

Gabriele Grassegger: Natursteine an Baudenkmalen

Stand der Kenntnisse über Zerstörungsvorgänge und Sanierungsmethoden

Als 1984 (Heft 2, S. 37–45) Eberhard Grunsky in dieser Zeitschrift das Thema Steinzerfall einer breiten Öffentlichkeit vorstellte, knüpfte er daran auch die Hoffnung, in Baden-Württemberg finanzielle und personelle Hilfen für diesen Problembereich zu erhalten. Ein Jahr später war es soweit: Die Landesregierung legte das sog. Umweltschadensprogramm auf, die Restaurierungswerkstatt des Landesdenkmalamtes erhielt einen Steinrestaurator, und die Autorin des folgenden Beitrags, von Beruf Geologin, wurde zur wissenschaftlichen Erforschung der Schadensprozesse und der Restaurierungsmethoden eingestellt.

Wenn hier also zum zweiten Mal über Steinschäden geschrieben wird – und diesmal sehr fachspezifisch – ist das nicht nur als Einführung für Spezialisten in laufende Forschungen gedacht. Das Echo auf den ersten Artikel ist überraschend groß gewesen. Die Nachfragen nach tiefergehenden Informationen kamen nicht nur von Naturwissenschaftlern, Umweltschützern und Lehrern, sondern auch von Baufachleuten, die im Zuge von Vorbeuge- und Instandsetzungsmaßnahmen mit dem Thema konfrontiert werden. Wir haben uns deshalb entschlossen, den Fachleuten unter unseren Lesern einen weitergehenden Einblick in die Materie zu bieten. Gleichzeitig hoffen wir, daß auch der interessierte Laie das eine oder andere für sich daraus gewinnen kann.

Einleitung

Umweltschäden an Kulturdenkmalen, insbesondere an Steinbauten und Steinplastiken, haben in den letzten Jahren ein immer bedrohlicheres Ausmaß angenommen. Kunstwerke und Gebäude aus Stein, Metall, Holz und Glas, die Jahrhunderte der Witterung ausgesetzt waren und diese Beanspruchung ohne nennenswerte Schäden überstanden haben, sind seit der Industrialisierung in wenigen Jahrzehnten teilweise bis zur Unkenntlichkeit zerstört worden.

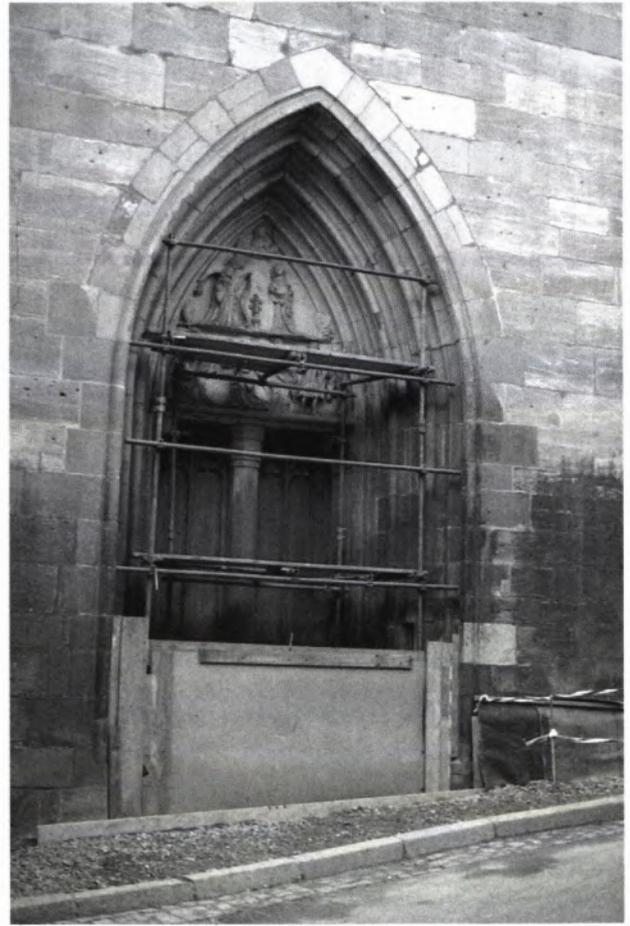
Das Land hat erstmals 1985 ein Programm aufgestellt, das der Beseitigung, Eingrenzung und wissenschaftlichen Erforschung von Umweltschäden an Kulturdenkmalen dient. Vom Steinzerfall sind nicht nur die großen Kirchen und Schlösser des Landes betroffen, sondern auch bewohnte Baudenkmale, Feldkreuze, Bildstöcke, Grabdenkmale, Treppenanlagen usw. Vor allem die großen gotischen Kirchen (Freiburger Münster, Ulmer Münster, Frauenkirche Esslingen, Heilig-Kreuz-Münster Schwäbisch Gmünd, Johanneskirche Crailsheim, Stiftskirche Baden-Baden etc.) sind wegen ihres reichen plastischen Schmuckes in besonderer Weise aggressiven Umwelteinwirkungen ausgesetzt. Der Verwitterung besonders des Steinmaterials muß mit raschen Maßnahmen begegnet werden.

Für Zuschüsse an die Denkmaleigentümer zur Beseitigung von Umweltschäden wurden im Staatshaushaltsplan 1985/86 jeweils 2 Mio. DM pro Jahr bereitgestellt. Die Fördermittel wurden im Staatshaushaltsplan 1987/88 auf 3,5 Mio. DM pro Jahr erhöht. 1985 konnten im Rahmen dieses Sonderprogramms insgesamt 30, 1986 insgesamt 21 und 1987 insgesamt 46 vordringliche Maßnahmen gefördert werden.

Diese Vorhaben reichen von der Restaurierung einzelner Wegkreuze, historischer Brunnenanlagen und Bildstöcke über die Konservierung von Grabdenkmalen jüdischer Friedhöfe (z. B. Zuschuß für den jüdischen



1 SALEM, Bodenseekreis, Münster, Nordquerhaus. Besonders starke Schäden an Basen von Rundstäben eines Fenstergewändes. Die geschädigten Bereiche sind bedeckt von Ausblühungen und zerfallen in Form von kleinen Schuppen.



2 u.3 ROTTWEIL, Kapellenkirche. Am Kapellenturm, links, der bereits viele Jahre lang restauriert wird, mußten weite Teile des schwer geschädigten Schiffsandsteins ausgetauscht werden. Nordportal der Kapellenkirche, rechts. Es ist restaurierungsbedürftig, weil eine dunkle Ecke häufig als Toilette mißbraucht wurde. Feuchtflecken und dunkle Zonen weisen auf eine starke Nitratbelastung hin. Die Nitrate sind bis in das vom berühmten Baumeister und Bildhauer Heinrich Parler geschaffene Bogenfeld gestiegen und haben begonnen, es zu zersetzen. Zur Zeit werden Versuche unternommen, den Schaden zu beheben.

Friedhof Braunsbach, Landkreis Schwäbisch Hall, in Höhe von 570 570,- DM) bis zu den umfangreichen Steinrestaurierungsmaßnahmen an wertvollen Kirchengebäuden, wie an der Pfarrkirche St. Peter in Bruchsal (450 000,- DM), der evangelischen Konkordienkirche Mannheim (410 000,- DM) oder dem Kapellenturm Rottweil (250 000,- DM). Auch für das Freiburger Münster (400 000,- DM) und das Ulmer Münster (300 000,- DM) wurden 1987 wiederum erhebliche Zuschüsse aus dem Umweltschadensprogramm bereitgestellt.

Bei der wissenschaftlichen Untersuchung der Zerstörungsprozesse treten mannigfaltige Probleme auf, da die Erscheinungen sehr vielschichtig sind, was die intensive Zusammenarbeit verschiedenster Disziplinen erforderlich macht. Eine baldige Besserung der Immissionssituation zahlreicher Luftschadstoffe ist nicht zu erwarten, wie kontinuierliche Messungen in den letzten Jahren zeigten (Umweltbundesamt, 1984; Lahmann, 1985). Aus diesem Grunde wird eine fachkundige Denkmalkonservierung im Moment dringend benötigt und stellt auch für die Zukunft eine große Aufgabe an die Denkmalpflege. Das beste Restaurierungsverfahren kann aber nicht darüber hinwegtäuschen, daß durch den Zerstörungsprozeß und die meisten Sanierungen sehr viel Information vom Original für die Zukunft verlorengeht.

