardit (Na_2SO_4), etwas Gips und Nitrat nachgewiesen.

scheinungen (mündliche Mitteilung Dr. A. Arnold).

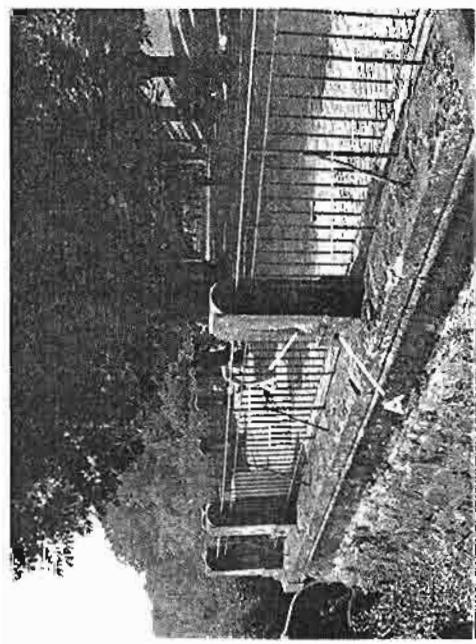
Hier kann eine Verzögerung des Schadensfortschritts erreicht werden durch Instandsetzen der Abdeckplatten und Fugen und durch Absenken des Erdreichs auf das Niveau der Fundamente. Weitergehende Massnahmen (zum Beispiel Entfeuchten der Mauer) wären zwar möglich, aber kaum verhältnismässig.



Hauptgründe für die Verwitterungsscheinungen sind der direkte Kontakt zum Erdreich, defekte Abdeckplatten und offene Fugen. Das entspricht einer Überlagerung einer Grundfeuchtesituation (siehe Figur Gl.1) mit der Situation einer Mauer mit vorstehender Abdeckplatte. Solche Expositionen führen auch an Mauern aus andern Sandsteinen zu einer vergleichbaren Zonierung der Verwitterungser-

Freistehende Geländerpfosten

Surte und darüberliegende Anschlusssteine (A4.1 bis A4.3)

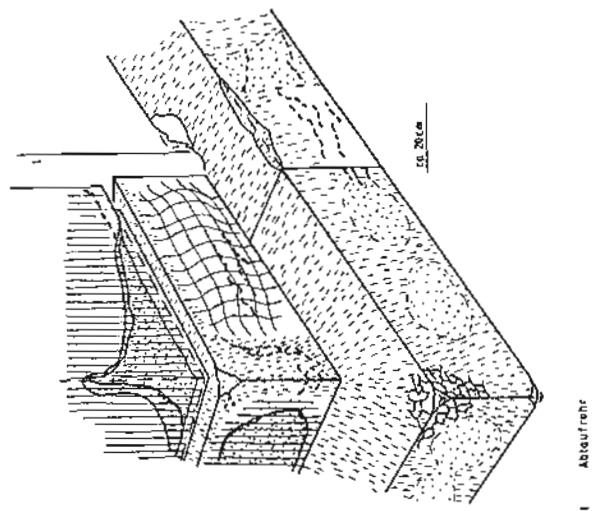


Figur A3.2: Geländerpfosten auf der Kleinen Schanze, SE-Ecke

In den Flächenmittten der Pfosten und der Pfostenbasen treten bis zu 5 cm tiefe Löcher durch Alveolarverwitterung (A) auf, welche vor allem auf der E-Seite stark ausgebildet sind. Die andern Teile der Pfosten sind mehr oder weniger stark mit Organismen bewachsen.

Diese Situation ist mit A2.1 c) vergleichbar, indem auch hier leicht regengeschützte Partien viel stärker verwittern als dem Regen direkt ausgesetzte Teile. Die nicht direkt beregneten Stellen können entweder durch über sie ablaufendes Wasser oder durch kapillar aus andern Teilen aufgenommene Feuchtigkeit nass werden. Beim Trocknen werden die Flächenmittten zuletzt trocken, so dass im Wasser gelöste Salze hier auskristallisieren.

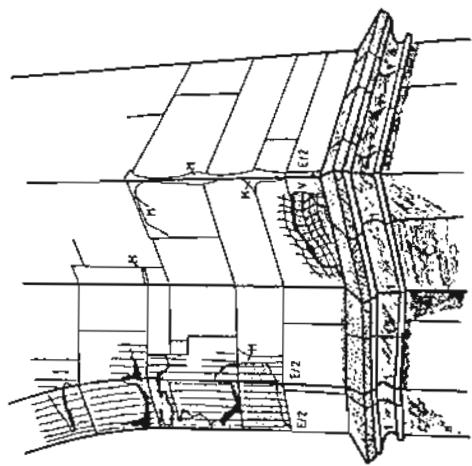
Sanierungsmöglichkeiten: Am besten wird die Situation so belassen wie sie ist, da kein sehr rasches Fortschreiten der Verwitterung zu erwarten ist. Eventuell kann ein Drehen der Pfosten in Betracht gezogen werden.



Figur A4.1: Ansicht des Gurtsteins an der SW-Ecke im 2. OG des Loraineschulhauses (heute renoviert)

Der Stein direkt oberhalb des Gurtes zeigt an der S-Fassade ein deutliches Blähnen, und an der W-Fassade ist unter einer abgefallenen Schale eine stark sandnde Zone zu erkennen.

Etwas weniger stark beregnete Stellen am Gurt (Stirnseiten) sandnen ab, stärker beregnete Teile sind von Organismen bewachsen und Ecken bröckeln ab. (zu den Schäden an der Gurtstirn direkt vor dem Ablaufröhr s. Figur E2.1)



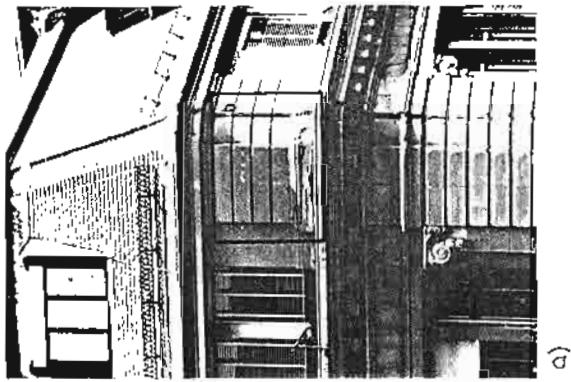
Figur A4.2: Rechter Pfeiler des südlichen Seitenportals an der W-Fassade des Münsters (Haupteingang)

Deutlich geschichteter Berner Sandstein

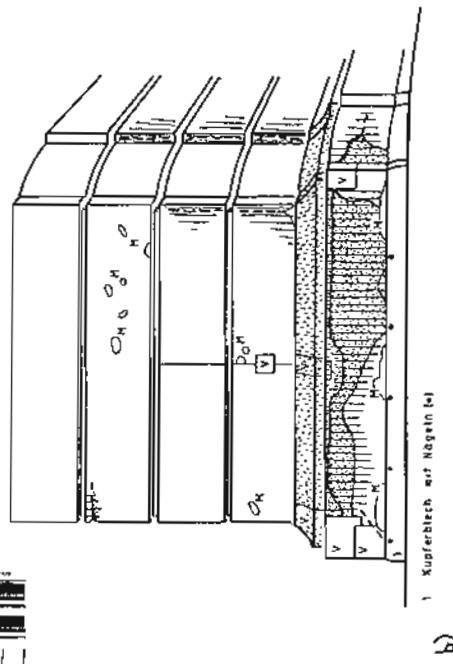
Ersatzsteine aus Berner Sandstein ohne makroskopisch sichtbare Sedimentstrukturen

Oberkirchner Quarzsandstein

Die Steine oberhalb des Kranzes sind zum grössten Teil ersetzt worden. Wo noch der ursprüngliche Stein vorhanden ist zeigt er eine Aufblähung. Die Steine im Torbogen weisen dünne Schalen auf.



a)



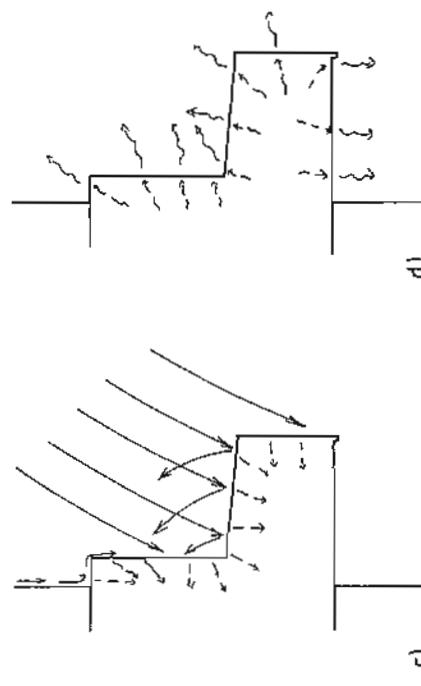
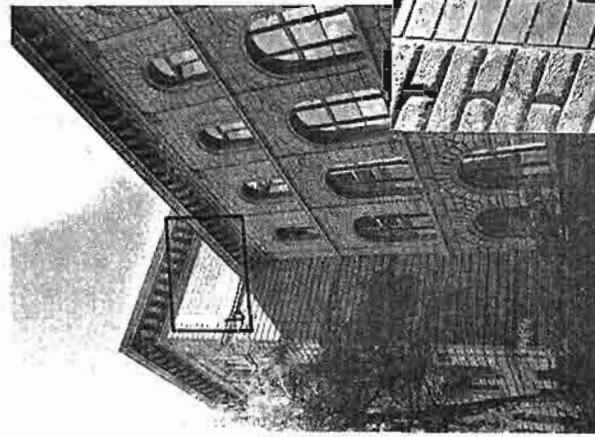
b)

Figur A4.3: Übersichtsfoto (a) und Schadenskizze (b) der südlichen Eckklisene der W-Fassade im 3.OG der Hauptpost am Bollwerk, Erklärungsskizzzen c) und d) siehe folgende Seite.

Am Anschluss Kupferblech zu Sandstein finden sich viele Mörtelflicke, und von einem Nagel aus zieht ein Riss durch den Sandstein. Der unterste Stein zeigt eine starke Schalenbildung auf der ganzen Breite. An den südlichen Kanten der nächst oberen Steine beginnen sich Schalen zu bilden. Der zweitoberste Lisenenstein zeigt auf der

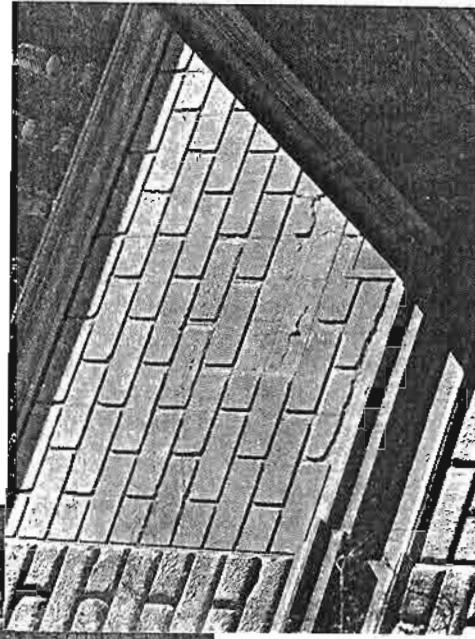
nördlichen Seite eine Kantenschale. Die zahlreichen Mörtelflicke in diesem Stein könnten auf herausgewitterte Mergelschmitzen (Lebern) hindeuten.

Mauerfläche an Wetterfassade (A5.1 und A5.2)



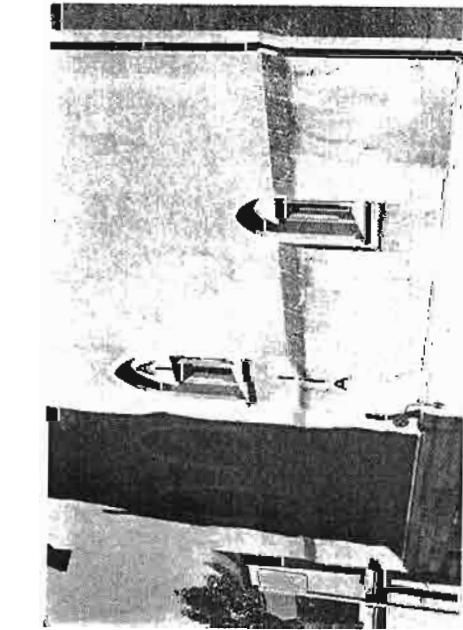
Sanierungsmöglichkeiten: Steine direkt oberhalb vorspringender Teile gehören zu den am stärksten ausgesetzten Bauteilen überhaupt, da sie der Fassade entlang ablaufendes und zudem auch zurückspülendes Regenwasser aufnehmen (c). Bei der Austrocknung wird ein grosser Teil des Wassers wieder durch die Oberfläche dieser Steine verdunsten (d). Ein wirksamer Schutz solcher Steine müsste das Eindringen des Wasser von allen Seiten verhindern. Es ist nicht möglich eine für jeden Einzelfall richtige Sanierungsmöglichkeit anzugeben.

An durch das Dach nicht geschützten Quadern bilden sich Schalen, welche sich in der Tiefe der Fugen der Fugen vom Stein lösen. Diese Schalenbildung ist vor allem in der Nähe des unteren Dachs ausgeprägt. Vielleicht wird sie beschleunigt durch besondere Temperaturverhältnisse (Rückstrahlung vom Dach?).



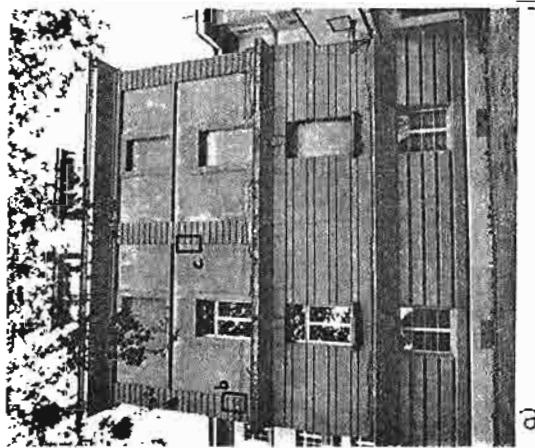
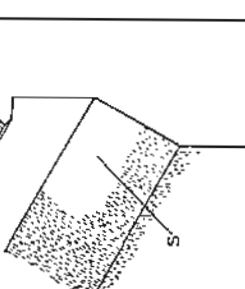
Figur A5.1: Bundeshaus Ostflügel, W-Fassade des zentralen Gebäude- teils

An durch das Dach nicht geschützten Quadern bilden sich Schalen, welche sich in der Tiefe der Fugen der Fugen vom Stein lösen. Diese Schalenbildung ist vor allem in der Nähe des unteren Dachs ausgeprägt. Vielleicht wird sie beschleunigt durch besondere Temperaturverhältnisse (Rückstrahlung vom Dach?).



Figur A5.2: Rathaus, Westfassade
Die etwas vorstehenden Flächen dieser Fassade sind mit Organismen bewachsen. Unterhalb der Fensterbänke fehlt dieser Bewuchs, und es bildet sich ein Negativschatten (S) an denjenigen Stellen, die bei Regen meistens trocken bleiben.
Sanierungsmöglichkeiten: Da der Bewuchs in diesem Fall kaum nennenswerte Schäden verursacht, sind auch keine Massnahmen nötig.

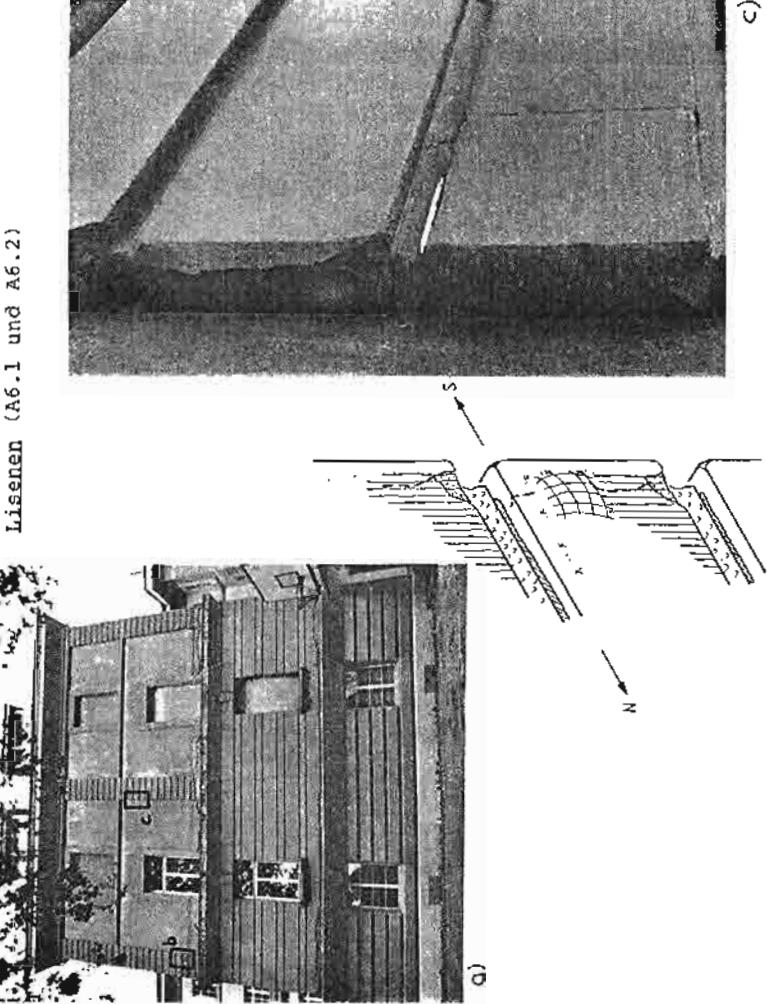
Schnitt A-A



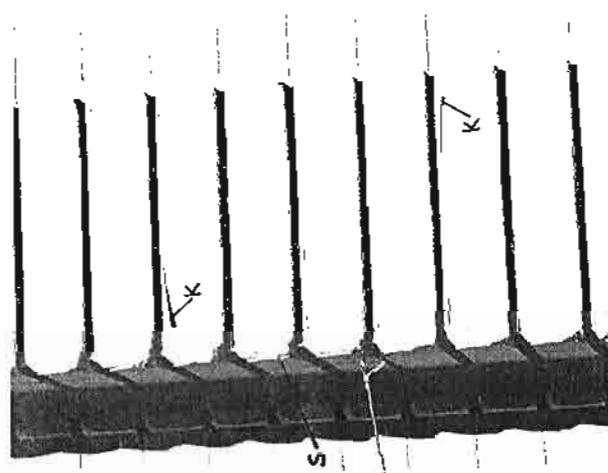
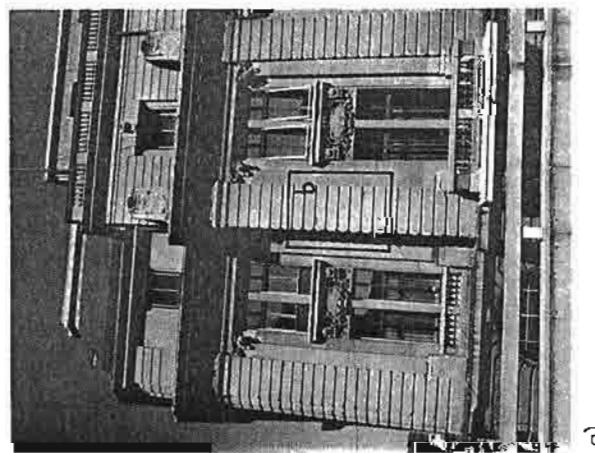
Figur A6.1: Lisenen W-Fassade Loraineschulhaus, 2. OG

An dieser Fassade hat die Stadt Bern Versuchsfelder ausführen lassen, um die verschiedenen Renovationsmaterialien zu testen. Die Situation b) wurde dabei renoviert, dagegen blieb c) unverändert.

- Das Zentrum des Lisenenstein ist aufgeblättert. Diese Blähung geht in eine Schale über, welche zum Teil bereits abgefallen ist. Den Rand der Blähung bildet eine helle Zone in der viel feinster Staub abgelagert ist und in der auch Salzausblühungen vorkommen. Die Kanten des Steins sind dunkel und sehr kompakt.
- An den Lisenensteinen bilden sich 1-2 cm tiefe Schalen, welche seitlich aufplatzen.

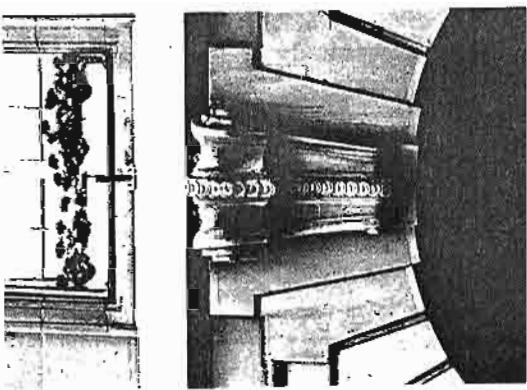


a)
b)
c)



Figur A6.2: Lisenen an der SW-Ecke der Hauptpost am Bollwerk
An den W-Seiten bilden sich 0,5-1 cm dicke Schalen (S). An den S-Seiten dagegen treten Kantenschalen (K) auf, die mit der Zeit abfallen, was ein Abrunden der Quadere zur Folge hat.
Einfache Sanierungsmöglichkeiten für solche Situationen gibt es nicht. Der Schadensfortschritt kann aber durch Flicken und eventuell eine wasserabweisende Massnahme verlangsamt werden.

Schlussstein in Laubengang

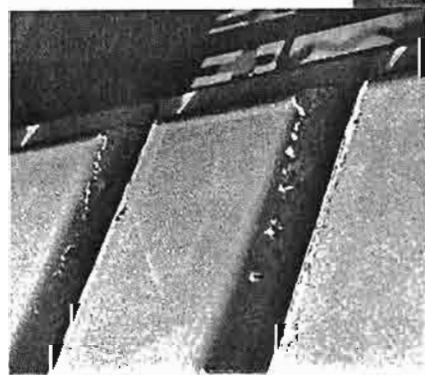


Figur A7.1: Relief am Schlussstein des südlichen Arkadenbogens am Bahnhofplatz 5 (Gewerberesse)

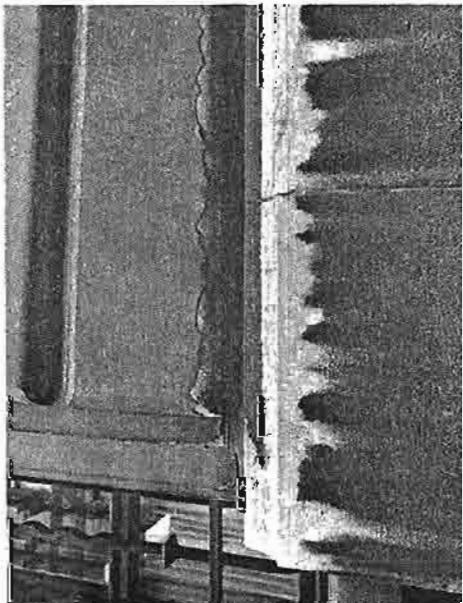
An selten oder nie beregneten Stellen bilden sich dunkle Krusten, direkt beregnete Stellen sanden oder zeigen Schalenbildung. In den Übergangsbereichen sandet der Stein stark, und es treten Ausblühungen auf.

Die asymmetrische Lage der Krusten deutet darauf hin, dass der Regen normalerweise von links vorne im Bild herkommt, das heißt vom Bahnhofplatz, also Westen, her. Vor Regenwinden aus SW ist dieser Stein dagegen durch die Heiliggeistkirche geschützt.

schwach bereegnete Fassadenteile



d)



b)



c)

Figur Bl.1: Detailfotos aus wetterabgewendeten Fassaden

- a) Lisene Hauptpost, NE-Fassade
- b) Lisene Hauptpost, SE-Fassade
- c) Länggassstrasse 25, N-Fassade
(siehe nächste Seite)

Die Oberflächen der Steine werden an wetterabgewendeten Fassaden meist von einer un-dünnen mehr oder weniger dunklen Kruste überzogen, welche vor allem aus Gips und Sand besteht und die Oberflächenbearbeitung meist genau nachzeichnet (c). An Ecken und Kanten löst sich diese Kruste meist vom Sandstein ab (a,b).

Auf dem Kalksteinsockel in (b) unten ist eine schwarze Gipskruste

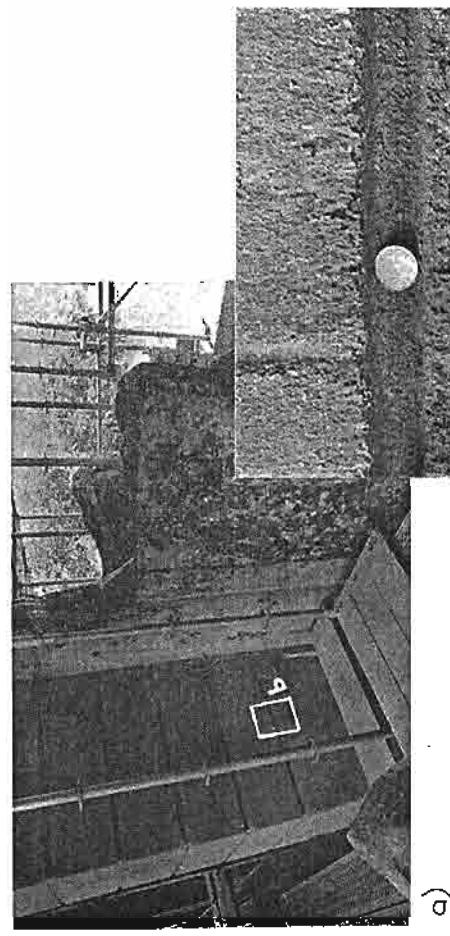
dort ausgebildet, wo der Stein kaum je bereegnet oder benetzt wird. Die Kante des vorspringenden Sockelsteins dagegen ist weiss gewaschen, sie erhält also offenbar genügend Wasser, so dass sich kein Gips akkumulieren kann.

Sanierungsmöglichkeiten: Gipskrusten auf Sandstein sind fast immer schädlich, da sie sich früher oder später vom Stein lösen und dabei die äusserste Sandschicht mitreißen. Gipskrusten auf Kalk und Marmor dagegen, können reaktionsverhindernd und dadurch schützend wirken (siehe zum Beispiel Camuffo et al., 1983).

In städtischer Umgebung sind recht grosse Mengen von Schwefeldepositionen an regengeschützten Fassaden zu erwarten. In Genf betrug die Schwefeldepositionsrate 1980/81 1.6 g/m²Jahr und in Lausanne 0.6-1.0 g/m²Jahr (Furlan und Girardet, 1983). Die Bildung von Gipskrusten lässt sich also in Städten wohl kaum vermeiden.

Es ist von Fall zu Fall zu entscheiden, ob eine Kruste entfernt werden soll oder nicht. Gipskrusten können mit Bürsten und, wenn nötig, mit möglichst wenig Wasser entfernt werden. Durch diese Behandlung würde aber die in c) noch gut sichtbare Scharierung zum grossen Teil entfernt.

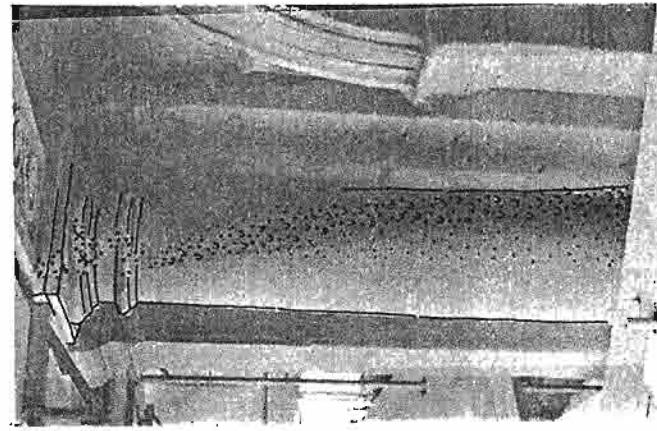
Übergangsbereiche beregnet/regengeschützt (C1.1 bis C1.3)



a)
b)

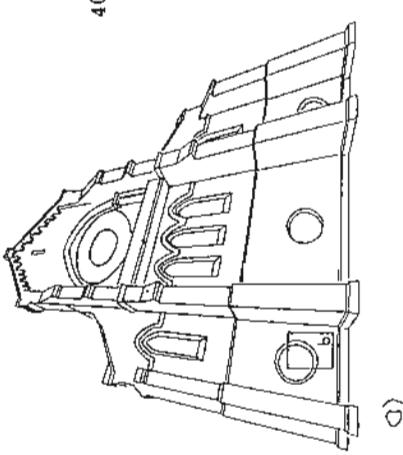
Figur C1.1: Rückseite des Wasserschlusses am Thunplatz
(heute renoviert)

Am Übergang zwischen direkt beregneten Steinen (von Algen und Flechten bewachsen) und regengeschützten Teilen, befindet sich eine Zone wo die Steine stark aufflocken (Münzendurchmesser 17 mm). Die hier auftretenden Flocken sind steinfarbig und enthalten wenig Gips.

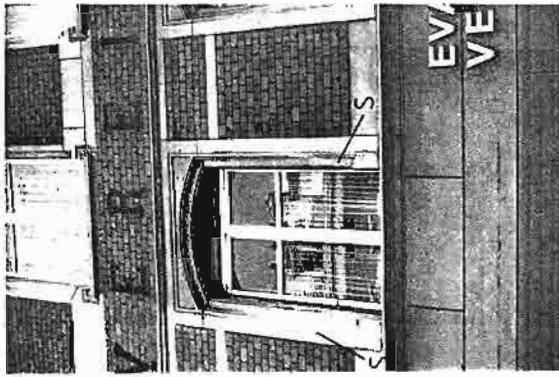


Figur C1.2: Säule an der Westseite (Vorderseite) des
Wasserschlusses

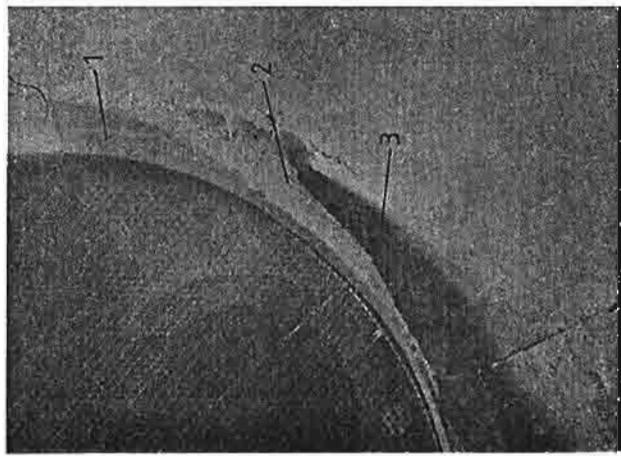
Am Übergang von beregnet zu regengeschützt bildet sich eine bis
15 cm breite Zone mit starkem Sanden bis Aufflocken.



Fenstergewände



Die vor Regen geschützten Sandsteinteile sind mit einer dünnen steinfarbenen bis gräulichen Kruste überzogen. Die feinen Streifen (S) deuten an, dass die Leibungen manchmal leicht benetzt werden. Normalerweise bleibt diese Fassade aber trocken.



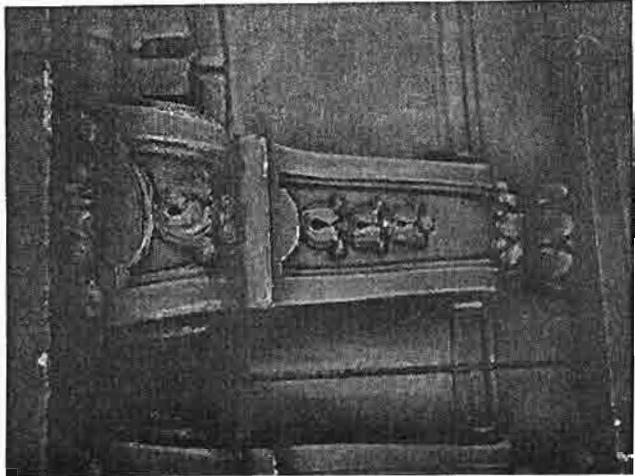
b)

a) Übersichtsskizze der N-Fassade

b) Foto der Detailsituation am Fenster

- 1) Unberegnete Zone, der Stein weist eine sehr dünne, steinfarbene Kruste auf.
 - 2) Übergangszone, der Sandstein flockt auf und sandet ab.
 - 3) Beregnete Teil, dunkel durch Organismusbewuchs.
- Sanierungsmöglichkeiten: Übergangsbereiche von beregnet zu regengeschützt stellen sehr heikle Probleme, welche nur von Fall zu Fall zu lösen sind.

Gurtkonsole und Relieftafel
regengeschützt.



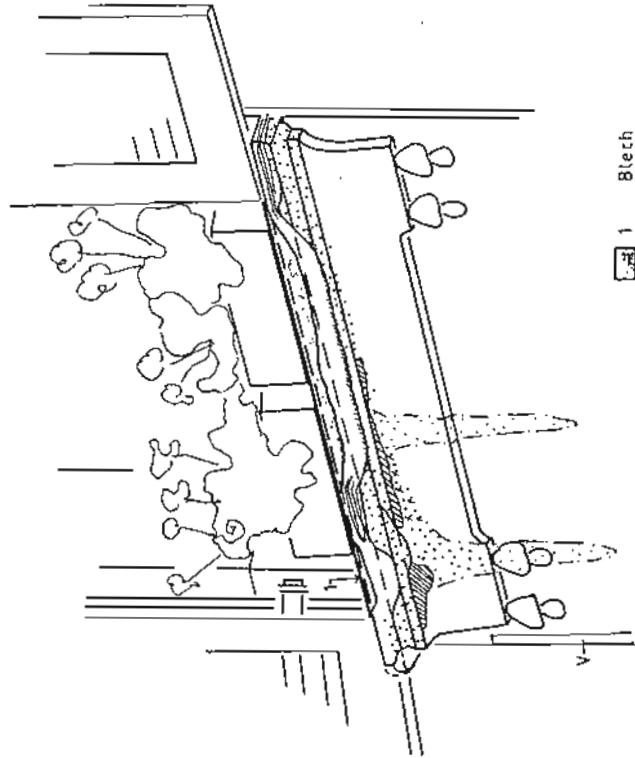
Figur D2.1: Warenhaus ABM, Spitalgasse, 3. OG, Nordfassade
(heute renoviert)

- Gurtkonsole
- unterster Teil des Mittelreliefs

Reliefs an regengeschützten Orten tragen in der Regel dunkle Gipskrusten, welche sich mit der Zeit an Kanten und Spitzen vom Stein lösen, und dabei die äussersten mm des Sandsteins mitreißen. Das führt zu einer Abflachung des Reliefs.

Sanierungsmöglichkeiten: Es muss von Fall zu Fall abgeklärt werden, ob überhaupt eingegriffen werden soll, da das Entfernen der Gipskruste immer zu einer Abflachung des Reliefs führen wird. Alle Fensterbänke des 1. Obergeschosses tragen Geranien und sind

Fensterbänke mit Geranien (El.1 bis El.3)



Figur El.1: Fensterbank 1. OG, S-Fassade, Polizeihauptwache
(ehem. Knabewaisenhaus)

Die Fensterbank ist zum grössten Teil weggewittert, so dass ein Blech darauf gelegt werden musste, das die Geranien trägt.

Das Haus weist einen etwa lm vorstehenden Dachvorsprung auf, der die Fassade gut schützt, so dass die Fensterbänke im 2. OG nur bei Schlagregen benutzt werden. Auf diesen noch gut erhaltenen Fensterbänken stehen auch keine Blumentöpfe.

Vor den Fenstern im Parterre stehen ebenfalls keine Geranien. Hier blättern die Fensterbänke an den Kanten auf, ihre Unterseiten sanden ab, und es treten Salzausbühlungen (am 20.8.85 Epsomit) auf. Diese Fensterbänke sind aber, obwohl hier der Dachvorsprung keine so grosse Schutzwirkung mehr hat, noch in deutlich besserem Zustand als jene des 1. Obergeschosses.

Alle Fensterbänke des 1. Obergeschosses tragen Geranien und sind

in sehr schlechtem Zustand. Es kann deshalb angenommen werden, dass Blumengießen die Hauptursache der Zerstörungen ist. (siehe auch Figur El.2)

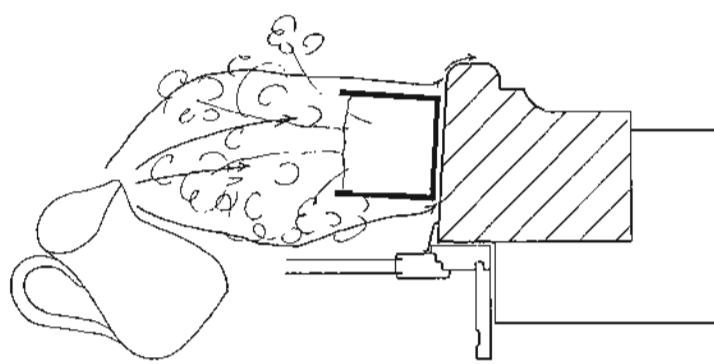


Figur El.3: Fensterbänke
a) Nägelgasse 1., 1. und 2. OG,
N-Fassade
b) Gübelin, Neuengasse, 1. OG,
N-Fassade

In a) unten und in b) sind die Fensterbänke stark beschädigt (Aufblättern, resp. Aufblätten), obwohl die Blumenkästen mindestens 10cm darüber befestigt sind.

Die obere Fensterbank in a) ist, da sie durch eine Blechabdeckung vor Gieswasser geschützt ist, noch in gutem Zustand.

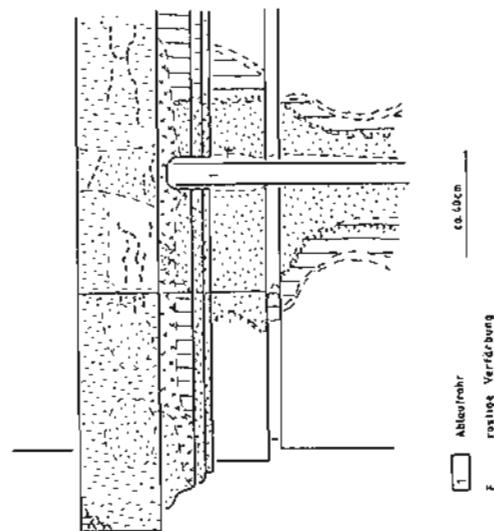
Sanierungsmöglichkeiten: Einen wirksamen Schutz für Fensterbänke unter Blumentöpfen scheinen Blechabdeckungen zu bieten. Sie sind aber von denkmalpflegerischen Satndpunkt her gesehen nicht unproblematisch (mündliche Mitteilung B. Stasser). Die einzige andere Möglichkeit bestünde darin, die BlumenbesitzerInnen auf den schädlichen Einfluss des Giesswassers auf die Fensterbänke aufmerksam zu machen. Keine entsprechende Anregung, für ein Merkblatt, leitete die "Vereinigung für Bern" an die Stadtgärtnerei Bern weiter. Ob diese etwas unternommen hat, ist mir nicht bekannt.



Figur El.2: Schematischer Schnitt durch eine Fensterbank mit Blumentopf

Mit dem Blumen wird häufig auch die Fensterbank begossen. Ein Teil des Wassers läuft sofort an der Oberfläche ab. Der Rest wird in die Bank eingesogen und kann, wegen der Blumenkiste, nur langsam verdunsten.

Gurte mit undichten Dachablaufrohren

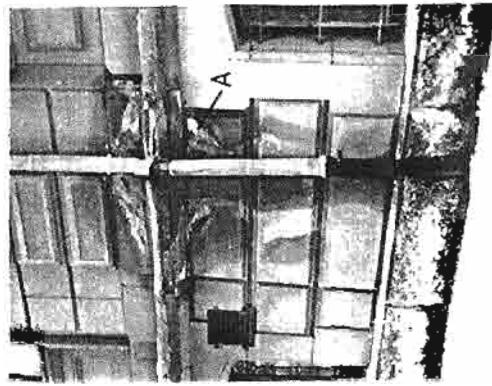


Figur E2.1: Gurt 2. OG an der S-Fassade des Lorraineschulhauses
(siehe auch Figur A4.1)

Hier war offenbar das Dachablaufrohr für einige Zeit undicht, so dass die Fassade auf einer bis zu 1m breiten Bahn stark beschädigt wurde. Der Schaden kann vom Rohr her nach aussen in drei Zonen eingeteilt werden:

- stark absandende Zone
- Übergangszone mit Auflocken, das in Abblättern und zuletzt in leichten Absanden übergeht
- und zu äusserst wieder intakter Stein.

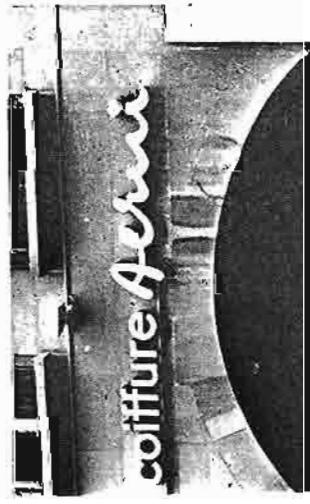
Die auftretenden Salze sind Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) und Epsomit ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$).



Figur E2.2: SBB-Generaldirektion, Hochschulstrasse 6, Ostfassade
Dieses Beispiel zeigt, vom Dachablaufrohr nach aussen, die gleiche Zonierung wie in E2.1. Zusätzlich sind frische Ausblühungen (A) zu erkennen. Bei den Salzen handelt es sich sowohl im Sommer (Juli 85) als auch im Winter (Februar 86) um Epsomit ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) und wenig Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Sie traten als 0.1-0.5 mm dicke, durchsichtige bis weisse, kleine Bläschen bildende Kruste oder als feines weisses Pulver auf.

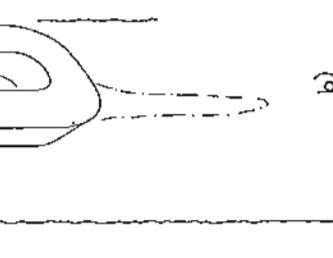
Sanierungsmöglichkeiten: Wenn die rinnenden Dachablaufrohre rasch geflickt werden, dann ist der Schaden zwar auch später noch zu sehen, er wird aber nicht mehr grösser, so dass sich meist keine weiteren Massnahmen aufdrängen. Bleiben die kaputten Rohre dagegen ungeflickt können, zum Beispiel durch Salze und Frost, grosse Schäden entstehen.

Technische Installationen an Fassaden

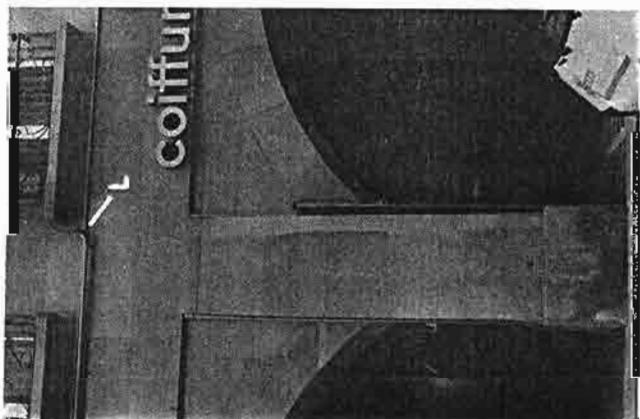


Figur E3.1: Details aus der N-Fassade des Hauses Aarbergergasse 33

- a) Wasserläufe unterhalb einer Leuchtreklame
- b) Erklärungsskizze zu a). Das Wasser sammelt sich v. a. in den becherförmigen Teilen der Reklameschrift und wird dadurch kanalisiert.



a)

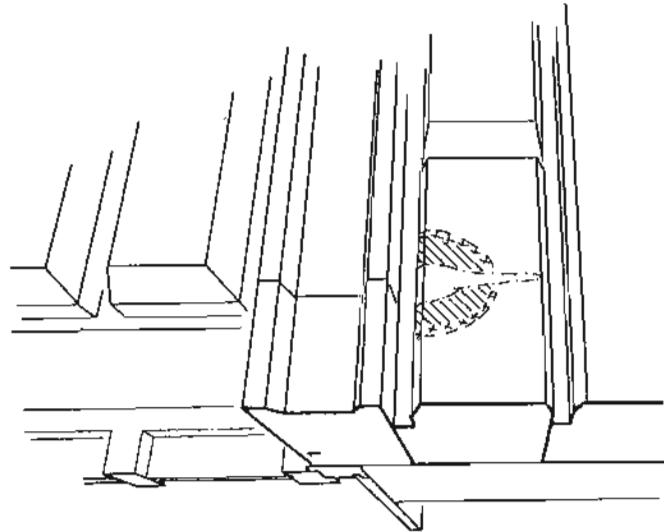


b)

- c) Das Kabel auf der Fensterbank kanalisiert das Wasser so, dass es direkt daneben abläuft. Die Schiene, welche unterhalb des Fensters horizontal durchzieht, lässt an der Stelle L eine Lücke offen, wo das Wasser abläuft.
- Sanierungsmöglichkeiten: Das Anbringen von Leuchtreklamen und ähnlichen technischen Installationen ist immer gut zu überdenken. Eine Möglichkeit besteht darin, die Installationen mit einem geringen Abstand vor die Fassade zu montieren.

c)

Wirkung von Fugen (E4.1 bis E4.3)

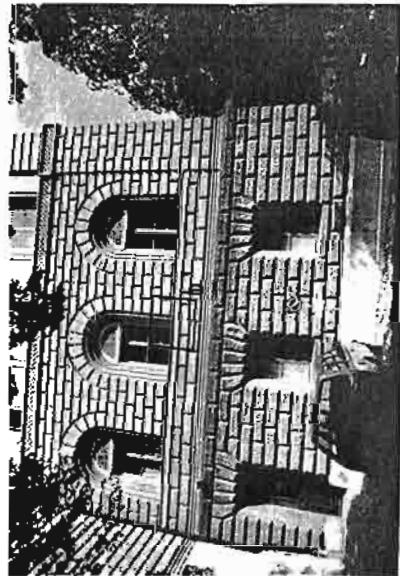


a)

Figur E4.1: Ansicht und Schnitt eines Fingers der Bundeshaus-S-Fassade im 1. OG

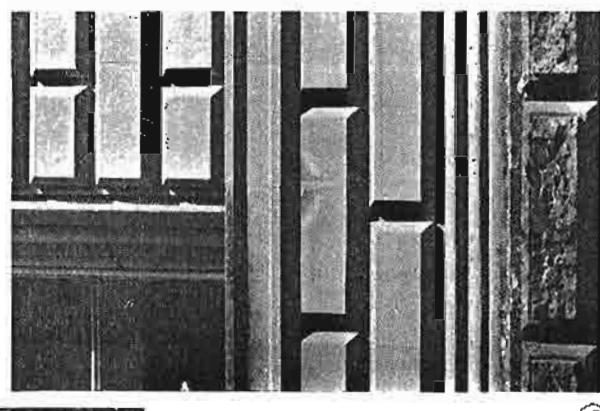
1 Zementstein

Die leicht vertiefte Fuge kanalisiert das Wasser, so dass dieses vermehrt in der Fuge abfließt. Dieser Kanaliseffekt kann verstärkt werden, wenn der Fugenmörtel aufgerissen ist oder fehlt.



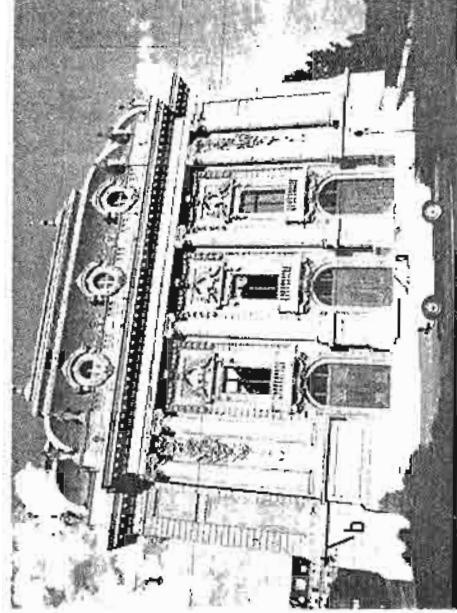
Figur E4.1: Fenster an der Westfassade, am Westflügel des Bundeshauses

Die gleiche Situation, wie sie in E4.1 für die Südseite dargestellt wurde, kann auch an der Westfassade des Bundeshauses beobachtet werden. Auch hier besteht das Gesims aus Zementstein. Da es offenbar häufiger berechnet wird als die Fensterbänke der Südseite, wachsen hier Organismen auf dem Fenstersims.

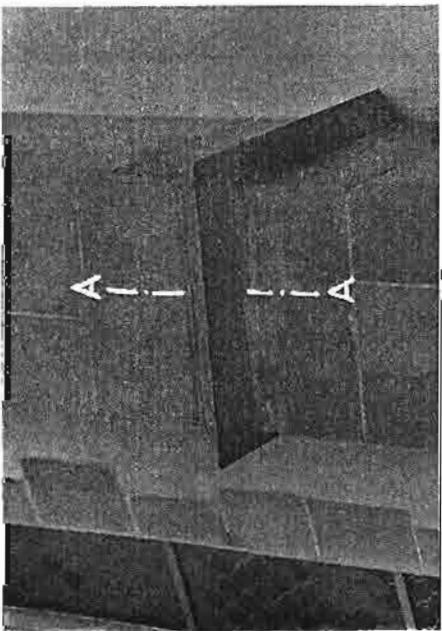


Figur E4.2: Fenster an der Westfassade, am Westflügel des Bundeshauses

Figur E4.3: Gurt an der Stadttheater-E-Fassade
Anstatt abzutropfen, fliesst das Wasser durch die Fuge nach hinten, wo es dann langsam verdunstet und wo Salze auskristallisieren.
Entlang der Fuge treten vermehrt Salze auf. Diese leider nicht zugänglichen Salze könnten aus dem Eugenmörtel stammen.



Figur E4.3: Gurt an der Stadttheater-E-Fassade
Anstatt abzutropfen, fliesst das Wasser durch die Fuge nach hinten, wo es dann langsam verdunstet und wo Salze auskristallisieren.
Entlang der Fuge treten vermehrt Salze auf. Diese leider nicht zugänglichen Salze könnten aus dem Eugenmörtel stammen.



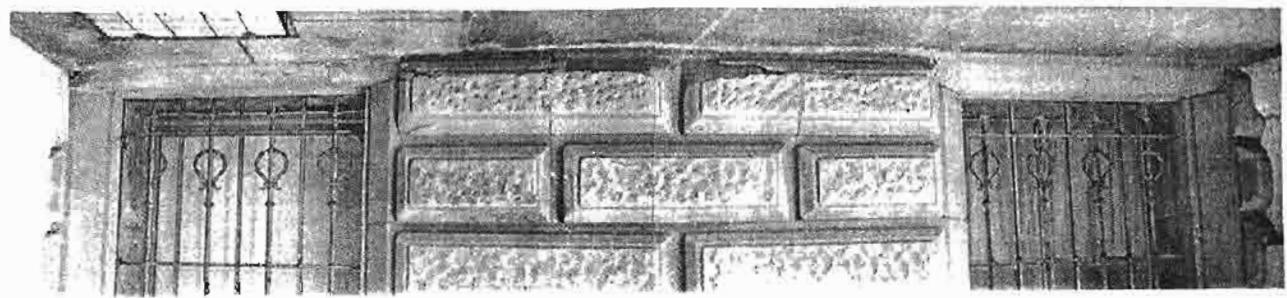
Kaffgesims

ehemalige Schadenssituation

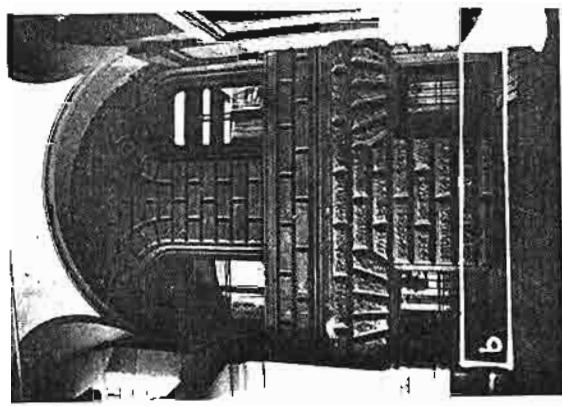
Figur F2.1: Durchgang Bundesestrasse Bärenplatz, auf der Westseite des Bundeshauses

Das Treppenpodest in diesem Durchgang hat nur ein sehr kleines Abflussrohr, so dass das Wasser nicht sofort abfließen kann. Es ist auch denkbar, dass sich auf dem Podest manchmal Schneeverwehungen ansammeln, welche beim Schmelzen die Wände netzen können.

Trotz mehrmaligen Besuches dieses Durchgangs, habe ich diese Situation nie feucht oder gar nass angetroffen. Auch Salzausblühungen (Salzstreuung) habe ich nie beobachtet. Deshalb kann angenommen werden, dass die Schäden bereits älteren Datums sind, und vielleicht der Abfluss früher einmal verstopft gewesen ist.

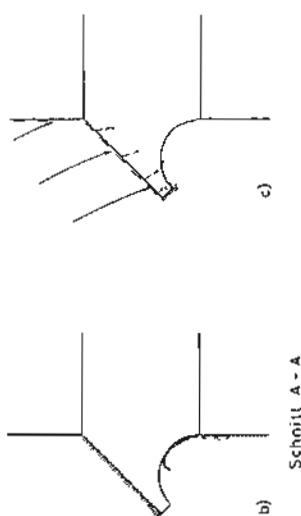


b)



Figur F2.1: Kaffgesims an der Südfassade der Französischen Kirche, Zeughausgasse; erster Strebepfeiler vom Kornhaus aus gesehen

Auf dem Gesims auftreffendes Regenwasser kann entweder oberflächlich abfließen oder eingesogen werden (c). Das eingesogene Wasser kann überall an der Oberfläche verdunsten und die mitgeföhrten Salze können auskristallisieren. An den Oberseiten werden solche Salze bereits beim nächsten Regen wieder abgewaschen, während sie an der Unterseite nicht mehr weggeschwemmt werden und sich so anreichern können. Oberflächlich abfließendes Wasser kann trotz der Wassernasse nach hinten gezogen werden, dort kann es einerseits zum periodischen aus- und umkristallisieren der vorhandenen Salze beitragen und andererseits neue mitgeföhrte Salze ablagnern.



b) Schoitt A - A

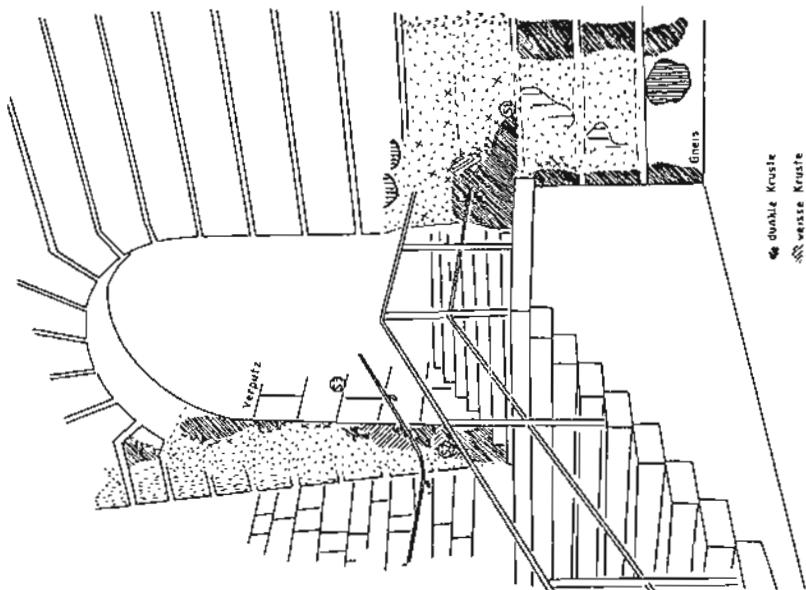
Figur F3.1: Durchgang Bundesestrasse Bärenplatz, auf der Westseite des Bundeshauses

Durchgang mit intensiver winterlicher Salzstreuwung

stammen, welche wegen der Unfallrisiken auf Treppen sehr intensiv erfolgt.

Auch die Salze S2) stammen wohl zu einem guten Teil aus dieser Quelle. Aus der Anwesenheit von Nitrat kann aber geschlossen werden, dass ein Teil der Salze aus der Grundfeuchte hinter der Mauer stammt. Allerdings ist nicht auszuschliessen, dass diese Stelle auch etwa als Hundetoilette benutzt wird, was dann die Nitrate auch erklären würde.

Die Salze auf dem Verputz in der Unterführung (S3) stammen wahrscheinlich aus dem Verputzmörtel selber und aus der Grundfeuchte.



Figur F2.2: Treppe von der Kleinen Schanze nach dem Bundesrain
Am 13.8.85 wurden hier die folgenden Salze und Ionen nachgewiesen:

- S1) Halit (NaCl) und etwas Ca^{2+}
- S2) Halit (NaCl) und etwas Ca^{2+} und NO_3^-
- S3) Glaserit ($\text{NaK}_3(\text{SO}_4)_2$) und Thenardit (Na_2SO_4)

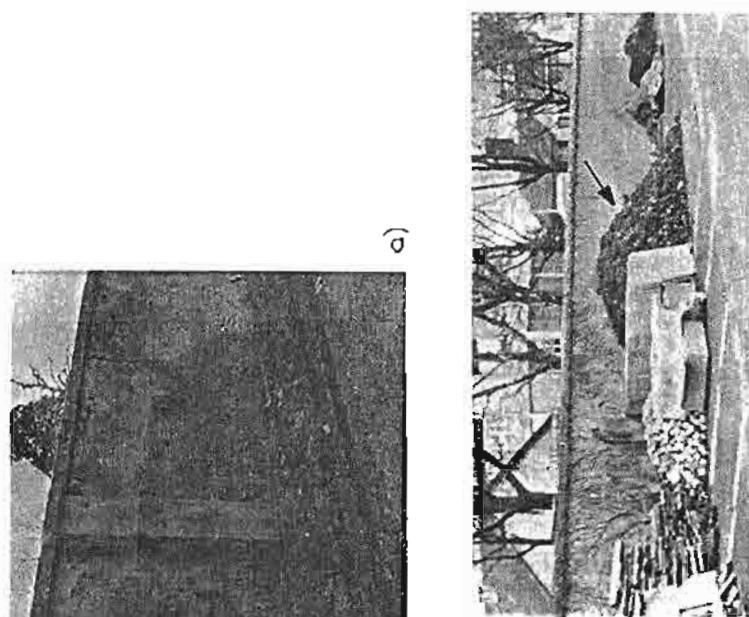
Die Zusammensetzung der Probe S1) lässt darauf schliessen, dass diese Salze zum grössten Teil aus der winterlichen Salzstreuung



Figur F3.1: Schlosshalden-Friedhofsmauer, Nordmauer etwa 40 m östlich des Pfortnerhauses

- a) Strassenseite (Nord)
- b) Friedhofseite (Süd)

Der Erdhaufen (Pfeil), der hier an der Mauer aufgehäuft wurde, enthält Feuchtigkeit, welche in die Sandsteinmauer eindringt. Bis jetzt wurden noch keine, auf diese Feuchtigkeit zurückzuführenden Schäden beobachtet. Trotzdem sollte der Erdhaufen möglichst rasch entfernt werden.

