

PETROGRAPHISCH-MINERALOGISCHE UNTERSUCHUNGEN

DER BAUSTEINE UND VERWITTERUNGSKRUSTEN DES REGENSBURGER DOMES

von

Gernot Endlicher⁺⁾ ZUSAMMENFASSUNG

Für die Verwitterung von Bausteinen haben neben dem Einfluß schwefeldioxidischer Luftverunreinigungen auf den Chemismus Gesteinsparameter eine vorrangige Bedeutung.

Es werden hier die petrographisch-mineralogischen und gefügekundlichen Merkmale der Bausteine des Regensburger Domes sowie ihrer Verwitterungskrusten erfaßt, die Aussagen über die Bildungsweise dieser Krusten und die damit verbundene Gesteinszerstörung erlauben.

Die chemische Analyse des Krustenmaterials auf die Hauptelemente und die Schadstoffe Schwefel und Fluor lassen Schadstoffkonzentrationen in der Atmosphäre i.e. Immissionen sowie Zusammenhänge zwischen Bausteinverwitterung und Anlagerung der Krusten erkennen.

ABSTRACT

Atmospheric sulphur pollution is most effective on the deterioration of building materials. Nevertheless rock parameters may be of as great an influence.

This paper describes the petrographical, mineralogical and fabric features of the building stones and the black crusts of the Regensburg Cathedral. The results yield data on the genesis of the crusts and weathering phenomena.

Chemical analysis of crust material reveals by the concentration of air pollutants uptakes of fluorine beside sulphur dioxide. The relation between formation of the crusts and corrosion of the stones can also be shown.

INHALTSVERZEICHNIS

	<u>Seite</u>
Zusammenfassung	53
Abstract	53
1. Einleitung	54
2. Die Bausteine in der Baugeschichte	55

⁺⁾ Dr. Gernot Endlicher, Staatliches Forschungsinstitut für angewandte Mineralogie, Kumpfmühler Straße 2, 8400 Regensburg

	<u>Seite</u>
3. Herkunft der Bausteine	57
4. Petrographische Ausbildung der Bausteine	58
4.1. Kalksteine	58
4.2. Grünsandsteine	61
5. Verwitterungskrusten	63
5.1. Allgemeines	63
5.2. Gefügemerkmale der Krusten	64
5.3. Mineralogische Merkmale der Krusten	68
6. Diskussion der Ergebnisse	70
6.1. Chemische Verwitterung der Bausteine	70
6.2. Krustenbildung und Gesteinszerstörung	74
7. Schlußwort	76
Literaturverzeichnis	77

1. EINLEITUNG

Wie fast alle mittelalterlichen Bauwerke so zeigt auch der Regensburger Dom, das eindruckvollste Zeugnis gotischer Baukunst in Süddeutschland, einen teilweise besorgniserregenden Zerfall seiner Bausteine.

Dieser Steinzerfall ist die unausweichliche Folge physikalischer und chemischer Reaktionen zwischen Gesteinen und Atmosphäre. Von den in der Luft von Industriegebieten und Großstädten vorhandenen Komponenten CO_2 , SO_2 , SO_3 , NO_x (Nitrit, Nitrat), PO_4 , Cl und NH_4 -Verbindungen, werden vor allem schwefeldioxidhaltige Verbindungen für die Verwitterung verantwortlich gemacht.

Die Zusammenhänge zwischen Bauwerkschädigungen und dem in Rauchgasen enthaltenen Schwefel sind schon sehr früh erkannt worden (KEEPE 1683). Die zunehmende Belastung der Luft mit Schadstoffen infolge von Industrialisierung, Motorisierung, Bildung von Ballungsräumen und nicht zuletzt auch durch die Freisetzung von Gasen bei dem massiven Einsatz von Sprengstoffen in den beiden Weltkriegern haben allgemein die Verwitterung von Baudenkmalern seit etwa hundert Jahren rapide beschleunigt.

Erste Maßnahmen, um dem Zerfall am Regensburger Dom Einhalt zu gebieten, wurden von dem Dombaumeister Dr. Schmitz aus Nürnberg im Jahre 1924 ergriffen. Die Ergebnisse langjähriger Versuche (DREXLER 1929, ZAHN 1936) wurden damals nur teilweise positiv beurteilt. Befürchtungen, daß sich die künstlichen Schutzschichten als Feuchtigkeitsfallen entpuppen und damit die Verwitterung nur beschleunigen könnten (u.a. LILL 1936, ZAHN & DREXLER 1937), haben sich nach heutigen Kenntnissen (z.B. GAURI et al. 1973, SERRA & STARACE 1978) leider weitgehend bestätigt. Die Verwitte-

rung hat zu weiteren gravierenden Schäden geführt. Laut Dombaumeister TRIEBE nehmen sie seit etwa fünfzehn Jahren in auffälliger Weise zu.

Wenn auch dem Einfluß schwefeldioxidischer Luftverunreinigungen auf den Gesteinschemismus in der Regel größte Bedeutung beigegeben wird, so können nach NIESEL (1979) unter Umständen andere Faktoren, vor allem Gesteinsparameter, eine noch größere Rolle spielen. Lokal gewonnene Ergebnisse dürfen angesichts der vielfältigen Faktoren nicht ungeprüft auf andere Bauwerke übertragen werden.

Die vorliegende Arbeit widmet sich deshalb neben der Herkunft der petrographisch unterschiedlichen Werksteine und ihrer Verteilung am Bauwerk in besonderem Maß der Erfassung der mineralogisch-petrographischen und gefügekundlichen Merkmale der Bausteine sowie der ihnen auflagernden Krusten. Hieraus und aus den Ergebnissen von chemischen Untersuchungen (ENDLICHER 1984) lassen sich Aussagen gewinnen über die Verwitterungsanfälligkeit der verschiedenen Bausteintypen, den Zusammenhang zwischen Bausteinverwitterung und Krustenbildung und den Einfluß von Schadstoffen in der Atmosphäre.

Für die Bereitstellung des Probenmaterials und wichtige Informationen sei Herrn Dombaumeister R. Triebe ganz besonders gedankt. Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Dr. Ackermann für die Betreuung der chemischen Analysengänge.

2. DIE BAUSTEINE IN DER BAUGESCHICHTE

Die ältesten am Regensburger Dom erhaltenen Bauteile sind der sogenannte Eselsturm und Fundamentteile des Kapitelhauses, die Reste des im frühen 11. Jahrhundert erbauten westlichen Querhauses des karolingischen Domes darstellen. Sowohl aus verkehrstechnischen Gründen als auch aufgrund der guten Verarbeitbarkeit fand ausschließlich ein heller massiger Kalkstein Verwendung, wie er schon von den Römern zum Bau der Castra Regina eingesetzt wurde.

Der Bau der gotischen Kathedrale, dessen Beginn bald nach dem Jahre 1254 erfolgt sein muß (Informationsquelle: SCHNELL Kunsthändler Nr. 41), vollzog sich dann in mehreren Abschnitten.

Bis um 1325 war die gesamte Ostseite mit den drei Chören, das Querhaus und das erste Joch des Langhauses fertiggestellt. In der Mitte des 14. Jahrhunderts wurde der Südturm begonnen und gegen Ende des selben Jahrhunderts (nach 1384) der Nordturm sowie der Mitteltrakt mit Hauptportal. Bis zur Fertigstellung des dritten Obergeschosses des Südturmes (1436), hatte entsprechend der mittelalterlichen Bauweise, nämlich tragende Teile wie Sockel, Pfeiler und Strebebögen sowie Sichtbares aus Kalkstein zu bauen und nur für Füllmauerwerk Sandstein zu verwenden, bisher ausnahmslos Kalkstein gedient. Ab etwa 1430 wurde jedoch bereits

beim Bau der oberen Geschosse des Nordturmes - das zweite Obergeschoß war um 1480, das dritte wurde in der Zeit von 1486 bis Anfang des 16. Jahrhunderts vollendet - sowie beim Bau des Mitteltraktes zwischen den beiden Türmen und des westlichen Langhauses Grünsandstein in tragender Funktion mitverwendet. Dies dürfte nach TRIEBE als Zeichen dafür zu werten sein, daß zu diesem Zeitpunkt der Kalkstein aus den bisherigen Brüchen zur Neigung.

Grünsandsteinquader in Sockelbereichen hingegen, wie z.B. an der Nordostecke des Domes, am Nordchor, werden auf Ausbesserungsarbeiten im 19. Jahrhundert zurückgeführt.

Als nach einigen Bauunterbrechungen im Jahre 1525 der Dom bis zum Ansatz der Turmhelme fertiggestellt war, und der Bau zu jener Zeit aufgrund der wirtschaftlichen und politischen Lage ganz eingestellt werden mußte, setzte sich der mittelalterliche Baubestand aus etwa 2/3 Kalkstein und 1/3 Grünsandstein zusammen.

Bis zu Anfang des 17. Jahrhunderts stoppte die Bautätigkeit völlig. Mit der Stiftung zweier Marmoraltäre durch Bischof Albert IV. von Törring (1613 - 1649) setzte zunächst die Innenausstattung ein, die am Ende des 18. Jahrhunderts zu einer reinen Barockisierung des Domes geführt hatte. In der Zeit unter König Ludwig I, wurden jedoch im Zuge einer Regotisierung alle barocken Werke bis auf den Hochaltar entfernt bzw. verändert.

Der Ausbau der noch unvollendeten gotischen Domtürme wurde erst 1859 auf Betreiben von Bischof Ignatius von Senestrey wieder in Angriff genommen. Bis 1869 waren Oktogongeschoße und die Turmkappen aufgesetzt und 1872 waren Querhausgiebel und Dachreiter über der Vierung und damit schließlich der Dom vollendet.

Für diese baulichen Maßnahmen hatte man ab 1860 vorwiegend Grünsandstein zum Ausbau der Fronttürme und des Querhauses, sowie den sog. Pfalzler zum Ausbau des Oktogongeschosses des Südturmes verwandt. Die Gründe dürften sowohl in der Unbrauchbarkeit des Kalksteins aus dem bisherigen Bruch (s. 3), als auch in der Entdeckung eines neuen Grünsandsteinvorkommens bei Ihrlerstein sowie in der leichteren Bearbeitung des Grünsandsteins zu suchen sein.