Dieser Bericht soll einen Überblick geben über die Schadensformen, über den Kenntnisstand bei der Erforschung der Schadensmechanismen bei der Natursteinerzörung an Baudenkmalen und der Anwendung von Sanierungsverfahren.

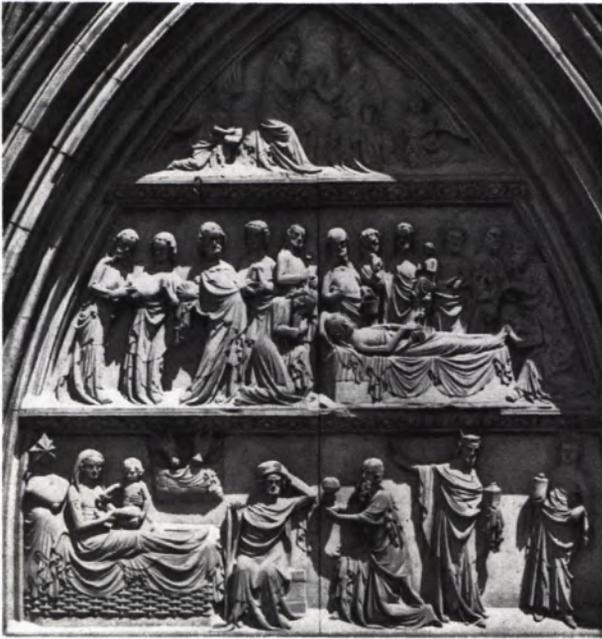
Die äußeren Formen und Erscheinungsbilder des Steinerfalls

Natursteine sind durch ihre Entstehungsgeschichte keine homogenen Werkstoffe mit genau definierbaren Eigenschaften und gleichbleibendem Aufbau. Dies gilt sowohl für sedimentäre Gesteine wie auch für magmatische und metamorphe Gesteine. So können z. B. Sandsteine aus der gleichen geologischen Formation und sogar dem gleichen Bruch höchst unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Hinzu kommt noch die unterschiedliche Beeinflussung durch die Lage am Bauwerk und die unterschiedliche Vorbehandlung, so daß das Schadensbild des Natursteinerfalls sehr komplex ist und die Haltbarkeit am Bauwerk variieren kann.

Allgemein werden folgende Schadensbilder beobachtet:

Schalenbildung

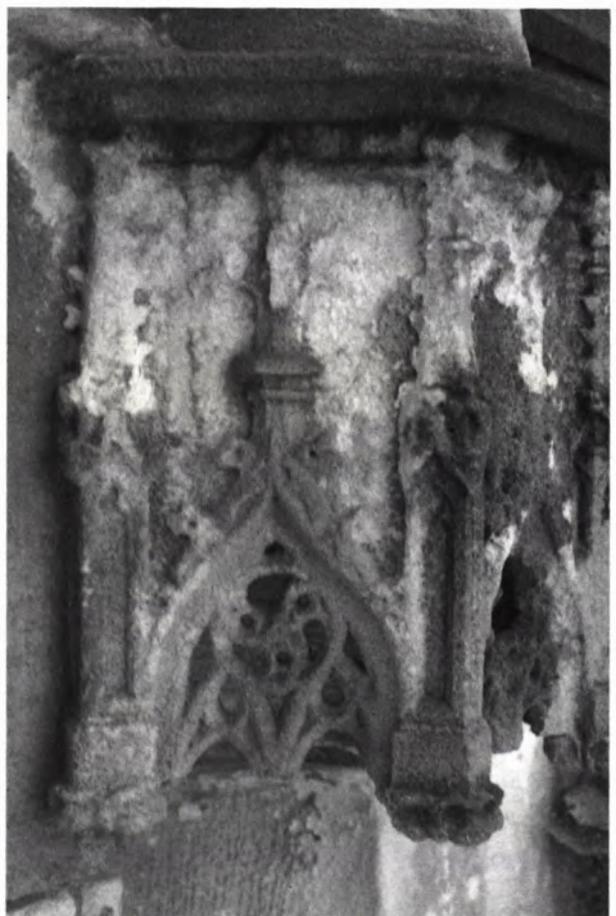
Aussehen: Eine starre Schale aus dem gleichen Gesteinsmaterial, die lange Zeit keine Auflösung zeigt und sich dann als große, steife Platte ablöst.



4 u.5 **ESSLINGEN**, Frauenkirche, Marienportal. Das Tympanon in einer Aufnahme von 1900. Es ist unbeschädigt. Dasselbe Portal im Jahr 1986. Der Zustand vieler Figuren hat sich stark verschlechtert, in einigen Bereichen fehlen bereits Teile. Die hier gezeigte Josefsdarstellung aus der Mitte des unteren Tympanonreliefs zeigt schwerwiegende Steinschäden mit teilweise erheblichen Substanzverlusten besonders an vorspringenden Teilen.



6 **REICHENAU-MITTELZELL**, Kreis Konstanz, Münster St. Markus. Starke Schalenbildung an einem Eckquader aus rotem Sandstein. Das Schadensbild besteht nicht nur aus oberflächenparallelen Abplatzungen, sondern auch aus horizontalen Rissen und Ausblühungen unter den abfallenden Schalen.



7 **GÖPPINGEN**, Oberhofenkirche. Feingliederiger gotischer Baldachin neben dem Hauptportal der Kirche. Der Sandstein ist durch Ausblühungen und starkes Absanden fast bis zur Unkenntlichkeit zerstört. Daneben zeigt er an zahlreichen Stellen dicke Schmutzkrusten.

Ursache: Das herausgelöste Bindemittel verfestigt die Außenhaut, darunter bildet sich eine stark wassergesättigte und meist gipsreiche Zwischenschicht, die zur Ablösung führt; dazu kommen Frost-Tau-Wechselbeanspruchung und andere Scherbeanspruchungen.

Absandungen

Aussehen: Die Oberfläche wirkt aufgeraut und zahlreiche kleine Sandkörnchen ragen aus der Grundmasse heraus, die schon bei leichter Berührung abfallen.

Ursache: Verlust und Auflösung des Bindemittels durch Angriff von Lösungen, Salzsprengphänomene, Tausalzeinfluß oder durch biologische Erosion.

Krümelerfall

Aussehen: Vollständiger krümeliger Zerfall der Oberfläche in unregelmäßige Bröckchen.

Ursache: Entlang von zahlreichen Rissen kann ständig Wasser eindringen und durch Wechselbeanspruchungen, z. B. Frost-Tau-Wechsel, das Gestein zersprengen. Die Mikrorisse oder Trennflächen sind entweder geologisch bedingt oder durch mechanische Beeinflussung entstanden und werden durch nachfolgende Einflüsse verstärkt.

Ausblühungskrusten

Aussehen: Weiße oder andersfarbige Krusten und Sinter an der Oberfläche der Gesteine, häufig an relativ geschützten Stellen.

Ursache: Herausgelöste Stoffe aus anderen Bereichen werden an regengeschützten Bauteilen abgeschieden oder bilden sich neu als Reaktion mit Immissionsstoffen.

Schmutzkrusten

Aussehen: Schwarze, unregelmäßige Krusten und Überzüge, häufig locker aufsitzend.

Ursache: Ruß und Staubpartikel haften auf bestimmten Gesteinsoberflächen sehr gut und werden von neuen Mineralbildungen an der Oberfläche verbacken.

Pudriger Zerfall

Aussehen: Die Oberfläche der Gesteine oder eine tiefere Schicht fallen mehlartig oder pudrig ab.