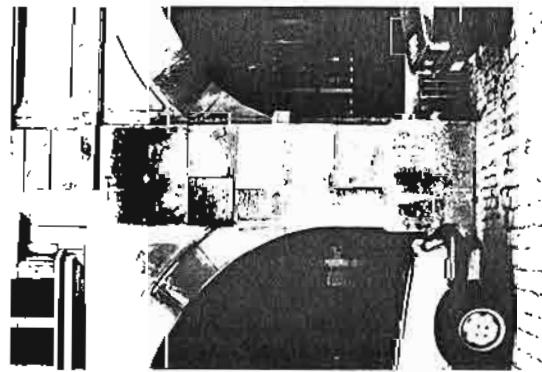


Figur F4.1: Eckhaus Waisenhausplatz - Spitalgasse, Parterre, Ostfassade

Diese Situation sieht auf den ersten Blick aus wie ein Grundfeuchteaufstieg (siehe Gl.1) mit intensiven Salzausbildungen (Gips, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). In Wirklichkeit handelt es sich jedoch um einen Schaden der durch einen Wasserleitungsbruch oder etwas Aehnliches hervorgerufen wurde. Dies kann aus der Flickstelle (F) an der Arkadendecke geschlossen werden.

Diese Aufnahmen entstanden Mitte Januar 1984. Heute ist ausser dem Flick nichts mehr zu sehen.

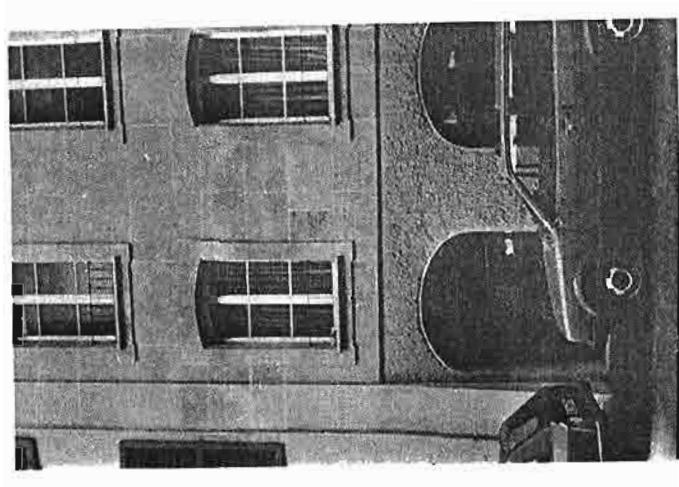
Grundfeuchte (Gl.1 bis Gl.3)



Figur Gl.1: Grundfeuchteaufstieg an einem Arkadenpfeiler an der Münstergasse 4

1 Kalksteinsockel

- Zone ohne sichtbare Grundfeuchteschäden (es ist möglich, dass die Steine in diesem Bereich bereits ersetzt worden sind)
 - Stark absandende Zone
 - Dunkle, feuchte Zone, z. T. organismenbewachsen (schwarz)
 - Zone ohne sichtbare Grundfeuchteschäden
 - Wasserlauf mit Absanden, das die Grundfeuchtezonen oberflächlich unsichtbar macht (gehört nicht zu den Grundfeuchtezonen)
- Die Zonen a) bis d) dürften den Zonen A bis D entsprechen, welche von Arnold und Zehnder (1984) beschrieben worden sind.

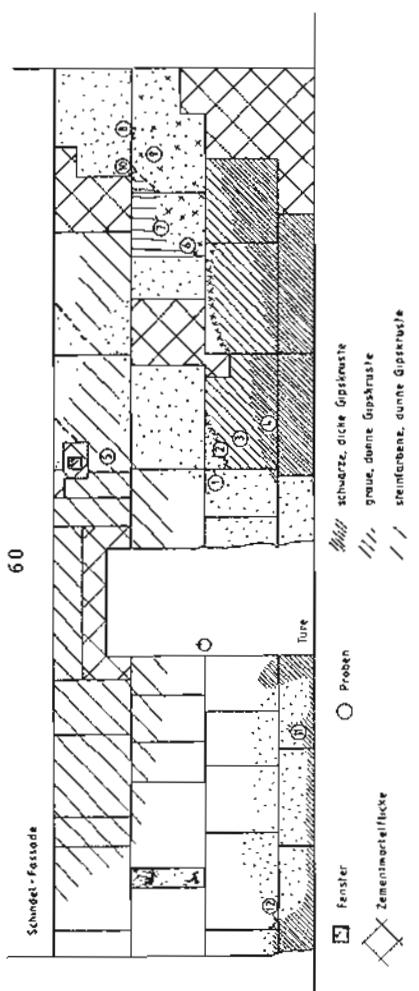


Figur Gl.2: Gerberengasse 12

Dieses Haus weist, mit ungefähr 4m, den höchsten Grundfeuchteaufstieg der Stadt Bern auf.

Die in Gl.1 dargestellte Situation, wo der Grundfeuchteaufstieg direkt oberhalb des Arkadenpfeilers stoppt, ist dagegen bedeutend häufiger zu beobachten. (Siehe dazu auch unter 4.5.3.2)

Sanierungsmöglichkeiten zu Gl.1 und Gl.2: Grundfeuchtesituationen bleiben oft über lange Zeit stabil. Da ein vollständiges Abdichten gegen die Grundfeuchte, an bereits bestehenden Bauten äusserst aufwendig ist, empfiehlt es sich oft "mit der Grundfeuchte zu leben". Das heisst, dass Steine welche keine genügende Tragfähigkeit mehr haben ersetzt werden, ansonsten aber die Situation so belassen wird wie sie ist.



Figur G1.3: Rahbenthalstrasse 78, Erdgeschoss, Südflassade

Hinter der Sockelmauer rechts der Türe, liegt das Erdreich und darüber ein etwa 50 bis 60 cm hoher Kriechgang.

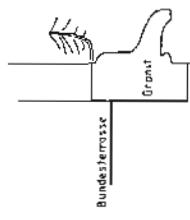
Folgende Salze und Ionen konnten am 7.7.86 in den gesammelten Proben nachgewiesen werden:

Gips	$(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$	1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 10, 11
Nitrokalit	(KNO_3)	6, 8, 9, 10
Thenardit	(Na_2SO_4)	1, 2, 12
Syngenit	$(\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O})$	9
Arcanit	(K_2SO_4)	8
Sylvin	(KCl)	8
K-Karbonat	$(\text{K}^+, \text{CO}_3^{2-})$	8
Na-Karbonat	$(\text{Na}^+, \text{CO}_3^{2-})$	2
Na-Nitrat	$(\text{Na}^+, \text{NO}_3^-)$	2

Vor allem auf und in der Nähe von Fugen treten alkalische Na- und K-Karbonate auf. Am häufigsten sind aber Gips und Nitrokalit. Links der Türe, wo die Feuchtigkeit weniger hoch steigt, sind dies sogar die einzigen gefundenen Salze.

Es scheint, dass die Feuchtigkeit in der rechten Ecke durch den grossen Mörtelflick höher hinauf gezwungen wird, da eine Verdunstung der Grundfeuchte durch den Zement hindurch nur schlecht möglich ist. Sanierungsmöglichkeiten: Die Zusammensetzung der Salze deutet darauf hin, dass sie aus der Grundfeuchte und aus dem verwendeten Mörtel stammen. Der Anteil der jeweiligen Salzquelle ist nicht einfach festzulegen, so dass hier nach längerer Diskussion beschlossen wurde, die Situation zu belassen wie sie ist.

Stützmauern (G2.1 und G2.2)



b)



c)

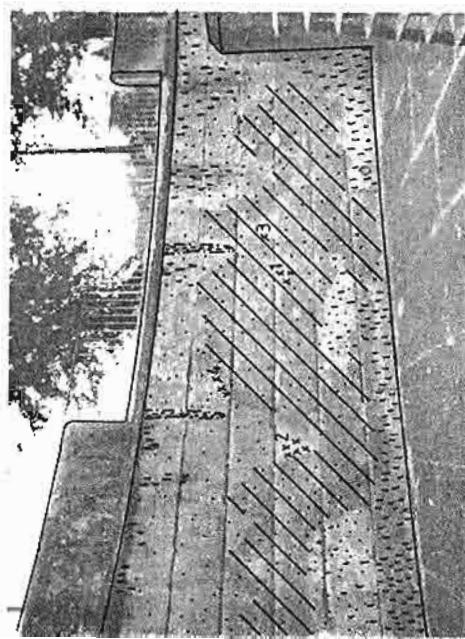
Figur G2.1: Bündesterrassen-Stützmauer gegen Münzrain, Südseite

- a) schematischer Schnitt durch die Mauer
- b) Ansicht der Mauer von Osten her

- c) Detailaufnahme von Quadern mit Alveolarverwitterung

Das Bossenmauerwerk kann von oben nach unten grob in drei Zonen eingeteilt werden:

- eine durch den Granitgurt regengeschützte Zone, zu der die obersten zwei bis zweieinhalb Bossenreihen gehören. In dieser Zone herrscht starkes Absanden, verbunden mit Salzausblühungen, vor.
- Übergangszone mit zum Teil sehr lokalem Sanden (Alveolarverwitterung) und Krustenbildung. Sie umfasst die nächsten zwei bis drei Bossenreihen.
- zuunterst sind die Quadere stark mit Organismen bewachsen und sanden leicht ab.



Figur G2.2: Bärengraben

Es können drei Zonen unterschieden werden; zuoberst eine leicht regengeschützte Partie, mit Absanden und etwas Organismenbewuchs. Unter den offenen Fugen in den Abdeckplatten sind stark mit Organismen bewachsene Wasserläufe zu erkennen. Dann folgt eine sehr unregelmäßig begrenzte, feuchte Zone, wo die Steine stark absanden und Salze ausblühen. Zuunterst folgt dann ein Bereich mit dunklen Krusten, Absanden und stellenweise Organismenbewuchs.

Am 7.7.86 wurden hier folgende Salze festgestellt:

- 1) Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
- 2) Halit (NaCl)
- 3) Halit
- 4) Trona ($\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) und Halit

An anderen Stellen im Bärengraben wurden Thenardit (Na_2SO_4), Nitronatrit (NaNO_3) und Glasserit ($\text{NaK}_3(\text{SO}_4)_2$) gefunden.

Da alkalische Salze (Trona) vorkommen, kann vermutet werden, dass für Fugen- oder Flickmörtel Zement verwendet wurde, aus dem diese Salze stammen.

Steinwespen

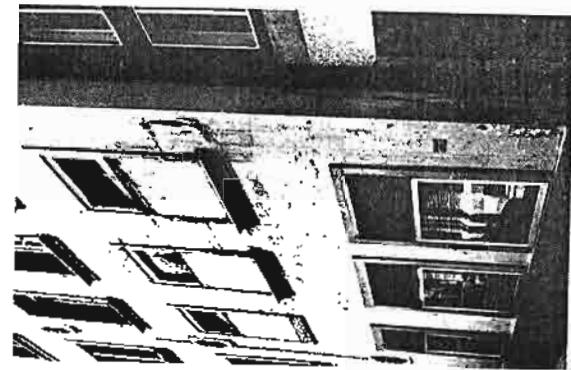


Figure H1.1: Räfiggässchen, Rückseite des Restaurants Gfeller am Bärenplatz.

Hinter den Fenstern im ersten Stock befindet sich wahrscheinlich die Küche. Die Sandsteinmauer ist gestrichen. Die von innen nach aussen gerichtete Dampfdiffusion wird offenbar durch diesen Anstrich gebremst. Mit der Zeit bildet der Anstrich Beulen, welche aufplatzen und Teile vom Sandstein mitreißen.

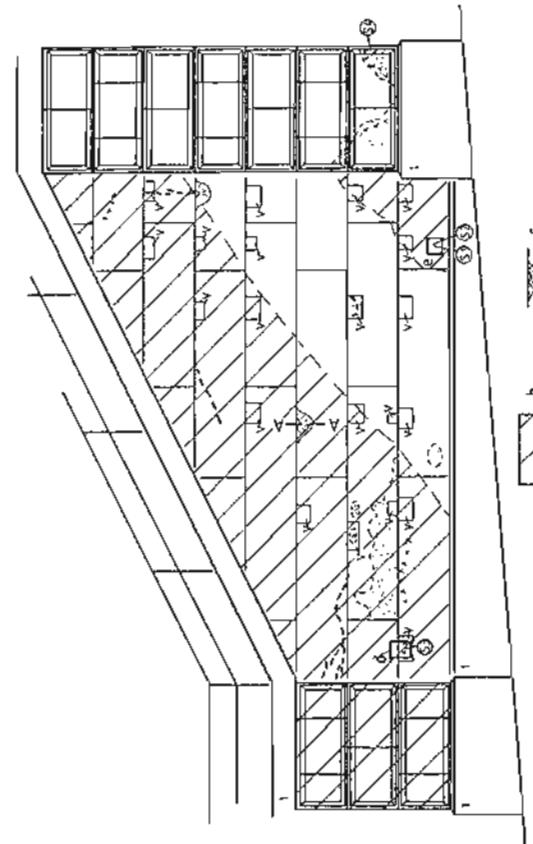
Sanierungsmöglichkeiten: Die Auswirkungen des einseitigen Dampftransports werden hier sicher durch den Anstrich verschlimmert. Sanierungsmassnahmen müssen vor allem auch die Dampfabzugsvorrichtung und die Auskleidung der Wandinnenseite betreffen.



Figure H2.1: Steinwespenlöcher in einem Gesims am Wasserschloss (renoviert)

Es ist wahrscheinlich, dass die Steinwespen nur bereits etwas gelockerte Steine besiedeln und somit nicht die primäre Ursache für die Schäden darstellen. Steinwespenlöcher können auch in den Lockerzonen hinter Schalen an der Schosshalden-Friedhofsmauer beobachtet werden.

Stützmauer mit vorgehängten Sandsteinplatten



Figur H3.1: Stützmauer beim Nydeggerhof, unterhalb der Treppe links der WC-Anlagen. (Detailschnitt A - A siehe Figur H3.2, Details d und e siehe Figur H3.3)

1 Kalkstein

- a) im allgemeinen feucht erscheinende Zone mit Abblättern oder zum Teil Schalenbildung und Absanden.

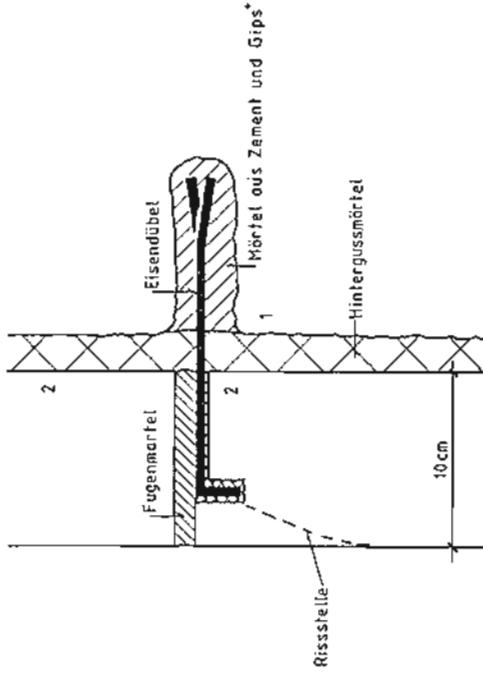
c) Kraterförmiger Ausbruch
S1 bis S4: Salzproben

Am 30.6.86 wurden hier die folgenden Salze bestimmt:

Thenardit	(Na_2SO_4)	S1, S2
Halit	$(NaCl)$	S2, S3, S4
Nitronatrit	$(NaNO_3)$	S1, S2
Arcanit	(K_2SO_4)	S1
	$(CaSO_4 \cdot 2H_2O)$	S2
	Gips	

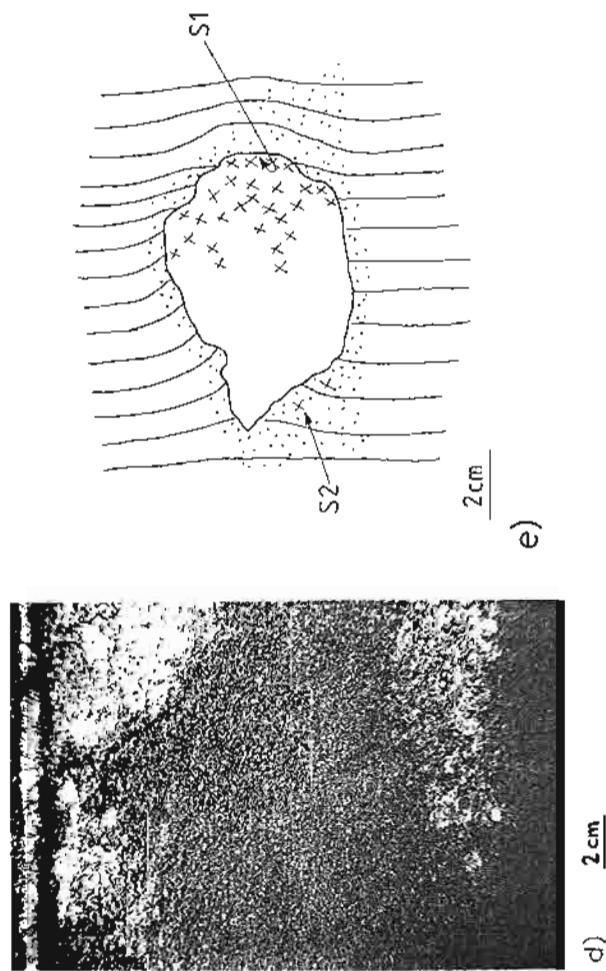
Vom Ursprung der Feuchtigkeit her gesehen, gehört diese Mauer in den Bereich G2 (Stützmauern mit eindringender Erdfeuchte). Die

vielen Vierungen deuten aber darauf hin, dass die Sandsteinplatten dort am schnellsten kaputt gehen (kratertörmige Ausbrüche), wo sie befestigt wurden. Die Entstehung dieser Ausbrüche wird in der nächsten Figur erklärt.
Gleiche kratertörmige Ausbrüche können auch am Turm der Heiliggeistkirche und an einem Arkadenpfeiler der Kramgasspost beobachtet werden.



Figur H3.2: Detailschnitt A - A aus Figur H3.1
(zusammengestellt mit Hilfe von Herrn Nussbaum von der Münsterbauhütte)

- 1) Bei der Renovation zurückgearbeitete, stark durchfeuchttete Sandsteinstützmauer
- 2) Neue vorgehängte Sandsteinplatten
 - +) Dieser Mörtel dehnt sich bei Wasseraufnahme stark aus, wodurch der Dübel nach aussen gedrückt wird, was zur Absprengung eines halbkugelförmigen Stückes aus der Sandsteinplatte führt. (s. a. Figur H3.1, Lage der Vierungen!).

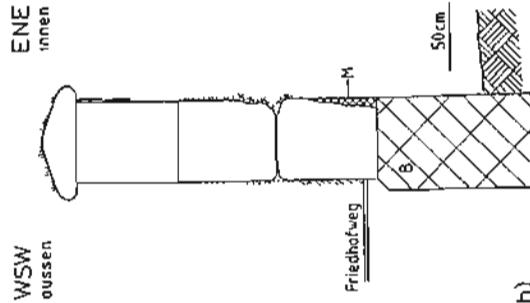


Figur H3.3: Details d und e aus Figur H3.1

- d) Am 30.6.86 traten hier die Halitausblühungen in Form von bis zu 2 mm grossen Würfeln (W) und daneben auch als feines, weisses Pulver auf. An einem Vormittag, ein paar Tage später, wurden ansteile der Salzwürfchen einzelne hochkonzentrierte Salzwassertropfen beobachtet.

- e) Die Zusammensetzungen der Salze sind bei der Figur H3.1 angegeben. S2 wurde auf, S1 unter der 3 mm dicken Abblätterung gefunden.

freistehende Mauer im Kontakt zu Zementmörtel

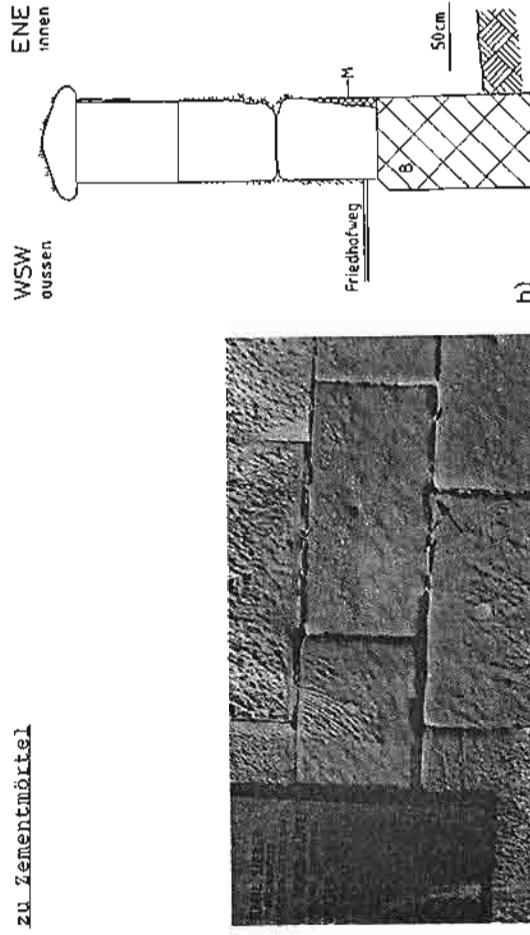


Figur H3.4: Westmauer des Schlosshaldenfriedhofs

- a) Schematischer Schnitt
b) Ansichtsfoto Friedhofinnenseite

- B: Betonfundament; M: zementhaltiger Flickmörtel;
d) Am 30.6.86 traten hier die Halitausblühungen in Form von bis zu 2 mm grossen Würfeln (W) und daneben auch als feines, weisses Pulver auf. An einem Vormittag, ein paar Tage später, wurden ansteile der Salzwürfchen einzelne hochkonzentrierte Salzwassertropfen beobachtet.

- e) Die Zusammensetzungen der Salze sind bei der Figur H3.1 angegeben. S2 wurde auf, S1 unter der 3 mm dicken Abblätterung gefunden.



Figur H3.4: Westmauer des Schlosshaldenfriedhofs

- a) Schematischer Schnitt
b) Ansichtsfoto Friedhofinnenseite

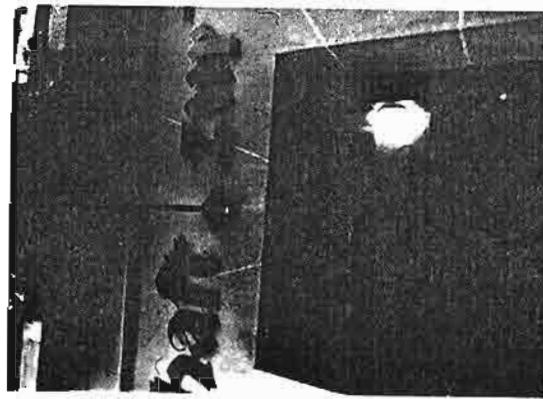
- B: Betonfundament; M: zementhaltiger Flickmörtel;
An diesem Teil der Mauer ist die vorherrschende Verwitterungsform starkes Absanden, verursacht durch periodisches Ausblühen von Salzen. Beim Pfeil ist ein durchgehendes Loch in der Mauer.
Am 8.4.86 wurden folgende Salze und Ionen nachgewiesen:

Natriit ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)	alkalisch
Thermonatrit ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)	alkalisch
Theomardit (Na_2SO_4)	neutral
Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	neutral
K^+ , Cl^- , NO_3^-	neutral

Die alkalischen Salze stammen entweder aus dem Betonfundament oder aus zementhaltigem Flick- oder Fugenmörtel. Die zum Transport der Salze durch die Mauer nötige Feuchtigkeit dürfte zum Teil aus der Grundfeuchte stammen. Es ist auch möglich, dass sich Regenwasser entlang der Mauer auf der Strasse (Friedhofsweg) sammelt und von dort in die Mauer eindringt.

Sanierungsmöglichkeiten: Das direkte Anschliessen der Strasse am Sandstein ist sehr unbefriedigend, kann aber in diesem Fall kaum geändert werden. Das Ersetzen der zementhaltigen Fugen- und Flickmörtel durch zementfreie Mörtel würde die Zufuhr von alkalischen Salzen mindestens zum Teil unterbrechen. Die Mauer müsste aber anschliessend trotzdem noch periodisch auf das Ausblühen von Salzen hin untersucht werden. Salzausblühungen sollten wann immer sie auftreten trocken entfernt werden, und zwar unabhängig davon ob die Mörtel ersetzt werden oder nicht.

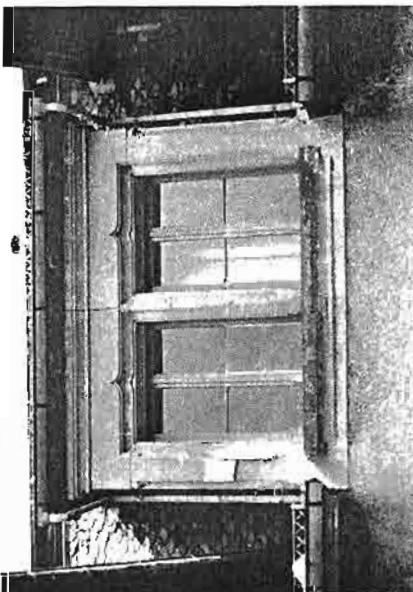
Türsturz in stark rauchiger Luft



Figur H4.1: Türsturz der Wirtschaft zur Traube, Genfergasse

Der Türsturz ist durch rauchige Luft dunkelbraun verfärbt; dabei handelt es sich um einen konzentrierten Niederschlag, wie er auch über Heizkörpern beobachtet werden kann.

Sanierungsmöglichkeiten: Räume, in denen stark geraucht wird, sollten eine kräftige Ventilation haben.

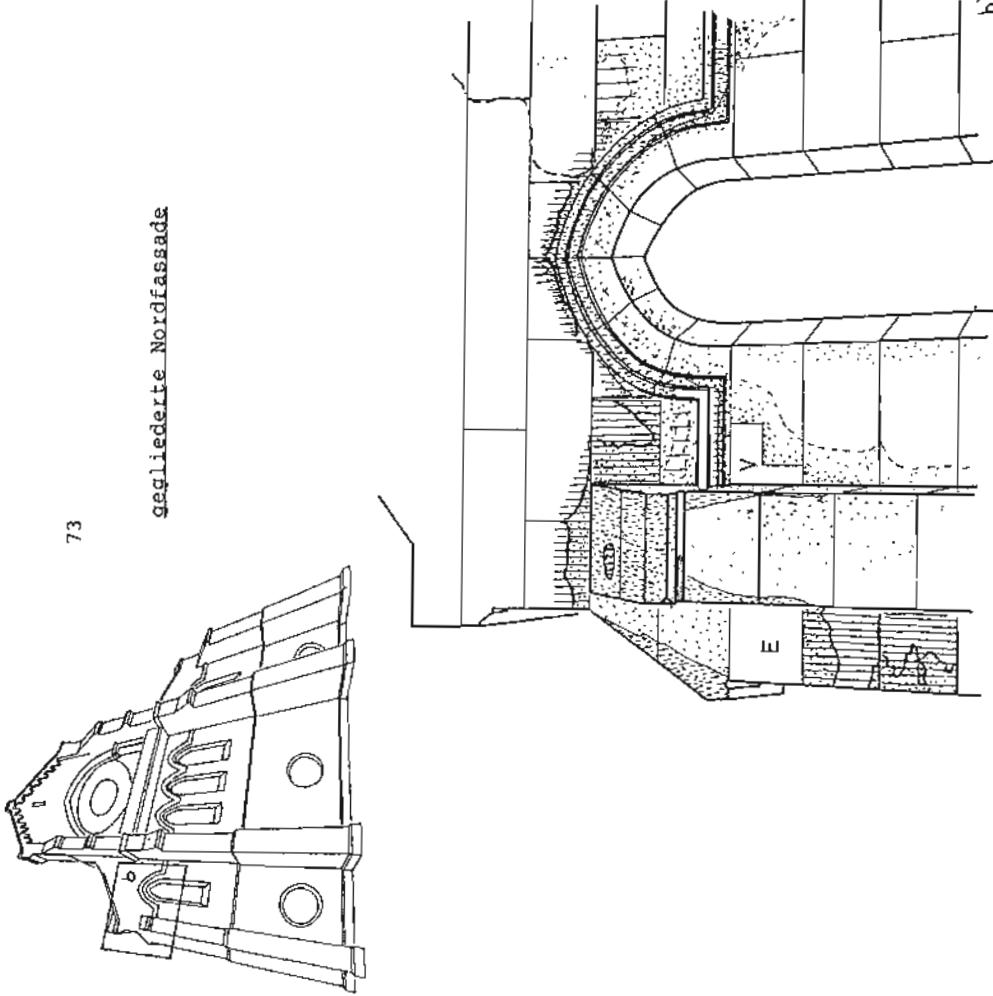


Figur H7.1: Senkrecht zum Lager versetzte Steine

- a) Wasserschloss am Thunplatz (heute renoviert)
- b) Muesmattschulhaus, NW-Fassade

Senkrecht zum Lager versetzte Berner Sandsteine blättern früher oder später auf.

Bei der Fensterleibung (b) konnte es wohl nicht vermieden werden den Stein senkrecht zum Lager zu versetzen, da wahrscheinlich die abgebauten Bankhöhe nicht ausreichte. Richtig versetzt wäre der Stein in einem solchen Fall, wenn er senkrecht statt parallel zur Fensterfront versetzt würde. (Steinhauer nennen wie in b versetzte Steine "Montagssteine").



Figur S1.1: Kirche Peter und Paul, N-Fassade

Etwas vorstehende Teile der Fassade zeigen dunklen Organismenbewuchs. Selten bildet sich eine kleine Schale, wie z. B. auf dem Dach des Wandpfeilers (Verwitterungsbereich A2 in Tabelle 1).

Oberhalb dieser vorstehenden Teile haben sich durchwegs Schalen gebildet (Verwitterungsbereich A4).

Unterhalb dieser Teile treten Krusten und Salzausblühungen auf, und der Stein sandet ab oder flockt auf (Verwitterungsbereich F1).

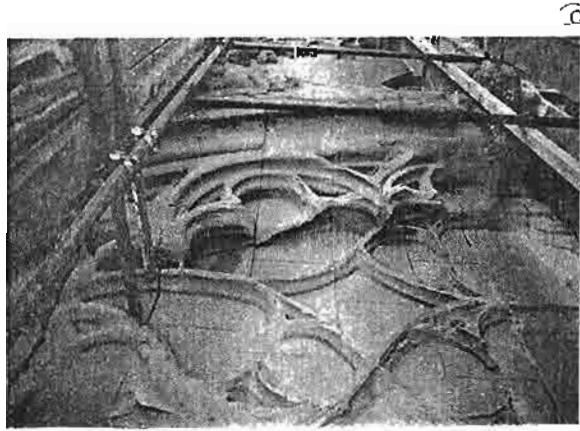
Wasserläufe treten vor allem an Kanten auf (Verwitterungsbereich E4).



durchsickerndes Wasser

direkt beregnet. Auf der Galerie auftreffendes Wasser dürfte, wenigstens zum Teil, oberflächlich abrinnen. Zudem kann es sein, dass zum Beispiel Schmelzwasser von oben, durch die Sandsteine hindurch, in diesen Bereich vordringt. Windwirbel können, vor allem an den feingliederten Teilen, das Absanden beschleunigen (Alveolarverwitterung).

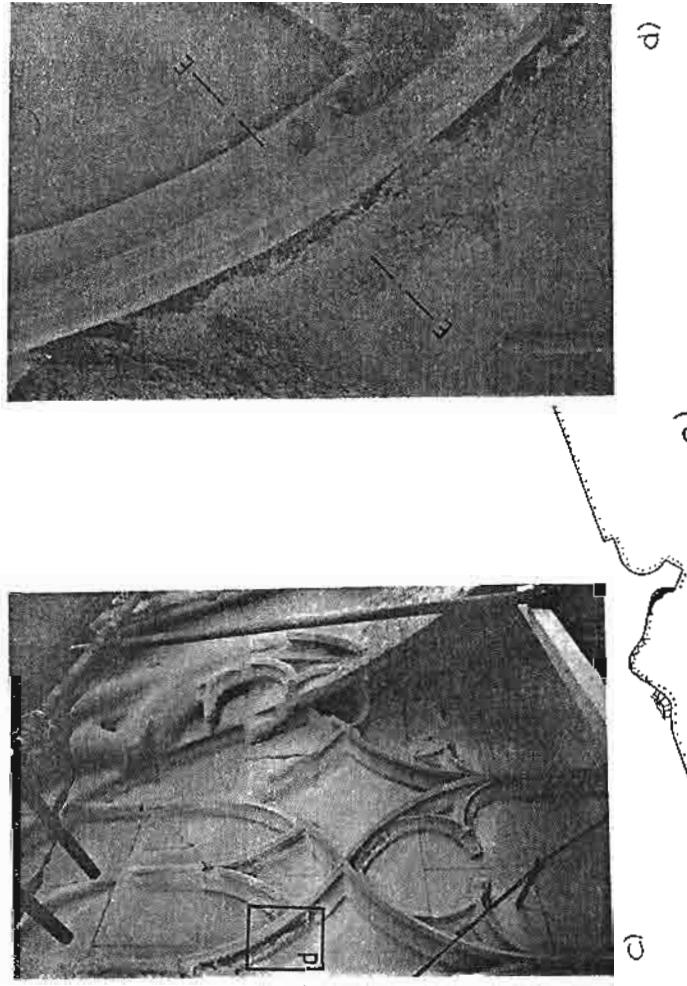
Zuunterst folgt dann eine Zone in der vorwiegend die Rippen stark beeinträchtigt sind. Die anderen Teile haben stellenweise dünne Schalen, sind aber sonst mehr oder weniger intakt (Bereich A5).



Figur S1.2: Münster, Westfassade, unter der ersten Galerie
(siehe auch Übersichtsplan der Westfassade im Anhang)

Die Galerie selber (a, ganz oben) ist, dort wo sie beregnet ist, mit Organismen bewachsen. Unter dem Bewuchs sind die Steine mehr oder weniger intakt (Bereich A2).

Unter dieser Zone folgt eine 1 bis 2 Meter hohe, durch die Galerie vor Regen geschützte Partie, in der starkes Absanden vorherrscht (b). Hier sind alle Bauteile 1 bis 2 cm zurückgewittert, was zu einer Abrundung aller Formen geführt hat. Entlang der Fugen sind die Steine in der Regel noch stärker zurückgewittert. Die ganze Situation gehört in den Bereich F1. Die Fassade wird hier selten



Schnitt E - E

Die gleiche Dreiteilung, wie sie oben dargelegt wurde, kann im Kleinen an den einzelnen Rippen des untersten Bereichs beobachtet werden (c, d, e). Dort wo die Rippe direkt beregnet wird, ist sie von Organismen bewachsen. An ihrer Unterseite bildet sich eine dunkle Gipskruste. Im durch die Rippe regengeschützten, direkt

c)

c)



e)

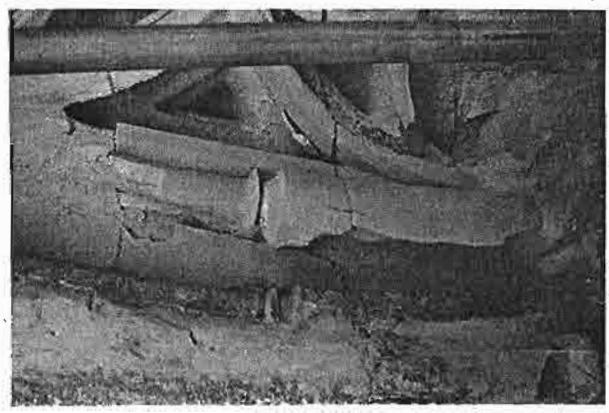
d)

c)

anschliessenden Bereich zeigen die Steine starkes Absanden bis Aufflocken, das in ein Aufblähen übergeht (e). Weiter unten sanden die Steine leicht ab.

Die grundsätzlich gleiche Dreiteilung findet sich überall an dieser Fassade wieder. Direkt beregnete, vorstehende Teile sind noch mehr oder weniger intakt und oft etwas mit Organismen bewachsen. Regengeschützte Teile tragen dunkle Gipskrusten und sind ebenfalls noch in verhältnismässig gutem Zustand. Die Übergangsbereiche dagegen und die Stellen, wo Wasser von hinten oder oben einsickern kann, sanden stark ab, flocken oder blähen auf.

Im Extremfall führt diese Dreiteilung dazu, dass die direkt beregneten Teile als Schalen stehen bleiben, während das im Regenschatten liegende Material fast vollständig weggewittert ist (f,g).



Die Bilder f und g (sie wurden an zwei verschiedenen Stellen aufgenommen) zeigen deutlich, dass gleiche Exposition auch zu gleichen Verwitterungsformen führt.

2.4 Verwitterungssituationen in Naturaufschlüssen

Mit Gebäudesituationen vergleichbare Naturaufschlüsse zu finden, erwies sich als eher schwierig, da der weitaus grössste Teil der Aufschlüsse mitten im Wald liegt und weder direkt beregnet noch besonnt wird. So sind die Sandsteine in den Naturaufschläussen meist stark mit Algen, Flechten und Moosen bewachsen. Wenn es sich um ehemalige Steinbrüche handelt, so sind in der Regel Schrämm- und andere Abbauspuren noch deutlich sichtbar. Im Steinbruch Nummer 15 (Tabelle 2) ist neben den Schrämmsspuren auch noch die eingravierte Jahrzahl 1795 gut zu erkennen (Figur 5). Dies ist ein deutlicher Hinweis darauf, dass die Steine unter solchen Bedingungen nur sehr langsam verwittern.



Figur 5: Detailansicht aus Steinbruch Nr 15. Die Jahrzahl 1795 ist noch gut zu erkennen. Bei den weissen Flecken handelt es sich um Flechten, und nicht etwa um Salzausblühungen.

Mit Gebäuden vergleichbare Situationen wurden vor allem in den Aufschläussen Nr 5, 7, 8 und 12 beobachtet.

Tabelle 2: Untersuchte Steinbrüche und Naturaufschlüsse

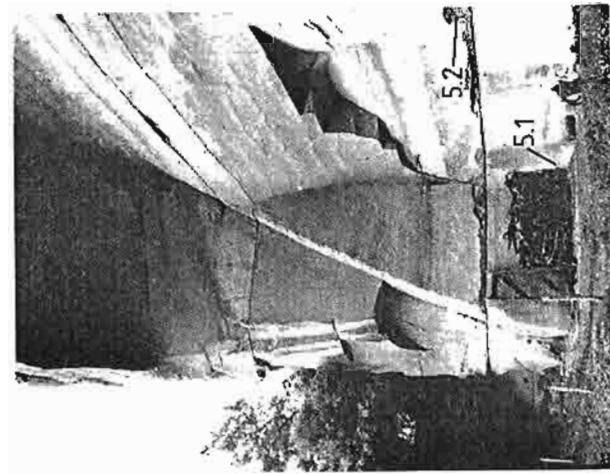
Nr	Ort	Koordinaten	Stein- bruch	in Be- trieb	Salzproben (+)
1	Bubenberg	598.430/194.300		x	
2		598.450/194.350		x	
3		598.500/194.370		x	
4		598.530/194.330		x	
5	Chrützflue	610.020/206.550		x	
6		609.910/206.510			EP, Then
7		610.000/206.550		x	Gi, Then Gi, Cc, Na ⁺
8	Gurten	599.850/196.800		x	EP, Cc
9	Krauchthal	609.880/205.990		x	Gi
10		609.790/206.030		x	Gi
11	Osternun-	604.250/200.000		x	Gi
12	digenberg	604.200/199.700		x	Gi
13	Schliern	599.250/195.500		x	
14		599.100/195.480		x	
15		599.050/195.500		x	
16	Sensegra-	591.150/185.230			Gi, Then, Cl ⁻ , NO ₃ ⁻
17	ben	591.130/185.730			EP, Gi, NO ₃ ⁻
18		590.400/185.900			EP, NO ₃ ⁻
19		590.200/185.700			Halit, NO ₃ ⁻
20		590.130/185.650			Gi, Then, Cl ⁻ , NO ₃ ⁻
21	Ulmizberg	599.200/195.450			
22		599.000/195.300			Gi
23		599.430/194.000		x	
24		599.620/194.020		x	
25		599.800/194.600		x	

(+) alle Proben mit Chloriden und Nitraten stammen aus Strassenaufschlüssen.

Gi: Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$); EP: Epsomit ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$); Then:

Thenardit (Na_2SO_4); Halit (NaCl); Cc: Kalzit (CaCO_3).

Die Aufschlüsse 5 und 7 liegen nahe beieinander an der Chrützflue bei Krauchthal. Beim Aufschluss 5 handelt es sich um einen recht grossen, ehemaligen Steinbruch, der südexponiert ist (Figur 6).



Figur 6: Ansicht des südexponierten Aufschlusses Nr 5

Im Dach des Steinbruchs wurden die obersten Meter belassen, so dass die darunter liegende Wand regengeschützt ist. Salzausblühungen konnten neben Klüften, an Schichtgrenzen und in der Nähe der Bodenfeuchte beobachtet werden. Es handelte sich bei der Probe 5.1 um Epsomit und wenig Thenardit und bei 5.2 um Epsomit. Abgesehen von den eher spärlichen Salzausblühungen ist leichtes Absanden die einzige feststellbare Verwitterungsform.

Der Aufschluss 7 ist ein kleiner ehemaliger Steinbruch mit überhängenden Abbauwänden (Figur 7).



Figur 7: Aufschluss 7, a) nördlicher und b) südlicher Teil

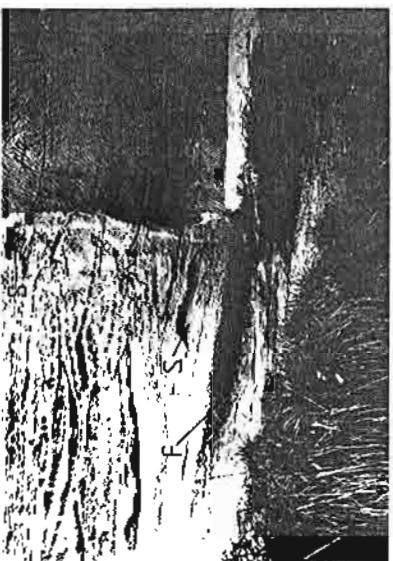
Deutlich wird in Figur 7a die Kreuzschichtung durch Alveolarverwitterung hervorgehoben. Nahe der vertikalen Abbaukante sind Wasserläufe und an zwei Stellen Schalenbildung (S) zu erkennen. Bei den dunklen horizontalen Streifen (F) handelt es sich um Fett aus der Wolle von Schafen, welche hier zu liegen pflegen.

Die Fotografie 7b wurde direkt südlich anschliessend an 7a aufgenommen. Hier ist die Wand durch Laubbäume vor Regen geschützt und es lösen sich bis 5 mm dicke Schalen von der Steinoberfläche.

Diese Schalen sind leicht gelblich gefärbt. Im Dünnschliff kann beobachtet werden, dass sämtliche Poren in diesen Schalen mit feinstkörnigem Kalzit gefüllt sind. Auf der Oberfläche tragen die Schalen eine 10 bis 100 um dicke Kalksinterkruste, welche stellenweise überlagert wird von einer ebenso dünnen, farblosen Gipskruste (im wässrigen Auszug wurde neben Ca^{2+} und SO_4^{2-} noch Na^+ nachgewiesen). Die hinter Schalen normalerweise zu beobachtende Lockerzone fehlt hier fast ganz.



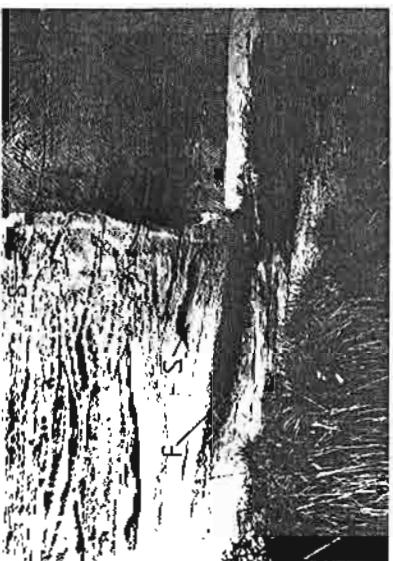
b)



a)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



b)



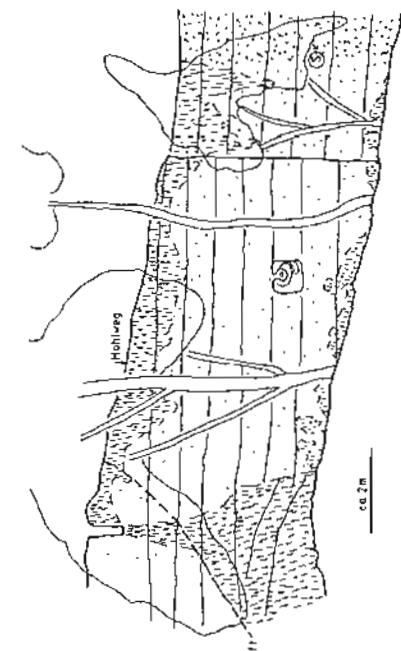
b)



b)



ehemalige Steinbruchwand am Ostermundigenberg, südlich des heutigen Betrieb stehenden Steinbruchs. Die Wand ist NE-exponiert und liegt direkt an einem Hohlweg angrenzend.



Figur 9: Skizze des Aufschlusses 12 am Ostermundigenberg. Die horizontalen Linien entsprechen den verschiedenen Abbauniveaus, und die in der Wandmitte eingezeichnete Figur entspricht einer an dieser Stelle eingemeisselten Zeichnung. Die Baumstämme und groben Aeste sind undurchsichtig eingezeichnet, die Kronen dagegen sind nur mit ihren Umrissen angedeutet.

In Bodennähe und zuoberst ist die Wand mit Algen, Flechten und Moosen bewachsen. Im Bereich dazwischen sanden die Steine leicht ab. Ganz rechts in Figur 9, wo keine Aeste die Wand abschirmen, ist eine Zone mit stärkerem Absanden und mit Gipsausblühungen (S) ausgebildet. Entlang der Kluft tritt offenbar viel Wasser aus, so dass die darunter liegenden Teile stark bewachsen und feucht sind.

regengeschützt sanden die Steine stark ab, oder sie flocken auf. Starkes Absanden steht fast immer mit periodisch ausblühenden Salzen in Zusammenhang.

An vollständig regengeschützten Stellen sind die Steine meist mit einer Gipskruste überzogen, welche sich mit der Zeit an Ecken und Kanten vom Stein löst und dabei die oberste Sandsteinschicht mitreißt.

Schalenbildungen treten vor allem an senkrechten Stellen im direkt beregneten Bereich oder an andern Stellen, welche periodisch stark benetzt werden, auf. An Lisenensteinen von Wetterfassaden oder an Steinen direkt oberhalb von Gurten ist oft ein Aufblühen der Steine zu beobachten, welches in Schalenbildung übergehen kann. Bis zu 20 cm tief reichende Auflockerung ist vor allem an Stützmauern nicht selten zu beobachten.

Waagrechte, direkt beregnete Stellen sind meist mit Algen und Flechten bewachsen. Aufblättern ist nur an falsch versetzten Steinen und an Fensterbänken zu finden.

Auch die in Naturaufschlüssen gefundenen Verwitterungsscheinungen an Berner Sandsteinen sind vor allem starkes bis schwaches Absanden, manchmal zusammen mit Salzausblühungen von Kalzium-, Magnesium- und/oder Natriumsulfat. Das Absanden kann auch hier in Alveolarverwitterung übergehen und tritt fast ausschliesslich an teilregengeschützten Stellen auf. An direkt beregneten Stellen wurde manchmal auch Schalenbildung angetroffen, allerdings meist ohne die hinter den Schalen an Gebäuden zu beobachtende, Lockerzone.

2.5 ZUSAMMENFASSUNG

Die häufigste beobachtete Verwitterungsform an Gebäuden aus Berner Sandstein ist Absanden. Starkes Absanden ist vor allem an leicht regengeschützten Stellen anzutreffen, wo es lokal als Alveolarverwitterung auftritt. Auch im Übergangsbereich von beregnet zu

3 ARBEITSMETHODEN

3.1 Felduntersuchungen

3.1.1 Vergleich_Naturaufschluss/Gebäude

Für das Verständnis der Verwitterungsvorgänge an Gebäuden ist es nötig, auch die Verwitterung der Gesteine im Naturaufschluss zu studieren. Dieses Studium kann Aufschlüsse über die für das Gestein typischen Eigenschaften geben, welche mehr oder weniger unabhängig von der Verwendungsart des Steins und der lokalen Luftverschmutzung sind.

Allerdings bestehen wesentliche Unterschiede zwischen Bauwerk und Naturaufschluss. Diese hat Zehnder (1982) aufgezeigt: an teilregengeschützten, senkrechten Felswänden, fand er mit Gebäudesituationen vergleichbare Verwitterungsscheinungen, eine Beobachtung die auch in Aufschlässen von Berner Sandsteinen gemacht werden kann.

3.1.2 Probenahme

A) Unverwitterte Proben

In der Umgebung von Bern werden noch in den Steinbrüchen Spiegel (Gurten), Krauchthal und Ostermundigen Berner Sandsteine abgebaut. Von den Steinbruchbetreibern wurde mir je ein grösserer Block der heute erhältlichen Typen, in "Normalqualität", für meine Untersuchungen zur Verfügung gestellt.

Steinbruch	Abbau durch	Typ	Beispiel einer Bezeichnung Verwendung in der Proben Bern
Gurten (Spiegel)	Münsterbauhütte, - Bern	-	Berner Münster GU
Krauchthal	Fa. von Dach, Krauchthal	-	Kirche Peter KRAU und Paul
Ostermundi- gen	C. Bernasconi AG, blau Bern	Eckhaus Markt- gasse - Käfig- gässli (+)	OB grau Eckhaus Waisen- hausplatz - Spitalgasse (+) gelb Alter Aargauer- OGE stalden 30 (+)

(+) aus Bärner Sandstei (1986)

Tabelle 3: Die verschiedenen momentan erhältlichen Typen von Berner Sandstein:

B) Verwitterte Proben:

Für Untersuchungen an Verwitterungsprofilen wurden an der Stützmauer der Münsterplattform an acht Stellen je zwei Bohrkerne entnommen. Die Auswahl der Bohrstellen erfolgte teils durch K. Zehnder und teils durch mich, wobei wir darauf achteten, möglichst viele verschiedene Verwitterungssituationen abzudecken.

Die Bohrungen wurden durch eine Spezialfirma vorgenommen. Es wurde mit Druckluft gespült, damit sich die im Stein enthaltene Salzverteilung nicht verändern konnte.

An vielen Bauten und in Naturaufschlüssen wurden Oberflächenproben von verändertem Gestein, Krusten und Ausblühungssalzen genommen.

3.2 Laboruntersuchungen

3.2.1 Mineralogie und Gesamtgesteinschemie

Die quantitativen Anteile der Mineralien Quarz, Kalifeldspat, Albit, Kalkit und Dolomit wurden aus Pulverpräparaten, die mit dem internen Standard LiF gemischt waren, bestimmt (relativer Fehler $\pm 5\%$). Die Tonminerale wurden semiquantitativ aus orientierten Präparaten der Fraktion $< 2 \mu\text{m}$ bestimmt. Diese Messungen erfolgten auf einem automatischen Röntgendiffraktometer PW 1710 von Philips.

Die Gehalte an anorganischem Kohlenstoff wurden auf dem Coulomat (CS 702) des Geologischen Instituts der Universität Bern gemessen.

Die Gesamtgesteinschemie wurde auf dem XRF-Sequenzspektrometer (Philips PW 1450) des Mineralogischen Instituts der Universität Fribourg gemessen. Zur Herstellung der Glaspillen für die Hauptelementchemie wurden die über Nacht bei 110°C getrockneten Proben eine Stunde lang bei 1050°C geäugt und die Glühverluste (GV) bestimmt. Jeweils 1 g der geäugten Probe wurde mit 5 g Lithiumtetraborat gesmischt, bei 1150°C geschmolzen und anschliessend in eine Au-Pt-Schale gegossen. Nach Berücksichtigung, des beim Aufoxidieren des zweiwertigen Eisens, zusätzlich aufgenommenen Sauerstoffs, des CO_2 -Gehalts wurde der Restglühverlust als H_2O betrachtet. Die Bestimmung des FeO-Gehalts erfolgte colorimetrisch.

3.2.2 Chemie der löslichen Anteile

Die vier Proben OGR 0.5-1.0, OGR 0.25-0.5, OGR 0.18-0.25 und OGR<0.18 wurden in einem Mörser zerstampft und durch Sieben in verschiedene Korngrössenklassen getrennt. Die Probenbezeichnungen geben diese Korngrössenklassen in mm wieder. Die andern frischen

Proben wurden in der Wolframkarbid-Scheibenschwingmühle zu feinem Pulver gemahlen.

Die Bohrkernproben wurden trocken gesägt, und die einzelnen Proben in einer Wolfram-Carbid-Scheibenschwingmühle zu feinem Pulver gemahlen. Einige kleine Proben wurden von Hand gemörsernt.

3.2.2.1 Herstellung der Wasserauszüge

Bei früheren durch das StadtLabor hergestellten Wasserauszügen aus Berner Sandsteinen (Proben Matteschuhhäuser), hatte es sich gezeigt, dass die von Zehnder (1982) vorgeschlagene kurze Kontaktzeit zwischen Probe und Wasser von zwei Minuten, bei einer grösseren Probenmenge unrealistisch ist (Zehnder verwendete 1 g Probe und 100 ml Wasser), da schon die anschliessende Filtration 15 bis 30 Minuten dauert, und so die Kontaktzeit erheblich verlängert wird.

Vorversuche mit Kontaktzeiten (ohne Filtration) von 15 und 35 Minuten respektive 2 Stunden, welche sowohl unter CO_2 -Ausschluss (N_2 -Atmosphäre, CO_2 freies Wasser) als auch ohne CO_2 -Ausschluss durchgeführt wurden, ergaben folgende Resultate.

Tabelle 4: Resultate der Vorversuche zur Herstellung der Wasserauszüge, durchgeführt an einer Probe vom Münster.

Atmosphäre	Kontaktzeit [min]	HCO_3^- [$\mu\text{mol/g}$]	Ca^{2+} [$\mu\text{mol/g}$]	Mg^{2+} [$\mu\text{mol/g}$]
Luft	15	39	43	6.0
"	35	41	42	6.6
"	120	39	38	5.6
N_2	15	43	42	6.5
"	35	40	44	6.1
"	120	36	39	6.4

Wider Erwarten führte eine längere Kontaktzeit nicht zu einer messbaren Zunahme der Konzentrationen (zunehmendes Anlösen der Karbonate). Auch ein Einfluss der Atmosphäre scheint vernachlässigbar zu sein.

Aufgrund dieser Resultate wurde das folgende Vorgehen für die Herstellung der Wasserauszüge gewählt:

- 4 bis 4.5 g Gesteinspulver in eine Polypropylenflasche einwägen
- Flasche mit Stickstoff füllen
- 400 bis 450 ml Austauscherwasser dazugeben (im Austauscherwasser war das CO₂ dank dem Durchperlen von N₂ mindestens teilweise ersetzt worden)
- die Suspension 90 Minuten lang etwa alle 10 Minuten kräftig schütteln
- durch 0.45 µm Membranfilter (BA85, Schleicher und Schüll) mit Hilfe einer Wasserstrahlpumpe in einen Rundkolben abfiltrieren (Dauer je nach Menge und Feinkörnigkeit der Probe 15 – 30 Minuten)

3.2.2.2 Quantitative Bestimmung der Ionen Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, Na⁺, K⁺, NH₄⁺, Ca²⁺

An ungefähr 100 mg des Wasserauszugs wird sofort nach der Filtration der Säureverbrauch bis pH 4.3 (SV_{4.3}), nach der Vorschrift des Schweizerischen Lebensmittelbuches (1985), durch potentiometrische Titration mit HCl 0.04 mol/l, automatisiert mit Metrohm Potentiograph, bestimmt und das pH der Lösung gemessen.

Unter der Annahme, dass die Lösung hauptsächlich durch Kohlensäure und ihre Anionen gepuffert ist, gilt näherungsweise:

$$[\text{HCO}_3^-] = 1000 (\text{SV}_{4.3} \text{ (Lösung)} - \text{SV}_{4.3} \text{ (Blindprobe)}) [\mu\text{mol/l}]$$

Blindprobe = Austauscherwasser, gleich behandelt wie die Wasserauszüge.

Der Fehler der SV_{4.3}-Bestimmung beträgt ± 0.02 µmol/l.
Die niedrig konzentrierten Lösungen erlaubten keine pH-Messung mit pH-Stäbchen, so dass die pH-Werte mit Glaselektroden gemessen wurden.

- Die Messungen der Ionen Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Na⁺, K⁺, NH₄⁺, Mg²⁺ und Ca²⁺ erfolgten auf dem Druckionenchromatografen (Dionex 2010i) des Stadtlabors. Der relative Fehler der Messungen liegt bei ±10%, für Messungen von sehr niedrigen Konzentrationen höher.
- Da die Proben aus maschinellen Gründen nicht umittelbar nach der Filtration gemessen werden konnten, wurden die Lösungen in Polypropylen- (einige wenige auch in Polyäthylen-) Fläschchen im Kühlenschrank aufbewahrt.

- Die Wasserauszüge aus Bohrkernproben der Natteschulhäuser wurden vom Stadtlabor hergestellt und mittels Atomabsorption gemessen. Die Resultate dieser Messungen wurden mir durch das Stadtlabor zur Verfügung gestellt.

3.2.3 Bestimmung der löslichen Ausblühungssalze

- Schnelle optische und mikrochemische Methoden zur qualitativen Bestimmung der löslichen Ausblühungssalze wurden von Arnold (1984a) ausführlich beschrieben. Bei diesen Methoden werden in einem ersten Schritt die optischen Eigenschaften der Salze bestimmt. In einem zweiten Schritt werden die Salze in Lösung gebracht und die in der Lösung enthaltenen Ionen werden analysiert.
- Einige Proben wurden auch röntgenografisch bestimmt (Diffraktometer PW 1710 oder Guinier-Kamera FR 552 von Enraf-Nonius).

3.2.4 Porenanalysen

3.2.4.1 Bestimmung des Porenvolumens

- A) Die absolute Porosität (de Quervain, 1967) kann aus dem Raumgewicht (RG) und dem spezifischen Gewicht (SG) wie folgt berechnet werden:

absolute Porosität (Pa) = (1 - RG / SG) mal 100; [Vol-%]
Das Raumgewicht wurde mittels des Auftriebes der Probe in Quecksilber, das spezifische Gewicht mittels der Pyknometermethode bestimmt.

Neben der erwähnten Bestimmung der absoluten Porosität, wurde die aufgenommene Wassermenge unter Vakuum, durch längssames Eintauchen und durch kapillares Saugen, gemessen.

B) Wasseraufnahme unter Vakuum (P_v , W_v): Die bis zur Gewichtskonstanten getrockneten Proben (Würfel 4x4x4 cm) wurden in einem Topf während einer Stunde evakuiert. Anschliessend wurde luftfries, deionisiertes Wasser eingelassen, bis alle Proben vollständig bedeckt waren. Anschliessend wurde das Gefäß belüftet, die Proben blieben noch 24 Stunden unter Wasserbedeckung. Die wassergesättigten Proben wurden herausgenommen, mit einem feuchten Lappen abgewischt und gewogen. W_v = Wasseraufnahme unter Vakuum in % des Trockengewichts, $P_v = W_v / m_0$ RG [Vol-%].

