

**MINERALOGISCHE ASPEKTE ZUR
VERWITTERUNGSANFÄLLIGKEIT DES
SCHILFSANDSTEINS AUS DEM RAUM BAMBERG**

von

Andreas Queisser *

Abstract

Schilfsandstein of the Bamberg area, F.R.Germany, a commonly used freestone for historic buildings and sculptures, has a fine poly-mineral grain-structure with special chemical and mechanical properties. Ultrasonic velocity measurements and X-ray tomography, which are both non-destructive, have been used to show that inhomogeneities already exist in the unweathered rock.

Initial strength properties of Schilfsandstein appear to be dependent upon the quartz and/or feldspar particle contacts. Open pores, microfissures and the amount of clay matrix, which often encloses mineral grains, have a profound influence on the weathering behavior of this rock and hence control the desintegration.

Depending upon the local microclimatic conditions two types of near surface fissures were observed on weathered building rocks. High moisture absorption is provoked by the mineralogical composition of the matrix. A swelling clay mineral (vermiculit) has been found; its high cation exchange capacities seem to influence the special chemical and mechanical reactivity of Schilfsandstein. Clay particles may catalize the crystallisation of salts like gypsum. This is interesting because originally very little calcium was detected within the rock.

A drying-wetting stress seems to be a very important parameter during the weathering of Schilfsandstein. In order not to enhance this "natural" weakness by conservation one must also consider possible reactions between organic solutions and the clay matrix in the porous structure.

* Dr. Andreas Queisser, Gastwissenschaftler
am Laboratoire de Conservation de la Pierre,
Federal Institute of Technology (EPFL)
32 chemin de Bellerive, CH - 1007 Lausanne

Résumé

Les Grès à roseaux ("Schilfsandstein") du Keuper de la région de Bamberg en Allemagne (RFA) ont souvent été utilisés comme pierres de taille et de sculpture dans les monuments historiques. Ils sont caractérisés par une structure à grain fin et possèdent des propriétés chimiques et mécaniques particulières. Des mesures de la vitesse du son et des examens tomographiques, deux méthodes d'essai non destructives, montrent en outre hétérogénéités héritées de la sédimentation.

Les résistances mécaniques des Grès à roseaux sont essentiellement déterminées par les contacts entre grains de quartz et/ou entre grains de quartz et de feldspaths. Les pores, les microfissures, et la matrice argileuse qui entoure souvent les autres grains, influencent par contre considérablement l'altérabilité de ces grès.

Il existe deux formes de fissuration superficielle résultant de l'altération atmosphérique des grès des monuments: elles semblent dépendre de conditions microclimatiques particulières. La forte absorption d'eau est due à la composition minéralogique de la matrice. On y a trouvé un minéral argileux gonflant, la vermiculite; sa grande capacité à pouvoir échanger des cations semble jouer un rôle important dans la réactivité chimique et mécanique particulière des Grès à roseaux. La fraction argileuse pourrait jouer un rôle catalytique dans la cristallisation de sels comme le gypse, car le grès originel ne contient que de faibles quantités de calcium.

Pour la conservation de ce type de grès particulièrement sensible, il nous semble important de prendre en considération, dans la structure poreuse, l'interaction entre la matrice argileuse et les solvants organiques utilisés.

I N H A L T

1. Einleitung
2. Herkunft der Werksteine, Probennahme
3. Petrographische Ausbildung
 - 3.1 Korngrößen, Schichtungsgefüge
 - 3.2 Chemismus und Mineralbestand
 - 3.3 Tonmineralogische Zusammensetzung
 - 3.4 Kornbindung und Porosität
4. Entfestigung als Folge von Verwitterungseinflüssen
 - 4.1 Erscheinungsformen
 - 4.2 Vorstellungen zur oberflächennahen Entfestigung
5. Schlußfolgerungen im Hinblick auf Schadensminimierung und Schutzmaßnahmen
6. Zusammenfassung, Literatur und Danksagung

1. Einleitung

Unter der Bezeichnung "Schilfsandstein" findet man im Raum Bamberg einen grüngrauen, zum Teil gelblich bis violett getönten, feinkörnigen Natursandstein, welcher mindestens seit dem frühen Mittelalter als Skulptur- und Werkstein bearbeitet wird. Der Bamberger Reiter oder das Fürstenportal des Bamberger Domes stellen kunsthistorisch bedeutsame Baudenkmäler dar. Wenig zitiert wird die Vielfalt der "kleinen, unbedeutenden" Denkmäler wie Gartenskulpturen, Gebäudeverzierungen und Wegekreuze aus Schilfsandstein, die das herrliche Bild vieler fränkischer Ortschaften prägen.

Feinkörnigkeit und ein relativ hoher Anteil toniger Minerale ermöglichen die vergleichsweise leichte und feingliedrige Bearbeitung des Schilfsandsteins. Wie nachfolgend dargestellt, bedingen diese Materialeigenschaften jedoch besondere Verwitterungseigenschaften; zu beobachten ist, daß freistehende Objekte aus Schilfsandstein zum Teil schon nach wenigen Jahren Veränderungen aufweisen, die bishin zur völligen Entfestigung des Gesteinsgefüges reichen können.

Bei der Diskussion des Einflusses von Luftverschmutzung auf die Gesteinsverwitterung wird nicht selten die "grundsätzliche" Frage berührt: Wer war zuerst da? ("Das Huhn oder das Ei?") - Auf den sedimentären Kreislauf von Gesteinen haben Verwitterungskräfte seit dem Entstehen der Erdkruste einen von der Natur aus bestimmten Einfluß. Da Natursteine, die als Baudenkmäler oder Skulpturen verbaut sind, äußerst unterschiedliche Verwitterungsmerkmale mit teilweise stufenlosen Übergängen zeigen, ist es häufig nicht möglich, einen einzigen Verwitterungstyp für das "Ergebnis" verantwortlich zu machen.

Im Rahmen dieses Beitrages soll versucht werden, der Frage nachzugehen, welche Materialeigenschaften im Fall des Schilfsandsteins gegeben sind, die solch heftige Verwitterungserscheinungen nach sich ziehen. Erst Antworten auf ursächliche Zusammenhänge dieser Art ermöglichen Sanierungskonzepte mit längerfristigen Erfolgchancen.

2. Herkunft der Werksteine, Probennahme

Geologisch wird der Schilfsandstein einer gleichnamigen Formation des Fränkischen Keuper (Mittlerer Keuper; vgl. BERGER, MEYER & SCHMIDT-KALER 1981) zugeordnet. Die Namensgebung beruht auf fossilen Halm- und Pflanzenresten, vgl. auch Abb. 1, die vereinzelt in Gesteinspartien an ihrer auffälligen Dunkelfärbung mit bloßem Auge zu erkennen sind. Sedimentologisch handelt es sich um ein niederenergetisches, sumpfiges und damit leicht reduzierendes Ablagerungsmilieu großer regionaler Ausbreitung. Das Ge-

stein ist in einzelnen Vorkommen sehr homogen und massig ausgebildet.

Auf eine ganze Reihe von historischen und in Abbau befindlichen Steinbrüchen weisen FÜRST & SANTOWSKI (1985) hin. Makroskopische Ansprache, Korngrößenanalysen sowie Untersuchungen zum Mineralbestand ermöglichen Vergleiche zwischen bruchfrischen und verbauten Natursandsteinen. Neben den geowissenschaftlichen Daten gaben historische Quellenzitate vereinzelt sogar direkte Hinweise über Örtlichkeiten der Herkunft.

Anhand von Archivalienauszügen des 16. bis 19. Jahrhunderts ließen sich einige Zusammenhänge zwischen Schilfsandsteinbrüchen und Baudenkmalern im Raum Bamberg belegen (LANG 1985): So diente Schilfsandstein aus "Abtswind" für Gartenplastiken von Ferdinand DIETZ in Schloß Seehof. Fensterstöcke, Treppenstufen, Skulpturen und Verzierungen wie Wappen wurden aus "Zeyler" Schilfsandstein geschlagen. Teilweise liegen auch Informationen über besondere Lieferkonditionen vor. Bevorzugt wurden bei trockenem, frostfreiem Wetter gebrochene Sandsteine, die den Winter über durchgefroren und trockneten. Auf Qualität und Farbe wurde in der Regel höchster Wert gelegt. Während verschiedene historische Steinbrüche über längere Zeit hinweg abgebaut wurden, waren andere Vorkommen schon nach kurzer Zeit erschöpft oder entsprachen nicht mehr den Qualitätsanforderungen. Sicher spielten die jeweiligen Transportbedingungen eine wichtige Rolle bei der Auswahl eines Steinbruches.

Entsprechend dieser Zusammenhänge wurden für die Untersuchungen aus folgenden vier Steinbrüchen zehn repräsentative Schilfsandsteinproben entnommen:

<u>Steinbruch</u>	<u>Proben-Nr.</u>
- Abtswind	1, 2
- Sand a.Main	3, 4, 5, 6
- Setzbachtal	7, 8
- Zeil a.Main	9, 10

Die Schilfsandsteinbrüche Sand, Setzbachtal und Zeil befinden sich in unmittelbarer Nähe des Mains, ca. 20 km nordwestlich von Bamberg. Aus dem südlich des Mains gelegenen Bruchgelände bei Sand werden noch heute Natursteine gewonnen, während die Vorkommen bei Zeil und im Setzbachtal weitgehend erschöpft sind. In dem ca. 60 km südwestlich von Bamberg an der Autobahn Nürnberg-Würzburg im Waldgebiet bei Abtswind gelegenen, aufgelassenen Steinbruchareal deuten Bergschäden auf den historischen Abbau.

Durch Messungen der Rückprallhärte mit dem Betonprüfhammer System SCHMIDT (QUEISSER 1986) war es möglich, in auf-

geschlossenen Gesteinsprofilen homogene Bereiche auszuhalten. Sandsteinproben in Bausandsteinqualität konnten somit aus weitgehend repräsentativen Gesteinszonen gewonnen werden.

