

Mitt. österr. geol. Ges.	79 (1986) Umweltgeologie- Band	S. 309-325 14 Abb., 3 Tab	Wien, Dezember 1986
--------------------------	--------------------------------------	------------------------------	---------------------

Verwitterungsstudien an Naturbausteinen im Wiener Stadtgebiet und in Steinbrüchen des Leithagebirges im Burgenland

Von A. MENTLER, H. W. MÜLLER und B. SCHWAIGHOFER*)

Mit 14 Abbildungen und 3 Tabellen

Zusammenfassung

Die unterschiedlichen Verwitterungseinflüsse in einer aggressiven, mit Schadstoffen belasteten Stadtatmosphäre und im Freiland wurden an Leithakalksandsteinen untersucht.

Mittels mineralogischer, chemischer und mikrobiologischer Methoden konnten nicht nur verschiedene Formen von Krustenbildungen, sondern damit im Zusammenhang auch Differenzierungen durch den Schadstoffeintrag erfasst werden. Dabei ließ sich auch eine enge Wechselbeziehung zur mikrobiologischen Besiedelung feststellen. Durch mikroklimatische Einflüsse und Schadstoffanreicherungen wird bereichsweise ein Milieu geschaffen, das das Wachstum von Mikroorganismen, die in die Verwitterungsprozesse eingreifen können, begünstigt.

Abstract

Different influences of weathering on Leitha-calcareenites were studied both in an aggressive polluted urban atmosphere and in the open countryside.

By means of mineralogical, chemical and microbiological methods there were found not only different forms of incrustations but also differentiations due to the infiltration of polluted material. A close correlation with the growth of microorganisms could be stated, microclimatic influences and the increase of polluted material creating a milieu that favours the development of microorganisms which may interfere with the weathering processes.

Inhalt

Einleitung	310
Probenmaterial und Standorte	310
Methodik	312
Ergebnisse und Interpretation	313
Ausblick	324
Danksagung	325
Literatur	325

*) Adresse der Verfasser: Dipl.-Ing. Dr. A. MENTLER, Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. H. W. MÜLLER und Univ.-Prof. Dr. B. SCHWAIGHOFER; Institut für Bodenforschung und Baugeologie, Universität für Bodenkultur, Gregor-Mendel-Straße 33, A-1180 Wien.

Einleitung

In zunehmendem Maß hat in den letzten Jahrzehnten die Luftverschmutzung dazu geführt, daß verwitterungsbedingte Zerstörungen an Naturbausteinen fast schon regelmäßig zum Erscheinungsbild unserer Industrielandschaft gehören.

Ziel der vorliegenden Studie ist die Erfassung der unterschiedlichen Verwitterungserscheinungen im Großstadtmilieu und unter natürlichen Bedingungen im Steinbruch. Für diese Untersuchungen wurde der Leithakalksandstein ausgewählt, da aus diesem der Großteil des Stephansdomes aufgebaut ist und auch heute noch für Instandsetzungsarbeiten Material aus dem Steinbruch in St. Margarethen abgebaut wird. Darüber hinaus ist der Leithakalksandstein überhaupt einer der wichtigsten und typischsten Naturbausteine für die Stadt Wien, da er bei einem großen Teil der Ringstraßenbauten Verwendung gefunden hat. Mit dem Standort Stephansdom wurde auch versucht, einen Umweltbereich zu erfassen, der als repräsentativ für die Verwitterungserscheinungen in einer aggressiven Stadtatmosphäre angesehen werden kann.

In der vorliegenden Arbeit sollen neben den z. T. bekannten verwitterungsbedingten physikalischen, chemischen und mineralogischen Veränderungen vor allem die Einflüsse der Biosphäre auf die Naturbausteine dargelegt werden. Dies deshalb, da das Problem der biologischen Gesteinszerstörung einerseits bei vielen Verwitterungsuntersuchungen bisher vernachlässigt wurde, andererseits aber heute immer aktueller wird. Ziel der mikrobiologischen Untersuchungen war es, die Mikrobenpopulationen sowohl im Bereich der Stephanskirche als auch im Steinbruch von St. Margarethen zu analysieren und aufgrund der dabei erhaltenen Daten die unterschiedlichen Lebensräume zu charakterisieren.