Das Verhältnis Kalkstein/Grünsandstein hatte sich umgekehrt und betrug nun 1:2. Damit aber waren ohne es zu ahnen, die Folgeschäden schon vorprogrammiert.

Denn bereits gegen Ende des 19. Jahrhunderts zeigten sich starke Verwitterungserscheinungen, die laufende Reparaturarbeiten unumgänglich machten. Die zuletzt errichteten Turmhelme und -krabben mußten schließlich (1954/58) durch Beton ersetzt werden, da sie nicht nur bis zur Unkenntlichkeit verwittert waren, sondern auch eine Gefährdung darstellten.

3. HERKUNFT DER BAUSTEINE

Die Gebiete, welchen die genannten Bausteine entstammen, befinden sich donauaufwärts im Westen von Regensburg in transport-technisch günstiger Lage.

Für die Kalksteine nimmt man mit gutem Grund an, daß sie aus dem riesigen, seit Jahren stillstehenden Bruch am Ziegelstadelberg SW' Kapfelberg gewonnen wurden, der mit großer Sicherheit schon in römischer Zeit angelegt worden war (RIEGER 1954). Ein Indiz hierfür liefern noch einige stark bemooste, behauene Gesteinsquader mit Ausmaßen von etwa 60 x 60 x 120 cm, die Greiflöcher vermutlich für römische Hebegeräte aufweisen.

Die zeitweilige Mitverwendung von Grünsandstein nicht nur am mittelalterlichen Dom, sondern bereits in der Römermauer, könnte sehr gut auch durch die dortigen geologischen Verbandsverhältnisse speziell die Überlagerungen der Kalksteinabfolge durch Grünsandstein erklärt werden.+)

Die zunehmende Verwendung des Grünsandsteins in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts dürfte letztlich auch eine Folge des Bergsturzes am 28. März 1831 sein, bei welchem nicht nur die Abbaustellen verschüttet, sondern auch der Kalkstein im gesamten Bereich des Ziegelstadelberges kataklasiert und somit als Baustein wertlos wurde (s. HASSELMANN 1888, 1892, in RUTTE 1962).

Die am Regensburger Dom verwendeten Grünsandsteine lassen sich drei verschiedenen Herkunftsgebieten zuordnen:

- dem Gebiet um Bad Abbach ("Abbacher"-Grünsandstein), wozu auch die östlich Kapfelberg gelegenen Brüche zu zählen sind,
- dem Steinbruch bei Ihrlerstein ("Ihrler-Grünsandstein) und
- dem Gebiet von Schwetendorf-Pettendorf ("Pfalzler").

+) Im unteren Teil des Bruches stehen dickbankige bis massige jurassische Kalke der Kelheimer Fazies (Malm-Zeta 1, tiefere Ulmensis-Schichten, RUTTE (1962) an, die eine Mächtigkeit von mehreren Zehnermetern erreichen und mit dünnbankigen Lagen im Wechsel stehen. Im Westteil folgt ins Hangende ein wenige Meter mächtiger Horizont dünn gebankter und plattiger Kalke (Plattenkalke).

Diskordant auf den Jurakalken lagern mit mehreren Metern aufgeschlossene obercenomane Grünsandsteine. Zwischen Jura und Obercenoman eingeschaltet, treten vor allem im Ostteil Schutzfelsschichten in Spalten und Hohlräumen (sedimentäre Gangfüllungen) auf.

Seiner stratigraphischen Stellung nach ist der als "Regensburger Grünsandstein" (Gümbel 1854) bezeichnete Gesteinstyp in das mittlere und obere Cenoman einzustufen (s. OSCHMANN 1958). Als Baustein wurde aber von dem aus zwei petrographischen Einheiten bestehendem Schichtglied praktisch nur der "Untere Glaukonit-Kalk-Sandstein" (Grünsandstein i.e.S.) gebrochen.

Aus dem Bad Abbacher Gebiet sind vor allem die Brüche am Mühlberg, am Galgenberg NW' Kalkhof, bei Oberndorf und E' und SW'-Kapflberg zu nennen.

Für den "Ihrler"-Grünsandstein kommt hauptsächlich der Bruch W' Ihrlerstein in Frage, der früher Material für zahlreiche bekannte Bauwerke in Bayern lieferte (u.a. Staatsbibliothek, Neue Residenz in München, Treppenaufgang zur Befreiungshalle) und aus welchem in den letzten Jahren wieder Restaurierungsmaterial für die Alte Pinakothek und den Bau der Neuen Pinakothek in München gewonnen wurde. Ein weniger bedeutender Bruch liegt ungefähr 1 km N' Ihrlerstein.

Die Brüche des "Pfalzlers", die heute nahezu völlig verstürzt und überwachsen sind, konzentrieren sich NW' Regensburg im Gebiet zwischen Pettendorf, Schwetendorf und Reifenthal. Es sind i.w. drei große, dem Schichtausbiß folgende längsgestreckte Steinbruchgebiete zwischen Pettendorf und Schwetendorf, 500 m E' Schwetendorf und NE' - E' und SE' Reifenthal. Weitere, isoliert auftretende Steinbrüche werden von BAUBERGER, CRAMER und TILLMANN (1969) genannt.

4. PETROGRAPHISCHE AUSBILDUNG DER BAUSTEINE

Die Bausteinproben stammen aus den untersten Partien der verschiedenen Seiten des Domes. Von den Kalksteinen standen Bohrkerne (\emptyset 2 cm, Länge 3,5 cm) und kleine herausgemeißelte Stücke (ca. 4 x 5 x 1,5 cm), von den Grünsandsteinen i.w. Originalteile aus dem Depot zur Verfügung (s. Tab. 1 und 2).

4.1 Kalksteine

Die untersuchten Kalksteine sind von weiß-erdiger oder gelblich-grauer Farbe, teilweise mit unregelmäßig fleckiger Rotbraunfärbung durch eisenoxidische Verbindungen und besitzen meist ein fein- bis mittelporiges Gefüge. Kalkige Organismenkomponenten bis zu mehreren Millimetern Größe sind fast stets vorhanden und können in den massig aussehenden Kalksteinen eine Schichtung andeuten. Die Korngröße der Komponenten ist größeren Schwankungen unterworfen (s.u.).

Mikrofaziell stellen die Kalksteine durchwegs komponentenbetonte Typen (Spatite) dar. Gemeinsame textuelle Merkmale sind ein Komponentenanteil von 80 Vol. % und ein mikro- bis feinmakrokristalliner (0,01 - 0,3 mm) Kalzitcement, bei welchem sich prinzipiell ein älterer, feinkörnig palisadenartiger Zement A von

Tabelle 1: ÜBERSICHT DER ENTNAHMEORTE UND BAUZEITLICHE EINSTUFUNG DER BAUSTEINPROBEN

<u>Bausteine</u>	<u>Probennr.</u>	<u>Entnahmeort</u>	<u>baueitl. Einstufung</u>
Kalksteine	K 1	E-Seite, Sockel	um 1300
	K 2	S-Seite, Südportal	15. Jahrh.
	K 3	W-Seite, Nordturm 6 m ü. Sockel	14. Jahrh.
	K 4	W-Seite, Nordportal	15. Jahrh.
	K 5	E-Seite, Nordost-Pfeiler	um 1300
	K 6	W-Seite, Nordturm Erogeschroß	15. Jahrh.
	K 7	W-Seite, Portalbereich	15. Jahrh.
Grünsandsteine			
"Abbacher"	G 1	Depot	-
"Irrler"	G 2 A	Depot	-
"	G 2 B	W-Seite, Bereich ü. Kalkstein (Depot)	Mittelalter
"Pfalzier"	G 3 A	Depot	-
"	G 3 B	NE-Seite, Nordturm Sockel	19. Jahrh.

Tabelle 2: ÜBERSICHT DER ENTNAHMEORTE DER PROBEN VON VERWITTERUNGSKRUSTEN

<u>Verwitterungs- krusten auf</u>	<u>Probennr.</u>	<u>Entnahmeort</u>
Kalkstein	KK 1	S-Seite, Mitte, Südportal
	KK 2	S-Seite, westlich Südportal (kleine Pforte)
	KK 3	W-Seite, Nordturm 6 m ü. Sockel
	KK 4	S-Seite, östlich Südportal
	KK 5	W-Seite, südliches Portal
Grünsandstein	KG 1	W-Seite, südliches Portal
	KG 2 B	W-Seite, Bereich ü. Kalkstein (Depot)
	KG 3	E-Seite, Mitte Sockelbereich
	KG 4	S-Seite, westlich Südportal (kleine Pforte)
	KG 5	S-Seite, östlich Südportal
	KG 6	S-Seite, Mitte, Südportal
	KG 7	S-Seite, westlich Südportal (kleine Pforte)

einem jüngeren, gröber kristallischen Hohlraumzement B unterscheiden läßt. Eine meist nicht vollständige Zementation (s. Taf. 1, Abb. 1) größerer Komponentenzwischenräume bedingt maßgeblich die Porosität (ENDLICHER 1984). Stärkere Um- und Sammelkristallisationen erschweren jedoch bereichsweise eine Unterscheidung von Komponenten und Zement.