8 **ESSLINGEN, Münster St. Paul.** Sehr starke Verschmutzung und Krustenbildungen auf Schilfsandstein. Unter den Schmutzkrusten sind teilweise hohe Gipsanteile und tiefreichende Auflösungen zu beobachten.

Ursache: Vielfältig, besonders bei dichten, wenig wasserdurchlässigen Gesteinen zerfallen die obersten Schichten derartig mehlig, bei manchen Gesteinen ist Salzsprengung hierfür verantwortlich.

Auswaschungen, Kavernen und Zellenbildungen

Aussehen: Die Gesteine weisen deutliche Kavernen,



9 **AIXHEIM, Kreis Tuttlingen, Katholische Kirche.** Innerhalb eines relativ gut erhaltenen Mauerwerksverbandes aus Sandstein zeigen einzelne Steine ein tiefgreifendes Absanden und Aushöhungen. Diese unterschiedlichen Gesteinszustände müssen auch unterschiedlich behandelt werden.



10 KUCHEN, Kreis Göppingen, Evangelische Pfarrkirche. Die Aufnahme zeigt im oberen Bereich vermutlich einen Schilfsandstein, als Sockel wurde wahrscheinlich ein lokaler Sandstein des Braunen Jura verwendet. Der Stein im Sockelbereich zeigt ein starkes Absanden und oberflächenparallele Abblätterungen. Die sedimentär bedingte lagige Struktur wird durch die Verwitterung herausgearbeitet.

Höhlungen oder starkes Zurückspringen gegen den Nebenblock auf.

Ursache: Stärker lösliche Minerale oder Partien in einem Gestein, die bevorzugt herausgelöst werden, häufig in Kombination mit einem abdichtenden Nebenblock, so daß sich das Wasser im weniger dichten Gestein staut und zerstörend wirken kann.

Rißbildungen

Aussehen: Offene Risse aller Größenordnungen, innerhalb eines Gesteinsblockes begrenzt auftretend.

Ursache: Spannungen im Gestein durch Temperaturschwankungen, Unstetigkeiten im Gestein, Wassereinfluß etc. führen zur Überschreitung der Zugfestigkeit des Gesteins.

Risse, die mehrere Blöcke durchqueren, lassen dagegen auf Spannungen im Gebäude schließen.

Blasenbildung, Aufblätterungen

Aussehen: Rundliche, gewölbte Gebilde, die bei Öffnung darunter Hohlräume besitzen und sich aufwölben abfallen.

Ursache: Treiberscheinungen durch Mineralneubildung und/oder abdichtende Außenschicht, die als Wasserdampfsperre wirkt.

Die genannten Schadensbilder treten zum Teil neben-

und miteinander auf und verstärken sich vermutlich gegenseitig, außerdem können sie häufig durch mehrere Ursachen hervorgerufen werden, so daß eine genauere Untersuchung meist unerläßlich ist.

Die Schadensursachen und ihre Erforschung

Um die Schadensursachen erforschen zu können, ist es nötig, möglichst viel über den verwendeten Naturstein, den Aufbau des Denkmals, die verwendeten Materialien, die lokale klimatische Situation und die Immissionsituation zu wissen, da all diese Bedingungen einen Einfluß auf das Schadensbild haben können. Vorab ist zu sagen, daß alle Gesteine einer natürlichen Verwitterung unterliegen, die aber sehr unterschiedlich schnell sein kann. So sind silikatische Gesteine weitaus schwerer verwitterbar als karbonatische oder sulfatische. Die Verwitterung scheint auch um so langsamer anzugreifen, je homogener und dichter ein Gestein ist und um so weniger Wasser in der Umgebung ist. Generell kann von drei verschiedenen Angriffsarten, einer chemischen, physikalischen und biologischen Verwitterung gesprochen werden, wobei sie sich in der Natur kaum gegeneinander abgrenzen lassen.

Diese natürliche Verwitterung kann aus verschiedenen Gründen schneller ablaufen (Grimm, 1983), und es treten auch Schadenmechanismen auf, die erst durch die vom Menschen verursachten Umweltverschmutzungen hervorgerufen werden.

Die Faktoren des Steinzerfalls

Folgende Faktoren wurden teilweise wissenschaftlich untersucht und können beim beschleunigten Steinzerfall eine Rolle spielen. Ein Teil der Verwitterungsfaktoren ist bereits naturgegeben, so daß der richtigen Gesteinsauswahl in jedem Falle eine große Bedeutung zukommt:

1. Von der Gesteinsseite:

Aufbau des Gesteins, chemische Zusammensetzung, Art des Bindemittels, Löslichkeit der Komponenten, Homogenität des Gefüges, Größe der inneren Oberfläche, Porosität, Festigkeit und Verformbarkeit des Gesteins.

2. Verhalten der Gesteine gegenüber Wasser in den verschiedensten Formen:

Wasseraufnahmefähigkeit, Wasserabgabefähigkeit, Permeabilität, Wassersättigungswert, kapillare Wasseraufnahme, Wasserdampfdurchlässigkeit usw.

3. Spannungen und Risse:

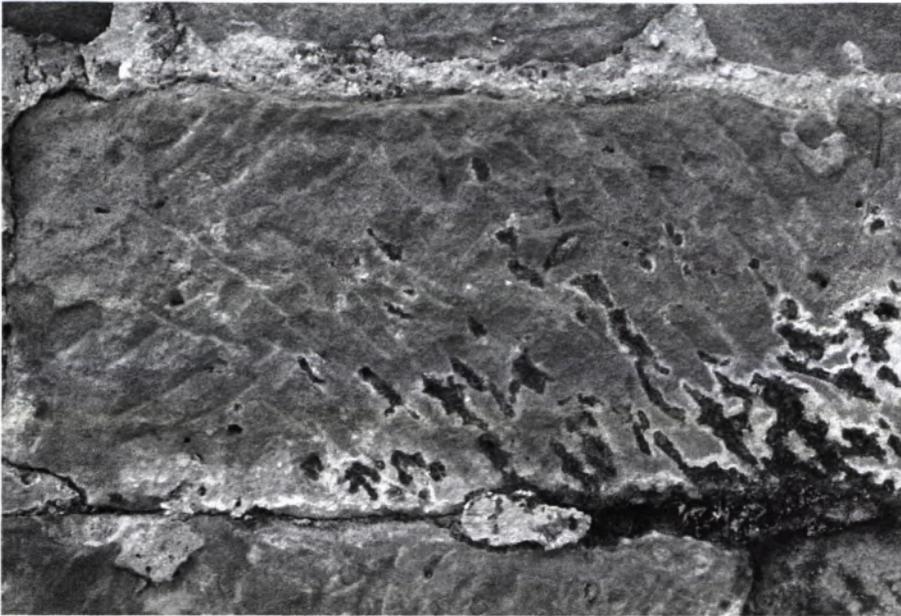
Natürlich bedingte Risse (Lager, Klüfte), durch den Herstellungs- und Verarbeitungsprozeß bedingte Risse, Risse durch Wärmebeanspruchung, lastenunabhängige und lastabhängige Spannungen, Wechselbeanspruchungen verschiedener Art.

4. Klimatische Faktoren:

Häufiger Frost-Tau-Wechsel, Regenmenge und -dauer, die chemische Zusammensetzung des Regens, Nebelhäufigkeit, Windstärke, -richtung, Sonnenscheindauer, UV-Strahlung, Spitzentemperaturen und Geschwindigkeit der Temperaturwechsel.

5. Biologische Verwitterung:

Art und Anzahl der siedelnden Organismen, Säureproduktion der Organismen, Wurzelsprengung, Verhinderung der Austrocknung durch Pflanzenbewuchs.



11 HIRSAU, Kreis Calw, Kloster. Historische Oberflächenbearbeitung (scharierter Stein) auf einem Mauerwerksquader, in den Vertiefungen haben sich Pflanzen angesiedelt. Der Pflanzenbewuchs führt zu einer Auflösung des Steins und zu deutlichen Bleichungshöfen im roten Sandstein.