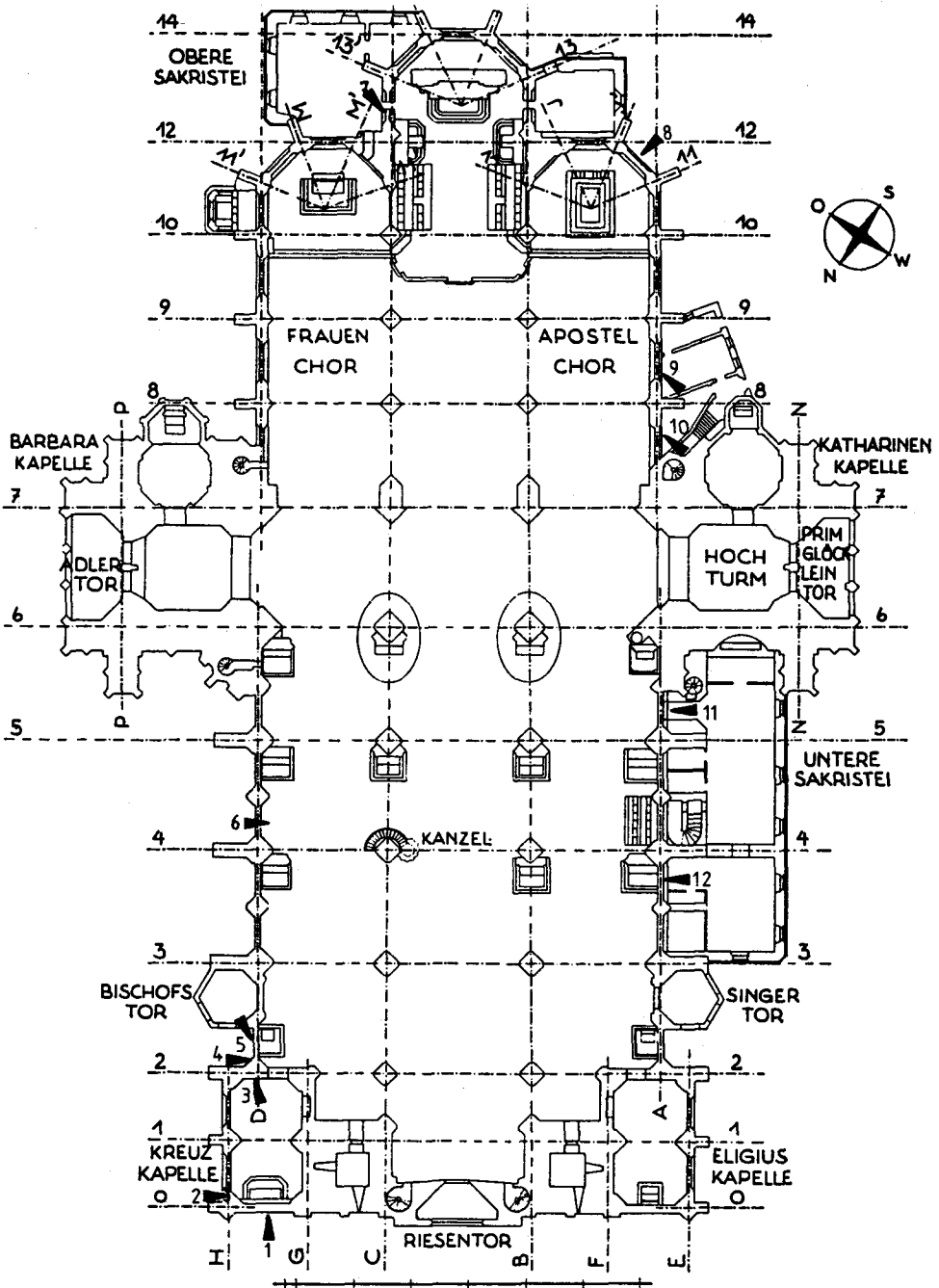
Probenmaterial und Standorte

Untersucht wurden ausschließlich Leithakalksandsteine, die zu den wichtigsten Bausteinen im Osten Österreichs gehören und neben den Algenkalken die Hauptbausteine von Wien darstellen (KIESLINGER, 1951).

Die Übersichtsskizze der Abb. 1 zeigt die Standorte für sämtliche am Stephansdom untersuchte Proben; in der vorliegenden Arbeit kann nur auf einen Teil davon näher eingegangen werden; diese stammen von folgenden Entnahmestellen:

- St 2 – Nördliche Balustrade
- St 4 – Überdachter Giebelbereich
- St 5 – Gesteinsfigur an der Außenwand
- St 6 – Staubablagerungen im nördlichen überdachten Giebelmaßwerk
- St 10 – Südliche Balustrade

Für Erneuerungsarbeiten, die von der Dombauhütte seit Jahrhunderten bereits laufend am Dom durchgeführt werden, war immer der St. Margarethener Kalksandstein das wichtigste Material (KIESLINGER, 1949). Um nun Vergleiche zwischen den verwitterten Bausteinen am Dom und den natürlichen Aufschlüssen des gleichen Materials ziehen zu können, wurden auch Proben aus dem Steinbruch St. Margarethen im Burgenland analysiert. Der auch heute noch im Betrieb stehende Abbau befindet sich 2 km E von St. Margarethen und 3 km W von Rust. In der ausgedeh-



Probenstandorte ►

Abb. 1: Übersichtsplan der Probenstandorte am Stephansdom.

ten Bruchanlage, in der bisher mehr als 1,5 Millionen Kubikmeter abgebaut wurden (KIESLINGER, 1951), befindet sich mit der sogenannten „Stephanswand“ ein eigener, dem Bedarf der Dombauhütte vorbehaltener Abbaubereich.

In der „Stephanswand“ wird der harte elfenbeingelbe Typus des Kalksandsteins abgebaut, der sich unter dem Mikroskop im wesentlichen als ein Zerreibsel von Algenbruchstücken erweist (KIESLINGER, 1932). Faziell handelt es sich hier um die detritäre Ausbildung des Leithakalkes, die für den Ruster Höhenzug charakteristisch ist und mit der das Mittelbadenien mit etwa 110 m seine größte Mächtigkeit erreicht (FUCHS, 1965).

Im Steinbruch wurden folgende Proben genommen und analysiert:

- M 1 – Westschauende Abbauwand, Fußbereich
- M 2 – W. A., 1,50–2,00 m
- M 3 – W. A., 3,00–4,00 m
- M 4 – Römerbruch
- M 5 – 90 Jahre alte Abbauwand, nordschauend
- M 6 – Frische Abbauwand, hell
- M 7 – Frische Abbauwand, dunkel

Methodik

Das Untersuchungsprogramm wurde im wesentlichen auf drei Punkte ausgerichtet:

1. Makroskopische und mikroskopische Erfassung der Verwitterungserscheinungen
2. Chemische Analysen der verschiedenen Gesteinsmaterialien
3. Mikrobiologische Untersuchungen mit Bestimmung der die Naturbausteine besiedelnden Flora, Erfassung ihrer Stoffwechselprodukte und Analyse der Auswirkungen der biologischen Prozesse auf die Gesteine.

Aufgrund der makroskopisch erfaßbaren Gesteinsdifferenzierungen wurde eine Anzahl von ausgesuchten Proben lichtmikroskopisch untersucht. Für die mikromorphologischen und mikrochemischen Analysen stand das Rasterelektronenmikroskop Cambridge Stereoscan S 4 zur Verfügung.

Die chemischen Gesamtanalysen wurden an gepulverten Gesteinsmaterialien spektralanalytisch durchgeführt*). Zur Bestimmung der Schwermetallanreicherungen wurden in verwitterten und unverwitterten Kalksandsteinen die Elemente Zn, Co, Cu, Ti, Mo, Cr, Ni und Cd erfaßt, wobei die Analysen mittels Plasmaemissionsspektrometer SPEKTRAPAN III A durchgeführt wurden**).

Die Bestimmungen der elektrischen Leitfähigkeit erfolgten an gemahlenem Gesteinsmaterial mittels elektrischem Leitfähigkeitsmeßgerät.