3. Petrographische Ausbildung

3.1 Korngrößenverteilung und Schichtungsgefüge

Nach Untersuchungen von SANTOWSKI (1984) lassen sich Schilfsandsteinproben mit mittleren Korngrößendurchmessern von $mD = 0.144$ mm (Std.Abw. 0.029 mm auf der Basis von 10 Gesteinsanalysen) gemäß der WENTWORTH-Skala als feinkörnig bis sehr feinkörnig ansprechen. Der Korngrößenanteil kleiner als 20 μ m beträgt ca. 20 Gew.%. Legt man des TRASK'schen Sortierungsparameter S_0 (Quadratwurzel des Quozienten aus 3. zum 1. Quartil einer Korngrößenverteilung) zugrunde, so handelt es sich beim Schilfsandstein mit im Mittel $S_0 = 1.38$ (Std.Abw. 0.08) um ein durchweg "gut" sortiertes Korngefüge. Das makroskopisch - im Vergleich zu anderen Natursandstein-Gruppen des Bamberger Raumes - recht homogene Erscheinungsbild von Werksteinen des Schilfsandsteins verdeutlicht diesen Zusammenhang.

Durch Untersuchungen mittels Ultraschall-Laufzeitmessungen sind Anisotropien des Schilfsandsteins deutlich nachweisbar, die sich auf die sedimentäre Schichtung zurückführen lassen (QUEISSER 1986). Eine Ausrichtung feinsten Tonmineralpartikel wird häufig schon unter der Lupe erkennbar. An entsprechend dieser Beobachtung orientierten Gesteinsproben verringern sich die Geschwindigkeit longitudinaler Ultraschallwellen bei einer Frequenz von 35 KHz in c-Richtung (= senkrecht zur Schichtung), während parallel zur Schichtung (a,b-Richtung) die Messungen in der Regel vergleichbare Werte aufweisen.

Definiert man das Verhältnis zwischen den Schallgeschwindigkeiten in a,b- und in c-Richtung als Anisotropie-Koeffizient A, lassen sich für die Schilfsandsteinproben der untersuchten Vorkommen im Durchschnitt Werte von $A = 1.16$ erreichen. Handstücke aus Abtswind zeigen mit $A = 1.07$ die geringsten und Proben aus Sand a.Main mit $A = 1.29$ die höchsten Anisotropie-Koeffizienten.

Eine technisch aufwendigere Methode erlaubte die direkte bildliche Darstellung von schichtungsbedingten Inhomogenitäten im Schilfsandstein: Durch Anwendung der computer-tomographischen Röntgenbildanalyse ist es möglich, Schnittbilder eines Probekörpers zerstörungsfrei zu gewinnen, die Auskunft über vorliegende Dichteverteilungen geben (QUEISSER 1988). Gefügebedingte Anisotropien zeigen sich in den Tomogrammen anhand von Grauwert-Variationen, die bis in den mm-Bereich auswertbar sind.

Abb. 1 a:

Computertomographisches
Schnittbild einer fossilen
Halmreste führenden
Schilfsandsteinprobe
(Kantenlänge ca. 10 cm;
Erläuterungen s. Text)



Abb. 1 b: Schichtungsgefüge eines homogen erscheinenden,
abgeplatzten Fassadensteins (Sander Schilfsand-
stein) von Schloß Weißenstein bei Pommersfelden

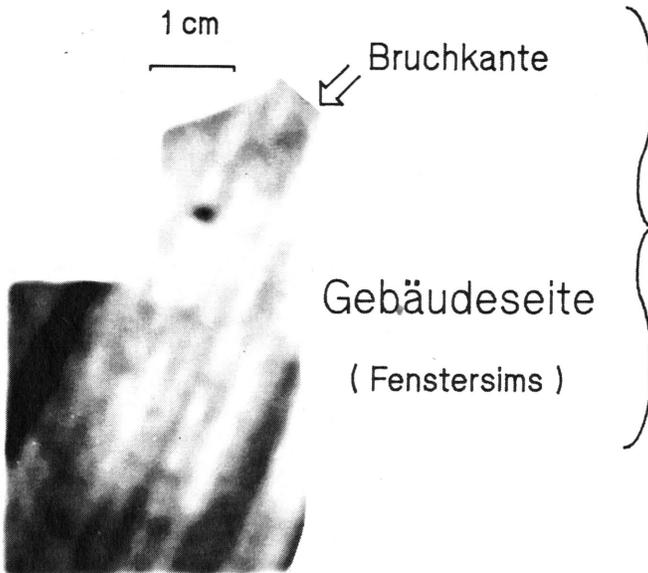


Abb. 1 a stellt einen computertomographischen Querschnitt durch eine fossile Pflanzenreste enthaltende Schilfsandsteinprobe aus Sand a.Main dar. Organische Reste (helle Grauwerte) weisen unterschiedliche Dichten gegenüber der grau erscheinenden Gesteinsmatrix auf. An der Ausrichtung dieser länglichen Halmreste wird ebenfalls die Schichtung innerhalb des Probekörpers erkennbar. Dunkle Partien auf der Abbildung repräsentieren Bereiche geringerer Dichte. Abb. 1 b zeigt einen Schnitt durch ein abgeplatzttes Fassadenteil (Sander Schilfsandstein) von Schloß Weißenstein bei Pommersfelden: Unterschiedliche Grauwerte, die parallel zueinander orientiert sind, deuten auf den Verlauf der Schichtung.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß der Schilfsandstein trotz Feinkörnigkeit und homogenem äußeren Erscheinungsbild als Folge der sedimentären Gesteinsbildung ein anisotropes Gefüge besitzt, welches räumlich ausgerichtete, d.h. richtungsorientierte Materialeigenschaften aufweist.

3.2 Chemische Zusammensetzung und Mineralbestand

Aus drei chemischen Vollanalysen sowie auf der Basis der röntgenographischen Mineralbestimmung an Schilfsandsteinproben (Sand a.Main und Setzbachtal; SANTOWSKI 1984, vgl. Tab. 2) konnte folgender Hauptmineralbestand normativ berechnet werden: 42 % Quarz, 20 % Kalifeldspat, 19 % Natriumfeldspat, < 1 % Calciumfeldspat, 9 % Kaolinit, 6 % Chlorit und 2-3 % Goethit. Chemisch wie mineralogisch besitzt der Schilfsandstein damit in etwa "Grauwacken"-Zusammensetzung, ohne jedoch den mit diesem Begriff implizierten diagenetischen Bildungsbedingungen gerecht zu werden. In Anlehnung an FÜCHTBAUR (1985) läßt sich das Gestein generell als "toniger, stark feldspathaltiger Sandstein" ansprechen.

Sieht man Quarz als die vergleichsweise beständigste Mineralphase an, so kann bei der gegebenen Gesteinszusammensetzung gefolgert werden, daß in erster Linie Feldspäte und feinkörnige Anteile wie Schichtsilikate oder Eisenhydroxide (Goethit) - zusammen ca. 60 Gew.% - bezüglich der Verwitterung eine Rolle spielen. Definiert man die feinkörnigen Mineralanteile (ohne Quarz und Feldspäte) als "Grundmasse", so ergeben sich für den Schilfsandstein normativ Anteile von fast 20 Gew.% (Summe Chlorit, Kaolinit und Goethit). Dies entspricht quantitativ der in Abschnitt 3.1 als "Matrix" angesprochenen Fraktion kleiner 20 µm. Innerhalb dieses Korngrößenbereichs sollte damit eine gute Anreicherung des Grundmassengehalts vorliegen.

Aufgrund einer hohen spezifischen Oberfläche besitzen feinkörnige Mineralpartikel und insbesondere Schichtsilikate und kolloidale Mineralphasen eine erhöhte Austausch- und Reaktionsbereitschaft. Für das Verständnis der Verwitterungsanfälligkeit des Schilfsandsteins wird daher der Kornfraktion kleiner 20 μm eine besondere Bedeutung zugemessen.

Aus dem mechanisch vorsichtig zerkleinerten Korngefüge der Originalproben wurden nach mehrmaligen Aufschlüssen und Sedimentieren der gröbere Mineralpartikel die Fraktion kleiner 20 μm entsprechend der spezifischen Sinkgeschwindigkeit annähernd quantitativ abgetrennt und für die weiteren Untersuchungen verwendet.

In Tab. 1 sind die Ergebnisse chemischer Vollanalysen zusammengefaßt: Bei der Fraktion kleiner 20 μm ist eine geringe Schwankungsbreite der Werte zu erkennen; gesteht man dem Abtswinder Schilfsandstein eine gewisse Variation in der Zusammensetzung zu, so lassen sich für die 20 μm -Fraktion der Proben aus den anderen Steinbrüchen bemerkenswerte Unterschiede nur in den Eisen II- und Eisen III-Konzentrationen erkennen. Sie stehen in einem gut interpretierbaren Verhältnis zu den unterschiedlichen Farbtonungen der einzelnen Gesteinsproben. Der gelbbräunliche bis rötlich gefärbte Zeiler Schilfsandstein zeigt die höchsten Eisen III-Gehalte (Verhältnis Fe_2O_3 : FeO = 5 : 1), während sich die grün bis zum Teil violette Färbung der Abtswinder Proben mit vergleichsweise hohen Eisen II-Anteilen korrelieren läßt (Verhältnis 1.4 : 1). Im mittleren Bereich, bei Verhältnissen zwischen 2-3 : 1, sind der Sander und der Setzbachtaler Schilfsandstein anzutreffen. In allen untersuchten Proben liegt die Summe von Fe_2O_3 + FeO bei 7-8 Gew.-%.

Aus dem Vergleich mit der Gesamtzusammensetzung von Schilfsandstein (Sand, Setzbachtal; SANTOWSKI 1984) werden für die meisten Elemente in der 20 μm -Fraktion Verschiebungen zu höheren Konzentrationen erkennbar, während die Gehalte an SiO_2 (73.9 \rightarrow 55.3 %) und Na_2O (2.2 \rightarrow 1.6 %) abnehmen:

Al_2O_3 (11.8 \rightarrow 18.2 %), Fe_2O_3 (2.4 \rightarrow 5.2 %), FeO (0.8 \rightarrow 2.0 %), MgO (1.6 \rightarrow 4.3 %), CaO (0.2 \rightarrow 0.8 %), K_2O (3.3 \rightarrow 4.3 %), P_2O_5 (0.13 \rightarrow 0.22 %), CO_2 (0.06 \rightarrow 0.56 %) und H_2O (2.8 \rightarrow 6.4 %).