Nach Art und Anteil der Komponenten und der Korngröße können folgende mikrofazielle Ausbildungen unterschieden werden:

I. Biogenkalke (Biospatite: K 1, K 2)

- Komponenten:
- überwiegend biogene Organismenhardtteile (Echinodermen, Crinoiden, Lamellibranchiaten u.a. Bivalven, Gastropoden, Foraminiferen in wechselnden Anteilen) mit längstem $\emptyset > 1$ cm. Die Korngrößenklasse > 2 mm nimmt etwa 20 Vol. % ein.
 - stark untergeordnet rundliche Partikel aus kryptokristallinem Kalzit. Häufigster Korndurchmesser schwankt zwischen 0,9 und 0,22 mm, der maximale \emptyset wurde mit 1,2 mm gemessen. Diese Partikel bilden in Teilgefügen die Matrix, Zement und Komponenten sind dann nicht mehr zu unterscheiden. In diesen Bereichen weicht das Mikrogefüge deutlich von dem typischer Biospatite ab.
- Zement:
- mikrokristallin körniger Kalzit, 10 - 20 Vol. %

II. Partikelkalke, speziell Übergänge zwischen Intraspatiten und Biospatiten:

1. Biointraspatite (K 5, K 6):

- Komponenten:
- überwiegend Organismenhardtteile mit längstem \emptyset bis 5 mm.
 - zurücktretend Intraklasten aus kryptokristallinem Kalzit, häufig mit mikrokristallinen Kernen, vereinzelt Ooide. Korngröße: i.M. um 0,5 mm, max. ca. 2 mm
- Zement:
- mikrokristalliner Kalzit, ca. 10 Vol. %

2. Intrabiospatite (K 3, K 4) unterschiedlicher Körnigkeit:

- Komponenten:
- überwiegend Intraklasten, z.T. Pillen
 - stark untergeordnet Organismenhardtteile bis etwa 6 mm Länge.

Körnigkeit in bezug auf die Intraklasten:

- a) grobarenitisch:
i.M. um 0,9 mm, bis 4 mm (K 4)
- b) mittelarenitisch:
i.M. um 0,2 mm, bis selten 3,6 mm (K 3)

Zement:

mikrokristalliner Kalzit

Vol. Anteil:

- a) grobarenitischer Typ, ca. 10 %, größere Porosität durch unvollständige Zementation
- b) mittelarenitischer Typ, 10 %, geringe Porosität durch fast völlige Zementation.

4.2 Grünsandsteine

Die Grünsandsteine sind hell grüngraue bis gelblich grüne, überwiegend mittelsandige karbonatische Sandsteine mit massiger Textur (Ihrler- und Abbacher Grünsandstein) oder unruhiger Schichtung im Zentimeterbereich ('Pfalzler'), die in einem Wechsel karbonatreicher und quarzreicher Lagen zum Ausdruck kommt.

Im Mikrogefüge herrschen weitgehende Gemeinsamkeiten vor. Die Klasten sind überwiegend gerundet und subgerundet (n. RUSSEL Taylor 1957, in: MÜLLER 1964) und bei Kornabstützung ohne Verzahnung mit mikrokristallinem und sammelkristallisiertem Karbonat verkittet (s. Taf. 1, Abb. 2), in den dolomitischen Entwicklungen ('Abbacher' und z.T. 'Pfalzler') auch durch diagenetisches Wachstum von Dolomit. Durch Korrosion von Quarz- und von Feldspatklasten durch karbonatischen Zement wird partiell ein festerer Kornzusammenhalt erreicht. Im 'Pfalzler' tritt bereichsweise eisenoxidische Substanz zementativ auf, die erst in stark sauren Verwitterungslösungen löslich ist (s. Diskussion der Ergebnisse). Planare sedimentär-diagenetische Elemente als Gefügeanisotropien waren nur im 'Pfalzler' festzustellen. Fossilführung (Foraminiferen, Relikte von Echinodermen, Lamellibranchiaten und Brachiopoden) ist stets vorhanden.

Nach der quantitativen Mineralzusammensetzung (Tab. 3) und nach der mittleren Korngröße der Proben lassen sich die untersuchten Bausteine sedimentpetrographisch (Nomenklatur nach FÜCHTBAUER MÜLLER 1970) folgendermaßen klassifizieren:

- Abbacher Grünsandstein : schwach glaukonitischer sandiger Kalkstein (0.20)
- Ihrler Grünsandstein : glaukonitführender Karbonatsandstein (0.32)
- Pfalzler Grünsandstein : sehr schwach glaukonitischer Sandkalkstein (0.5)

Tab. 3: MODALANALYSEN DER SANDSTEINE UND KORNGRÖSSENINTERVALLE

	1	2	3	
Quarz	23.2	43.8	29.9	
Feldspäte	0.6	1.1	0.5	
Karbonat (Partikel, Zement)	65.0	40.6	65.9	
Glaukonit	9.0	13.0	3.3	
Glimmer (Biotit- Muskowit)	0.1	Sp.	Sp.	
Akzessorien	2.0	1.3	1.3	
Summe	99.9	99.8	99.9	
	min.	0.04	0.023	0.054
Korn-Ø in mm	mittl.	<u>0.2</u>	<u>0.32</u>	<u>0.5</u>
	max.	0.85	1.3	2.0

1 = Abbacher, 2 = Ihrler, 3 = Pfalzler

Als mittlere Korngröße (in mm) sind hier die häufigsten Korndurchmesser der im Vergleich zu den karbonatischen Partikeln etwas größeren silikatischen Klusten, speziell Quarz angegeben.

Alle Grünsandsteintypen sind relativ gut sortierte mittelsandige Sandsteine, da sie zu 98 % aus Klusten der Sandkorngröße (0.063 - 2.0 mm) bei einem Mittelwert im Mittelsandbereich (0.2 - 0.63 mm) aufgebaut werden. Eine Differenzierung ergibt sich jedoch im Hinblick auf die Fein- und Grobsandanteile (Abb. 1). Der 'Abbacher' mit dem niedrigsten Mittelwert besitzt den größten Feinsandanteil, so gut wie keinen Grobsand und einen niedrigeren Mittelsandanteil als der Ihrler und Pfalzler. Er stellt somit den feinkörnigsten Typ dar. Der 'Pfalzler' weist sich dagegen mit dem größten Grobsand- und dem niedrigsten Feinsandanteil als der grobkörnigste Bausandstein aus. Der 'Ihrler' nimmt eine Mittelstellung zwischen beiden ein. Die von seiten der Dombauhütte erfolgte Typisierung der Grünsandsteine mit Hilfe von Lokalitätsbezeichnungen beruht, wie sich hier nachweisen läßt, auf ihrer sedimentpetrographischen Charakteristik (Gefüge, Mineralzusammensetzung, Korngrößenverteilung). Aus geologischen Gründen muß allerdings in Frage gestellt werden, ob die Sandsteine nur jeweils diesen Herkunftsgebieten zuzuordnen sind. Die Unterscheidung dürfte vielmehr als Gruppenbezeichnung für diese Werksteine zu verstehen sein.

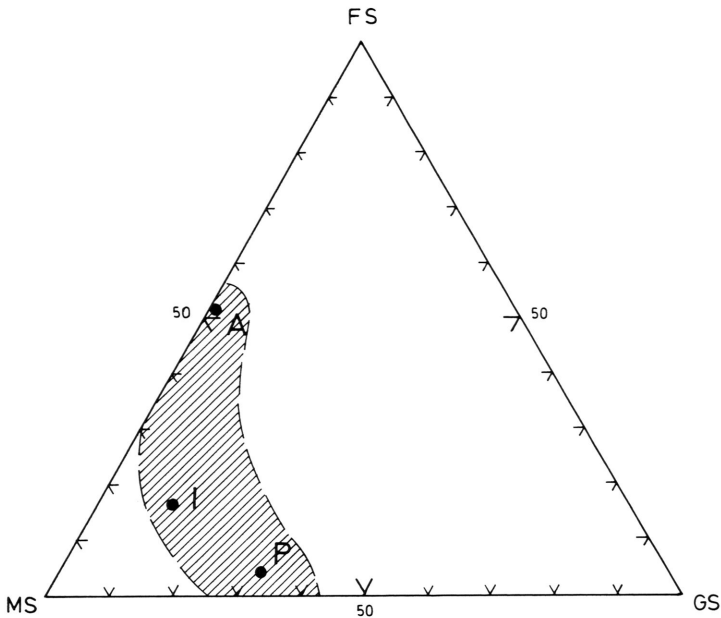


Abb. 1: Zusammensetzung der Sandsteine im System Feinsand (0.063 - 0.2 mm) - Mittelsand (0.2 - 0.63 mm) - Grobsand (0.63 - 2.0 mm). A = Abbacher, I = Ihrler, P = Pfalzler

Karbonatische und silikatische Klasten werden noch selektiv ausgewertet (ENDLICHER 1984), um Kenntnisse über mineralspezifische Korngrößenverteilungen zu erhalten, die über die Lösungsanfälligkeit der Mineralphasen und damit das Verwitterungsverhalten weitgehendere Aussagen gestatten.

5. VERWITTERUNGSKRUSTEN

5.1 Allgemeines

Als Reaktionsbildung zwischen Atmosphäre und Bausteinen sind auf Kalksteinen, Grünsandsteinen und Fugenmörtel gleichermaßen schwarze Verwitterungskrusten entstanden. Zunächst haben diese über unterschiedlich lange Zeiträume eine Art Schutzfunktion ausgeübt, in den letzten Jahrzehnten begannen sie unter dem Einfluß von Luftverunreinigungen und in Abhängigkeit von kleinklimatischen Verhältnissen am Gebäude (Exponiertheit für Wind, Niederschläge und Sonneneinstrahlung) in unterschiedlichem Maße verstärkt von den Bausteinen abzuplatzen. Von fest mit den Bausteinen verhafteten dünnen Krusten bis zu völlig abgeplatzten Oberflächen sind sämtliche Übergänge zu beobachten. In der Regel sind die Krusten auf den rascher verwitternden Grünsandsteinen einer umfangreicheren Abplatzung anheim gefallen als die auf den Kalksteinen (Taf. 2 und Taf. 3). An bestimmten Gebäudepartien

sind jedoch auch am gleichen Baustein unterschiedliche Destruktionen festzustellen. Ein für jedermann besonderes augenfälliges Beispiel ist der Eingangsbereich des Ostportales auf der Südseite des Domes (Taf. 1, Abb. 1 und 2). Andererseits sind Kalksteinquader, die an stark zerfressene Partien anschließen, von einer makroskopisch unversehrten Kruste bedeckt.