Für die mikrobiologischen Untersuchungen wurden an den natürlichen Objekten Organismenstämme isoliert, um mit ihnen Verwitterungsprozesse an Testgesteinen zu simulieren, die Aufschlüsse über den mikrobiologischen Angriff auf die Mineralsubstanz und dessen Intensität geben sollten. Weiters wurden die unter Laborbedin-

*) Diese Analysen wurden dankenswerter Weise von Herrn F. KUGLER (†) vom Institut für Analytische Chemie der Universität Wien durchgeführt.

***) Herrn N. SCHITTENHELL ist für die Ausführung dieser Analysen zu danken.

gungen produzierten Stoffwechselprodukte der Mikroorganismen analysiert und versucht, diese auch an den natürlichen Standorten nachzuweisen.

Mikroorganismen sind sehr substratspezifisch und so können durch geeignete Wahl der Nährbodenzusammensetzung einzelne Gruppen von Mikroben selektiert und erfaßt werden. Zur Charakterisierung der Mikrobenpopulation wurden Standardzählverfahren mit festen und flüssigen Nährmedien verwendet. Neben der zahlenmäßigen Erfassung der Mikroben wurden Reinkulturen von Organismen hergestellt, um deren Stoffwechsellistung und ihre Auswirkungen auf definierte Testgesteine unter Laborbedingungen zu untersuchen. Ob ein Organismus überhaupt in der Lage ist, Minerale und Gesteine anzugreifen, zeigt unter anderem sein Säurebildungsvermögen. Durch eine standardisierte Nährlösung, sowie Zusatz eines geeigneten Indikators kann die Säureproduktion der Organismen durch die pH-Wert-Änderung quantitativ und auch zeitlich beobachtet werden. Die Selektionierung der säurebildenden Organismen erfolgte ausschließlich mit Hilfe komplexer Nährmedien, die auch anspruchsvolleren Stoffwechselltypen gerecht wurden. Damit wurden aber ernährungsphysiologische Voraussetzungen geschaffen, die mit dem natürlichen Standort nicht vergleichbar sind. Um den schlechteren Umweltbedingungen am natürlichen Standort gerecht zu werden, wurden ausgewählte Mikrobenstämme auf festen Minimalmedien mit Gesteinsmehl gezüchtet. Die gesteinszerstörende Wirkung einzelner Mikrobenstämme kann durch diese Versuchsanordnung direkt anhand von Lösungshöfen, die auf der Agarplatten-Unterseite durch stoffwechselbedingtes Auflösen des im Agar suspendierten Gesteinsmehles entstehen, beobachtet werden. Damit die Gesteinszerstörung quantifizierbar wird, wurden Organismenstämme in flüssigen Minimalmedien und einer definierten Zugabe von Gesteinsmehl in Dialyseschläuchen gezüchtet. Die Elemente, die bei dieser Versuchsanordnung durch die Stoffwechselltätigkeit der Mikroben aus dem Gestein freigesetzt werden konnten, wurden spektralanalytisch qualitativ und quantitativ untersucht. Neben diesen Versuchen wurden auch rasterelektronenoptische und lichtmikroskopische Untersuchungen durchgeführt, um auch die durch mikrobiologische Prozesse neugewonnenen chemischen und mineralogischen Veränderungen an Gesteinsplättchen und an angegriffenen Kalziten beurteilen zu können. Die Identifizierung und Quantifizierung von Stoffwechselprodukten der Mikroben in Kultur und am natürlichen Standort erfolgte gaschromatographisch und röntgenanalytisch. Genaue Angaben zur Durchführung der mikrobiologischen Analysenmethoden finden sich in MENTLER 1985.

Ergebnisse und Interpretation

1. Makroskopische und mikroskopische Erfassung der Verwitterungserscheinungen

Der Schwerpunkt der Verwitterungsuntersuchungen am Stephansdom befindet sich im Bereich der Dachgalerie. Hier findet man – wie auch an vielen anderen Stellen (siehe Abb. 2) folgendes Erscheinungsbild: Gipskrustenbildungen, Lösungsverwitterung an den von Niederschlägen betroffenen Bereichen, Abschalungen und absandendes Gesteinsmaterial. Die Originaloberflächen sind vielfach fast vollkom-



Abb. 2

Abb. 2: Nördliche Dachgalerie im Bereich der Kreuzkapelle; die Gipskrusten haben sich teilweise abgelöst, sodaß das mürbe, absandende Material sichtbar wird.

men zerstört. Die Ursachen dafür dürften Lösungserscheinungen des Bindemittels, Anreicherungen von leichtlöslichen Salzen in der entsprechenden Tiefe und Salzsprengung sein. Die hohen Leitfähigkeiten dieser Krustenbereiche (siehe Tab. 3) deuten auf derartige Prozesse hin.

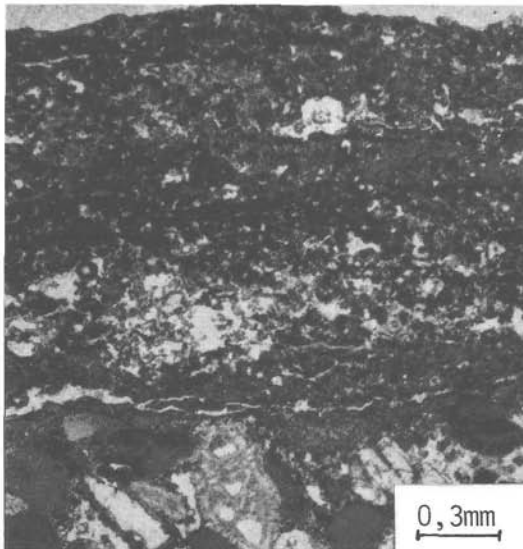
Vor allem in der Giebelkonstruktion an der Nordseite des Domes sind mächtige Gipskrusten und beginnende Krustenabplatzungen zu beobachten (Abb. 3).