6. Aufbau, Konstruktion und Wasserführung an den Bauwerken:

Schlechte Austrocknungsmöglichkeiten, stauende Nässe durch schlechte Wasserführung, falsche Mörtel, Auswahl von ungeeignetem Gesteinsmaterial für den Bauzweck, problematische Kombination von Bausteinen, allgemeine konstruktive Mängel.

7. Die Immissionsituation:

Konzentration an Schwefelverbindungen, Stickstoffverbindungen, Konzentration anderer Schadgase, Art der Verbindung und Aggregatzustand; Oxidations- oder Reduktionsvorgänge, Staubanteil in der Luft, Staubbiederschlag und -zusammensetzung.

8. „Mißglückte“ Sanierungsversuche:

Sanierungen, bei denen bauschädliche Stoffe verwendet wurden; künstliche Abdichtungen geschaffen wurden, die keine Belüftung oder Austrocknung mehr zulassen; Mörtel als Salzlieferanten; Verwendung ungeeigneter Mörtel, Putze oder Farben.

Hinzu kommen noch weitere Faktoren wie die Streusalzbelastung und ggf. Vibrationen durch hohe Schallbelastungen, die durch den Menschen verursacht werden. Auch Nutzungsänderungen der alten Gebäude mit verändertem Raumklima und Verwendung anderer Materialien führen häufig zu Schäden.

Es hat sich herausgestellt, daß sich zahlreiche Parameter gegenseitig beeinflussen, häufig ohne daß der Mechanismus der Beeinflussung und die Quantität bekannt wären. Auch eine Abgrenzung zwischen natürlich bedingter und künstlicher Verwitterung ist sehr schwer durchzuführen. Die gleichen Schwierigkeiten bestehen für die Angabe eines exakten Geschwindigkeitsverlaufs.

Bisherige Untersuchungen zur Kennzeichnung der Zerstörungsvorgänge an den Gesteinen

Es sind viele Untersuchungen erfolgt, um die entscheidenden und kritischen Merkmale zu finden, die einen Verwitterungsvorgang kennzeichnen, um den Vorgang zu quantifizieren und seine Geschwindigkeit zu bestimmen (Niesel & Schimmelwitz, 1982; Niesel, 1979;

Grimm, 1983; Baudracco, 1985; Driussi u. a. 1985; Felix, 1985; Kraus & Jasmund, 1981; Lange, 1972. Es kann hier nur eine kleine Auswahl angeführt werden).

Andere Untersuchungen haben sich intensiv mit der Vorhersage von Verwitterungsanfälligkeit und der Eig-



12 REICHENAU-MITTELZELL, Kreis Konstanz, Münster St. Markus. An vielen Stellen des Bauwerks wurden Steingänzungen mit farblich abgestimmten Mörteln vorgenommen. Die Ergänzungen – vermutlich um 1936 angebracht – zeichnen sich bereits durch Verfärbungen und Ausblühungen ab, die auch in den Naturstein gewandert sind.

13 LUDWIGSBURG, Schloß.
 Eckpfosten einer Balustrade im
 Schloßpark. Um 1930 wurden
 hier Profilierungen an den Sä-
 u len und Eckpfosten mit stark ze-
 menthaltigen Mörteln durchge-
 führt. Heute fallen die Antra-
 genungen mit Natursteinpartien
 komplett ab.



nung von Gesteinen und den dafür benötigten Parametern auseinandergesetzt (Winkler, 1985; Fitzner & Snethlage, 1982 a und b; van Atta & Ludowise, 1974; Efes & Lühr, 1975; Lange, 1972).

Als entscheidende Kriterien für eine Vorhersage der Verwitterbarkeit werden angesehen (oft auch in Kombination):

Die Gesamtporosität, der Grobporen-/Feinporen-Anteil, die innere Oberfläche eines Gesteins, die Wasseraufnahmefähigkeit, die kapillare Saugfähigkeit, die Löslichkeit der Gesteinskomponente, die Homogenität des Gefüges, der Anteil an Tonmineralien und quellbaren Mineralien, die Quellfähigkeit des Gesteins bei Wassereinfluß, die Resistenz bei Salzsprengtests, die Änderung der Mikrohärtigkeit bei Verwitterungstests, die Abriebbeständigkeit, die Frost-Tau-Beständigkeit und das Verhalten bei Temperaturbelastungen.

Dies zeigt, daß schon in der Auswahl der Gesteinscharakteristiken, die eine Eignung oder Anfälligkeit vorhersagen lassen, eine große Meinungsvielfalt besteht und eine Vielzahl von teilweise divergierenden Ergebnissen vorliegt. Auch der bereits erreichte Verwitterungsgrad kann nicht allgemeingültig definiert oder beschrieben werden. Die Wertung des erreichten Verwitterungsgrades ist bei Baudenkmalen weit differenzierter vorzunehmen als beim allgemeinen Bautenschutz; denn eine wenige Millimeter tiefe Abwitterung der Oberfläche kann bei einem Natursteinmauerwerk unerheblich sein, während sie bei einer Skulptur schon den weitgehenden Verlust des originalen Kunstwerkes bedeutet (Wolff, 1984).

Die Rolle der Position am Bauwerk

Bei der Situation am Bauwerk ergibt sich ein ähnlich differenziertes Bild, da die Gesteine je nach Exposition sehr unterschiedlich stark geschädigt sein können:

An der Wetterseite, meist Westen, findet eine bevorzugte Auflösung und Weglösung des Gesteines statt, und wasserbeeinflusste Schadensbilder treten auf. An der Ostseite und an geschützten, überhängenden Bauteilen kommt es vorwiegend zur Krusten- bzw. Sinterbildung und zu Ausblühungen. Diese Neubildungen haben

sprengende Wirkung, außerdem verlangsamen sie eine Austrocknung und halten Schmutz, der katalytisch wirken kann, sehr gut fest (Kieslinger, 1958; Arnold, 1981; Weber, 1985 a; Kraus, 1985). So konnten auch Braitsch & Trautmann (1965) bevorzugte Bereiche am Freiburger Münster ausmachen, die die stärksten Auflösungserscheinungen zeigen: der Sockel, Durchfeuchtungsgebiete, filigranes Maßwerk der Turmpyramide und Bereiche unter überhängenden Gesimsen. Sie vermuten auch, daß der Wechsel trocken/naß, die Frostsprengung und großer Wassereinfluß am stärksten schädigend wirken. Die Sockelbereiche sind häufig außer durch aufsteigende Nässe durch die Streusalzbelastung stark geschädigt (Frank, 1983; Weber, 1984). Eine Kartierung der Schäden am Bauwerk ist häufig eine große Hilfe, um durch gezielte Maßnahmen in den Schadensablauf einzugreifen.

Schadstoffimmissionen

Die bahnbrechenden und grundlegenden Arbeiten zur Immissionsmessung an Bauwerken leistete Luckat (1972, 1975, 1981), der mit seiner mobilen Meßstation IRMA, die in verschiedenen Höhen an den Baudenkmalen befestigt wurde, nachweisen konnte, daß der Schädigungsgrad mit den SO₂-Immissionsraten an Baudenkmalen korrelierbar ist. Verfeinerte Meßmethoden erlauben heute laufend auch andere gas- und partikelförmige Verschmutzungen der Luft direkt zu messen (Dannecker, Müller & Wolf, 1987; Dannecker, 1986). Es wurde in zahlreichen Arbeiten nachgewiesen, daß die Schwefelanteile der Luft mit den kalkhaltigen Baustoffen zu Gipskrusten reagieren, und diese Reaktion sprengend auf das Gefüge der Natursteine wirkt (Literaturdiskussion bei Niesel, 1979). Der Schwefelgehalt der Luft wird zum Teil erst auf der Baustoffoberfläche oxidiert (Beilke, Lamb & Müller, 1975). Auch viele Salze, die an Gebäudeoberflächen gefunden wurden (Arnold, 1976 und 1981; Winkler & Wilhelm, 1970; Winkler & Singer, 1972), lassen sich nur über Wechselwirkungen mit der Umwelt erklären. Die Staubimmissionen scheinen auch in mehrfacher Hinsicht eine große Rolle zu spielen; so ist von zahlreichen Metallen, die im Staub vorhanden sind, bekannt, daß sie die Schwe-

feloxydation beschleunigen (Barrie & Georgii, 1976, Fassina, 1978). Staub und Ruß bilden außerdem abdichtende Krusten, an denen weitere Schadstoffe gut haften. Untersuchungen von Kraus (1985 a) und Furlan & Girardet (1983) haben nachgewiesen, daß ein Großteil, wenn nicht sogar der überwiegende Teil der Schwefelanreicherung auf den Baustoffen durch trockene Ablagerungen erfolgt. In letzter Zeit werden zudem die Rolle der Stickoxide und ihre Bedeutung für die Salz- bildung, Oxidationsvorgänge und die Lebewelt am Ge- stein zunehmend erforscht (Zalmanzing, 1984; Li- vingston, 1985; Bock, 1986).