Im Hinblick auf die Diskussion der Gipsbildung beim Schilfsandstein sei angemerkt, daß mit Ausnahme der untersuchten Proben aus Abtswind weder in der Gesamtanalyse (0.2 Gew.%) noch in der kleiner 20 μm -Fraktion (0.8 Gew.%) nennenswerte CaO -Konzentrationen vorliegen. CO_2 -Werte von durchschnittlich unter 0.6 Gew.% bestätigen, daß in den untersuchten Schilfsandsteinproben carbonatische Anteile wie Calcit nicht gegeben sind.

Tab. 1: Chemische Zusammensetzung bruchfrischer Schilfsandsteine

Analysen	Gesamtprobe [*] [-----Fraktion kleiner 20 µm-----]					
	Mittelwert	Abtswind	Sand	Setzbach-	Zeil	
	2	8	2	4	2	2
SiO ₂	73.9	55.3	53.7	55.9	55.8	55.3
TiO ₂	0.7	0.6	0.6	0.6	0.7	0.6
Al ₂ O ₃	11.8	18.2	17.8	18.2	18.1	18.8
Fe ₂ O ₃	2.4	5.2	4.1	4.8	5.7	6.7
FeO	0.8	2.0	2.9	2.1	1.7	1.4
Verhältnis	3.0	2.6	1.4	2.3	3.3	5.0
MgO	1.6	4.3	4.2	4.7	4.3	3.7
CaO	0.2	0.8 (1.2)	2.7	1.0	0.7	0.8
Na ₂ O	2.2	1.6	1.5	1.6	1.8	1.6
K ₂ O	3.3	4.3	4.5	4.5	4.0	4.0
P ₂ O ₅	0.13	0.22	0.20	0.21	0.25	0.26
CO ₂	0.06	0.56	0.56	0.69	0.39	0.46
H ₂ O	2.8	6.4	7.2	6.0	6.4	6.5
Summe	99.9	100.2	100.0	100.4	99.8	100.2

Tab. 2: Berechneter Mineralbestand bruchfrischer Schilfsandsteine

	Gesamtprobe [*] [-----Fraktion kleiner 20 µm-----]					
	Mittelwert	Abtswind	Sand	Setzbach-	Zeil	
	6.4	21.1	22.4	22.4	21.2	16.9
Chlorit/ Vermiculit	6.4	21.1	22.4	22.4	21.2	16.9
Glimmer/ Illit	n.b.	24.4	28.6	27.1	18.2	21.2
Kaolinit	9.2	16.3	14.0	14.6	18.0	20.3
Quarz	42.0	8.1	6.2	7.5	9.8	9.7
Alkali- Feldspäte	39.0	28.6	26.8	28.6	30.8	28.4
Goethit	2.6	1.5	2.1	0.9	1.4	2.2
Sonstige	1.0	1.2	1.2	1.1	1.3	1.2

(* Werte für die Gesamtproben nach SANTOWSKI 1984)

Die CO₂-Gehalte lassen sich auf die Verbrennung organischer Reste des Schilfsandsteins zurückführen. Damit liegen primär keine Mineralanteile vor, die ausreichende Calcium-Mengen für eine Gipsbildung freisetzen könnten.

Eine bemerkenswerte Änderung im chemischen Stoffbestand der 20 µm-Fraktion stellt die hohe Magnesium-Anreicherung dar. Dies entspricht einer starken Bindung dieses Elements an feinkörnige Mineralphasen wie Chlorit oder Illit. Kalium erfährt scheinbar eine vergleichsweise geringe Zunahme in der Fraktion kleiner 20 µm, wobei zu berücksichtigen ist, daß dieses Element sowohl in Feldspäten wie in Glimmern gebunden sein kann. Insgesamt deutet der veränderte Stoffbestand auf Anreicherungen von hydratisierten Alumosilikaten und Alkalielementen in der Grundmasse, dem chemischen Stoffbestand von Feldspäten, Tonmineralen und kolloidalen Phasen wie Goethit/Limonit entspricht.

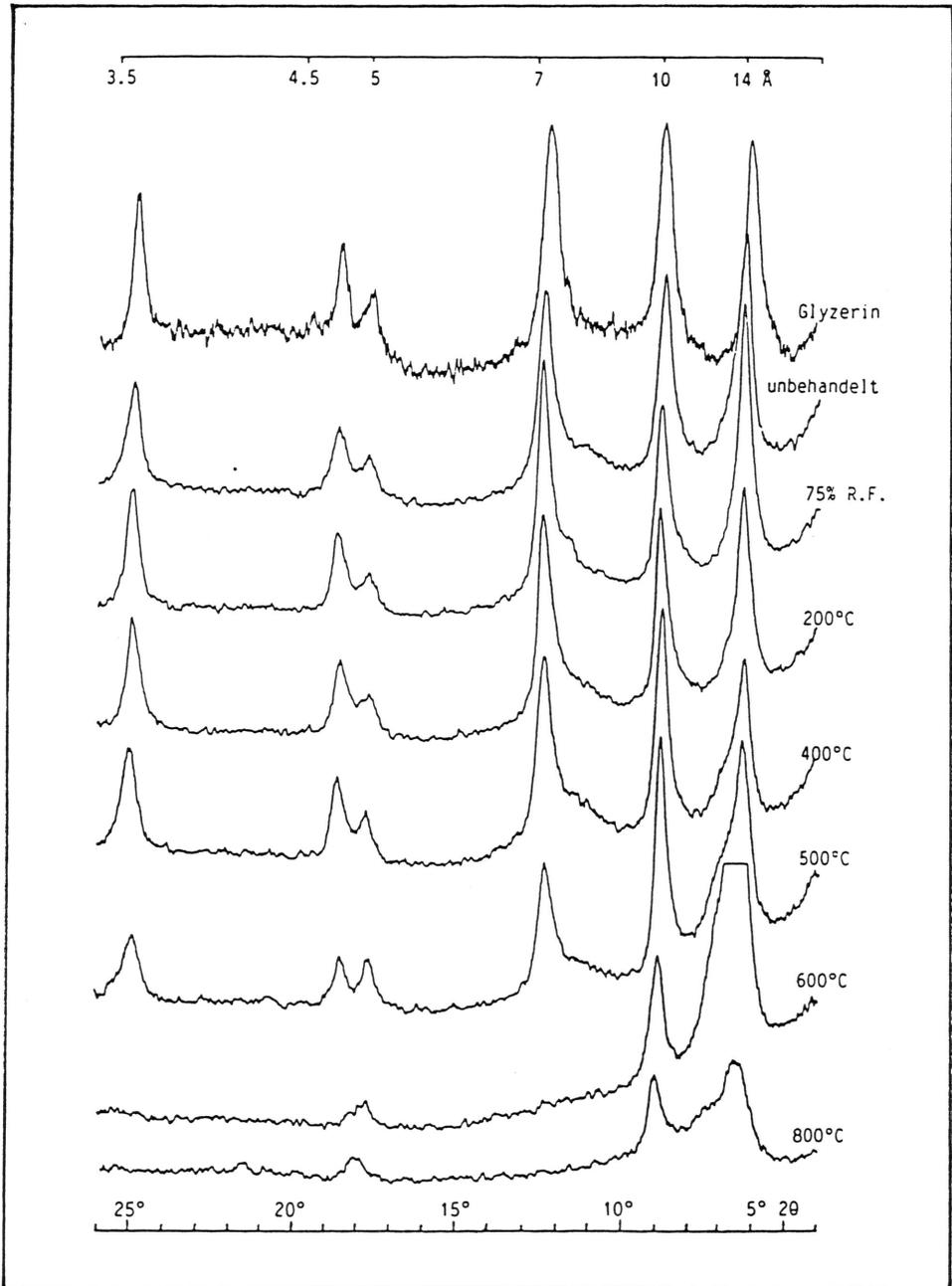
3.3 Tonmineralogische Zusammensetzung

Eine tonmineralogische Bestimmung der Grundmasse wurde röntgenographisch an Texturpräparaten vorgenommen, da aufgrund einer Intensitätssteigerung von (001)-Basisreflexe Schichtsilikate deutlicher hervortreten. Die Phasenidentifizierung ist in Anlehnung an BRINDLEY & BROWN (1981) durchgeführt und durch Thermodifferenzialanalyse (D.t.a.) ergänzt worden.

Aufgrund der Überlagerungen verschiedener Basisreflexe waren folgende Schichtsilikate/Tonminerale erst mit Hilfe von Glycerin- und Hitzebehandlung nachweisbar: - Kaolinit, - Glimmer/Illit, - Chlorit, - Vermiculit (in nicht-regelmäßiger Wechsellagerung mit Chlorit). In Abb. 2 sind Röntgendiffraktometeraufnahmen von glycerin- und temperatur-/feuchtigkeitsbehandelten Texturpräparaten der Fraktion kleiner 0,63 µm zusammengestellt, die das Vorhandensein des quellfähigen Tonminerals Vermiculit im Schilfsandstein am deutlichsten belegen. Im einzelnen ließen sich folgende Effekte beobachten und interpretieren:

- Im Feintonbereich (Fraktion kleiner 0.63 µm) kann das Quellverhalten nach Glycerinbehandlung an der deutlichen Peakverschiebung des (001)-Basisreflexes von 14 Å auf 14.5 Å nachgewiesen werden, da hier die Beugungsintensitäten des grobkörnigen Chlorits aufgrund der Anreicherung des Vermiculits zurücktreten.
- Intensitätsabnahmen der Basisreflexe im Verlauf einer thermischen Behandlung bis 500°C sind ebenfalls an Texturpräparaten der Fraktion kleiner 20 µm zu beobachten und werden mit Dehydration von Zwischenschicht - Wasser erklärt.