Das mikroskopische Bild (Abb. 4) zeigt deutlich den geschichteten Aufbau der Verwitterungskruste. Der klar abgrenzbare, unmittelbare Krustenbereich ist sehr feinkörnig und zeigt Anreicherungen von opaken bis rötlich-braun durchscheinenden Eisenoxiden, die den lagigen Aufbau nachzeichnen. Unter der Kruste ist die locker strukturierte Karbonatmatrix mit zahlreichen Mikrofossilien zu erkennen. Die Verwitterungskrusten sind meist sehr intensiv durch Staubteilchen, Rußpartikel und Flugasche schwarz pigmentiert. Im Rasterelektronenmikroskop (Abb. 5) erscheinen Flugascheteilchen als kugelförmige Gebilde mit siebartig durchlöcherter Oberfläche. In den Außenseiten der Krusten sind häufig Fasern von idiomorphen Gipskristallen zu finden, die mitunter die typische Ausbildungsform von Schwalbenschwanzwillingen zeigen (Abb. 6). Vergleichsuntersuchungen, die in den Steinbrucharanlagen von St. Margarethen im Burgenland durchgeführt wurden, zeigten, vor allem an regengeschützten Stellen, im Bereich einer 90 Jahre alten, ehemaligen Abbauwand (M 5) Verwitterungsbildungen, die den Krusten am Stephansdom im



Abb. 3

Abb. 3: Giebelkonstruktion an der Nordseite des Domes beim Strebfeiler D 3/4; in den Gipskrusten sind beginnende Abplatzungen festzustellen.



0,3mm

Abb. 4: Im Dünnschliffbild ist der geschichtete Aufbau der Verwitterungskrusten gut zu erkennen, wobei vor allem die Eisenoxide durch ihre unterschiedliche Anreicherung einzelne Lagen deutlich nachzeichnen (Vergrößerung 37 \times ; parallele Nikolls).

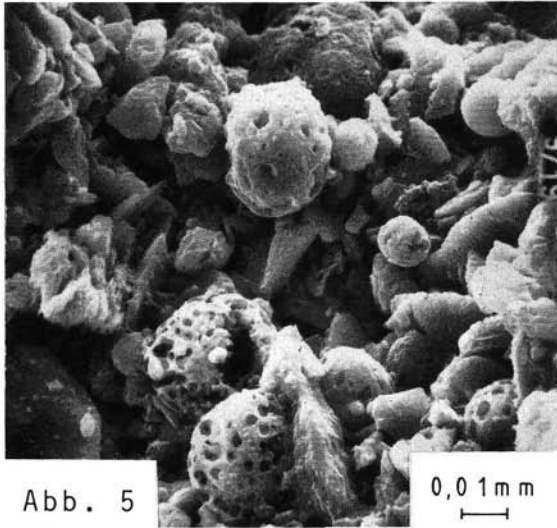


Abb. 5

Abb. 5: In den Krustenbildungen finden sich neben Staub und Rußpartikeln auch kugelförmige Flugascheteilchen (Vergrößerung 1150 \times).

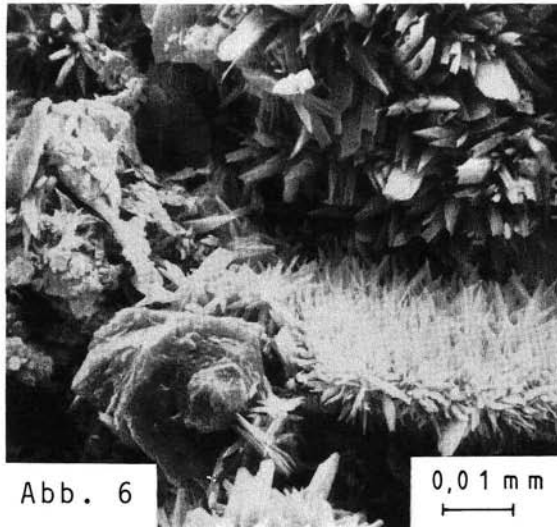


Abb. 6

Abb. 6: Neugebildete idiomorphe Gipskristalle treten als Überzüge auf den Krustenoberflächen auf (Vergrößerung 950 \times).

Aussehen weitgehend entsprechen. Sie sind gegenüber den Gipskrusten wesentlich dünner und sind als Karbonatsinter ausgebildet (Abb. 7).

2. Chemische Analysen

Am Stephansdom wurden im Bereich der Dachgalerie Verwitterungskrusten entnommen und in ihnen quantitativ Al, Ca, Mg, Mn, Na, Fe und SO_4 bestimmt.



Abb. 7: 90 Jahre alte Abbauwand im Steinbruch St. Margarethen; an regengeschützten Stellen zeigen sich ähnliche, aber wesentlich dünnere und chemisch anders zusammengesetzte Krusten als am Stephansdom.

Diese Analysendaten wurden den Werten des hellen und dunklen Kalksandsteines aus dem Steinbruch von St. Margarethen gegenübergestellt und in Tabelle 1 zusammengefaßt.

Tab. 1: Chemische Analysen der Verwitterungskrusten von St. Stephan (St 4) und der Kalksandsteine von St. Margarethen; Angaben in ppm.

Element	St4	M6	M7
Al	4.800	80	440
Ca	190.400	388.400	386.200
Mg	3.800	3.200	5.100
Mn	90	830	490
Na	2.000	210	350
Fe	6.300	2.700	1.900
SO ₄	466.500	120	118

Das Verwitterungsmaterial zeigt eine wesentlich andere chemische Zusammensetzung als die Kalksandsteine aus dem Steinbruch von St. Margarethen. Am auffälligsten ist die durch atmosphärische Einflüsse verursachte Sulfatanreicherung des Krustenmaterials. Der Unterschied entspricht einem Zuwachs von mehr als 395.000%. Damit verbunden ist eine Abnahme des Kalziumgehalts, da aufgrund der besseren Löslichkeit von Kalziumsulfat in der Folge Kalziumionen abgeführt werden können. Leichtlösliche Salze aus tieferliegenden Gesteinsbereichen werden mit dem Kapillarwasser mitgeführt und kristallisieren an der Oberfläche der sich bildenden Verwitterungskruste aus. Dies führt auch zu einer Zunahme an Na, Al und Fe in diesem Bereich.