C) Wasseraufnahme durch längssames Eintauchen (w_{24h} , w_{48h} , W_{sl} , S): Die bis zur Gewichtskonstanten (RILEM 25-PEN, 1980) getrockneten Proben (Würfel 4x4x4 cm oder Bohrkernstücke) wurden in 1 cm tiefes, deionisiertes Wasser gestellt. Der Wasserstand wurde laufend erhöht (nie höher als die Feuchtigkeitsgrenze in den Proben), so dass die Proben nach ca. einer Stunde vollständig unter Wasser lagen. Wägungen erfolgten jeweils nach dem Abwischen des Oberflächenwassers mit einem feuchten Lappen. w_{24h} respektive w_{48h} stellen die Wasseraufnahme durch längssames Eintauchen nach 24 resp. 48 Stunden in % des Trockengewichts dar. W_{sl} bedeutet die Wasseraufnahme in % des Trockengewichts bei Erreichen der Gewichtskonstantz, das heisst, wenn die Gewichtszunahme innerhalb von 24 Stunden kleiner als 0.1% des zuletzt gewogenen Gewichts wird.

Das Verhältnis von w_{48h} zu W_{sl} ergibt den Sättigungskoeffizienten S (Hirschwald, 1908).

D) Wasseraufnahme durch kapillares Saugen (w_{24hk} , w_{48hk} , A, B):

Je 3 Prismen der Grösse 4x4x10 wurden pro Sandsteintyp (GU, KRAU, OB, OGR, OGE) so gesägt, dass ihre lange Seite senkrecht zur Schichtung lag. Nur je ein Prisma wurde parallel der Schichtung gesägt.

Von den Proben KR und KM war nicht genügend Material vorhanden, weshalb hier Bohrkernstücke von 10 cm Höhe benutzt wurden, welche kongruente Grund- und Deckflächen in der Form rechtwinkliger Dreiecke mit gebogener Hypothenusse aufwiesen. Von der Probe KR

Konnten nur 2, von der Probe KM sogar nur ein solcher Probenkörper gewonnen werden. Auf die Messung der Wasseraufnahme parallel zur Schichtung musste ganz verzichtet werden.

Alle Proben wurden zuerst bis zur Gewichtskonstantz getrocknet (nach den Vorschriften in RILEM 25-PEN, 1980) und gewogen (Trockengewicht). Anschliessend wurden die Proben aufrecht in 5 mm tiefes Wasser in einer zudeckbaren Glaswanne gestellt, wie dies Boussique (1979) ausführlich beschrieben hat. Einzig der automatische Wassernachschnitt wurde weggelassen, da die Berner Sandsteine das Wasser sehr schnell aufsaugen (relativ kurze Versuchsdauer) und die Verdunstung aus der verschlossenen Wanne heraus sehr gering ist. Nach bestimmten Zeitintervallen wurde die Grenze trocken/nass auf der Probenoberfläche markiert, die Prüfkörper wurden kurz herausgenommen, mit einem feuchten Lappen abgewischt, gewogen und sofort wieder zurückgestellt.

Nachdem die Feuchtigkeit die Deckflächen der Proben erreicht hatte, wurden die Sandsteinklötzchen noch bis 24 respektive 48 Stunden nach Versuchsbeginn im zugedeckten Becken belassen. Nach Ablauf dieser Fristen wurden die Körper gewogen und die Gewichtszunahme in % des Trockengewichts berechnet (w_{24h} resp. w_{48hk}).

Im Folgenden wird die Berechnung der Materialkennwerte A und B nur kurz dargelegt, ihre Berechnung ist im Anhang ausführlich beschrieben.

Unter dem kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten A wird die Steigung der Regressionsgeraden im Diagramm $\Delta \text{Gew}/F$ gegen die Wurzel der Zeit verstanden. Der kapillare Wassereindringkoeffizient B stellt die Steigung der Regressionsgeraden im Diagramm Steighöhe (h) gegen Wurzel Zeit dar.

Beim Auftragen der Steighöhe (h) beziehungsweise der Gewichtszunahme pro Grundfläche ($\Delta \text{Gew}/F$) gegen die Quadratwurzel der Zeit zeigte es sich, dass die Kurven im allgemeinen erst nach etwa 15 Minuten (was 30 sec^{1/2} entspricht) Saugzeit linear verlaufen (siehe Figur 60 im Anhang). Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Proben ja in 5 mm tiefes Wasser gestellt wurden, und somit am Anfang die Wasserzufluss nicht bloss durch die Grundfläche, sondern auch durch einen Teil der Seitenflächen erfolgt. Der Einfluss dieser

seitlichen Wasserzuflüsse schwächt sich aber sehr rasch ab und zeigt nach 15 Minuten keine messbare Wirkung mehr. Weiter liegen die Schnittpunkte der Regressionsgeraden mit der y-Achse (dGew/F resp. h) bei jeder Probe in verschiedener Höhe, was dadurch zu erklären ist, dass der ursprüngliche Wasserstand nicht bei allen Versuchen genau 5 mm war.

Die dadurch für die Berechnung der Regressionsgeraden notwendige Normierung der Messwerte ist im Anhang ausführlich dargestellt. Die Regressionsgeraden wurden mit Hilfe der SAS-Prozedur REG auf dem IBM-Computer der BEAG berechnet (Methode der kleinsten Quadrate).

Die komplizierte Normierung der Messwerte könnte vermieden werden, wenn der kapillare Wasseraufnahmekoeffizient A nach den RILEM-Vorschlägen (RILEM PEM-25, 1980) gemessen würde, wo empfohlen wird, die senkrechten Seiten der Prüfkörper zuerst einzuwachsen, um seitliches Eindringen von Wasser zu verhindern. Bei diesem Verfahren kann aber der kapillare Wasseraufnahmekoeffizient B nicht gemessen werden, weshalb das oben beschriebene, etwas kompliziertere Vorgehen gewählt worden ist.

E) Wasseraufstiegs geschwindigkeit an Bohrkernen:

Die Geschwindigkeit, mit der eine Wasserfront in einem porösen Material aufsteigt, hängt von der Porenweite ab und kann dazu benutzt werden, in Bohrkernen die Tiefe der Auflockerungszone zu bestimmen.

Zu dem Zweck werden die Kerne (diese können natürlich anschliessend nicht mehr zur Bestimmung der löslichen Salze benutzt werden) in einer Plastikwanne der Länge nach auf eine wasser durchtränkte Schaumstoffunterlage gelegt. Nach bestimmten Zeitintervallen wird auf der Kernoberfläche die Nass-/Trockengrenze angezeichnet. Je höher die Wasserfront an einer bestimmten Stelle des Bohrkerns zu einem gegebenen Zeitpunkt ist, desto grösser ist die durchschnittliche Porengröße an diesem Ort, verglichen mit einer Stelle wo die Front tiefer liegt.

Die Wasseraufstiegsgeschwindigkeiten an Bohrkernen aus der Stützmauer der Münsterplattform wurden zum grösseren Teil durch das Technische Labor des Instituts für Denkmalpflege der ETH-Zürich durchgeführt.

3.2.4.2 Quecksilberdruckporosimetrie

Auf dem Quecksilber-Druckporosimeter (Carlo Erba 60), des Tonmineralogischen Labors der ETH-Zürich, wurde das offene Porenvolumen und eine idealisierte Porengrössenverteilung bestimmt. In einem ersten manuellen Messvorgang wurde die offene Porosität mit Äquivalentradien r von 0.13 mm bis 6.3 um gemessen (Vakumbereich 35 bis 760 Torr, Kontaktwinkel 130°). Im anschliessenden automatischen Messstiel konnten, im Druckbereich von 1 bis 1000 atm, Poren volumen mit Äquivalentradien von 6.3 bis 0.0063 um erfasst werden. Der Äquivalentradius ist dabei gleich dem Radius einer zylindrischen Pore, in die das Quecksilber bei gegebenem Druck eindringen würde. Unmittelbar nach der Messung wurden die Proben nochmals gewogen, um die darin zurückgebliebene Hg-Menge zu ermitteln und so einen Ein druck über das Volumen der gefangenen Porosität (Kapitel 3.5.3.3) zu haben.

Der Messvorgang und die Maschine werden von Niesel und Schimmelwitz (1982) sehr anschaulich grafisch dargestellt. Aus apparativen Gründen war es nicht möglich, neueste Messtechniken mit wiederholten Injektions- und Rückzugskurven anzuwenden, wie sie bei Peillerin (1980) und Bousquet (1979) beschrieben sind.

2.2.4.3 Dünnschliffporosimetrie

Um die Porenräume direkt beobachten zu können, wurden Proben vor der Herstellung der Dünnschliffe mit farbigem Harz imprägniert.

A) Herstellung der imprägnierten Dünnschliffe

Eine Serie von imprägnierten Dünnschliffen von unverwitterten Berner-Sandstein-Proben wurde am Geologischen Institut der Universität Strassburg durch D. Jeannette hergestellt. Dabei wurde je eine Probe unter Vakuum vollständig mit rotem Harz imprägniert. In einer zweiten Probenserie wurde rotes Harz kapillar eingesogen und zwar bei der Temperatur der kleinsten Viskosität des Harzes. Anschliessend wurden die Proben gesägt, poliert und sehr sauber gewaschen (Entfernung des Schleifstaubes). Die in der polierten Oberfläche verbliebenen Hohlräume wurden danach mit blauem Harz gefüllt (Genaue

Arbeitsvorschrift bei D. Jeannette). Bei dieser Prozedur wird sowohl die gefangene als auch die geschlossene Porosität (siehe Kapitel 4.5.4.1) durch blaues Harz sichtbar gemacht.

Um einen Eindruck über die Porenverteilung zu erhalten, genügt es oft, die Proben nach dem Sägen und Trocknen mit gefärbtem Harz zu beträufeln. Die Dünnsschliffe werden dann aus der obersten Schicht hergestellt.

Vor allem bei aufgelockerten Proben werden mit dieser Methode recht gute Resultate erzielt. In grossen Hohlräumen kommen noch ungefärbte Stellen vor, die aber durch ihre kugelige Gestalt als Luftblasen zu erkennen sind.

B) Pointcounter-Analysen

Benutzt wurde die Pointcounting-Methode nach Glagolev-Chays (Galehouse, 1971) an imprägnierten Dünnschliffen, mit der die Flächenanteile der einzelnen Bestandteile bestimmt werden können.

Chayes (1956) hat auch gezeigt, dass diese Flächenprozente den Volumenanteilen der ausgezählten Bestandteile im Gestein entsprechen. Er betont auch, dass die Methode unabhängig von der Orientierung oder der Form der gezählten Komponenten ist.

Die Zählungen erfolgten mit einem Swift Automatic Pointcounter, Model F.

Die Angabe des absoluten Fehlers ($E_{95.4}$) bezieht sich auf die Angaben von Galehouse (1971). $E_{95.4}$ gibt den Bereich um den ermittelten Wert in % an, in den der wirkliche Wert mit 95.4-prozentiger Wahrscheinlichkeit fällt, d.h. der Fehler ist abhängig von der Anzahl gezählter Punkte. Es wurden jeweils 500 Punkte pro Schliff gezählt (machmal 1000).

3.2.4.4 REM-Untersuchungen

An einigen ausgewählten Proben wurden die Gefüge und Poreninhalte unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM) des Geologischen Instituts der Uni Bern angesehen. Einige Proben wurden auch auf dem REM des Physikalischen Instituts untersucht, da dieses Gerät mit einem EDAX-System ausgerüstet ist und somit qualitative, chemische Analysen erlaubt.

3.2.4.5 Ausdehnung bei Wasseraufnahme

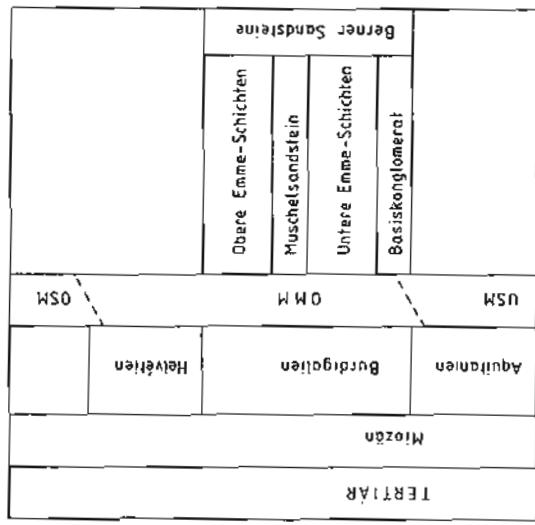
Die Ausdehnung bei Wasseraufnahme von unverwitterten Berner-Sandstein-Proben wurden im Laboratoire de Conservation de la Pierre an der EPF-Lausanne durch C. Félix gemessen. Die Proben hatten die Grösse 4x4x10 cm und waren senkrecht und in wenigen Fällen auch parallel zur Schichtung gesägt. Die Versuche erfolgten nach der Methode, wie sie in Félix und Furian (1982) beschrieben ist, mit einer Eintauchzeit von einer Stunde ("immersion progressive").

4 Eigenschaften der Berner Sandsteine

4.1 Geologischer Rahmen

Zu den wichtigsten regionalgeologischen Arbeiten über das Abgebiet der Berner Sandsteine gehören: Studer (1825), Gerber (1926), Rutsch (1933), Frasson (1947), Gerber (1950), Rutsch und Frasson (1953), Büchi et al. (1965), Rutsch (1967), Rutsch und Schlüchter (1973) sowie Gerber (1982).

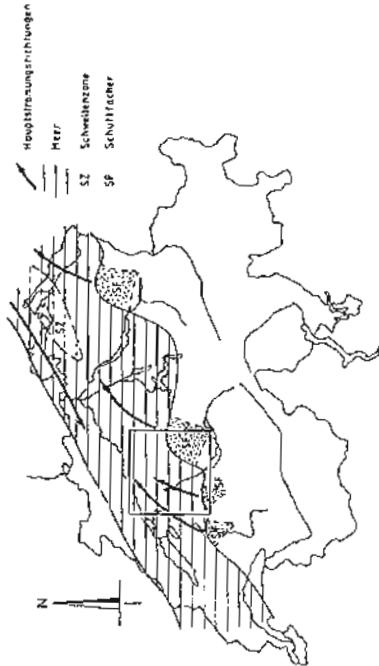
Die Berner Sandsteine gehören zu den Molasseablagerungen, welche fast ausschliesslich aus dem Abtragungsschutt der sich hebenden Alpen entstanden. Je nachdem ob dieser Alpendetritus in einem Meer oder in einer kontinentalen Umgebung abgelagert wurde, wird die Molasse als Meeres- oder Süßwassermolasse bezeichnet. Die Berner Sandsteine entstanden im unteren Teil der Oberen Meeresmolasse (OMM), zur Zeit des Burdigalien.



Figur 10: Stratigrafische Zuordnung der Berner Sandsteine;
nach Gerber (1982).

Zu Beginn des Burdigalien wurde das Molassebecken durch ein tiefes Meer überflutet, welches das Rhone- mit dem Wienerbecken verband. Die Berner Sandsteine wurden als Teile der zu den grossen Schuttflächen am Südufer dieses Meeres gehörenden, subaquatischen Deltakomplexe abgelagert. Das Ablagerungsmilieu wurde durch starke Küstenparallele, nach Osten gerichtete Strömungen und durch die Gezeiten beeinflusst.

Figur 11: Paläogeografische Übersichtskarte der Schweiz zur Zeit der Oberen Meeres Molasse; nach Trümpy (1980).



In der Umgebung von Bern unterteilt Gerber (1982) das Burdigalien in die Unteren und Oberen Emme-Schichten, welche auf dem Basis Konglomerat liegen und durch einen Muschelkalsandsteinhorizont voneinander getrennt werden (Figur 10). Die drei heute noch in Betrieb befindlichen Berner-Sandstein-Brüche liegen alle innerhalb der Oberen Emme-Schichten; der Steinbruch von Ostermundigen liegt direkt über dem Muschelkalsandsteinhorizont, so dass er ausserhalb der 150m-Isopache der Deltalöben in der Figur 12 zu liegen kommt. Die Steinbrüche Krauchthal und Gurtlen liegen im Zentrum respektive an der Front ihrer jeweiligen Deltalöben.

bis gelblich. Dabei scheint Blau die ursprüngliche Farbe zu sein.

Aus der Gegenüberstellung der Farben mit den $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ -Verhältnissen (Tabelle 5) geht hervor, dass die blauen Berner Sandsteine ein tieferes $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ -Verhältnis aufweisen als die gelben Sandsteine.

Dazwischen kommen die grauen Sandsteine zu liegen. Dies stimmt mit der Beobachtung von Zgraggen und Peters (1980) überein, wonach die gräulichen und gelblichen Farben "auf die Zersetzung eisenhaltiger Minerale" zurückzuführen sei (vor allem Glaukonit und zum Teil Biotit).

Tabelle 5: Einfluss des $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ -Verhältnisses auf die Farbe der Berner Sandsteine.

Probe	Farbe	$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$
GU	blau-grau	0.82
OB	blau	1.22
OGR	grau	1.56
CGE	gelb	2.29
KRAU	gelb-grau	1.45
KM	gelb-grau	1.66
KR	gelb-grau	1.83

GU: Gurten; OB: Ostermundigen Blau; OGR: Ostermundigen Grau; OGE: Ostermundigen Gelb; KRAU: Krauchthal; KM und KR: Bohrkerne Krauchthal mit Mergelschmitzen resp. ohne Mergelschmitzen.
 In der Stadt Bern werden (und wurden) hauptsächlich gelbliche und gräuliche Sandsteine verwendet, dies wohl nicht zuletzt, weil sie am häufigsten aufgeschlossen sind, respektive weil eine einmal in gelbem Sandstein erstellte Fassade nicht ohne weiteres mit blauem Sandstein geflickt werden kann. Mancherorts wurden aber verschiedenfarbige Sandsteine als Gestaltungsmittel eingesetzt (zum Beispiel Aarbergergasse 40).

4.2 Mineralogie-Petrografie

Der Unterteilung klastischer Sedimente nach Füchtbauer und Müller (1977) folgend, sind die Berner Sandsteine feldspatreiche Sandsteine mit Gesteinsbruchstücken. Von der Korngrösse her gehören sie zu den Fein- bis Mittelsandsteinen (ihre mittlere Korngrösse liegt meistens zwischen 0.1 und 0.3 mm.).

Zur Verwendung an Bauten werden heute vor allem grobbankige und makroskopisch homogene Berner Sandsteine abgebaut. Eine Ausnahme bilden die am Münster verwendeten Gurten-Sandsteine, welche meist eine deutliche Reinschichtung aufweisen.

An älteren Bauten können oft Sandsteine mit Rippen oder Kreuzschichtung beobachtet werden (zum Beispiel am Alten Schlachthaus).

Häufig sind auch Steine mit Mergelklasten oder -linsen, sogenannten Lebern, anzutreffen (zum Beispiel an der Rabbenthalstrasse 78).

Die Farbe der Berner Sandsteine reicht von bläulich über gräulich

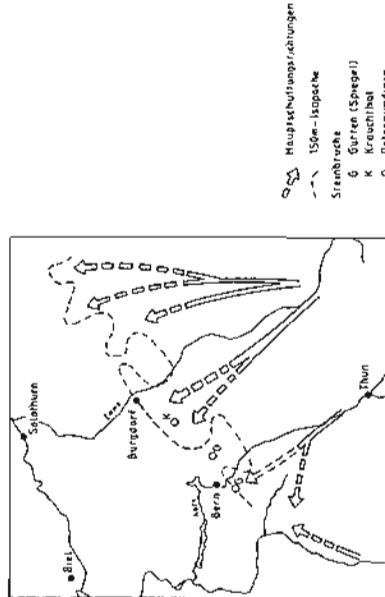


Tabelle 6: Mineralogische und chemische Zusammensetzung der fünf frischen Berner Sandsteinproben und von KM und KR.

Probe	GU				OB				OGE				KRAU				KR			
	Quarz	38	50	47	46	KM	45	43	KRAU	45	43	45	KR	45	43	45	KR	45		
Abit	14	15	15	17		17	15	17		17	15	17		17	15	17				
Kalifelspat	9	8	8	13		6	9	11		6	9	11		6	9	11				
Kalzit	23	17	17	16		20	14	13		20	14	13		20	14	13				
Dolomit	8	6	6	5		3	6	5		3	6	5		3	6	5				
KM	8	4	7	3		4	13	9		4	13	9		4	13	9				
Tonschiezahlen in % von THI																				
Illit	45	55	50	35		50	50	50		50	50	50		50	50	50				
Chlorit	20	30	20	25		20	20	20		20	20	20		20	20	20				
Spektit	35	15	30	40		30	30	30		30	30	30		30	30	30				
SiO ₂	56.03	61.37	61.69	63.56		58.77	58.77	58.77		58.77	58.77	58.77		58.77	58.77	58.77				
TiO ₂	0.34	0.25	0.25	0.24		0.24	0.24	0.24		0.24	0.24	0.24		0.24	0.24	0.24				
Al ₂ O ₃	7.34	7.05	7.05	6.96		6.96	6.96	6.96		6.96	6.96	6.96		6.96	6.96	6.96				
Fe ₂ O ₃	1.08	1.40	1.56	1.03		1.42	1.42	1.42		1.42	1.42	1.42		1.42	1.42	1.42				
FeO	1.32	1.15	1.00	0.80		0.98	0.98	0.98		0.98	0.98	0.98		0.98	0.98	0.98				
MnO	0.08	0.06	0.06	0.06		0.06	0.06	0.06		0.06	0.06	0.06		0.06	0.06	0.06				
MgO	3.06	2.82	2.63	2.35		3.09	3.09	3.09		3.09	3.09	3.09		3.09	3.09	3.09				
CaO	13.50	10.87	10.83	9.78		12.06	11.93	10.65		12.06	11.93	10.65		12.06	11.93	10.65				
Na ₂ O	1.47	1.58	1.84	1.60		1.52	1.52	1.42		1.52	1.52	1.42		1.52	1.52	1.42				
K ₂ O	1.80	2.01	2.04	2.07		1.91	2.00	1.99		2.00	1.91	1.99		2.00	1.91	1.99				
P ₂ O ₅	0.13	0.20	0.20	0.17		0.23	0.23	0.22		0.23	0.23	0.22		0.23	0.23	0.22				
H ₂ O _r	0.10	0.09	0.10	0.12		0.10	0.12	0.12		0.10	0.12	0.12		0.10	0.12	0.12				
CO ₂	14.08	10.56	10.42	9.26		12.52	9.76	8.83		12.52	9.76	8.83		12.52	9.76	8.83				
Total	100.33	99.43	99.67	98.30		99.86	99.85	99.45		99.86	99.85	99.45		99.86	99.85	99.45				

GU: Gurten, OB: Ostermundigen blau, OGE: Ostermundigen gelb, OGR: Ostermundigen grau, KRAU: Krauchthal, KM und KR: Bohrkerne Krauchthal mit Mergelstützen resp. ohne Mergelstützen.

In dieser Aufstellung treten vor allem die Proben GU und KRAU durch etwas erhöhte Karbonat- und CaO-Gehalte hervor. In Dünnabschliffen kann beobachtet werden, dass das Bindemittel der Berner Sandsteine durch eisenhaltigen, isometrischen Kalzitzement (B-Zement) gebildet wird. Allerdings tritt Kalzit nicht bloss als Zement, sondern auch als detritische Körner auf. Darum sagt der Kalzitzgehalt alleine noch nichts über die Menge an Zement und somit über die Festigkeit aus.

Mittels Pointcounter-Analysen wurde versucht, den Anteil Bindemittel am Gesamtkarbonat zu bestimmen. Die Resultate der Zählungen sind in Tabelle 7 zusammenge stellt.

Tabelle 7: Pointcounter-Resultate zur Ermittlung des Bindemittelanteils am Gesamtgestein [Vol-%]

Probe	Punkte				Anzahl				detr				deka				Zeme				Gla				SuPo				Poro			
	GU	OB	OGE	KRAU	GU	OB	OGE	KRAU	GU	OB	OGE	KRAU	GU	OB	OGE	KRAU	GU	OB	OGE	KRAU	GU	OB	OGE	KRAU	GU	OB	OGE	KRAU	GU	OB	OGE	KRAU
GU	2000	57.1	2.2	10.8	±	1.4		12.3	±	1.5		9.9	±	0.4		1.9	±	0.6		1.7	±	0.5		15.1	±	1.3						
OB	2000	60.0	±	2.2		9.7	±	1.3		9.1	±	1.3		1.9	±	0.6		1.6	±	0.6		17.7	±	1.7								
OGE	2000	58.8	±	2.2		9.1	±	1.3		7.0	±	1.1		2.7	±	0.7		1.6	±	0.6		20.8	±	1.8								
KRAU	1500	55.0	±	2.6		11.7	±	1.7		9.2	±	1.5		2.1	±	0.7		2.3	±	0.8		19.7	±	2.1								
KR	1500	60.4	±	2.2		10.9	±	1.4		10.3	±	1.4		2.0	±	0.6		0.8	±	0.4		15.6	±	1.6								

Es zeigt sich ein Zusammenhang zwischen "guten Bausteinen", als was die Gurten-Sandsteine angesehen werden, und hohen Zementanteilen. Wie die folgenden Überlegungen zeigen, sollte dieser Zusammenhang allerdings nicht überbewertet werden.

Um einen Eindruck über die Genauigkeit der Pointcounter-Methode zu geben, werden in Figur 13 die Gesamtkarbonatgehalte, welche mit dieser Methode bestimmt wurden, gegen die diffraktometrisch bestimmten Karbonatgehalte aufgetragen.

Da beim Röntgen Gewichts-, beim Auszählen aber Volumenanteile ermittelt werden, ist für die Gegenüberstellung der Daten eine Umrechnung der Werte nötig. Dazu bieten sich eher die Diffraktometerdaten an, weil hier das Kalzit-Dolomit-Verhältnis bekannt ist.

Die Karbonatgehalte in Volumen-% wurden aus den Diffraktometerdaten wie folgt berechnet:

Gesamtkarbonat =

RG der Probe mal ((Gew-% CC/SG CC) + (Gew-% Do/SG Do))

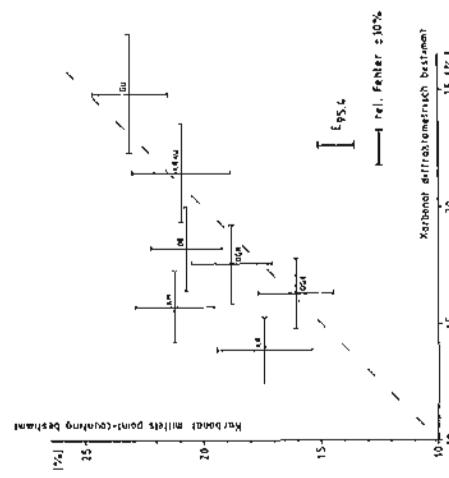
SG CC = 2.79 [g/cm³] (Fe-haltiger Kalzit)

SG Do = 2.86 [g/cm³]

Werte nach Deer, Howie und Zussman (1962)

RG: Raumgewicht (Werte siehe unter 4.4)

SG: spezifisches Gewicht



Figur 13: Vergleich der Pointcounter-Analysen mit den in Volumen-% umgerechneten Diffraktometerdaten der Karbonate.

Die gestrichelte Linie in der Figur 13 stellt die Gerade mit der Steigung 1 dar, auf der die Punkte, bei genauer Übereinstimmung, liegen müssten.

Für die beiden Proben KR und KM sind die diffraktometrisch bestimmten Karbonatgehalte deutlich tiefer als die mittels Pointcounter bestimmten Werte. In beiden Proben wurden bei den Dünnschliffanalysen nur mergelfreie Partien berücksichtigt, was wohl den

Hauptgrund für die starken Abweichungen ausmachen dürfte. Die Mergelklasten enthalten weniger Karbonate als der Rest des Sandsteins.

Für die anderen fünf Proben ergeben die zwei Bestimmungsmethoden recht ähnliche Resultate. Die Abweichungen sind aber zu gross, so dass keine feinen Unterschiede herausgelesen werden können. Deshalb sind auch die in Tabelle 7 zusammengestellten Pointcounter-Daten bloss als Richtwerte zu betrachten.

4.3 Geochemie

Die Resultate der XRF-Analysen sind in der Tabelle 6, Kapitel 4.2 zusammengestellt.

Die Herstellung der Wasserauszüge und die Bestimmung der verschiedenen Ionen werden unter 2.2.2 ausführlich dargelegt.

In der nachfolgenden Tabelle 8 sind die wasserlöslichen Anteile für die frischen Berner Sandsteinproben zusammengestellt.

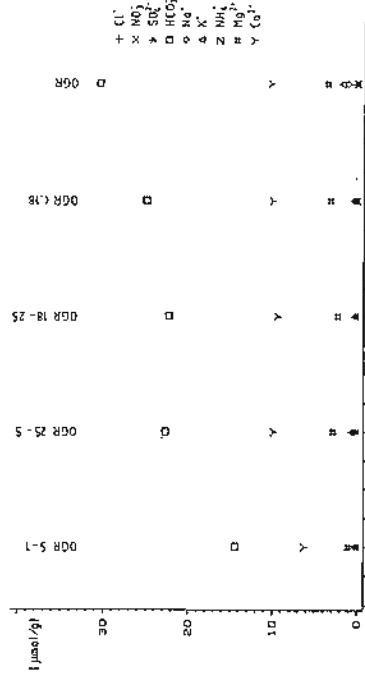
Alle Angaben erfolgen in µmol/g Probe, damit stöchiometrische Überlegungen erleichtert werden; die in ppm umgerechneten Resultate finden sich im Anhang.

Tabelle 8: Chemie der löslichen Auszüge aus frischen Proben von Berner Sandstein. Werte in µmol/g. BIL: Ladungsbilanz

Probe	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	pH	BIL
GU	0.36	0.08	0.89	37	1.75	1.74	0.55	3.45	13.4	9.85	-1
QB	0.34	0.03	0.48	37	1.45	2.41	0.45	5.63	12.3	9.90	2
QGR	0.20	0.01	0.09	31	1.12	1.79	.	3.52	10.2	9.75	-1
GGE	0.24	0.02	0.08	33	1.29	1.86	0.28	3.48	12.6	9.80	2
KRAU	0.22	.	0.11	33	0.70	1.02	0.07	5.36	9.58	9.95	-2
KM	0.47	.	0.25	42	1.86	4.42	0.97	5.43	15.0	9.85	5
KR	0.48	.	0.21	45	1.63	3.93	0.24	5.03	16.0	9.80	2
GSR.5-1	0.27	.	0.10	14	0.26	0.17	.	1.04	6.20	9.35	0
GSR.25-.5	0.24	.	0.08	23	0.24	0.67	0.25	2.83	9.86	9.75	3
GGR.18-.2	0.25	.	0.08	22	0.31	0.31	.	2.27	9.40	9.75	1
GGR.18	0.31	0.01	0.13	25	0.39	0.40	.	3.15	10.00	9.65	1

4.3.1 Zusammenhang zwischen den wasserlöslichen Anteilen und der Korngrösse

Aus den Resultaten der vier Gemörsererten Proben, OGR 0.5-1.0, OGR 0.25-0.5, OGR 0.18-0.25 und OGR < 0.18, die mit der entsprechenden gemahlenen Probe OGR verglichen werden, kann abgelesen werden, welchen Einfluss die Korngrösse, respektive das Mahlen auf die wasserlöslichen Anteile hat (Figur 14). Dies ist deshalb wichtig, weil einige kleine Proben aus den Bohrkernen der Münsterplattform-Stützmauer blass gemörserert wurden, da so am wenigsten Material verloren ging (Kapitel 5.1).



Figur 14: Einfluss der Mahleinheit der Proben auf die löslichen Anteile.

Für die Hydrogenkarbonatwerte, die Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Werte, zeigt sich eine eindeutige Korrelation mit der Korngrösse, was dadurch erklärbar ist, dass diese Ionen sicher zum grössten Teil aus dem Lösen von Calcit und Dolomit stammen.

Chlorid, Sulfat, Nitrat und Ammonium sind in so geringen Mengen vorhanden, dass keine signifikanten Einflüsse der Korngrösse erkennbar sind.

Kalium- und Natrium-Konzentrationen dagegen sind in der gemahelten Probe deutlich grösser als in den von Hand gemörserten Proben. Die erhöhten Konzentrationen könnten damit zusammenhängen, dass die Kontaktfläche Wasser/Probe für die fein pulverisierten Proben am grössten sind, und zudem durch den Mahlvorgang neue reaktive Flächen entstehen.

4.3.2 Wasserlösliche Anteile in frischen Proben

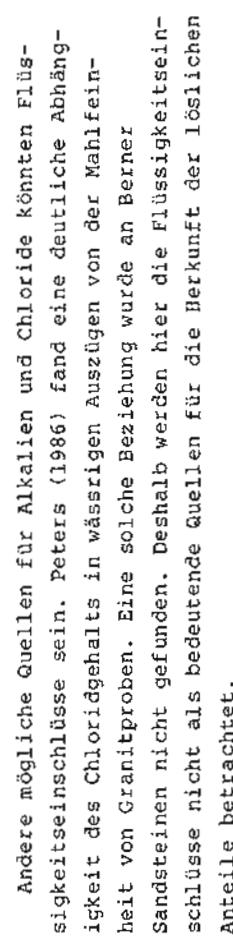
Die in allen Messungen festgestellten hohen pH-Werte lassen sich wie folgt erklären: Beim Mahlen der Proben entstehen neue reaktive Flächen, an denen je nach Mineral Kationen oder Anionen gegen H^+ - oder OH^- -Ionen ausgetauscht werden können. Dieser Vorgang führt zu einer relativen Erhöhung des andern Ions, also des OH^- -respektive H^+ -Ions, in der verbleibenden Lösung. Stevens und Carron (1948) nennen den pH-Wert einer Suspension, die durch Mörsern eines Minerals in destilliertem Wasser hergestellt wird, Abrasions-pH-Wert des Minerals. Sie geben eine Tabelle für eine grosse Anzahl Mineralien. Ausser Glaukonit (Abrasions-pH = 5) haben sämtliche Mineralien, welche in den Berner Sandsteinen mit einem oder mehr Prozenten vertreten sind, einen Abrasions-pH-Wert zwischen 6 und 10.

Die Ladungsbilanzen (BL) sind sicher stark durch den Messfehler der HCO_3^- -Messung von $\pm 2 \mu\text{mol/g}$ beeinflusst. Zudem bedeutet ein pH von 9.8, dass umgerechnet etwa $6.3 \mu\text{mol/g}$ OH^- -Ionen vorhanden sind. Durch Einbezug der OH^- -Ionen werden die Bilanzen durchwegs zu negativen Werten verschoben. Weil das pH aber in allen Messungen etwa gleich hoch ist, wurde die OH^- -Konzentration nicht in die Bilanz einbezogen, da dies höchstens eine mehr oder weniger konstante Verschiebung zu kleineren Werten ergeben würde. Zudem soll die Ionenbilanz vor allem zeigen, ob die wichtigsten Ionen gemessen wurden, oder ob noch weitere Ionen (z.B. organische) vorhanden sind, die nicht erfasst wurden.

Alle gemessenen Ionen, außer Nitrat und Ammonium, sind in allen Proben wenigstens als Spuren vorhanden. Grosse Unterschiede von Probe zu Probe weisen die Sulfatmessungen auf, wo der geringste Wert bloss etwa 10 % des grössten gemessenen Wertes aufweist, alle Werte liegen aber unter $1 \mu\text{mol/g}$.

Die Alkali-Ionen Na^+ und vor allem K^+ zeigen ebenfalls recht deutliche Unterschiede, von einem Faktor 3 bis 4 zwischen der geringsten und der grössten gemessenen Konzentration. Die Gehalte an Na^+ - und K^+ -Ionen scheinen mit den Tonmineralgehalten zu korrelieren (Figur 15). Die Probe mit den Mergelschmitzen (KM) weist die grössten K^+ - und Na^+ -Werte und zudem eine stärker positive Ionengleichung auf als die andern Proben. Es könnte deshalb sein, dass ein grosser Teil des Kaliums aus Illiten und des Natriums aus Smektiten stammt. Andere mögliche Lieferanten für die Alkalien sind die Feldspäte. Die Korrelationen zwischen Na^+ und Albit sowie K^+ und Kalifeldspat (Figur 16) sind aber deutlich schlechter als die Korrelationen der Alkalien mit den Tonmineralien. Ein Teil der Alkalien stammt aber sicher auch aus den Feldspäten.

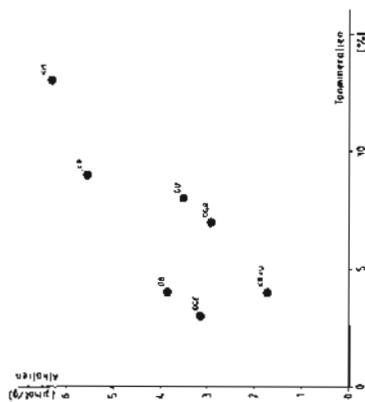
Figur 16: Zusammenhang zwischen Alkalionen und Feldspäten



4.4 Physikalische Eigenschaften

Andere mögliche Quellen für Alkalien und Chloride könnten Flüssigkeitseinschlüsse sein. Peters (1986) fand eine deutliche Abhängigkeit des Chloridgehalts in wässrigen Auszügen von der Mahleinheit von Granitproben. Eine solche Beziehung wurde an Berner Sandsteinen nicht gefunden. Deshalb werden hier die Flüssigkeitseinschlüsse nicht als bedeutende Quellen für die Berkunft der löslichen Anteile betrachtet.

GU: Gurtten, OB: Ostermundigen blau, OGE: Ostermundigen gelb, OGR: Ostermundigen grau, KRAU: Krauchthal, KM und KR: Bohrkerne Krauchthal mit Mergelschmitzen resp. ohne Mergelschmitzen.



Figur 15: Zusammenhang zwischen Alkalionen und Tonmineralien

Angaben über physikalische Eigenschaften der Berner Sandsteine sind in der Literatur nur spärlich zu finden. Die wenigen gefundenen Angaben sind im folgenden zusammengestellt. Sie sind zum Teil durch eigene Messungen ergänzt worden.

Im Bausteinband (1915) wird die Abnützung von Gesteinen, welche durch zehnminütiges Schleifen mit 50 g Schmirgel erzeugt wurde, aufgeführt. Sämtliche Berner Sandsteine, welche damals untersucht wurden, schlossen mit dem Resultat "nicht schleifbar" ab, da ihre Kernbindungsfestigkeit so gering war, dass sie sich bei diesem Versuch sofort in einen "Sandbrei" auflösten.

Die Druckfestigkeiten werden von de Quervain (1969) mit 250 bis 400 kg/cm² für trockene und mit 100 bis 200 kg/cm² für nasse Berner

Sandsteine angegeben. Gerber (1982) ermittelte für bergfeuchte (8 % Wasser), klüftungsfreie Proben eine Druckfestigkeit von 176 ± 16 kg/cm^2 .

Die an den frischen Proben aus Berner Sandstein und an KR und KM ermittelten Raumgewichte und spezifischen Gewichte (RG und SG) sind in Tabelle 9 zusammengestellt.

Tabelle 9: Raum- und spezifische Gewichte (RG respektive SG) der frischen Berner Sandsteine:

Probe	RG [g/cm ³]	SG
GU	2.25	2.71
OB	2.22	2.73
OGR	2.14	2.69
OGE	2.18	2.70
KRAU	2.14	2.71
KM	2.20	2.77
KR	2.16	2.71

GU: Gurten; OB: Ostermundigen Blau; OGR: Ostermundigen Grau; OGE: Ostermundigen Gelb; KRAU: Krauchthal; KM und KR: Bohrkerne Krauchthal mit Mergelschmitzen resp. ohne Mergelschmitzen.

4.5 Stereometrie des Porenraums

Der Porenraum eines Gesteins kann durch direkte oder indirekte Beobachtung erfasst werden. Bei der indirekten Beobachtung werden aus physikalischen Versuchen, mittels mathematisch-geometrischer Modelle, Rückschlüsse auf den Porenraum gezogen. Bei der direkten Beobachtung dagegen wird der Porenraum mit Hilfe des Mikroskops (Raster-, Durchlicht- oder Auflichtmikroskop) oder von Röntgengeräten (Queisser, 1986) mehr oder weniger direkt erfasst.

Der Vergleich der Resultate aus den beiden Betrachtungsweisen ist nicht einfach, weil die Ergebnisse der direkten Beobachtung nur schwer in Zahlen zu fassen sind (Esbert und Montoto, 1986), beziehungsweise weil die physikalischen Messdaten nur über mehr oder

weniger realistische Modellvorstellungen auf die Wirklichkeit übertragbar sind (Robertson, 1985).

4.5.1 Nomenkultur für die direkte Beschreibung von Porenräumen

Nomenklaturen, welche bei der direkten Beobachtung von Porenräumen, zum Beispiel in Dünnschliffen, angewendet werden können, liefern Choquette und Pray (1970), Schmidt und McDonald (1979), Scholle (1979). Diese für Diagenesestudien und vor allem für die Beurteilung der Gesteine als mögliche Erdölreservoirs (Pittman, 1979) entwickelten Nomenklaturen, können für Verwitterungsbetrachtungen reduziert werden.

Die von Zehnder (1982) benützte Unterteilung der Porenmorphologie, in fünf Porentypen hat sich auch für diese Arbeit als genügend erwiesen. Im folgenden sind die fünf Typen und ihre zugehörigen leicht veränderten Definitionen aufgelistet:

- Fugenpore, liegt zwischen zwei festen Bestandteilen
- Intragranulare Pore: Hohlraum der zwischen mindestens zwei verschiedenen festen Bestandteilen liegt.
- Zwickelpore, liegt zwischen drei oder mehr festen Bestandteilen.
- Intracrystalliner Pore: Hohlraum innerhalb eines festen Bestandteils. (Leider lässt sich der von Schmidt und McDonald (1979) für diesen Porentyp verwendete, viel umfassendere Begriff der "intra-constituent"-Pore nicht verdeutschen.)
- Auflösungspore: Geometrisch komplizierter, aber charakteristischer Hohlraum, der durch Auflösung entstanden ist.
- Risspore: Hohlraum mit parallelen Begrenzungsfächern, der durch mechanische Auflockerung entstanden ist.
- Submikroskopische Pore: Hohlraum in kryptokristallinen Bereichen, der ein so feinmaschiges Netz bildet, dass es

mit dem Lichtmikroskop nicht mehr im Detail beobachtet werden kann.

(siehe auch Figur 17)

4.5.2 Indirekte (physikalische) Beschreibung der Poren

Scheidegger (1960) unterteilt die Porenräume nach den in ihnen wirkenden hydrodynamischen Kräften in drei Klassen:

"voids" (Leerräume) sind Hohlräume, deren Porenwände keinen oder nur einen sehr geringen Einfluss auf die hydrodynamischen Vorgänge im Innern haben (z.B. Karsthöhlen, grössere Hohlräume in Tuffsteinen).

Kapillaren: Die Porenwände haben starken Einfluss auf die Transportdynamik der Flüssigkeit, aber die molekulare Struktur der Flüssigkeit spielt keine Rolle (z.B. Poren der Berner Sandsteine).

"force spaces" (Krafträume): Die molekulare Struktur der Flüssigkeit spielt eine Rolle für die Transportvorgänge im Innern (z.B. Röhren in den Zeolithen).

Diese drei Porenklassen können je nach Flüssigkeit und Festkörper verschiedenen Porengrößen entsprechen. Für Wasser, in glatten, sauberen Glasröhren, bei 1 atm und 25°C, entsprechen "voids" Röhren mit einem Radius grösser als einige mm, Kapillaren solchen mit Radien zwischen einigen Å und einigen zehn Å und "force spaces" Röhren mit Radien von einigen Å. Wasser sickert in den "voids" durch, wird in den Kapillaren durch Kapillarkräfte bewegt oder festgehalten und kondensiert in den "force spaces" (sogenannte Kapillarkondensation). Volumenmässig gehört der weitaus grösste Teil der Hohlräume der Berner Sandsteine in den Bereich der Kapillaren.

Die direkten und indirekten Betrachtungsweisen der Poren gehen da ineinander über, wo es gilt, die Porenräume sichtbar zu machen, indem sie zum Beispiel mit farbigem Harz gefüllt werden. Wird der Porenraum so imprägniert, dass das Harz unter Luftdruck kapillar eingesogen wird, so läuft der Vorgang grundsätzlich nach den

gleichen physikalischen Gesetzen ab, wie wenn Wasser in den Stein eingesogen wird. Das bedeutet, dass die am Schluss mit Harz gefüllten Bohlräume mehr oder weniger gut den beim Wasseraugen gefüllten Hohlräumen entsprechen, vorausgesetzt, dass die Eigenschaften des Harzes etwa denjenigen des Wassers gleichgesetzt werden können. Figur 17 zeigt einen Ausschnitt aus einem kapillar gefüllten Dünnschliff.



Figur 17: Fotografie eines Dünnschliffs der unter Luftdruck mit Harz gefüllt wurde. Rot = kapillar eingesogenes Harz, blau = Luftblasen. Fu: Fugenpore; Zwi: Zwischenpore.

Um die Resultate der physikalischen Messungen und der Dünnschliffuntersuchungen diskutieren zu können, müssen zuerst noch einige Begriffe und physikalische Gesetze besprochen werden.

4.5.3 Wasser im Porenraum

Wenn sich flüssiges Wasser im Porenraum bewegt, so sickert es entweder oder es wandert kapillar. Sicken ist ein Vorgang, der durch die Schwerkraft dominiert wird und vor allem in grossen

Hohlräumen stattfindet. Der kapillare Wassertransport dagegen, ist bis zu einem gewissen Grade unabhängig von der Schwerkraft und kann deshalb in einem isotropen Medium in alle Richtungen gleichmäßig erfolgen.

4.5.3.1 Kapillarbewegung in zylindrischen Röhren

Die Kapillarkraft F_k , respektive der durch sie erzeugte Kapillarzug P_k können durch die zwei folgenden Formeln dargestellt werden:

$$\begin{aligned} 1) \quad F_k &= 2\pi\gamma \cos\theta \quad r \quad \text{und} \\ 2) \quad P_k &= 2\gamma \cos\theta / r \end{aligned}$$

γ = Oberflächenspannung

θ = Benetzungswinkel

r = Radius der Kapillaren

Diese beiden Formeln gelten für zylindrische Poren.

$$\begin{aligned} 3) \quad 2\sigma\pi\cos\theta \quad r &= \pi r^2 \gamma \sin \theta \max / \cos\beta \quad \text{woraus folgt:} \\ 4) \quad h_{\max} &= 2 \gamma \cos\theta \cos\beta / r \sigma g \end{aligned}$$

und für Wasser bei 20°C in einer vertikalen Glasröhre gilt:

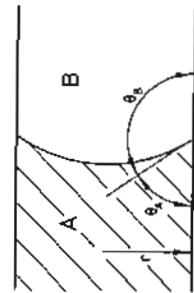
$$\begin{aligned} 5) \quad h_{\max} &= 14.83 / r; \quad (h_{\max} \text{ in m, } r \text{ in } \mu\text{m}) \\ \gamma &= \text{Dichte der Flüssigkeit} = 1 \text{ [g/cm}^3\text{]} \\ g &= \text{Gravitationskonstante} = 9.81 \text{ [m/sec}^2\text{]} \\ h_{\max} &= \text{maximale Steighöhe [m]} \\ r &= \text{Radius der Kapillare [} \mu\text{m}] \\ \theta &= 0^\circ \\ \gamma &= 72.75 \text{ [dynes/cm]} \\ \beta &= \text{Abweichung von der Vertikalen} = 0^\circ \end{aligned}$$

Die maximale Steighöhe in zylindrischen Röhren ist also für eine bestimmte Flüssigkeit bloss vom Kapillarradius abhängig.

Bei einem Kapillarradius von ca. 1.5 μm beträgt der Kapillarzug von Wasser in Glasröhren gerade 1 atm und die maximale Steighöhe wird 10 m. In der Verwitterungsliteratur ist eine Feststellung anzutreffen (Klopper, 1979), die besagt, dass für kleinere Kapillarradien ein Kapillarzug von mehr als 1 atm dazu führe, dass der Wasserfaden reisse, weil die scheinbare Zugfestigkeit des Wassers überstiegen werde. Somit könnte Wasser nicht kapillar in Poren mit $r < 1.5 \mu\text{m}$ eindringen, respektive 10 m stelle eine absolute Grenze für die maximale Steighöhe von Wasser in Bausteinen dar.

Die scheinbare Zugfestigkeit von Flüssigkeiten ist jedoch eine nur sehr schwer messbare Größe. Nyborg et al. (1972) geben eine

ist ein Mass für diese Benetzbarekeit. Die Flüssigkeit A ist eine netzende Flüssigkeit wenn $\Theta_A < 90^\circ$ ist. Für die in Figur 18 dargestellte Situation heisst das also, dass der kapillare Zug dazu führt, dass die Phase A die Phase B verdrängt. Bei horizontalem Eindringen ist dieser Vorgang theoretisch unendlich. Dringt die Flüssigkeit aber von unten in eine geneigte Kapillarröhre ein, so wirkt der Kapillarkraft die Schwerkraft entgegen. Wenn Kapillarkraft und Schwerkraft sich die Waage halten, ist die maximale Steighöhe erreicht (Cammerer, 1963).



Figur 18: Schema zur Erklärung der Kapillarkraft.

Die Kraft kommt dadurch zustande, dass sich die Phasengrenze AB (Figur 18) wie eine gespannte Haut verhält, die die Tendenz hat sich zusammenzuziehen. Diese Tendenz sich zusammenzuziehen wird Oberflächenspannung genannt; sie ist von der Art der Phasen A und B abhängig. Die Kapillarkraft wird mehr oder weniger verkleinert, je nach dem wie gut die Phase A die Wand der Poren benetzt. Der Winkel

Tabelle, der in der Literatur zu findenden Werte, mit Kurzbeschreibungen der zugehörigen Messmethoden, und sie stellen fest, dass bei den gemessenen Werten oft nicht genau zu erfassen ist, ob wirklich die Zugfestigkeit des Wasserfadens oder zum Beispiel die Adhäsion des Wassers an der Gefäßwand gemessen wurde. Von den 13 durch Nyborg et al. (1972) zitierten Messwerten liegt ein Wert zwischen 0.2 und 0.5 atm, die restlichen Werte liegen höher als 1 atm und reichen bis zu 277 atm.

Dies widerspricht der Behauptung von Klopfer (1979), dass Wasser nicht kapillar in Poren mit $r < 1.5 \mu\text{m}$ eindringen kann. Als praktisches Beispiel dazu können auch die Membranfilter 0.45 μm , welche bei der Herstellung der Wasserauszüge benutzt wurden (Kapitel 3.2.2.1), angeführt werden. Diese Filter saugen Wasser problemlos auf, und es kann sogar noch eine zusätzliche Zugkraft (Vakuum) angelegt werden, ohne dass dadurch der Wassertransport abbrechen würde. Aus diesen Gründen betrachte ich die von Snethlage (1983) postulierte Lücke zwischen Poren mit kapillarem Transport und Poren mit Kapillarkondensation als nicht existent.

Die Geschwindigkeit, mit welcher eine Kapillarröhre Flüssigkeiten einsaugt, wird durch das Poiseuille-Gesetz beschrieben (Amoroso und Fassina, 1983):

$$6) \quad \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{R^4 \pi \Delta P}{8 \eta l}$$

R = durchschnittlicher Porenradius, ΔP = Druckdifferenz zwischen Flüssigkeitsreservoir und dem Ende des Kapillarweges, η = Viskosität, l = Länge des Kapillarweges, $\Delta V/\Delta t$ = Flüssigkeitsvolumen das pro Zeiteinheit durch 1 cm^2 Poren fliesst.

Daraus lässt sich für die Steighöhe x als Funktion der Zeit die folgende Beziehung ableiten (Bousquie, 1979):

$$7) \quad x = B \sqrt{t}$$

Für zylindrische, vertikale Röhren ist

$$8) \quad B = \sqrt{r \cos \theta / 2 \eta} \quad (\text{Bousquie, 1979})$$

Diese Funktion vernachlässigt die Schwerkraft. Bousquie (1979) hat gezeigt, dass dies für kleinere Porenradien auf den ersten paar dm

zulässig ist.

Für die Gewichtszunahme pro Grundfläche, beim kapillaren Saugen, gilt eine analoge Beziehung:

$$9) \quad dGew/F = A \sqrt{t}$$

Bousquie (1979) stellt auch A als Funktion von r, δ, Θ und η dar. Diese Funktion basiert aber auf dem, für die hier anzustellenden Überlegungen, zu realitätsfernen Modell von nur einer geraden Kapillarröhre pro Grundflächeneinheit.

Die kapillare Wasseraufnahme im Berner Sandstein lässt sich gut mit diesen Gesetzen darstellen (Bläuer, 1985), das heisst, sowohl die Steighöhe als auch die Gewichtszunahme verhalten sich linear zur Wurzel der Saugzeit (Kapitel 4.5.4.4).

4.5.3.2 Kapillarbewegung in Röhren, deren Querschnitt periodisch ändert

Das Modell der zylindrischen Poren entspricht der wirklichen Porenform in Sandsteinen überhaupt nicht (Figur 17). Ein Modell das der Wirklichkeit schon etwas näher kommt, ist dasjenige von Röhren mit kreisrundem, periodisch wechselndem Querschnitt.

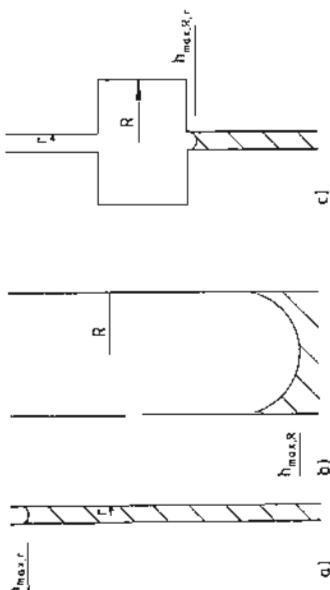
Ein einfaches solches Modell ist in Figur 19 dargestellt.

da $R \gg r$, folgt aus Gleichung 2:

$$\left. \begin{aligned} p_{kR} &= 2 \delta \cos \Theta / R \\ p_{kr} &= 2 \delta \cos \Theta / r \end{aligned} \right\} p_{kR} < p_{kr};$$

Für Kapillarröhren ohne Querschnittsänderung wären die maximalen Steighöhen (a, b)

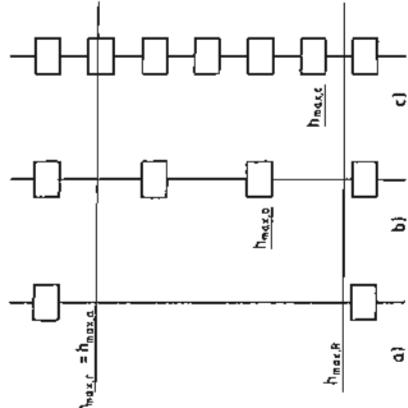
$$\left. \begin{aligned} h_{max,R} &\approx 2 \delta \cos \Theta / R g \\ h_{max,r} &= 2 \delta \cos \Theta / r g \end{aligned} \right\} h_{max,R} < h_{max,r}$$



Figur 19: Einfaches Modell für ein Kapillarrohr mit zwei abwechselnden Radien r und R . Steighöhen: a) in Rohr mit Radius R , b) in Rohr mit Radius R und c) in Rohr mit abwechselnden Radien.

Für das Modell von Kapillarröhren mit periodisch wechselndem Querschnitt (Figur 19c) liegt $h_{\max,r}$ irgendwo zwischen $h_{\max,r}$ und $h_{\max,R}$. Wie hoch das Wasser steigt, hängt ab von der relativen Häufigkeit der beiden Porenradien. Dies sei kurz anhand der Figur 20 dargestellt.

Figur 20: Einfluss der Häufigkeit eines Kapillarradius' auf die maximale Steighöhe.



Genau die gleichen Überlegungen wie sie zu Figur 19 angestellt werden können, führen bei der Figur 20 zu folgendem Schluss: in Figur 20a wäre die maximale Steighöhe $h_{\max,a}$ gerade gleich $h_{\max,r}$, in 20b gleich $h_{\max,b}$ und in 20c gleich $h_{\max,c}$. Das heisst also, dass je häufiger die Poren mit grossem Radius R sind, desto näher kommt die maximale Steighöhe $h_{\max,r}$ dem Wert $h_{\max,R}$.

Als praktisches Beispiel dazu kann der Grundfeuchteaufstieg an Berner Sandsteinen angeführt werden (Figur G1.1, Seite 58), welcher in Bern meistens zwischen 2.5 und 5 m Höhe erreicht. Nach der Formel 5 (Seite 113) ergeben diese Werte Porenradien zwischen 6 und 3 μm , für Wasser, was gut mit den im Quecksilberporosimeter bestimmten häufigsten Porenradien übereinstimmt (Kapitel 4.5.4.3).

Aus den unter 4.5.4.4 experimentell ermittelten Wassereindringkoeffizienten B der Berner Sandsteine lässt sich mit Hilfe der Gleichung 8) der Radius, desjenigen zylindrischen Kapillarrohrs ausrechnen, in dem das Saugen gleich schnell wie in den Sandsteinen

verlaufen würde (Tabelle 10).

$$r = B^2 \cdot 2\eta / \zeta \cos \theta$$

daraus folgt, für $\cos \theta = 1$, $\zeta = 72.75$ [dynes/cm] und $\eta = 1.002 \cdot 10^{-2}$ (poise)

$$r = 2.75 \cdot 10^{-4} B^2 \quad [\text{cm}]$$

Probe	B [$\text{cm/sec}^{1/2}$]	r [\AA]
GU	0.038	39.7
OB	0.058	92.5
OGR	0.057	89.3
OGE	0.066	119.8
KRAU	0.098	264.1
KM	0.070	134.8
KR	0.071	138.6

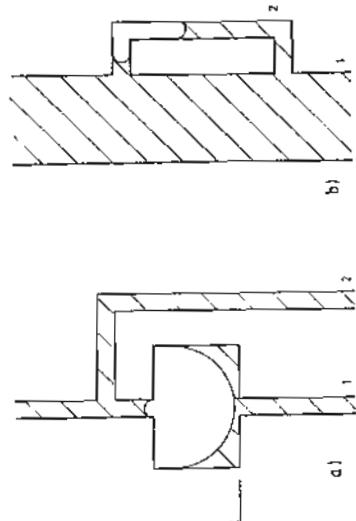
Tabelle 10: Wassereindringkoeffizienten und zugehörige Porenradien bezogen auf ein glattes zylindrisches Kapillarrohr.

Diese Werte sind alle um Zehnerpotenzen tiefer als die im Quecksilberporosimeter gemessenen häufigsten Porenradien, welche in der Größenordnung von $6.3 \mu\text{m}$ liegen (Kapitel 4.5.4.3). Dullien (1979), der an Sandsteinen zu ähnlichen Ergebnissen kam, gibt dafür eine qualitative Erklärung: er sagt, dass der Widerstand gegenüber der kapillaren Bewegung vor allem durch feinere Nachbarporen, welche die gröberen Poren verbinden, bewirkt wird. Die treibende Kapillarkraft ist aber klein, weil sie vor allem von den häufigeren gröberen Poren abhängt.

4.5.3.3 Kapillare Vorgänge in Porennetzwerken

Daraus, dass die bei Luftdruck kapillar aufgesogene Wassermenge immer deutlich tiefer liegt als die unter Vakuum aufgenommene Wassermenge (Tabelle 11), kann der Schluss gezogen werden, dass Luft im Stein zurückbleibt. Ein solches Einschliessen von Luftblasen kann mit linearen Modellen nur durch "Stackgassporen" erklärt werden. In

zwei- oder dreidimensionalen Modellen sind jedoch relativ einfache Erklärungsmöglichkeiten denkbar. Die im folgenden kurz dargelegten Erklärungen beruhen alle darauf, dass der kapillare Flüssigkeitstransport in dünnen Röhren, wegen der grösseren Wirkung der Reibung, langsamer verläuft als in weiteren Röhren (siehe Gleichung 8, Seite 114).