5.2 Gefügemerkmale der Krusten

Die Krusten lassen sich nach dem mikroskopischen Befund - in grundsätzlicher Übereinstimmung mit Bildungen an anderer Stelle und anderen Bausteinen (s.u.a. KAISER 1907, 1929, KIESLINGER 1932, SCHAFFER 1932, BRAITSCH & TRAUTMANN 1965) - in eine schwarze Außenkruste A und eine Innenkruste B, die eine Übergangszone zwischen Außenkruste und dem unveränderten Baustein C darstellt, trennen.

Die Grenzfläche A/B ist hier durch die Punkte bestimmt, wo entweder mit scharfem Kontakt ein geschlossenes Korngefüge des Bausteines beginnt oder Einzelkörner und Kornaggregate des Gesteins mit noch erkennbarer Beziehung zu ihrer ursprünglichen Lagerung aus dem Kornverband herausgelöst und über Mineralneubildungen mit dem Festgestein verkittet wurden. Als Kriterium für die Grenze B/C gilt das Verschwinden atmosphärisch bedingter Mineralneubildungen und Umkristallisationen nach dem Gesteinsinneren zu. Diese Grenze verläuft unregelmäßig tief im Gestein, entsprechend der lokalen Wegsamkeit für Porenlösungen. Als maximale Eindringtiefe wurden im Grünsandstein wie im stärker porigen Kalkstein 12 Millimeter gemessen.

Die Außenkrusten sind im Durchschnitt 0.2 mm dick, können lokal aber bis auf mehrere Millimeter anschwellen. Unterschiede hinsichtlich der Mächtigkeitseentwicklungen zwischen Krusten auf Kalksteinen und Krusten auf Grünsandsteinen konnten nicht zweifelsfrei festgestellt werden. Unter dem Mikroskop zeigt sich, daß die Außenkrusten das Mikrorelief der Grenzfläche A/B ausgleichen und konvex buchtige Oberflächenformen in Mikro- bis Millimeterdimensionen aufweisen (Taf. 1, Abb 3). Das Interngefüge der Außenkrusten ist schwach bis deutlich lagenartig ausgeprägt, wobei der parallel zur Grenzfläche Atmosphäre/Baustein orientierte Lagenbau sich in der Änderung der Zusammensetzung der einzelnen Lagen zu erkennen gibt.

Die nicht scharf von den Bausteinen abgrenzbaren Innenkrusten stellen demgegenüber Bereiche dar, in welchen das primäre Korngefüge teilweise durch überwiegend kristalline Ausscheidungen aus Porenlösungen gestört wurde. Die Häufigkeit dieser Neubildungen nimmt dabei mit der maximalen Eindringtiefe ab. Der Ort der Neubildungen sind prinzipiell die offenen oder durch Lösung geschaffenen sekundären Porenräume im Gestein. Als Migrationswege fungierten die Intergranularflächen und planare Gefügeelemente im Gestein.

Trotz offener Poren in den Kalkgesteinstypen sind jedoch die mit der Atmosphäre in Verbindung stehenden Porenlösungen hier nach

Tafel 1

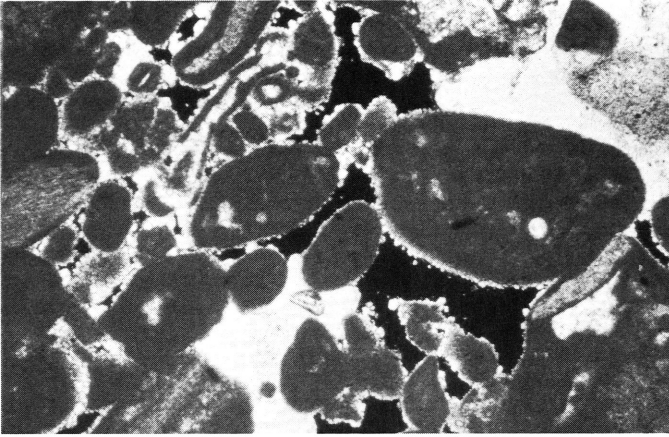


Abb. 1

Mikrofoto, Durchlicht, x Pol.,
37-fach

Gefüge eines Partikelkalkes. Unvollständige Zementation von Karbonatpartikeln durch Kalzit (weiß); Poren (schwarz).

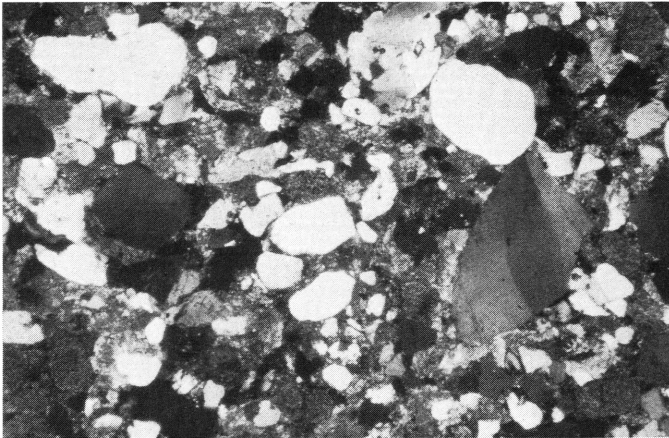


Abb. 2

Mikrofoto, Durchlicht, x Pol.,
37-fach

Gefüge des Ihrler Grünsandsteins. Vollständige Zementation von Quarz-, Feldspat-, Glaukonit- und Karbonatklasten durch Kalzit.

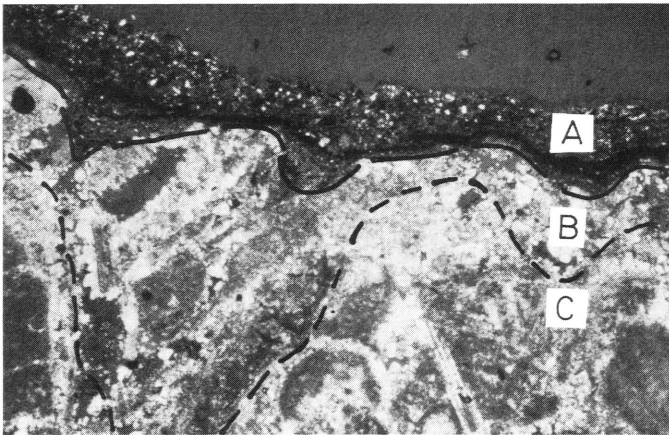


Abb. 3

Mikrofoto, Durchlicht, x Pol.,
37-fach

Zonare Gliederung einer Kruste auf Kalkstein.

A = schwarze Außenkruste,
B = Übergangszone bzw. Innenkruste,
C = unveränderter Baustein.

Tafel 2

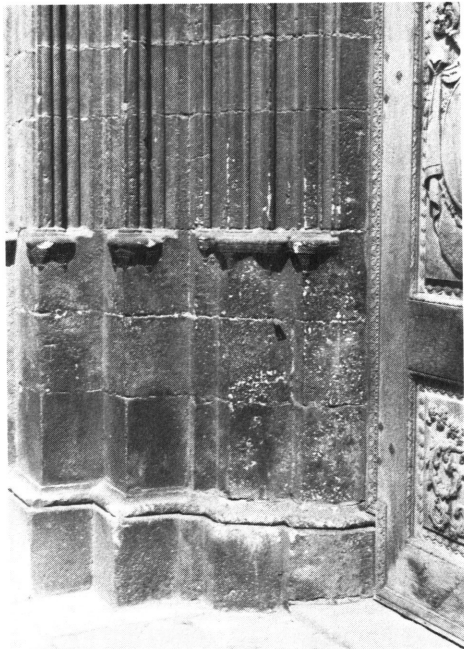


Abb. 1



Abb. 2

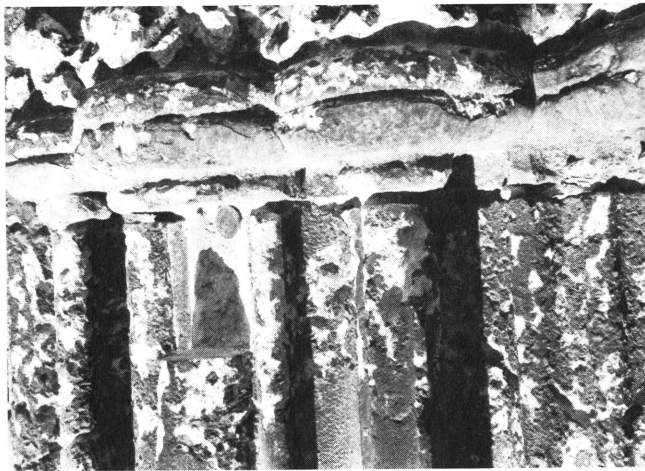


Abb. 3

Unterschiedliche Kalksteinzerstörung im Bereich des Ostportals
auf der Südseite des Domes

Abb. 1 = westlich, Abb. 2 = östlich des Portals,
Abb. 3 = Ausschnitt von Abb. 2

Tafel 3

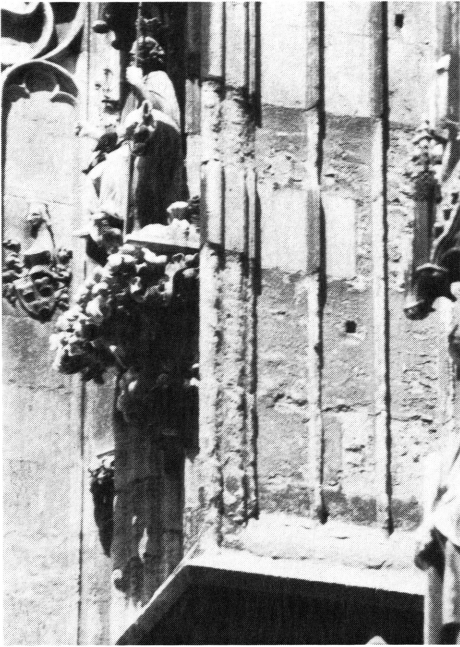


Abb. 1

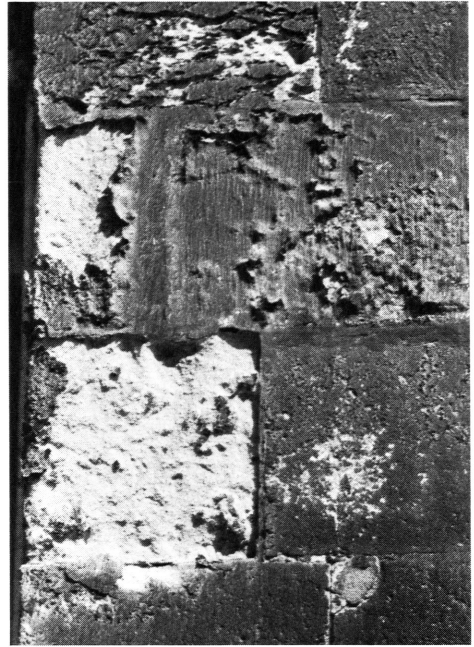


Abb. 2

Abb. 1: Auffällig stärkere Abtragung von Grünsandstein im Vergleich zu Kalkstein; Südturm Ostseite

Abb. 2: Abplatzen und Abblättern der Krusten auf Grünsandstein und dessen tiefgreifendes Absanden; Südseite in 5 m Höhe.