Um auch die Schwermetallanreicherungen der verschiedenen Probenstandorte erfassen zu können, wurden quantitativ die Elemente Zn, Co, Cu, Ti, Mo, Cr, Ni und Cd bestimmt. In der Tabelle 2 sind die Analysen von Verwitterungskrusten an der nördlichen und südlichen Dachgalerie des Domes (St 2, St 10), einer Staubprobe aus einer Nische an der Nordseite des Stephansdomes (St 6), einer Verwitterungskruste an einer 90jährigen Abbauwand im Steinbruch von St. Margarethen (M5) und von unverwittertem hellem bzw. dunklem St. Margarethener Kalksandstein (M6, M7) zusammengestellt.

Tab. 2: Schwermetall-Analysen; Angaben in ppm.

Element	St2	St6	St10	M5	M6	M7
Zn	100,75	200,30	90,90	2,44	1,31	1,67
Co	0,66	0,85	1,13	0,96	0,53	0,57
Cu	7,95	10,10	6,05	2,15	1,96	1,87
Ti	120,90	180,75	70,60	1,42	0,84	0,44
Mo	2,11	2,25	2,34	2,76	1,81	1,88
Cr	11,37	10,62	10,73	1,44	0,90	0,92
Ni	10,49	10,76	10,62	0,89	0,52	0,54
Cd	0,15	0,18	0,23	0,13	0,04	0,05

Insgesamt ergaben sämtliche Analysen der Proben aus dem Wiener Stadtgebiet eine deutlich höhere Schwermetall-Anreicherung als die Steinbruchproben.

Die größten Unterschiede zeigten sich bei den Elementen Zn und Ti. Das stimmt gut überein mit einer Untersuchung von SCHROLL und KRACHSBERGER (1970), die in einer Studie zur Geochemie der Verunreinigungen in atmosphärischen Niederschlägen im Stadtgebiet von Wien zu ähnlichen Ergebnissen kamen. Die Analysen der 90jährigen Abbauwand ergaben nur geringfügig höhere Metallkonzentrationen als die des unverwitterten Ausgangsgesteins.

In einer weiteren Analysenserie wurde auch die elektrische Leitfähigkeit der einzelnen Proben untersucht.

Tab. 3: Mittelwert der Leitfähigkeitsmessungen (aus vier Wiederholungen); Angaben in μS .

Probe	Mittelwert absolut	Probe	Mittelwert absolut
St2	3295,0	M4	318,8
M1	2218,8	M5	114,0
M2	196,3	M6	110,5
M3	406,3	M7	112,3

Extrem hohe Leitfähigkeitswerte ergaben die Proben St2 und M1 (siehe auch Abb. 8). St2 zeigt Gipsverwitterungskrusten und ist charakteristisch für die Verwitterung im Stadtbereich.

Die Verwitterungskrusten der Proben M1 bis M6 gehören dagegen einem anderen Verwitterungstyp an, der durch die Bildung von Karbonatsinterkrusten gekennzeichnet ist. M2 bis M6 unterscheiden sich in der Leitfähigkeit kaum von unverwittertem Vergleichsmaterial. Die Probe M1 dagegen stammt direkt aus dem Fußbereich der ehemaligen Abbauwand und steht somit noch im Einflußbereich des Bodens. Bodenbürtige Salze, die kapillar aufsteigen, dürften hier den hohen Salzge-

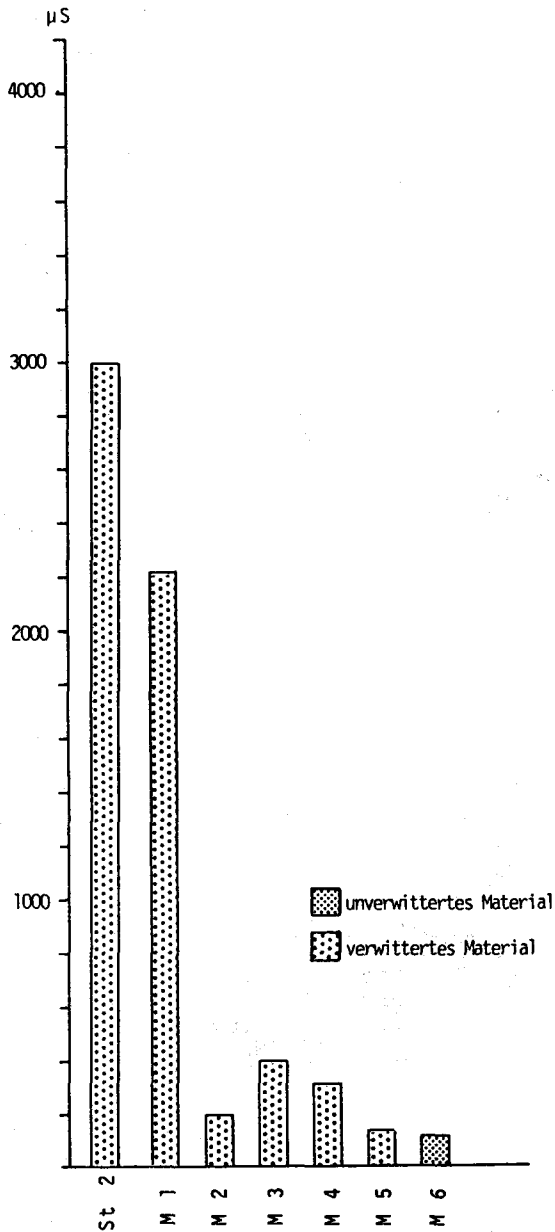


Abb. 8: Leitfähigkeitswerte in verwitterten und unverwitterten Leithakalksandsteinen.

halt der Probe verursachen. Sie ist jedenfalls untypisch für die Verwitterungsform im Steinbruch St. Margarethen.

Bei den mikrobiologischen Untersuchungen zeigte sich, daß bei beiden Standorten Mikroorganismen in allen Bereichen auf der Gesteinsoberfläche anzutreffen sind.