Figur 21: Mechanismen, welche zum Einschliessen von Luftblasen, beim kapillaren Eindringen von Flüssigkeiten, unter Luftdruck führen.

- a) nach Bousquie (1979)
- b) nach Seker und Recordon (1984).

Im Fall a) (Figur 21) wirkt, sobald das Niveau x im Röhrenteil 1 erreicht ist, eine Kapillarkraft, welche deutlich tiefer ist als in der Röhre 2. In der Röhre 1 muss alles Wasser durch den unteren dünnen Röhrenteil, mit einer recht grossen Reibung, bezogen werden (siehe auch obige Überlegungen zu den Wassereindringkoeffizienten in Poren mit wechselndem Querschnitt!). So ist es möglich, dass das Wasser in Röhre 2 schneller voran kommt als in Röhre 1 und dadurch eine Luftblase einschliesst.

Im Modell b) ist die Aufstiegsgeschwindigkeit in der gröberen Röhre 1 so viel schneller (Gleichung 8, Seite 114), dass sie die Röhre 2 oben abschliessen kann, bevor alle Luft daraus verdrängt ist. In den mittels kapillarem Saugen mit farbigem Harz gefüllten

Dünnenschliffen von Berner Sandsteinen, wurden gefangene Luftblasen, wie sie dem Fall b) entsprechen würden, nicht beobachte die dem Modell a) entsprechende Situation ist jedoch häufig (siehe Figur 17). Auch "Sackgasssporen", das heisst Poren mit nur einseitiger Öffnung, wurden in Berner Sandsteinen nicht beobachtet.

Chatzis und Dullien (1977) haben das stufenweise Einpressen einer nicht netzenden Flüssigkeit in zwei- oder dreidimensionale Modellnetzwerke berechnet. Sie fanden, dass zum Zeitpunkt der sogenannten breakthrough-Bedingung (Moment, ab dem die eingepresste Flüssigkeit von einem Ende des Netzwerkes zum andern ein Kontinuum bildet) die verdrängte Phase in isolierte Bereiche im Netzwerk zurückgedrängt wurde. Diese Bereiche können erst bei zusätzlicher Druckerhöhung gefüllt werden. Sind sie aber einmal unter Aufwendung des entsprechenden Druckes gefüllt worden, so würde es des passenden Unterdruckes bedürfen, um sie wieder zu leeren.

Mit diesen Modellen lässt sich recht gut der Messvorgang im Quecksilberporosimeter beschreiben, wo unter Druck die nicht netzende Flüssigkeit Hg ($\Theta = 130^\circ$) in die Porenräume der Proben eingepresst wird (Kapitel 3.2.4.2). Das Porenvolumen, das auch noch 24 Stunden nach der Messung mit Hg gefüllt bleibt, nennt Boussiqué (1979) "porosité piégée".

Die in Blasen eingeschlossene Luft löst sich mit der Zeit im Wasser und wird diffusiv nach aussen transportiert, so dass die Porenräume sich ganz mit Wasser füllen, wenn der Stein lange genug im Wasser stehen gelassen wird (Bousquét, 1979). Dieser Vorgang wird mit der Zeit immer langsamer und unter Verwitterungsbedingungen, wo das Wasser immer wieder aus dem Stein verdunstet, ist nicht zu erwarten, dass die Porenräume der Berner Sandsteine jemals zu 100 Prozent mit Wasser gefüllt werden (siehe dazu auch Wasseraufnahme nach 32 Tagen, W_{32} , in Tabelle 11).

4.5.4 Der Porenraum der Berner Sandsteine

Der zugängliche Porenraum eines Gesteins spielt für die Verwitterung eine entscheidende Rolle, denn nur in ihm können Flüssigkeiten und Gase zirkulieren. Sie transportieren gelöste Stoffe und können mit den festen Bestandteilen des Steins reagieren (Korrosion, Mineralneubildungen). Die Poren ermöglichen unter Umständen die Ansiedlung von Kleinstlebewesen (Algen, Flechten).

Unter Verwitterungsbedingungen ist ein Stein weder je ganz trocken (alle Poren mit Luft gefüllt) noch ganz nass (alle Poren vollständig mit Wasser gefüllt). Der ganz trockene Zustand wird zum Beispiel durch Kapillarkondensation, langsame Trocknungsrate, Be- wuchs und die Anwesenheit von hydroskopischen Salzen verhindert, der ganz nasse Zustand dagegen durch Verdunstung und durch das Eindringen von Luft beim kapillaren Eindringen des Wassers.

Im Folgenden soll versucht werden, mit Hilfe von verschiedenen Messtechniken den Porenraum qualitativ und quantitativ zu beschreiben.

4.5.4.1 Bezeichnung und Bedeutung verschiedener Porositätsarten

Als absolute (de Quervain, 1967) oder totale (von Engelhardt, 1960) Porosität (P_a) wird das gesamte Porenvolumen im Verhältnis zum Gesamtvolumen des Gesteins verstanden. P_a kann als Summe der geschlossenen Porosität und der effektiven Porosität (von Engelhardt, 1960) betrachtet werden. Poren, die von aussen keinen Zugang haben, werden geschlossene Poren genannt. Alle von aussen zugänglichen Poren bilden die effektive Porosität. Sie sollte gemessen werden können, indem die Steine unter Vakuum mit einer Flüssigkeit gefüllt werden, also zum Beispiel bei der Wasseraufnahme unter Vakuum (W_V , P_V), im Quecksilberporosimeter (top) und beim Auszählen von unter Vakuum imprägnierten Dünnenschliffen (P_{oro}).

Die effektive Porosität kann als Summe der scheinbaren (de Quervain, 1967) und der gefangenen Porosität (P_g) betrachtet werden, wobei die scheinbare Porosität (P_s) der Wasseraufnahme bis zur Gewichtskonstanz (W_{st}) entspricht (Gewichtskonstanz bedeutet, dass die Gewichtszunahme innerhalb 24 Stunden $< 0.1\%$ beträgt). Die

Gewichtskonstanz wurde nach 32 Tagen erreicht. Die gefangene Porosität dagegen stellt den Anteil der Porenräume dar, welche auch zu diesem Zeitpunkt noch mit Luft gefüllt bleiben.

Die gefangene Porosität (P_g) ergibt sich aus der Differenz von Vakuumporosität (P_v) minus W_{S1} .

Als weitere Größen wurden an den frischen Berner Sandsteinen die Wasseraufnahme nach 24 respektive 48 Stunden, jeweilen durch kapillares Aufsaugen und durch langsames Eintauchen, bestimmt (W_{24hk} , W_{48hk} , W_{24hl} , W_{48hl}). In imprägnierten Dünnenschliffen wurden die Anteile an Hohlräumen in die das Harz kapillar eingesogen worden war (Prot; rot in Figur 17) und an den verbleibenden Luftblasen (Pbla; blau in Figur 17) gezählt. Der Anteil an Quecksilber, das unmittelbar nach der Quecksilberporosimetrie-Messung in der Probe zurückblieb wurde bestimmt (tgp). tgp entspricht nicht genau der sogenannten "porosité piégée" nach Bousqué (1979), für deren Bestimmung die Probe erst 24 Stunden nach der Messung gewogen wurden. Aus technischen Gründen war diese späte Wägung nicht möglich.

Die Zahlenwerte für die hier angeführten Porositätsarten sind in Tabelle 11 zusammengestellt.

Tabelle 11: Zusammenstellung der an den frischen Proben bestimmten Porositätswerte: (Alle Angaben in ml/100g Probe, was Gew- & Wasseraufnahme entspricht, wenn für Wasser die Dichte 1 angenommen wird).

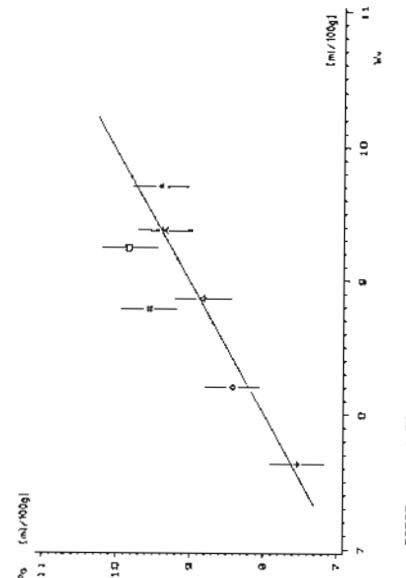
	Probe	Pa	W_v	top	Poro	W_{S1}	P_g
	max. Fehler	± 0.4	± 0.02	± 0.15	± 1.0		
GU	7.54	7.63	8.07	7.6	6.71	0.92	
OB	8.42	8.20	7.74	6.8	7.05	1.15	
OGR	9.55	8.78	8.54	8.3	7.59	1.19	
OGE	8.84	8.86	8.06	9.5	7.64	1.22	
KRAU	9.83	9.24	8.57	9.2	7.90	1.34	
KM	9.35	9.37	8.68	(7.1)	8.29	1.08	
KR	9.40	9.70	8.51	(8.6)	8.66	1.04	
GU	5.19	5.32	5.28	5.48	4.1	3.5	5.33
OB	5.62	5.64	5.70	5.79	3.8	3.0	-
OGR	5.95	5.95	6.06	6.13	3.6	4.7	-
OGE	6.05	6.10	6.14	6.21	2.3	7.2	6.53
KRAU	6.16	6.14	6.31	6.38	5.7	3.5	6.57
KM	6.62	6.34	6.71	6.65	(2.8)	(4.3)	6.40
KR	6.45	6.62	6.52	6.94	(1.9)	(6.7)	6.78
							0.72

Fehlerangabe = bei Mehrfachbestimmung festgestellte maximale Abweichung vom Mittelwert.

GU: Gurten, OB: Ostermundigen blau, OGE: Ostermundigen gelb, OGR: Ostermundigen grau, KRAU: Krauchthal, KM und KR: Bohrkerne Krauchthal mit Mergelschmitzen resp. ohne Mergelschmitzen.
 Pa: absolute Porosität; W_v : Wasseraufnahme unter Vakuum; top und tgp: totale offene und gefangene Porosität (Quecksilbersorptionsmethode); W_{24hl} , W_{48hl} resp. W_{24hk} resp. W_{48hk} : Wasseraufnahme durch kappillares Saugen nach 24 h resp. nach 48 h; Pbla, Prot und Poro: in imprägnierten Dünnenschliffen blau resp. rot gefärbte Poren und Pbla+Prot S: Sättigungskoeffizient (Hirschwald, 1908) = $(W_{48hl} / W_v) \cdot 100$.

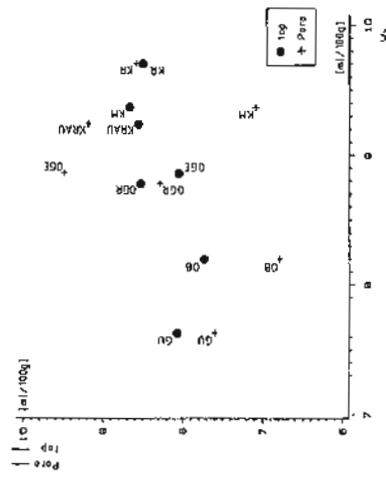
4.5.4.2 Vergleich der Resultate aus verschiedenen Porositätsbestimmungsmethoden

In der Figur 22 sind die absoluten Porositäten (Pa) gegen die Wasseraufnahme unter Vakuum (Wv) aufgetragen. Innerhalb der Fehlergrenze liegen alle Werte so, dass $\text{Pa} \geq \text{Wv}$ ist. Für die beiden Proben OGR und KRAU ist Pa deutlich höher als Wv , was bedeutet, dass diese Proben auch geschlossene Poren aufweisen.

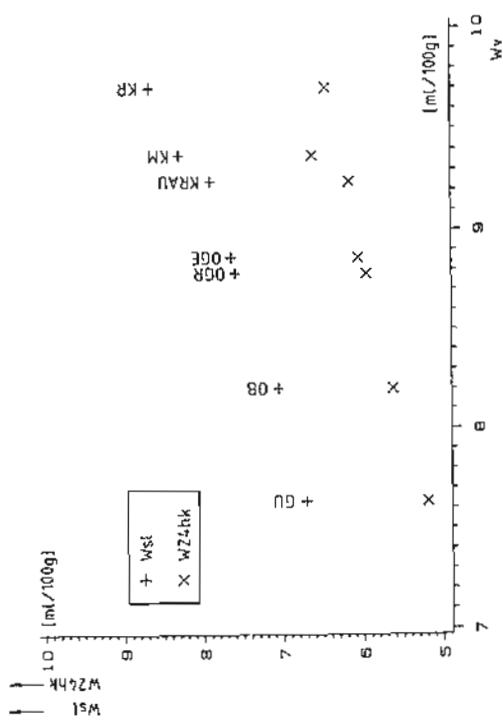


Die in der Figur 23 dargestellten Werte Wv , top und Poro müssen alle gleich gross sein, wenn angenommen wird, dass bei der jeweiligen Methode alle von aussen zugänglichen Poren gefüllt werden. Dies kann aber für die mittels Quecksilberdruckporosimeter gemessene totale offene Porosität (top) nicht angenommen werden, denn bei dieser Methode werden nur Poren mit Äquivalentradius $r > 63 \text{ \AA}$ gemessen. Dementsprechend liegt die totale offene Porosität in der Regel tiefer als die Wasseraufnahme unter Vakuum. Das bedeutet, dass

die Proben noch einen Anteil Poren besitzen, deren Eingangsradien kleiner als 63 \AA sind. Einzig für die Probe GU ist $\text{top} > \text{Wv}$, was am ehesten auf Materialinhomogenitäten zurückzuführen ist. Die durch Pointcounting in gefärbten Dünnschliffen ermittelte Porosität (Poro) zeigt die grössten Schwankungen. Da die Auflösung des Mikroskops 0.2 um beträgt, ist es nicht verwunderlich, dass die aus Dünnschliffen ermittelten Porositätswerte (Poro) in der Regel kleiner als sind als die Wasseraufnahme unter Vakuum.



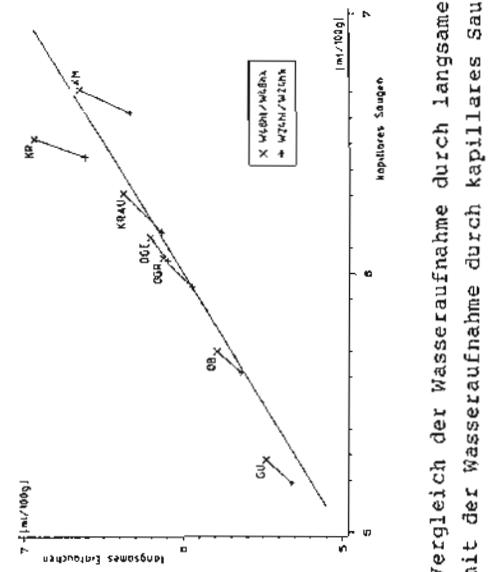
Figur 23: Mit dem Quecksilberdruckporosimeter bestimmte offene Porosität (top) und mittels Pointcounting ermittelte Porosität (Poro), verglichen mit der Wasseraufnahme unter Vakuum. GU: Gurten, OB: Ostermundigen blau, OGE: Ostermundigen gelb, OGR: Ostermundigen grau, KRAU: Krauchthal, KM und KR: Bohrkerne Krauchthal mit Mergelschlitzen resp. ohne Mergelschlitzen.



Figur 24: Wasseraufnahme nach 24 Stunden (W24hk) und nach 32 Tagen (Ws1), verglichen mit der Wasseraufnahme unter Vakuum.

Figur 24 zeigt, dass die Werte für die Wasseraufnahme unter Vakuum positiv sowohl mit der scheinbaren Porosität (W_{s1}) als auch mit der kapillaren Wasseraufnahme nach 24 Stunden (W24hk) korrelieren.

Für die frischen Berner Sandsteine spielt es keine grosse Rolle, ob die Wasseraufnahme nach einer bestimmten Zeit durch kapillares Saugen oder durch langsames Eintauchen bestimmt wird (Figur 25). Dabei tritt die grösste Differenz zwischen den mit den zwei verschiedenen Methoden bestimmten Messwerten, in Proben mit erhöhtem Tonmineralgehalt auf. Die Probe KM, mit den Mergelschmitzen, nimmt das Wasser beim Eintauchen anfänglich langsamer auf, als wenn sie kapillar saugt. Nach zwei Tagen nimmt sie aber bei beiden Methoden etwa gleich viel Wasser auf. Die Probe KR dagegen nimmt, von Anfang an das Wasser beim Eintauchen schneller auf, und nach zwei Tagen hat sie beim Eintauchen deutlich mehr Wasser aufgenommen als beim kapillaren Saugen.



Figur 25: Vergleich der Wasseraufnahme durch langsames Eintauchen mit der Wasseraufnahme durch kapillares Saugen.

Generell lässt sich feststellen, dass die Resultate der verschiedenen Messmethoden gut vergleichbar sind. Da die Quecksilberdruckporosimetrie es erlaubt an relativ kleinen Probenmengen, Aussagen über die Porenradienverteilung und das Porenvolumen zu machen würden für die Porositätsmessungen an Bohrkernen (Kapitel 5) diese Methode gewählt.

Die Sättigungskoeffizienten (S) sind für alle Proben etwa gleich gross.

4.5.4.3 Quecksilberdruckporosimetrie

Zehnder (1982) zieht die Grenze zwischen Mikroporosität (omip) und Makroporosität (omap) bei Poreneingangsradien von $1 \mu\text{m}$. Diese Grenze wird hier übernommen. Poren, die bei kleineren Drucken als 1 atm gefüllt werden, nennt Kraus (1985) Grobporen. Sie legt den Grenzradius zwischen Grob- und Makroporosität auf $7.5 \mu\text{m}$ fest (Benetzungswinkel 140°). Die Bezeichnung "Grobporosität" (ogr), für Poren, welche bei kleineren Drucken als 1 atm gefüllt werden, wird in dieser Arbeit übernommen. Der Grenzradius wurde hier aber mit $6.3 \mu\text{m}$ berechnet, da ein Benetzungswinkel von 130° festgestellt wurde (Mitteilung Herr Kahr).

In Tabelle 12 sind die Resultate der Quecksilberdruckporosimeter-Messungen an frischen Sandsteinproben zusammengestellt. Die Werte für GU und für OB sind Mittelwerte aus je drei Messungen mit ihren Standardabweichungen.

Tabelle 12: Porositäten der unverwitterten Berner Sandsteine, gemessen mittels Quecksilberdruckporosimetrie.

Probe	ogrP	omap	omip	top	r-Bereich	%P(r)
	[ml/100g]			[µm]	[µm]	[%]
GU	0.52±0.08	5.16±0.20	2.39±0.04	8.07	5.2 - 6.3	45.9
OB	1.62±0.34	3.56±0.30	2.57±0.15	7.74	5.7 - 7.2	36.2
CGR	1.38	4.12	3.04	8.54	5.2 - ?	(48) 1)
OGE	2.59	2.97	2.50	8.06	5.2 - 8.3	39.1
KRAU	2.72	3.63	2.22	8.57	5.2 - 7.1	47.8
KM	2.72	3.49	2.47	8.68	5.8 - 7.1	39.2
KR	2.81	3.39	2.31	8.51	5.2 - 7.2	44.7

ogrP: offene Grobporosität ($r > 6.3 \mu\text{m}$),

omap: offene Makroporosität ($1 \mu\text{m} < r < 6.3 \mu\text{m}$),

omip: offene Mikroporosität ($6.3 \mu\text{m} < r < 1 \mu\text{m}$),

top: totale offene Porosität (ogrP+omap+omip),

r-Bereich: häufigster Poren eingangsradien-Bereich

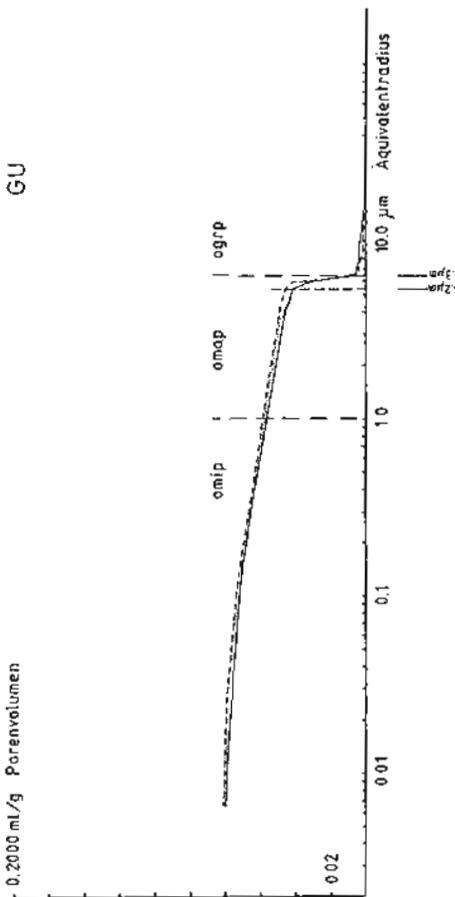
%P(r): Anteil an Poren mit Radien im r-Bereich in % von top,

1) Anteil an Poren mit Eingangsradien $r > 5.2 \mu\text{m}$,

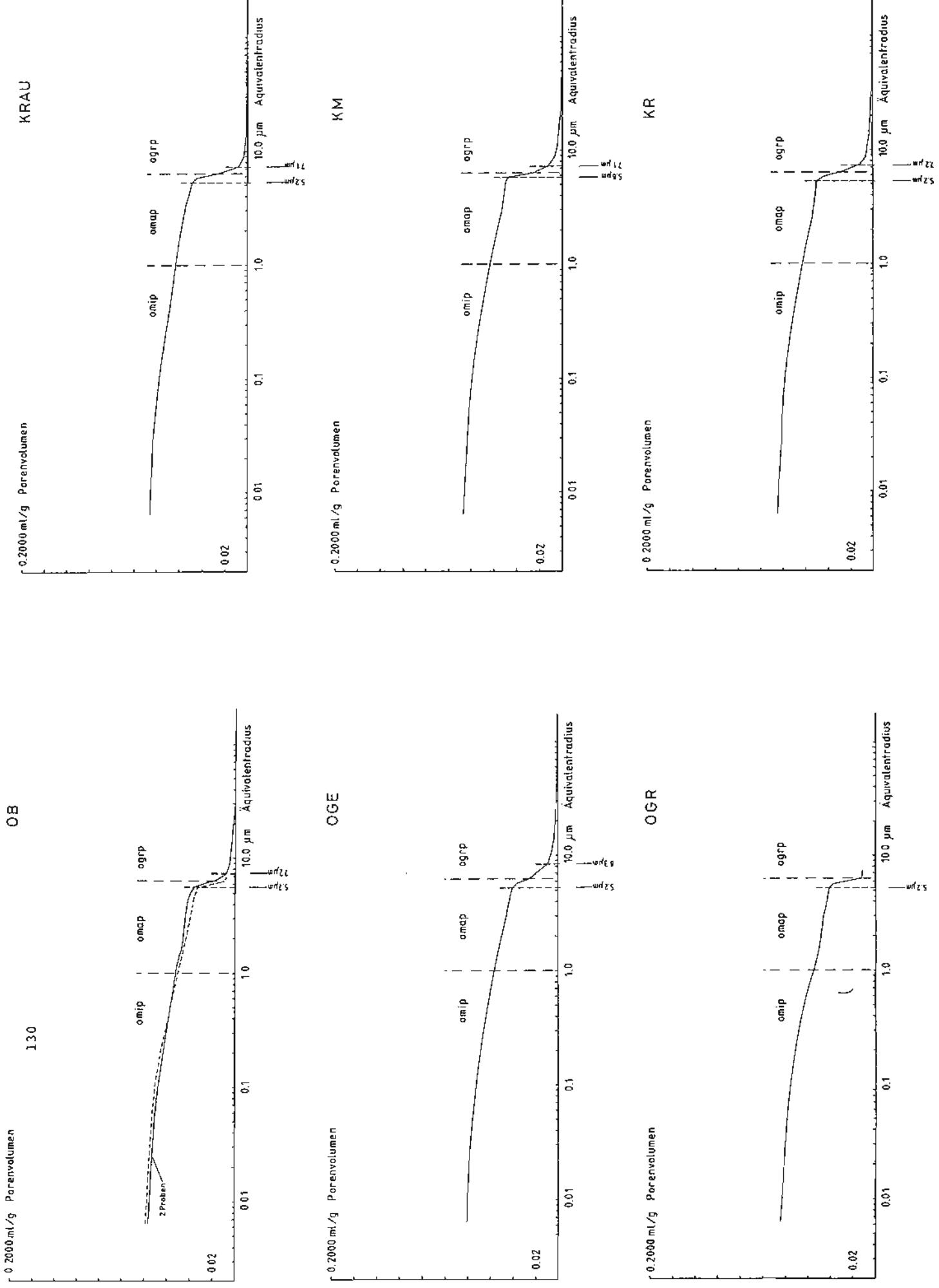
± : Standardabweichung.

Die Volumensummenkurven aller Messungen (Figur 26) zeigen einen ausgeprägten unimodalen Verlauf. Der weitauß grösste Teil der Poren wird bei Radien um $6.3 \mu\text{m}$ gefüllt, das heißt gerade im Übergangsbereich zwischen manuellem und maschinellem Messvorgang, respektive an der Grenze zwischen ogrP und omap. Diese Grenze ist also in bezug auf die häufigsten Porenradien nicht sehr glücklich gewählt. Trotzdem wird hier zu Vergleichszwecken an ihr festgehalten. Denn für alle Proben vom Grossen Matteschuhhaus (siehe Kapitel 5.2) ist der Kurvenverlauf im Bereich $r > 6.3 \mu\text{m}$ nicht gemessen worden, hingegen wurde der Wert der totalen offenen Grobporosität gemessen. Somit

können die Grobporositäten dieser Proben mit denjenigen der frischen Proben verglichen werden.
Der Bereich der häufigsten Porenradien ist für die feingeschichteten, feinkörnigen Gurtensandsteine am engsten und für die ungeschichteten, grobkörnigeren, gelben Ostermundiger-Sandsteine am weitesten. In Dünnschliffen kann beobachtet werden, dass 10 bis 20 µm breite Poren vor allem als Fugenporen auftreten, die bis 200 µm weite Zwickelporen verbinden (vergleiche Figur 17, Seite 109).

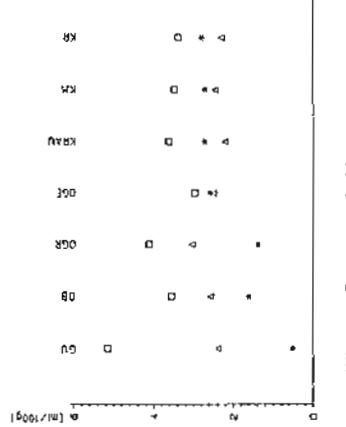


Figur 26: Porenradien-Porenvolumensummenkurven der unverwitterten Berner Sandsteinproben. (Fortsetzung siehe Seite 130)
GU und OB: Dreifachbestimmungen.
ogrP: offene Grobporosität; omap: offene Makroporosität;
omip: offene Mikroporosität.
GU: Gurtens, OB: Ostermundigen blau, OGE: Ostermundigen gelb, CGR: Ostermundigen grau, KRAU: Krauchthal, KM und KR: Bohrkerne Krauchthal mit Mergelschmitzen resp. ohne Mergelschmitzen.



Die totalen offenen Porositäten (top) der sieben Proben unterscheiden sich nur wenig voneinander. Sie liegen zwischen 7.74 und 8.68 ml/100g. Werden die totalen Porositäten in Grob-, Makro- und Mikroporosität unterteilt, so zeigt sich folgendes Bild (Figure 27).

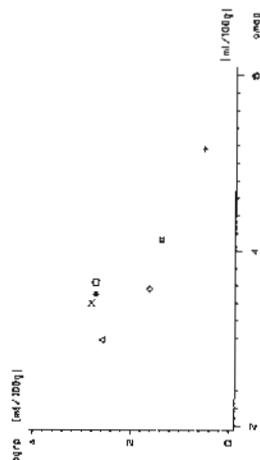
Die Mikroporositäten (omip) schwanken kaum und decken den Bereich zwischen 2.22 und 3.04 ml/100g ab. Die Grob- (ogr) und Makroporositäten (omap) dagegen streuen recht stark - zwischen 2.97 und 5.16 für omap und zwischen 0.52 und 2.81 für ogrp.



Figur 27: Offene Grob- (ogr), Makro- (omap) und Mikroporositäten (omip).

GU: Gurten, OB: Ostermundigen blau, OGE: Ostermundigen gelb, OGR: Ostermundigen grau, KRAU: Krauchthal, KM und KR: Bohrkerne Krauchthal mit Mergelschmitzen resp. ohne Mergelschmitzen.

Für die Gurten- sowie die grauen und blauen Ostermundiger-Proben gilt, dass die Makroporosität vor der Mikro- und der Grobporosität den grössten Anteil ausmacht. Für die Krauchthal und die gelben Ostermundiger Proben ist dagegen die Grobporosität etwas grösser als die Mikroporosität. Für die gelben Ostermundiger Sandsteine sind alle drei Porentypen etwa gleich häufig vertreten.



Figur 28: Offene Grobporosität (ogr) verglichen mit der offenen Makroporosität (omap).

Es zeigt sich (Figure 28), dass die Grobporosität negativ mit der Makroporosität korreliert. Dabei liegen die Proben der Gurten- und der Ostermundiger Sandsteine alle etwa auf der gleichen Geraden, die Krauchthalerproben dagegen liegen nahe beieinander etwas daneben.

4.5.4.4 Kapillare Wasseraufnahme- und -eindringgeschwindigkeit

Sowohl die Gewichtszunahme als auch das Aufsteigen der Wasserfront beim kapillaren Saugen in Berner Sandsteinen verlaufen linear mit der Wurzel der Zeit. Das heisst, die Sauggeschwindigkeit wird mit der Zeit immer langsam, theoretisch aber nie null, solange weder Schwerkraft noch Verdunstung wirken.

Messung und Berechnung der kapillaren Wasseraufnahme- und -eindringkoefizienten A und B werden unter 3.2.4.1D und im Anhang ausführlich beschrieben. Die Resultate sind in Tabelle 13 zusammengestellt.

Tabelle 13: Wasseraufnahme- und -eindringkoeffizienten der unverwitterten Berner Sandsteine.

		A [g/cm ² sec ^{1/2}]	B [cm/sec ^{1/2}]
GU	s	0.0042 ± 0.0004	0.038 ± 0.002
GU	p	0.0048	0.047
OB	s	0.0066 ± 0.0002	0.058 ± 0.006
OB	p	0.0066	0.058
OGR	s	0.0066 ± 0.0002	0.057 ± 0.004
OGR	p	0.0078	0.065
OGE	s	0.0078 ± 0.0002	0.066 ± 0.004
OGE	p	0.0080	0.061
KRAU	s	0.0119 ± 0.0004	0.098 ± 0.003
KRAU	p	0.0113	0.094
KM	s	0.0094 ± 0.0004	0.070 ± 0.003
KR	s	0.0099	0.071

s : Saugen senkrecht zur Schichtung

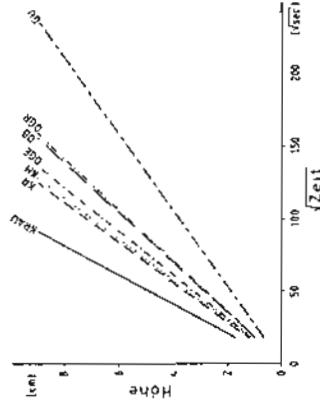
p : Saugen parallel zur Schichtung

± : maximale Abweichung bei 3 Messungen

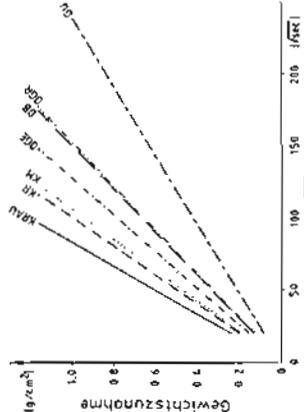
GU: Gurten, OB: Ostermundigen blau, OGE: Ostermundigen gelb, OGR: Ostermundigen grau, KRAU: Krauchthal, KM und KR: Bohrkerne Krauchthal mit Mergelschmitzen resp. ohne Mergelschmitzen.

Nur für die Proben GU und OGR verläuft das Eindringen des Wassers parallel zur Schichtung etwas schneller als senkrecht dazu. Die Unterschiede sind jedoch nicht sehr gross und für die folgenden Überlegungen werden, wo nicht anders vermerkt, die Werte A und B senkrecht zur Schichtung benutzt.

Die Wassereindring- und -aufnahmekurven sind in den Figuren 29 und 30 wiedergegeben. Die Proben aus den drei Steinbrüchen sind mehr oder weniger deutlich voneinander zu unterscheiden. So saugen die Krauchthaler Proben das Wasser am schnellsten, die Gurten-Proben am langsamsten, und die Ostermundiger Sandsteine zeigen ein dazwischen liegendes Verhalten. Der Unterschied zwischen den gelben Ostermundinger Sandsteinen und KR und KM ist allerdings bei der Steighöhe nicht sehr gross.



Figur 29: Steighöhe der Wasserfront, abgetragen gegen die Quadratwurzel der Zeit. Saugrichtung senkrecht zur Schichtung. Werte gemittelt aus drei Versuchen gemäss Anhang.



Figur 30: Gewichtszunahme beim kapillaren Saugen, aufgetragen gegen die Quadratwurzel der Zeit. Saugen senkrecht zur Schichtung. Mittelwerte aus drei Versuchen gemäss Anhang.
Werden A und B gegeneinander aufgetragen (Figur 31), so zeigt sich folgendes Bild; alle Proben außer KM und KR kommen auf die selbe Gerade zu liegen, die beiden Proben KM und KR dagegen weisen einen etwas grösseren Wasseraufnahmekoeffizienten (A) auf. Das bedeutet also, dass sie einen grösseren Anteil des vorhandenen

Porenvolumens mit Wasser füllen oder mit andern Worten, etwas weniger Luftblasen einschliessen.

Tabelle 14: Werte für die Ausdehnung bei Wasseraufnahme nach 3 Tagen und bei Versuchsabbruch.

Probe	E72h [mm/m]	1)	5 Tage	13 Tage	14 Tage	22 Tage
GU	1.28	± 0.10				1.51
GU P	0.65	± 0.10			0.76	0.80
OB	2.04	± 0.09				
OGR	2.34	± 0.02			2.75	2.87
OGE	2.28	± 0.06			2.66	2.77
KRAU	1.77	± 0.06	1.90			
KRAU p	1.54	± 0.09	1.66			
KM	5.79	± 0.27	2)			6.56
KR	2.96	± 0.24			3.43	3.60

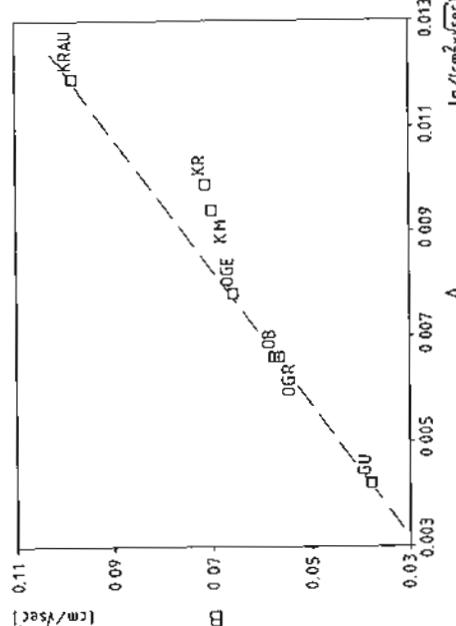
1) Mittel aus 3 Proben; 2) Mittel aus 2 Proben

± : maximale gemessene Abweichung vom Mittelwert
P : Ausdehnung Parallel zur Schichtung

GU: Gurten, OB: Ostermundigen blau, OGE: Ostermundigen gelb, OGR: Ostermundigen grau, KRAU: Krauchthal, KM und KR: Bohrkerne Krauchthal mit Mergelschmitzen resp. ohne Mergelschmitzen.

Der von Schumann (1986) angegebene Wert für die "hygrische Quellung der unverwitterten Berner Sandsteine" von 0.4 mm/m ist damit um einen Faktor 3 bis 8 zu klein.

Es ist naheliegend anzunehmen, dass das Quellen vor allem durch die quellfähigen Tonminerale (hier Smektit) verursacht wird. Eine Korrelation zwischen der Längenänderung und dem Tonmineralgehalt lässt sich allerdings erst ab einem Tonmineralgehalt von 10% erkennen (Figur 32).

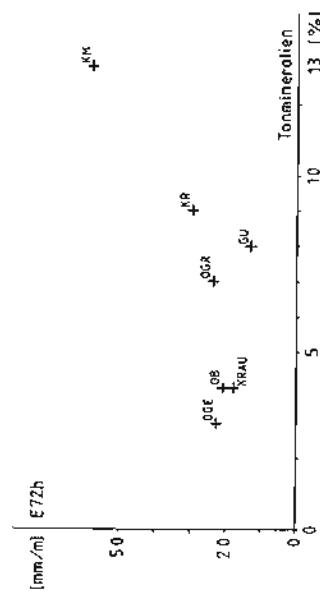


Figur 31: Wassereindringkoeffizienten B gegen die Wasseraufnahmekoeffizienten A aufgetragen.

GU: Gurten, OB: Ostermundigen blau, OGE: Ostermundigen gelb, OGR: Ostermundigen grau, KRAU: Krauchthal, KM und KR: Bohrkerne Krauchthal mit Mergelschmitzen resp. ohne Mergelschmitzen.

4.5.4.5 Ausdehnung bei Wasseraufnahme

Werden die Berner Sandsteine benetzt, so erfahren sie eine Ausdehnung, welche nach 72 Stunden, für Proben ohne makroskopisch beobachtbare Mergelschmitzen, in der Grössenordnung von 1 bis 3 mm pro Meter liegt (Tabelle 14). Die Ausdehnung der Probe mit Mergelklasten ist doppelt so hoch.



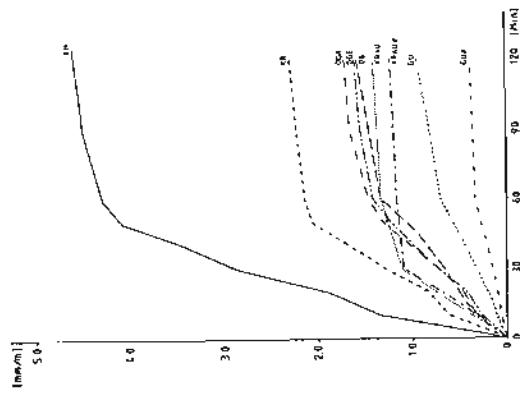
Figur 32: Ausdehnung bei Wasseraufnahme nach 72 Stunden senkrecht zur Schichtung verglichen mit den Tonmineralgehalten.

GU: Gurten, OB: Ostermundigen blau, OGE: Ostermundigen gelb, OGR: Ostermundigen grau, KRAU: Krauchthal, KM und KR: Bohrkerne Krauchthal mit Mergelschmitzen resp. ohne Mergelschmitzen.

Beobachtungen in REM-Aufnahmen zeigen, dass die Tonmineralein sehr oft in den Zwischenporen, also im freien Porenraum, liegen und dort quellen können, ohne ihre Umgebung stark zu beeinflussen.

Wenn allerdings in einem Sandstein quellfähige Tonmineralein als Bindemittel auftreten, können sie zu einem der wichtigsten Faktoren für die Verwitterung überhaupt werden (Angles Vincente, 1983).

Wenn Bausteine benetzt werden, so geschieht dies in der Regel relativ kurzfristig, und die Benetzung beschränkt sich auf die obersten Zentimeter des Steins (Ausnahmen von dieser Regel stellen zum Beispiel die Grundfeuchtesituationen dar). Figur 33 soll die ersten 2 Stunden des Dilatationsversuches dokumentieren.



Figur 33: Ausdehnung der Berner Sandsteine durch Wasseraufnahme in den ersten zwei Stunden.

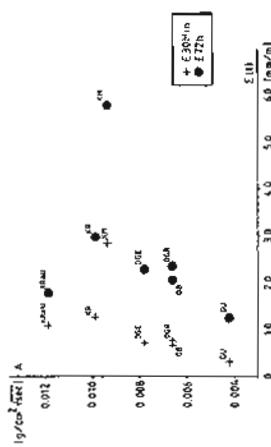
GU: Gurten, OB: Ostermundigen blau, OGE: Ostermundigen gelb, OGR: Ostermundigen grau, KRAU: Krauchthal, KM und KR: Bohrkerne Krauchthal mit Mergelschmitzen resp. ohne Mergelschmitzen.

Bereits nach zwei Stunden erreicht die Ausdehnung mehr als 70 % des E72h-Wertes. Die Proben mit den grössten Wassereindringungs-aufnahmekoeffizienten (B und A); KRAU, KR und KM, dehnen sich anfänglich auch am schnellsten aus. Für KRAU verlangsamt sich die Ausdehnung bereits nach dreissig Minuten (nach der Hälfte der Eintauchzeit!), während für die andern Proben diese Verlangsamung erst etwa beim vollständigen Untertauchen beginnt. Die Ausdehnungsgeschwindigkeit nimmt für KRAU so sehr ab, dass diese Probe beim Vergleich zwischen A und E72h völlig aus der Reihe tanzt (Figur 34).

Nach dreissig Minuten Benetzung ist die Ausdehnung verglichen mit A von KRAU noch durchaus im Rahmen der andern Proben, dann aber dehnt sich diese Probe eindeutig weniger stark aus als die andern. Dass auch KM sich anders verhält als die andern Proben, ist wohl durch

ihren Mergelgehalt zu erklären; das Ausdehnungsverhalten von KRAU im Vergleich zu den andern Proben ist aber noch ungelöst.

mineralogischen Zusammensetzung, vor allem die Struktur des Porenraumes eine wichtige Rolle für die Dilatation bei der Wasseraufnahme spielt. Das Zusammenspiel der Vorgänge, welche schlussendlich zu der Ausdehnung führen, ist aber noch nicht genau bekannt.



Figur 34: Wasseraufnahmekoeffizient A verglichen mit der Ausdehnung bei Wasseraufnahme nach 30 Minuten, respektive nach 3 Tagen.

GU: Gurten, OB: Ostermundigen blau, OGE: Ostermundigen gelb, OGR: Ostermundigen grau, KRAU: Krauchthal, KM und KR: Bohrkerne Krauchthal mit Mergelschmitzen resp. ohne Mergelschmitzen.

Die Ursachen für den Verlauf und die Größe der Ausdehnung bei der Wasseraufnahme ist also nicht in jedem Fall klar. Félix und Furlan (1982) haben festgestellt, dass die Längenänderung schneller verlief, aber niedrigere Endwerte erreichte, wenn die Proben sehr schnell (innerhalb von 15 Sekunden) eingetaucht wurden, als wenn sie langsam (innerhalb einer Stunde) eingetaucht wurden. Zudem stellten sie fest, dass auch bei Eintritt der Wassersättigung der Steine ihre maximale Ausdehnung noch nicht erreicht war.

Félix (1983) stellte nach nur wenigen Tränkungs-Trocknungs-Zyklen an einem Sandstein fest, dass der Stein eine bleibende Ausdehnung erfahren hatte, welche etwa 80 % des E72h-Wertes betrug.

Hatsagortsian (1985) hat festgestellt, dass ein vulkanischer Tuff nach 100 Tränkungs-Trocknungs-Zyklen die grösse Verringerung des Elastizitätsmoduls erfahren hatte als nach der gleichen Anzahl Frost-Tau-Zyklen. All dies sind Hinweise darauf, dass, neben der

mineralogischen Zusammensetzung, vor allem die Struktur des Porenraumes eine wichtige Rolle für die Dilatation bei der Wasseraufnahme spielt. Das Zusammenspiel der Vorgänge, welche schlussendlich zu der Ausdehnung führen, ist aber noch nicht genau bekannt.

4.6 Zusammenfassung und Vergleich der Berner Sandsteine mit andern Molassesandsteinen des Schweizerischen Mittellandes

4.6.1 Gegenüberstellung der verschiedenen Berner Sandsteine

Die chemische und mineralogische Zusammensetzung der untersuchten frischen Proben von Berner Sandstein sind alle sehr ähnlich (Tabelle 6). Dabei weist die Probe vom Gurten (GU) den grössten Anteil an Kalzitkement und den kleinsten an Quarz auf. Die blauen bis grauen Proben weisen einen grösseren Anteil an zweiwertigem Eisen auf als die gelben Sandsteine.

Der wasserlösliche Anteil ist für diejenigen Proben am grössten, die auch am meisten Tonmineralein enthalten. Hier ist speziell die recht gute Korrelation zwischen den Alkalien und den Tonmineralehalten zu erwähnen (Figur 15). Die deutlich höchsten Sulfatgehalte weist mit 85 ppm die Probe vom Gurten auf.

Die Wasseraufnahme unter Vakuum ist für die Gurten-Proben am kleinsten und für die Krauchthaler Proben am grössten (Tabelle 15). Die mittels Quecksilberdruckporosimetrie gemessenen Porositäten (top) sind alle etwa gleich gross; der Anteil der Grobporosität (ogr) an der totalen Porosität kann aber stark schwanken. Er macht für die Gurten-Proben nur 6.5 %, für die Krauchthaler- und die gelben Ostermundiger Sandsteine dagegen über 30 % ihrer Porosität aus.

Deutliche Unterschiede gibt es auch in den Geschwindigkeiten, mit denen die verschiedenen Proben Wasser aufsaugen (Tabelle 11). Eindeutig am schnellsten saugen die Krauchthaler Proben das Wasser, gefolgt von den Ostermundiger- und den recht langsam saugenden Gurten-Sandsteinen. Nur die Gurten- und die grauen Ostermundiger-Sandsteine saugen das Wasser parallel zur Schichtung etwas schneller als senkrecht dazu.

Die Ausdehnung der Proben bei der Wasseraufnahme ist für die

mergelhaltige Probe (KM) am grössten. Für die andern Proben, ausgenommen KRAU, wurde eine recht gute, positive Korrelation zwischen der Längenänderung und dem Wasseraufnahmekoeffizienten (A) (Figur 34) gefunden. Die verhältnismässig geringe Ausdehnung von KRAU konnte vorläufig nicht erklärt werden.

4.6.2 Vergleich mit den Sandsteinen aus dem Burdigalien der Westschweiz

Der Vergleich mit den in der Westschweiz abgebauten Sandsteinen der Oberen Meeresmolasse drängt sich auf, da sie zu den Berner Sandsteinen im weiteren Sinn gerechnet werden können (de Quervain und Gschwind, 1934). Félix (1985) gibt einen Überblick über die wichtigsten Verwitterungsformen dieser Sandsteine, welche an Wetterfassaden häufig Schalenbildung aufweisen. Weitere häufige Veränderungen sind Absanden und die Bildung von oberflächlichen Gipskrusten. Diese Steine sind also in ihrem Verwitterungsverhalten recht ähnlich wie die hier beschriebenen Sandsteine; Schalenbildungen scheinen bei den Molassesandsteinen der Westschweiz etwas häufiger zu sein.

Im Steinbruch von Villarlod, Kanton Freiburg, werden diese Sandsteine heute noch abgebaut. Félix (1977) hat die geologisch-mineralogischen und die physikalischen Eigenschaften der Sandsteine von Villarlod zusammengestellt. Ein Vergleich mit den hier bearbeiteten Berner Sandsteine s.str. ergibt folgendes Bild: das makroskopische Aussehen der Sandsteine von Villarlod und die mineralogische Zusammensetzung entsprechen den Berner Sandsteinen s.str. Auch die Ausdehnung bei Wasseraufnahme und der Wasseraufnahmekoeffizient sind in der gleichen Größenordnung. Die Wasseraufnahme unter Vakuum und die absolute Porosität liegen bei den Berner Sandsteinen s.str. leicht höher. Die grössten Unterschiede zeigen die Sulfatgehalte: so weisen die Sandsteine von Villarlod mit 0.07 Gew-% fast zehn mal mehr Sulfat auf als der Berner Sandstein mit dem höchsten SO_4^{2-} -Wert (0.0085 Gew-%).

4.6.3 Vergleich mit den Granitischen Sandsteinen und den Plattsandsteinen

Das Verwitterungsverhalten der Granitischen Sandsteine und der Plattsandsteine wurde von Zehnder (1982) beschrieben. Ein Vergleich der Berner Sandsteine mit diesen Sandsteinen scheint deshalb sinnvoll, weil vor allem die Granitischen Sandsteine, welche als viel verwitterungsresistenter als die Berner Sandsteine gelten, in Bern an exponierten Stellen recht häufig verwendet worden sind (zum Beispiel als Fialen am Münster).

Tabelle 15: Zusammenstellung einiger Eigenschaften der Berner-, Platten- und Granitischen Sandsteine.

	Berner Sandsteine	Granitische Sandsteine	Platten- sandsteine 1)
Cc-Zement	7 - 12.5 %	1 - 10 %	5 - 15 %
Pa 2)	17 - 21 %	7 - 11 %	4 - 8 %
Ws1 2)	15 - 18.5 %	2.5 - 3.5 %	1 - 2.5 %
A [g/cm ² sec ^{1/2}]	0.0044 - 0.011	0.0020 3)	-
B [cm/sec ^{1/2}]	0.038 - 0.10	0.034 3)	-
D trocken [kg/cm ²]	250 - 400	500 - 1000	800 - 1100
D nass [kg/cm ²]	100 - 200	400 - 700	600 - 900
r [µm]	um 6.3	0.3 - 3	0.3 - 0.7
T 4)	Absanden, 4) (Schale)	Schale, 4) (Absanden)	Schale, 4) (Absanden)

Cc-Zement: Kalzit-Zement

Pa : totale Porosität nach de Quervain (1967)
Ws1 : scheinbare Porosität nach de Quervain (1967)

A : Wasseraufnahmekoeffizient

B : Wassereindringkoeffizient
D : Druckfestigkeit

r : häufigste Porenradien
T : Verhalten im Na_2SO_4 -Tränkversuch nach de Quervain und Jenny (1951)

1) wo nicht anders vermerkt nach Zehnder (1982)

2) nach de Quervain (1967)

3) nach Kraus (1985)

4) nach de Quervain und Jenny (1951)

Gross sind vor allem die Unterschiede in der Porosität und bei den häufigsten Porenradien der verschiedenen Sandsteine. Die langsameren Wasseraufnahmer- und -eindringgeschwindigkeiten für die Granitischen als für die Berner Sandsteine lassen sich durch die engeren Porenradien der ersten erklären. Die deutlich höhern Druckfestigkeiten der Granitischen Sandsteine und der Plattsandsteine dürften unter anderem im Zusammenhang mit ihrem kleineren Porenvolumen stehen.

Es kann vermutet werden, dass die Tendenz zum Absanden der Berner Sandsteine im Tränkversuch und am Bau ebenfalls mit den Unterschieden in der Porosität und in der räumlichen Porenverteilung zusammenhängt. Diese Vermutung basiert vor allem darauf, dass Versuche gezeigt haben, dass die Behandlung von Berner Sandsteinen mit einem Steinfestiger zu einer Abnahme des Porenvolumens in einem ganz bestimmten Porenradienbereich ($r = 0.01 - 0.1 \mu\text{m}$) führten, und dass die Steine nach der Festigung im Tränkversuch nicht mehr absanden, sondern Schalenbildungen und Abblätterungen aufwiesen (Zehnder und de Quervain, 1977).

5 Objektstudien (Verwitterungsprofile)

Bereits zu Beginn dieser Arbeit stand fest, dass es sinnvoll wäre, neben dem Situationenkatalog (Kapitel 2), an mindestens einem Objekt vertiefte Untersuchungen zur Sandsteinveränderung und zum Salzhalt bei bestimmten Verwitterungsformen anzustellen. 1984 bot sich dazu die SW-Ecke der Stützmauer der Münsterplattform an (Figur 35). Dieses Objekt sollte renoviert werden, weshalb besonders von den Salzanalysen ein praktischer Nutzen bei den anstehenden Ausführungsentscheidungen erwartet wurde.

Die Untersuchungen an Bohrkernen der Matteschulhäuser waren damals schon weitgehend fertig, und die Renovierungsarbeiten an den beiden Gebäuden hatten schon begonnen. Für die Matteschulhäuser wurden mir die Resultate der Salzanalysen vom StadtLabor und die Resultate der Porositätsmessungen und die Schadenbeschreibungen vom Technologischen Labor des Instituts für Denkmalpflege der ETH-Zürich zur Verfügung gestellt.

5.1 Münsterplattform-Stützmauer

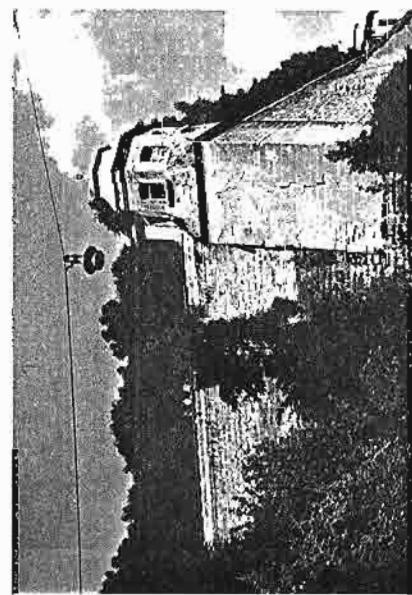
5.1.1 Bau- und Renovationsgeschichte

Die Bau- und Renovationsgeschichte des SW-Teils der Münsterplattform-Stützmauer sind in einem unveröffentlichten Bericht zusammengestellt worden (Dreifuss, 1983). Daraus geht hervor, dass die Grundsteinlegung 1334 erfolgte, und dass vorerst eine senkrechte, sich nach oben verjüngende Mauer gebaut wurde. Bereits um 1450, als die Mauer im grossen und ganzen ihre heutige Höhe erreicht hatte, zeigte es sich, dass sie dem Druck des Füllmaterials nicht genügend standhielt. So wurde 1479 dem unteren Teil der Westmauer eine

Böschungsmauer aus Sandstein vorgemauert. Bereits aus dem 16. Jahrhundert gibt es Hinweise, welche auf Risse und Spalten in der Mauer hindeuten; aber der grosse Riss unterhalb des Westtürmchens wird erst 1808 zum ersten Mal eindeutig erwähnt. Die 1985 begonnenen Renovierungsarbeiten haben nicht zuletzt zum Ziel, die Probleme, welche sich aus dem langsamem Auseinander-Bewegen der Süd- und der Westmauer ergeben, zu lösen.

Der Ostteil und die SE-Ecke der Münsterplattform-Stützmauer waren bereits in den Jahren 1980 bis 1984 saniert worden (Baudirektion der Stadt Bern, 1984).

Die senkrechten oberen Teile der Westmauer zeichnen sich durch Schalenbildungen, Abblättern und vor allem in den obersten paar



Figur 35: Übersichtsfoto der SW-Ecke der Münsterplattform-Stützmauer

5.1.2 Schädenbilder, Zustand der Mauer und Bohrkernbeschreibungen
Die senkrechten oberen Teile der Westmauer zeichnen sich durch Schalenbildungen, Abblättern und vor allem in den obersten paar

Meter durch Absanden aus. Salzausblühungen sind selten; an vier Stellen wurden Thenardit, Nitronatrit und Gips festgestellt. Im unteren, schrägen Teil der Mauer sind die Bossen stark mit Algen, Flechten und stellenweise auch mit höheren Pflanzen bewachsen. Der dumpfe Klang beim Dranklopfen deutet auf eine tiefe Auflockerung hin.

Auf der Westseite, im unteren Teil des SW-Pfeilers, bilden sich Schalen und in der Nähe des schrägen unteren Teils der W-Mauer sanden die Sandsteine oberflächlich stark ab. An der Südseite des Pavillon-Unterbaus sanden die Sandsteine leicht oder sie sind mit einer hellen Gipskruste überzogen.

Der oberste senkrechte Teil der Südmauer ist grossflächig mit Zementmörtel überzogen. Wo die Sandsteine an der Oberfläche zu sehen sind, sanden sie immer sehr stark ab und sind meist mehrere Zentimeter zurückgewittert. Rings um die mit Mörtel überzogene Partie wurden denn auch Natriumkarbonat-Ausblühungen nachgewiesen. Ausser basisch reagierendem Natrit ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) wurden in der Nähe des Mörtels in den Salzausblühungen noch folgende Bestandteile nachgewiesen: Thenardit (Na_2SO_4), Nitronatrit (NaNO_3) und Cl^- . Bereits wenige Dezimeter neben den Mörtelflicken wurden keine alkalischen Salze mehr festgestellt, obwohl die Steine auch dort noch sehr stark absanden. Bei den eher seltenen Salzausblühungen in einiger Entfernung vom Mörtel handelte es sich immer um neutrale Natrium- und Kalziumsulfate und -nitrate.

Der Pavillon zeigte im allgemeinen die typischen Verwitterungsscheinungen in Abhängigkeit von der Exposition, also dunkle Krusten in regengeschützten Bereichen, starkes Absanden und Aufflocken in den Übergangsbereichen sowie Schalenbildung, Algen- und Flechtenbewuchs dort, wo die Steine direkt beregnet werden. Einzig unterhalb des Südfensters am Pavillon wurde ein Feuchter, stark absandernder Hof mit vielen Salzausblühungen festgestellt, der nicht der "normalen" Verwitterung entsprach. Folgende Ausblühungssalze wurden dort festgestellt: Mirabilit ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), Thenardit (Na_2SO_4) und Galit (NaCl). Etwas rechts davon fanden sich Mörtelflicke mit feinstpulvrigem, alkalischen Ausblühungen, welche folgende Ionen enthielten: Na^+ , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , NO_3^- und Cl^- . Es ist nicht auszuschliessen, dass diese stärker als ihre Umgebung verwitternde Stelle im Zusammenhang

mit der WC-Anlage steht, als die der Pavillon zuletzt diente. Beim Abbruch dieser Anlage wurde nämlich festgestellt, dass ihr Ablauf leck war (mündliche Mitteilung Herr Funk).

Bohrkerne zur genaueren Untersuchung wurden so entnommen, dass möglichst alle an der Mauer vorkommenden Situationen erfasst wurden.

Bereits im Frühling 1984 wurden an 6 Stellen der Mauer Bohrkernentnahmen. Sie wurden durch das Technologische Labor des Instituts für Denkmalpflege beschrieben und auf ihre Verwitterungstiefe hin untersucht (Arnold und Küng, 1984). Für die Bestimmungen der löslichen Anteile in den Sandsteinen wurde dann im Winter 1985 aus den gleichen sechs Quadern nochmals je ein Kern trocken erbohrt. Zusätzlich wurden noch an zwei Stellen an der West- und der Südseite unterhalb des Pavillons Kerne entnommen. Die nachfolgenden Probenbeschreibungen beziehen sich vor allem auf die Bohrkerne, welche 1985 entnommen wurden; sie werden aber durch die Beobachtungen von Arnold und Küng (1984) ergänzt. Die genauen Bohrkernentnahmestellen sind in steingerechten Plänen beim Hochbauamt der Stadt Bern festgehalten.

In den folgenden Kernbeschreibungen sind die von Arnold und Küng (1984) benutzten Probenbezeichnungen in Klammer angegeben, da hier etwas andere Probenbezeichnungen benutzt werden,

Bohrkern 1s (und Bohrkern 3 von 1984), Länge: 35 cm; Durchmesser 5.2 cm.