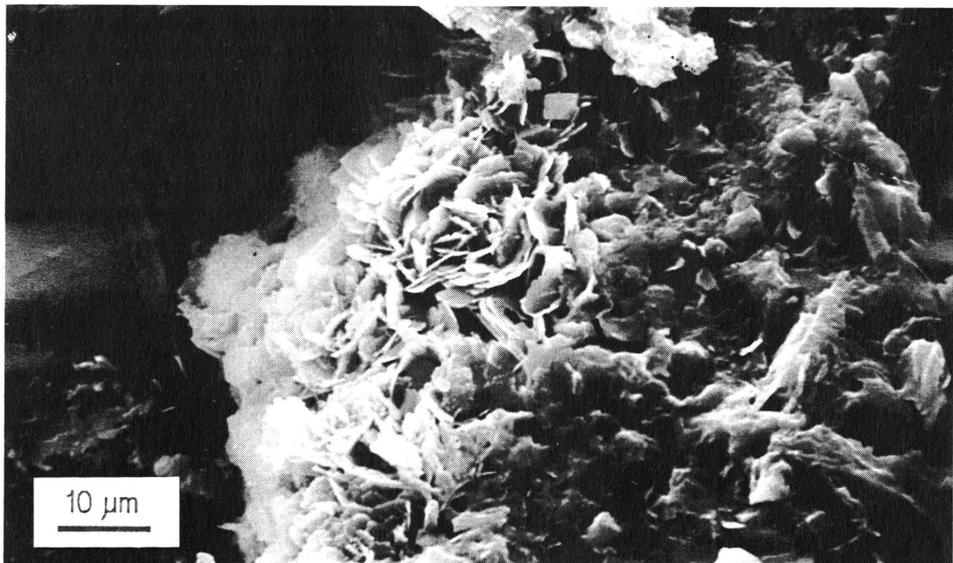
Abb. 2: Röntgendiffraktometeraufnahmen von glyzerin- und temperaturbehandelten Texturpräparaten der Fraktion kleiner 0.63 μm



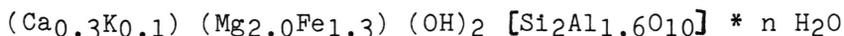
- Eine eindrucksvolle Intensitätssteigerung des (001)-Basisreflexes in dem kleiner 0.63 μm -Präparat, das einer relativen Feuchtigkeit von 75 % ausgesetzt war, demonstriert die besonders ausgeprägte Neigung von Vermiculit, Wassermoleküle direkt aus der Luftfeuchtigkeit aufzunehmen. Unter "trockenen" Bedingungen setzt eine Dehydratation ein, die bis ca. 300-400°C reversibel zu sein scheint.
- Die überproportional hohe Intensitätssteigerung des 14 Å-Reflexes ab 600°C (bei gleichzeitiger Dekomposition des Kaolinites) wird dem Chlorit zugeschrieben und stellt ein besonderes Phänomen dar, da sie ausschließlich an dem (001)-Basisreflex zu beobachten ist. Für eine nicht-regelmäßige Chlorit/Vermiculit-Wechselagerung sprechen Nebenpeaks in Röntgendiffraktogrammen der Fraktion kleiner 20 μm , die zwischen 7-10 Å, sowie 10-14 Å auftreten und bei thermischer Behandlung auf den 10 Å-Reflex zuwandern, ohne ihn zu erreichen.

Weitere Hinweise auf die röntgenographisch bestimmten Tonmineralphasen konnten aus rasterelektronenmikroskopischen und mikrochemischen Untersuchungen gewonnen werden. Charakteristische "Chlorit-Rosen" sowie Kaolinit-Blättchen lassen sich im REM-Bild erkennen und anhand des energie-dispersiven Röntgenspektrums (Elementverteilung: Mg, Fe, Si bzw. Al, Si) zuordnen. Weitgehend ideomorphe Mineralaggregate deuten auf Neubildungen mit guten Kristallinitäten, vgl. Abb. 3.

Abb. 3: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Schilfsandsteinprobe aus Setzbachtal (Erläuterungen s. Text) mit "Chlorit-Rosen".



Mikrosonden-Messungen im Bereich der tonigen Matrix von Schilfsandsteinproben deuten auf eine Vermiculit-Phase mit annähernd folgender strukturchemischen Zusammensetzung (Mittelwert aus zehn Punktanalysen):



Genetisch kann Vermiculit als Umwandlungsprodukt des Biotit aufgefaßt werden (DEER, HOWIE & ZUSSMAN 1978), wobei er strukturchemisch eher dem Chlorit nahe steht. Ein hauptsächlich in der Tetraederschicht bestehendes Ladungsdefizit wird vorwiegend durch den Einbau von zweiwertigen Zwischenschichtkationen wie Calcium oder Magnesium, aber auch durch einwertige Kationen wie Kalium kompensiert.

In Tab. 2 sind als auf der Basis der chemischen Vollanalyse (Tab. 1) und gemittelter Strukturformeln berechnete Tonmineralanteile zusammengefaßt. Aufgrund der kristallchemischen Ähnlichkeiten ließ es sich nicht vermeiden, Chlorit und Vermiculit als Summe zu berechnen:

Wie die Ergebnisse verdeutlichen, liegt der Anteil von Chlorit/Vermiculit in der Grundmasse des Schilfsandsteins bei ca. 21 Gew.%. Dies ergibt umgerechnet auf die Gesamtprobe einen Gehalt von maximal 4-5 Gew.% an quellfähiger Tonmineralphase. Zusammen mit Gewichtsanteilen von im Durchschnitt 16 % Kaolinit und 24 % Glimmer/Illit liegen in der Fraktion kleiner 20 µm des Schilfsandsteins bis zu 65 Gew.% Schichtsilikate vor, die den feinkörnigen Partikeln aus Quarz (8 %), Feldspat (28 %), Goethit und sonstigen (max. 3 %) gegenüberstehen.

Damit wird das Materialverhalten der Matrix bzw. der Grundmasse im wesentlichen durch Eigenschaften dieser tonigen Komponenten bestimmt, die von ihrer Natur her feinkörnig, schichtenförmig und oberflächenaktiv sind. Die Präsenz des Vermiculits impliziert zudem gesteigerte Ionen- und Wasseraustauschkapazitäten.

Dieser Einfluß wird bereits in einem einfachen Versuch zur Feuchtigkeitsaufnahme deutlich: Bei 105°C getrocknete Probenwürfel, die über mehrere Wochen unter Zimmerbedingungen relativen Feuchtigkeiten von 40-60 % ausgesetzt waren, zeigten Gewichtsabnahmen zwischen 0.22-0.38 Gew.%. Nach 48 Stunden unter denselben Feuchtigkeitsbedingungen konnten Gewichtszunahmen von 0.10-0.19 Gew.% verzeichnet werden. Diese Aufnahmefähigkeit liegt um den Faktor 2 bis 10 über der Feuchtigkeitsaufnahme, die für andere Natur-sandstein-Gruppen aus dem Raum Bamberg bestimmt werden konnte (QUEISSER 1986).

3.4 Kornbindung und Porosität

Festigkeiten und Verwitterungsbeständigkeit als Materialeigenschaften eines klastischen, porösen Sedimentgesteins, wie der Natursandstein, werden in hohem Maß von den Intensitäten der Kornbindungen zwischen einzelnen Mineralpartikeln bestimmt. In bezug auf Dauerhaftigkeit und Stabilität von Kornbindungen kann dem direkten Kontakt zwischen Quarz - Quarz die höchste "Qualität" zugeordnet werden, da es sich um eine Bindung zwischen gleichartigen Partikeln des vergleichsweise härtesten und verwitterungs-resistentesten Materials im Sandstein handelt. Kornübergänge verschiedener Mineralphasen wie Quarz und Feldspat oder Schichtsilikaten und Quarz weisen Grenzflächen zwischen Medien unterschiedlicher chemischer und physikalischer Eigenschaften auf.

Neben einer direkten Auswirkung der Kornbindung auf den Mineralverband besteht im Hinblick auf die Verwitterungsanfälligkeit ein nicht zu unterschätzender indirekter Einfluß der Porosität. Sandsteine hoher Kompaktion haben im Verlauf ihrer diagenetischen Bildung unter Abnahme der Gesamtporosität generell eine Intensivierung der Kornbindung erfahren. Sich dabei in zunehmendem Maß bildende allseitig umschlossene Porenräume sind für Porenwässer oder den Gasaustausch nicht zugänglich und bleiben daher am Verwitterungsgeschehen weitgehend unbeteiligt. Anders verhalten sich offene, nicht isolierte Porenräume, welche in der Erdölgeologie auch als "Nutzporositäten" angesprochen werden. Hohe kapillare Saugkräfte feinkörniger Poren verleihen einem Gestein speichernde Eigenschaften und ermöglichen einen vergleichsweise fast ungehinderten Stoffaustausch.

An fünf bruchfrischen Schilfsandsteinproben aus Sand, Setzbachtal und Zeil sind Gesamtporosität und Wasseraufnahmevermögen nach DIN 52 103 gravimetrisch bestimmt worden; bei einer mittleren Gesamtporosität von 15.5 Vol.% konnte im Durchschnitt 14.1 Vol.% Wasseraufnahme ermittelt werden, was ca. 91 % des gesamten nutzbaren Porenraumes entspricht. Quecksilberporosimetrische Messungen an Schilfsandsteinproben aus Sand a.Main, die im Laboratoire de conservation de la pierre (ETH Lausanne) durchgeführt worden sind, ergaben Gesamtporositäten von 20.1 Vol.%. Unter Normaldruck konnte an diesen Proben Wasseraufnahmen von 15.5 Vol.% (= 77 % des Gesamtporenraumes) gemessen werden, während unter Vakuum Wasseraufnahmen von 20.4 Vol.% bestimmt wurden. 8.1 Vol.% der Poren besitzt Durchmesser von kleiner 10 µm. Ein Anteil von 10.5 Vol.% weist Porendurchmesser zwischen 10-50 µm auf.