Die Verwitterungskrusten, die expositionsabhängig an regengeschützten Stellen entstehen, stellen mikroklimatologische Bereiche dar, die den Aufbau von Mikrobenpopulationen begünstigen. In derartigen Verwitterungskrusten konnten pro Gramm Verwitterungsmaterial im Steinbruch St. Margarethen $1,9 \cdot 10^5$ Pilze und $4,6 \cdot 10^5$ Bakterien festgestellt werden. Geringer hingegen ist die Populationsdichte im Krustenmaterial des Stephansdomes mit $8,8 \cdot 10^3$ Pilzen und $1,49 \cdot 10^4$ Bakterien

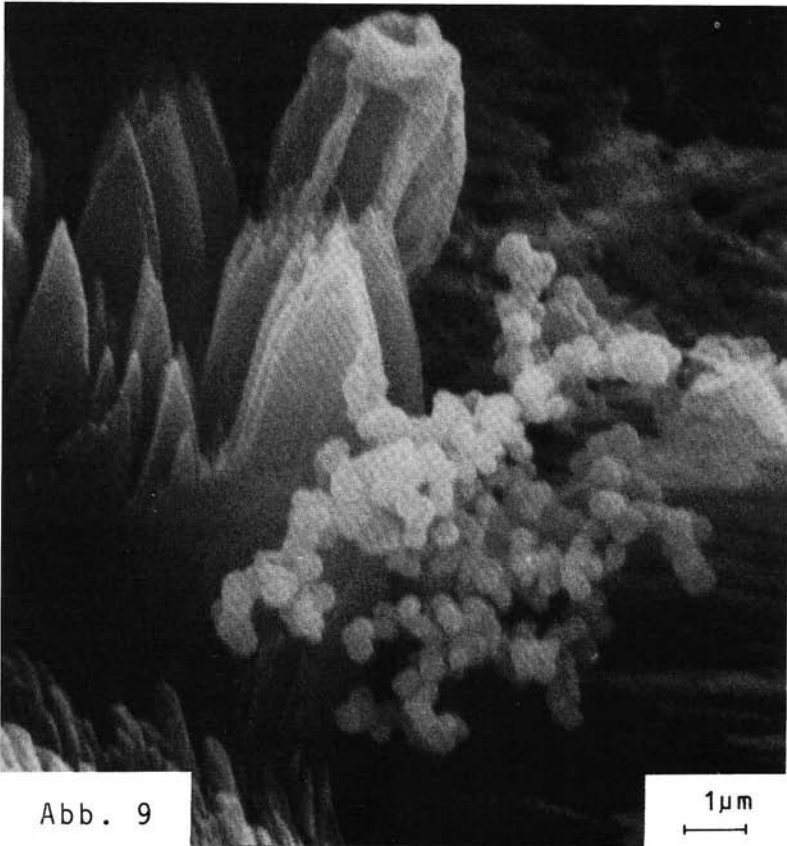


Abb. 9

Abb. 9: Heterotrophe, kokkoide Bakterien besiedeln Gipsneubildungen (Vergrößerung 18.000 \times).

(Abb. 9). An beiden Standorten wird die Außenseite der Verwitterungskrusten von Mikroorganismen nicht besiedelt. Das ergibt sich dadurch, daß unter der Kruste die kapillare Bindung zum Gestein unterbrochen ist, wodurch für die Krustenoberfläche eine verminderte Versorgung mit Wasser und somit schlechtere Lebensbedingungen für Organismen geschaffen werden.

Neben Pilzen und Bakterien können phototrophe Organismen (Organismen mit Photosynthese) am Stephansdom nur an Stellen ohne Krustenbildung angetroffen werden. Die Verwitterungskrusten im Steinbruch St. Margarethen bieten im Gegen-

satz dazu günstige Entwicklungsmöglichkeiten für Grünalgen und Cyanobakterien. Im Bereich der Verwitterungskrusten der beiden Standorte können somit zwei verschiedene Organismengesellschaften unterschieden werden, nämlich solche mit und ohne photosynthetische Primärproduktion.

Der Grund für eine derartige Differenzierung ist durch die Unterschiede in der Morphologie und im Chemismus der Verwitterungskrusten gegeben, die durch die jeweilige Umweltsituation der Standorte entstanden sind.

Am Stephansdom entstehen durch die mit SO_2 und anderen Agentien beladene, aggressive Stadtatmosphäre dicke, kompakte, lichtundurchlässige Gipskrusten, die die Entwicklung phototropher Organismen ausschließen und infolge der guten Wasserlöslichkeit von Kalciumsulfat zusätzlich die verbleibenden Organismen osmotisch belasten. In der natürlichen Umgebung des Steinbruches St. Margarethen greift Kohlensäure der Atmosphäre den Kalksandstein an, wodurch dünne, transparente Kalciumcarbonatkrusten gebildet werden, die günstige Voraussetzungen für die phototrophe Lebensweise schaffen (Abb. 10).

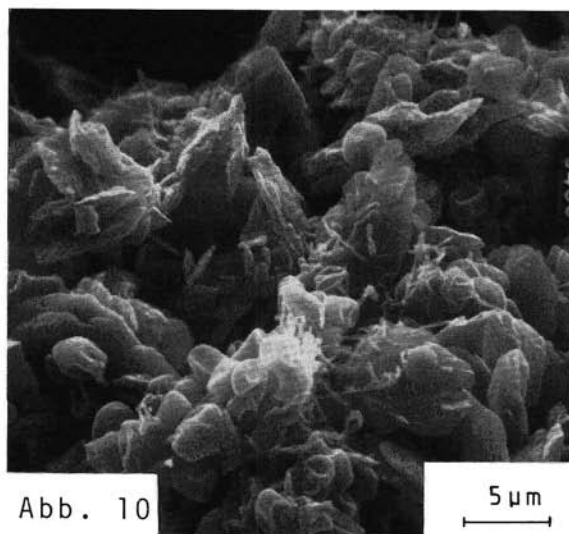


Abb. 10: 90 Jahre alte Abbauwand; auf der Innenseite der Verwitterungskrusten finden sich Grünalgen und Pilzhypen (Vergrößerung 1800 \times).