Quaderhöhe = 35 cm

den bisherigen Beobachtungen nicht tiefer und in größerem Umfang eingedrungen als in den Grünsandsteinen. Als Grund hierfür wird die mangelnde kapillare Verbindung der Poren untereinander angesehen.

Der Übergang von Innen- zur Außenkruste ist als scharfe Grenzfläche (A/B) bei geringer Mikroverzahnung ausgebildet. Umfangreiche Verdrängungen oder Umkristallisationen im primären Mineralbestand, vor allem von Karbonat, waren bislang mikroskopisch nicht nachweisbar.

5.3 Mineralogische Merkmale der Krusten

Die mikroskopischen und röntgendiffraktometrischen Untersuchungen des Krustenmaterials haben ergeben, daß die sich aus dünnen Lagen zusammensetzenden Außenkrusten sowohl in den Kalksteinen wie in den Grünsandsteinen im wesentlichen aus neugebildetem Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) und mit diesem verkitteten Partikeln unterschiedlicher Herkunft aufgebaut werden.

Zu diesen Partikeln gehören in erster Linie submikroskopische bis etwa 800μ große Rußteilchen, die in den einzelnen Lagen unterschiedlich stark angelagert für die schwarze Farbe der Außenkrusten verantwortlich zu machen sind. Weitere Hauptkomponenten sind Quarz, Karbonat und Eisenhydroxid. Weniger häufig sind Glaukonit, Hellglimmer, Clorit sowie isotrope Körner, vermutlich Glassubstanz, und hoch - licht- und doppelbrechende, farbige, meist blaugrüne Partikel, bei welchen es sich um nicht näher bestimmtes Staubmaterial handelt.

Anhand dieses Spektrums wird nachgewiesen, daß der größte Teil der klastischen Komponenten den Bausteinen des Domes entspringt. Bei einem geringeren Teil handelt es sich um von Wind antransportierte fremde Staubpartikel (Glas u.a. Industrieprodukte).

In den Kalksteinen wie in den Grünsandsteinen erfolgten außer der Gipskristallisation als Neubildung aus Verwitterungslösungen in sehr geringem Umfang Ausscheidungen von gelblich braunem isotropen Eisenhydroxidgel und z.T. auch von opalartiger Kieselsäure, die tiefer in das Gestein eindringen als die Gipsausscheidungen. Auf die Bedeutung dieser Beobachtung wird bei der Diskussion der Ergebnisse besonders eingegangen.

Das formal unterschiedliche Auftreten von Gipskristallisaten weist auf zeitlich verschiedene Gipsgenerationen hin. Grundsätzlich ist hier zwischen älteren vornehmlich die Außenkrusten aufbauenden Kristallisaten und jüngeren diskordant zur lagigen Textur vorliegenden Bildungen zu unterscheiden, wodurch sich eine komplexe Bildungsgeschichte für die Krusten und die damit zusammenhängende Gesteinszerstörung ableitet (ENDLICHER 1984).

Im Hinblick auf den qualitativen Mineralbestand konnten keine Unterschiede zwischen Krusten auf Kalksteinen und denen auf Grünsandsteinen festgestellt werden. Ansätze für Unterschiede in der

Tab. 4: CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG DER KRUSTEN

	Gew. %								ppm
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	S	
KK 1	6.8	1.37	34.2	0.47	0.70	1.08	1.35	8.46	1.100
KK 2	5.2	0.57	43.8	0.56	0.25	0.15	0.89	4.09	620
KK 4	2.5	0.39	48.3	0.53	0.18	0.10	0.33	3.35	550
KK 5	2.9	0.57	43.3	0.58	0.30	0.15	0.53	6.79	460
KG 1	10.0	1.43	30.2	0.66	1.02	0.87	1.50	5.86	970
KG 3	23.2	1.54	23.8	0.90	1.07	0.17	2.03	3.91	800
KG 4	15.1	1.48	23.6	0.56	0.88	0.40	1.80	8.00	1.300
\bar{x}	9.4	1.00	35.3	0.60	0.63	0.42	1.20	5.78	828

KK = Krusten auf Kalkstein, KG = Krusten auf Grünsandstein, \bar{x} = arithmetisches Mittel

Tab. 5: QUANTITATIVE MINERALOGISCHE ZUSAMMENSETZUNG EINIGER

	KRUSTEN (GEWICHTSPROZENT)					
	G	K	Q	E	F/Cl/c	0
KK 1	45.5	27.6	6.8	1.5	1	17.6
KK 2	22.0	62.0	5.2	1.0	1	8.8
KK 4	18.0	73.0	2.5	0.35	1	5.1
KK 5	36.5	50.5	2.9	0.6	1	8.5
KG 1	31.5	30.8	10.0	1.7	1	25.0
KG 3	21.0	27.0	16.8	2.25	1	32.0
KG 4	43.0	10.5	15.1	2.0	1	28.4
\bar{x}	31.0	40.2	8.5	1.34	1	18.0

G = Gips, K = Kalzit, Q = Quarz, E = Eisenhydroxide, F = Feldspat,
 Cl = Glaukonit, C = Chlorit und Illit, 0 = Opakanteil (vorwiegend
 Rußpartikel) und unbestimmte Staubpartikel

quantitativen Zusammensetzung ergeben sich aus der Mikroskopie, da in den meisten Krusten auf Grünsandsteinen seltener Karbonat und häufiger eisenhydroxidische Partikel beobachtet wurden. Ausgehend von der chemischen Zusammensetzung*) einiger typischer Krusten (Tabb. 4) wurde die quantitative mineralogische Zusammensetzung der Krusten rechnerisch ermittelt (Tab. 5).

Unter der Annahme, daß S ausschließlich im Gips gebunden ist - röntgenographisch wurden keine weiteren Schwefelsalze nachgewiesen (s.u.) - wurde der Gesamtschwefel auf die $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - Phase umgerechnet. Der Karbonatanteil (Kalzit) wurde aus den CaO-Gehalten bestimmt. SiO_2 wurde Quarz gleichgesetzt, da die Silikate Glaukonit, Chlorit, Illit und Feldspäte nur sporadisch am Krustenaufbau beteiligt sind und der diesbezüglich SiO_2 -Gehalt unter 1 % liegen dürfte. Fe_2O_3 wurde in die hydratisierte Form (FeOOH) umgerechnet. Da eventuell gebildete Na-, Mg- und K-Verbindungen (Sulfate, Chloride, Fluoride) kurzlebig sind, weil sie an exponierten Stellen des Bauwerkes von Regenwasser leicht gelöst werden, und deshalb nur wenige Prozente betragen würden, läßt sich bei deren Vernachlässigung auch der opake Anteil annähernd angeben.

Da eine optimale mechanische Trennung von Außenkrusten und Bausteinen nicht erreicht werden kann, beinhaltet das Untersuchungsmaterial unterschiedlich geringe Anteile der Innenkrusten. Die im Vergleich zu den Grünsandsteinkrusten höheren und wechselnden CaO-Gehalte in den Kalksteinkrusten und die durchwegs höheren SiO_2 -Gehalte in den Krusten auf Grünsandsteinen sind wohl hauptsächlich hierdurch zu erklären. Die Gipsgehalte schwanken in beiden Krustentypen zwischen etwa 20 und 45 %. Unterschiede zeigen sich dagegen im Eisenhydroxidgehalt und vor allem im Opakanteil.

6. DISKUSSION DER ERGEBNISSE

6.1 Chemische Verwitterung der Bausteine

Das an Bauwerken häufig festgestellte unterschiedliche Verwitterungsverhalten von Kalk- und (karbonatischen) Sandsteinen ist grundsätzlich d.h. nicht nur in anthropogen verunreinigter Luft, sondern bereits in natürlicher Atmosphäre durch die unterschiedliche mineralogische Zusammensetzung und Unterschiede im Mikrogefüge bedingt. Die Hauptgründe für die raschere Verwitterung der Sandsteine sind der größere Intergranularraum (größere Zahl an Grenzflächen und bessere kapillare Verbindung der Poren) mit der Möglichkeit zu einer höheren Feuchtigkeitsaufnahme, der Gehalt an H_2O -adsorptionsfähigen Mineralphasen (quellfähige Glaukonite u.ä. Phyllosilikate mit großen Oberflächen und Spaltflächen) und die inhomogene Zusammensetzung aus chemisch leichter und schwerer verwitterbaren Mineralien. Die unterschiedlichen

*) Die Hauptelemente wurden aus HF/HClO_4 -Aufschlüssen mit der Atomabsorption und Flammenphotometrie, S mit der Röntgenfluoreszenz und F nach der Methode von ACKERMANN (1978) bestimmt.

thermischen Ausdehnungskoeffizienten, spezifischen Wärmeleitfähigkeiten, elastischen Konstanten und Zugfestigkeiten der Minerale in polymineralischen Gesteinen dürften zwar zu höheren Spannungen führen als in den homogenen Kalksteinen, für die Verwitterung spielen sie aber im Vergleich zu der Adsorption und Desorption von Wasser längs Grenz- oder innerkristalliner Flächen als Folge von Temperaturwechsel und der hierbei ausgeübten Rückwirkung auf das Gesteinsgefüge sowie dessen chemischer Reaktion mit den Mineralphasen nur eine geringe Rolle (ENGELHARDT v. 1973).