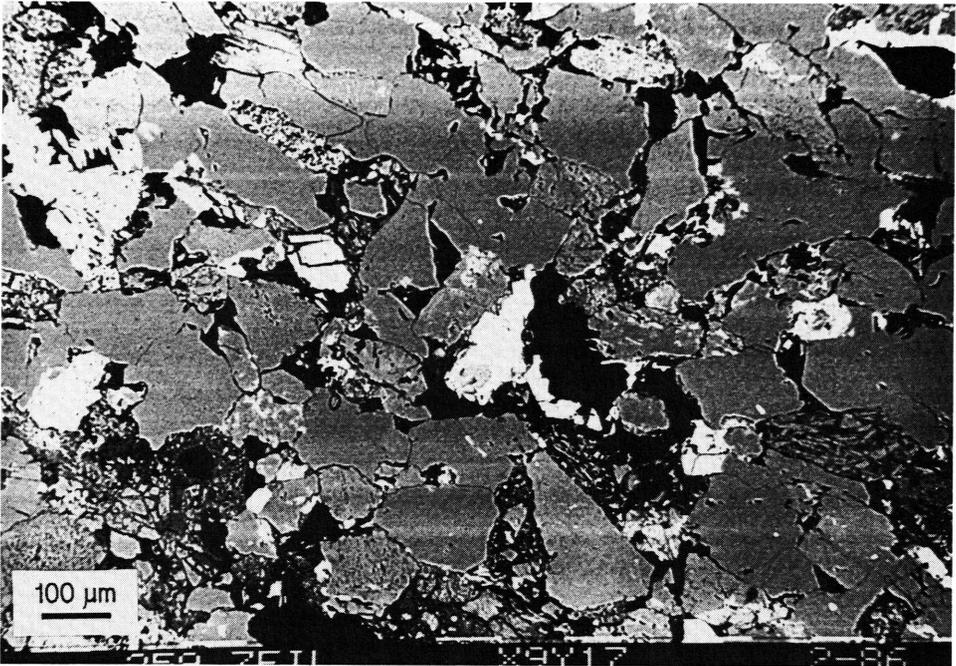


Abb. 4: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Schilfsandstein-Korngefüges im Rückstreukontrast

Die Größenordnung dieser Meßwerte verdeutlicht, daß der Schilfsandstein in hohem Maß offene Porenräume besitzt, die bei Verwitterung Lösungsvorgänge und Stofftransporte begünstigen. Aus der Porengrößenverteilung kann auf beträchtliche Anteile an Mikroporen geschlossen werden, welche eine kapillare Wasseraufnahme begünstigen und damit erhöhte Frostanfälligkeiten des Gesteins bewirken.

An einer rasterelektronenmikroskopischen Aufnahme des Schilfsandstein-Gefüges, Abb. 4, läßt sich dieser für die Gesteinsbeständigkeit bedeutende Sachverhalt verdeutlichen. Unter Verwendung der Rückstreuetelektronen-Technik gelang es, Sandsteingefüge mit einem gegenüber der Lichtmikroskopie gesteigerten Auflösungsvermögen darzustellen und dabei einzelnen Mineralphasen entsprechend ihrer chemischen Zusammensetzung Graustufen zuzuordnen (QUEISSER 1986). Die geringsten Rückstreu-Intensitäten weisen Porenräume, Spalten und Risse auf; sie sind in Abb. 4 schwarz dargestellt. Die Mineralphasen Albit und Quarz zeigen sehr ähnliche Grauwerte. Der Albit läßt sich an Einschlüssen, einem hohen Zerklüftungsgrad sowie an Zwillingsbildungen mit Orthoklas (heller Farbton) erkennen. Durch energiedispersive Röntgenanalyse (EDS) können Befunde direkt am Elektronenmikroskop überprüft und Mineralphasen damit anhand ihrer qualitativen chemischen Zusammensetzung im Schnittbild lokalisiert werden.

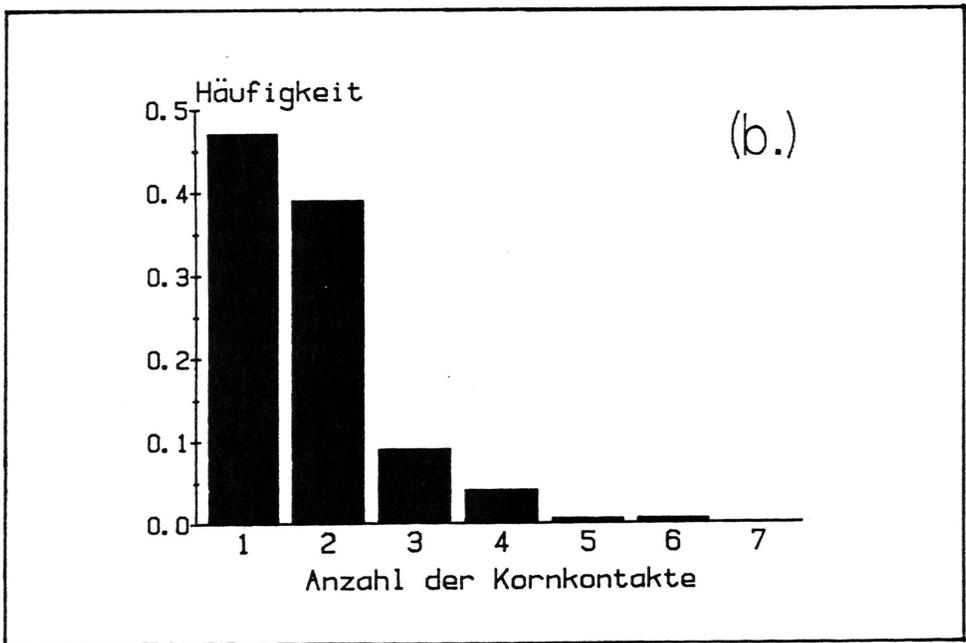
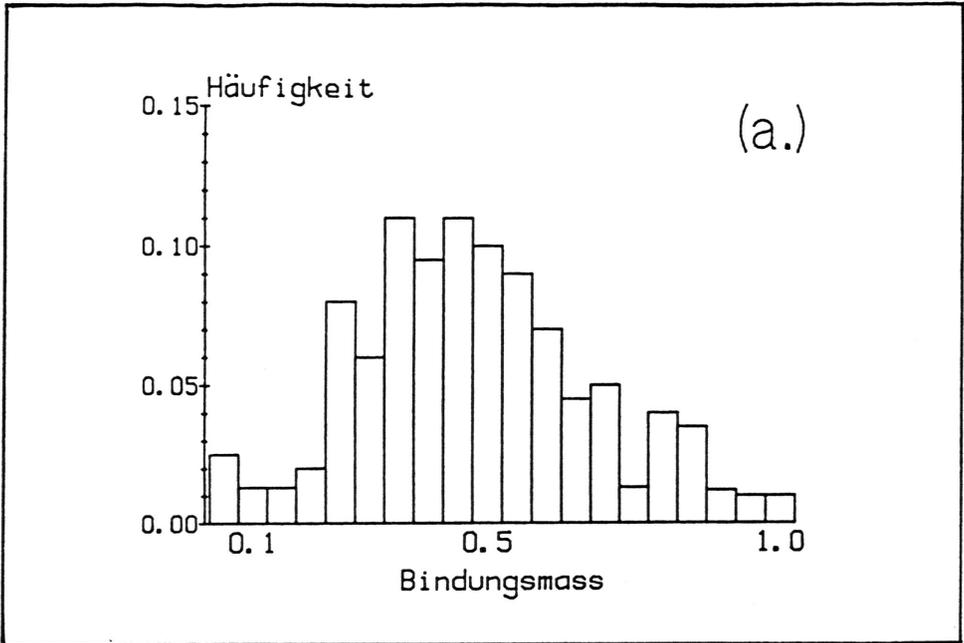
Durch die Fülle verschiedener Mineralphasen liegt im Schilfsandstein eine äußerst komplexe Gefügestruktur vor. Anhand der elektronenmikroskopischen Aufnahmen lassen sich einige grundsätzliche Informationen ableiten und quantifizieren. Die Matrixminerale Kaolinit, Illit und Chlorit/Vermiculit zeigen sich in leicht veränderten Grautönungen als Umwandlungsprodukte angewitterter Feldspäte. Mikroporositäten werden im Bereich dieser Tonmineral-Aggregate deutlich, zeigen sich aber auch als feine Haarrisse, die bevorzugt Feldspäte und Kontakte zwischen Mineralkörnern durchziehen. Form und Ausrichtung einzelner Mineralkörner deuten auf die erwähnten anisotropen Mineraleigenschaften. Natur und Intensität von Kornbindungen nehmen ihrerseits Einfluß auf die Festigkeiten.

Bezüglich der Bindung lassen sich die Merkmale folgendermaßen zusammenfassen: Direkte Kornkontakte zwischen den Mineralen Quarz/Quarz sowie Feldspat/Quarz überwiegen. Tonminerale füllen Hohlräume aus und umschließen häufig grobkörnige Mineralpartikel. Bezüglich der Kornbindung dürfen sie nur unter Vorbehalt als Zement aufgefaßt werden, da im Kontakt mit Wasser aufgrund erhöhter Porosität und Adsorption mindestens mit plastischem Materialverhalten zu rechnen ist. Es bleibt somit festzuhalten, daß die eigentlichen, die Stabilität des Korngefüges bestimmenden Bindungen über direkten Kontakt zwischen den Mineralpartikeln Quarz oder Feldspat aufgebaut werden.

Zur Abschätzung der Intensitäten der direkten Mineralkornbindungen wurden repräsentative, im Rückstreuverfahren aufgenommene rasterelektronenmikroskopische Vergrößerungen ausgewertet. An 1250 Mineralkörnern verschiedener Natursandstein-Gruppen des Bamberger Raumes wurden Kornumfang, Anzahl und Länge der direkten Kornkontakte zwischen den Mineralen Quarz und/oder Feldspat mit Hilfe eines rechnergestützten Bildauswertungssystems quantitativ vermessen (QUEISSER 1986). Trotz der Reduzierung auf die zweidimensionale Bildebene ergab sich im statistischen Vergleich für den Schilfsandstein im bruchfrischen Zustand eine recht intensive Kornbindung bei geringer Anzahl direkter Kornkontakte, vgl. Abb. 5 a/b. Drückt man nach HIRSCHWALD (1908) die Bindungsintensität als das Längenverhältnis zwischen Kornumfang und Kornbindungslänge aus, so sind mit einem mittleren Index von 0.45 etwa 50 % der Kornumfänge an einer direkten Mineralkornbindung beteiligt.

Dieser Sachverhalt erklärt hohe Festigkeitswerte von unverwittertem Schilfsandstein, die sich u.A. in den Rückprall- und Ultraschall-Laufzeit Messungen widerspiegeln (QUEISSER, v. PLATEN & FÜRST 1985).