Mikroorganismen, die eine Primärproduktion aufweisen, genießen in energetischer Hinsicht einen Vorteil gegenüber solchen, denen keine physiologisch verwertbare Energie zur Verfügung steht. Dieser ernährungsphysiologische Nachteil, der für den Standort Stephansdom charakteristisch ist, wird durch die in den Gipsverwitterungskrusten enthaltenen Staub- und Rußpartikel ausgeglichen. Wie die Untersuchungen zeigten, beinhalten diese genügend organischen Kohlenstoff, der heterotrophen Bakterien und Pilzen (Organismen, die ihren Energiebedarf aus dem Abbau von organischer Substanz decken) als Nahrungsquelle zur Verfügung steht. Im Steinbruch St. Margarethen konnten derartige Organismen nicht festgestellt werden.

Hinsichtlich der durch mikrobiologische Tätigkeit an den beiden Standorten hervorgerufenen Gesteinszerstörung zeigte sich, daß in erster Linie saure Stoffwechselprodukte für den Angriff auf die Mineralsubstanz verantwortlich sind.

Labortests haben gezeigt, daß heterotrophe Organismen beim Abbau von organischem Kohlenstoff saure Stoffwechselprodukte bilden. Einige der an den Probenstandorten isolierten Organismen konnten den pH-Wert einer Nährlösung innerhalb von 6 Tagen von pH 8,0 auf Werte unter pH 3,0 absenken. Karbonate sind bei diesen pH-Werten nicht mehr beständig.

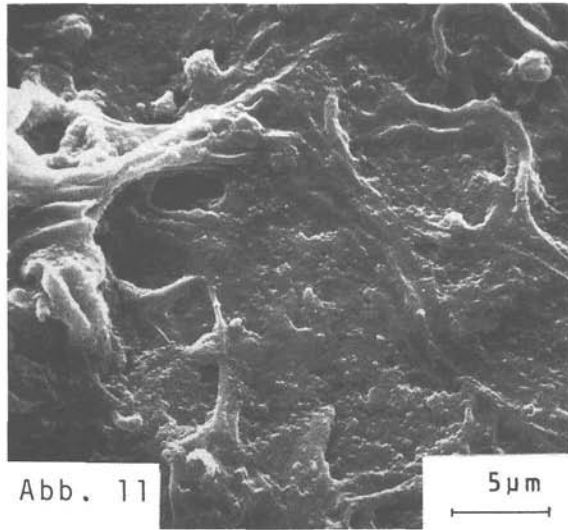


Abb. 11: Durch das Wachstum bestimmter Organismenstämmen (im Bild *Penicillium rugulosum* THOM) kommt es zu Ätzungen an der Oberfläche von Kalzitkristallen (Vergrößerung 1900 \times).

Bei experimentell auf Kalcitanschliffen wachsenden Kulturen konnte rasterelektronenoptisch die Säurewirkung von Pilzen im Hyphenbereich nachgewiesen werden. Oxalatkristalle und Ätzspuren zeigten sich im unmittelbaren Umfeld der Hyphen (Abb. 11, 12 u. 13). Kulturen, die auf St. Margarether Kalksandsteinsmehl im Agar gezüchtet wurden, konnten mühelos innerhalb von 3 Wochen deutlich sichtbare Lösungserscheinungen hervorrufen (Abb. 14). Die von Pilzen und Bakterien ausgeschiedenen Säuren haben zusätzlich auch vielfach chelatisierende Eigenschaften (ECKHARDT 1979, a, b) und können dadurch Minerale und Gesteine sehr effektiv angreifen (KRUMBEIN, 1966; SILVERMANN a. MUNOZ, 1970; BERTHELIN, 1976 und andere).

Gaschromatographische Analysen ergaben, daß die an den natürlichen Standorten isolierten Mikroben unter Laborbedingungen Oxalsäure, Zitronensäure, Bernsteinsäure, Malonsäure, Apfelsäure und Shikimisäure produzierten.

Bei der Extraktion der Verwitterungskrusten des Stephansdomes konnte hingegen nur Oxalsäure in Spuren nachgewiesen werden. Durch Cyanobakterien gebildeter Weddellit ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ Kalziumoxalatdihydrat) konnte von DEL MONTE

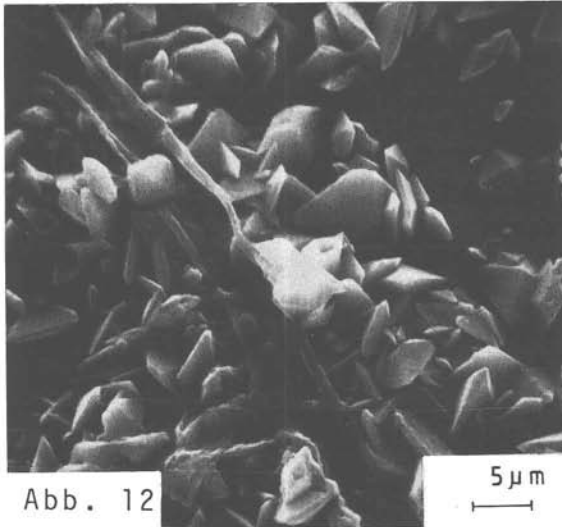


Abb. 12: Im Hyphenbereich sind bipyramidale Kalziumoxalate zu erkennen, die röntgenanalytisch als Weddellit bestimmt wurden (Vergrößerung 2600×).



Abb. 13: Zwei unterschiedliche Kristallformen wurden von *Penicillium variable* auf Kalzitanschliffen erzeugt; bei den tetraederförmigen, bipyramidalen Kristallen dürfte es sich um Weddellit, bei den stapelförmigen um Whewellit handeln (Vergrößerung 270×).

und SABBIONI (1983) auf Karbonatgesteinen in der Lagune von Venedig nachgewiesen werden. Die vom Stephansdom und von St. Margarethen isolierten Organismen konnten unter Laborbedingungen sowohl Weddellit als auch Whewellit ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 1\text{H}_2\text{O}$ Kalziumoxalatmonohydrat) erzeugen; die Identifizierung erfolgte