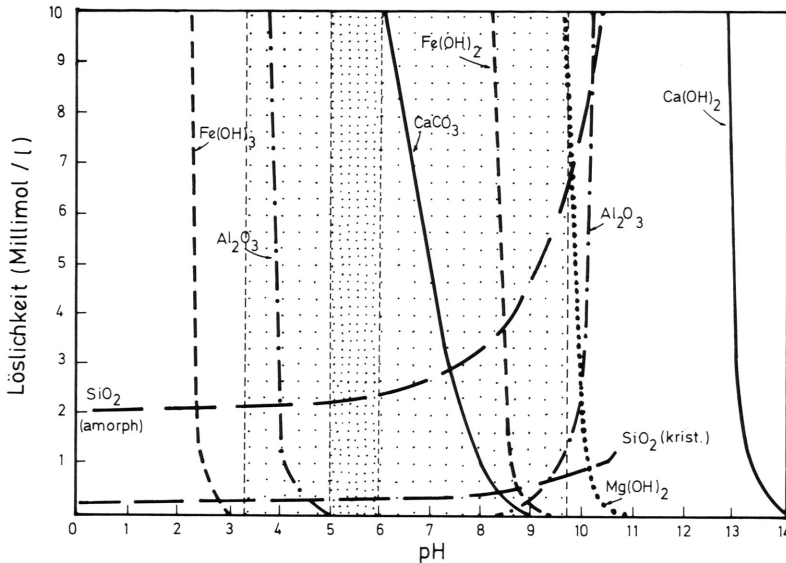


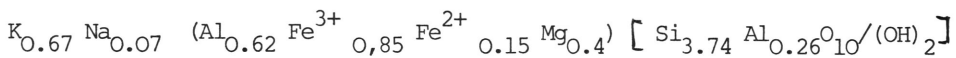
Abb. 2: Löslichkeit der wichtigsten Kationen in Gesteinen in Abhängigkeit vom pH Wert (aus LOUGHNAN 1969), ergänzt durch die Löslichkeit von kristallinem Quarz und die pH Schwankungen mit den Durchschnittswerten des Regenwassers von Regensburg im Zeitraum 1975 - 1979.

Während die chemische Verwitterung der reinen Kalksteine durch die Löslichkeit allein von Kalzit bedingt ist, wirkt sich bei den Grünsandsteinen das unterschiedliche Lösungsverhalten von Kalzit, Dolomit, Quarz, Feldspäten, Glaukonit, Glimmern und evtl. Erzanteilen aus. Dieses hängt neben Faktoren wie Kristallstruktur und Korngröße im pH-Bereich von 4 bis 9 (natürliche Wasser) in erster Linie von der in der genannten Reihenfolge abnehmenden Mobilisierbarkeit der Ionen Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Fe^{2+} , Si^{4+} , Fe^{3+} , Al^{3+} aus den Mineralen und von dem herrschenden Oxidationspotential ab (LOUGHNAN 1969), das bei Regenwasser relativ hoch ist ($E_h = 0,5$ ENGELHARDT, v. 1973). Der Einfluß von pH-Änderungen auf die Mobilität der chemischen Komponenten ist aus Abb. 2 ersichtlich, in welcher auch die

pH-Schwankungen der Niederschläge in Regensburg in der Zeit von 1975 bis 1979^{*)} eingetragen sind. Im Bereich der diesbezüglichen Mittelwerte sind die Komponenten Mg(OH)₂, Fe(OH)₂, CaCO₃ bereits sehr leicht löslich. Die Löslichkeit von Al₂O₃ aus Alumosilikaten steigt mit zunehmender Azidität gegen pH 4 (Extremwert Regensburg pH 3,3) sprunghaft an. Die kristallinen Quarzphasen sind nur gering löslich, ausgenommen im alkalischen Milieu von pH 9,7 (z.B. Sept. 1975) in welchem gelöstes CaCO₃ und Fe²⁺-Komponenten wieder ausgefällt werden. Die in den Verwitterungskrusten festgestellten Ausscheidungen von FeOOH bestätigen diese Messungen und sind zudem ein Nachweis für zeitweilig wiederkehrende alkalische Bedingungen. Fe³⁺-Ionen sind erst in stark saueren Lösungen und bei hohem Oxidationspotential mobilisierbar.

Für die Verwitterungsanfälligkeit der in den Bausteinen festgestellten Minerale bedeutet dies im einzelnen folgendes. Die Löslichkeit der Karbonate steigt mit zunehmender Azidität, vor allem aber durch erhöhten CO₂-Gehalt im Regenwasser. Normale Atmosphäre enthält im Durchschnitt etwa 0,03 Vol. % CO₂ (LOUGHNAN 1969). Durch industrielle Verbrennungsprozesse kann CO₂ wesentlich stärker angereichert sein. Eine Aziditätszunahme durch in der Luft enthaltenes SO₂, das mit der Luftfeuchtigkeit zu Schwefelsäure reagiert (s. Literaturdiskussion bei NIESEL 1979), führt nicht zu einer Weglösung des Karbonates, sondern zu dessen In-situ-Umwandlung in Gips (CaSO₄ · 2H₂O). Eine größere Bedeutung als dem SO₂ in wässriger Lösung wird jedoch dem gasförmigen SO₂ zugeschrieben (GAURI et. al. 1973), (RÖNICKE & RÖNICKE 1972), (SERRA & STARACE 1978), (SRAMEK 1978), (SNETLAGE 1983 - mündl. Mittlg. -), das auch bei trockenen Bedingungen ins Gestein eindringt, von CaCO₃ absorbiert wird und mit diesem zu Kalziumsulfat reagiert. Bei feuchten Bedingungen erfolgt allerdings eine raschere Reaktion (SRAMEK) bei größeren Eindringtiefen in den Baustein (GAURI et. al.).

Bei den in den Grünsandsteinen mit über 10 Vol. % anteiligem Glaukonit (chemische Formel nach KOHLER 1980)



werden K⁺, Na⁺ und Fe²⁺ leicht und aufgrund der Kristallstruktur in großer Menge gegen H⁺-Ionen ausgetauscht, die der Reaktion von CO₂ mit H₂O entstammen. Eine höhere Azidität beschleunigt auch hier den chemischen Auslaugungsprozeß. Da Glaukonit zudem in seinem Gitter über quellfähige Zwischenschichten bis zu 40 Vol. % verfügt (KOHLER), erfolgt bei obiger Reaktion eine Expansion des Gitters. Quellvorgänge bedingt durch Feuchtigkeitsaufnahme tragen deshalb noch in besonders großem Umfang zur Zerstörung ursprünglicher Kornverbände glaukonitführender Sandsteine bei.

^{*)} BAYER. LANDESAMT F. UMWELTSCHUTZ-Luftphysik, Monatsberichte 1975 - 1979

Entsprechend der Mobilität der genannten Ionen werden auch aus den weiteren in den Grünsandsteinen vorhandenen Mineralphasen Kalifeldspat, Plagioklas, Muskowit bzw. Illit und Biotit, K aus den Feldspäten und aus Muskowit, Fe^{2+} und Mg aus dem Biotit und z.T. Al aus den Feldspäten rascher ausgelaugt als SiO_2 und somit diese Phasen zerstört.

Die Auslaugungsgeschwindigkeit nimmt hierbei mit fallendem pH-Wert deutlich zu (s. ENGELHARDT 1973).

Bis auf Quarz werden also alle die Bausteine bildenden Minerale mit zunehmender Azidität der Verwitterungsagenzien verstärkt angegriffen.

Die pH-Schwankungen, die in Regensburg gemessen wurden, gehen mit ihren Extremwerten (3.3 und 9.7) deutlich über die Normalität von Regenwasser in Europa (pH 4 - 6, BLOKKER 1970) hinaus, wobei, wie aus dem oben Gesagten hervorgeht, selbst in diesem pH-Bereich bereits eine beschleunigte Verwitterung stattfindet. Die hierfür in Regensburg in erster Linie verantwortlich gemachten hohen SO_2 -Konzentrationen sind für die letzten Jahre nachgewiesen und ihre Verteilung im Stadtgebiet in Verbindung mit klimatischen Faktoren grundlegend untersucht worden (DITTMANN 1982). Hiernach haben sich die SO_2 -Konzentrationen im Zeitraum von 1975 bis 1979 mehr als verdoppelt. Dabei wurden die für den menschlichen Organismus als gefährdend erachteten Grenzwerte für die Kurzzeitbelastung ($0,4 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$) als auch für die Langzeitbelastung ($0.14 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$) zeitweilig um das Mehrfache überschritten. In größeren Höhen (100 m) wurde sogar das 4,5-fache des Basiswertes festgestellt. Für 1980*) wurde das Jahresmittel mit $0.066 \text{ mg}/\text{m}^3$ und eine Kurzzeitbelastung bis zu $0.444 \text{ mg}/\text{m}^3$ angegeben (vgl. LUCKAT 1981)!

Für eine beschleunigte Gesteinsverwitterung sind aber schon niedrigere Immissionsraten aufgrund der ständigen Einwirkung von Einfluß.

Die Verwitterung der Bausteine darf aber nicht nur im Hinblick auf die SO_2 -Konzentrationen gesehen werden. Keine Kenntnisse liegen über CO_2 - und H-Ionen Konzentrationen vor, die für die Azidität und die Auslaugung von Mineralen, speziell Karbonaten, eine sehr große Rolle spielen (s.o.). Untersuchungen im Zeitraum von 1956 bis 1964 haben ergeben, daß die prozentuale Zunahme der H-Ionen Konzentrationen in ganz Europa höher war als die Zunahme an SO_4 -Konzentrationen (PERSSON 1968, zit. in: BLOKKER 1970). Zu den SO_2 -Immissionsmessungen, die im Rahmen von lufthygienischer Überprüfung systematisch durchgeführt werden, sollten daher im Hinblick auf die beschleunigte Verwitterung von Bausteinen auch die CO_2 - und H-Ionen-Konzentrationen bestimmt werden.