Abb. 5 a/b: Kornbindungszahl und Kornbindungsintensität von Mineralpartikeln im Schilfsandstein



4. Entfestigung als Folge von Verwitterungseinflüssen

4.1 Erscheinungsformen

Auf die Beschleunigung der Verwitterung an Schilfsandstein-Skulpturen des fränkischen Barocks (Rokoko) hat FÜRST (1974) im Zusammenhang mit der zunehmenden Luftbelastung industrieller Ballungsräume hingewiesen. Die Abbildungen 6 a/b dokumentieren zwei sehr häufig anzutreffende Formen der Schilfsandstein-Verwitterung:

- Am Fürstenportal des Bamberger Domes können im Sockelbereich Absandungserscheinungen beobachtet werden, die mit Fortschreiten der Verwitterung sich zunehmend in die Tiefe verlegen. Oberflächennah zeigen sich vereinzelt weiße Gipskristall-Ausblühungen. Dünnschalige Krusten sind seltener erkennbar.
- Krustenbildungen von 1-2 cm Dicke zeigen sich häufig an regenexponierten Gebäudeteilen und Skulpturen, vgl. Abb. 6. Tiefer liegend verbergen sich Schwächezonen mit höheren Porositäten und Korngefügen, die bis zur vollständigen Entfestigung reichen. Weiße Gipsneubildungen lassen sich in dieser Zone, von Regenauswaschung geschützt, mit der Lupe leicht erkennen.

Wie ENDLICHER (1984) am Beispiel des Regensburger Grünsandsteins und eines Kalksteins des Regensburger Domes aufzeigte, unterscheiden sich Verwitterungskrusten sowohl gefügekundlich wie petrographisch von tiefer liegenden, nicht angegriffenen Gesteinsbereichen. Neben Gipsneubildungen, die stets mit einer Volumenvergrößerung (Salzsprengung) einhergeht, lassen sich Mobilisierungen von Eisenhydroxid-Gelen, opalartiger Kieselsäure und die Absorption von Rußpartikeln beobachten. Fluor-Anreicherungen, die nach der Methode von ACKERMANN (1978) bestimmt wurden, belegen den Einfluß anthropogener Emissionen.

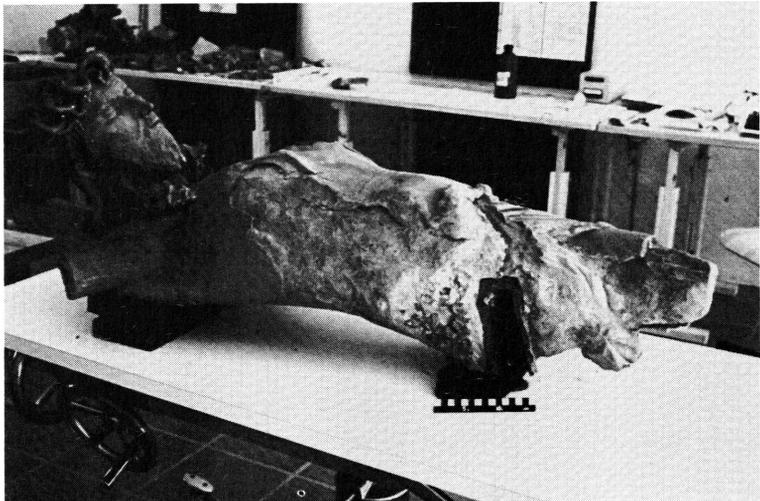
Meßergebnisse über Ansammlungsgeschwindigkeiten von Schwefel- und Kohlenstoffverbindungen im Krustenprofil verbauter schweizer Molassesandsteine, welche vom makroskopischen Erscheinungsbild wie der Verwitterungsanfälligkeit dem Schilfsandstein sehr ähnlich sind, belegen, daß entgegen verbreiteter Vorstellungen (saurer Regen) beim Schadstoffangriff auf Gesteinsoberflächen der Transport und die Zirkulation über die gasförmige Phase (Luft) dominiert (FURLAN & GIRADET 1983, 1987). Dies schließt die Belastung durch Aerosol-Partikel ein.

Der Einfluß des Regenwassers, wie der Feuchtigkeit ganz allgemein, kommt bei der Verteilung und der chemischen Reaktion von Schadstoffen im Gestein eine wichtige Rolle zu. In Abhängigkeit von der Durchfeuchtungsart lassen sich zwei Verteilungsmuster für Gipsbildungen aufzeigen:



Abb. 6 a:
Verwitterter Schilfsandstein am Fürstenportal des Bamberger Domes

Abb. 6 b: Eine in der Außenstelle des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, Schloß Seehof bei Bamberg, Restaurierungsarbeiten unterzogene Skulptur aus Schilfsandstein



- A) Bereiche, die vor direkter Beregnung weitgehend geschützt sind, jedoch von kondensiertem, durchsickern- den oder ablaufenden Regenwasser durchfeuchtet werden, weisen bei dünner Krustenbildung und Absandungserscheinungen oberflächennahe Sulfatanreicherungen in Tiefen zwischen 40 μm und 200-400 μm auf.
- B) Bereiche, die direkt von Regenwasser ausgewaschen werden, zeigen Verschiebungen der Gipsanreicherungen auf Tiefen von 5-20 mm. Es liegen strukturelle Umordnungen im Mineralgefüge vor. Krustenbildung und Abplatzungserscheinungen von 1-2 cm sind charakteristisch.

Beide Arten von "Krustenevolutionen" entsprechen den oben dargestellten häufig anzutreffenden Verwitterungsformen des Schilfsandsteins.

Die Veränderung von Kennwerten oberflächennah durchgeführter Ultraschall-Laufzeit-Messungen folgen diesen Trends: Absandungserscheinungen der Oberflächen zeigen entsprechend den verringerten Kornbindungsintensitäten niedrigere Schallgeschwindigkeiten als die Normwerte, während Krustenbildungen aufgrund ihrer verdichteten Korngefüge eine raschere Fortpflanzung von Ultraschall-Impulsen ermöglichen (QUEISSER 1986). Diese Ergebnisse deuten darauf hin, daß mit Hilfe der Ultraschall-Methode eine zerstörungsfreie in-situ Quantifizierung von Verwitterungszuständen toniger Sandsteine wie der Schilfsandstein meßtechnisch möglich ist. Diesbezüglich weiterführende Untersuchungen werden derzeit am Laboratoire de conservation de la pierre (ETH Lausanne) vorgenommen.

4.2 Vorstellungen zur oberflächennahen Entfestigung

Die Veränderungen des polymineralischen Gesteinsgefüges im Schilfsandstein als Folge der Verwitterung kann sicher nicht ausschließlich im Hinblick auf die Gipskristallisation betrachtet werden, obwohl dieser für die oberflächennahe Entfestigung sicher eine besondere Funktion zukommt. Wie in Abschnitt 3.2 dargestellt, enthält der Schilfsandstein primär keine Mineralanteile, die Calcium während der chemischen Verwitterung in nennenswerten Mengen freisetzen könnte.

Die tonmineralogischen Untersuchungen der Gesteinsmatrix hat jedoch gezeigt, daß mit dem Vermiculit ein quellbares Schichtsilikat vorliegt, das in der Lage ist, zweiwertige Kationen wie das Calcium in sein Zwischengitter einzubauen. Die hohe Ionenaustauschkapazität dieser Tonmineral-Phase läßt den Schluß zu, daß bei einem entsprechenden Angebot an Schwefeldioxid-Anionen Calcium-Ionen aus der Zwischenschicht für eine Gipsbildung freisetzbar sind. Damit würde der Vermiculit eine Katalysator-Funktion im Hinblick auf die Salzkristallisation ausüben.

ENDLICHER (1983) stellte bezüglich der Verwitterung des Regensburger Grünsandsteins fest, daß kaum Erkenntnisse über den Einfluß von CO_2 - und H-Ionenkonzentrationen auf einen "reaktionsfähigen mikrokristallin körnigen Zement", dem die tonige Grundmasse/Matrix des Schilfsandstein weitgehend entspricht, vorliegen. So könnten in gleicher Weise Stickstoffverbindungen (Salpetersäure) in der Lage sein, durch Austauschreaktionen mit der Grundmasse Nitrate zu bilden, die aufgrund hoher Wasserlöslichkeiten im porösen Gesteinskörper sehr mobil sind.

An exponierten Oberflächen verbauter Natursandsteine finden in Abhängigkeit von klimatischen und besonders mikro-klimatischen Gegebenheiten im Laufe der Verwitterung Austauschreaktionen mit der Atmosphäre statt. Der Mechanismus der stetigen Verdunstung von Wassergehalten, die sich entsprechend der jeweiligen Feuchtigkeitszustände ansammeln, bewirken einen nach außen gerichteten Stofftransport mit Ausfällreaktionen von löslichen Komponenten und feinkörnigen Partikeln in den Randzonen. Entsprechend dem Alternieren dieses Vorgangs können sich durch Verdichten der oberflächennahen Korngefüge Krusten ausbilden, die kurzzeitig eine Schutzfunktion übernehmen.

In diesem Zusammenhang wird deutlich, daß die spezifischen Materialeigenschaften grundlegend das Verwitterungsverhalten prägen. Feinkörnige und tonig ausgebildete Natursandsteine sind besonders gefährdet, einem dauernden Trocknungs-Befeuchtungs-Streß zu unterliegen. Quellvorgänge bei Tonmineralen, zumal wenn diese als feine Tonhäutchen Mineralkörner umschließen, scheinen mit fortschreitender Verwitterung die Tendenz zu entwickeln, ursprünglich intakte Kornbindungen aufgrund ihrer Volumenvergrößerung von innen her zu beanspruchen und langfristig gesehen zu entfestigen. In Abb. 7 ist eine solche Auflockerung des Korngefüges am Beispiel einer verbauten Schilfsandsteinprobe aus Schloß Weißenstein bei Pommersfelden dokumentiert. Die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme zeigt im Rückstreukontrast feine, schwarz dargestellte Risse zwischen einzelnen Mineralpartikeln, die das Aufbrechen von Kornbindungen und damit die Lockerung des Korngefüges bei Zunahme der Mikroporosität verdeutlichen. Es ist abzusehen, daß ab einem gewissen Stadium der Entfestigung mit einer rascheren Zunahme des Zerfalls zu rechnen ist und sich Schwächezonen mit geringen Festigkeiten ausbilden.