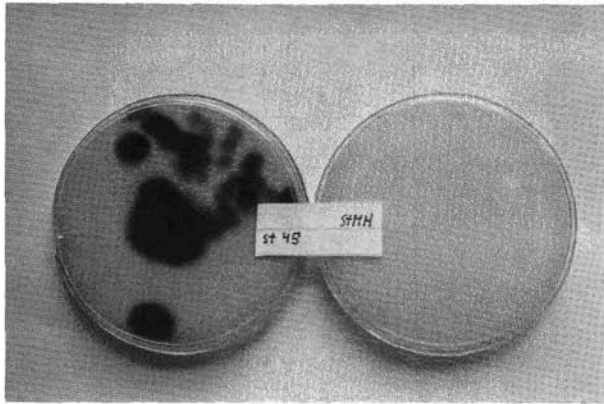


Abb. 14: Testplatten mit steriler Vergleichsplatte (rechts) und Agarplatte mit gemahlenem St. Margarethener Kalksandstein; deutlich sind die durch Pilze hervorgerufenen Lösungshöfe zu erkennen.

nach LIPPMANN, 1955. Versuche mit ausgewählten Mikroorganismen, die in Dialysesläuchen in einem Minimalmedium mit St. Margarethener Kalksandsteinmehl gezüchtet wurden, zeigten, daß durch die Stoffwechsellätigkeit der Mikroben ein- und zweiwertige Kationen aus dem Gesteinsmehl mobilisiert werden können. Die Mobilisierungsleistungen der Organismen sind bei Eisen wesentlich höher als bei Kalzium. Pilze können verglichen mit der sterilen Nährlösung die 417fache Menge an Eisen lösen. Die Manganmengen, die die Mikroben aus dem Kalksandstein lösen konnten, sind dagegen sehr gering. Sie betragen etwa nur 0,48% der im Gestein enthaltenen Menge. Ähnliche Verhältnisse ergaben sich bei Magnesium.

Ein gutes Freisetzungsvermögen zeigten die Mikroben bei Kalium, vor allem Pilze vermochten große Mengen zu mobilisieren. Die Versuchsreihen ergaben also, daß die aus den Standorten isolierten Mikroorganismen in der Lage sind, Minerale und Gesteine anzugreifen.

Ausblick

Bei zukünftigen Restaurierungsarbeiten an Naturbausteinen sollte doch der Bedeutung der Mikroben und ihrer gesteinszerstörenden Wirkung mehr Aufmerksamkeit gewidmet werden. Die Ausschaltung dieses mikrobiologischen Effektes bietet aber große Schwierigkeiten. Die meisten Fungizide und Bakterizide haben auch auf den Menschen toxische Wirkungen und außerdem könnten durch ihren massiven Einsatz unter Umständen bei den Mikroben Resistenzerscheinungen provoziert werden, deren Auswirkungen gar nicht abgeschätzt werden können.

Hinsichtlich der spezifischen Verwitterungsprobleme vom Stephansdom wäre es daher vor allem zielführend, die Zufuhr von aggressiven, atmosphärischen Agentien und auch die Staubdeposition zu reduzieren. Dadurch würde das zusätzliche Nährstoffangebot für die Mikroben herabgesetzt werden und durch die Verringerung von Metallstäuben würde die Gipsbildung nicht zusätzlich noch katalytisch beeinflusst (SNETHLAGE, 1984).

Für die Bekämpfung von verwitterungsbedingten Zerstörungen von wertvollen Steinkunstwerken sollten dennoch künftige Schadensanalysen die quantitative und qualitative Erfassung der Mikroorganismen beinhalten. Nur die genaue Kenntnis der Wachstumsfaktoren der Mikroben gewährleistet ein Sanierungskonzept, das nicht nur die momentane Besiedlung ausschaltet, sondern auch die Ursachen beseitigt, die zu einem vermehrten Wachstum von Mikroorganismen führen.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand durch die dankenswerte Unterstützung des Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung in Österreich, Projekt Nr. 4264 und 4769.

Literatur

- BERTHELIN, J.: Étude expérimentale des mécanismes d'altération des minéraux par des microorganismes hétérotrophes. – Diss. Univ. Nancy I 1976.
- DEL MONTE, M. & SABBIONI, C.: Weddellite on Limestone in the Venice Environment. – Environ. Sci. Technol. 17, 518–522, Bologna 1963.
- ECKHARDT, F. E. W.: Über die Einwirkung heterotropher Mikroorganismen auf die Zersetzung silikatischer Minerale. – Z. Pflanzenernähr. Bodenkd. 142, 434–445, 1979 a.
- ECKHARDT, F. E. W.: Über den Einfluß niederer Pilze auf die Mineral- und Gesteinsverwitterung. – Mitt. dtsh. bodenkdl. Ges. 29, 391–398, 1979 b.
- FUCHS, W.: Geologie des Ruster Berglandes (Burgenland). – Jb. geol. B.-A., 108, 155–194, Wien 1965.
- KIESLINGER, A.: Zerstörungen an Steinbauten, ihre Ursachen und ihre Abwehr. – F. Deuticke, Wien 1932.
- KIESLINGER, A.: Die Steine von St. Stephan. – Herold, Wien 1949.
- KIESLINGER, A.: Gesteinskunde für Hochbau und Plastik. – Österr. Gewerbeverlag, Wien 1951.
- KRUMBEIN, W. E.: Zur Frage der Gesteinsverwitterung (über geochemische und mikrobiologische Bereiche der exogenen Dynamik). – Diss. Univ. Würzburg 1966.
- LIPPMANN, H.: Kristallographische Untersuchungen an Calciumoxalaten. – Geol. Rdsch. 43, 491–497, Stuttgart 1955.
- MENTLER, A.: Untersuchungen zur biologischen Verwitterung von Naturbausteinen im Wiener Stadtgebiet. – Diss. Univ. f. Bodenkultur, Wien 1985.
- SCHROLL, E. & KRACHSBERGER, H.: Untersuchungen zur Geochemie der Verunreinigungen in atmosphärischen Niederschlägen im Stadtgebiet von Wien. – Radex-Rdsch., 5, 332–341, 1970.
- SILVERMAN, M. P. & MUNOZ, E. F.: Fungal attack on rock solubilization and altered infra-red spectra. – Science 169, 985–987, 1970.
- SNETHLAGE, R.: Steinkonservierung, 1979–1983–Arbeitshefte, Bayer. Landesdenkmalamt, 22, 47–65, 1984.

Bei der Schriftleitung eingelangt am 7. Juli 1986