*) Informationsquelle: Städt. Amt für Öffentl. Ordnung

6.2 Krustenbildung und Gesteinszerstörung

Die mikroskopischen Untersuchungen der Bausteine zeigen die petrographischen-mineralogischen Merkmale der am Regensburger Dom verwandten Gesteine sowie die Variationsbreite der petrographisch definierten Gesteinstypen auf.

Die monomineralischen Kalksteine und die polymineralischen Grünsandsteine, die sich in dem, das Verwitterungsverhalten bestimmenden Mikrogefüge und dem qualitativen wie quantitativen Mineralbestand unterscheiden, weisen einen Karbonatanteil auf, dem für die Gipsbildung an Bauwerken die größte Rolle beigemessen wird (s. Literaturdiskussion von NIESEL 1979). Feldspatanteile, die ebenfalls zu Gips umgewandelt werden können (KELLER 1935), sind nach den Modalanalysen hier zu vernachlässigen. Der gesamte Karbonatgehalt der Grünsandsteine liegt mit 40 bis 60 Volumenprozent beträchtlich unter dem der reinen Karbonatgesteine, was bei einer Gipsbildung unmittelbar aus dem Karbonat der Bausteine eine stärkere Gipsbildung auf den Kalksteinen bei intensiverer Destruktion zur Folge haben sollte. Noch nicht abgeschlossene Untersuchungen liefern aber bereits Hinweise darauf, daß der Anteil an reaktionsfähigerem mikrokristallinen körnigen Zement und ebensolcher Partikel in den Sandsteinen höher ist als in den monomineralischen Kalksteinen. Diese Untersuchungen enthüllen einen weiteren maßgeblichen Grund für die raschere Verwitterung der Sandsteine, speziell für das Absanden. Dieser Befund könnte aber auch mit zur Erklärung der Beobachtung beitragen, daß auf den Kalksteinen im allgemeinen keine dickeren Gipskrusten entwickelt sind als auf den Grünsandsteinen.

Die Außenkrusten, in welchen sowohl bauwerkfremdes Staubmaterial als auch Mineralkörner aus den Bausteinen selbst fixiert sind, sind bei geringer Mikroverzahnung mit den Bausteinoberflächen verbunden. Eine chemische Verdrängung von Karbonat durch Gips ist dabei nur selten direkt zu beobachten. Die meisten Kalkpartikel und Zementpartien sind ohne Korrosionserscheinungen von den gipsreichen Krusten überlagert, so daß die Feststellung DITTMANN's (1982, S. 231) ... "Durch die Einwirkung von Schwefelsäure wird Kalk (CaCO_3) in Gips (CaSO_4) umgewandelt, der eine etwa tausendmal grössere Volumenausdehnung hat. Die Folge sind rasche und starke physikalische Verwitterungserscheinungen des Sandsteins, die zur Abplatzung dicker Gesteinsschichten führen" ... auch bei der viel niedrigeren, aber noch äußerst wirkungsvollen Volumenausdehnung*) den Vorgängen nur bedingt gerecht wird.

*) Bei der quantitativen Umwandlung von Kalzit in Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) vergrößert sich das Volumen um den Faktor 2:

$$\frac{\text{Molvolumen}_{\text{Gips}}}{\text{Molvolumen}_{\text{Kalzit}}} = \frac{\text{Molekulargewicht}_{\text{Gips}}}{\text{Dichte}_{\text{Gips}}} \cdot \frac{\text{Dichte}_{\text{Kalzit}}}{\text{Molekulargewicht}_{\text{Kalzit}}} =$$

$$\frac{172.18}{2.32} \cdot \frac{2.715}{100.09} = 2.013$$

Der thermische Ausdehnungskoeffizient von Gips ist fünf mal so groß wie derjenige von Kalzit.

Es sollten dann nämlich die Kalksteinoberflächen generell einer intensiveren Gipsumwandlung unterliegen und dort dickere Gipskrusten entwickelt sein als auf den Sandsteinen, was nicht nachgewiesen werden konnte.

Vor allem aber gilt nach den mikroskopischen Untersuchungen die früher festgestellte maximale Eindringtiefe für Porenlösungen nur für Eisenhydroxid und evtl. Kieselsäure, nicht aber für die Gipsbildung bei den Außenkrusten, die hier auf den unmittelbaren Grenzbereich Atmosphäre/Baustein beschränkt ist. Diese Gipskristallite an der Oberfläche sind aus druckmechanischen Gründen nicht in der Lage, dickere Gesteinsbereiche abzusprengen.

Die Schutzfunktion, die teilweise den Außenkrusten zugeschrieben wird (GEIKIE 1882, KAISER 1929, CAMERMAN 1960/1961 zit. in: NIESEL 1979) kann nach dem mikroskopischen Befund nur eine gewisse Zeit ausgeübt worden sein. Die Außenkrusten zeigen jüngere Deformationen (Brüche, Risse), die vielfältige Lösungswanderungen in den Grenzbereich Außenkruste/Baustein und damit weitere Gipsbildung ermöglichen. Alternierende Lösung und Ausscheidung unter Beteiligung von löslichen Salzen (ARNOLD 1976, LUCKAT 1973, 1974, 1975a) führen in Verbindung mit Frostsprengung und unterschiedlichem thermischen Verhalten zur Ablösung der Krusten vom Baustein, zu Beulenbildung, Aufplatzen und Erweiterung der Risse und schließlich zum Abplatzen größerer Außenkrustenbereiche. Diese Zerstörung kann, wie die Beschreibung solcher Verwitterungserscheinungen in der Literatur zeigt, dort von statten gehen, wo neugebildeter Gips aufgrund seiner leichten Löslichkeit vor Auswaschung durch Regenwasser geschützt ist und durch stetige Kristallisation eine zusätzliche Druckwirkung erzeugt.

Die chemischen Untersuchungen (s. Tab. 4) können als Bestätigung der mikroskopischen Schlußfolgerungen angesehen werden. Die hohen Schwefelgehalte lassen deutlich die atmosphärische Herkunft von SO_2 erkennen. Im Hinblick auf die Konzentrationen in den Krusten sind keine Unterschiede zwischen Krusten auf Grünsandsteinen und Kalksteinen festzustellen. Die Fluor-Konzentrationen liegen deutlich über den Durchschnittswerten in Kalk- und Sandsteinen. Sie stellen damit einen indirekten Nachweis für Fluor enthaltende Emissionen dar (z.B. aus der chemischen Industrie, Reinigungsbetrieben etc.). Amtliche systematische Meßdaten über Fluorid-Immissionsraten liegen in Regensburg bislang nicht vor, in Verbindung mit den festgestellten hohen F-Konzentrationen und der Gesteinszerstörung durch saure Lösungen wären sie durchaus von Bedeutung.

In der Umgebung des Südportals sind nun im Vergleich zum übrigen Sockelbereich besonders auffällige Abplatzungen zu sehen, die noch keine befriedigende Erklärung gefunden haben. Allgemein sind stark unterschiedliche Verwitterungsformen in unmittelbarer Nachbarschaft am gleichen Baustein erklärbar durch unterschiedliche Orientierung von Gesteinsinhomogenitäten zur Grenzfläche Baustein/Atmosphäre, durch die Auswirkung unter-

schiedlicher Bearbeitungsmethoden auf das Gesteinsgefüge, klein-klimatische Verhältnisse, Mikroorganismen und die Einwirkung von Vogelexkrementen. Schließlich hat aber auch der in den Steinbrüchen vorliegende unterschiedliche Verwitterungsgrad schon einen Einfluß auf das spätere Verwitterungsverhalten am Bauwerk.

Aufgrund der Begrenzung der Schäden auf die Portalnähe, die Abnahme des Zerstörungsgrades mit zunehmender Entfernung vom Portal und die Begrenzung der Schäden auf eine Höhe im wesentlichen zwischen 1 m und 1,6 m werden die Abplatzungen vom Verfasser auf ein spezielles Kleinklima zurückgeführt. Als Hauptursache wird ein erhöhter CO_2 -Gehalt der Atmosphäre durch die Atemtätigkeit der vorwiegend hier ein- und ausgehenden Besucher, in Verbindung mit einem besonderen Anreicherungsmechanismus von Schadstoffen angesehen. Bei der schlechteren Durchlüftung des Portalbereiches infolge der durch die Architektur bedingten leicht geschützten Lage können Schadstoffkonzentrationen grundsätzlich länger erhalten bleiben. Im speziellen treffen hier die beim Öffnen des Portals in Bodennähe angesaugten Schadstoffe (Staubteilchen, gasförmige Stoffe und Aerosole) mit der gleichzeitig im oberen Portalniveau ausströmenden CO_2 -haltigen Atmosphäre zusammen. Beim Schließen kehrt sich der Vorgang um, so daß im mittleren Portalniveau eine Mischungszone entsteht, in der in Abhängigkeit von den Windverhältnissen eine ständige Schadstoffkonzentrierung erfolgt. Von besonders ungünstigem Einfluß dürfte in diesem Mechanismus die direkt vor dem Portal gelegene Bushaltestelle sein, wodurch regelmäßig höhere Schadstoffkonzentrationen (NO_x , Staub, Ruß) erzeugt werden. Denn diese feinverteilten Verbindungen wirken als Katalysatoren für die Oxidation von SO_2 vor allem im Porenraum der Bausteine (URONE et. al. 1968, BLÖKKER 1970) und tragen damit wesentlich zur Bildung der Sulfatkrusten bei.

7. SCHLUSSWORT

Wenn auch die gravierendsten Schäden am Regensburger Dom im Zuge von zwingenden Sofortmaßnahmen durch hervorragende Nachbauten der Originalteile aus einem besonders gut bearbeitbaren Kalkstein aus Istrien behoben werden, so muß auch dieser Baustein bei der herrschenden Azidität der Atmosphäre beschleunigt verwittern.