FELIX (1983) weist bezüglich Wasserempfindlichkeiten toniger Natursandsteine auf die komplexe Verbindung zwischen mineralogischen und strukturellen Faktoren hin: Messungen des isothermen Dilatationsverhaltens ergaben für den Schilfsandstein (Proben aus Sand a.Main) Expansionswerte von 1.10 mm/m senkrecht und 0.72 mm/m parallel zur Schichtung. Als Hauptfaktoren hierfür wird die Präsenz von Tonmineralen oder anderer quellbarer Phasen einerseits sowie

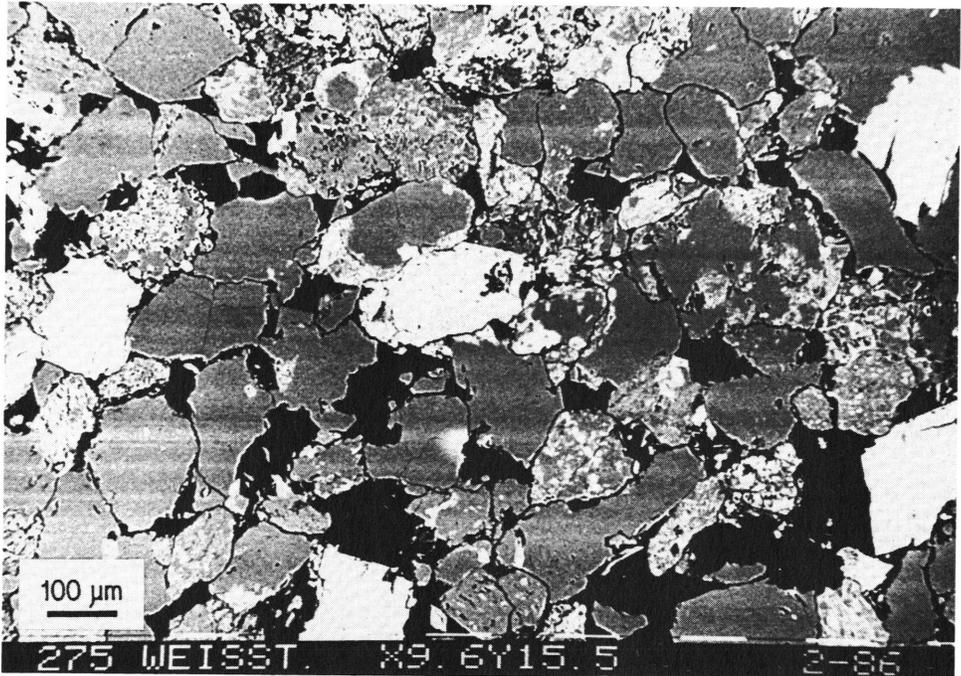


Abb. 7: Korngefüge einer angewitterten Schilfsandsteinprobe aus der Fassade von Schloß Weißenstein bei Pommersfelden; rasterelektronenmikroskopische Aufnahme, Erläuterung s. Text

der strukturell/texturelle Einfluß von Mikroporen mit gerichteter kapillare Druckwirkung andererseits genannt.

Auch das Spannungs-Deformationsverhalten von Natursandsteinen kann nach SCHUH, KLEMM & SNETLAGE (1986) von den tonigen "Coatings" (feine Tonhäutchen, die einzelne Mineralpartikel umschließen) wesentlich modifiziert werden. Die Kenntnis der hygri-schen sowie thermischen Expansion erlaubt zumindest eine Abschätzung von Sandstein-Deformationen. Da sich mit fortschreitender Verwitterung in oberflächennahen Zonen Kornbindungsintensitäten und Porenstrukturen verändern, entstehen gegenüber dem nicht angegriffenen Gesteinsinneren zunehmend größere Unterschiede in den Materialbeschaffenheiten. Damit bauen sich Grenzflächen auf, an denen beträchtliche Scherkräfte entstehen, welche zu Erweiterungen von Rissen, Bildungen von Hohlräumen sowie letztlich zum Abplatzen von Krusten und/oder Absandungserscheinungen führen. Dieser Vorgang setzt sich weiter in das Gesteinsinnere fort und bewirkt schubweise den Substanzverlust des verbauten Werksteins.

Für den Schilfsandstein läßt sich der Ablauf der Verwitterung bis zur Oberflächenentfestigung stichpunktartig etwa folgendermaßen skizzieren:

1. Der frisch gebrochene und in der Regel einige Zeit trocken gelagerte Werkstein erfährt durch das Austrocknen der Tonminerale eine Intensivierung der Kornbindungen und damit eine Festigkeitszunahme.
2. Mit der Durchfeuchtung des Werksteins wird seine Bearbeitung erleichtert; das plastische Verhalten der tonigen Grundmasse setzt seine Festigkeiten herab und verringert die Staubeentwicklung. Je nach Art der Oberflächenbehandlung wird eine Kompaktion des Korngefüges im Außenbereich des Steins erzeugt, die Inhomogenitäten darstellen können. Ebenso hat die Orientierung des sedimentären Schichtungsgefüges Einfluß auf die mechanischen Eigenschaften und Beständigkeiten des verbauten Werksteins.
3. Die einseitige Bewetterung in Verbindung mit den mikroklimatischen Gegebenheiten, zum Beispiel stete Feuchtigkeit in den Nischen eines Bauwerks oder die direkte Beregnung, erzeugen einen speziellen Trocknungs-Befeuchtungs-Streß an der Werkstein-Oberfläche. Die Absorptionseigenschaften der tonigen Grundmasse im Schilfsandstein werden aktiviert.
4. Entsprechend der Evaporationsrate und dem Angebot an löslichen Komponenten setzt ein gerichteter Lösungstransport in Richtung der Gesteinsoberfläche ein, der auch kleine Partikel wie Ruß oder Kolloide einschließt. Aufgrund dieser Veränderungen können sich chemische Aktivitäten entwickeln, die von den hohen Oberflächen feinkörniger Mineralphasen, insbesondere der Tonminerale, begünstigt werden. Der Vermiculit könnte durch den Austausch von Kationen aus der Zwischenschicht für die Salzkristallisation (Gipsbildung) als Katalysator fungieren.
5. Oberflächennahe Korngefüge und Porenstrukturen ändern sich entsprechend der mikroklimatischen Beanspruchung; zwei Erscheinungsformen lassen sich häufig beobachten: In relativ geschützten Bereichen mit hohen Luftfeuchtigkeiten bestehen Tendenzen zur Entwicklung von Absandungserscheinungen. Kornentfestigung führt zum Ablösen von Mineralaggregaten und dünnen Krustenbildungen. Dieser Vorgang wird durch Salzsprengung, wie zum Beispiel Gipsneubildung, intensiviert.
6. Zum anderen zeigen exponierte Gesteinszonen, die einem starken Wechsel von Beregnung und Austrocknen unterliegen, Tendenzen zu Verdichtungen sowie strukturelle Veränderungen infolge von Materialausfällungen. Es bilden sich Gesteinskrusten von ca. 1-2 cm Dicke aus, die dem Auswaschen durch Regenwasser unterliegen. Der kurzzeitige Vorteil dieser oberflächennahen Verfestigung wird sehr bald durch eine tiefer liegende, sich entwickelnde Entfestigung aufgehoben. Im "Schutz" der Krusten-

schicht entsteht ein Feuchtigkeits- und Reaktionsmilieu, das ähnlich wie bei Ansandungserscheinungen zur Kornentfestigung führt. Gipsbildungen sind in diesem tieferen Bereich anzutreffen. Zunehmende Unterschiede in den Festigkeitseigenschaften bedingen Scherkräfte, die zum Abplatzen der dichten Krusten führen.

7. Nach eingetretenem Materialverlust wirken die gleichen Verwitterungsmechanismen auf den nächst tiefer liegenden Gesteinsbereich und setzt damit den Angriff auf den Sandstein fort.

5. **Schlußfolgerungen im Hinblick auf die Schadensminimierung und Schutzmaßnahmen**

Wie die Diskussion der Verwitterungsabläufe im Schilfsandstein zeigt, stellen oberflächennahe Gesteinsfestigungen mehr oder weniger "natürliche" Reaktionen auf bestehende mikroklimatische Bedingungen dar. Verbaute Natursandsteine haben, wie andere Werkstoffe auch, eine bestimmte Lebensdauer, die durch verschiedene Risikofaktoren herabgesetzt werden kann. Damit wird deutlich, daß die Forderung der Denkmalpflege nach dem Erhalt des Originals nur in begrenztem Maß erfüllbar ist.

Aus den dargelegten Untersuchungen zur mineralogischen Beschaffenheit des Schilfsandsteins lassen sich im Hinblick auf die Schadensminimierung eine Anzahl von Schlußfolgerungen und Empfehlungen ableiten:

- Entsprechend baulichen und mikroklimatischen Gegebenheiten sind Objekte aus Schilfsandstein, die hohen oder stark wechselnden Luftfeuchtigkeiten ausgesetzt sind, gefährdet. Es muß also das Ziel sein, den Trocknungs-Befeuchtungs-Streß so gering wie möglich zu halten.
- Hydrophobierungen von Gesteinsoberflächen sind vielleicht ein Schritt in die richtige Richtung. Es stellt sich für den Schilfsandstein jedoch die grundlegende Frage, wie vertragen sich organische Lösungsmittel mit der anorganischen, äußerst reaktionsfähigen Grundmasse des Gesteins. So haben eine ganze Reihe solcher organischer Moleküle (Alkohole, Benzole, Chlor-Wasserstoff-Derivate usw.) die Tendenz zum irreversiblen Einbau in die kristallinen Zwischenschichten von Tonmineralen, ein Effekt, der zum röntgenographischen Nachweis von Schichtsilikaten ausgenutzt wird. Dabei zeigen quellbare Phasen die orientierte Aufweitung in Richtung der kristallographischen c-Achse.
- Die gleiche Einschränkung gilt für Schutzanstriche, die organische Lösungsmittel enthalten.