Entnahmestelle: Südmauer, am oberen Teil des steilen Oberbaus, innerhalb des mit Zementmörtel überdeckten Bereichs.
4 - 5 Meter vom SW-Turm weg und etwa 3 Meter unterhalb der Brüstung.

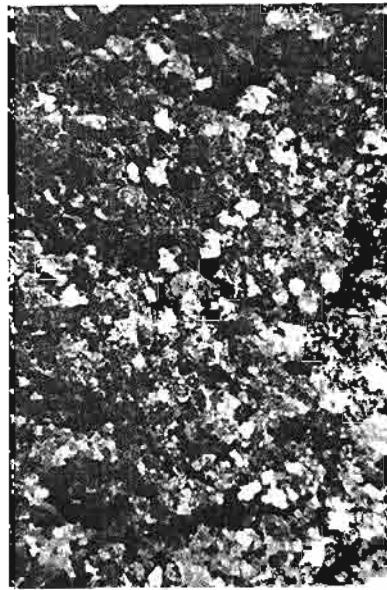
Beschreibung: Die Oberfläche ist von einem 1.0 bis 1.5 cm dicken Mörtelflick überzogen. Dahinter ist der Sandstein intakt.

Der Kern war feucht, obwohl er trocken erbohrt wurde, und mit einer feinen Gesteinsstaubsschicht verklebt, als er geliefert wurde. In einer Tiefe von 25 bis 29 cm befindet sich eine 1 mm dicke Mergelschmitze.

Bemerkungen: Auf Sandsteinquadern ganz in der Nähe der Bohrkernentnahmestelle wurden folgende Salze und Ionen nachgewiesen:
- Natrit, Thenardit, NO_3^- , Cl^- .

Bohrkern 2W (und Bohrkern 1 von 1984), Länge 36 cm; Durchmesser 5.2 cm.

Entnahmestelle: Westmauer, in der Mitte des steilen Oberbaus, circa 7 Meter vom Turm und 5 Meter unterhalb der Brüstung.
Beschreibung: Aussen befindet sich eine 1 cm dicke Schale vor einer 1.5 cm dicken Lockerzone. Der äusserste Teil dieser Lockerzone besteht aus kleinen Sandsteinfragmenten und aus einer Zone mit gut sichtbaren, oberflächenparallelen Rissen. Auf den Oberflächen der Lockerzone treten weisse, punktförmige Gipsausblühungen auf (Figur 36). Ab einer Tiefe von 2.5 bis 3 cm ist der Kern kompakt und sandet nicht. In der Tiefe von 4 bis 8.5 cm befindet sich eine bis 3 mm dicke Mergelschmitze und in der Tiefe von 16 bis 18 cm liegt kernachsenparallel ein etwa 0.5 mm dicker brauner Pflanzenrest. Die Maueroberfläche ist gelbbraun verfärbt, sandet nicht, und stellenweise wird sie von Flechten besiedelt.



Figur 36: Punktförmige Gipsausblühungen auf Oberflächen in der Lockerzone. Bildbreite 5mm.

Bemerkungen: Auf der Kernoberfläche wurden durch C. Scheidegger folgende Flechten bestimmt:
- *Cadelariella aurella* var. *aurella* (Krustenflechte mit

schwefelgelben Apothecien (Fruchtkörpern).
- *Lecanora dispersa* (Krustenflechte mit braunen Apothecien mit einem grauen Rand.)

Bohrkern 3s (und Bohrkern 4 von 1984), Länge 30 cm, Durchmesser 5.2

cm.
Entnahmestelle: Südmauer; im unteren Teil des steilen Oberteils, etwa 6 Meter vom SW-Turm entfernt und etwa 8 Meter unterhalb der Brüstung. Die Stelle liegt etwa 2 Meter unterhalb der mit Zementmörtel überzogenen Zone.

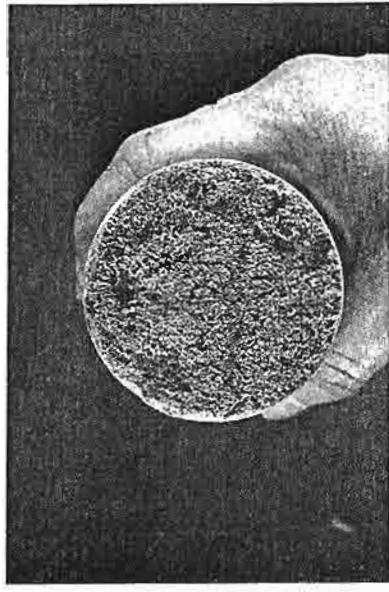
Beschreibung: Die ersten 2 cm des Kernes fehlen fast ganz. Arnold und Küng (1984) hatten in den äussersten Zentimetern eine mauerparallele Aufblätterung festgestellt. In einer Tiefe von 7.5 cm ist der Kern beim Bohren gebrochen. Der Sandstein weist eine angedeutete waagrechte Schichtung auf und ist relativ grobkörnig (mittlere Korngrösse etwa 0.3 mm).

Bemerkungen: Etwa einen Meter über der Kennentnahmestelle wurde am 7.4.86 eine feinstpulvige Salzausblühung mit der Zusammensetzung Na^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} und NO_3^- gefunden.

Bohrkerne 4s und 5s, Länge 35 cm, Durchmesser 5.2 cm.

Entnahmestelle: Südseite des Turmunterbaus, 9.5 Meter unterhalb OK Fensterbank, 2 Meter von der Ecke entfernt. Beide Kerne wurden direkt nebeneinander im gleichen Quader entnommen. 4s wurde für den Wasseraufnahmeversuch und die Dünnschliffe benutzt.

5s wurde für die Salz- und die Porenanalysen verwendet.
Beschreibung: Die äussersten 2 mm sind leicht bräunlich gefärbt und tragen eine 0.5 bis 1 mm dicke gräuliche Gipskruste, die sich flockig vom Stein löst (Figur 37). Darunter ist der Stein intakt.



Figur 37: Aufsicht auf die oberflächliche Gipskruste des Kerns 5s.
Bohrkerne 6w und 7w, Länge 37 cm, respektive 39 cm; Durchmesser 5.2 cm.

Entnahmestelle: Westseite des Turmunterbaus, 9.5 Meter unterhalb OK Fensterbank (auf der gleichen Höhe wie 4s und 5s). 4 Meter von der Ecke entfernt und etwa 20 cm respektive 30 cm links vom grossen Spalt.

6w wurde für den Wasseraufnahmeversuch und die Dünnschliffe benutzt.
7w wurde für die Salz- und Porenanalysen verwendet.

Beschreibung: Die Steinoberfläche wird durch eine 1 bis 2 mm dicke bräunliche Schicht gebildet, die leicht absandet (an der Oberfläche von 6w wurde sie offenbar beim Bohren abgeschabt). In der Tiefe von 2 cm löst sich eine Schale entlang einer scharfen Grenze vom Rest des Kerns. In den folgenden 1 bis 2 cm weist der Kern parallel zur Schale verlaufende Haarrisse auf. Solche Risse sind auch innerhalb der Schale zu beobachten.

Der Sandstein ist relativ grobkörnig (0.3 - 0.4 mm mittlere Korngrösse). Er erschien beim Sägen etwas weicher als die Kerne 1 bis 5.

Bohrkern 8w (und Bohrkern 2 von 1984), Länge 39 cm; Durchmesser 5.2 cm.

Entnahmestelle: Westmauer im obersten Teil des bossierten Unter- teils. Etwa 10 Meter unterhalb der Brüstung und 7 Meter vom Turmunterbau entfernt.

Beschreibung: In einer Tiefe von 5 bis 14 cm ist der Kern beim Bohren in mehrere Stücke zerbrochen, in der Tiefe von 18 bis 30 cm ist er staubverklebt und feucht. Der vordere Teil des Kerns fühlt sich oberflächlich rauh an und sandet leicht ab. Die Oberfläche ist von Flechten und Moosen bewachsen, unter denen sich eine etwa 1 mm dicke humusähn- liche Zone bildete.

Bemerkungen: Die auf der Oberfläche wachsenden Flechten und Moose wurden von C. Scheidegger bestimmt:

- *Verrucaria c.s. macrostoma* (braun-schwarze Krustenflechte)
- *Collema spec.* (schwarze "buschige" Blaulalgenflechte)
- *Caloplaca teicholyta* (schnneeweiße Flechte, die wie eine Salzausbühlung aussieht)
- Knospen eines wahrscheinlich akrokarpfen (spitzfrüchtigen) Laubmooses.

Bohrkern 9s (und Bohrkern 5 von 1984), Länge 37 cm; Durchmesser 5.2 cm.

Entnahmestelle: Südmauer, aus dem drittobersten Stein des bossierten Unterteils der Mauer (ein Stein tiefer als die Probe 5 von 1984, da diese Stelle wegen des Baugerüsts nicht mehr zugänglich war). Etwa 11.5 Meter unter der Brüstung und 6 Meter vom Turmunterbau entfernt.

Beschreibung: Die Mauerfläche ist mit Flechten bewachsen. Wo diese fehlen sandet der Stein leicht ab. Auf den ersten 10 cm sandet der Kern oberflächlich etwas ab; in 25 cm Tiefe ist er entlang einer scharfen Grenze in zwei Teile gebrochen.

In 28 cm Tiefe wurde ein Hohlraum, der zum Teil Kalkmörtel

enthieilt angebohrt (Figur 38).

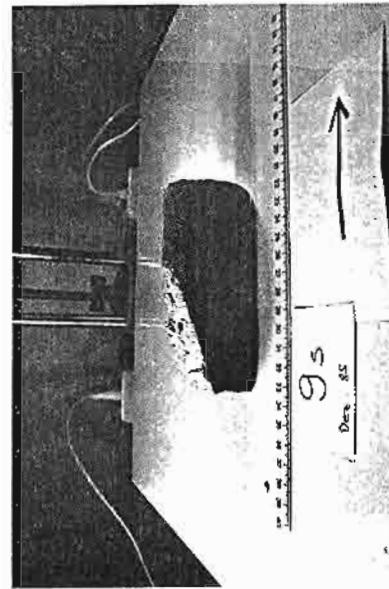
Bemerkungen: Etwa einen Meter neben der Probe 9s wurden am 30.6.86 Salzausbühlungen aus Thennardit und etwas weniger Gips bestimmt.

Die Flechten auf der Steinoberfläche wurden von C. Scheidegger wie folgt bestimmt:

- *Caloplaca teicholyta*
- *Lecanora dispersa*

Zudem wurden Knospen eines wahrscheinlich akrokarpfen Laub-

mooses festgestellt.



Figur 38: Hinterer Teil des Bohrkerns 9s. Die an den Hohlraum grenzende Oberfläche des Kerns ist mit einer weissen 0.5 bis 1 mm dicken Kalksinterkruste überzogen. Darunter bildete sich eine bis zu 5 mm tiefe Zone aus, in der die Porosität etwas reduziert ist (Dünnschliffbeobachtung). Dann folgt ein 1 mm breiter, unter dem Binokular glasig erscheinender, grauer Streifen, der kaum mehr mit Harz füllbare Poren aufweist. Der Streifen enthält also höchstens noch Mikroporen. Ausserhalb dieses Streifens weist der Sandstein keine sichtbaren Veränderungen mehr auf.

Bohrkern 10s (und Bohrkern 6 von 1984), Länge 36.5 cm; Durchmesser 5.2 cm.

Entnahmestelle: Stützmauer, im bossierten Unterteil, 3 Meter tiefer und 0.5 Meter weiter links als 9s.

Beschreibung: Der Kern zerfiel beim Bohren in drei Stücke. Die Oberfläche ist mit den gleichen Flechten wie der Bohrkern 9s und mit Mooskeimen bewachsen. Im vorderen Teil sandet der Kern auf den Zylinderflächen ab; in tiefen Bereichen war er feucht.

5.1.3 Resultate der Untersuchungen an Bohrkernen

Die Messmethoden sind insbesondere in den Abschnitten 3.2.2, 3.2.4.1E und 3.2.4.2 besprochen. Ausser für die Proben 4s respektive 5s und 6w respektive 7w wurden alle Wasseraufnahmebestimmungen im Technischen Labor des Instituts für Denkmalpflege der ETH-Zürich gemacht. Die Resultate wurden dem Bericht von Arnold und Küng (1984) entnommen.

Nachfolgend werden als erstes alle Resultate der porosimetrischen und der chemischen Analysen in den Tabellen 16 und 17 aufgeführt. Die in ppm umgerechneten Resultate der Analysen der Wasserauszüge sind im Anhang in Tabelle 22 zusammengestellt. Anschliessend an die beiden Tabellen werden die Resultate für jeden Kern einzeln diskutiert, und zuletzt werden die Kerne miteinander verglichen.

Tabelle 16: Resultate der Quecksilberdruckporositäts-Messungen an Bohrkernen der Münsterplattform-Stützmauer. Die Probenbezeichnung setzt sich aus der Bohrkernnummer und der Entnahmetiefe zusammen.

	Probe	ogrP	ogrM	ogrP [ml/100g]	ogrM [ml/100g]	tGP	omip	top	r-Bereich [µm] [%]	%P(r)
1s/4-5		0.55	5.65	2.80	9.00	6.79			5.2 - 6.3	48.9
1s/19-20		0.58	5.62	2.90	9.10	6.20			5.8 - 6.3	42.9
2w/0-1		1.48	6.22	2.73	10.43	5.59			5.2 - 6.3	43.6
2w/2-3		2.05	5.25	2.33	9.63	5.57			5.2 - 6.3	36.3
2w/19-20		0.29	5.11	2.41	7.81	4.81			5.2 - 6.3	49.9
2w/29-30		0.39	5.55	2.71	8.65	4.91			5.2 - 6.3	47.4
3s/2-3		0.70	5.02	1.97	7.69	6.53			5.2 - 6.3	46.8
3s/9-10		0.79	5.03	2.76	7.79	6.21			5.9 - 6.3	47.5
3s/29-30		0.92	4.62	2.34	7.88	5.20			5.2 - 6.3	44.4
5s/0-1		1.56	6.04	2.54	10.14	7.12			5.9 - 6.3	42.4
5s/9-10		0.71	5.39	2.46	8.56	6.43			5.9 - 6.3	42.6
5s/29-30		0.88	4.64	2.88	8.40	5.02			5.2 - 6.3	35.7
7w/1-2		4.03	4.21	2.28	10.52	9.02			5.2 - 6.3	26.1
7w/2-3		4.19	4.47	1.60	10.26	9.00			5.2 - 6.3	38.5
7w/27-28		0.97	5.03	2.43	8.43	6.44			5.2 - 6.3	43.3
8w/0-2		3.66	4.94	3.00	11.60	6.30			5.2 - 8.8	44.0
8w/14-15		0.93	5.95	2.42	9.30	7.13			5.2 - 6.3	44.1
8w/29-30		0.68	5.56	2.60	8.84	5.65			5.2 - 6.3	46.4
9s/0-1		4.69	5.01	2.85	12.55	5.89			5.2 - 8.8	45.4
9s/27-28		1.04	4.62	2.38	8.04	5.67			5.2 - 6.3	42.9
10s/0-2		5.18	4.82	2.63	12.63	8.49			5.2 - 10.05	56.2
10s/9-10		1.51	4.33	2.65	8.49	7.90			5.2 - 6.3	32.4
10s/29-30		0.90	4.18	2.64	7.72	4.77			5.2 - 6.3	38.9

ogrP: offene Grobporosität; ogrM: offene Makroporosität; top: totale offene Porosität;
r-Bereich: häufigster Porenengangsradien-Bereich; %P(r): Anteil an Poren mit Radien im r-Bereich in % von top.

Tabelle 17: Chemie der wasserlöslichen Anteile in den Bohrkernen der Münsterplattformstützmauer. Angaben in $\mu\text{mol/g}$. (Die Tabelle 22 mit den in ppm umgerechneten Werten findet sich im Anhang). Die Probenbezeichnung setzt sich aus der Bohrkernnummer und der Entnahmetiefe zusammen.

Bil: Ladungsbilanz

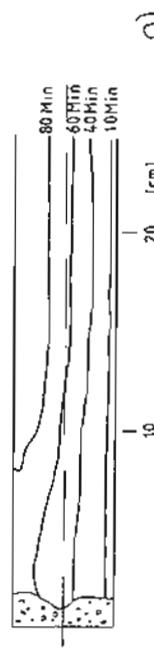
Probe	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	pH	Bil	
7w/0-3	28.0	13.4	23.1	143	10.1	6.03	-	92	10.80	-30	-	
1s/0-2	0.89	1.18	0.32	45	6.66	9.40	-	1.70	8.84	9.90	-11	
1s/2-3	1.01	0.88	0.32	52	6.14	9.49	-	3.48	11.8	9.80	-8	
1s/3-4	0.75	0.75	0.33	50	6.67	9.24	-	3.90	13.7	9.75	-1	
1s/4-5	0.75	1.04	0.30	47	7.01	7.20	-	3.54	12.1	9.85	-3	
1s/7-8	0.81	1.69	1.96	0.22	36	7.86	6.75	-	1.64	8.38	9.75	-5
1s/9-10	0.41	1.22	0.22	43	7.41	6.65	-	3.07	9.93	9.80	-5	
1s/19-20	0.51	2.11	0.20	42	6.86	6.02	-	2.89	12.6	9.80	-2	
1s/26-27	0.27	0.13	74	20	1.11	1.76	1.60	3.39	83	9.30	10	
2w/2-3	1.04	0.54	49.7	25	2.00	3.86	0.28	5.98	36.8	9.40	-34	
2w/3-4	3.11	2.49	17.2	35	4.43	4.74	0.27	5.55	16.6	9.65	-21	
2w/4-5	3.80	3.59	16.2	33	7.47	2.30	-	5.36	13.0	9.65	-27	
2w/6-7	8.32	10.5	2.94	31	9.93	2.87	0.23	4.86	10.6	9.65	-12	
2w/8-9	12.6	21.0	0.62	33	10.3	2.05	-	5.83	14.1	9.40	-15	
2w/9-10	12.3	19.6	0.53	37	10.8	2.88	-	6.48	14.9	9.45	-13	
2w/19-20	11.2	9.88	0.27	36	9.54	3.07	-	4.56	9.78	9.65	-17	
2w/29-30	4.46	2.57	0.69	45	8.25	4.06	2.19	5.32	9.89	9.65	-11	
2w/34-35	1.47	1.01	0.15	41	6.96	2.34	0.18	3.64	8.34	9.80	-11	
3s/1-2	22.5	82	54	24	35.3	7.15	-	11.7	111	9.40	51	
3s/2-3	22.1	73	21.0	25	33.9	5.92	-	8.07	65	9.45	22	
3s/3-4	21.9	70	9.92	27	32.6	6.05	-	6.83	49.3	9.55	12	
3s/4-5	27.4	72	5.97	27	34.0	5.32	-	6.91	53	9.60	21	
3s/6-7	28.9	82	3.56	25	36.3	5.04	-	7.66	45.1	9.60	6	
3s/7-8	31.4	81	1.13	22	35.3	3.83	-	5.10	41.8	9.60	-4	
3s/9-10	32.8	78	1.17	25	42.4	5.18	-	6.93	42.3	9.50	8	
3s/14-15	40.2	75	0.40	23	43.0	4.83	-	7.06	37.9	9.50	-2	
3s/19-20	39.5	60	0.36	25	43.1	4.42	-	5.95	33.7	9.35	2	
3s/29-30	36.4	43.5	0.33	24	42.3	3.97	-	4.95	25.2	9.60	1	
5s/0-0.2	4.13	6.66	503	12	7.35	2.61	3.88	19.1	528	8.60	-	
5s/0.2-1	3.97	5.34	7.1	36	7.34	5.90	-	16.5	86	9.50	29	
5s/1-2	1.87	4.85	10.2	53	6.85	4.58	-	13.5	42.3	9.65	43	
5s/2-3	1.66	3.99	7.68	50	6.48	4.20	-	4.82	27.9	9.55	5	
5s/3-4	1.00	2.29	0.92	44	6.36	4.17	-	4.83	18.3	9.70	8	
5s/4-5	1.03	2.43	0.22	40	6.74	3.99	-	3.74	15.5	9.65	5	
5s/5-6	1.40	2.32	0.16	41	5.80	2.49	-	3.01	12.7	9.75	-6	
5s/9-10	2.87	1.73	0.12	42	7.29	4.20	-	3.28	14.5	9.65	0	
5s/19-20	0.62	0.47	0.57	36	8.59	3.95	-	2.82	10.9	9.85	1	
5s/29-30	0.44	0.10	0.15	39	9.40	2.49	-	2.90	11.0	9.95	-1	
5s/31-34	0.22	0.11	0.15	39	9.90	4.25	-	2.38	11.2	10.00	-2	
5s/35-38	0.22	0.11	0.15	39	9.90	4.25	-	2.38	11.2	10.00	-1	

Probe	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	pH	Bil
7w/0-3	28.0	13.4	23.1	143	10.1	6.03	-	92	10.80	-30	-
7w/0-3-1	8.28	24.4	7.56	29	9.47	5.19	0.85	5.84	25.8	9.70	2
7w/1-2	8.84	32.1	47.8	19	11.1	4.52	1.03	7.03	65	9.45	5
7w/2-3	13.4	48.4	54	20	15.5	5.12	0.41	8.09	80	9.35	8
7w/3-4	13.5	51	33.8	20	16.3	5.05	0.64	7.33	61	9.40	6
7w/4-5	14.0	53	23.1	20	17.3	4.69	0.79	6.41	52	9.45	6
7w/5-6	14.5	54	17.1	23	18.3	4.37	0.83	6.00	45.8	9.45	2
7w/6-7	15.4	51	13.2	24	17.2	3.35	0.19	5.74	41.3	9.50	-2
7w/9-10	11.9	38.4	3.82	26	14.8	3.57	0.18	8.02	27.0	9.60	5
7w/14-15	8.68	25.9	0.44	29	11.9	2.69	0.20	3.24	20.5	9.60	-3
7w/19-20	6.44	18.7	0.45	30	9.97	3.11	0.16	3.70	18.1	9.70	1
7w/27-28	5.76	18.7	0.30	32	9.85	3.30	1.25	4.14	18.1	9.65	2
7w/37-38	11.1	38.5	0.41	28	11.6	2.99	3.25	4.48	27.6	9.60	4
8w/0-0.3	0.72	-	1.26	25	0.65	3.93	0.40	1.89	15.7	9.40	12
8w/0-3-2	0.26	-	0.14	25	0.94	3.17	-	2.35	14.9	9.80	1
8w/2-3	0.17	-	0.12	39	1.51	4.01	-	2.57	15.4	9.85	2
8w/3-4	0.11	-	0.12	39	1.52	3.66	-	2.92	14.9	9.75	2
8w/4-6	0.07	0.04	0.08	33	1.41	2.07	0.24	2.65	14.1	9.85	4
8w/6-7	0.10	-	0.12	40	1.50	2.56	0.18	3.42	14.9	9.85	1
8w/7-13	0.11	-	0.11	34	1.17	2.18	-	3.02	13.0	9.90	1
8w/13-14	0.14	-	0.15	37	1.37	2.70	-	2.94	15.7	9.90	4
8w/14-15	0.07	-	0.10	70	0.52	1.60	-	1.94	11.8	9.85	-40
8w/19-20	0.10	-	0.12	36	1.39	3.12	-	3.53	11.9	9.85	-1
8w/29-30	0.19	-	0.14	36	1.03	3.20	-	2.78	12.1	9.90	-3
8w/36-37	0.02	-	0.09	34	0.91	2.18	-	3.02	13.0	9.90	1
8w/0-0.3	0.81	0.74	11.7	46	7.11	3.00	1.03	5.16	27.9	9.60	6
9s/0-3-1	0.29	0.09	2.07	46	4.61	6.31	-	2.79	15.8	10.00	4
9s/1-2	0.19	-	0.29	44	3.63	4.75	-	3.49	5.53	9.95	-18
9s/2-3	0.18	-	0.36	42	3.85	5.71	0.17	4.45	12.5	9.95	0
9s/3-4	0.23	-	0.35	39	3.13	5.32	-	3.90	12.2	9.95	0
9s/4-5	0.21	-	0.47	39	2.87	5.08	0.22	3.72	12.5	9.95	1
9s/9-10	0.34	0.13	0.29	40	2.30	4.18	-	4.76	11.9	10.00	-2
9s/11-15	0.40	-	0.19	42	2.63	3.58	0.21	4.12	11.7	9.95	-5
9s/19-20	0.20	-	0.17	40	2.91	4.33	-	4.51	11.2	10.00	-2
9s/27-28	0.16	-	0.17	38	3.11	3.83	-	3.79	10.2	10.00	-4
9s/28-30	0.14	-	0.14	37	3.03	3.21	-	3.90	10.00	-5	-
9s/32-34	1.97	-	0.13	36	3.58	3.35	0.19	4.76	11.4	9.95	-2
9s/14-15	0.40	-	0.13	36	1.64	3.55	0.14	2.72	13.1	9.85	1
10s/0-0.3	0.29	0.03	1.09	25	0.85	1.22	0.53	1.59	15.3	9.60	9
10s/0-3-2	0.26	-	0.25	39	1.25	2.95	-	2.49	14.7	9.95	-2
10s/2-3	0.22	-	0.14	40	1.87	3.42	-	3.09	14.3	9.90	0
10s/9-10	0.13	-	0.13	38	1.37	3.35	-	3.74	13.7	9.85	3
10s/12-14	0.13	-	0.13	38	1.46	4.98	-	3.99	16.1	9.90	3
10s/14-15	0.17	-	0.20	37	1.36	3.04	-	3.27	13.0	9.90	-6
10s/19-20	0.27	0.01	0.23	38	1.69	3.29	-	2.63	13.0	9.90	-2
10s/29-30	0.22	0.01	0.24	40	2.07	3.89	-	3.61	13.7	9.90	-1
10s/36-37	0.12	0.03	0.18	38	2.25	4.26	-	2.86	13.5	9.90	1
GU	0.36	0.08	0.89	37	1.75	1.74	0.55	3.45	13.4	9.85	-1
CB	0.34	0.03	0.48	37	1.45	2.41	0.45	3.52	12.3	9.90	2
CCR	0.20	0.01	0.09	31	1.12	1.79	-	3.52	10.2	9.75	-1
OGE	0.24	0.02	0.08	33	1.29	1.86	0.28	3.48	12.6	9.80	2
KNAU	0.22	-	0.11	33	0.70	1.02	0.07	5.36	9.58	9.95	-2
KM	0.47	-	0.25	42	1.86	4.42	0.97	5.43	15.0	9.85	5
KR	0.48	-	0.21	45	1.63	3.93	0.24	5.03	16.0	9.80	2
CCR-5-1	0.27										

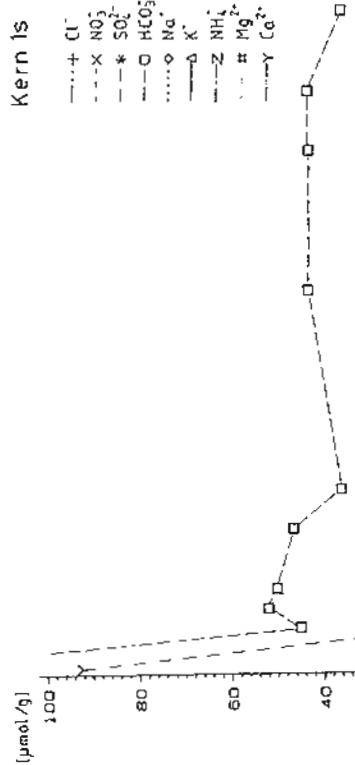
Bohrkern 1s (und Bohrkern 3 von 1984); Figur 39, a - c

Bei der Renovation der Ostmauer stellte es sich heraus, dass Berner Sandsteine, welche hinter Zementmörteln lagen, vollständig "verfaul" waren (mündliche Mitteilung Herr Funk). An der Stelle 1s wurde deshalb ein ähnliches Bild erwartet. Dies zu unrecht, wie bereits aus der Kernbeschreibung hervorgeht, und wie auch aus den Porositäts- und Wasseraufnahmemessungen zu sehen ist. Direkt hinter dem Mörtel ist die Wasseraufnahme (Figur 39a) etwas schneller als zuhinterst im Kern; die bei den Quecksilberdruckporositätsmessungen (Figur 39c) vorne und hinten am Kern fielen aber praktisch identisch aus. Verglichen mit frischen Berner Sandsteinproben sind die totalen offenen Porositäten (top) gross. Am ehesten gleicht der Kern 1s, von der Porosität her gesehen, den Sandsteinen vom Gurtten (GU), er besitzt allerdings eine grössere Makroporosität.

In den vordersten 2 Zentimetern, welche zu zweij Dritteln aus Zementmörtel bestehen, sind alle Ionen angereichert (Figur 39b), ausgenommen Ammonium und Magnesium, die ganz fehlen. Diese Probe enthält zehnmal soviel Chlor und Kalzium, zwanzigmal soviel Sulfat, 160mal soviel Nitrat, dreimal soviel Hydrogenkarbonat und zweimal soviel Kalium wie Sandsteine frisch ab Steinbruch. Hinter dem Mörtelflick sind im ganzen Kern Nitrate zehnfach, Natrium fünf- bis zehnfach und Kalium zwei- bis fünffach angereichert. Bis in zehn Zentimeter Tiefe enthält der Sandstein doppelt soviel Chlorid wie frische Sandsteine.



a)



b)



c)

Figur 39: Bohrkern 1s (und Bohrkern 3 von 1984)
(siehe folgende Seite)

- Feucht/Trockengrenze auf der Kernoberfläche nach bestimmten Saugzeiten (nach Arnold und Küng, 1984)
- Ionenverteilungen im Wasserauszug.
- Porengrößenverteilung in Proben aus verschiedenen Mauertiefen

Bohrkern 2w (und Bohrkern 1 von 1984); Figuren 40, a - c
Die Wasseraufstiegsgeschwindigkeit (Figure 40a) ist in den ersten zwei Zentimetern hinter der abgefallenen Schale stark erhöht. In etwa 8 cm Tiefe wird die Wasseraufstiegsgeschwindigkeit sogar etwas langsamer als zu hinterst im Kern. 2w gehört mit 1s und 3s zusammen zu den langsam saugenden Proben.

Die beiden Quecksilberdruckporositätsmessungen (Figure 40c) in 20 und 30 cm Tiefe sind recht ähnlich ausgetfallen, mit etwas höheren Werten in 20 cm Tiefe. Wenn angenommen wird, dass diese beiden Proben etwa die ursprünglichen Porositäten widerspiegeln, dann hat sich durch die Schalenbildung vorne am Kern vor allem die Grobporosität vergrössert. Dabei ist in der Schale selber (2w/0-1) auch die Makroporosität erhöht, in der Lockerzone dahinter dagegen nur ogrp.

Von der Porositätsmessung her gesehen, gleicht auch dieser Sandstein, wie schon 1s, am ehesten der Probe GU. Auffallend sind allerdings die tiefen Werte für die gefangene Porosität (tgp in Tabelle 16).

In den äussersten 2 mm sind die Hydrogenkarbonatgehalte (Figure 40b) doppelt so hoch wie im restlichen Kern und auch Kalzium ist deutlich angereichert. Es ist also naheliegend anzunehmen, dass beide Ionen von der Lösung des vorhandenen Kalzits herstammen, obwohl diese Probe nur gemörsert wurde (siehe 4.3.1). Vielleicht war dieser Kalzit im Staub enthalten der auf der Oberfläche des Steins die bräunliche Verfärbung hervorrief. In der ähnlich verfärbten Oberflächenzone im Kern 7w wurden allerdings keine erhöhten HCO_3^- - und Ca^{2+} -Werte festgestellt. Aus der Tatsache, dass bei der Titration mit HCl (siehe auch 3.2.2) nicht nur das Hydrogenkarbonat gemessen wird, sondern auch andere eventuell anwesende schwache Basen, ergibt sich eine weitere Erklärungsmöglichkeit für den hohen Säureverbrauch der ersten Probe. Es ist möglich, dass zusätzlich eine schwache Base, zum Beispiel eine organische, anwesend war, die den Säureverbrauch dieser Probe erhöhte.

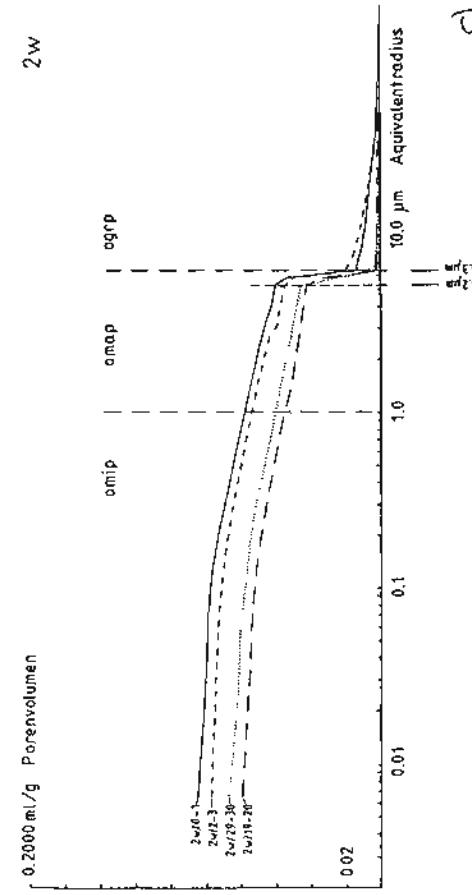
Der Rest der Schale (2w/0-2-1) enthält Ca^{2+} und SO_4^{2-} schwach angereichert. Stark angereichert sind diese beiden Ionen aber erst in der Lockerzone dahinter. Dort konnten bereits unter der Lupe Gipsausblühungen festgestellt werden. Gipsanreicherungen der gleichen Grössenordnung, in Lockerzonen hinter Schalen fand auch Zehnder

(1982), sowohl in Granitischen- wie auch in Plättensandsteinen. Bereits in 7 cm Tiefe sind keine Sulfatanreicherungen mehr feststellbar und auch Kalzium ist nur noch leicht aufkonzentriert. Ammoniumkonzentrationen, welche die Gehalte in bruchfrischen Sandsteinen übersteigen, wurden vor allem in den vordersten Zentimetern nachgewiesen.

Im vordersten Kernteil sind die Ladungsbilanzen, welche über den ganzen Kern gesehen sehr hoch sind, stark positiv und ab 3 cm Tiefe werden sie stark negativ. Möglicherweise sind hier auch nicht alle Ionen erfasst worden.

Figure 40: Bohrkern 2w (und Bohrkern 1 von 1984)

- Feucht/Trockengrenze auf der Kernoberfläche nach bestimmten Saugzeiten (nach Arnold und Küng, 1984), (siehe folgende Seite)
- Ionenverteilungen im Wasserauszug (siehe folgende Seite)
- Porengrössenverteilung in Proben aus verschiedenen Mauertiefen.



C)

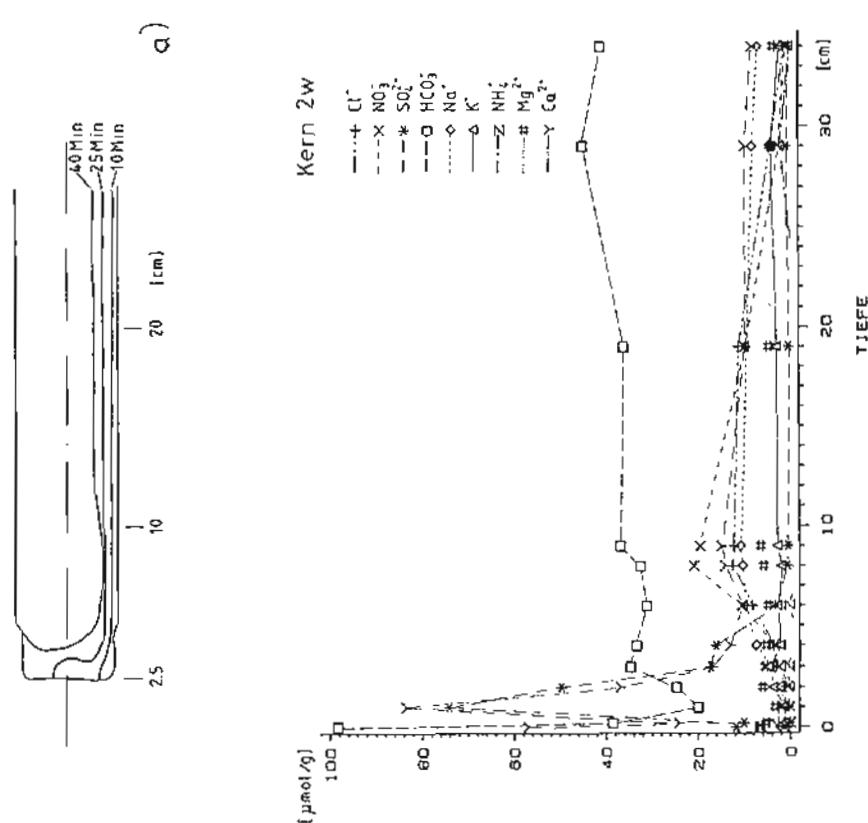
Bohrkern 3s (und Bohrkern 4 von 1984); Figur 41, a - c

Die Wasseraufstiegsgeschwindigkeit (Figur 41a) ist in der Schale und in den dahinter folgenden paar Millimetern ungefähr dreimal so schnell wie im hinteren Kernteil. Der Übergangsbereich zwischen schnell und langsam saugender Zone ist nur etwa 2 cm breit. Mit fluoreszierendem Harz imprägnierte Dünnenschliffe zeigen, dass in der schnell saugenden Zone der Kornverband aufgelockert ist, und dass dort um 5 bis 10 um breite, schalenparallele Risse auftreten (Arnold und Küng, 1984).

Am Kern 3s fehlte die ganze Schale und der grösste Teil der Probe zwischen 1 und 2 cm Tiefe. Was noch vorhanden war, wurde für die chemische Analyse gebraucht, so dass die erste Probe für die Quecksilberdruckporositätsmessung (Figur 41c) erst zwischen 2 und 3 cm Tiefe genommen werden konnte. Da sich in dieser Tiefe bereits die Wasseraufsauggeschwindigkeit kaum mehr vom hinteren Kernteil unterscheidet, ist es nicht erstaunlich, dass alle Porositätsmessungen fast identische Resultate ergaben. Der einzige deutliche Unterschied, der festgestellt werden kann, liegt in der vergleichsweise kleinen gefangenen Porosität (tqp in Tabelle 16) der Probe 3s/29-30.

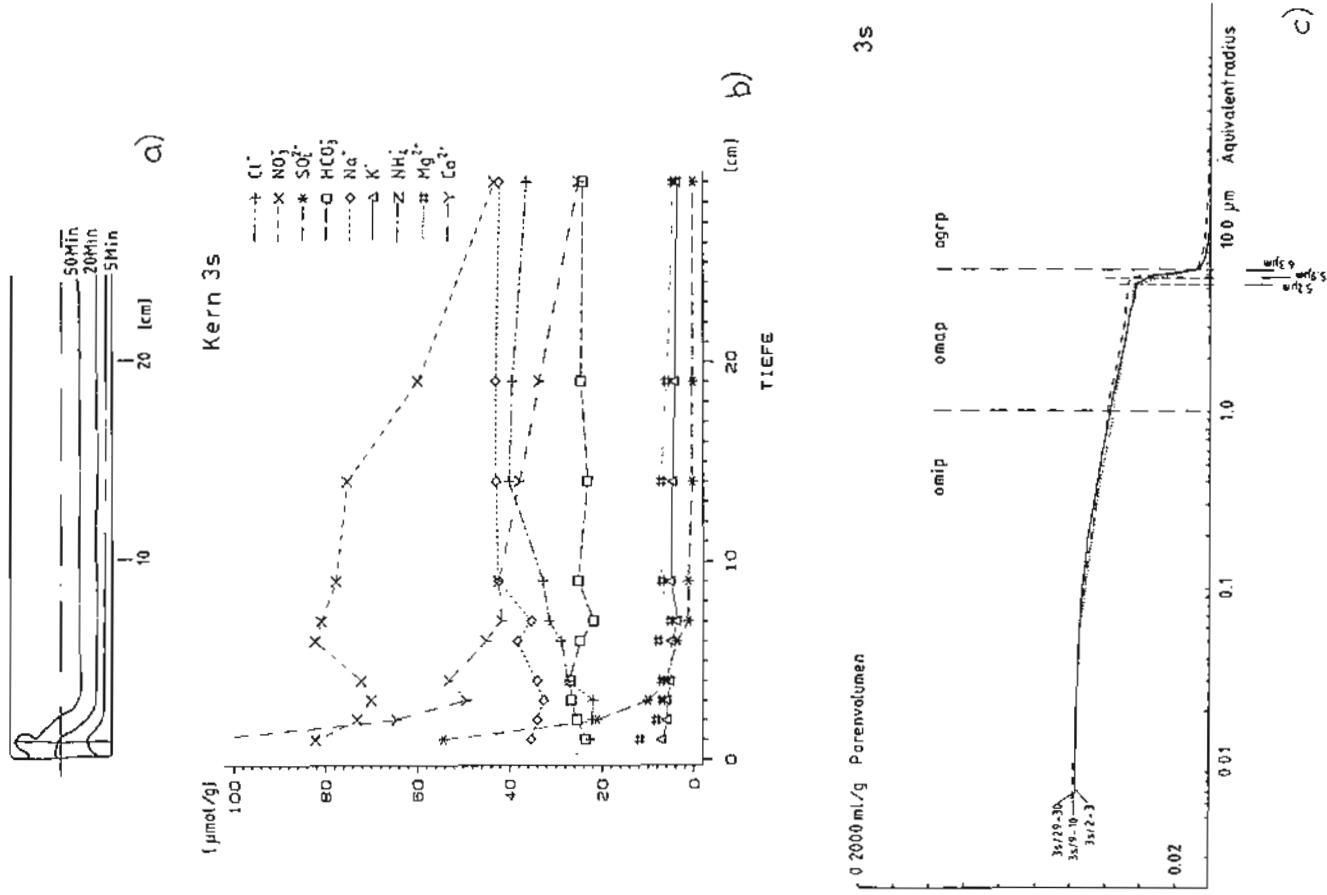
Auch hier ist, wie in 2w, in der Lockerzone hinter der Schale Kalzium und Sulfat gegenüber tiefen Teilen des Kernes angereichert (Figur 41b), und wiederum nehmen die Sulfatgehalte nach hinten sehr rasch ab, so dass in 14 cm Tiefe Gehalte wie in den frischen Sandsteinen erreicht sind. Die Nitrat-, Chlorid- und Natriumgehalte sind in diesem Kern extrem hoch. Auch Kalzium und Magnesium sind etwas angereichert. Während die Nitratgehalte nach innen abnehmen, nehmen die Chloridgehalte und parallel zu ihnen auch das Natrium nach innen leicht zu. Ammonium wurde in diesem Kern nicht festgestellt. Die Ladungsbilanzen sind bis in eine Tiefe von 5 cm deutlich positiv, aber nur in der vordersten Probe ist sie ausserhalb der Fehlergrenze von zehn Prozent.

In der Lockerzone enthält der Kern umgerechnet etwa 1.5 % lösliche Salze (ohne CaCO_3), in einer Tiefe von 5 cm noch 0.8 % und in 30 cm Tiefe noch immer 0.5 %. Es fragt sich jetzt, wie es zu einer solch massiven Salzanreicherung kommen kann. Die Sulfatanreicherung in der Lockerzone hinter der Schale stellt etwa den 60- bis 600-fachen Wert der Sulfatmengen in frischen Berner Sandsteinen dar.



Da die Probenbreite gerade 1 cm war, heisst das, dass dies der Sulfatmenge einer 0.6 bis 6 Meter dicken Mauer entspricht, wenn alles Sulfat fast ausschliesslich in dieser schmalen Zone abgelagert würde. Allerdings müsste dann eine Abreicherung der Sulfate im Mauerinnen beobachtet werden können, was nicht der Fall ist, jedenfalls noch nicht in 30 cm Tiefe. Das bedeutet, dass die Sulfate von aussen eingedrungen sein können. Möglich ist auch, dass sie aus der Hinterfüllung der Mauer stammen und mit dem Grundfeuchtestrom zur Maueraussenseite transportiert wurden.

Die Nitrate und Chloride stammen mit ziemlicher Sicherheit aus dem Erdreich hinter der Stützmauer. Ihre starke Anreicherung, gerade in diesem Bereich der Mauer lässt sich vielleicht wie folgt erklären: 2 Meter weiter oben ist die Mauer grossflächig mit einem mehr oder weniger dichten Zementmörtel bedeckt, so dass dort die Verdunstung erschwert ist. Ein Hinweis auf erschwerte Verdunstung ist, dass der Bohrkern 1s bei der Lieferung noch spürbar feucht war. Rings um die Mörtelüberzogenen Bereiche kann aber Verdunstung stattfinden, so dass der Feuchtigkeitsstrom durch die Mauer so erfolgt, dass die löslichen Salze vor allem hier angereichert werden. Dass der Sandstein im Kern 3s trotz der starken Salzanreicherung kaum verändert ist, ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die hier vor allem angereicherten Natrium- und Kalziumnitrate und -chloride sehr gut löslich sind und erst bei relativ tiefen Luftfeuchtigkeiten auskristallisieren. In der Mauer hinter der Schale bleiben die Salze deshalb in Lösung, und an der Maueroberfläche sind die Luftfeuchtigkeiten selten tief genug, als dass diese Salze auskristallisieren könnten.



- Feucht/Trockengrenze auf der Kernoberfläche nach bestimmten Saugzeiten (nach Arnold und Küng, 1984)
- Ionenverteilungen im Wasserauszug.
- Porengrössenverteilung in Proben aus verschiedenen Mauertiefen

Bohrkerne 4s und 5s; Figuren 42, a - d

Die Wasseraufstiegs geschwindigkeit (Figure 42a) ist innerhalb und unmittelbar hinter der oberflächlichen Gipskruste stark erhöht. In 1 bis 2 cm Tiefe hat sie ein Minimum und ab 4 cm Tiefe bis zu hinterst am Kern geht der Wasseraufstieg gleichmässig und schnell vor sich.

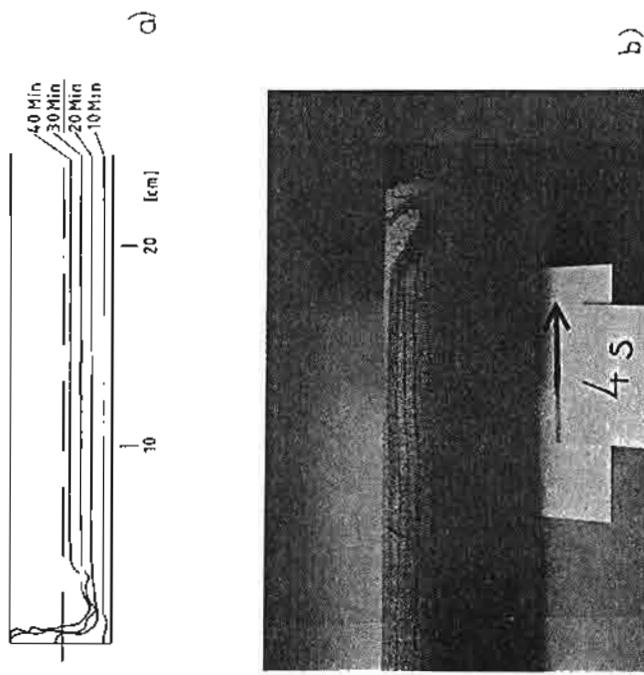
Nach dem Trocknen des Kerns zeigte dieser an der zuletzt erreichten Trocken/Nassgrenze eine vor allem in der Tiefe von 1 bis 2 cm kräftige braune Verfärbung (Figure 42b). Die Wasserauszüge bis 4 cm Tiefe waren leicht gelblich gefärbt, und die Filtration dauerte für alle diese Proben aussergewöhnlich lange (bis 40 Minuten). Die kräftigste Gelbfärbung wies die Probe 5s/1-2 auf. Mit 2,2'-Dipyridyl konnte zwar ein geringer Eisengehalt in den Lösungen qualitativ nachgewiesen werden; die Reaktion verlief aber nicht deutlich genug, als dass Eisen für die Gelbfärbung der Lösung verantwortlich sein könnte. Wegen der langen Filtrationszeit kann vermutet werden, dass die Lösung Colloide enthält.

Auf der Steinoberfläche befindet sich hier eine Gipskruste, die sich in hohen Kalzium- und Sulfatgehalten der äussersten Probe widerspiegelt (Figure 42d). Auch der vergleichsweise tiefe pH-Wert dürfte auf den hohen Gipsgehalt zurückzuführen sein. Die stark positive Ladungsbilanz (Tabelle 17) der äussersten Probe ($Bil = 80$) kann mit den hohen Konzentrationen im Zusammenhang stehen, die Probe enthält mehr als $1000 \mu\text{mol/g}$ Ionen, somit liegt die Bilanz innerhalb des zehnprozentigen Messfehlers.

In den beiden folgenden Proben (gelbe Wasserauszüge) ist die Bilanz wiederum stark positiv. In diesen Proben sind vor allem die Sulfat-, Kalzium- und Magnesiumgehalte erhöht. Chlorid und Nitrat sind bis in eine Tiefe von 10 cm aufkonzentriert. Natrium ist auf der ganzen Kerlhänge 5- bis 10-fach angereichert. Ammonium tritt nur gerade in der äussersten Probe auf. In der äussersten Probe, sie wurde gemörsernt, wurde ein nur sehr kleiner HCO_3^- -Wert gemessen, und in den beiden Proben 5s/1-2 und 5s/2-3 sind die höchsten Hydrogenkarbonatwerte in diesem Kern festgestellt worden.

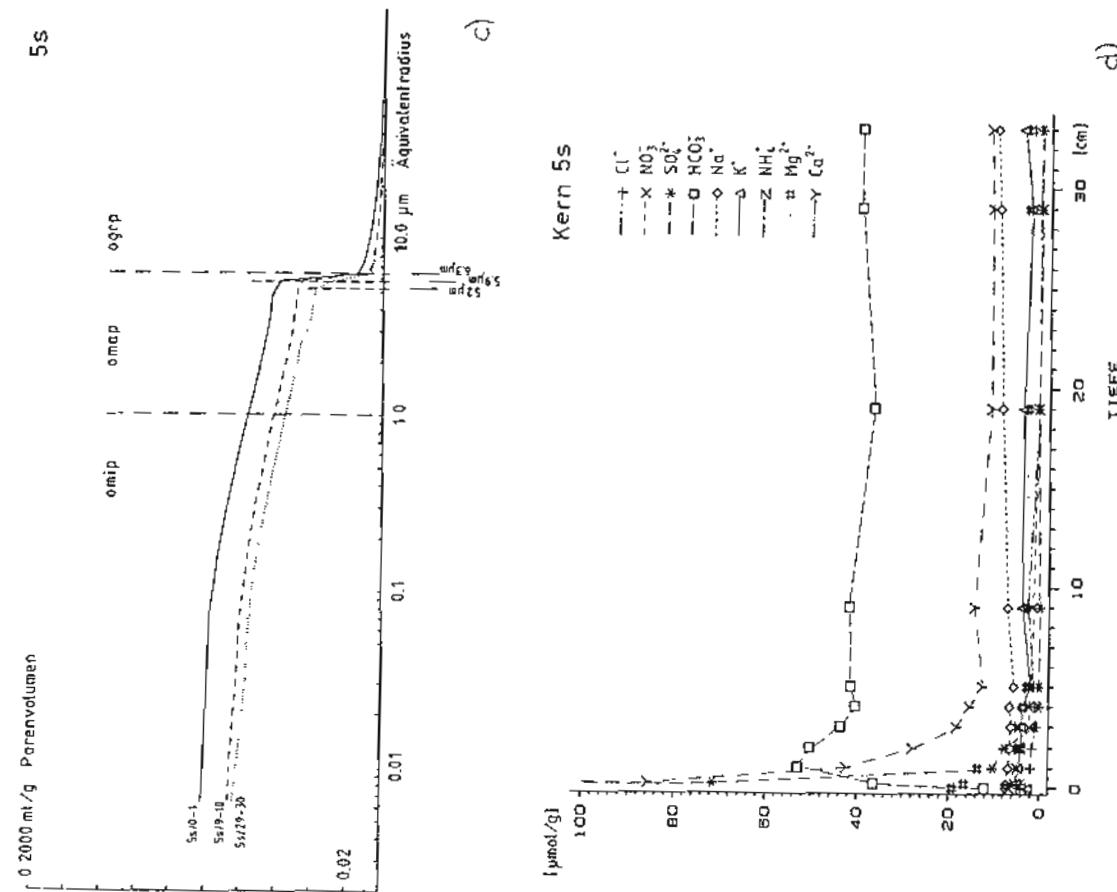
Die Porositätsmessungen (Figure 42c) zeigen eine etwas erhöhte Grobporosität im äussersten Zentimeter und in 9 bis 10 cm Tiefe eine leicht höhere Makroporosität, bei etwa gleicher totaler Porosität wie in 30 cm Tiefe. Die gefangene Porosität nimmt von aussen nach innen ab. Auffallend ist auch eine Verengung des Bereichs der häufigsten Poren eingangsradien in den beiden äusseren Proben gegen über der Probe 5s/29-30 (Tabelle 16).

Figur 42 (erster Teil): Bohrkerne 4s und 5s
a) Feucht/Trockengrenze auf der Kerndoerfläche nach bestimmten Saugzeiten
b) Foto des Kern 4s nach dem Wasserabsaugversuch. Deutlich ist die braune Verfärbung in 1 bis 2 cm Tiefe, an der Stelle der zuletzt erreichten Feucht/Trockengrenze zu erkennen.



Figur 42 (zweiter Teil): Bohrkerne 4s und 5s

- c) Porengrößenverteilung in Proben aus verschiedenen Mauertiefen
 d) Ionenverteilungen im Wasserauszug.



Figur 42 (zweiter Teil): Bohrkerne 4s und 5s

Bohrkerne 6w und 7w; Figuren 43, a - c

Der Wasseraufstieg (Figur 43a) in der Schale verlief langsam. Der Rest des Kerns saugte das Wasser recht ausgeglichen mit je einem Maximum direkt hinter der Schale und in 25 bis 28 cm Tiefe.

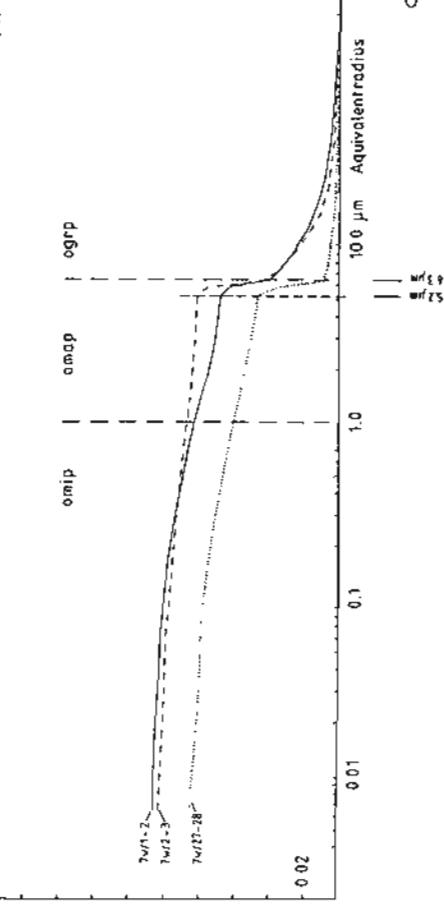
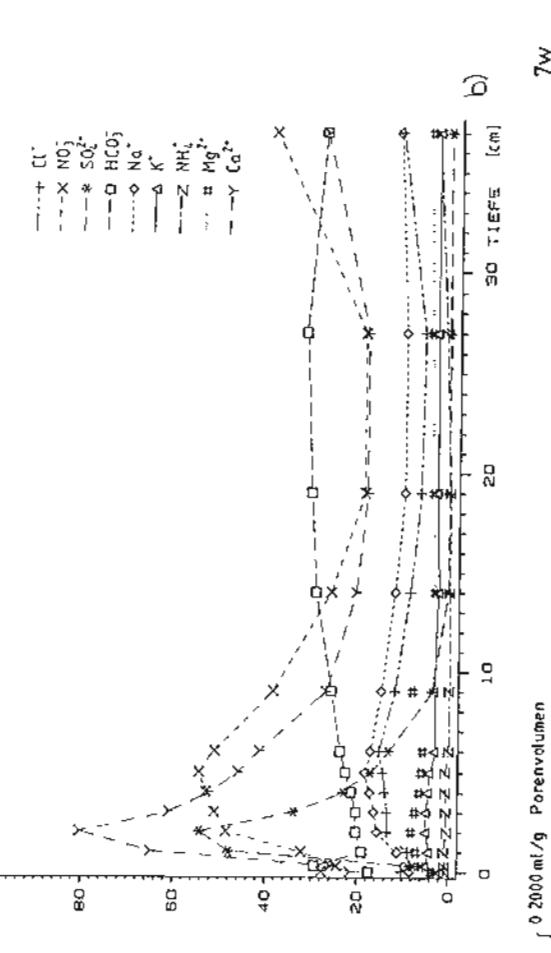
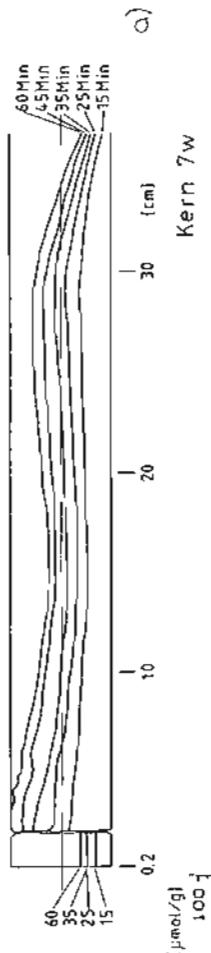
Der linke Teil der Quecksilbereindringkurve (Figur 43c) verläuft für die beiden Proben 7w/1-2 und 7w/27-28 ziemlich genau parallel, was sich auch in den etwa gleich grossen Mikroporositäten zeigt. In der Probe 7w/1-2 ist die Grobporosität, zum Teil auf Kosten der Makroporosität, stark erhöht. Die Probe, welche direkt hinter der Schale genommen wurde (7w/2-3) hat etwa die gleiche totale Porosität wie die Probe aus der Schale selber (7w/1-2). Die Kurven dieser beiden Proben verlaufen im Bereich der Grobporosität fast genau gleich, dann hat aber 7w/2-3 einen deutlich grösseren Anteil an Poren mit Radien um $6.3 \mu\text{m}$ und einen entsprechend kleineren Anteil an Poren mit Eingangsradien $< 1 \mu\text{m}$. Der häufigste Porenradienbereich ist für alle drei gemessenen Proben gleich (Tabelle 16). Der Anteil an Poren, die in diesen Bereich fallen, ist in der Schale, mit nur 26%, gegenüber den andern Proben stark verringert.

Auch dieser Bohrkern zeigt eine starke Kalzium- und Sulfatanreicherung in und direkt nach der Lockerzone hinter der Schale (Figur 43b). Bereits in der äussersten Probe ist reichlich Nitrat vorhanden, ein Maximum erreichen die Nitratwerte zwischen 2 und 7 cm Tiefe. Danach sinken sie leicht ab; in der letzten Probe beginnen sie wieder anzusteigen. Im ganzen Kern entsprechen die Nitratwerte mindestens dem 200-fachen von frischen Berner Sandsteinproben. Chlor, Natrium und Kalzium sind ebenfalls im ganzen Kern deutlich angereichert. Dieser Kern ist der einzige, in dem Ammonium in allen Proben festgestellt wurde. Der höchste Ammoniumwert wurde in der hintersten Probe gemessen. Abgesehen vom Ammonium sind die Salzanreicherungen etwa halb so gross wie im ebenfalls sehr nitrat- und chloridreichen Kern 3s.