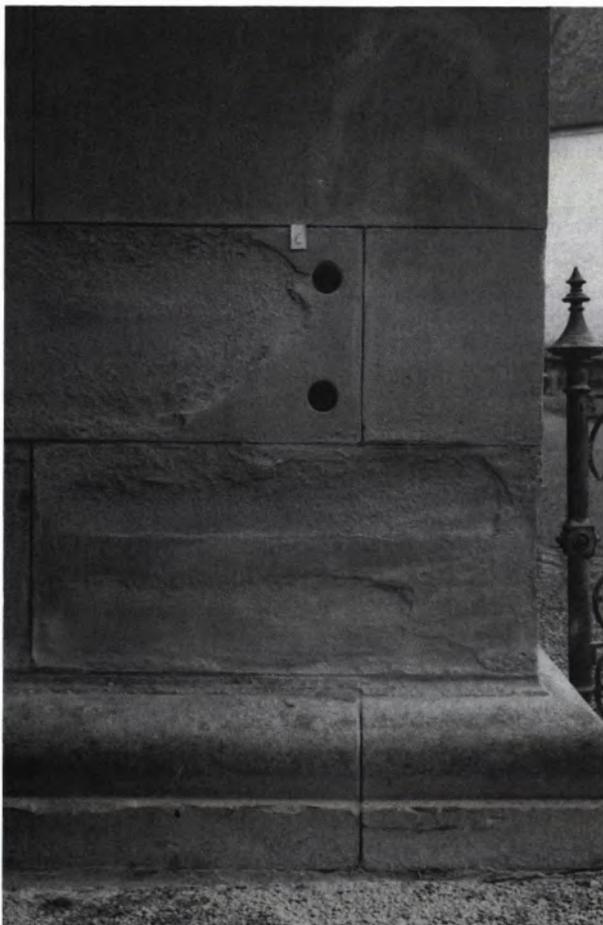
Der Ablauf der Zerstörung

In zahlreichen Untersuchungen konnte gezeigt werden, daß ein Teil der immitierten Schadstoffe in Verbindung mit Feuchtigkeit zu einem Säureangriff auf den Bau- stoff und somit zur Lösung oder Schwächung des Bin- demittels führt. Zusätzlich kommt es zur Bildung von Salzen und nachfolgend zu Salzsprengungseffekten, die wiederum die Porosität erhöhen. Die erhöhte Porosität steigert die Wasseraufnahme, so daß eine Kombination der aufgelisteten Einflußfaktoren zur gänzlichen Zer- störung des Steinmaterials führt.

Untersuchungen am Gebäude und im Labor

Untersuchungen am Gebäude

An den Gebäuden sollte stets versucht werden, durch zerstörungsfreie oder zumindest zerstörungsarme Prüf- methoden den Ist-Zustand des Gebäudes zu erfassen. Hierzu sind verschiedene Systeme in der Entwicklung und in der Erprobung, wobei sich die abschließende



Auswertung meist als komplexe Anforderung erweist (Diem, 1982). Eine methodisch sinnvolle Abfolge der Voruntersuchungen für eine anschließende Restau- rierung wurde in der VDI-Richtlinie (3798) aufgezeigt: „Konservierung von Naturstein und anderen nichtme- tallischen Materialien bei Objekten von kulturhisto- rischem Wert“.

Bei allen Untersuchungen am Gebäude sollte vorrangig darauf geachtet werden, daß keine Bearbeitungsspuren, Farbfassungen und Zierteile beschädigt werden.

Laboruntersuchungen

Die Laboruntersuchungen sind teilweise, soweit sie bauingenieurmäßig notwendig sind, als Normenprüf- verfahren geregelt. Wobei sich aber manchmal ergibt, daß die Ergebnisse im Falle der Natursteine sich relativ schwierig auf die Praxis übertragen lassen.

Die aufgeführten Untersuchungen führen zu einer Schadensbeschreibung und lassen die Aufstellung eines Konservierungs- und Restaurierungskonzeptes zu. Sie ermöglichen auch die Auswahl von passenden Ergä- nzungsmassen, Mörteln und ggf. Naturstein-Austausch- material.

Die häufigsten Restaurierungs- und Konservierungsver- fahren und der Ablauf der Maßnahmen

Eine Natursteinrestaurierung setzt sich in der Regel aus mehreren Einzelschritten zusammen, deren Ablauf durch die Voruntersuchungen entsprechend der Scha- densanalyse festgelegt wird. Das Restaurierungskon- zept muß denkmalpflegerische Interessen wahren, also eine möglichst weitgehene Erhaltung des Originalbe- standes anstreben. Prinzipiell wird also der weitere Ar- beitsgang wie folgt ablaufen:

- a) Vorfestigung von mürben Partien, Sicherung von lo- sen Teilen und Abnahme von stark geschädigten Teil- en, die einer Spezialbehandlung bedürfen;
- b) Reinigung von Verschmutzungen;
- c) Beseitigung von Schadensursachen, soweit möglich;
- d) Steinkonservierungsmaßnahmen in situ;
- e) Ersatz oder Teilersatz von nicht mehr sanierbaren Partien; Auswahl und Abstimmung von Ersatzmateria- lien;
- f) flankierende Maßnahmen und Schlußdokumentation.

Alle Maßnahmen während der Sanierung sollten ge- nauestens dokumentiert werden.

Zu a): Lockere und abfallende Teile müssen gesichert und ggfs. abgenommen und geschützt untergebracht werden. Mürbe Partien können mit einem Steinfestiger vorgefestigt werden. Zur Sicherung und Wiederbefesti- gung kommen verschiedene Kunstharze in Frage.

Zu b): In der Literatur sind zahlreiche Reinigungsver- fahren aufgelistet (z. B. Weber, 1985 a), von denen aber einige schon durch die zu erwartenden chemischen Re- aktionen abzulehnen sind. Dies zeigen auch Untersu- chungen von Folgeschäden nach aggressiven Sand- und Laugenreinigungen. Es sollten an Verschmutzungen

14 SALEM, Bodenseekreis, Münster, Nordfassade. Aus den geschädigten Bereichen werden Bohrkern entnommen, da für eine detaillierte Untersuchung des Schadensbildes, das hier bereits im Austauschmaterial von 1930 auftritt, Tiefenprofile verschiede- ner Eigenschaften erforderlich sind.



15 u. 16 LAUDA, Main-Tauber-Kreis, Alter Friedhof. Bei der in die Mauer eingelassenen Kreuzwegstation wurde eine Acrylharz-Volltränkung vorgenommen, da das Objekt bereits so weitgehend geschädigt war, daß es nur noch durch diese Maßnahme erhalten werden konnte. Die Aufnahme rechts zeigt ein Detail aus der Kreuzwegstation (der Originalausschnitt ist ca. 20×40 cm groß). In diesem Zustand befand sich das Relief 1985 vor der Behandlung. Die figürlichen Bereiche haben tiefreichende Risse, mürbe Partien und abplatzen-de Schalen, die z. T. hochstehende Schollen bilden.

Vorversuche gemacht werden, welche Mittel sich am besten eignen; ggfs. muß im Interesse der Substanzerhaltung auf eine vollständige Schmutzentfernung verzichtet werden. Vor jeder Reinigung sind außerdem Farb- und Fassungsreste zu dokumentieren und Belegstücke zu sichern.