- Ein oberflächennahes Verschließen von Porenräumen behindert die "Atmung" des Natursteins. Es besteht die Gefahr der Ausbildung von Feuchte-Staus und einer Kornentfestigung als Folge von Frostsprengung (Volumenausdehnung des kondensierten Wassers unterhalb des Gefrierpunkts). Schutzanstriche oder Putze müssen daher eine auf das Gestein eingestellte Wasserdampfdurchlässigkeit besitzen.
- Gesteinskonsolidierungen auf der Basis von Kunstharzen bzw. verschiedener polymerer Verbindungen erzeugen häufig Festigkeiten, die weit über den natürlichen Kennwerten des Schilfsandsteins liegen. Änderungen in der Porenstruktur durch Verfüllung mit Festigern bewirken Materialeigenschaften mit neuen Schwierigkeiten: zum Beispiel einem Aufbau hoher Spannungs- und Scherkräfte als Folge der um den Faktor 10 größeren thermischen Volumenausdehnung von Polymeren im Vergleich zum Natursandstein.
- Das Eindringen auch der niedrigst-molekularen Polymerketten orientiert sich an Gesteinsinhomogenitäten: Die so entstandenen neuen Grenzflächen sind Ausgangspunkt für Entfestigungen bei Wiederbeanspruchung. So können oberflächenbehandelte wie "vollgetränkte" Schilfsandstein-Objekte Spannungsrisse zeigen, die entlang solcher Schwachzonen bevorzugt auftreten.
- Geht man von den bestehenden Immissionsbelastungen unserer Umwelt, deren Herabsetzung natürlich wünschenswert wäre, aus, so muß an den exponierten Außenschichten mit Anreicherungen verschiedener Anionenkomplexe gerechnet werden. Zur Salzkristallisation führende Kationenangebote sollten daher so gering wie möglich gehalten werden. Gerade im Hinblick auf die Gipsneubildung im Schilfsandstein erscheint es wahrscheinlich, daß Calcium-Ionen aus Mörteln oder carbonatischen Lösungen über die tonige Grundmasse absorbiert und wieder freigesetzt werden können.

Die skizzierten Einschränkungen machen deutlich, daß es im Hinblick auf möglichst lang andauernde Erfolge von Schutzmaßnahmen für den Schilfsandstein und vergleichbare Gesteinsgruppen von grundlegender Bedeutung ist, die Reaktionsfähigkeit der tonigen Matrix in die Dynamik des porösen Korngefüges einzubeziehen und zu verstehen sowie Nebenwirkungen, die durch den Einsatz organischer Chemikalien auftreten, zu quantifizieren.

6. Zusammenfassung

An historischen Baudenkmalern und Skulpturen verbaute Schilfsandsteine aus dem Raum Bamberg weisen ein feinkörniges, polymineralisches Gesteinsgefüge mit besonderen chemischen und mechanischen Materialeigenschaften auf.

Ultraschallmessungen sowie röntgentomographische Schnittbilder, beides zerstörungsfreie Prüfmethode, lassen bereits in unverwitterten Proben Inhomogenitäten erkennen.

Gesteinsfestigkeiten im Schilfsandstein werden primär über direkte Kornbindungen zwischen Quarz- und/oder Feldspatpartikeln aufgebaut. Offene Porenräume, Mikrorisse sowie hohe Anteile an toniger Grundmasse, welche häufig die Mineralpartikel umschließen, beeinflussen das Verwitterungsverhalten des Gesteins grundlegend.

Hauptsächlich lassen sich zwei Formen oberflächennaher Entfestigung an verwitterten Skulptur- und Werksteinen aus Schilfsandstein beobachten, die offenbar in Verbindung mit mikroklimatischen Gegebenheiten stehen. Die Natur der tonigen Grundmasse bewirkt überdurchschnittliche Feuchtigkeitsaufnahmen. Neben anderen Schichtsilikaten enthält sie die quellbare Tonmineralphase Vermiculit, welche besonders durch ein hohes Kationenaustauschvermögen für chemische und mechanische Reaktivitäten des Schilfsandstein von Bedeutung sein dürfte. Ihre direkte katalytische Beteiligung an Austauschreaktionen, welche zur Salzkristallisation - häufig in Form von Gipsneubildung - führen, wird für möglich gehalten, da primär im Gestein keine nennenswerten Calcium-Konzentrationen vorliegen.

Schilfsandstein ist in erster Linie im Trocknungs-Befeuchtungs-Streß verwitterungsgefährdet. Um diese "natürliche" Anfälligkeit bei Schutzbehandlungen mit chemischen Substanzen nicht noch zu vergrößern, wird im Hinblick auf Sanierungsmaßnahmen empfohlen, den außergewöhnlichen Reaktivitäten der tonigen Grundmasse innerhalb der Dynamik des porösen Korngefüges einen ausreichend hohen Stellenwert zuzuordnen.

Danksagung

Die mineralogischen und gesteintechnischen Untersuchungen konnten im Rahmen des DFG-Forschungsprojekts "Prallhammer- und Ultraschall-Kennzahlen an Baudenkmalern Bambergs" im Institut für Geowissenschaften der Johannes Gutenberg-Universität Mainz durchgeführt werden. In diesem Zusammenhang möchte ich Herrn Prof. Dr. H. v. Platen und Herrn Prof. Dr. M. Fürst sowie Herrn Prof. Dr. D. Heim (emeritus) für die vielfältigen Unterstützungen meinen aufrichtigen Dank sagen. Herrn und Frau Kost bin ich für die Durchführung der naßchemischen Analysen dankbar. Herrn Prof. Dr. V. Furlan, Direktor des Laboratoire de conservation de la pierre der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne, verdanke ich viele Anregungen zur Konservierungsproblematik. Dem Naturwissenschaftlichen Verein Regensburg e.V. und seinem Vorsitzenden, Herrn Dr. H. Ackermann, danke ich für die Redaktion und Drucklegung dieses Beitrages.

Literatur

- ACKERMANN, H. (1978):
Fluorine Determination in Minerals, Rocks and Raw Materials. - Interceram Nr. 4.
- BERGER, K., MEYER, R. & SCHMIDT-KALER, H. (1981):
Keuper und Jura nördlich der Alpen. - Erläuterungen zur Geol. Karte von Bayern 1 : 500.000, hsg. Bayer.Geol.Landesamt, 49 - 61.
- BRINDLEY, G.W. & BROWN, G. (1981):
Crystal structures of clay minerals and their identification. - Mineral.Soc., London, Monograph No. 5, 495 p.
- DEER, W.A., HOWIE, R.A. & ZUSMAN, J. (1978):
An Introduction to the Rockforming Minerals. - 11 th impression, Longman Group, London, 528p.
- ENDLICHER, G. (1984):
Petrographisch-mineralogische Untersuchungen der Bausteine und Verwitterungskrusten des Regensburger Domes. - Acta Albertina Ratisbonensia, Bd. 42, S. 53 - 80.
- FELIX, C. (1984):
Essais de dilatation linéaire isotherme par absorption d'eau sur des grès. - Chantiers/Suisse, Vol.15, 12/84 p. 1171 - 1176.
- FÜCHTBAUR, H. (1985):
Sediment-Geologie I, Skrit A - Sandsteine. - Ruhr-Universität Bochum, Inst. f. Geologie (Maschenschrift).
- FÜRST, M. (1974):
Die Dynamisierung von Verwitterungserscheinungen an Skulpturen des fränkischen Barocks (Rokoko) und ihre Deutung. - Geol.Bl.NO-Bayern, Bd. 24, Heft 1/2, S. 156 - 166.
- FÜRST, M. & SANTOWSKI, G. (1985):
Natursteine historischer Baudenkmäler Bambergs und seiner Umgebung. - Geol.Bl.NO-Bayern, 34/35, S. 563 - 601.
- FURLAN, V. & GIRADET, F. (1983):
Überlegungen zur Aufnahmegeschwindigkeit und zur Verteilung schwefelhaltiger Schadstoffe in Naturstein im Freien. - International Conference "Material Science and Restoration" Technische Akademie Esslingen, S. 285 - 290.

- FURLAN, V. & GIRADET, F. (1987):
Vitesse d'accumulation des polluents soufrés sur les pierres en oeuvre. - ICOMOS 8th General Assembly and International Symposium "Old Cultures in New Worlds", Symposium Paper Vol.II, p.293-298.
- HIRSCHWALD, J. (1908).
Die Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihre Wetterbeständigkeit. - Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 675 S.
- LANG, G. (1985):
Quellenforschungen zu historischen Steinbrüchen im Bamberger Raum. - Bericht zum Forschungsprojekt "Prallhammer- und Ultraschallkennzahlen an Baudenkmalern Bambergs" der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Bonn - Bad-Godesberg, (Maschinenschrift) 46 Seiten.
- QUEISSER, A., v.PLATEN, H. & FÜRST, M. (1985):
Rebound and ultrason investigations on freestones of Bamberg area, F.R.Germany. - Proceedings of "V th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone", 25.-27.9.1985 Lausanne, Presses Polytechniques Romandes Vol.1, p.79-86.
- QUEISSER, A. (1986):
Geotechnische und mineralogische Bewertung von Natursandsteinen aus dem Raum Bamberg. - Dissertation am Fachbereich Geowissenschaften der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, (Maschinenschrift) 153 S., 50 Abb., 36 Tab.
- QUEISSER, A. (1988):
Zerstörungsfreie Materialuntersuchungen an Natursandsteinen mittels Computer-Tomographie. - Bautenschutz & Bautensanierung, Heft 2, 1988 (in Druck).
- SANTOWSKI, G. (1984):
Korngrößenverteilung, Mineralbestand und technische Meßdaten von Bausandsteinen des Bamberger Raumes. - Dissertation am Fachbereich Geowissenschaften der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, (Maschinenschrift) 149 S., 70 Abb., 26 Tab.
- SCHUH, H., KLEMM, D.D. & SNETLAGE, R. (1986):
Festigkeits- und Verformungseigenschaften ausgewählter Sandsteine. - 2. Internationales Kolloquium "Werkstoffwissenschaften und Bausanierung", 2.-4. September, Technische Akademie Esslingen, S. 403 - 408.