Die Kerne 6w und 7w wurden sehr nahe dem grossen Riss auf der Westseite des Pavillonunterbaus entnommen; wie bereits erwähnt, war der Ablauf der im Pavillon befindlichen Toilettenanlage wohl schon seit längerer Zeit kaputt. An dieser Stelle stammen die Salze also wahrscheinlich aus den Abwässern.

Figure 43: Bohrkern 6w und 7w;

- a) Feucht/Trockengrenze auf der Kernoberfläche nach bestimmten Saugzeiten
- b) Ionenverteilungen im Wasserauszug.
- c) Porengrößenverteilung in Proben aus verschiedenen Mauertiefen

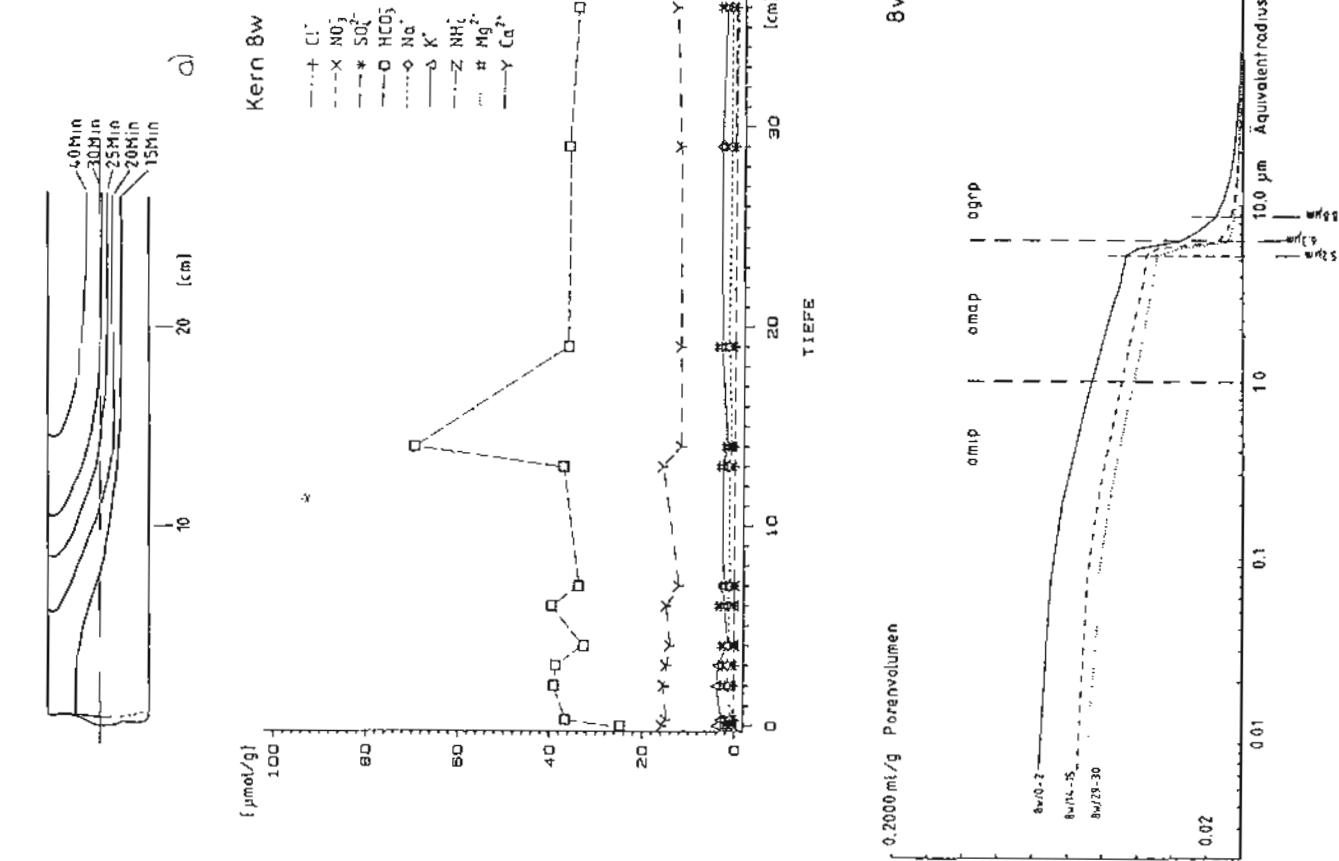


Bohrkern_8w (und Bohrkern 2 von 1984); Figuren 44, a - c
Die Wasseraufnahmegeschwindigkeit (Figure 44a) zeigt ein deutliches Langsamer-Werden von aussen nach innen. In Dünnenschliffen, von mit gefärbtem Harz imprägnierten Proben aus den vordersten Paarzentimetern dieses Kerns, kann eine deutliche Aufweitung des Porengefüges beobachtet werden.

Diese Aufweitung des Porengefüges widerspiegelt sich auch in den Quecksilberdruck-Porosimetriemessungen (Figure 44c), wo die Probe aus 0 bis 2 cm Tiefe einen grossen Anteil Grobporosität aufweist. Die Unterschiede zwischen den beiden Proben in 15 respektive 30 cm Tiefe sind nur noch gering. Die Probe 8w/0-2 weist, verglichen mit 8w/14-15, eine viel geringere gefangene Porosität auf (Tabellle 16). Die Gehalte an löslichen Salzen (Figure 44b) sind in diesem Kern durchwegs im Rahmen der frischen Berner Sandsteine oder sogar tiefer als diese. Der hohe Hydrogenkarbonatgehalt der Probe 8w/14-15 ist wahrscheinlich auf einen Messfehler zurückzuführen, wie aus der einzige für diese Probe stark negativ werdenden Ladungsbilanz zu schliessen ist.

Figure 44: Bohrkern 8w (und Bohrkern 2 von 1984)
(siehe folgende Seite)

- a) Feucht/Trockengrenze auf der Kernoberfläche nach bestimmten Saugzeiten (nach Arnold und Küng, 1984)
- b) Ionenverteilungen im Wasserauszug.
- c) Porengrößenverteilung in Proben aus verschiedenen Mauertiefen



Figur 45: Bohrkern 9s (und Bohrkern 5 von 1984)
(siehe folgende Seite)

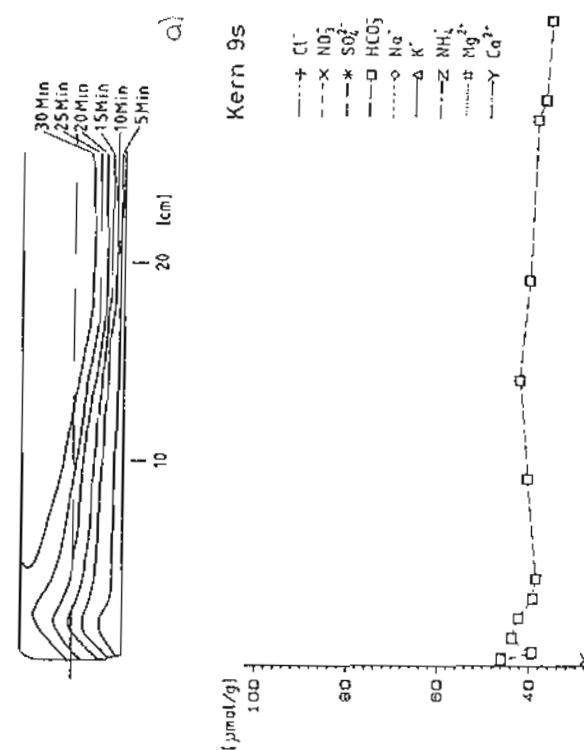
- a) Feucht/Trockengrenze auf der Keroberfläche nach bestimmten Saugzeiten (nach Arnold und Küng, 1984)
- b) Ionenverteilungen im Wasserauszug.
- c) Porengrößenverteilung in Proben aus verschiedenen Mauertiefen

Bohrkern 9s (und Bohrkern 5 von 1984); Figuren 45, a - c

Die Wasseraufstiegsgeschwindigkeit (Figur 45a) ist in 2 cm Tiefe am grössten und nimmt nach innen langsam ab. Der Kern ist bis mindestens 15 cm tief aufgelockert.

Die beiden Porositätsmessungen (Figur 45c) unterscheiden sich in Bezug auf Makro- und Mikroporosität kaum; die Grobporosität in der Probe 9s/0-1 ist jedoch 4.5mal grösser als in 9s/27-28 und der Bereich der häufigsten Porenradien ist mit 5.2 - 8.8 nach oben erweitert. Die gefangenen Porositäten sind in beiden Proben relativ niedrig.

Im äussersten Zentimeter sind Kalzium, Sulfat, Natrium und Magnesium leicht angereichert (Figur 45b). In der nachfolgenden Probe 9s/1-2 wurde nur halb soviel Kalzium wie in frischen Berner Sandsteinen gemessen. Im ganzen restlichen Kern entsprechen die löslichen Anteile den Werten von frischen Sandsteinen. Der in 28 cm Tiefe angebohrte Hohlraum und der in ihm enthaltene Kalkmörtel scheinen keinen Einfluss auf den Gehalt an löslichen Salzen zu haben.



Bohrkern 10s (und Bohrkern 6 von 1984); Figuren 46, a - c
Bohrkern 9s (und Bohrkern 6 von 1984); Figuren 46a)
Die Wasseraufstieg (Figure 46a) erfolgt in dieser Probe generell schneller als in 9s. Das Saugen erfolgt hier in 2 cm Tiefe am schnellsten und wird nach hinten langsamer.

Die Porositätsmessungen (Figure 46c) ergaben für alle drei gesenen Proben die gleiche Mikroporosität und eine Makroporosität, welche mit zunehmender Tiefe leicht abnimmt. Die Grobporosität der vordersten Probe (10s/0-2) weist den grössten ogrp-Wert aller Messungen an Bohrkernen der Münsterplattform-Stützmauer auf. Fast zwei Drittel der Grobporosität dieser Probe haben Eingangsradien zwischen 10 und 6.3 um, mehr als die Hälfte aller Poren haben Eingangsradien zwischen 5.2 und 10 um. Die gefangenen Porositäten (tgp in Tabelle 16) nehmen von hinten nach vorne im Kern stark zu. Die wasserlöslichen Anteile sind im ganzen Kern ungefähr gleich gross (Figure 46b), ohne lokale Maximal- und Minimalwerte. Der geringe HCO_3^- -Wert der ersten Probe (10s/0-0.3) kam dadurch zustande, dass diese Probe von Hand gewörsert wurde.

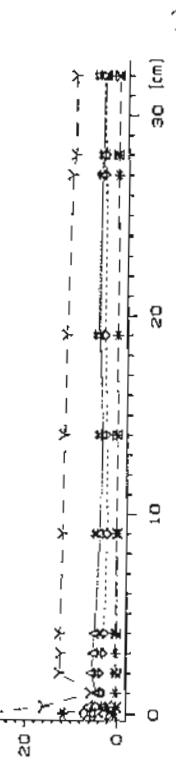
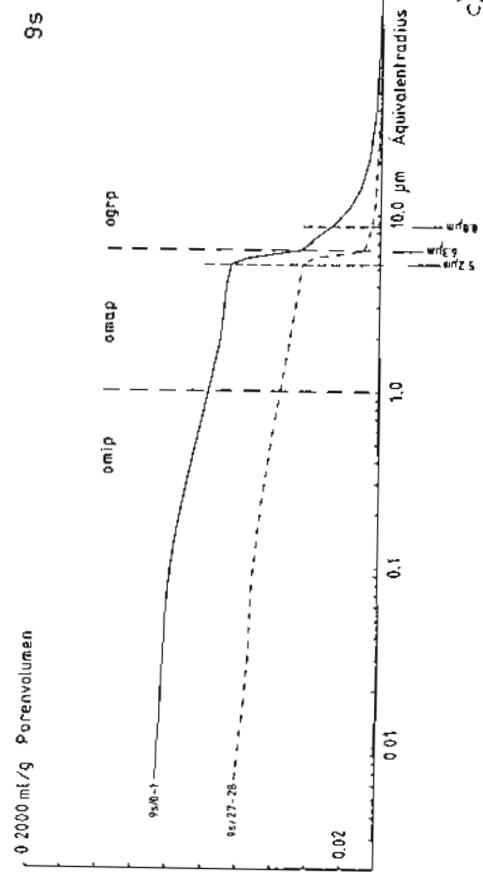
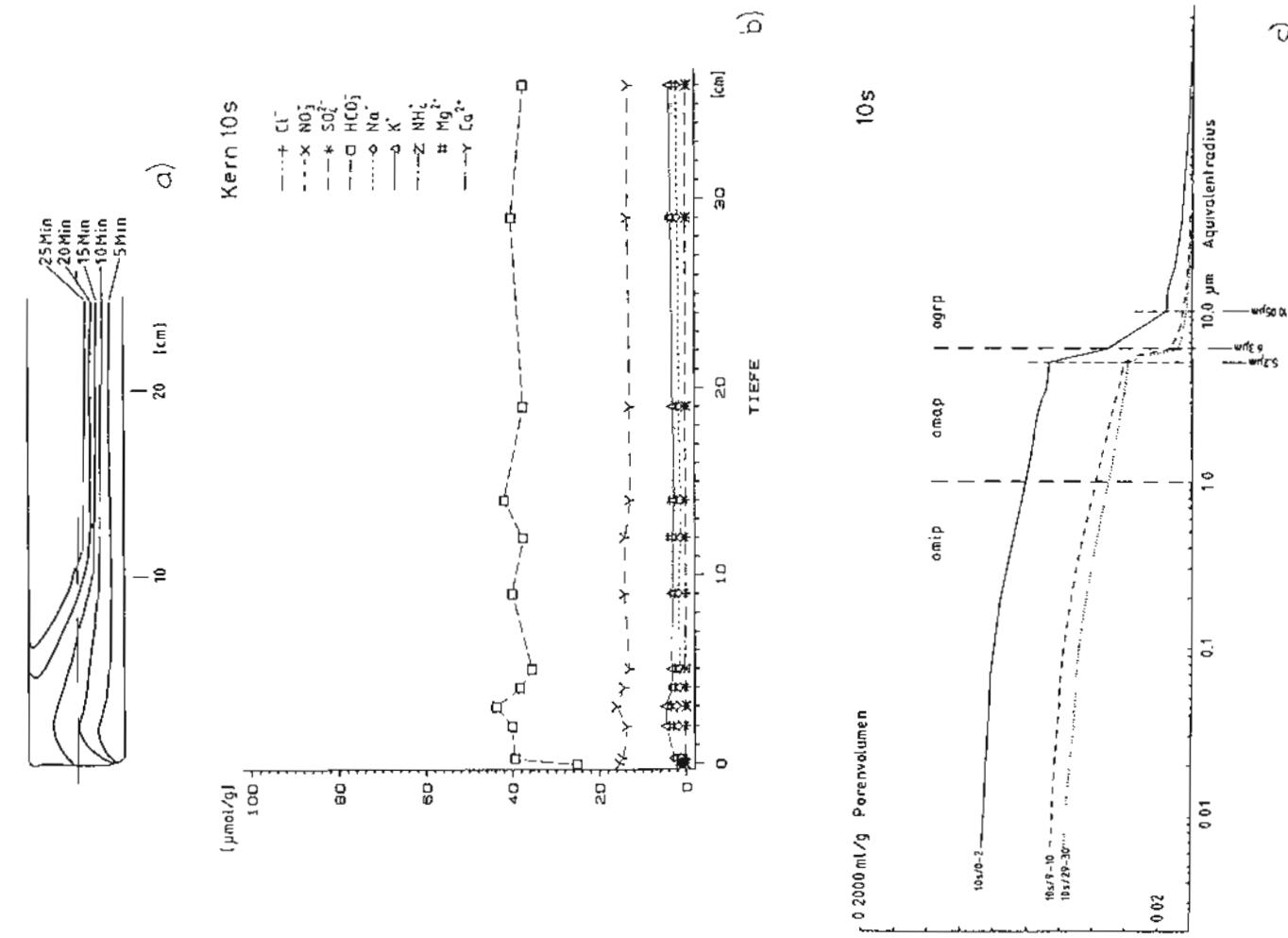


Figure 46: Bohrkern 10s (und Bohrkern 6 von 1984)
(siehe folgende Seite)

- Feucht/Trockengrenze auf der Kernoberfläche nach bestimmten Saugzeiten (nach Arnold und Küng, 1984)
- Ionenverteilungen im Wasserauszug.
- Porengrössenverteilung in Proben aus verschiedenen Mauertiefen





5.1.4 Gegenüberstellung der verschiedenen Bohrkerne aus der Münsterplattform-Stützmauer

Die Auflockerung des Sandsteingefüges kann in Quadern, die keine Schalenbildung aufweisen, bis 15 cm tief reichen. Hinter Schalen geht die Auflockerung in der Regel etwa 2 cm tief; am einzigen Kern mit oberflächlicher Gipskruste war blos der äusserste Zentimeter etwas aufgelockert.

An den Bohrkernen konnten nur in den äussersten paar Zentimetern Grobporositäten, welche grösser als 1.5 ml/100g sind, festgestellt werden. Es kann deshalb vermutet werden, dass die an der Münsterplattform-Stützmauer verwendeten Sandsteine von Anfang an eine geringe Grobporosität aufwiesen, etwa vergleichbar mit den Steinen vom Gerten (GU), oder den grauen Ostermundiger Sandsteinen (OGR). Die Mikroporositäten liegen in der Regel zwischen 2.3 und 3.0 ml/100g, in den äussersten Zentimetern sind sie manchmal etwas tiefer. Die totale Porosität nimmt meistens, ebenso wie die gefangene Porosität, von aussen nach innen ab. Weitaus der grösste Teil der Proben weisen eine deutliche Dominanz der Poren mit Eingangsradien zwischen 5.2 und 6.3 μm auf. Einzig die äussersten Proben aus den Bohrkernen des bossierten Unterteils der Mauer zeigen eine Aufweitung des Bereichs der häufigsten Porenradien. In diesen Proben kommen Poren bis 10 μm Eingangsradius häufig vor.

In den Figuren 47 bis 49 sind alle Analysen der löslichen Anteile so dargestellt, dass für jedes Ion die verschiedenen Bohrkerne miteinander und mit den frischen Sandsteinen verglichen werden können.

In Figure 47d ist zu erkennen, dass niedrige HCO_3^- -Werte vor allem in den vordersten Proben gefunden wurden, vor allem dann, wenn die betreffenden Proben gemörsert und nicht fein gemahlen wurden. Weiter sind tiefe HCO_3^- -Werte in den Lockerzonen hinter Schalen (Kern 2w) oder in Kernen zu finden, welche generell hohe Anteile von Salzen aufweisen (Kerne 3s und 5s).

Die drei Hydrogenkarbonatwerte, welche 60 $\mu\text{mol/g}$ übersteigen, wurden bereits bei den jeweiligen Bohrkernen 1s, 2s und 8w besprochen. Höhere HCO_3^- -Werte, als der in den frischen Berner Sandsteinen gefundene Maximalwert von 45 $\mu\text{mol/g}$, wurden nur vereinzelt gemessen. So in den Proben zwischen 3 und 8 cm Tiefe des Kerns 1s, also etwas

hinter dem Zementmörtelflick und dann noch in 1 bis 3 cm Tiefe im Kern 5s. Das sind die Proben, bei denen sich der wässerige Auszug gelb verfärbte. Es sei hier nochmals darauf hingewiesen, dass bei der HCO_3^- -Messung nicht das Ion selber, sondern der Säureverbrauch bis pH 4.3 gemessen wird (3.2.2.2), das heisst also, dass andere anwesende schwache Basen (zum Beispiel organische) mitgemessen werden. Der weitaus grösste Teil des Hydrogenkarbonats dürfte in allen Proben aus der Lösung von Kalzit und Dolomit stammen.

Schalenbildungen sind mit Sulfatanreicherungen in der Lockerzone hinter der Schale verbunden (Figur 47c, Kerne 2w, 3s, 7w). In keinem Fall reichen die Sulfatanreicherungen tiefer als 10 cm. Hinter der Gipskruste in Kern 5s ist der Sulfatgehalt noch 1 cm tief stark erhöht, bereits in 3 cm Tiefe ist aber kein Unterschied gegenüber den frischen Berner Sandsteinen mehr festzustellen. Alle Proben weisen an der Quaderoberfläche etwas erhöhte Sulfatgehalte auf. In den Proben 8w und 10s ist diese Erhöhung allerdings äusserst gering. Alle Sulfatmessungen lagen über der Nachweissgrenze. Keine einzige Messung in den Bohrkernen ergab einen tieferen Wert als den niedrigsten gemessenen Sulfatwert in den frischen Proben. Es kann also nirgends von einer Auswaschung oder Abreicherung des Sulfats gesprochen werden.

Hohe Chlorid- und Nitratwerte finden sich jeweils in den gleichen Kernen (Figuren 47a und b). Die Nitratgehalte sind meistens höher als die Chloridgehalte, und die höchsten Chloridwerte pro Kern werden jeweilen ein paar Zentimeter tiefer im Kern gemessen als die höchsten Nitratwerte. Die Höchstwerte an Chlorid und Nitrat werden immer deutlich tiefer im jeweiligen Kern gemessen als die höchsten Sulfatwerte. Von aussen nach innen tritt zuerst eine sulfatreiche Zone auf, mit Maximalwerten in 2 - 3 cm Tiefe, dann eine nitratreiche Zone, mit Maximalwerten in 5 - 7 cm Tiefe und zuletzt eine Chloridreiche Zone mit Maximalwerten in 6 - 15 cm Tiefe. Im Kern 7w nehmen die Nitrat- und Chloridwerte in der tiefsten Probe wieder zu, und im Kern 9s weist die hinterste Probe den höchsten Chloridgehalt auf.

Die Natriumgehalte (Figur 48a) sind in der Regel in jenen Proben hoch, in denen hohe Chlorid- und/oder Nitratgehalte gemessen wurden.

So erreichen die Natriumwerte meist zwischen 0 und 6 cm Tiefe den jeweiligen Höchstwert; mit der Tiefe nehmen die Na^+ -Gehalte aber nur sehr wenig ab, und auch die tiefsten Proben weisen meist noch deutlich höhere Gehalte an Na^+ auf als die frischen Proben von Berner Sandsteinen.

Ein sehr ausgeglichenes Bild ergeben die Kaliumwerte (Figur 48b), welche in weitaus den meisten Proben in der Grösserordnung wie in KM und KR vorkommen. Doppelt soviel Kalium enthält der Kern 1s hinter dem Zementmörtel und auch in 3s sind erhöhte Werte feststellbar.

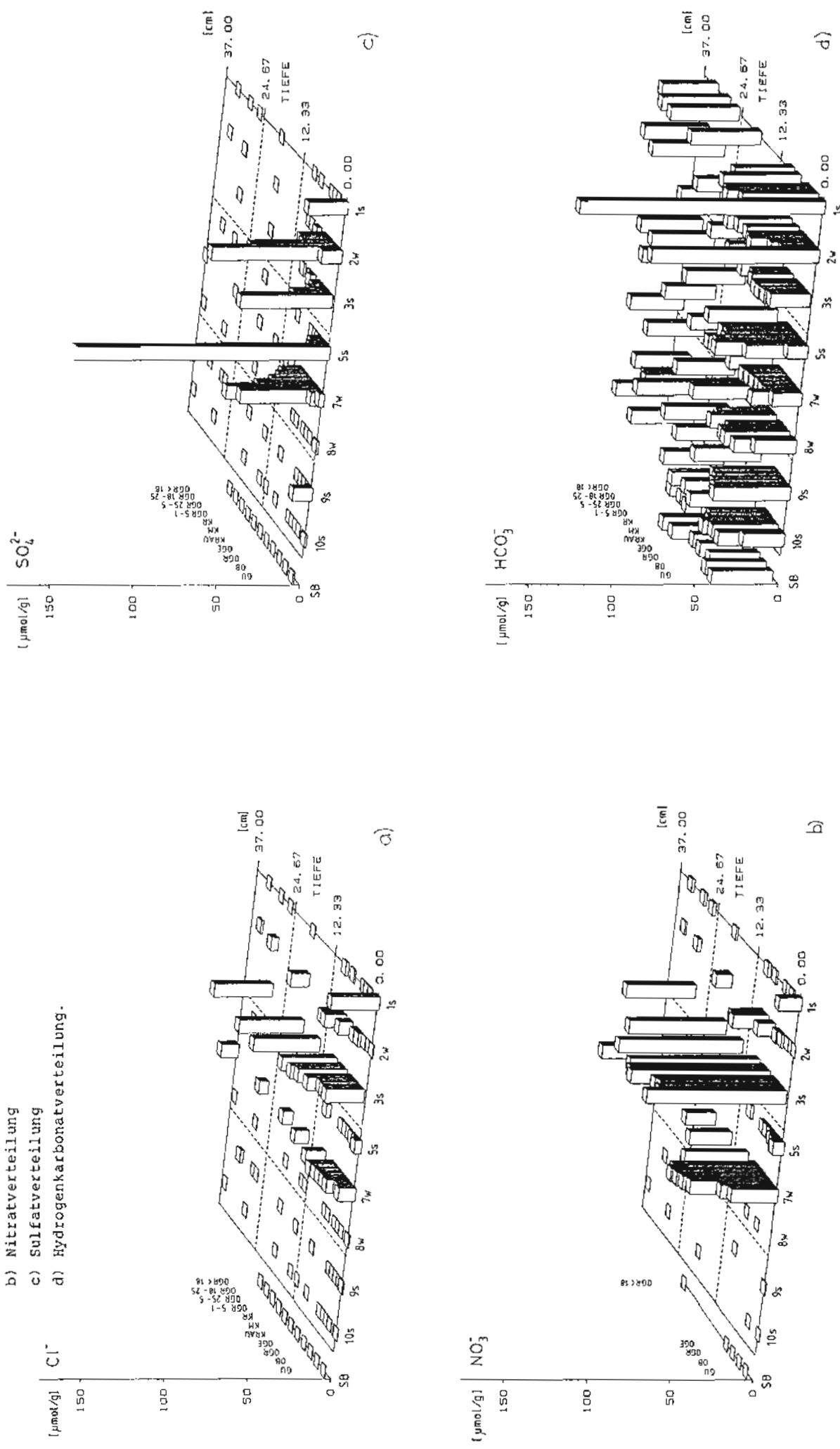
Ammonium (Figur 48c) wurde immer bloss in geringen Mengen gemessen. Die Zunahme des Ammoniumgehaltes mit der Tiefe im Kern 7w steht wohl im Zusammenhang mit den Abwässern der WC-Anlage, die sich im Pavillon über der Bohrstelle befand. Sonst wurden erhöhte NH_4^+ -Werte, mit Ausnahme von Kern 2w, jeweils nur in den äussersten 2 cm gemessen.

Die Magnesiumgehalte in den Bohrkernproben übersteigen kaum je die Werte in den frischen Proben der Berner Sandsteine (Figur 49a). Ihren Maximalwert erreichen sie in den ersten 2 cm des Kerns 5s, wo sie den vierfachen Wert des Mg^{2+} -Gehalts in frischen Proben erreichen.

Die höchsten Kalziumgehalte (Figur 49b) wurden in allen Kernen zusammen mit den höchsten Sulfatgehalten gemessen. Oft nehmen aber die Ca^{2+} -Werte mit der Tiefe nicht so rasch ab wie die Sulfatwerte, dies vor allem in den Kernen 3s und 7w. In diesen beiden Kernen verlaufen die Kalziumwerte hinter den Lockerzonen mit der Tiefe etwa parallel mit den Nitratgehalten (Figuren 41c und 43c). In den äussersten Proben der beiden Bohrkerne 1s und 2w fallen die hohen Ca^{2+} -Werte mit hohen HCO_3^- -Werten zusammen.

Figur 47: Anionenkonzentrationen in den Wasserauszügen aus Kernen der Münsterplattform-Stützmauer:

- a) Chloridverteilung
- b) Nitratverteilung
- c) Sulfatverteilung
- d) Hydrogenkarbonatverteilung.



Figur 48: Alkali- und Ammoniumkonzentrationen in den Wasserauszügen aus Kernen der Münsterplattform-Stützmauer:

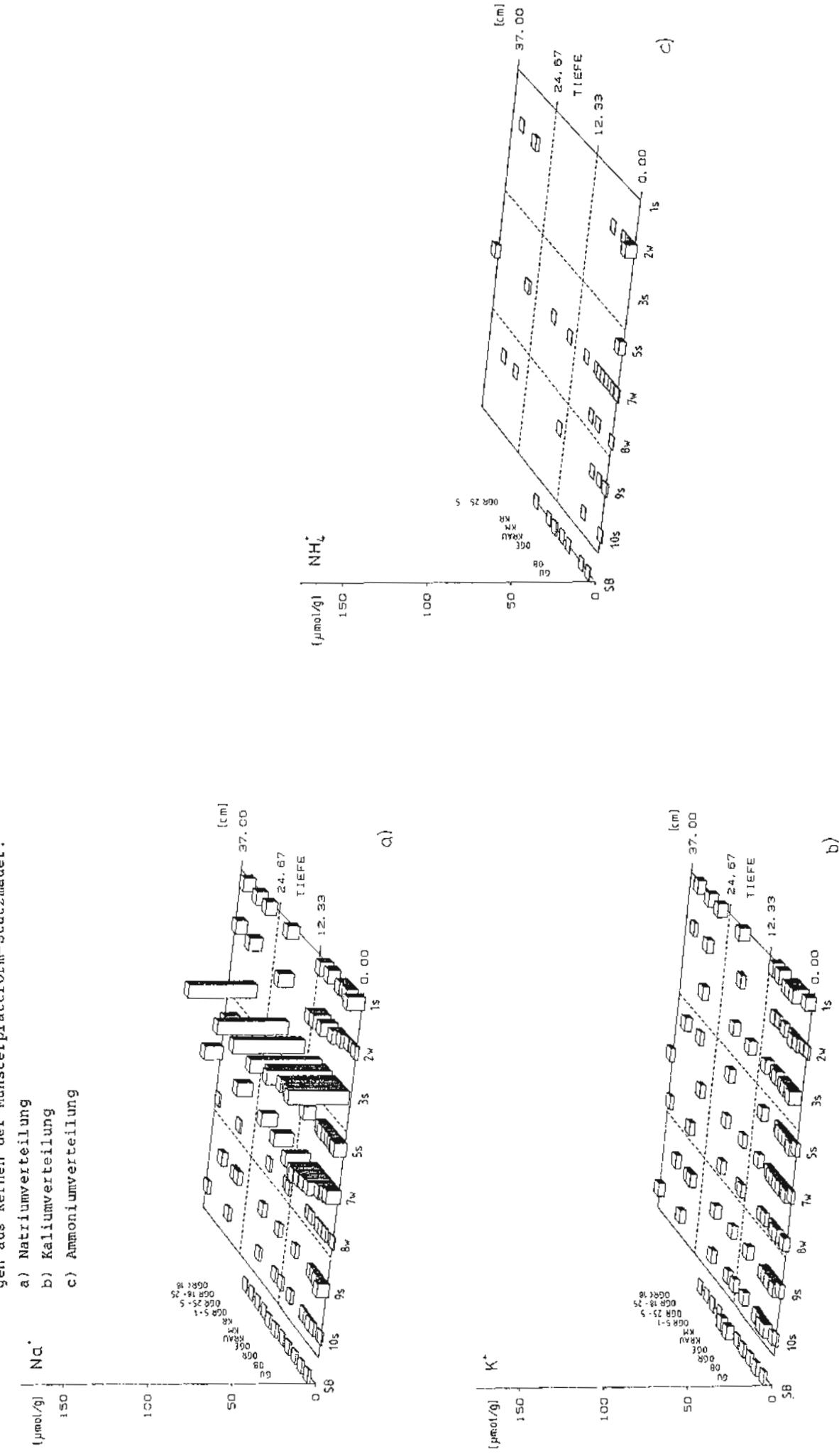
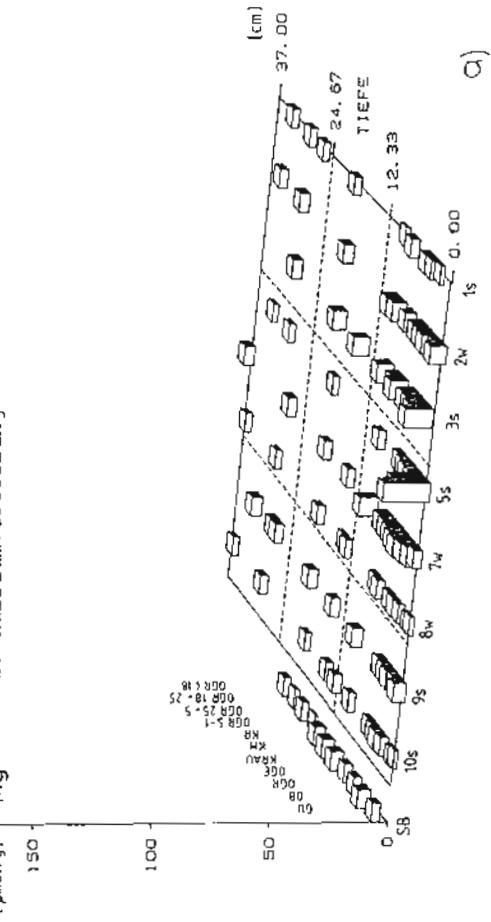
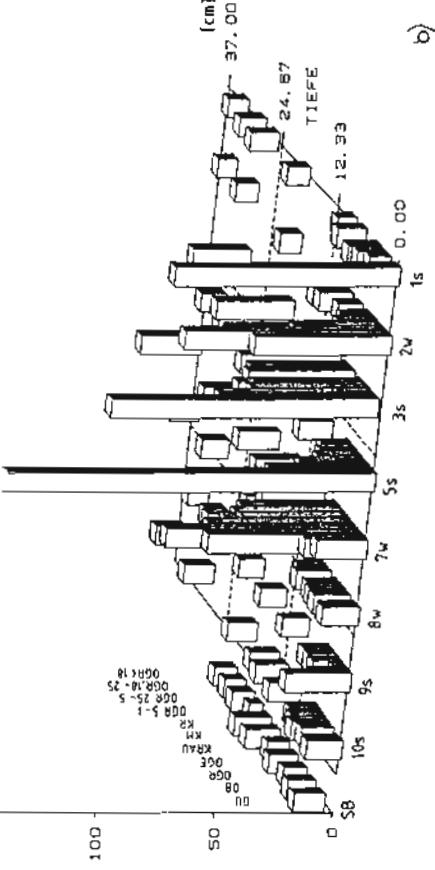


Figure 49: Erdalkalikonzentrationen in den Wasserauszügen aus Kernen der Münsterplattform-Stützmauer:

- a) Magnesiumverteilung
- b) Kalziumverteilung



Ca²⁺



5.1.5 Zusammenfassung

Am Westteil der Münsterplattform-Stützmauer blühnen Salze oberflächlich nur selten und ausschliesslich im oberen senkrechten Teil der Mauer aus. Bei den Salzen handelt es sich jeweils um Phenardit, Gips und Nitronatrit. In diesem Mauerteil treten vor allem Schalenbildungen, Abblättern und Absanden auf. Der untere schräge Teil der Mauer ist vor allem mit Flechten, aber auch mit Moosen oder höheren Pflanzen bewachsen, und die Steine sind in diesem Bereich tieffündig aufgelockert.

Der einzige Bohrkern, der im unteren, schrägen Teil der Westmauer entnommen wurde (8w), enthielt gegenüber frischen Berner Sandsteinen keine erhöhten Salzgehalte. Dieser Teil der Mauer wurde aber erst nachträglich angebaut (Dreifuss, 1983), so dass es möglich ist, dass der Lösungstransport von hinten, zum Beispiel durch einen Hohlraum, unterbrochen oder behindert ist. Die Möglichkeit von transporthemmenden Hohlräumen oder ähnlichem, hinter den angebohrten Quadern besteht natürlich grundsätzlich. Dass die beiden im schrägen Unterteil der Südmauer erbohrten Kerne 9s und 10s ebenfalls kaum Salzanreicherungen aufweisen, spricht allerdings gegen ein Hindernis im Lösungstransport an der Stelle 8w.

Der Bohrkern 2w aus dem oberen, senkrechten Teil der Westmauer enthält in der Lockerzone hinter der Schale im Maximum etwa 1 % Gips. So ist es nicht verwunderlich, dass dort Gipsausfällungen bereits von bloßem Auge, als kleine weiße Pünktchen festgestellt werden können. Die Kalziumsulfatarmreicherungen werden in 5 – 6 cm Tiefe durch Natrium, Chloride und Nitrate abgelöst. Die an verschiedenen Orten auf der Westmauer festgestellten Salze entsprechen in ihrer chemischen Zusammensetzung den im Kern 2w festgestellten häufigsten Ionen, eine Ausnahme bilden die Chloride, welche in mehr festzustellen, ob die am Kern 2w in den äussersten 2 mm gemessenen ungewöhnlich hohen Säureverbrauchs- respektive HCO_3^- -Werte auch an andern Proben des steilen Oberteils auftreten.

Die südliche Stützmauer ist in ihrem obersten Teil grossflächig mit Zementmörtel überzogen. Rings um diese Stellen sandten die Sandsteine stark ab und es treten alkalische Natriumkarbonatausfällungen, neben Sulfaten, Nitraten und Chloriden auf. Etwas

tiefer im steilen Oberteil fehlen die alkalischen Salze, dafür tritt zusätzlich Gips auf.

Der schräge untere Teil der Südmauer ist wie der untere Teil der Westmauer stark mit Flechten bewachsen. Oberflächliche Salzausblühungen sind in diesem Teil der Mauer selten und bestehen aus Gips und Thenardit.

Die beiden Kerne, welche aus dem schrägen unteren Teil der Südmauer stammen, zeigen, dass die Auflockerung hier etwa 15 - 20 cm tief reicht, und dass sie mit einer deutlichen Zunahme der Poren mit Eingangsradien zwischen 6,3 und 10 μm verbunden ist. Die löslichen Anteile in 9s zeigen eine leichte Kalzium-, Natrium- und Sulfatansreicherung an der Oberfläche, was mit den gefundenen Ausblühungssalzen übereinstimmt. Die Analysen aller andern Proben in 9s und 10s zeigen, wenn überhaupt, höchstens geringfügig höhere wasserlösliche Anteile als frische Proben von Berner Sandsteinen.

Damit kann festgehalten werden, dass sich die stark bewachsenen, schrägen Unterteile der Süd- und der Westmauer weder in der Auflockerungstiefe der Sandsteine noch in ihrem Gehalt an leichtlöslichen Salzen wesentlich unterscheiden.

Im Bohrkern 1s, welcher in der mörtelüberzogenen Partie des steilen Oberteils der Südmauer entnommen wurde, sind Natrium, Kalium und Nitrat bis zuinnerst gleichmässig, aber relativ wenig angereichert. Die grössten Salzanreicherungen überhaupt finden sich aber im Kern 3s, welcher 2 Meter unter der mörtelüberzogenen Partie erbohrt wurde. 3s weist bis zuhinterst grosse Anreicherungen an Natrium, Kalzium, Chlorid und Nitrat auf. Die Anreicherungen der Salze gerade an dieser Stelle werden im Zusammenhang mit der mörtelüberzogenen Fläche darüber erklärt. Es wird angenommen, dass durch die Verdunstung der Lösungstransport durch die Mauer zu mörtelfreien Oberflächen hin gelekt wird. Das wäre auch in Übereinstimmung damit, dass rings um die mörtelüberzogenen Stellen fast überall Salze ausblühen, und dass die Steine dort auch sehr stark absanden. Die chemische Zusammensetzung der gefundenen Ausblühungssalze stimmt mit den in Kern 3s am häufigsten bestimmten Ionen gut überein; zusätzlich treten aber noch Natriumkarbonate als Ausblühungssalze auf. Dass in den Analysen der löslichen Anteile im Kern 3s keine erhöhten HCO_3^- -Konzentrationen und auch kein erhöhtes pH gemessen wurden,

lässt sich dadurch erklären, dass bei erhöhten Gehalten an HCO_3^- und Ca^{2+} sofort Kalzit (CaCO_3) ausfällt (siehe auch qualitativer Karbonatnachweis in Arnold, 1984).

Im steilen Oberteil, sowohl der West- als auch der Südmauer, enthalten die Sandsteine gegenüber den schrägen Unterteilen vermehrt Kalzium- und Natriumchloride und -nitrate. Gross sind die Konzentrationen vor allem rings um die mörtelüberzogenen Teile der Südmauer. Die Sulfatanreicherungen beschränken sich in diesen Mauerteilen auf die Lockerzonen hinter den Schalen, und sie reichen von dort aus bis maximal 6 cm Tiefe. Die Veränderung der Porosität ist in und direkt hinter der Schale deutlich und besteht vor allem in der Erhöhung des Grobporen- und Makroporenanteils.

Die Südseite des Pavillonunterbaus ist mit einer gräulichen Gipskruste überzogen und stellenweise sanden die Steine leicht ab. Der hier entnommene Bohrkern (5s) weist Ca^{2+} - und SO_4^{2-} -Anreicherungen bis in maximal 3 cm Tiefe auf, auch die Magnesiumgehalte sind hier etwas erhöht. Im ersten Zentimeter des Bohrkerns sind sowohl die Makro- als auch die Grobporosität gegenüber tiefer in der Mauer liegenden Bereichen grösser. Die Wasserauszuzeige waren zwischen 1 und 4 cm Tiefe geltlich verfärbt. Erhöhte Eisengehalte können als Grund für die Verfärbung ausgeschlossen werden. Die Ursache der Farbe bleibt vorläufig ungeklärt (siehe Figur 42b).

Die Westseite des Pavillonunterbaus weist Schalenbildungen und stellenweises Absanden auf. In der Schale und im ersten Zentimeter dahinter, im aus diesem Bereich stammenden Bohrkern 7w, war der Anteil der Grobporosität sehr stark vergrössert und der Anteil der Makroporosität leicht verringert. Der Kern, welcher nahe am grossen Riss entnommen wurde, wies bis in 10 cm Tiefe erhöhte Sulfatgehalte auf, mit dem Maximalwert im ersten Zentimeter hinter der Schale. Im ganzen Kern 7w wurden hohe Kalzium-, Natrium-, Nitrat- und Chloridwerte gemessen, und auch Ammonium ist in grösseren Konzentrationen vorhanden als anderswo. Die zuletzt aufgezählten Ionen erreichen etwa in der Kermitte ein Minimum, in der tiefsten Probe steigen sie wieder deutlich an. Nicht zuletzt wegen des Anstiegs der Messwerte zuhinterst im Kern wird angenommen, dass die hohen Salzkonzentrationen hier vor allem im Zusammenhang mit der bis anhin im Pavillon befindlichen WC-Anlage stehen.

5.2 Grosses Matteschulhaus

Tabelle 18: Beschreibung der untersuchten Bohrkerne vom Grossen Matteschulhaus. Beschreibung nach K. Zehnder (vom Technischen Labor des Instituts für Denkmalpflege der ETH-Zürich).

Die Fassaden der beiden Matteschulhäuser wurden 1984 bis 1985 renoviert. Vor Baubeginn wurden die Schäden an den Sandsteinen durch Herrn Architekt M. Saurer in steingerechten Fassadenplänen festgehalten. Im Technischen Labor des Instituts für Denkmalpflege der ETH-Zürich wurden Porositätsmessungen an Bohrkernen vom Grossen Matteschulhaus durchgeführt, und an den gleichen Kernen wurden im StadtLabor Bern die wasserlöslichen Anteile bestimmt. Die Resultate dieser Untersuchungen wurden mir für diese Arbeit zur Verfügung gestellt.

Da alle untersuchten Proben vom Grossen Matteschulhaus stammen, wird im folgenden nur noch von ihm die Rede sein.

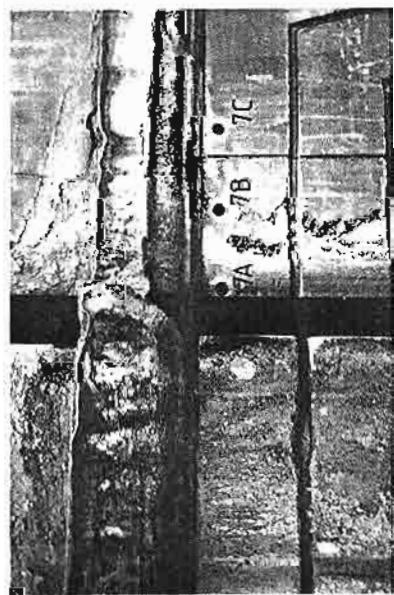
5.2.1 Zustand der Fassaden und Bohrkernbeschreibung

Das Grosse Matteschulhaus wurde in den Jahren 1834-37 erbaut und 1896 um ein Geschoss aufgestockt (INFO, 1986). Der Zustand der Fassaden vor der Renovation lässt sich wie folgt zusammenfassen: Gurte, Fensterbänke und Fensterverdachungen, welche direkt beregetzt sind, waren mit Algen und Flechten bewachsen, blätterten auf, bröckelten ab und/oder sandeten ab. An ihrer Unterseite traten Salzausblühungen und Krustenbildungen auf (vergleiche Bohrkern 4A, 4B und 8). Lisenen im oberen Fassadenbereich sandeten leicht ab, im unteren Fassadenbereich wiesen sie, vor allem an der Westfassade, Schalenbildungen auf, und die Kanten bröckelten ab. An regenschützten Stellen traten dunkle Krusten auf. Die erste Reihe von Sandsteinquadern über dem Kalksockel wies manchmal Schalenbildungen auf (vergleiche Bohrkern 1) oder die Steine waren in den äussersten 10 cm stark aufgelockert und bereits bis 1 cm zurückgewittert (vergleiche Kern 2A). In der nachfolgenden Tabelle 18 werden die Bohrkerne und ihre Entnahmestellen kurz beschrieben.

Bohrkern Nr.	Entnahmestelle	Beschreibung
1	W-Fassade, links vom Eingang; 40 cm über dem Kalksteifsockel.	An der Oberfläche befindet sich eine 1,5 cm dicke Schale, vor einer 1,5 bis 2 cm breiten, gipshaltigen Lockerzone. Dahinter folgt kompakter Sandstein.
2A,B	N-Fassade, nahe der NW-Ecke. A: 4 cm über dem Sockelstein, B: 23 cm über 2A.	ZA: Die ersten 10 cm, direkt über dem Sockelstein, bilden eine aufgelockerte Zone, die bereits 0,5 bis 1 cm zurückgewittert ist. Die äussersten 0,5 cm des Kerns bestehen aus schuppig abfallendem, lockkrem, weißlichem Material (Aufflocken?). ZB: stammt aus dem oberflächlich, massig abhandenden Bereich.
3	S-Fassade, 30 cm unter dem obersten Gurt, unter dem Dachversprung	intakter Stein, mit oberflächlich dünnem, schönlich-grauer Kruste.
4A,B	W-Fassade, in Gurt über dem Eingang links.	 Die Gurtoben- und Stirnseite sind mit Algen bewachsen; die Unterrseite ist stark aufgelockert und trägt Salzausbildungen.
7A,B,C	W-Fassade, unter dem Gurt im 1. Obergeschoss, rechts vom Dachablaufrohr.	 Die Entnahmestellen sind in Figur 50 abgebildet. 7A stammt aus dem übersprühten Bereich. 7B der Sandstein sandet oberflächlich stark ab und trägt eine 2-3 mm dicke Kruste. 7C trägt oberflächliche Salzausbildungen, darunter ± intakt.
8	N-Fassade, 1. Obergeschoss Fensterverdachung des östlichsten Fensters.	2 cm dicke Schale, 2 cm dicke Lockerzone, dann folgt ein mehr oder weniger intakter Kern.

nicht mit Ionenchromatographie, wie bei den bisher besprochenen Proben, sondern mit Atomabsorption. Zehnder (1982) hat darauf hingewiesen, dass bei dieser Methode die Kalziumwerte bei der Anwesenheit von viel Schwefel in der Regel zu tief gemessen werden. Dies könnte der Grund für die, vor allem in Gipsanreicherungszonen festgestellten, tiefen Ladungsbilanzen sein (Tabelle 20).

In den Tabellen 19 und 20 sind die Resultate der Porositätsmessungen und der Bestimmungen der wasserlöslichen Anteile zusammengestellt. Die in ppm umgerechneten Werte für die wasserlöslichen Anteile sind in Tabelle 23 im Anhang aufgeführt.



Figur 50: Foto der Situation beim lecken Dachablaufrohr an der Nordfassade wo die Kerne 7A, 7B und 7C erbohrt wurden
(Bild K. Zehnder)

Tabelle 19: Resultate der Quecksilberdruckporositätsmessungen an Bohrkernen des Grossen Matteschulhauses (Daten ermittelt vom Technischen Labor des Instituts für Denkmalpflege, ETH-Zürich). Die Probenbezeichnung setzt sich aus der Bohrkernnummer und der Entnahmetiefe zusammen.

Probe	ogrP	onap	omip	top [ml/100g]
1/2-3	3.35	1.72	2.75	7.82
1/3-4	5.27	2.28	2.73	10.28
1/5-6	4.74	2.32	2.83	9.89
1/8-9	3.55	2.20	2.75	8.50
1/22-23	4.39	2.37	2.76	9.52
3/19-20	2.78	2.50	2.58	7.86
4A/1-2	6.95	1.85	2.27	11.07
4A/3-4	4.98	1.78	2.86	9.60
4A/6-7	5.47	1.95	2.23	9.65
4A/12-13	5.07	1.91	2.07	9.05
4A/18-19	4.20	2.16	2.38	8.74
8/2.5-4	9.57	2.86	2.58	15.01
8/5-6	3.18	3.35	2.15	8.68
8/8-9	3.25	3.29	2.54	9.08
8/19-20	3.27	2.95	2.60	8.82

ogrP: offene Grobporosität; onap: offene Makroporosität;
omip: offene Mikroporosität; top: totale offene Porosität.

Die Resultate der Messungen der löslichen Anteile wurden mir durch das Stadtlabor zur Verfügung gestellt. Die Messungen erfolgten

5.2.2 Porositäten und wasserlösliche Anteile in den Bohrkernen
Die hier zusammengestellten Porositätsdaten wurden mir vom Technischen Labor des Instituts für Denkmalpflege zur Verfügung gestellt. Die Quecksilberindringkurven wurden auf dem gleichen Porosimeter aufgenommen, wie die bisher besprochenen Porositätskurven. Im ersten, manuellen Messteil wurde hier aber aus technischen Gründen die ganze Grobporosität in einem einzigen Schritt ermittelt, so dass von diesem Teil der Kurve nur der Endwert, nicht aber der Verlauf bekannt ist. In allen Messungen vom Grossen Matteschulhaus liegt der weitaus grösste Teil der Poren im Bereich der Grobporosität, also ausgerechnet in jenem Bereich für den der Kurvenverlauf nicht bekannt ist. Deshalb wird hier auf die Wiedergabe der Quecksilberindringkurven verzichtet. Die gefangenen Porositäten (tgp) wurden nicht bestimmt.

Die Resultate der Messungen der löslichen Anteile wurden mir durch das Stadtlabor zur Verfügung gestellt. Die Messungen erfolgten

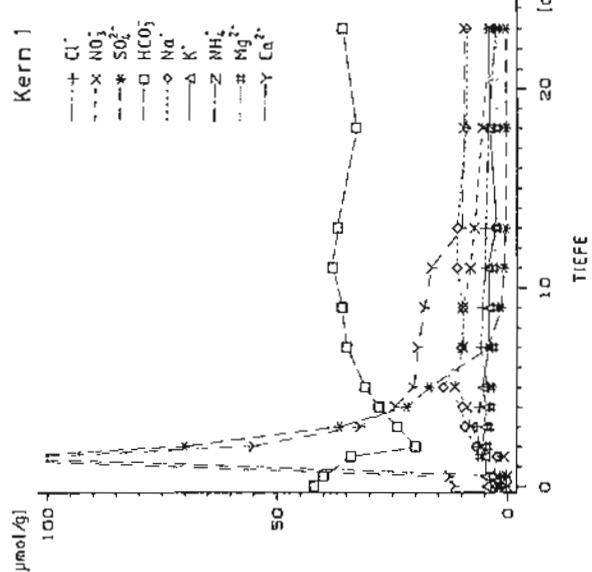
Tabelle 20: Wasserlösliche Anteile in den Bohrkernen des Grossen Matteschulhauses (Daten durch das Stadtlabor Bern zur Verfügung gestellt). Angaben in $\mu\text{mol}/\text{g}$. Die Probenbezeichnung setzt sich aus der Bohrkernnummer und der Entnahmetiefe der Probe zusammen.

Bil: Ladungsbilanz.

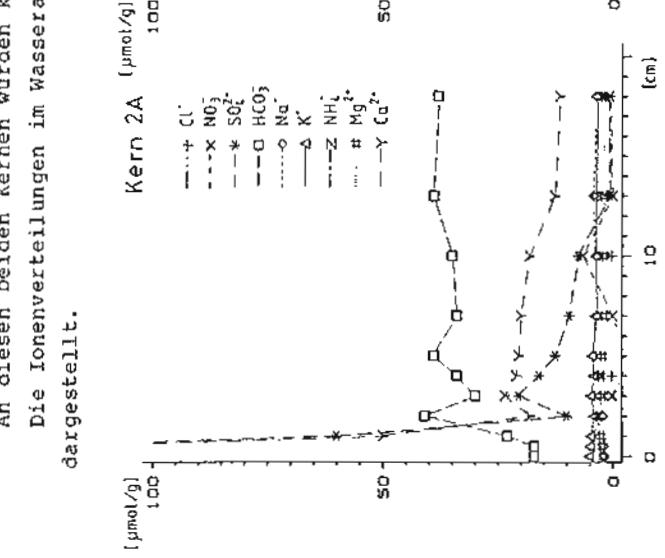
Probe	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	pH	BIL
4A/0-1	0.6	-	-	-	4.7	8.1	4.0	2.9	12	10.15
4A/1-2	0.3	-	-	-	2.0	3.9	4.1	2.7	13	9.90
4A/2-3	0.3	-	-	-	33	28	2.7	3.5	33	9.95
4A/4-5	0.3	-	-	-	2.3	41	2.0	4.9	32	-15
4A/7-8	0.4	-	-	-	0.9	48	4.0	4.5	3.3	10.00
4A/10-11	0.4	-	-	-	0.9	45	2.0	4.1	3.1	-9
4A/13-14	0.3	-	-	-	1.2	40	1.9	4.1	3.3	10.05
4A/16-17	-	-	-	-	1.3	46	2.3	4.2	3.6	-11
4A/19-20	-	-	-	-	1.3	38	1.7	3.8	3.6	-6
4B/0-2	-	-	-	-	10.5	125	3.2	5.3	15.5	-78
4B/2-5	-	-	-	-	1.0	42	2.2	4.4	8.0	-22
4B/5-8	-	-	-	-	0.7	12	4.0	4.7	5.0	-3
4B/8-13	-	-	-	-	-	9.0	44	1.9	4.0	-7
7A/0-1	-	-	-	-	0.3	34	40	3.0	5.0	-7
7A/1-2	-	-	-	-	-	0.3	40	1.9	4.2	-3
7A/2-3	-	-	-	-	-	0.3	40	1.8	4.2	-1
7A/3-4	-	-	-	-	-	0.3	40	1.8	4.2	-1
7A/5-6	-	-	-	-	-	0.3	39	1.7	4.2	-1
7A/8-9	-	-	-	-	-	0.4	42	1.8	4.1	-1
7A/11-12	-	-	-	-	-	0.3	41	2.5	4.2	-1
7A/14-15	-	-	-	-	-	0.7	39	1.9	2.6	-1
7B/0-0.5	-	-	-	-	-	0.7	39	13.0	7.0	-1
7B/0-5-1	-	-	-	-	-	1.8	2.4	2.4	445	-10
7B/1-2	-	-	-	-	-	1.4	2.4	4.0	7.5	-10
7B/2-3	-	-	-	-	-	0.8	1.0	4.1	7.5	-4
7B/4-5	-	-	-	-	-	0.1	41	2.5	4.3	-2
7B/6-7	-	-	-	-	-	0.1	43	2.8	4.4	-2
7B/9-10	-	-	-	-	-	0.4	41	2.0	4.0	-1
7B/12-13	-	-	-	-	-	0.4	41	2.3	4.2	-1
7B/15-16.5	-	-	-	-	-	0.4	40	2.1	3.6	-1
7C/0-1	-	-	-	-	-	2.5	7.3	105	35	-1
7C/6-7	-	-	-	-	-	0.2	41	4.8	5.9	-1
7C/7-8	-	-	-	-	-	0.2	46	2.3	4.0	-4
7C/9-10	-	-	-	-	-	0.4	41	2.0	4.0	-1
7C/12-13	-	-	-	-	-	0.4	41	2.3	4.2	-1
7C/13-14	-	-	-	-	-	0.4	41	2.1	3.6	-1
7C/16-17.5	-	-	-	-	-	0.4	40	2.9	4.2	-1
8/0-1	-	-	-	-	-	0.3	40	2.1	3.6	-1
8/1-2	-	-	-	-	-	0.2	41	1.7	4.1	-1
8/2-2.5	-	-	-	-	-	0.3	41	2.2	4.2	-1
8/2-5.4	-	-	-	-	-	0.8	40	1.9	4.2	-1
8/4-5	-	-	-	-	-	0.4	39	1.7	3.8	-1
8/6-7	-	-	-	-	-	0.5	42	2.0	3.6	-1
8/9-10	-	-	-	-	-	0.8	40	1.4	3.2	-1
8/12-13	-	-	-	-	-	0.8	41	2.5	6.7	-1
8/15-16	-	-	-	-	-	0.5	40	7.70	5.0	-1
8/19-20	-	-	-	-	-	0.7	48	3.2	4.5	-1
3/0	1.3	-	1350	-	3.0	52	2.5	560	7.85	-1
3/0-1	0.4	0.7	12	38	1.3	4.3	4.0	29	9.70	-13
3/1-2	0.4	0.3	0.2	46	3.7	3.9	3.6	14	10.05	-11
3/2-3	0.4	0.1	0.3	40	1.5	3.8	3.5	12	10.10	-4
3/3-4	0.4	0.4	0.4	40	2.1	3.0	3.3	12	10.15	-1
3/4-5	0.3	0.1	0.8	39	1.6	3.3	3.6	12	10.10	-1
3/7-8	-	-	0.2	39	1.4	3.0	3.3	12	10.15	-1
3/10-11	-	-	1.0	38	2.2	2.7	3.2	12	10.10	-1
3/19-20	-	-	0.4	43	2.5	3.2	3.6	11	10.10	-1

Kern 1:
 Die Porositätsmessungen (Tabelle 19) an diesem Kern ergeben das paradoxe Resultat, dass die Lockerzone hinter der Schale die niedrigste totale Porosität aufweist. Bei einem Vakuum von 35 Torr sind Poren mit einem Äquivalentradius von ungefähr $r > 0.13$ mm bereits gefüllt. Wenn also Poren mit $r > 0.13$ mm vorhanden sind, können diese mit der Quecksilberdruckporosimetrie nicht erfasst werden. Es besteht leider keine Möglichkeit mehr nachzuprüfen, ob die Probe 1/2-3 tatsächlich noch Poren in einem gröberen Bereich als 0.9 pm enthält. Die Vermutung, dass es so ist, wird aber durch den in dieser Probe gemessenen geringen Anteil Makroporosität gestützt, denn tiefe Makroporositäten treten in der Regel nur auf, wenn die Grobporositäten stark erhöht sind, wie zum Beispiel in 4A/1-2 und 4A/3-4.