Zu c): Die Beseitigung der Schadensursachen kann, soweit sie nicht immissionsbedingt sind, nach der Abklärung der Schadensentstehung erfolgen und umfaßt z. B. eine Entsalzung, neue Verfugungen, Änderungen der Wasserführung, Schutzdächer, biologische Bekämpfung, Entfernung von sprengenden Eisenteilen, Fundamentabdichtung u. v. m.

Zu d): Steinkonservierungsmaßnahmen am Gebäude
An Steinkonservierungsmittel müssen sehr hohe Anforderungen gestellt werden, da sie zu keinen sichtbaren Veränderungen führen dürfen und eine verlängerte Haltbarkeit des wertvollen Denkmals gewährleisten sollen. Sie sollen eine gleichmäßige Verfestigung des Steines erzeugen, möglichst ungiftig sein, leicht verarbeitbar, resistent gegen Nässe und Temperatur sein, eine normale Belüftung des Bauteils garantieren, Schadstoffe möglichst fernhalten und reversibel in der Anwendung sein. Ein Universalmittel, das alle diese Bedingungen erfüllt und langfristig erprobt ist, wurde bisher noch nicht gefunden.

In der momentanen Praxis setzt sich die Steinkonservie-

rung häufig aus zwei Arbeitsschritten zusammen: einer Festigung des Gesteins bei zermürbter Gesteinssubstanz und einer anschließenden Imprägnierung mit Hydrophobierungsmitteln.

Zur Gesteinsfestigung:

Als Gesteinsfestiger, hauptsächlich bei geschädigtem Sandstein, wird in jüngster Zeit nur mehr Kieselsäureester eingesetzt, der durch Reaktion mit dem Wasser im Baustoff ein Kieselgel abscheidet, das den Bindemittelverlust z. T. ausgleichen kann. Kieselsäureester sind sehr dünnflüssig und können daher weit in den Stein eindringen. Sie enthalten bis zu 70% Wirkstoff und ein leichtflüchtiges Lösungsmittel.

Andere Systeme, die früher eingesetzt wurden, haben sich als nutzlos oder sogar schädlich erwiesen. Flußsäure und Fluat z. B. haben zu einer weiteren Gefügeschwächung durch Bindemittelverlust geführt, und Wasserglasbehandlungen riefen eine erhebliche Salzbelastung mit allen ihren Nachteilen hervor; bei keinem der genannten Verfahren konnte ein Neuaufbau des zerstörten Bindemittels durch einerseits CaF_2 oder Kieselgele erzielt werden. Auch bei der Behandlung mit Barytwasser konnte keine Bildung von schwerlöslichem BaSO_4 beobachtet werden.

Aber auch bei dem relativ bewährten Mittel Kieselsäureester müssen Voruntersuchungen die benötigte Auftragsmenge, die erfolgte Festigkeitssteigerung, die Ein-

dringtiefe und die Verfahrensweise abklären. Auch Kunstharze würden eine ausreichende Bindemittelmenge erzeugen; da sie aber teilweise sehr zähflüssig sind, häufig schlecht angenommen werden und Dampfsperren bilden, können sie bisher nur für Spezialzwecke, z. B. Acrylharz-Volltränkungsverfahren im Vakuum an beweglichen Objekten, Reißverpressungen und Klebungen, eingesetzt werden. Das Acryl-Volltränkungsverfahren kann dann zum Einsatz kommen, wenn mit herkömmlichen Methoden keine Sanierung mehr zu erzielen ist.

Die Imprägnierungs- und Hydrophobierungsmittel:

Diese Mittel sollen die Wasseraufnahme reduzieren und den Naturstein vor lösendem Angriff schützen, ohne dabei die Dampfdurchlässigkeit zu vermindern. Hierfür sind im wesentlichen siliciumorganische Verbindungen unterschiedlicher Rezepturen im Einsatz. Jedes einzelne Mittel besitzt gewisse Vor- und Nachteile, die seine Anwendbarkeit einschränken. Die Hydrophobierungsmittel müssen vor ihrer Anwendung auf dem Naturstein getestet werden, da bislang keine Vorhersage ihrer Wirksamkeit möglich ist. Testserien von verschiedenen Mitteln auf Gesteinen unterschiedlicher Zusammensetzung zeigen, daß sich die Systeme sehr unterschiedlich verhalten können (Luckat, 1975; Marschner, 1973, 1980; Hempel, 1975; Roth, 1983; Janning

u. a. 1985). Andere Polymersysteme sind im Erforschungsstadium hinsichtlich ihrer Eignung als Hydrophobierungs- und Festigungsmittel (Sasse, 1986). Mit der Haltbarkeit von Hydrophobierungen und hydrophobierend behandelten Fassaden haben sich beispielsweise Grunau, 1981, Winkler, 1984, und Sneathlage, 1986, beschäftigt.

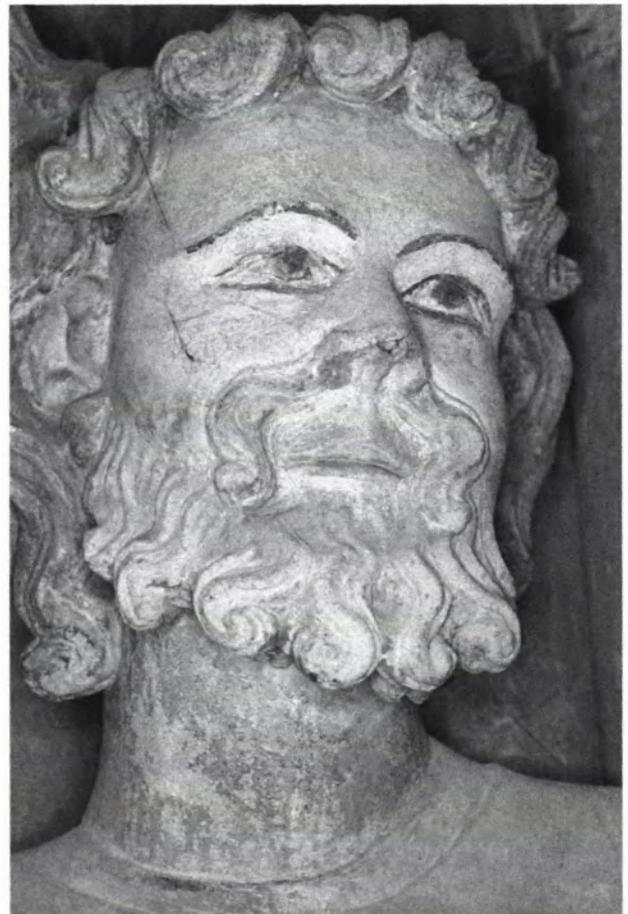
Zu e): Ersatz oder Teilersatz von nicht mehr sanierbaren Teilen

Nicht mehr sanierbare Teile werden meist traditionell steinmetzmäßig ersetzt. Sie können aber auch als Abguß oder Natursteinkopie hergestellt werden. Kleinere fehlende Teile können durch Restaurierungsmörtel ergänzt werden, die sehr sorgsam auf den vorbehandelten Stein aufgetragen werden und in den Eigenschaften weitgehend auf den Stein abgestimmt sein müssen (Knöfel, 1975 und 1979). Die Eigenschaften von Restaurierungsmörteln, die als Steinersatzmassen verwendet werden können, sollen dem Naturstein auch in ihrem Erscheinungsbild entsprechen. Deshalb wird als Zuschlag häufig der aufgemahlene Naturstein verwendet. Unter Umständen kann es notwendig sein, die natürliche Patinierung mit Lasuren nachzuempfinden.