Eine Verringerung der Verwitterungsgeschwindigkeit könnte langfristig auf jeden Fall durch Maßnahmen erreicht werden, die eine Luftverbesserung im Sinne einer Abnahme der Azidität zum Ziele haben. Systematische Messungen auch der CO_2 -Gehalte, der F- und der H-Ionen-Konzentrationen sollten deshalb zu einer genaueren pH-Kontrolle mit durchgeführt werden.

Den heutigen Luftverunreinigungen Rechnung tragend, werden international große Anstrengungen auf dem Gebiet der Konservierung von Bausteinen unternommen, aufgrund der sehr vielfältigen Anforderungen an die Konservierungsstoffe mit jedoch noch

nicht befriedigenden Ergebnissen. Gleichzeitig ist es Ziel der Forschungen, aus der Kombination verschiedener Gesteinsmerkmale Kennwerte für die Beurteilung (i.e. Voraussage) für das Verwitterungsverhalten von Bausteinen zu erarbeiten (NIESEL 1982), um sowohl den optimalen Einsatz bestimmter Bausteine zu gewährleisten, als auch quantitative Grundlagen für die Konservierungsforschung zu schaffen.

Aus petrographischer Sicht allein müssten folgende Forderungen an einen verwitterungsresistenten Baustein gestellt werden:

- Minimum an Poren- und Intergranularraum,
- Aufbau aus möglichst wenigen Mineralphasen, die im pH-Bereich von etwa 4 - 9 ein Minimum an Löslichkeit besitzen,
- die Minerale dürfen nicht wasseraufnahmefähig sein und im Hinblick auf ihr physikalisch-chemisches Verhalten möglichst geringe Anisotropien aufweisen,
- das Gestein sollte keine Gefügeinhomogenitäten besitzen.

Diesen theoretischen Forderungen, die in ihrer Summe von Natursteinen nicht zu erfüllen sind, werden am ehesten noch metamorphe monomineralische Quarzite gerecht, die aufgrund ihres Gefüges, des Mineralbestandes und der sehr geringen Löslichkeit von Quarz im sauren und neutralen Milieu am verwitterungsresistentesten sind. Diese Gesteine sind aber andererseits aus anderen ebenso wichtigen Gründen für die Praxis unbrauchbar. Denn sie erfüllen weder die Anforderungen an die Bearbeitbarkeit oder eine notwendige Mindestblockgröße bei der Gewinnung im Steinbruch, noch werden sie ästhetischen Gesichtspunkten und, im oberpfälzer Raum, dem für Bauwerke ebenso bedeutsamen Bezug zur Landschaft gerecht.

LITERATURVERZEICHNIS

- ACKERMANN, H. (1978): Fluorine Determination in Minerals, Rocks and Raw Materials. - Interceram Nr. 4
- ARNOLD, A. (1976): Behavior of some soluble salts in stone deterioration. - 2nd Internat. Symp. on the Deterioration of Building Stones, Athens 27/09-01/10/1976. - The Chair of Physical Chemistry of the National Technical University of Athens, 1977, 27 - 36
- BAUBERGER, W., CRAMER, P. & TILLMANN, H. (1969): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 25 000, Blatt Nr. 6938 Regensburg. - Bayer. Geol. Landesamt, München
- BRAITSCH, O. & TRAUTMANN, L. (1965): Die Bausteine und Verwitterungsschäden am Freiburger Münster. - In: 75 Jahre Münsterpflege, Hrsg. P. Booz - Herder, Freiburg, 89 - 104.

- BLOKKER, P.C. (1970): The atmospheric chemistry and long-range drift of sulphur dioxide. - J. Inst. Petrol 56, No. 548, 71 - 79
- DITTMANN, Chr. (1980): Regensburg - Stadtklima und Luftverunreinigung. Klimaökologische und lufthygienische Untersuchungen zur Belastbarkeit des städtischen Lebensraumes. - Acta Albertina Ratisbonensia, Bd. 41, 336 S., Regensburg
- DREXLER, F. (1929): Steinzerstörung und Steinschutz am Regensburger Dom. - Zeitschrift Denkmalpflege und Heimatschutz, Jg. 1929
- ENDLICHER, G. (1984): Petrographie und Geochemie der Bausteine und Verwitterungskrusten des Regensburger Domes. - News Letters, Petrography des ICOMOS, in Vorbereitung
- ENGELHARDT, W.v. (1973): Die Bildung von Sedimenten und Sedimentgesteinen. Sediment-Petrologie, Teil II. - E. Schweizerbart, Stuttgart
- FÜCHTBAUER, H. & MÜLLER, G. (1970): Sedimente und Sedimentgesteine, Sediment-Petrologie, Teil III. - E. Schweizerbart, Stuttgart
- GAURI, K.L., DODERER, G.L., LIPSCOMP, N. Th. & SARMA, A.C. (1973): Reactivity of treated and untreated marble specimens in an SO₂ atmosphere. - Stud. in Conservation, 18, 25 - 35
- GÜMBEL, C.W. (1854): Übersicht der geographischen Verhältnisse der Oberpfalz. - Korresp. Bl. zool. mineral. Ver. Regensburg, 8, 1 - 48, Regensburg
- KAISER, E. (1907): Über Verwitterungserscheinungen an Bausteinen. I. Der Stubensandstein aus Württemberg, namentlich in seiner Verwendung am Cölner Dom. - N. Jahrb. Mineral. Geol. Paläont., z. Bd., 100, 42 - 64
- (1929): Über eine Grundfrage der natürlichen Verwitterung und die chemische Verwitterung der Bausteine im Vergleich mit der in der freien Natur. - Chemie der Erde 4, 290 - 342
- KEEPE, H. (1683): Monumenta Westmonasteriensia: or an historical account of the original increase and present state of St. Peter's or, the Abby church of Westminster. - C. Wilkinson & T. Dring, London, p. 23, zit. in: NIESEL, K. (1979)
- KELLER, G. (1935): Verwitterungserscheinungen an Sandsteinen des Oberdevons und die Verwendung der oberkarbonischen Ruhsandsteine als Bausteine. - Geol. und Bauwesen, 7, 81 - 89, Wien

- KIESLINGER, A. (1932): Zerstörungen an Steinbauten, ihre Ursachen und ihre Abwehr. - Franz Deuticke, Leipzig, Wien, 346 pp
- KOHLER, E.E. (1980): Die Glaukonit- und Grünsandablagerungen in Nordwest- und Süddeutschland - Bemerkungen zu ihrer Entstehung und Bedeutung. - Acta Albertina Ratisbonensia, Bd. 39, 59 - 80, Regensburg
- LAURIE, A.P. (1925): Zit. in: NIESEL, K. (1979)
- LILL, G. (1936): Erhaltungsmaßnahmen am Fürstenportal des Domes zu Bamberg. - Bayer. Heimatschutz, 32, 192 - 199
- LOUGHNAN, F.C. (1969): Chemical weathering of the silicate minerals. - 154 S., Elsevier, New York
- LUCKAT, S. (1973): Die Einwirkung von Luftverunreinigungen auf die Bausubstanz des Kölner Domes I. - Kölner Domblatt 36/37, 65 - 74
- (1974): Die Einwirkung von Luftverunreinigungen auf die Bausubstanz des Kölner Domes II. - Kölner Domblatt 38/39, 95 - 106
- (1975 a): Die Einwirkung von Luftverunreinigungen auf die Bausubstanz des Kölner Domes III. - Kölner Domblatt 40, 75 - 108
- (1981): Quantitative Untersuchung des Einflusses von Luftverunreinigungen bei der Zerstörung von Naturstein. - Staub-Reinhaltung Luft, 41, 440 - 442, 1981
- MÜLLER, G. (1964): Methoden der Sedimentuntersuchung. - E. Schweizerbart, Stuttgart
- NIESEL, K. (1979): Zur Verwitterung von Baustoffen in schwefeldioxidhaltiger Atmosphäre - Literaturdiskussion. - Fortschr. Miner., 57, 1, 68 - 124, Stuttgart
- (1982): Möglichkeiten der Beurteilung des Verwitterungsverhaltens von porösen Werksteinen: Bedeutung der gefügeabhängigen Kriterien. - Fortschr. Miner., 60, 1, 81 - 100, Stuttgart
- OSCHMANN, F. (1958): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 25 000, Blatt Nr. 7038 Bad Abbach. - 184 S., Bayer. Geol. Landesamt, München
- RIEGER, G. & H. (1954): Kelheimer Heimatschutzbuch für die Stadt und den Landkreis Kelheim. - 2. Aufl. Kelheim
- RÖNICKE, G. & RÖNICKE, R. (1972): Über den Mechanismus der zerstörenden Wirkung der Luftverunreinigung am Freiburger Münster. - Dt. Kunst- und Denkmalpflege, 30, 57 - 64
- RUTTE, E. (1962): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 25 000, Blatt Nr. 7037 Kelheim. - Bayer. Geol. Landesamt, München

- SERRA, M. & STARACE, G. (1978): Study of reactions between gaseous sulfur dioxid and calcium carbonate. - UNESCO/RILEM Internat. Symp. on the Deterioration and Protection of Stone Monuments, Paris 05/06-09/06/1978 (Rep. 3.7), 19 pp
- SCHAFFER, R.J. (1932): The weathering of building stones. - Building Res. Spec. Rep. No. 18, H.M., Stationery Office, London, 149 pp
- SRAMEK, J. (1978): The non-destructive investigation of chemical alterations in the surface of stone. - UNESCO/RILEM Internat. Symp. on the Deterioration and Protection of Stone Monuments, Paris 05/06-09/06/1978 (Rep. 2.8), 14 pp
- URONE, P., LUTSEP, H., NOYES, L.M. & Parcher, J.F. (1968): Static studies of sulfur dioxid reactions in air. - Environ. Sci. Technol. 2, No. 8, 611 - 628
- ZAHN, K. (1936): Zehn Jahre Steinschutz am Regensburger Dom. - Der Bautenschutz, 7, 1 - 10
- ZAHN, K. & DREXLER, F. (1937): Leinölmischungen als Schutzmittel für Natursteine. - Angew. Chem., 50, 682 - 686