Kern 2A und 2B:
 An diesen beiden Kernen wurden keine Porositäten gemessen. Die Ionenverteilungen im Wasserauszug sind in der Figur 52 dargestellt.
 Bei der Analyse der wasserlöslichen Anteile erstaunten die hohen Ca^{2+} - und SO_4^{2-} -Gehalte in 1.5 bis 3 cm Tiefe nicht, denn Gips konnte bereits makroskopisch in dieser Zone beobachtet werden (Mitteilung K. Zehnder). Ab einer Tiefe von 3 cm treten hohe Chlorid-, Nitrat- und Natriumwerte auf, wobei der höchste Chloridgehalt in 3 bis 4 cm Tiefe und die höchsten Nitrat- und Natriumgehalte nach 5 cm gemessen wurden. Sowohl Natriumnitrat als auch -chlorid können aus der Grundfeuchte stammen, für das Chlorid kommt zusätzlich noch die winterliche Salzstreuung als Quelle in Frage.



Figur 51: Ionenverteilung im Wasserauszug aus Bohrkern 1.



Die Mikroporositäten aller fünf an diesem Kern gemessenen Proben sind fast identisch und auch die Makroporositäten sind, abgesehen

Figur 52

Figur 52: Ionenverteilungen im Wasserauszug der Bohrkerne 2A und 2B.

wurde viel mehr Sulfat als Kalzium gemessen, was aber wahrscheinlich auf die oben erwähnten Schwierigkeiten der Kalziummessung mittels Atomabsorptionsspektrometrie bei hohen Sulfatkonzentrationen zurückzuführen ist.

Nur wenige cm über dem Kalksteinsockel (2A) sind Sulfat und Kalzium bis in eine Tiefe von 11 cm angereichert. Etwas höher im gleichen Werkstück (2B) ist ausser einer geringen Anreicherung von Kalzium und Sulfat an der Oberfläche keine Anreicherung dieser Ionen mit der Tiefe mehr festzustellen. Dafür sind in 2B im ganzen Kern Chloride und Nitrate gemessen worden. Diese beiden Ionen kommen in 2A erst ab einer Tiefe von 4 cm vor, und zudem kommen sie auch bloss in geringerer Menge als in 2B vor. Eine Ausnahme bildet der hohe Nitratwert in 2A in 10 bis 11 cm Tiefe.

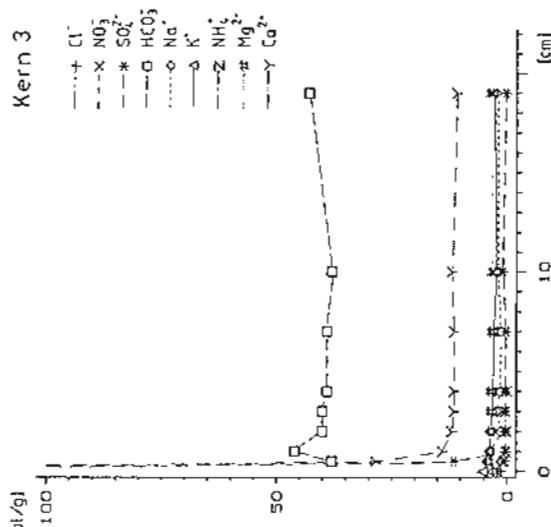
Die Zonierung mit den Sulfaten im unteren, oberflächlich aufgerockneten Bereich des Steins und mit Chloriden und Nitraten im etwas höher liegenden Bereich, wo kaum mehr Schäden sichtbar sind, erinnert an die von Arnold und Zehnder (1984) festgestellte Verteilung von Salzen im Grundfeuchtebereich.

Bohrkern 3:

Die an diesem Kern festgestellten Porositätswerte (Tabelle 19) könnten, als Werte von mehr oder weniger unverwittertem Sandstein, als Referenzwerte für die andern Proben dienen. Dabei ist allerdings Vorsicht am Platz, da ja das dritte Obergeschoss, aus dem dieser Bohrkern stammt erst 60 Jahre nach den darunterliegenden Geschossen erbaut worden ist. Es ist deshalb nicht sicher, ob für diese Aufstockung Sandsteine aus dem gleichen Steinbruch verwendet wurden. Und selbst wenn der Sandstein aus dem gleichen Steinbruch stammt, muss angenommen werden, dass mit den Jahren andere (tiefere?) Schichten abgebaut wurden und so die Steinqualität nicht die gleiche war.

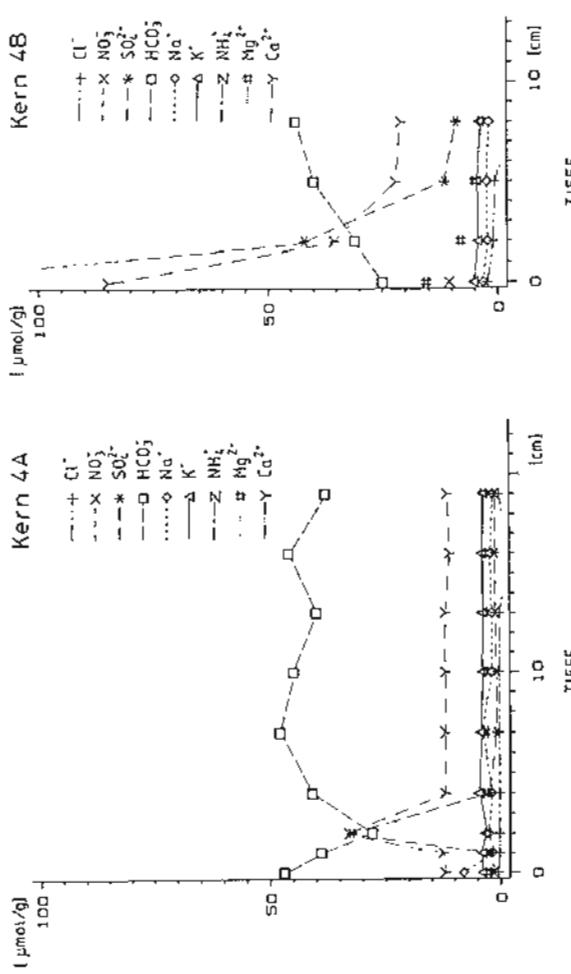
Verglichen mit den in dieser Arbeit untersuchten frischen Sandsteinproben, gleichen die Porositätsdaten der Proben 3/19-20 am ehesten denen der gelben Ostermundiger Sandsteine (Tabelle 12). Von den andern Proben des Grossen Matteschulhauses unterscheidet sich diese Probe vor allem durch die niedrige Grobporosität.

Mit Ausnahme der äussersten paar Millimeter sind in den Wasserauszügen alle Ionen etwa in der Grössenordnung wie in frischen Sandsteinen vorhanden. Im Wasserauszug der oberflächlichen Kruste



Figur 53: Ionenverteilung im Wasserauszug des Bohrkerns 3.
Bohrkerne 3A und 3B:

Die Porositätsmessungen (Tabelle 19) zeigen eine Abnahme der totalen offenen Porosität mit der Tiefe. Die Mikroporositäten schwanken hier, verglichen mit den Messungen an den andern Bohrkernen der Matteschulhäuser, relativ stark. Die Makroporosität nimmt von aussen nach innen tendenziell zu, verglichen mit den andern Bohrkernen ist sie aber durchwegs tief. Die Grobporositäten nehmen, abgesehen von der Probe 4A/3-4, nach innen ab. Die Auflösung der ersten 10 cm des Bohrkerns 3A widerspiegelt sich in der, auch noch in 12 cm Tiefe, grossen Grobporosität und in der wahrscheinlich damit zusammenhängenden, reduzierten Makroporosität.



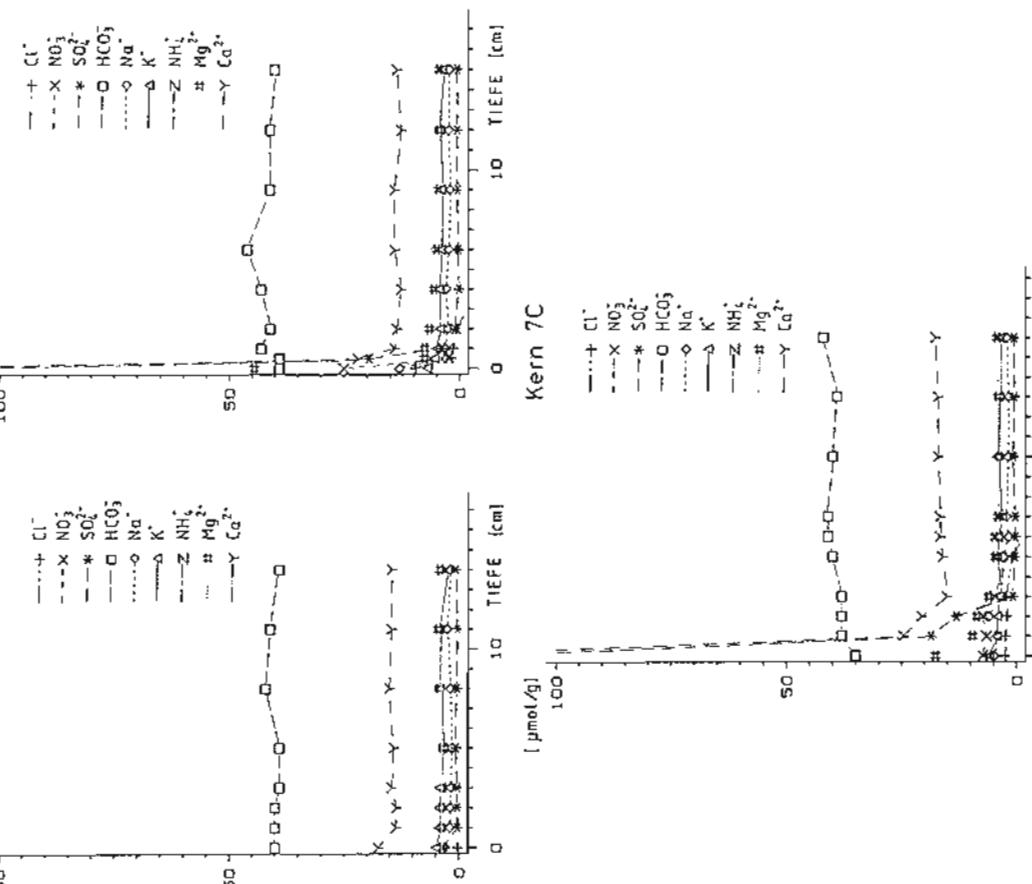
Figur 54: Ionenverteilung im Wasserauszug der Bohrkerne 4A und 4B.

Im Kern 4A sind in 2 bis 3 cm Tiefe Kalzium und Sulfat angereichert, was auf eine beginnende Schalenbildung hindeuten könnte. Im äussersten Zentimeter wurden 2 - 4 mal so hohe Natriumwerte wie im Rest des Kerns gemessen.
In den äussersten 2 cm des Kerns 4B sind außer HCO_3^- , Natrium und Kalium alle Ionen in, gegenüber frischen Sandsteinen, erhöhten Konzentrationen vorhanden, was nicht erstaunt, da ja dort oberflächliche Salzausblühungen festgestellt wurden. Dieser schräg nach oben gebohrte Kern enthält auch in einer Tiefe von 8 bis 13 cm noch erhöhte Kalzium- und Sulfatwerte.
Generell wurden im unteren Teil des Gurts (4B) höhere Ionenkonzentrationen als im oberen Teil gemessen.

Bohrkerne 7A, 7B und 7C:

An diesen Proben wurden keine Porositätsmessungen gemacht. Dass die drei Bohrkerne aus verschiedenen Bereichen eines Wasserlaufs

stammen (Figur 50), widerspiegelt sich deutlich in der Chemie der Wasserauszüge.

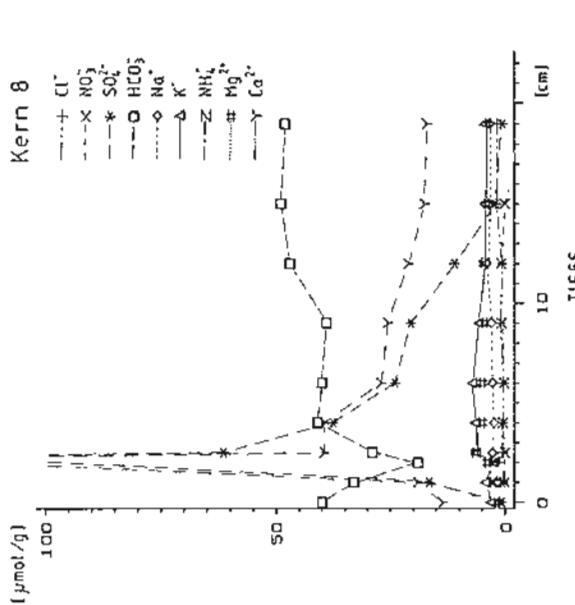


Figur 55: Ionenverteilung in den Wasserauszügen der Bohrkerne 7A, 7B und 7C.

Im Kern 7A, der im überspülten Bereich gezogen wurde, sind nur im äussersten Zentimeter ganz geringe Kalzium- und Sulfatanreicherungen festzustellen. Im Kern 7B, aus dem Übergangsbereich zwischen überspültem und nicht überspültem Bereich, sind alle gemessenen Ionen außer HCO_3^- um das 2- bis 400-fache angereichert. Die Anreicherungen gehen aber nicht tiefer als 2 bis 3 cm. Auf der Oberfläche von 7C wurden ebenfalls hohe Werte von Chlorid, Nitrat, Sulfat, Magnesium und Kalzium festgestellt; die Konzentrationen betragen aber höchstens einen Drittel der in der Oberflächenzone von 7B gemessenen. Dafür reicht die Aufkonzentrierung bis 4 cm tief und damit etwas tiefer als in 7B.

Bohrkern 8:

Die Porositätsmessungen (Tabelle 19) ergeben, für die Lockerzone hinter der Schale, Werte von mehr als 30 Vol-%, wobei 20 Vol-% allein als Grobporen vorhanden sind. Ab 5 cm Tiefe weichen die Porositätsmessungen nur noch wenig voneinander ab.



Figur 56: Ionenverteilung im Wasserauszug des Bohrkerns 8.

Hohe Sulfat- und Kalziumwerte wurden in 2 bis 2.5 cm Tiefe, direkt hinter der Schale, gemessen; die Konzentrationen dieser beiden Ionen sind bis 16 cm Tiefe erhöht. In der Lockerzone hinter der Schale ist auch Nitrat etwas aufkonzentriert, und dahinter wurden etwas grössere Magnesiumwerte gemessen.

5.2.3 Gegenüberstellung der verschiedenen Bohrkerne des Grossen Matteschulhauses

Alle gemessenen Proben des Grossen Matteschulhauses zeichnen sich durch sehr grosse Anteile an Grobporosität aus (Tabelle 19), auch dann wenn sie kaum gelockert sind (zum Beispiel 3/19-20). Die Makroporositäten schwanken zwischen 1.7 und 3.4 ml/100g und die Mikroporositäten zwischen 2.1 und 2.9 ml/100g. In ihren Mikroporositäten sind die Proben also durchaus vergleichbar mit den in dieser Arbeit untersuchten unverwitterten Berner Sandsteinen (Tabelle 12). Die Makroporositäten der Proben vom Matteschulhaus sind jedoch fast durchwegs geringer und ihre Grobporositäten fast immer grösser als die Werte der heute erhältlichen Berner Sandsteine.

Die Hydrogenkarbonatwerte der Wasserauszüge (Figur 57d) geben ein sehr ausgeglichenes Bild wider, nicht zuletzt deshalb, weil diese Werte praktisch nur durch Herauslösen von Kalzit und Dolomit zustande kommen. Tiefe HCO_3^- -Werte wurden immer dort gemessen, wo hohe Sulfat- und Kalziumwerte festgestellt wurden. Die Hydrogenkarbonatwerte waren durchwegs tiefer als 50 $\mu\text{mol/g}$.

Hohe Sulfatgehalte (Figur 57c) kommen in den Lockerzonen hinter Schalen (Bohrkerne 1 und 8), bei oberflächlicher Krustenbildung (Bohrkerne 2B, 3 und 7C), bei Salzausblühungen an der Oberfläche (7B und 4B) und in Auflockerungsbereichen (2A) vor. Die Sulfatgehalte erreichen in der Regel spätestens in etwa 10 cm Tiefe das Niveau von unverwitterten Berner Sandsteinen. Einzig im Kern 8 geht die Sulfatanreicherung deutlich tiefer als 10 cm. Dies steht wahrscheinlich im Zusammenhang mit dem Entnahmestandort des Kerns, in einer Fensterverdachung, wo Sulfat zusammen mit der Feuchtigkeit auch von oben und nicht nur von vorne in den Stein eindringen konnte. In diese Richtung deuten auch die Sulfatgehalte im Kern 4B, welche noch

in 8 bis 13 cm Tiefe deutlich erhöht sind; allerdings entspricht diese Sulfateindringtiefe nur einer effektiven Tiefe von etwa 6 bis 10 cm, da schräg nach oben gebohrt wurde.

Geringe Nitrat- und Chloridwerte (Figuren 57a und 57b) sind in fast allen Proben vorhanden. Die höchsten Konzentrationen erreichen beide Ionen in Proben aus dem Grundfeuchtebereich, ein paar cm hinter der Oberfläche oder dort an der Oberfläche, wo Salzausblühungen auftreten (4B und 7B). In 7C sind die beiden Ionen bis in etwa 4 cm angereichert, und es kann angenommen werden, dass sie hier mit dem Wasser aus dem lecken Dachablauf ins Steininnere transportiert wurden.

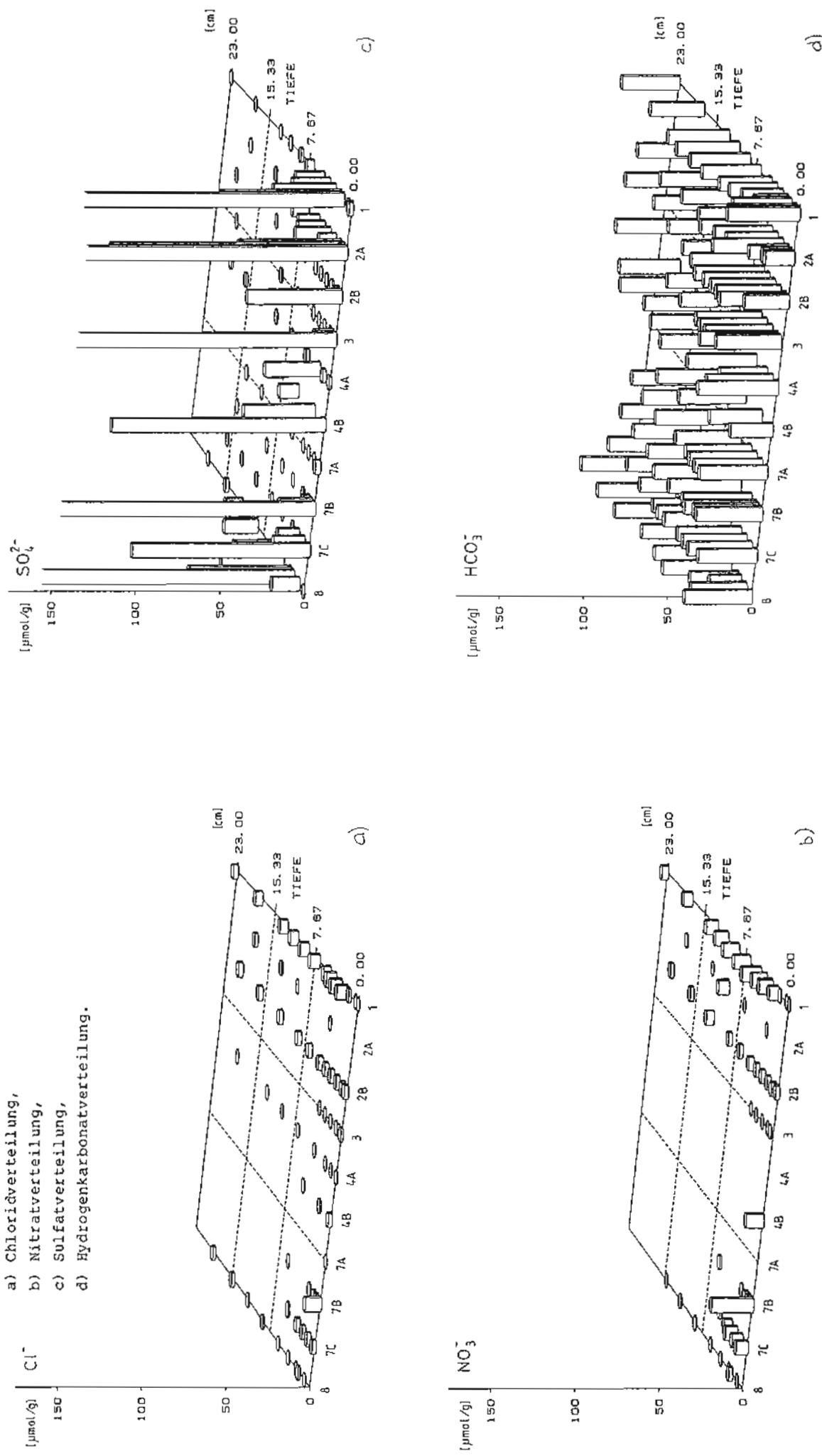
Etwas erhöhte Natriumgehalte (Figure 58a) fallen meistens zusammen mit erhöhten Nitrat- und Chloridgehalten (1, 7B, 7C). Eine Ausnahme bildet die vorderste Probe von 4A, in der überhaupt kein Nitrat und nur wenig Chlorid, aber deutlich aufkonzentrierte Nitratwerte gemessen wurden.

Die Kaliumgehalte (Figure 58b) in den verschiedenen Proben schwanken kaum. Ihr Minimum beträgt 1.9 $\mu\text{mol/g}$, ihr Maximum 7.3 $\mu\text{mol/g}$. Hohe Kalziumwerte (Figure 58d) treten dort auf, wo auch hohe Sulfatwerte gemessen wurden. Manchmal ist Kalzium noch etwas tiefer im Kern angereichert als Sulfat, zum Beispiel in den Kernen 1 und 8, wo Ca^{2+} zusammen mit Nitrat und Chlorid bis in 12 beziehungsweise 15 cm Tiefe auftritt.

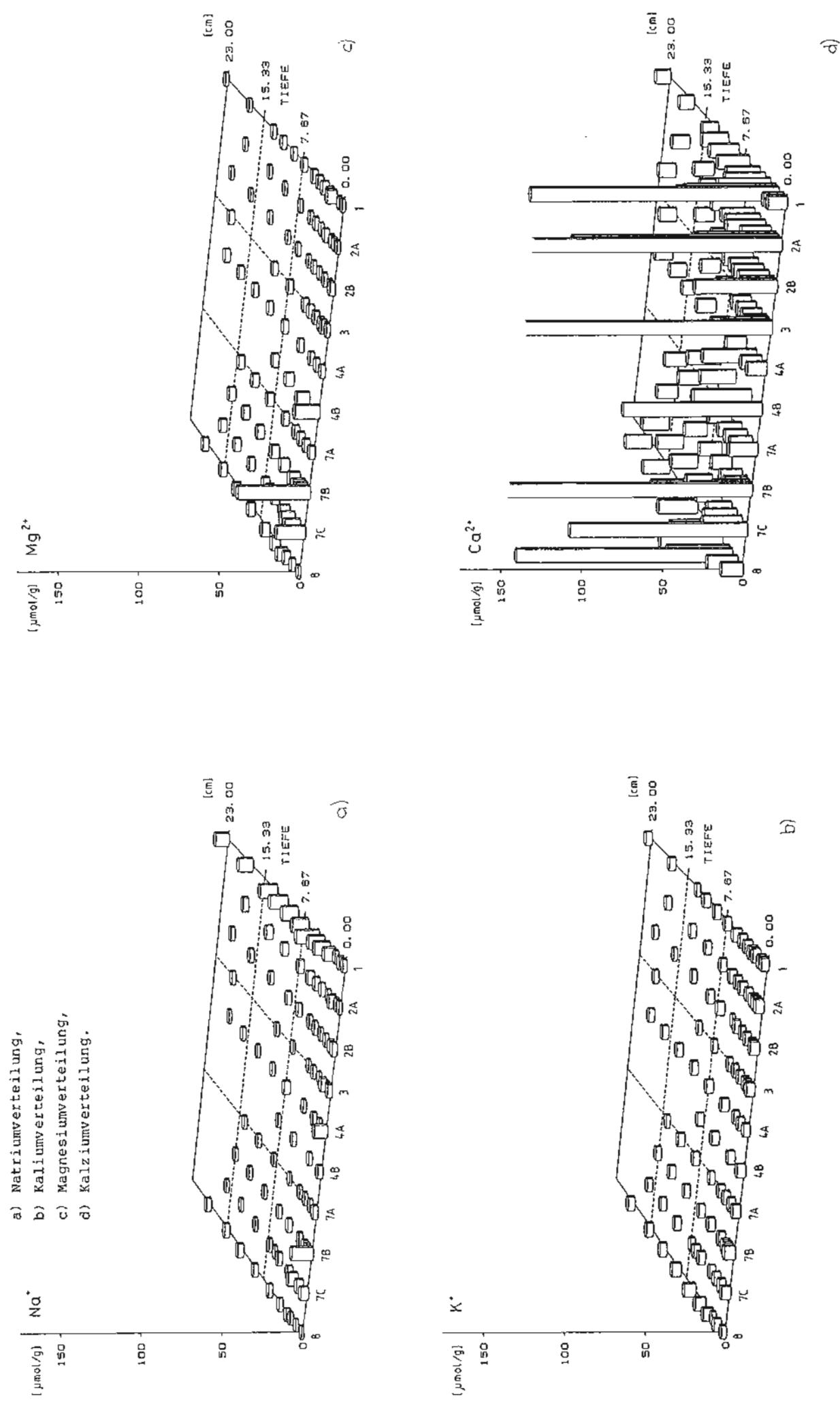
Deutlich erhöhte Magnesiumkonzentrationen (Figure 58c) kommen ausschliesslich im äussersten Zentimeter und nur gerade an Stellen mit oberflächlichen Salzausblühungen vor (4B, 7B, 7C).

Figur 57: Anionenkonzentrationen in den Wasserauszügen aus Bohrkernen des Grossen Matteschulhauses.

- a) Chloridverteilung,
- b) Nitratverteilung,
- c) Sulfatverteilung,
- d) Hydrogenkarbonatverteilung.



Figur 58: Kationenkonzentrationen in den Wasserauszügen aus Bohrkernen des Grossen Matteschulhauses.



5.2.4 Zusammenfassung

Die an den Berner Sandsteinen der Matteschulhäuser festgestellten Verwitterungssituationen sind gut vergleichbar mit den im Kapitel 2 dieser Arbeit zusammengestellten Situationen von andern Gebäuden. Dem direkten Regen ausgesetzte Gurte, Fensterbänke und -verdachungen sind mit Organismen bewachsen, blättern auf und bröckeln ab. An ihrer Unterseite finden sich öfters Salzausblühungen. Regenschützte Stellen sind mit dunkeln Gipskrusten überdeckt. Senkrechte Mauerteile sanden mehr oder weniger stark ab, und an frischen Steinen von Wetterfassaden bilden sich Schalen aus. In den ersten paar Zentimetern oberhalb der Sockelsteine sind die Sandsteine aufgelockert (Aufflocken?) und meist bereits einige Zentimeter zurückgewittert.

Die an den Matteschulhäusern verwendeten Sandsteine zeichnen sich im allgemeinen durch einen deutlich grössern Grobporenanteil als die heute abgebauten Berner Sandsteine aus. Mit zunehmender Auflockerung des Gesteins wird dieser Grobporenanteil noch vergrössert und kann bis zu 20 Vol-% erreichen.

Kalzium und Sulfat machen den weitaus grössten Teil der vorhandenen wasserlöslichen Salze aus. Sie sind in der Regel in der Lockerzone hinter Schalen oder oberflächlich stark angereichert. Chloride und Nitrate treten vor allem im Grundfeuchtebereich oder zum Teil auch in oberflächlichen Salzausblühungen ausserhalb des Grundfeuchtebereichs auf. Deutlich erhöhte Magnesiumkonzentrationen wurden ausschliesslich oberflächlich an Stellen mit Salzausblühungen festgestellt.

5.3 Zusammenfassender Vergleich der Verwitterungsprofile

Trotz der grossen Unterschiede zwischen der Münsterplattform-Stützmauer und dem Grossen Matteschulhaus, lassen sich die vorgefundenen Verwitterungsprofile vergleichen. So sind Schalenbildungen hier wie dort mit ausgeprägten Kalzium- und Sulfatanreicherungen in Tiefen zwischen 1 und 4 cm, also in der Lockerzone hinter der

Schale, verbunden. Schalen treten vor allem an senkrechten, dem direkten Regen ausgesetzten und gut besonnten Teilen auf. Die Porenweiterung in und hinter der Schale ist meist bereits von bloßem Auge an Rissen zu erkennen. Sie zeigt sich auch in raschen Wasseraufstiegsgeschwindigkeiten und in einer deutlichen Erhöhung des Grobporenanteils. Oberflächliche Gipskrusten werden an regenschützten Stellen beobachtet. Dabei ist die Gipsanreicherung an Hausmauern, ohne Feuchtigkeit von hinten, auf die äussersten Millimeter beschränkt. Bei der Stützmauer wird dagegen eine leichte Sulfatanreicherung bis in etwa 3 cm Tiefe gemessen.

Starke, tief gehende Auflockerungen zeigen sich in schnellen Wasserausggeschwindigkeiten und in der Zunahme der Grobporosität. In den hier untersuchten Bohrkernen wiesen stark aufgelockerte Bereiche keine oder höchstens oberflächliche Erhöhungen der Salzgehalte auf. Senkrecht von oben beregnete Teile sind meist mit Algen und Flechten bewachsen und häufig tiefründig aufgelockert. Die höchsten Salzkonzentrationen werden im oberen Teil der Münsterplattform-Stützmauer, in der Nähe der mit Zementmörtel überzogenen Teile festgestellt.

6 ZUR ENTSTEHUNG DER VERWITTERUNGSFORMEN

Die Verwitterungseinflüsse lassen sich in die Gesteinseigenschaften und die Einflüsse der Umwelt unterteilen. In diesem Kapitel soll versucht werden die Entstehung der beobachteten Verwitterungsformen mit Hilfe der verschiedenen Einflüsse zu erklären. Einleitend sei noch festgehalten, dass die biologische Verwitterung hier weitgehend unberücksichtigt bleibt. Ihre Berücksichtigung könnte in manchen Fällen noch zu Modifikationen der Interpretation führen.

6.1 Die verschiedenen Einflüsse

6.1.1 Einflüsse der Gesteinseigenschaften
Fast alle physikalischen Verwitterungsvorgänge spielen sich im Porenraum ab. Der Porenraum, die Porenordnung und die Porengrösse

spielen für die Aufnahme und Abgabe von Wasser, für die Dilatation bei der Wasseraufnahme, für das Frostverhalten und für den Ort der Salzkristallisation eine entscheidende Rolle.

Die Wasseraufnahmefähigkeit eines Gesteins kann durch die kapillaren Wassereindring- und -aufnahmekoeffizienten (B und A) charakterisiert werden. Die Saugfähigkeit ist nach Gummerson et al. (1980) proportional zur Wurzel aus dem Koeffizienten von Oberflächenspannung und Viskosität ($\sqrt{\sigma/\eta}$). Nach den gleichen Autoren habe der Benetzungswinkel (θ) nur einen geringen Einfluss. Wenn also der Wassereindringkoeffizient B für Wasser in einem bestimmten Gestein bekannt ist, kann B auch für eine andere Flüssigkeit im gleichen Gestein berechnet werden. In Salzlösungen ist die Veränderung des Wassereindringkoeffizienten (B) von der Konzentration abhängig. Hoch konzentrierte Salzlösungen haben in der Regel eine leicht höhere Oberflächenspannung (σ) und eine deutlich höhere Viskosität (η) als reines Wasser (Handbook of Chemistry and Physics, 1983). Sie werden also langsamer aufgesaugt als Wasser. In der nachfolgenden Tabelle 21 ist die Veränderung der Wassereindringkoeffizienten für zwei verschieden konzentrierte Magnesiumsulfatlösungen zusammengestellt.

Tabelle 21: Vergleich der Eindringkoeffizienten B zweier Magnesiumsulfatlösungen mit demjenigen von Wasser bei 20 °C. Die Werte für σ und η wurden nach dem Handbook of Chemistry and Physics (1983) berechnet, respektive interpoliert.

Lösung	Salz [g/cm ³]	σ [dyne/cm]	η [poise]	$\sqrt{\sigma/\eta}$	B von $B(\text{H}_2\text{O})$
H_2O	0	72.75	1.002 10 ⁻²	85.2	-
$\text{H}_2\text{O} + \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1.19	73.01	1.011 10 ⁻²	83.2	98.6
$\text{H}_2\text{O} + \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	24.0	79.25	6.498 10 ⁻²	34.9	41.0

Die Geschwindigkeit mit der ein Gestein Wasser, respektive Salzlösungen saugen kann, spielt neben der Porengröße und -verteilung eine Rolle für die Höhe des Grundfeuchteaufstiegs; denn an der Oberfläche kann nur soviel Wasser verdunsten wie kapillar antransportiert wird (siehe zum Beispiel bei Amoroso und Fassina, 1983).

Gerade beim Grundfeuchteaufstieg bildet sich zuerst eine Zone aus, in der hygriskopische Salze stark angereichert sind (Arnold und Zehnder, 1984). Es ist möglich, dass die in Bern meistens beobachtete Obergrenze für den Grundfeuchteaufstieg von 2.5 bis 5 m, durch die Verlangsamung des Lösungstransports durch hohe Salzkonzentrationen mitbeeinflusst wird. Allerdings können hygriskopische Salze auch gerade ein Höhersteigen der Grundfeuchte bewirken, indem sie Feuchtigkeit auch aus relativ trockener Luft aufnehmen und so trotz langsamerem Eindringen immer höher aufsteigen.

Beim oben betrachteten Saugvorgang wird ein unbeschränktes Flussangebot angenommen, eine Voraussetzung die zum Beispiel bei der Beregnung nicht erfüllt ist. Wird eine Fassade beregnet, dann saugt sie das Wasser solange auf, bis sie oberflächlich gesättigt ist. Nach Erreichen der Sättigung läuft Wasser aussen ab, und nur noch ein Teil des auftreffenden Regens wird eingesogen (Pauly, 1975a). Der Zeitpunkt ab dem das Wasser oberflächlich abzufließen beginnt, ist abhängig von der Saugfähigkeit der Gesteine und der pro Zeiteinheit auftreffenden Regenmenge. Hall und Kalimeris (1982) haben für die Berechnung dieses Zeitpunkts die folgende Gleichung angegeben:

$$t_s = 0.64 \frac{B^2}{V_0^2}$$

t_s = Zeitpunkt, ab dem die Oberflächenzone gesättigt ist und das Wasser aussen abzurinnen beginnt [Min]; B = Wassereindringgeschwindigkeit [mm/Min^{0.5}]; V_0 = Schlagregenmenge [mm/Nin].

Für frische Berner Sandsteine liegt der Zeitpunkt der oberflächlichen Sättigung, wenn $V_0 = 25 \text{ mm/h}$ gesetzt wird, zwischen 32 Minuten für Gurten- und 3.5 Stunden für Krauchthaler-Sandstein. Bei geringerer auftreffender Regenmenge dauert es noch länger, bis das Wasser an der Oberfläche abzulaufen beginnt. In unseren Regionen dürften Stürme mit windgetriebenen Regenmengen von 25 mm/h und mehr eher selten sein. Es kann deshalb angenommen werden, dass der weitaus grösste Teil des Regens, der auf Fassaden aus Berner Sandstein auftrifft vom Stein aufgesogen wird. Dazu ist noch

folgende einschränkende Bemerkung zu machen. Pauly (1975a) hat festgestellt, dass schon im Stein vorhandene Feuchtigkeit dazu führt, dass das Wasser bereits zu einem früheren Zeitpunkt oberflächlich abzulaufen beginnt, als wenn der Stein trocken gewesen ist. Nicht vernachlässigbare Feuchtigkeitsgehalte dürften zum Beispiel in Stützmauern, wie derjenigen der Münsterplattform vorhanden sein.

Einer der wichtigsten Verwitterungsprozesse in unserem Klima ist die Salzsprengung (Kaiser, 1907; Laurie und Milne, 1926; Schmöller, 1936; de Quervain, 1945; Winkler, 1973; Arnold, 1976; Charola und Lewin, 1979; Niesel, 1981; Zehnder, 1982 sowie Furian und Houst, 1983a,b, um nur einige zu nennen). In der Bibliographie von Evans (1970) werden die Kenntnisse zur Salzverwitterung bis Ende der Sechzigerjahre zusammengestellt. Die heutigen Kenntnisse über die bei der Salzverwitterung wirkenden Kräfte (Kristallisat-, Hydratations- und thermische Expansionskräfte) werden bei Zehnder (1982) kurz dargelegt.

Thermodynamische Berechnungen innerhalb des geschlossenen Systems $\text{Na}^+ \text{-Mg}^+ \text{-Ca}^+ \text{-H}^+ \text{-Cl}^- \text{-SO}_4^{2-} \text{-OH}^- \text{-CO}_3^{2-} \text{-CO}_2 \text{-H}_2\text{O}$ sind heute bereits möglich (Harvie et al., 1984). Salzsysteme in Mauern sind aber keine geschlossenen Systeme und enthalten, neben den in Salzlagerstätten vorkommenden Salzen, oft noch weitere Bestandteile, wie zum Beispiel Nitrate. Deshalb wird in der Verwitterungsforschung noch weitgehend empirisch gearbeitet.

Arnold und Küng (1985) stellen fest, dass alle löslichen Salze starke Zerfallserscheinungen verursachen können und nicht nur diejenigen, welche in verschiedenen Hydratstufen vorkommen. Diese Autoren haben auch beobachtet, dass normalerweise zuerst die hydratisierte Form eines Salzes ausblüht und erst nachher, durch Umkristallisation, die wasserärmere Salzform entsteht. Sie halten dazu fest, dass diese Reihenfolge gerade dem Gegenteil dessen entspricht, was in Salzsprengtests passiert. Binda et al. (1985) haben aber beobachtet, dass Salze, welche eine Hydratationsänderung erfahren, eine grössere Zerstörung verursachen als solche ohne Hydratationsänderung, sogar dann wenn es sich dabei um eine Dehydratation handelt.

Die meisten Salzumwandlungen laufen über eine partielle oder vollständige Lösung der Salze ab (Arnold und Zehnder, 1985).

Manche Salze scheinen auch bevorzugt auf bestimmten Mineralien zu wachsen. So berichtet zum Beispiel Frenzel (1980) vom bevorzugten Wachstum von Halit auf und in Biotiten von Tafonigraniten. Kristalle wachsen dort, wo sie unter möglichst kleinem Druck stehen (Taber, 1916). Das heisst, dass Salze nur dann in engen Hohlräumen wachsen, wenn die Lösung ohne Verbindung zu grösseren Hohlräumen steht. In einem einfachen Experiment haben Laurie und Milne (1926) dies bestätigt. In einer Glaskapillare mit einem vergrösserten Hohlräum in der Mitte, kristallisierten die Salze zuerst im grossen Hohlräum. Dann wurde die Salzlösung aus dem dünnernen Kapillaranteil nachgesogen und auch der zweite Teil der Salze kristallisierte am gleichen Ort.

Der gleiche Vorgang wird von Smetlage (1983) für die Eisbildung in Poren beschrieben, wo die Eiskristalle zuerst in den grossen Hohlräumen auf Kosten des Poreninhalts der kleineren Hohlräume wachsen. Deshalb ist die Porenradienverteilung für das Frostverhalten von Steinen entscheidender, als der Sättigungskoeffizient wie er von Hirschwald (1908) definiert wurde (Smetlage, 1983).

Wenn eine Stelle im Winter regelmässig benetzt und Frost-Tau-Zyklen unterworfen wird, kann ein wesentlicher Einfluss des Frostes auf den Verwitterungsfortgang vermutet werden. Solche Stellen dürften zum Beispiel Gurtgesimse, Balkone und andere vorstehende Sandstein- teile sein, auf denen im Winter Schnee liegen bleibt. Wenn dieser Schnee schmilzt und das Wasser vom Stein aufgesogen wird, ist bei tiefen Temperaturen die Entstehung von Frostschäden leicht vorstellbar. Da aber gerade stark frostanfällige Stellen, in der Regel auch andern Einflüssen gegenüber stark ausgesetzt sind, ist es selten möglich den genauen Anteil des Frostes zu erkennen; genauso schwierig ist es jedoch auch zu beweisen, der Frost spielt keine Rolle.

Nach Powers (1955) können feinkörnige Teile oft stärker wassergesättigt sein als grobkörnige; sie sind deshalb auch frostanfälliger. Taber (1929) beobachtete, dass Ton durch den Gefrierprozess noch zusätzlich Wasser ansog, und dass das Wasser in Tonen schneller gefroren. Solche Vorgänge könnten die Gründe dafür sein, dass oberflächliche Mergelschmitzen in Berner Sandsteinen meistens weggewittert sind. Weiter konnte beobachtet werden, dass Salze manchmal bevorzugt auf den Mergelschmitzen ausblühen (Bläuer, 1985).

Eine nicht zu unterschätzende Rolle bei der Verwitterung spielen auch die chemische und mineralogische Zusammensetzung des Gesteins.

Die karbonatgebundenen Berner Sandsteine sind sicher anfälliger auf die Einwirkung saurer Niederschläge als zum Beispiel Oberkirchner Quarzsandsteine (in Bern zum Teil verwendet für Fialen am Münster). Auch die Positionsgeschwindigkeit von Schwefel ist unter anderem abhängig von der Art des Gesteins (Furlan und Girardet, 1983).

Weiter enthalten die Sandsteine bereits im frischen Zustand eine gewisse Menge löslicher Salze (siehe Kapitel 4.3) und/oder es können leicht oxidierbare Mineralein, wie zum Beispiel Pyrit, vorhanden sein (Zehnder, 1982).

6.1.2 Antropogene Einflüsse auf die Verwitterung

Die Einflüsse des Menschen auf die Zerstörung von Bauten und Denkmälern sind äusserst vielschichtig. Sie können in zwei grundsätzlich verschiedene Gruppen unterteilt werden. Die erste Gruppe von Einflüssen umfasst alles was in den Bereich der Umweltverschmutzung gehört: wie zum Beispiel die Einwirkung von Rauchgasen und saurem Regen. In die zweite Gruppe dagegen gehört alles, was unter dem Überbegriff "falsche Behandlung eines Baus oder Bauteils" zusammengefasst werden kann: also beispielsweise das unsachgemäss Giessen der Blumen oder die Anwendung von mit dem ursprünglichen Material unverträglichen, Baustoffen. Ein offensichtlicher Unterschied zwischen den beiden Arten der menschlichen Einflussnahme besteht darin, dass sich die Wirkung der zur zweiten Gruppe gehörenden Einflüsse im Einzelfall beseitigen oder stark verringern lassen, während sich die Auswirkungen der Umweltverschmutzung durch regionale oder sogar globale Massnahmen reduzieren lassen. Es ist allerdings immer schwierig, jedoch nicht unmöglich, den antropogenen Anteil an einem bestimmten Schadensbild anzugeben.

6.1.2.1 Einflüsse der Umweltverschmutzung

Dass ein Zusammenhang zwischen der Zerstörung von Steinbauten und der Luftverschmutzung besteht, ist bereits seit langem bekannt. Kieslinger (1932) zitiert dazu eine Quelle aus England, nach der bereits 1683 Rauchgase als Grund für Schäden an der Westminster Abbey angegeben wurden. Dank einem zunehmenden Umweltbewusstsein ist dieser Zusammenhang auch weiteren Bevölkerungskreisen bekannt (Zeitungsartikel, 1985). Der Einfluss der Luftverschmutzung auf die Verwitterung von Steinbauten im Einzelnen ist aber auch heute noch weitgehend unerforscht (Lehmann, 1985). Nachstehend werden einige aus der Literatur bekannte Zusammenhänge kurze dargelegt.

Die Gesamtbelastung der Luft hat vor allem in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts immer rascher zugenommen, die SO₂-Belastung dagegen hat in den letzten Jahren stagniert (Eidg. Dept. d. Innern, 1984). Die Schwefeldepositionsraten (trockene Deposition) auf Sandsteinen von Villarjod (siehe Kapitel 4.6.2) werden von Furlan und Girardet (1983, Seite 287) mit 1.6 g/m²a in Genf und mit 0.6 bis 1.0 g/m²a in Lausanne angegeben. Diese Werte, welche an Wänden gemessen wurden, entsprechen ungefähr einem Zehntel des in schweizerischen Stadtzentren durchschnittlich deponierten Schwefels (Eidg. Dept. d. Innern, 1984).

Erst wenig erforscht ist der Einfluss des Stickstoffs auf die Verwitterung. Nach Livingstone (1985) ist die Nitratdepositionsrate auf Kalken und Marmoren bedeutend geringer als die Sulfatdepositionsraten. Bereits Kaiser (1930) hatte beobachtet, dass SO₂ sehr viel schneller von Steinen (Kalken, Dolomiten und karbonatgebundenen Sandsteinen) aufgenommen wurde als CO₂. Er stellte weiter fest, dass die SO₂-Aufnahme am Licht schneller vor sich ging als im Dunkeln. Nasse Deposition umfasst alle Ablagerungen aus Regen und Schnee; trockene Deposition dagegen umfasst alle anderen Ablagerungen, also zum Beispiel auch diejenigen aus dem Nebel. Bauteile sind somit fast dauernd der trockenen Deposition ausgesetzt.

Gipskrusten entstehen zum grössten Teil aus der trockenen Schewfeldeposition (Jeannette, 1979; Camuffo et al., 1983; Furlan und Girardet, 1983). Die Sulfatanreicherungen hinter Schalen werden dagegen hauptsächlich auf die Wirkung des sauren Regens zurückge-

führt (Zehnder, 1982). Die pH-Werte für Regen liegen selbst auf dem Jungfraujoch mit pH = 5.4 im sauren Bereich (Eidg. Dept. d. Innern, 1984, Seite 77). In der Stadt Zürich liegen sie aber noch bedeutend tiefer, bei pH = 4.13, und Zehnder (1982) hat zum Teil sogar Werte kleiner als 4 gemessen. Ländliche Regen unterscheiden sich von städtischen aber weniger im pH-Wert als in der Menge von Inhaltstoffen. So sind städtische Regen viel stärker ionenbeladen als ländliche (Eidg. Dept. d. Innern, 1984). Vor allem der erste Teil eines Regens ist stark ionenbeladen, was sich besonders negativ auswirkt, da dieser Teil meist auf noch trockenen und dadurch sehr saugfähigen Stein fällt (Fritz und Jeannette, 1981).

6.1.2.2 Unsachgemäße Behandlung von Bauten

Bereits aus der Zusammenstellung der Schadensbilder in Bern, im Kapitel 2 dieser Arbeit, ist ersichtlich wie vielfältig solche Falschbehandlungen sein können. Sie reichen in der Stadt Bern vom unsachgemäßen Blumengießen (Figur E1.2), über das Deponieren von feuchten Erdhaufen (Figur F3.1) bis zur Verwendung von zementhaltigen Mörteln auf Sandsteinen (Figur H3.4 und Münsterplattform-Südmauer). Weiter gehören dazu Schäden durch Streusalze (Figur F2.2), durch besonders stark verschmutzte Luft (Figur H4.1), durch fehlende Unterhaltsarbeiten (Figur E2.2) aber auch durch falsches Versetzen der Steine (Figur H7.1). Ein Blick in die Literatur zeigt, dass solche Falschbehandlungen sehr häufig vorkommen. So konnten Arnold et al. (1986) zeigen, dass in der Kirche Müstair seit einer Renovation, bei der vor allem eine Trockenlegung der Wände erfolgte und eine Zentralheizung eingebaut worden war, die Zerstörung von mittelalterlichen Wandmalereien drastisch beschleunigt wurde. Am Erlacherhof in Bern führte die Anwendung von Ameisensäure als Reinigungsmittel zu Schäden durch Formialsalze (Arnold und Zehnder, 1983).

Zerstörungen durch die Verwendung von alkalischen Baumaterialien sind sehr zahlreich. Arnold (1985a) zeigt, dass, durch die Reaktion von alkalischen Salzen mit dem autochthonen Salzsystem alter Mauern, neue Salze entstehen, welche schwerer löslich sind und daher häufiger auskristallisieren als die ursprünglich vorhandenen Salze.

Daneben gibt es viele Beispiele für Schäden, welche durch die Anwendung alkalischer Baumaterialien in der Schweiz entstanden. Dass das Problem nicht auf die Schweiz beschränkt ist, zeigen zum Beispiel die Publikationen von Cane et al. (1985) und Roscher et al. (1985).

Einen weiteren Aspekt der möglichen Falschbehandlung zeigt das Beispiel der Cleopatras Needle (Winkler, 1965). Dieser granitische Obelisk aus Ägypten, steht heute in New York und ist an der wetterabgewandten Seite viel stärker verwittert als an der Wetterseite. Noch in Ägypten war er über längere Zeit einseitig im Boden gelagert, und dort drangen Salzlösungen in ihn ein. Erst im wechselhaften Klima von New York konnten diese Salze dann periodisch um- und auskristallisieren und Schaden anrichten. Aus ähnlichen Gründen werden die Figuren welche hinter der Münsterplattform-Stützmauer gefunden wurden, unter kontrollierten Umgebungsbedingungen gelagert. Baufachleute könnten die obige Aufzählung der möglichen falschen Behandlungen von Bauten und Bauteilen sicher noch um viele Beispiele verlängern.

6.2 Die Verwitterungsformen und ihre Ursachen

Absanden ist die weitaus häufigste Verwitterungsform an Berner Sandsteinen. Meist beginnen sie schon nach kurzer Expositionszeit leicht abzusanden. Stark absandende Stellen sind immer dort zu finden, wo leichtlösliche Salze periodisch ausblühen. Beispiele dazu finden sich unter anderem in den Figuren: A2.1, E2.1, F2.2, G1.3, G2.1, H3.1, H3.4 und S1.2. Der Zusammenhang zwischen oberflächlicher Anreicherung von leichtlöslichen Salzen und Absanden ist aus der Literatur auch von andern Gesteinen bekannt (Schmölzer, 1936; die Quervain, 1945; Charola und Lewin, 1979 und Zehnder, 1982).

An Stellen die dem direkten Regen ausgesetzt sind, geht starkes Absanden oft in Abbröckeln über und wird wahrscheinlich durch Frost mitverursacht (beispielweise in Figur A4.1).

Zellenverwitterung (Alveolarverwitterung) besteht in einem sehr lokalen, starken Absanden der Steine, so dass mit der Zeit tiefe

Löcher entstehen. Pauly (1975b) sagte, dass in Alveolen häufig Turbulenzen auftreten, welche die Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse verändern. Dadurch werde ein häufiger, schneller Feuchtigkeitsaustausch zwischen den meist hygroskopischen Salzen und der Umgebungsluft bewirkt. Aehnliche mikroklimatische Verhältnisse dürfen auch da auftreten, wo an Berner Sandsteinen Alveolarverwitterung auftritt (Beispiele in den Figuren: A2.1c, A3.2, G2.1c und 7a). Nach Schmöller (1936) geht Alveolarverwitterung an Leithakalken von geringfügigen Vertiefungen im Gestein aus, welche bei der Bearbeitung oder durch einen anderen Prozess entstanden sind. Die gleiche Beobachtung machte Jeannette (1980) an Buntsandstein. Die Berner Sandsteine bilden da keine Ausnahme. So scheinen die Alveolen in Figur G2.1, Vertiefungen zu vergrössern, welche ursprünglich durch das Bossieren entstanden sind; auch an der Minerva (Figur A2.1c) werden bereits vorhandene Vertiefungen erweitert. An andern Stellen entstehen aber Alveolen, ohne dass dort eine Vertiefung bestanden hätte (beispielweise in Figur A3.2).

Weitaus am häufigsten werden Schalen durch Sulfatanreicherungen in der dahinter liegenden Lockerzone begleitet. Dies wurde sowohl an Berner Sandsteinen, als auch an Granitischen- und Plattsandsteinen (Zehnder, 1982; de Quervain, 1945), an Buntsandsteinen (Millot und Jeannette, 1975) und an Schleitdorfer Sandsteinen (Kaiser, 1907) festgestellt. In Schalen an Berner Sandsteinen sind in der Regel bereits wenige cm hinter der Lockerzone keine gegenüber frischen Steinen erhöhte Sulfatgehalte mehr feststellbar, auch dann nicht, wenn andere Ionen bis tief in die Steine hinein aufkonzentriert sind (siehe zum Beispiel Figur 4lb). Eine Auslaugung des Sulfats hinter Schalen konnte in dieser Arbeit ebensowenig festgestellt werden wie in der Arbeit von (Zehnder, 1982), der übrigens feststellte, dass die Schalendicke von der Benetzungs- und Austrocknungsintensität abhängig ist. Zudem ist die Schalendicke von der Gesteinsbeschaffenheit abhängig. Feinkörnige und feingeschichtete Berner Sandsteine weisen, bei vergleichbarer Exposition, dünnerne Schalen auf als grobkörnige, homogene Steine (Beispiele Figuren A4.2 und A6.1). An der nicht sehr stark bereegneten Südseite (siehe auch Figur 1) der Münsterplattform-Stützmauer sind die Schalen 1 bis 1.5 cm dick, an der stärker bereegneten Westseite sind sie 2 bis 3 cm dick.

Kieslinger (1932) behauptete, dass Schalen ("Innenkrusten") einzig dadurch entstünden, dass Stoffe aus dem Gesteinsinnern in die Oberflächenschicht transportiert und dort eine Verdichtung bewirken würden. Auf ähnliche Weise sind wahrscheinlich die in Figur 7b abgebildeten, dünnen Schalen entstanden, deren Porenräume vollständig mit Feinstkristallinem Kalzit gefüllt sind. Diese Art der Schalenbildung dürfte an Berner Sandsteinen aber eher selten sein.

Der Einfluss weiterer Faktoren, wie der Ausdehnung bei Wasseraufnahme, des Frostes und der thermischen Ausdehnung ist nicht im Detail bekannt. Sie spielen aber sicher auch eine wesentliche Rolle bei der Schalenbildung.

Abblätterungen sind an Berner Sandsteinen eher selten und treten immer zusammen mit intensiven Salzausbühlungen auf (Beispiele in den Figuren E2.1 und F2.2).

Abbröckelnde Steine finden sich fast ausschliesslich an von Organismen bewachsenen Stellen, an Ecken und Kanten vorspringender, beregneteter Bauteile (Beispiel in Figur A4.1). Dabei ist es wahrscheinlich, dass die Organismen das Bröckeln nicht verursachen, sondern vielmehr die durch Frost, Wärmedehnung oder Wasserausdehnung entstandenen, rissigen Stellen besiedeln und vielleicht sogar zusammenhalten. Sulfat oder andere Salzanreicherungen wurden an Berner Sandsteinen im Zusammenhang mit abbröckelnden Stellen nicht beobachtet, was aber darauf zurückzuführen sein kann, dass diese Verwitterungsform selten beobachtet wurde. Es wäre möglich, dass das Bröckeln durch Salze mitverursacht wird, welche aber immer wieder weggespült werden.

Schichtparalleles Aufblättern wird an Berner Sandsteinen immer dann beobachtet, wenn Werkstücke senkrecht zum Lager versetzt worden sind (Beispiele in Figur H7.1). Selbst sehr homogene, scheinbar schichtungsfreie Sandsteine werden, wenn sie falsch versetzt sind, mit der Zeit aufblättern, es sei denn sie würden im Gebäudeinnern und vollständig geschützt aufgestellt.

Aufblättern ist ausserdem an Fensterbänken zu finden, und zwar vor allem dann, wenn diese durch regelmässiges Blumengießen häufig stark durchhässt werden und die Blumenkisten

verzögert wird (Beispiel Figur E1.1). Es kann angenommen werden, dass das Aufblättern mit der Ausdehnung durch Wasseraufnahme zusammenhängt, welche laut Félix (1983) nicht vollständig reversibel ist und umso grösser wird, je länger die Durchfeuchtung dauert (Tabelle 14). Daneben dürfte auch der Frost eine nicht zu unterschätzende Rolle spielen.

Gipskrusten finden sich nur an regengeschützten Orten. Sie entstehen zum grössten Teil durch Ablagerung von Aerosolen (Jeannette, 1979; Camuffo et al., 1983; Furlan und Girardet, 1983). Auf Berner Sandsteinen lösen sich diese Krusten mit der Zeit vom Untergrund und reissen die oberste Steinschicht mit sich. Zehnder (1982) vermutet, dass der Hauptgrund für das Ablösen, eine Gipsanreicherung unter der Kruste ist, die zur Ausbildung einer dünnen Lockerzone führt. Snethlage (1983) erklärt die Fatsache, dass sich Krusten bevorzugt an Ecken und Kanten vom Untergrund lösen, damit dass die beiden Schichten (Gipskruste respektive Sandstein) verschiedene hygrische und thermische Dehnungen erfahren, wodurch Spannungen entstehen, welche sich vor allem an Ecken und Kanten bemerkbar machen und zum Aufreissen der Kruste führen.

Auflockern ist eine für Berner Sandsteine typische Verwitterungsform, welche vor allem im Übergangsbereich von beregnet zu regengeschützt auftritt (Beispiel in Figur C1.1). Manchmal enthalten die dabei entstehenden dünnen, oberflächenparallelen Sandsteinflocken etwas Gips, aber manchmal auch nicht. Daraus kann geschlossen werden, dass es sich um eine Verwitterungsform zwischen Gipskrustenbildung und Absänden handelt. Die Stellen, wo das Auflocken auftritt, zeichnen sich typischerweise dadurch aus, dass sie zu oft feucht werden, als dass sich eine durchgehende Gipskruste bilden könnte, aber zu selten benetzt werden, als dass einmal deponiertes Sulfat vollständig weg- oder in den Stein hineingewaschen würde. Auf Kalken tritt in vergleichbarer Exposition eine verdickte Gipskruste auf.

Aufblättern ist die zweite für Berner Sandsteine sehr typische Verwitterungsform (Beispiele in den Figuren A4.1 und A6.1). Es könnte vom Erscheinungsbild her auch als Schalenbildung mit einer besonders mächtigen Lockerzone, welche sich in der Regel auf die

Quadermitte beschränkt, betrachtet werden. Solche Blähungen entstehen ausschliesslich an, von aussen periodisch stark benetzten, homogenen Steinen. Besonders typisch ausgebildet findet sich diese Verwitterungsform an Steinen, welche direkt oben an Gurtgesimse anschliesen. Die Benetzungs- und Austrocknungsverhältnisse solcher Stellen werden bei den Figuren A4.3c und d erklärt. Daraus geht hervor, dass solche Stellen sehr variablen Klimaverhältnissen ausgesetzt sind, was zu einer Salzanreicherung in einem breiten Tiefenbereich führen kann (Zehnder, 1982). Es war leider nicht möglich, im Rahmen dieser Arbeit ein Salzprofil durch eine solche Stelle aufzunehmen. Ein weiterer Faktor der wohl eine wesentliche Rolle spielt, ist der Frost. Auf einem Gurt bleibt im Winter Schnee liegen, dessen Schmelzwasser dann vom Gurt und Anschlussstein aufgesogen wird und darin gefrieren kann.