Zu f): Flankierende Maßnahmen und Schlußdokumentation

Im Rahmen einer Sanierung können sehr verschiedene

17 u. 18 BAD WIMPFEN, Kreis Heilbronn, links Ausschnitt aus der Kreuzigungsgruppe von Hans Backoffen. Die Gruppe entstand um 1500, seit Beginn des 20. Jahrhunderts hat sie starke Schäden erlitten. Das Schadensbild an den Figuren (der abgebildete Kopf war ehemals farbig gefaßt) ist geprägt von dünnschaligem Ablösen der Oberfläche, pudrigem Zerfall und Ausblühungen. Der Schaden ist vermutlich – wie ausführliche Untersuchungen der Zersetzungen schließen lassen – auf eine aggressive Ablaugung und Sulfatimmissionen zurückzuführen. Aus der Stiftskirche Bad Wimpfen i. T. stammt der Kopf (rechts) einer Chorpfilerfigur in farbig gefaßtem Stein. Ehemals befanden sich – rein technisch gesehen – die Figuren der Backoffen-Gruppe auch in einem ähnlichen Erhaltungszustand (die Aufnahmen stammen aus jüngster Zeit).



zusätzliche Maßnahmen zur Steinkonservierung nötig werden. Das Spektrum reicht von einer Neuverfugung bis zur statischen Sicherung des Gebäudes. Am Ende jeder Sanierung sollte eine Schlußdokumentation stehen, in der alle durchgeführten Maßnahmen nachlesbar sind und in der eine weitere Betreuung und Beobachtung des Objekts festgelegt wird.

Laufende Forschungen

Einen Überblick über den Stand der Forschungsaktivitäten an verschiedenen Instituten und den Forschungsbedarf bei natürlichen und synthetischen Baustoffen geben Snethlage & March, 1986. An dieser Stelle soll nur ein begrenzter Überblick über Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet gegeben werden. Seit 1985 existiert ein DFG-Sonderforschungsbereich SFB 315 am Fachbereich Architektur der Universität Karlsruhe, Leitung Prof. Dr. F. Wenzel. Das Bundesministerium für

Forschung und Technologie in Bonn fördert seit ca. 2 Jahren ein Forschungsprojekt BAU 5014, 5015, 5016 und BCT 0379, das sich interdisziplinär mit dem Zerstörungsablauf, den Einflußfaktoren und den Sanierungsmöglichkeiten von geschädigten Baudenkmalen beschäftigt.

Nach einer umfangreichen Literaturlauswertung kann gesagt werden, daß auf verschiedenen Gebieten die Zusammenhänge und Ursachen von gemessenen Phänomenen bei dem „Zerfall“ von Natursteinen nur punktuell geklärt sind. Viele der bisherigen Forschungsergebnisse haben weitere Fragen aufgeworfen, und in der Praxis der Steinkonservierung treten noch viele Probleme auf, so daß in Zukunft noch ein weites Betätigungsfeld vor uns liegt, bis Steine „geheilt werden“ können oder wir Schäden vermeiden können. Eine nicht unerhebliche Rolle wird hier die zukünftige Entwicklung der Umweltverschmutzung spielen.

Literatur:

Arnold, A. (1976): Behaviour of some soluble salts in stone deterioration. 2nd International Symposium on Deterioration of Building Stones, Athens 1976, S. 27–36.
Arnold, A. (1981): Salzminerale in Mauerwerken. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 61, 1981, S. 147–166.
Barrie, L. A., u. Georgii, H. W. (1976): An experimental investigation of the absorption of sulfur dioxide by water drops containing heavy metal ions. Atmospheric Environment, 10, 1976, S. 743–749.
Baudracco, J. (1985): Etude expérimentale de l'altération de roches par percolation. In: Félix, G. (1985), S. 177–184.
Beilke, S., Lamb, D., u. Müller, J. (1975): On the uncatalyzed oxidation of atmospheric sulfur dioxide by oxygen in aqueous systems. Atmospheric Environment, 9, 1975, S. 1083–1090.
Bock, E. (1986): Biologisch induzierte Korrosion von Naturstein – starker Befall mit Nitrifikanten. In: Bautenschutz und Bausanierung, Sonderheft „Bausubstanzerhaltung in der Denkmalpflege“ zum 1. Statusseminar des Bundesministers für Forschung und Technologie, 17. u. 18. Dez. 1986 in Mainz, S. 42–45.
Braitsch, O., u. Trautmann, L. (1965): Die Bausteine und Verwitterungsschäden am Freiburger Dom. 75 Jahre Münsterpfleger, Freiburger Münsterbauverein 1890–1965, Freiburg 1965, S. 89–104.
Dannecker, W. (1986): Einsatz eines neuartigen Passivsammlersystems an Kulturbauten zur Messung saurer reagierender Schadgase in der Atmosphäre. In: Bautenschutz und Bausanierung, Sonderheft „Bausubstanzerhaltung in der Denkmalpflege“ zum 1. Statusseminar des Bundesministers für Forschung und Technologie, 17. u. 18. Dez. 1986 in Mainz, S. 46–49.
Dannecker, W., Müller, H.-W., u. Wolf, F. (1987): Messung gasförmiger Luftverunreinigungen an Bauwerken. – Neuartiger Passivsammler. Staub und Umwelt, 9, 1987, S. 32–34.
Driussi, G., Valle, A., u. Biscontin, G. (1985): Porosity and soluble salts as decay's parameters of stone materials. In: Félix, G. (1985), S. 185–194.
Efes, Y., u. Lühr, H.-P. (1975): Einfluß der Porosität auf die Korrosion der am Kölner Dom verwendeten Natursteine. IRB-Forschungsbericht T 1006, Aachen 1975.
Fassina, V. (1978): A survey on air pollution and deterioration of stonework in Venice. Atmospheric Environment, 12, 1978, S. 2205–2211.
Félix, G. (Hrsg., 1985): 5th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Lausanne, Sept. 1985, Lausanne 1985.
Fitzner, B., u. Snethlage, R. (1982a): Über Zusammenhänge zwischen Salzkristallisationsdruck und Porienradienverteilung. GP-News Letters, 3, 1982, S. 13–26.

Fitzner, B., u. Snethlage, R. (1982b): Einfluß der Porienradienverteilung auf das Verwitterungsverhalten ausgewählter Sandsteine. Bautenschutz + Bausanierung 3, 1982, S. 97–104.
Frank, W. H. (1983): Verwitterungserscheinungen an Bauwerken aus Naturstein, Möglichkeiten der Restaurierung und Konservierung. Zeitsch. d. Dt. Geol. Ges., 134, 1983, S. 317–344.
Furlan, F., u. Girardet, F. (1983): Considerations on the rate of accumulation and distribution of sulphurous pollutants in exposed stones. In: Wittmann, F. H. (1983), S. 285–290.
Grimm, W. D. (1983): Rauigkeitsmessungen zur Kennzeichnung des Verwitterungsfortschrittes an Naturwerkstein-Oberflächen. In: Wittmann, F. H. (1983), S. 321–324.
Grimm, W.-D., u. Völkl, J. (1983): Rauigkeitsmessung zur Kennzeichnung der Naturwerksteinverwitterung. Zeitsch. d. Dt. Geol. Ges., 134, 1983, S. 387–412.
Grunau, E. B. (1981): Lebenserwartung von Hydrophobierungen der Fassade mit Siloxanharzen. Schriftenreihe „Bau- und Wohnforschung“ des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, F 1660.
Janning, F., Marschner, H., Rödder, K.-H., Roth, M., u. Schamberg, E. (1986): Natursteinhydrophobierung mit siliciumorganischen Verbindungen. 2. int. Kolloquium Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, 2.–4. 9. 1986, Esslingen. Tagungsband der Technischen Akademie Esslingen.
Kieslinger, A. (1958): Restspannung und Entspannung im Gestein. Geologie im Bauwesen, 24, 1958, S. 95–112.
Klemm, D. D. (1980): Gedanken zum Stand der Kalksteinkonservierung. In: Oel, H. J. (Hrsg.), 1980, S. 126–138.
Knöfel, D. (1975): Stichwort: Baustoffkorrosion. Wiesbaden/Berlin 1975, 127 S.
Knöfel, D. (1979): Bautenschutz mineralischer Baustoffe. Wiesbaden/Berlin 1979, 220 S.
Kraus, K. (1985a): Experimente zur immissionsbedingten Verwitterung der Natursteine des Kölner Doms im Vergleich zu deren Verhalten am Bauwerk. Dissertation, Universität Köln 1985, 208 S.
Kraus, K. (1985b): Unterschiedliche Verwitterungsanfälligkeit der Kölner Dombausteine. Kölner Domblatt, Jahrb. d. Zentral-Dombau-Vereins, 50, 1985, S. 101–104.
Kraus, K., u. Jasmund, K. (1981): Verwitterungsvorgänge an Bausteinen des Kölner Domes. Kölner Domblatt, 46, 1981, S. 175–190.
Krumbein, W. E. (1973): Über den Einfluß von Mikroorganismen auf die Bausteinverwitterung. – Eine ökologische Studie. Deutsche Kunst- und Denkmalpflege 31, 1973, S. 54–71.
Lahmann, E. (1985): Immission materialschädigender Luftverunreinigungen. VDI-Bericht 530, Materialkorrosion durch Luftverunreinigungen, Tagung Köln, 17. bis 19. Okt. 1984, S. 23–48.

- Lange, P. (1972): Gesteintechnische Prüfung und baupraktische Eignung von Brecherprodukten aus Hartgestein verschiedenen Verwitterungsgrades. Ber. deutsch. Ges. geol. Wiss. Geol. Paläont., 17/4, 1972, S. 593–601.
- Livingston, R. A. (1985): The role of nitrogen oxides in the deterioration of carbonate stone. In: Félix, G. (1985), S. 509–516.
- Luckat, S. (1972): Ein Verfahren zur Bestimmung der Immissionsrate gasförmiger Komponenten. Staub-Reinhalung der Luft, 32, 1972, S. 484–486.
- Luckat, S. (1975): Die Einwirkung von Luftverunreinigungen auf die Bausubstanz des Kölner Domes III. Kölner Domblatt, 40, 1975, S. 75–108.
- Luckat, S. (1981): Quantitative Untersuchungen des Einflusses von Luftverunreinigungen bei der Zerstörung von Natursteinen. Forschungsbericht 10608003/02, Dortmund 1981.
- Marschner, H. (1973): Laboratoriumsuntersuchungen zum Verwitterungsschutz von Bausteinen. Deutsche Kunst- und Denkmalpflege 1973, S. 32–44.
- Niesel, K. (1979): Zur Verwitterung von Baustoffen in schwefeldioxidhaltiger Atmosphäre – Literaturdiskussion. Fortschr. Mineralogie, 57, 1979, S. 68–124.
- Niesel, K., u. Schimmelwitz, P. (1982): Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale. BAM-Forschungsbericht 86, 99 S.
- Oel, H. J. (Hrsg., 1980): Sitzung des Arbeitskreises „Naturwissenschaftliche Forschung an Kunstgütern aus Stein“, München, 6. u. 7. 3. 1980. Institut für Werkstoffwissenschaften, III, Erlangen 1980.
- Sasse, H. R. (1987): Polymere als Schutzstoffe für Naturstein. – Anforderungskriterien und Stand der Entwicklung. In: Bautenschutz und Bausanierung, Sonderheft „Bausubstanzerhaltung in der Denkmalpflege“ zum 1. Statusseminar des Bundesministers für Forschung und Technologie, 17. u. 18. Dez. 1986 in Mainz, S. 65–68.
- Schmidt-Thomsen, K. (1969): Zum Problem der Steinerstörung und -konservierung, Deutsche Kunst- und Denkmalpflege, 27, 1969, S. 11–23.
- Schumann, D. (1981): Natursteinschutz durch Imprägnierungen (hydrophobierend) und Beschichtungen (Anstriche und Putze). Baugewerbe, 15, 1981, S. 28–32; 17, 1981, S. 54–60.
- Snethlage, R. (1984): Adneter Rotmarmor-Eigenschaften, Schadensbilder und Konservierungsmöglichkeiten. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, 25, München 1984, S. 27–41
- Snethlage, R., u. Mach, M. (1986): Umweltbedingte Gebäudeschäden. 1986.
- Snethlage, R. (1986): Messungen zur Dauerhaftigkeit von Hydrophobierungen an Sandsteingebäuden. In: Bautenschutz und Bausanierung, Sonderheft „Bausubstanzerhaltung in der Denkmalpflege“ zum 5. Statusseminar des Bundesministers für Forschung und Technologie, 17. u. 18. Dez. 1986 in Mainz, S. 16–19.
- Van Atta, R. O., und Ludowise, H. (1974): A Study of Petrography and Degradation of Some Basaltic Aggregates, Nestucca River Area, Oregon. Eng. Geol. Soil. Eng. Symp. Proc., Boise, Idaho, 1974, S. 59–70.
- Weber, H. (1984): Mauerfeuchtigkeit und deren Beseitigung. Bautenschutz + Bausanierung 1, 1984.
- Wihr, R. (1980a): Restaurierung von Steindenkmälern. Ein Handbuch für Restauratoren, Steinbildhauer, Architekten und Denkmalpfleger. München 1980.
- Wihr, R. (1980b): Kieselsäureester- und Acrylharzvolltränkung an zwei Beispielen aus der Praxis. Aus → „Oel (1980)“, S. 122–125.
- Winkler, E. M. (1984): Neue, einfache Testmethoden für die Wirksamkeit von Steinkonsolidierungsmitteln. Bautenschutz + Bausanierung 2, 1984, S. 90–92.
- Winkler, E. M. (1985): A durability index for stones. In: Félix, G. (1985), S. 151–156.
- Winkler, E. M., und Singer, P. C. (1972): Crystallization Pressure of Salts in Stone and Concrete. Geol. Soc. America Bull., 83, 1972, S. 3509–3514.
- Winkler, E. M., und Wilhelm, E. J. (1970): Saltburst by hydration pressure in architectural stone in urban atmosphere. Geol. Soc. America Bull., 81 (2), 1970, S. 567–572.
- Wittmann, F. H. (Hrsg., 1983): Werkstoffwissenschaften und Bausanierung. Kolloquium, Technische Akademie Esslingen, Sept. 1983.
- Wolff, A. (1984): Das Denkmal und sein Original. Probleme und Aufgaben des Kulturgüterschutzes unter der Bedrohung durch Schadstoffe der Luft. Kölner Domblatt, 49, 1984, S. 9–16.
- Zalmanzing, J. (1985): Wirkungsmechanismen saurer Luftverunreinigungen bei Natursteinen am Beispiel des Kölner Doms. VDI-Berichte 530, Materialkorrosion durch Luftverunreinigungen, Tagung Köln, 17. bis 19. Okt. 1984, S. 95–110.
- Bücher mit einem Überblick über bestimmte Teilbereiche*
- Diem, P. (1982): Zerstörungsfreie Prüfmethode für das Bauwesen. Wiesbaden/Berlin 1982.
- Knöfel, D. (1975): Stichwort: Baustoffkorrosion. Wiesbaden/Berlin 1975, 175 S.
- Knöfel, D. (1979): Bautenschutz mineralischer Baustoffe. Wiesbaden/Berlin 1979, 220 S.
- Lutz, P., Jenisch, R., Klopfer, H., Freymuth, H., u. Krampf, L. (1985): Lehrbuch der Bauphysik. Stuttgart 1985.
- Weber, H. (1985): Steinkonservierung. Der Leitfaden zur Konservierung und Restaurierung von Natursteinen. Band 59, Kontakt & Studium Bauwesen. 3. Aufl., Sindelfingen 1985.
- Wihr, R. (1980): Restaurierung von Steindenkmälern. Ein Handbuch für Restauratoren, Steinbildhauer, Architekten und Denkmalpfleger. München 1980.
- Winkler, E. M. (1975): Stone: Properties, Durability in man's environment. 2. Aufl., Heidelberg/Berlin/New York 1975.
- Dipl.-Geologin Gabriele Grassegger
LDA · Bau- und Kunstdenkmalpflege
Mörkestraße 12
7000 Stuttgart*