7 VERMEIDUNG VON SCHÄDEN

Die wichtigsten Verwitterungsfaktoren sind: "natürliche Verwitterung" durch, auf die Steine einwirkende Klimaschwankungen, Verwitterung durch die Umweltverschmutzung (wie nasse und trockene Deposition von Schadstoffen) sowie zerstörungen, welche durch unsachgemäss- se Behandlung entstehen. Unabhängig von der Ursache können gleiche Schadensbilder entstehen (Beispiele in den Figuren F4.1 und G1.1). Wo immer möglich sollte versucht werden, vor dem Eingriff die Ursachen der Zerstörung zu erkennen, wenn nicht bloss die Symtome bekämpft werden sollen. Es ist "wichtiger, Schadenssituationen im Zusammenhang zu erkennen, als den Einzelshaden mit allen Mitteln der Kunst und Wissenschaft zu analysieren" (Arnold, 1985b, Seite 13).

Baugutachten müssen nachvollziehbar sein. Das heisst, sie sollen zeigen, welche Überlegungen zu welchen Probennahmen, Analysemethoden und Sanierungsvorschlägen geführt haben. Ein Beispiel für einen gut nachvollziehbaren Untersuchungsbericht liefert Zehnder et al. (1986).

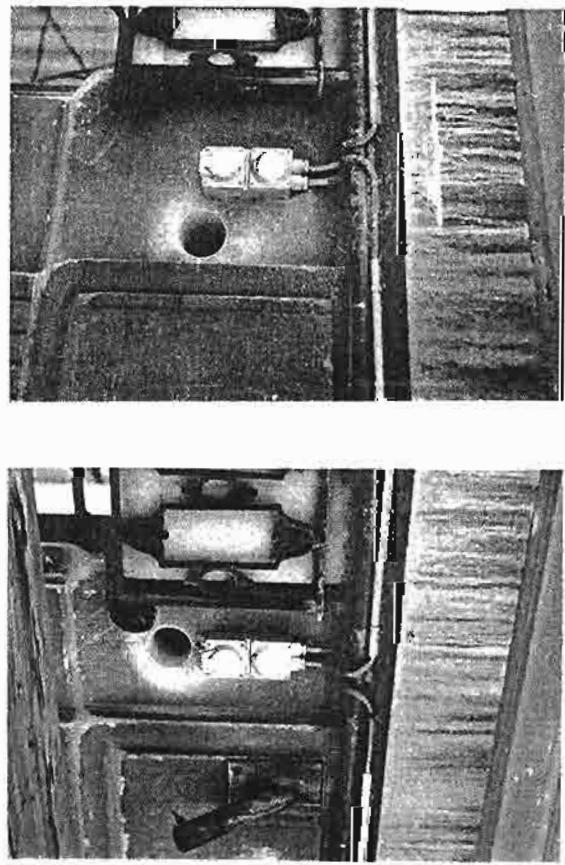
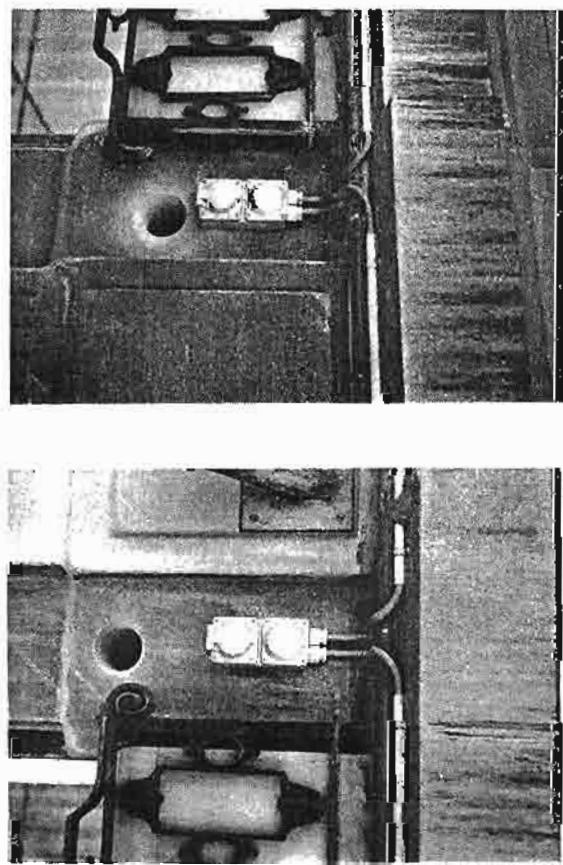
Es ist wichtig, dass nicht eine einzige Sanierungsmöglichkeit als Allerweltsmethode in Betracht gezogen wird. Zum Beispiel sollte weder ausschliesslich die Methode des Reinigen-Festigen-Hydrophobierens, noch alleiniges Zurückarbeiten auf den "gesunden" Stein und

Steinersatz gelassen werden. Oder ein anderes Beispiel dazu aus der Literatur: Stein (1981) empfiehlt für unzählige Kirchen in Deutschland, welche in verschiedenen Natursteinen erbaut sind, sie zu verputzen, um sie vor schädlichen Umwelteinflüssen zu schützen. Ein solches Vorgehen ist schon deshalb kurzsichtig, weil die schädlichen Einflüsse nicht nur von aussen kommen können.

Falsche Sanierungsmethoden habe oft die schlimmeren Langzeiteffekte, als die ursprünglichen Schadensursachen gehabt hätten (Arnold und Zehnder, 1983; Caner et al., 1985; Roscher et al., 1985; Arnold et al., 1986; Livingston, 1986). Auch die "Vereinigung der Schweizer Denkmalpfleger" ist sich bewusst, dass unter anderem, unsachgemässen Renovationen einen wichtigen Grund für die Zerstörung unseres Kulturguts aus Stein darstellen. Die Resolution, in der sie dies zum Ausdruck bringen, ist im Anhang in ihrem vollen Wortlaut wiedergegeben.

Zum Abschluss sollen hier noch einige Bemerkungen zur Aussagekraft verschiedener Testmethoden gemacht werden. Das Wichtigste an jeder Untersuchung ist die sinnvolle Probennahme. Das setzt aber voraus, dass die Art, der Ort und wenn möglich auch die Ursache der auftretenden Verwitterungserscheinungen in zweckmässiger Form erfasst worden sind. Dabei sollte eine möglichst vielseitige Vorgehensweise gewählt werden. Es ist wichtig von der Umgebung bis zum Einzelschaden alle möglichen Faktoren, die eine Rolle spielen können, zu berücksichtigen. Bei der Beurteilung einer Fassade ist es meistens unmöglich zu wissen, was hinter der Fassade für Räume stecken, wie sie genutzt werden, oder wie sie früher einmal genutzt wurden (zum Beispiel als Feuchträume oder Salzlager). Ganz wichtig, vor allem wenn Salze oder stark absandende Stellen auftreten, ist es, die Situation bei den verschiedensten Witterungsverhältnissen periodisch zu beobachten. So traten zum Beispiel an der Westmauer des Schlosshaldenfriedhofs (Figur H3.4) am 22. Januar 1986 keine Salzausblühungen auf, am 8. April 1986 dagegen waren die absandenden Stellen stark mit Ausblühungen bedeckt. Nach Möglichkeit sollten die Beobachtungen in Plänen, Fotos oder Skizzen festgehalten werden, damit ein etwaiger Schadensfortschritt erkannt werden kann. Solche Dokumente können auch für die Erfolgskontrolle von Sanierungen dienen.

Was hier für Geologinnen und Geologen wie eine Binsenwahrheit tönen mag, erweist sich bei Untersuchungen an Natursteinbauten als nicht selbstverständlich. Dies sei am Beispiel der Nordfassade des ABM-Warenhauses in der Spitalgasse belegt. Der Zustand dieser Fassade vor der Renovation lässt sich in Kürze wie folgt beschreiben: alle Fensterbänke auf welchen Geranien gestanden hatten, blätterten auf, darunterliegende Fassadenteile waren entlang Wasserläufen abgewaschen und sandeten mehr oder weniger stark ab. Die Gurtgesimse waren stellenweise durch Vogelkot verschmutzt. Die restliche Fassade war gleichmässig von einer, ein paar Zehntelmsimeter dicken Gipskruste überzogen, die sich vor allem an Ecken und Kanten von Relieftischen, vom Stein löste. Die mit dem Sanierungsgutachten betraute Firma erbohrte 12 Kerne an verschiedenen Stellen der Fassade. Vier dieser Bohrlöcher sind in der Figur 59 abgebildet, sie befinden sich alle an derselben Fassade, im ersten Stock neben den Fenstern. Jeder weitere Kommentar erübrigt sich hier wohl.



Nach der makroskopischen Untersuchung eines Bauwerks kann es notwendig sein, für weitere Untersuchungen Bohrkernproben zu entnehmen. Je nach Fragestellung müssen diese Bohrkerne trocken gezogen werden, und es empfiehlt sich bei der Kernetnahmen anwesend zu sein. Die entnommenen Kerne sollten immer zuerst makroskopisch untersucht und beschrieben werden.

Verschiedene Untersuchungsmethoden und ihre Aussagekraft sind in Müller (1964), de Quervain (1967) und spezifisch für Verwitterungsuntersuchungen in RILEM 25-PEN (1980) zusammengestellt. Nachstehend werden einige Methoden, die in dieser Arbeit benutzt worden sind, in bezug auf ihre Aussagekraft erläutert:

- Dünnschliffuntersuchungen können Aufschluss über die mineralogische Zusammensetzung und die Kornbindung (Zementierung) geben. Wenn die Proben zuerst mit farbigem Harz imprägniert worden sind, sind auch Aussagen über Porengröße, -verteilung und -erweiterung möglich. Manchmal kann anhand dieser Untersuchung auch bereits festgestellt werden, welcher der heute erhältlichen Steine dem untersuchten Stein gleicht.
- Wasseraufnahme- und -eindringgeschwindigkeiten geben Aufschluss über die relativen Porenweiten. An Bohrkernen kann mit Hilfe der Wasserabsaugeschwindigkeit die Auflockerungstiefe festgestellt werden (vergleiche Figuren 38 bis 45).
- Mit Hilfe der qualitativen, chemischen und der mikroskopischen Analyse der Ausblühungssalze (nach Arnold, 1984) kann in der Regel der Ursprung der Salze lokalisiert werden. Stellen, wo Salzausblühungen auftreten, sollten möglichst regelmässig beobachtet werden, da die Salze in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen ausblühen oder in Lösung gehen (Arnold, 1981).
- Weitere Untersuchungen wie Quecksilberdruckporosimetrie und quantitative chemische Analysen, sind sehr aufwendig, es ist von Fall zu Fall abzuklären, ob sie notwendig sind. In manchen Fällen, wie zum Beispiel für die Lagerung und Restaurierung der hinter der Münsterplattform-Stützmauer gefundenen Figuren, ist es fraglos nötig, ihren Salzhalt zu kennen. In andern Fällen, wie zum Beispiel bei gipskrustenüberzogenen, regengeschützten

Figur 59: Vier verschiedene Bohrlöcher an der Nordfassade des ABM-Warenhauses in der Spitalgasse. Sie wurden durch eine Baugutachterfirma in viermal der gleichen Exposition erbohrt (siehe dazu auch im Text).

Fassaden, sind Bohrkernentnahmen und spezielle Untersuchungen nur im Ausnahmefall notwendig.

Für alle Untersuchungen, die angestellt werden, gilt, dass ihre Resultate verständlich diskutiert und interpretiert werden sollen, so dass sie als Grundlage für die Ausarbeitung eines Sanierungskonzepts dienen können.

8 ZUSAMMENFASSUNG

In Bern und Umgebung stellen die Berner Sandsteine den am weitesten verbreiteten, traditionellen Baustoff dar. Das Erkennen der Schadensursachen ist eine notwendige Voraussetzung für das Ergreifen erfolgreicher Sanierungsmaßnahmen. Deshalb gibt der erste Teil dieser Arbeit Beispiele für verschiedene Verwitterungssituationen an Bauten und in Naturaufschlüssen wieder. Dieser Teil soll helfen, vergleichbare Situationen und Schadensursachen an Gebäuden zu erkennen.

Als häufigste Verwitterungsform kann Absanden beobachtet werden. Seltener, aber sehr typisch für Berner Sandsteine, sind Aufblähen und Aufflocken anzutreffen. Aufflocken besteht in einem Abschuppen von dünnen Sandsteinplättchen und tritt am Übergang zwischen beregneten und regengeschützten Bereichen auf. An Stellen, welche regelmäßig stark benetzt werden, können diese Sandsteine aufblähen.

Die Berner Sandsteine sind Ablagerungen aus der Oberen Meeresmolasse. Sie sind kalzitisch gebunden und relativ weich. Ihre totale Porosität beträgt 17% bis 21%, und ihre scheinbare Porosität liegt zwischen 15% und 18.5%. Quecksilberdruckporositätsmessungen zeigen einen ausgeprägt unimodalen Kurvenverlauf, bei dem fast die Hälfte aller Poren eingangsradien zwischen 5.2 und 8.3 μm zu liegen kommen. Diese Porenklasse entspricht den in Dünnschliffen beobachteten Fugengporengrößen, welche Zwickelporen von bis zu 200 μm Durchmesser verbinden.

Die Berner Sandsteine dehnen sich bei der Wasseraufnahme mit 1.3 bis 3.0 mm/m relativ stark aus. Proben mit makroskopisch sichtbaren Mergelschmitzen dehnen sich sogar bis zu 6 mm/m aus. Der Anteil an wasserlöslichen Salzen ohne Kalzium- und Magnesium-

Karbonate beträgt zwischen 76 und 274 ppm in feingemahlenen Proben. Die höchsten Salzgehalte weisen die Proben mit den höchsten Tonmineralanteilen auf.

Die Bohrkernprofile aus der Süddecke der Münsterplattform-Stützmauer und aus dem Grossen Matteschulhaus zeigen, dass Sulfatanreicherungen immer sehr oberflächennah auftreten, während andere Salze, je nach Herkunft, bis zu hinterst in den gezogenen Bohrkerren (maximale Tiefe 37 cm) angereichert sein können. Es wurden Salzanreicherungen von bis zu 1.5% gemessen.

In den verwitterten Proben ist hauptsächlich eine Zunahme der Poren mit Eingangsradien ab 5.2 μm feststellbar. Diese Zunahme der groben Poren beschränkt sich auf eine schmale Lockerzone hinter Schalen oder auf den äussersten Dezimeter bei aufgelockerten Proben. In der am stärksten aufgelockerten Probe erhöhte sich die Porosität auf über 30%.

Die wichtigsten Ursachen für die Verwitterung der Berner Sandsteine sind:

- 1) "natürliche" Verwitterung durch Regen, Schnee, Frost, Temperaturschwankungen etc.
- 2) Einflüsse der Umweltverschmutzung durch trockene Deposition von Schwefel und durch Einwirkung von saurem Regen
- 3) unsachgemäss Behandlung von Bauten, wie zum Beispiel die Anwendung von Zement auf Berner Sandsteinen oder die Vernachlässigung von Gebäuden.

RESUME

Les grès bernois sont des grès à ciment calcaire de la Molasse marine supérieure. Leur porosité totale prend des valeurs entre 17% et 21% et leur absorption d'eau sous pression atmosphérique des valeurs entre 15% et 18.5%. La porosimétrie au mercure montre que presque la moitié de toutes les pores ont des rayons de seuil entre 5.2 et 8.3 μm .

Les échantillons analysés contiennent entre 76 et 274 ppm de sels, sans y compter les carbonats de calcium et de magnésium. Leur dilatation linéaire par absorption d'eau, mesuré par immersion

progressive, révèle des valeurs entre 1.3 et 3.0 mm/m. Les échantillons qui contiennent beaucoup de marne, ont une dilatation de 6 mm/m.

L'analyse des causes de dégâts doit être le premier pas afin que la conservation se fasse avec succès. Pour cette raison la détérioration des grès bernois en relation avec leur exposition est documentée et discutée dans le premier chapitre.

La façon principal d'altération des grès bernois est la désagréagation sableuse, qui est d'habitude accompagnée d'efflorescence de sel. La formation des flocons minces qui se détachent facilement de la pierre n'est pas aussi fréquente que la désagrégation sableuse, mais néanmoins elle est très typique pour les grès bernois à des endroits de transition entre l'abri et la pluie. Un gonflement peut être observé aux endroits où les grès sont souvent fortement mouillés.

Le contenu en sel peut monter jusqu'à 1.5% dans les pierres altérées; le diamètre, surtout des grands pores, est élargi, et en conséquence la porosité s'augmente jusqu'à plus de 30%.

Il y a trois raisons principales pour la dégradation:

- 1) les altérations "naturelles" causées par des fluctuations de température, des effets de pluie, neige ou gel.
- 2) la pollution atmosphérique qui influence la déposition en soufre et l'acidité de la pluie.
- 3) les dégâts causés par des traitements inadaptés, comme par exemple l'utilisation de ciment en contact avec les grès. En outre la négligence des bâtiments, comme par exemple un tuyau de descente défectueux, peut aussi causer des dégâts importants.

soft sandstones contain 76 to 274 ppm water soluble constituents, excluding the soluble portion of calcium and magnesium carbonates. High concentrations of soluble constituents are associated with high clay mineral contents.

When soaked, marl free sandstones expand from 1.3 to 3.0 mm/m. Samples containing marl clasts expand even as much as 6 mm/m.

In order to find an appropriate conservation method, the causes of the deterioration of the rock have to be known in detail. In the first part of this study, the weathering appearance of the Bernese sandstones in relation to their exposure, is thus documented in several characteristic examples.

Granular disaggregation is the major weathering phenomenon, usually connected with more or less intense salt efflorescence. Very specific for these sandstones, however not very frequently observed are the so-called flaking and the swelling. Flaking occurs mainly at the contact between areas exposed to rain and shaded from rain. Swelling is typically found on stones that are frequently wetted strongly, such as ashlar above cornices.

During weathering the soluble constituents in these rocks may increase up to 1.5wt%, and the open porosity reaches up to one third of the total volume. The rise in porosity is mainly caused by an increase in the amount of large pores.

The main reasons for the deterioration are:

- 1) "natural" weathering through frost action, rain, snow, temperature changes etc.
- 2) Environmental pollution such as attack by acid rain and sulfur deposition etc.

- 3) inappropriate treatment of the rocks or neglect, e. g. applying cement mortars on these stones, leaking gutters.

Bernese sandstones are calcareous sandstones from the Upper Marine Molasse. Their total porosity ranges from 17% to 21%, and their apparent porosity from 15% to 18.5%. Close to 50% of all open pores have entering radii between 5.2 and 8.3 microns. These rather

ABSTRACT

LITERATURVERZEICHNIS

- Amoroso, G. G. und Passina, V. (1983): Stone decay and conservation - atmospheric pollution, cleaning, consolidation and protection. Elsevier, Amsterdam - Lausanne - Oxford - New York.
- Angeles Vincente, M. (1983): Clay mineralogy as the key factor in weathering of "Arenisca Dorada" (golden sandstone) of Salamanca, Spain. Clay Miner., 18, p. 215-217.
- Arnold, A. (1976): Behaviour of some soluble salts in stone deterioration. 2nd Internat. Symposium on the Deterioration of Building Stones, Athens 27.Sept.-1.Oct., p. 27-36.
- Arnold, A. (1981): Salzmineralien in Mauerwerken. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt., 61, p. 147-166
- Arnold, A. (1984): Determination of mineral salts from Monuments. Studies in Conservation, 29, p. 129-138.
- Arnold, A. (1985a): Moderne alkalische Baustoffe und die Probleme bei der Konservierung. Arbeitsheft 31, Bayrisches Landesamt für Denkmalpflege, p. 152-162.
- Arnold, A. (1985b): Die Verwitterung von Bau- und Kunstdenkmalern aus mineralischen Materialien. in historische Technologie und Konservierung von Wandmalerei. Verlag Paul Haupt, Bern, p. 1-13.
- Arnold, A. und Küng, A. (1984): Münsterplattform Bern, Sandsteinuntersuchung. unpubl. Bericht des Technologischen Labors d. Inst. f. Denkmalpflege, ETH-Zürich.
- Arnold, A. und Küng, A. (1985): Crystallization and habits of salt efflorescences on walls I. Methods of investigation and habits. 5th Int. Congr. Deterior. Conserv. of Stone, Lausanne, 25.-27. Sept., p. 255-267.
- Arnold, A. und Zehnder, K. (1983): Verwitterungsschäden durch Ameisensäure. Sonderdruck aus Schweiz. Ing. und Architekt., Vol. 36.
- Arnold, A. und Zehnder, K. (1984): Evaporite und Verwitterung an Bauwerken. Eclogae geol. Helv., vol. 77/2, p. 287-300.
- Arnold, A. und Zehnder K. (1985): Crystallization and habits of salt efflorescences on walls II. Conditions of crystallization. 5th Int. Congr. Deterior. Conserv. of Stone, Lausanne, 25.-27. Sept., p. 269-277.
- Arnold, A., Küng, A. und Zehnder, K. (1986): Deterioration and preservation of carolingian and mediaeval mural paintings in the Müstair convent (Switzerland). Part I: Decay mechanisms and preservation. Case studies in the conservation of stone and wall paintings. Preprints of the Bologna Congress, p. 190-194.
- Bärner Sandstei (1986): Broschüre herausgegeben von den Steinhauermeistern Bern und Umgebung, und von der Gewerkschaft Bau und Holz, Gruppe Steinhauser Bern.
- Baudirektion der Stadt Bern (1984): Dokumentation der Hochbauten der Stadt Bern, Bauten von 1971-1984. unpubl.
- Bausteinband (1915): Die natürlichen Bausteine und Dachziefer der Schweiz. Beitr. geol. Schweiz, geotech. Ser. 5. (Autoren: Niggli, P., Grubenmann, U., Jannet, A., Moser, R., u.a.)
- Bläuer, C. (1985): Weathering of Bernese sandstone. 5th Int. Congr. Deterior. Conserv. of Stone, Lausanne, 25.-27. Sept., p. 381-390.
- Bousquier, P. (1979): Texture et porosité de roches calcaires. Thèse doct. Ecole natl. sup. Mines Paris.
- Büchi, P., Wiener, G. und Hofmann, F. (1965): Neue Erkennisse im Molassebecken auf Grund von Erdöltiefbohrungen in der Zentral- und Ostschweiz. Eclogae geol. Helv., 58/1, p.87-108.

- Cammerer, W. F. (1963): Die kapillare Flüssigkeitsbewegung in porösen Körpern. VDI-Forschungsheft 500, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Camuffo, D., Monte, M. del und Sabbioni, C. (1983): Origin and growth mechanisms of the sulfated crusts on urban limestone. Water, Air and Soil Pollution, 19, p. 351-359.
- Caner, E. N., Demirci, S. und Türkmenoglu, A. G. (1985): Deterioration of dolomite by soluble salts in Divrigi great mosque, Turkey. 5th Int. Congr. Deterior. Conserv. of Stone, Lausanne, 25.-27. Sept., p. 299-305.
- Charola, A. E. und Lewin, S. Z. (1979): Efflorescences on building stones. SEM in the characterization and elucidation of the mechanisms of formation. Scanning Electron Microscopy, 1979/I, p. 379-386.
- Chatzis, I. und Dullien, F. A. L. (1977): Modelling pore structure by 2-d and 3-d networks with application to sandstones. J. canad. Petroleum Technol., 16, p. 97-108.
- Chayes, F. (1956): Petrographic modal analysis. John Wiley and Sons Inc., New York.
- Choquette, P. W. und Pray, L. C. (1970): Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. Amer. Assoc. Petroleum Geol. Bull., 54, p. 207-250.
- Deer, W. A., Howie, R. A. und Zussman, J. (1962): Rock forming minerals, vol. 4, non-silicates. Longman Group Ltd., London.
- Delgado Rodrigues, J. und Gil Saraiwa, J. A. (1985): Experimental and theoretical approach to the study of the mechanism of wind erosion of stone in monuments. 5th Int. Congr. Deterior. Conserv. of Stone, Lausanne, 25.-27. Sept., p. 167-175.
- Dreifuss, E. (1983): Plattform West und Südwestpfeiler. Bericht, Baudirektion der Stadt Bern, Hochbauamt. unpubl.
- Dullien, F. A. L. (1979): Porous media. fluid transport and pore structure. New York, Academic Press.
- Eidg. Dept. d. Innern (1984): Waldsterben und Luftverschmutzung. Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, Bern.
- Engelhardt, W. von (1960): Der Porenraum der Sedimente. Springer Verlag, Berlin - Göttingen - Heidelberg.
- Esbert, R. M. und Montoto, M. (1986): Digital computerizing of microscope images in petrographic investigation of stone. Proc. Meet. group petrography of the stone committee, ICOMOS, Pavia, 17.-19. Sept., p. 101-124.
- Evans, I. S. (1970): Salt crystallization and rock weathering - a review. Rev. Géomorph. Dyn., 19, p. 153-177.
- Félix, C. (1977): Molasse et grès de Villarlod (Fribourg). Fiche Technique, Ecole Polytechnique Fédéral Lausanne.
- Félix, C. (1983): Sandstone linear swelling due to isothermal water sorption. Materials Science and Restoration, Internat. Conference Sept., Esslingen/Germany.
- Félix, C. und Furlan, V. (1982): Mesures automatiques sur des facies gréseux de la dilatation linéaire isotherme par absorption d'eau dans différentes conditions. 20th Internat. Congress on Deterioration and Preservation of Stone Objects, July 7.-9. Ed. K. L. Gauri and J. A. Gwin, University of Louisville, Kentucky.
- Frasson, B.A. (1947): Geologie der Umgebung von Schwarzenburg. Beitr. geol. Karte Schweiz, N.F. 88.
- Frenzel, G. (1980): Natriumchlorid im Tafoni-Granit. Chemie d. Erde, 39, p. 158-169.
- Fritz, B. und Jeannette, D. (1981): Pétrographie et contrôlée géochimique expérimental de transformations superficielle

- cielles de grès de monuments. *Sci. géol. Bull.*, 34/4, Strasbourg, p. 193-208.
- Furlan, V. und Girardet, F. (1983): Considerations on the rate of accumulation and distribution of sulphurous pollutants in exposed stones. *Miner. Sci. and Restoration, Int. Conf., Sept., Esslingen/Germany*, p. 285-290.
- Furlan, V. und Houst, Y. (1983a): Cristallisation de sels et dégâts de matériaux. 1re partie. Chantiers/Suisse, 14, 3, p. 225-228.
- Furlan, V. und Houst, Y. (1983b): Cristallisation de sels et dégâts de matériaux. 2e partie. Chantiers/Suisse, 14, 4, p. 317-320.
- Furrer, B. (1985): Denkmalpflege in der Stadt Bern 1978-1984. Sonderdruck aus Berner Zeitschrift für Geologie und Heimatkunde. 47 Jg. Heft 1.
- Füchtbauer, H. und Müller, G. (1977): Sedimentpetrologie, Teil 2: Sedimente und Sedimentgesteine. Schweizerbart, Stuttgart.
- Galehouse, J. S. (1971): Point counting. in *Procedures in Sedimentary Petrology*, Ed. Carver, R. E., Wiley-Interscience, New York, p. 385-407.
- Gerber, Ed. (1926): Geologische Karte von Bern und Umgebung 1:25'000. Verlag Kümmerly und Frey, Bern.
- Gerber, Ed. (1950): Geologischer Atlas der Schweiz 1:25'000, Atlasblatt 22 (Fraubrunnen - Wynigen - Hindelbank - Burgdorf), mit Erläuterungen. Schweiz. Geol. Komm. Diss. Univ. Bern.
- Gerber, M. E. (1982): Geologie des Berner Sandsteins (das Burdigalien zwischen Sense und Langete, Kanton Bern). *Bulletin de la Société Suisse pour l'Etude des Géosciences*, 17, p. 257-262.
- Building and Environ., 15, p. 101-108.
- Hall, C. und Kalimeris, A. N. (1982): Water movement in porous building materials. V. Absorption and shedding of rain by building surfaces. *Building and Environ.*, 17, p. 257-262.
- Handbook of Chemistry and Physics (1983): 64th Edition. Ed. Weast, R. C., CRC Press Inc., Boca Raton, Florida.
- Harvie, C. E., Mollar, N. und Wear, J. H. (1984): The prediction of mineral solubilities in natural waters: The Na-K-Mg-Ca-H-Cl-SO₄-OH-HCO₃-CO₂-H₂O system to high ionic strengths at 25 °C. *Geochim. cosmochim. Acta*, 48, p. 723-751.
- Hatsagortsian, Z. (1985): Principes expérimentaux et théoriques pour l'évaluation de durabilité de la pierre. 5th Int. Congr. Deterior. Conserv. of Stone, Lausanne, 25.-27. Sept., p. 195-202.
- Hirschwald, J. (1908): Die Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihre Wetterbeständigkeit. Verlag Ernst, Berlin.
- Hofer, P. (1947): Die Staatsbauten der Stadt Bern. Kunstdenkmäler des Kantons Bern III, Birkhäuser Verlag, Basel.
- INFO (1986): Die Planungs- und Baudirektion der Stadt Bern informiert, Nr. 23, Nov. 86.
- Jeannette, D. (1979): Les pélicules d'altération des grès. 3ème Congr. Int. sur la Déterioration et la préservation de la pierre, Venice, 24.-27. Oct., p. 65-80.
- Jeannette, D. (1980): Les grès du château du Landsberg: Exemple d'évolution des "grès Vosgiens" en milieu rural. *Sci. géol., Bull., Strasbourg*, 33, 2, p. 111-118.
- Kaiser, E. (1907): Über die Verwitterungsscheinungen an

- Bausteinen, I. N. Jb. Mineral. Geol. Paläont., 2, p. 42-64.
- Kaisser, E. (1930): Ueber die Grundfrage der natürlichen Verwitterung und die chemische Verwitterung der Bausteine im Vergleich mit der freien Natur. Chemie d. Erde, 4, p. 290-342.
- Kieslinger, A. (1932): Zerstörungen an Steinbauten, ihre Ursachen und ihre Abwehr. Verlag Deuticke, Leipzig-Wien.
- Klopfer, H. (1979): Das Kapillarverhalten poröser Baustoffe. Techn. Akad. Esslingen. Lehrgang Nr. 4280/79.88
- Kraus, K. (1985): Experimente zur immissionsbedingten Verwitterung der Naturbausteine des Kölner Doms im Vergleich zu deren Verhalten am Bauwerk. Diss. math.-naturfak. Univ. Köln.
- Laury, A. P. und Nilne, J. (1926): The evaporation of salt solution from surfaces of stone, brick and mortar. Proc. Royal Soc. of Edinburgh, 47, 1926-1928, p. 52-68.
- Lehmann, P. (1985): Auswirkung der anthropogenen Luftbelastung auf den Menschen und seine natürliche und kulturelle Umwelt. Unpubl. Studie im Auftrag der schweiz. natf. Ges.
- Livingston, R. A. (1985): The role of nitrogen oxides in the deterioration of carbonate stone. 5th Int. Congr. Deterior. Conserv. of Stone, Lausanne, 25.-27. Sept., p. 509-516.
- Livingston, R. A. (1986): Architectural conservation and applied mineralogy. Canad. Mineralogist, 24, p. 307-322.
- Mathys, H. (1976): Die Temperaturverhältnisse in der Region Bern. Beitr. Klma Region Bern, No. 3, Geogr. Inst. Univ. Bern.
- Mathys, H. und Wanner, H. (1975): Sonnenscheindauer, Bewölkung und Nebel. Beitr. Klma Region Bern, No. 5., Geogr. Inst. Univ. Bern.
- Maurer, R. (1976): Das regionale Windgeschehen. Beitr. Klma Region Bern, No. 2., Geogr. Inst. Univ. Bern.
- Maurer, R., Kunz, S. und Witmer, U. (1975): Niederschlag Hagel Schnee. Beitr. Klma Region Bern, No. 4, Geogr. Inst. Univ. Bern.
- Millot, G. und Jeannette, D. (1975): Altération des grès. Monum. hist. France, no. hors sér., p. 33-35.
- Müller, G. (1964): Methoden der Sedimentuntersuchung. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Niesel, K. (1981): Durability of porous building stone: Importance of judgement criteria related to its structure. The Conservation of Stone II, Int. Symp., Bologna, 27-30 Oct., p. 47-57.
- Niesel, K. und Schimmelwitz, P. (1982): Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale. Forschungsbericht 86, Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin.
- Nyborg, W. L., Scott, A. F. und Ayres, F. D. (1972): Tensile strength and surface tension of liquids. American Institute of Physics, Handbook, p. 2/202-2/205.
- Oke, T. R. (1978): Boundary layer climates. Methuen und Co. Ltd., London.
- Pauly, J. P. (1975a): Etude sommaire du bilan hydrologique d'un mur. Lithoclastia, 1, p. 53-82.
- Pauly, J. P. (1975b): Maladie alvéolaire: conditions de formation et d'évolution. The conservation of stone, 1, Proc. int. Symp., Bologna, p. 55-80.
- Péllerin, F.M. (1980): La porosimétrie au mercure appliquée à la géologie de l'ingénieur. Bull. Liais. Lab. Ponts

- Chaussees, 106, p. 105-116.
- Peters, T. (1986): Structurally incorporated and water extractable chlorine in the Boettstein granite (N. Switzerland). *Contr. Mineral. Petrol.*, 94, p.272-273.
- Pittman, E.D. (1979): Porosity, diagenesis and productive capability of sandstone reservoirs. *Soc. econ. Paleont. Mineral., spec. Publ.* 26, p. 159-173.
- Powers, T. C. (1955): Basic considerations pertaining to freezing and thawing tests. *Proc. Amer. soc. testing Miner.*
- Querner, A. (1986): Computerized tomography applied to stone investigation. *Proc. Meet. group petrography of the stone committee, ICOMOS, Pavia*, 17. -19. Sept., p. 125-138.
- Quervain, F. de (1945): Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz, Teil 1. *Beitr. Geol. Schweiz. geotech. Ser.*, 23.
- Quervain, F. de (1967): Technische Gesteinskunde, 2. Aufl., Birkhäuser-Verlag, Basel.
- Quervain, F. de (1969): Die nutzbaren Gesteine der Schweiz. Verlag Kümmeli und Frey, Bern.
- Quervain, F. de (1984): Gesteinsarten an historischen Bau- und Bildwerken der Schweiz, Aufzeichnungen 1954-83, Band 9, Bern - Jura. Hrsg. Inst. f. Denkmalpflege ETH-Zürich.
- Quervain, F. de und Jenny, V. (1951): Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz. *Beitr. Geol. Schweiz. geotech. Ser.*, 30.
- RILEM 25-PEM (1980): Essais recommandés pour mesurer l'altération des pierres et évaluer l'efficacité des méthodes de traitement. *Materiaux et Constructions*, 13, N. 75, p. 175-253.

- Robertson, W. D. (1985): A three dimensional description of the pore structure in limestone. *5th Int. Congr. Deterior. Conserv. of Stone*, Lausanne, 25.-27. Sept., p. 87-92.
- Roscher, H., Bauer, G. und Oel, H.-J. (1985): Analysis of deterioration of ancient masonry, made out of brick. *5th Int. Congr. Deterior. Conserv. of Stone*, Lausanne, 25.-27. Sept., p. 289-298.
- Rutsch, R. (1933): Beiträge zur Geologie der Umgebung von Bern. *Beitr. geol. Karte Schweiz*, 66.
- Rutsch, R. (1967): Erläuterungen zum geol. Atlasblatt 26, Neuenegg - Oberbalm - Schwarzenburg - Rüeggisberg.
- Rutsch, R. und Frasson, B.A. (1953): Geologischer Atlas der Schweiz 1:25'000, Atlasblatt 26, Neuenegg - Oberbalm - Schwarzenburg - Rüeggisberg.
- Rutsch, R. und Schlüchter, C. (1973): Stratigraphische Gliederung der Molasse im Bernischen Mittelland. *Mitt. natf. Ges. (N.F.)* 30.
- Scheidegger, A. E. (1960): The physics of flow through porous media. University of Toronto Press.
- Schmidt, V. und McDonald, D. A. (1979): Texture and recognition of secondary porosity in sandstones. *Soc. econ. Paleont. Miner., Spec. Publ.*, No. 26, p. 209-225.
- Schmöller, A. (1936): Zur Entstehung der Verwitterungsskalpturen an Bausteinen. *Chemie d. Erde*, 10, p. 479-520.
- Schölle, P. A. (1979): Constituents, textures, cements and porosities of sandstones and associated rocks. *Amer. Assoc. Petroleum Geol., Mem.* 28.
- Schuepp, M. (1967): Klimatologie der Schweiz, C, Lufttemperaturen. *Beihet zu Annalen Schweiz. Meteorolog. Zentralanst.*

- Schuepp, M. und Urfer, C. (1970): Klimatologie der Schweiz, D., Luftfeuchtigkeit. Beiheft zu Annalen Schweiz. Meteorol. Zentralanst.
- Schuhmann, H. (1986): Steinfestigung und Reprofilierung. Bautenschutz Bausanierung, Sonderheft Bausubstanz-erhaltung in der Denkmalpflege, p. 78 - 81.
- Schweiz. Lebensmittelbuch (1985): Trinkwasser, Kapitel 27. Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, Bern.
- Seker, E. und Recordon, E. (1984): Ecoulement de deux fluides non miscibles en milieux poreux. Annex au cours; Dynamique des eaux souterraines, cours post-grade, Université de Neuchâtel, Centre d' Hydrologie.
- Snetthlage, R. (1983): Steinkonservierung 1979-1983. Bericht für die Stiftung Volkswagenwerk. Arbeitsheft 22, Bayrisches Landesamt für Denkmalpflege.
- Stein, V. (1981): Naturwerksteine im niedersächsischen Kirchenbau. Jb. Reihe D, 44, p.3-22.
- Stevens, R. E. und Carron, M. R. (1948): Simple field test for distinguishing minerals by abrasion pH. Amer. Mineralogist, p. 31-49.
- Studer, B. (1825): Beyträge zu einer Monographie der Molasse. Se. Jenni, Bern.
- Taber, S. (1916): Growth of crystals under external pressure. Amer. J. Sci., 41, p.532-556.
- Taber, S. (1929): Frost heaving. J. Geol., 37, p.428-461.
- Trümpy, R. (1980): Geology of Switzerland, part A. Wepf und Co., Basel.
- Winkler, E. M. (1965): Weathering rates as exemplified by Cleopatra's Needle in New York. Journal Geol. Education, 13(2), p. 50-52.
- Winkler, E. M. (1973): Stone: Properties, durability in man's environment. Springer-Verlag, Wien, New York.
- Zehnder, K. (1982): Verwitterung von Molassesandsteinen an Baudenkälern und Naturaufschlüssen. Beitr. geol. Schweiz., geotech. Ser., 61.
- Zehnder, K., Arnold, A. und Spirig, H. (1986): Zerfall von Wandmalerei durch lösliche Salze. Maltechnik 2, Callwey Verlag, München.
- Zehnder, K. und Quervain, F. de (1977): Auswirkungen einer Festigung von Ostermundiger Sandstein mit Kieselsäureester. Beitr. Geol. Schweiz, kleine Mitt. 69.
- Zeitungsatikel (1985): verschiedene Artikel in: der schweizerische Beobachter, Nr. 4, 28. Feb.; Brückebauer, Nr. 19, 8. Mai; Coop-Zeitung, Nr. 39, 26. Sept.; Umwelt, Nr. 8., 18. Dez; die Weltwoche, Nr. 52, 26. Dez.; der Bund, Nr. 302, 27. Dez.;
- Zgraggen, P. und Peters, M. (1980): Verwertbarkeit karbonathaltiger Molassesandsteine als Rohstoffe für dampfgehärtete Baustoffe. Beitr. geol. Schweiz., geotech. Ser. 59.

ANHANG

Berechnung der kapillaren Wasseraufnahmee- und Wassereindringkoeffizienten (A resp. B)
(Ergänzung zu 3.2.4.1 D)

Für die Wasseraufnahmekoeffizienten (A) erfolgt die Berechnung analog, mit dem einzigen Unterschied, dass auf der y-Achse anstelle der Höhe die Gewichtszunahme pro Grundfläche ($\Delta G_{\text{ew/F}}$) abgetragen wird.

Die Normierung der Messwerte für die Berechnung der Wassereindringkoeffizienten (B) wird als Beispiel an zwei Proben des gelben Ostermundiger Sandsteins dargestellt.

In Figur 60a sind die Messwerte und die aus allen Punkten vor der Normierung berechneten Regressionsgeraden (g_x , g_y) für die beiden Proben (X, Y) dargestellt.

Um die Regression direkt durch alle Punkte rechnen zu können, wird jede Messung so normiert, dass der Nullpunkt des Koordinatensystems jeweilen durch den Punkt $\sqrt{t} = \sqrt{10} \text{ min} = \sqrt{600} \text{ sec}$ und die dazugehörige Höhe $h(\sqrt{600})$ gelegt wird. D.h. Figur 60b entsteht aus Figur 60a, indem für jeden Punkt die Koordinaten wie folgt linear verschoben werden:

alte Koord.
Punkt P_x : $\sqrt{t_x} | h(\sqrt{t_x})$

neue Koordinaten
Punkt P'_x : $\sqrt{t_x - \sqrt{600}} | h(\sqrt{t_x}) - h(\sqrt{600})$

Punkt P_y : $\sqrt{t_y} | h(\sqrt{t_y})$

neue Koordinaten
Punkt P'_y : $\sqrt{t_y - \sqrt{600}} | h(\sqrt{t_y}) - h(\sqrt{600})$

Die Gleichungen der Geraden im alten Koordinatensystem heißen:

$$g_x \equiv h_x = B_x \sqrt{t_x} + C_x$$

$$g_y \equiv h_y = B_y \sqrt{t_y} + C_y$$

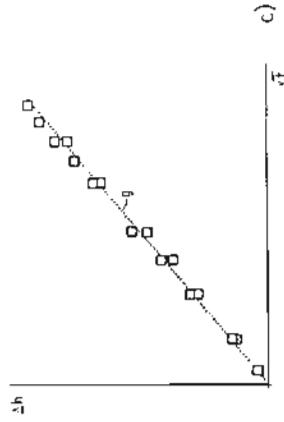
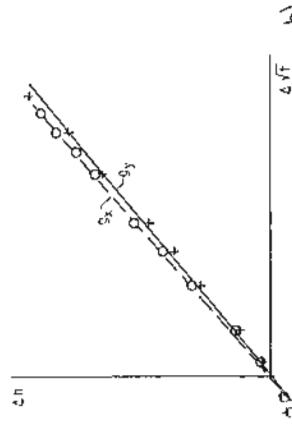
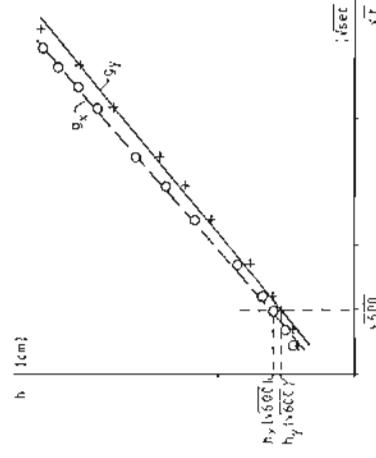
Die Gleichungen im neuen Koordinatensystem lauten:

$$\begin{aligned} g'_x &\equiv \Delta h_x = B_x \Delta \sqrt{t_x} \\ g'_y &\equiv \Delta h_y = B_y \Delta \sqrt{t_y} \end{aligned}$$

Die Steigungen B_x und B_y werden also durch diese Manipulation nicht verändert.

Die Gerade $g \equiv \Delta h = B \Delta \sqrt{t} + C$ ergibt sich jetzt aus der Regression berechnet über alle Bildpunkte welche innerhalb des positiven Quadranten liegen (Figur 60c).

Figur 60: Normierung der Messwerte für die Berechnung der Wassereindringkoeffizienten (B).



Tabellen der in ppm umgerechneten Werte der Chemie der löslichen Auszüge:

Tabelle 22: Chemie der löslichen Auszüge der Proben von der Münsterplattform-Stützmauer, in ppm.

Probe	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
7w/0-0-3	360	1717	307	1060	192	77	13	89	860
7w/0-3-1	294	1510	727	1789	218	203	15	142	1033
7w/1-2	313	1989	4598	1153	256	177	19	171	2595
7w/2-3	474	2999	5200	1235	357	200	7	197	3217
7w/3-4	477	3159	3241	1234	374	197	12	178	2439
7w/4-5	495	3275	2214	1301	398	183	14	156	2089
7w/5-6	513	3369	1643	1377	422	171	15	146	1837
7w/6-7	544	3159	1271	1578	395	131	3	140	1657
7w/9-10	425	2380	367	1514	341	140	3	195	1082
7w/14-15	308	1607	42	1790	274	105	4	79	821
7w/19-20	228	1158	44	1853	229	122	3	90	727
7w/27-28	204	1157	29	1932	226	129	23	101	727
7w/37-38	395	2388	40	1694	266	117	59	109	1107
8w/0-0-3	26	·	121	1514	15	154	7	46	631
8w/0-3-2	9	·	14	2232	22	124	·	57	597
8w/2-3	6	·	12	2384	35	157	·	62	616
8w/3-4	4	·	11	2360	35	143	·	71	595
8w/4-6	3	2	8	1990	33	81	4	64	563
8w/6-7	4	·	11	2419	35	100	3	83	597
8w/7-13	4	·	11	2059	27	104	·	60	490
8w/13-14	5	·	14	2265	31	105	·	71	627
8w/14-15	2	·	10	4244	12	62	·	47	471
8w/19-20	4	·	12	2199	32	122	·	86	475
8w/29-30	7	·	13	2206	24	125	·	68	484
8w/36-37	1	·	9	2097	21	65	·	73	523
9s/0-0-3	29	46	1125	2806	164	117	19	125	1116
9s/0-3-1	10	5	199	2400	106	247	·	68	632
9s/1-2	7	·	28	2662	84	186	·	85	222
9s/2-3	6	·	35	2579	88	223	3	108	501
9s/3-4	8	·	34	2394	72	208	95	95	468
9s/4-5	7	·	45	2351	66	199	4	91	501
9s/9-10	12	8	27	2471	53	163	·	116	478
9s/14-15	14	·	18	2578	60	140	4	110	448
9s/19-20	7	·	16	2450	67	169	·	115	587
9s/27-28	6	·	16	2347	72	150	·	92	407
9s/28-30	5	·	14	2249	70	131	4	88	376
9s/32-34	70	·	13	2175	82	131	3	114	379
10s/0-0-3	10	2	104	1533	19	48	10	39	615
10s/0-3-2	5	·	24	2407	29	115	·	61	587
10s/2-3	8	·	13	2445	43	134	·	82	549
10s/3-4	6	·	15	2671	52	195	·	97	645
10s/4-5	4	·	11	2335	33	128	·	75	577
10s/5-7	17	·	13	2169	38	139	3	66	526
10s/9-10	5	·	13	2445	43	134	·	75	574
10s/12-14	5	·	13	2293	32	131	·	91	570
10s/14-15	6	·	20	2559	31	119	·	80	522
10s/19-20	10	1	22	2294	39	129	·	64	522
10s/29-30	8	2	23	2463	48	152	·	88	448
10s/36-37	4	2	17	2304	52	167	·	70	541
CG	13	5	85	2243	40	68	10	84	536
CB	12	2	46	2233	33	94	8	137	492
GCR	7	1	9	1863	26	70	·	86	410
GCE	9	1	8	1996	30	73	5	85	504
RRAU	8	·	11	2018	16	40	1	130	384
RM	17	·	24	2585	43	173	17	132	602
KR	17	·	20	2717	37	154	4	122	642
GCR-5-1	10	·	9	880	6	7	25	249	395
GCR-25-5	9	·	8	1386	6	26	5	69	395
GCR-18-25	9	·	8	1363	7	12	·	55	377
GCR-18	11	1	13	1526	9	·	13	1526	401

Tabelle 23: Chemie der löslichen Auszüge der Proben vom Grossen Mattenschulhaus, in ppm.

Probe	Mg ²⁺ Ca ²⁺									
	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
4A/0-1	14	12	231	2563	57	180	46	461	139	2868
4A/1-2	11	50	16810	74	188	55	501	192	2380	186
4A/1-5-2	11	50	16750	53	192	446	6012	112	1708	156
4A/2-3	11	347	6724	1220	161	219	106	110	2441	66
4A/2-7-8	11	347	1220	161	219	106	2204	110	2441	66
4A/10-11	11	241	502	82	2319	253	172	70	46	1323
4A/13-14	11	241	502	82	2319	253	172	70	46	1323
4A/16-17	11	220	552	48	2258	253	102	62	120	110
4A/19-20	11	160	713	1633	1892	322	215	86	120	110
4B/0-2	11	160	713	209	2136	230	164	782	120	110
4B/2-5	11	195	601	139	2197	223	160	64	110	110
4B/5-8	11	174	502	82	2319	253	172	70	110	110
4B/8-13	11	174	453	48	2258	253	102	62	110	110
7A/0-1	11	160	347	38	2014	209	164	56	110	110
7A/1-2	11	110	248	48	2197	205	164	56	110	110
7A/2-3	11	110	248	28817	1037	44	203	49	110	110
7A/3-4	11	110	248	12968	1037	46	199	56	110	110
7A/11-12	11	110	248	12968	1037	46	199	56	110	110
7A/14-15	11	110	248	12968	1037	46	199	56	110	110
7A/15-16.5	11	110	248	12968	1037	46	199	56	110	110
7B/0-0.5	11	110	248	12968	1037	46	199	56	110	110
7B/0-5-1	11	110	248	12968	1037	46	199	56	110	110
7B/8-9	11	110	248	12968	1037	46	199	56	110	110
7B/11-12	11	110	248	12968	1037	46	199	56	110	110
7B/14-15	11	110	248	12968	1037	46	199	56	110	110
7B/15-16.5	11	110	248	12968	1037	46	199	56	110	110
7B/1-2	11	110	248	12968	1037	46	199	56	110	110
7B/2-3	11	110	248	12968	1037	46	199	56	110	110
7B/4-5	11	110	248	12968	1037	46	199	56	110	110
7B/6-7	11	110	248	12968	1037	46	199	56	110	110
7B/9-10	11	110	248	12968	1037	46	199	56	110	110
7B/12-13	11	110	248	12968	1037	46	199	56	110	110
7B/15-16.5	11	110	248	12968	1037	46	199	56	110	110
7C/0-1	11	110	248	12968	1037	46	199	56	110	110
7C/1-2	11	110	248	12968	1037	46	199	56	110	110
7C/2-3	11	110	248	12968	1037	46	199	56	110	110
7C/3-4	11	110	248	12968	1037	46	199	56	110	110
7C/5-6	11	110	248	12968	1037	46	199	56	110	110
7C/6-7	11	110	248	12968	1037	46	199	56	110	110
7C/7-8	11	110	248	12968	1037	46	199	56	110	110
7C/10-11	11	110	248	12968	1037	46	199	56	110	110
7C/13-14	11	110	248	12968	1037	46	199	56	110	110
7C/16-17.5	11	110	248	12968	1037	46	199	56	110	110
8/0-1	11	106	149	341	2380	69	156	56	110	110
8/1-2	11	106	149	341	2380	69	156	56	110	110
8/2-2.5	11	106	149	341	2380	69	156	56	110	110
8/2.5-4	11	106	149	341	2380	69	156	56	110	110
8/4-5	11	106	149	341	2380	69	156	56	110	110
8/6-7	11	106	149	341	2380	69	156	56	110	110
8/9-10	11	106	149	341	2380	69	156	56	110	110
8/12-13	11	106	149	341	2380	69	156	56	110	110
8/15-16	11	106	149	341	2380	69	156	56	110	110
8/19-20	11	106	149	341	2380	69	156	56	110	110

Resolution der Vereinigung der Schweizer Denkmalpfleger über den Umgang mit geschädigten Steinen vom 14. November 1986.

Vervendete Symbole und Abkürzungen

Symbol	Berechnung/Bedeutung	Masseneinheit
A	Wasseraufnahmekoeffizient; Gewichtszunahme beim kapillären Saugen, pro Grundflächen-einheit und Quadratwurzel der Zeit	{g/cm ² ·sec ^{1/2} }
B	Wassereindringkoeffizient; Wasserstandshöhe beim kapillären Saugen, pro Quadratwurzel der Zeit	[cm/sec ^{1/2}]
E95.4	absoluter Fehler der Pointcounter-Analysen	[‰]
dGew/F	Gewichtszunahme pro Grundfläche	[g/cm ²]
Fk	Kapillarkraft	[dyne]
GV	Glühverlust; Gewichtszunahme durch das Glühen der Porben bei 1050°C	[Gew-%]
h _{max}	maximale Steighöhe	[m]
omap	offene Makroporosität	[cm ³ /100g]
omip	offene Mikroporosität (Quecksilberporosimetrie)	[cm ³ /100g]
Pa	absolute Porosität; (1 - RG/KG) mal 100	[Vol-%]
Pk	Kapillarzug	[dyne/cm ²]
Ps	scheinbare Porosität; W ₁ mal RG	[Vol-%]
Pv	Vakuum-Porosität; gesante dem Wasser zugängliche Hohlräume; W ₂ mal RG	[Vol-%]
r, R	Kapillarradien	[cm]
RG	Raumgewicht; Gewicht/Gesamtvolumen	[g/cm ³]
SG	spezifisches Gewicht; Gewicht/Volumen der festen Bestandsteile	[g/cm ³]
SV 4.3	Säureverbrauch bis pH 4.3	[μmol/l]
tgp	totale gefangene Porosität (Quecksilberporosimetrie)	[cm ³ /100g]
top	totale offene Porosität (Quecksilberporosimetrie)	[cm ³ /100g]
w24 h1	Wasseraufnahme beim langsamem Eintauchen nach 24 Stunden	[Gew-%]

fest, die hier und jetzt an geschädigten Steinen zu treffen sind. Sie erinnert daran, dass einerseits jedem Denkmal der Charakter eines Originals zukommt und andererseits nur das historisch überlieferte Werk als Denkmal gelten kann. Das originale Werkstück, die originale Form und Oberfläche z.B. Bearbeitung und Stichbearbeitung in ihren Details bis hin zu den Bearbeitungsspuren machen das Denkmal aus, zu welchem auch die Spuren seines Alters gehören. Oberstes Ziel jeder Pflegearbeitsnahme ist die Erhaltung und Sicherung des überlieferten historischen Originals. Die Averehnung der Schweizer Denkmalpfleger, in welcher die anatlich tütigen kantonalen und kommunalen Denkmalpfleger zusammengeschlossen sind, hat am 14. November 1986 in Bern ein ganzzigiges Kolloquium zum Thema «Umgang mit geschädigten Steinen» durchgeführt, an welchem auch die Eidgenossische Kommission für Denkmalpflege vertreten war. Nach intensiven Diskussionen anhand konkreter Fallbeispiele, die dem besonders gefährdeten Sandstein galten, wurde die folgende Resolution verabschiedet:

Die Averehnung der Schweizer Denkmalpfleger ist tief besorgt über die zu beobachtenden, rösch fort schreitenden Schäden, die an alten oder jungen exponentiellen Hausteinarten zu beobachten sind. Betroffen sind in besonderem Maße die an historischen Gebäuden oft verwendeten Natursteine, vor allem die Sandsteine. Untersuchungen mit naturwissenschaftlichen Methoden, die noch intensiviert werden müssen, bestätigen, dass neben der natürlichen Erosion und unsachgemässen Eingriffen die Luftverschmutzung in ursächlichem Zusammenhang mit dem Steinzerfall steht. Die sich aufdrängenden, quantitativ zunehmenden, wiederherstellungs-Massnahmen, die mit grossem finanziellem Aufwand verbunden sind, verhindern nicht darüber hinwegzusehen, dass die Werke unserer Vorfahren mehr und mehr Gefahr laufen, nur noch als blosse Kopien überlassen zu werden. Die Averehnung der Schweizer Denkmalpfleger weist eindeutig darauf hin, dass unsere Denkmalärzte nur dann wirklich geschützt werden können, wenn die in der Luft vor kommenden Schadstoffe rasch und drastisch reduziert werden.

Die Averehnung der Schweizer Denkmalpfleger hat sich, gestützt auf die breiten Erfahrungen aus der täglichen Praxis, mit den Massnahmen beschäftigt.

aus: Unsere Kunstdenkämler, 1987, 1

W48hl	Wasseraufnahme beim langsamen Eintauchen nach 48 Stunden	[Gew-%]
Wsl	Wasseraufnahme beim langsamen Eintauchen bei der Sättigung	[Gew-%]
W24hk	wasseraufnahme durch kapillares Saugen nach 24 Stunden	[Gew-%]
W48hk	wasseraufnahme durch kapillares Saugen nach 48 Stunden	[Gew-%]
Wv	wasseraufnahme unter Vakuum	[Gew-%]

Benetzungswinkel
Oberflächenspannung
Dichte
Viskosität

Probenbezeichnungen

GU	Gurten/Spiegel
OB	blauer Ostermundiger Sandstein
CGE	gelber Ostermundiger Sandstein
OGR	grauer Ostermundiger Sandstein
KRAU	krauchthaler Sandstein frisch
KM	krauchthaler Sandstein mergelführend
KR	krauchthaler Sandstein als Vergleich zu KM

Mineralien, Korn- und Porenarten im Dünnschliff
und beim Röntgen

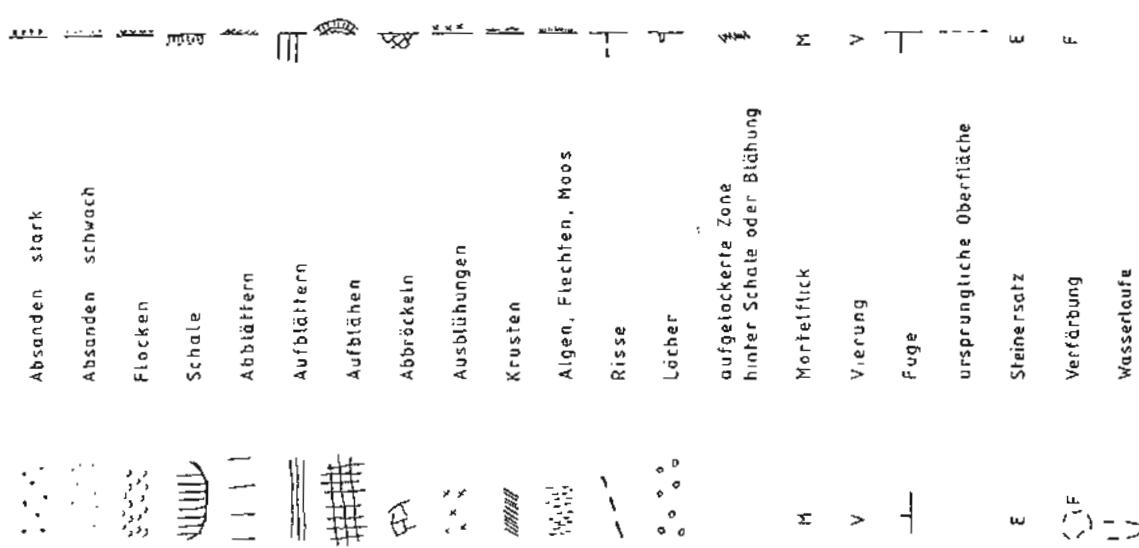
Ab	Albit
Cc	Kalzit
Chl	Chlorit
deKa	detritische Karbonatkörper
Detr	detritische Körner
Do	Dolomit
Glau	Glaukonit
ILL	Illit
KF	Kalifeldspat
Qz	Quarz
Pbla	blau gefärbte Poren

Legende

Ansicht



Schnitt



Übersicht zu
Figur S1.2

Passeadenplan durch die Münsterbauhütte
Bem zur Verfüigung gestellt.

