

Kartierung und Bewertung von Verwitterungsschäden an Natursteinbauwerken

Bernd Fitzner & Kurt Heinrichs*

Fitzner, B. & Heinrichs, K. (2005): Kartierung und Bewertung von Verwitterungsschäden an Natursteinbauwerken. [Mapping and evaluation of weathering damage on stone monuments] – Z. dt. Ges. Geowiss., 156: 7-24, Stuttgart.

*Anschrift der Autoren: Dr.-Ing. Bernd Fitzner (E-mail: fitzner@geol.rwth-aachen.de), Dipl.-Geol. Kurt Heinrichs, Geologisches Institut der RWTH Aachen, Arbeitsgruppe „Natursteine und Verwitterung“, Wüllnerstraße 2, D-52062 Aachen.

Kurzfassung: Weltweit werden große Anstrengungen zur Erhaltung verwitterungsgeschädigter Natursteinbauwerke unternommen. Einhellig vertreten heute alle Bausachverständigen die Meinung, dass der Weg vom geschädigten zum dauerhaft und kostengünstig sanierten Bauwerk nur über eine gesicherte Material- und Schadensdiagnose führt. Die Bauwerkskartierung ist ein zerstörungsfreies, zeit- und kostengünstiges Diagnoseverfahren, das vielfältige Dokumentationsmöglichkeiten und eine quantitative Bewertung der Verwitterungsschäden an Natursteinbauwerken erlaubt. Sie empfiehlt sich für den routinemäßigen Einsatz in der Denkmalpflege. Methode und Anwendungsbeispiele der Bauwerkskartierung werden vorgestellt.

Abstract: Stone monuments represent an important part of our world's cultural heritage. The awareness of increasing weathering damage on the monuments and the danger of irretrievable loss of cultural heritage have resulted in great efforts worldwide for sustainable monument preservation. A comprehensive damage diagnosis with precise characterization, interpretation and rating of stone damage is of vital importance for effective and economic monument preservation measures. The monument mapping method is presented as an experienced non-destructive procedure for in situ investigation and evaluation of stone damage. It can be applied to all stone types and to all kind of stone monuments. The evaluation of weathering damage is based on lithological mapping and mapping of weathering forms. Weathering forms represent the visible results of weathering processes which are initiated and controlled by interacting weathering factors. A detailed classification scheme of weathering forms has been developed for objective and reproducible mapping. The results of monument mapping ensure the precise documentation and quantitative evaluation of weathering damage in dependence on stone types, environmental conditions and monument exposure characteristics. They provide information on weathering factors and processes, and they allow characterization and quantification of weathering progression including weathering prognosis. Damage categories and damage indices have been established for the rating of damage. They are very suitable indicators of need and urgency of preservation measures. The monument mapping method can also be recommended for the control of preservation measures and for reevaluation of weathering damage in the framework of long-term monitoring and maintenance of monuments.

Schlüsselworte: Natursteinbauwerke, Verwitterungsschäden, Schadensdiagnose, Bauwerkskartierung, Verwitterungsformen, Verwitterungsfortschritt, Schadensbewertung, Schadensklassen, Schadensindizes

Keywords: stone monuments, weathering damage, damage diagnosis, monument mapping, weathering forms, weathering progression, rating of damage, damage categories, damage indices

1. Einleitung

Frühgeschichtliche Felsritzungen und Steinwerkzeuge, viele sakrale und profane Monumente, technische Bauwerke, künstlerische Objekte sowie moderne Wohn- und Industriebauten – aus Naturstein geschaf-

ten – sind Zeugnisse oftmals außergewöhnlicher technischer und künstlerischer Leistungen in verschiedenen Zeitepochen und Kulturkreisen (Abb. 1 – 4). Wie alle an der Erdoberfläche anstehenden Gesteine unterliegen auch die Naturwerksteine den vielfältigen Prozessen der Verwitterung. Anthropogene Schadstoffe



Abb. 1: Dogenpalast, Venedig / Italien.

Fig. 1: Doges' Palace, Venice / Italy.

in Luft, Wasser und Boden, die Verwendung verwitterungsanfälliger Gesteine, unzureichende Bauwerksunterhaltung, nicht bestimmungsgerechte Bauwerksnutzung und mangelhafte Restaurierungsmaßnahmen beschleunigen diese allgegenwärtige Materialzerstörung. Die an Natursteinbauwerken in vielfältiger Form auftretenden Schäden sind das Ergebnis komplexer Wechselwirkungen zwischen den Gesteinen und den Umweltfaktoren. Die Zunahme der Schäden und die daraus erwachsende Gefahr des Verlustes kulturellen Erbes haben weltweit große Bemühungen um erfolgversprechende und möglichst dauerhaft wirksame Schutzmaßnahmen ausgelöst.

Die systematische Untersuchung der Gesteine sowie die Erfassung und Bewertung der Verwitterungsschäden sind eine notwendige Voraussetzung für das Verständnis der Schadensmechanismen und Schadensursachen. Interdisziplinäre Forschungsaktivitäten sowie die Verbesserung vorhandener und Einführung neuer, moderner Untersuchungsmethoden haben die Schadensdiagnose zur wichtigsten Planungsgrundlage für die Durchführung denkmalgerechter Erhaltungsmaß-



Abb. 2: Cheops-Pyramide und Sphinx, Gizeh / Ägypten.

Fig. 2: Great Pyramid of Cheops and Sphinx, Giza / Egypt.

nahmen werden lassen. Die Schadensdiagnose stellt damit einen zentralen Bestandteil der weltweit akzeptierten Vorgehensweise zur Bauwerkserhaltung dar, die aus den drei aufeinander aufbauenden Bereichen „Anamnese – Diagnose – Therapie“ besteht (Abb. 5). Eine erfolgreiche Schadensdiagnose erfordert immer den Einsatz verschiedener und sich ergänzender Untersuchungsverfahren. Material- und Schadensaufnahme am Bauwerk in Kombination mit Vor-Ort-Messungen und umfangreicher Laboranalytik einschließlich Verwitterungssimulationstests ergeben in der Zusammenschau ein präzises Bild der geschädigten Naturwerksteine (Fitzner 2002). Diese Diagnosebefunde - zusammengeführt mit den Untersuchungsergebnissen anderer Disziplinen wie Chemie, Ingenieurwissenschaften, Architektur, Denkmalschutz und Mikrobiologie - ermöglichen die Erarbeitung eines umfassenden Erhaltungsmaßnahmenkonzepts. Im Rahmen der Vor-Ort-Untersuchungen stellt die von der Arbeitsgruppe „Natursteine und Verwitterung“ am Geologischen Institut der RWTH Aachen entwickelte Bauwerkskartierung einen sehr wichtigen Diagnose-



Abb. 3: „Schatzhaus“, Petra / Jordanien.

Fig. 3: „Treasury“, Petra / Jordan.

schritt dar. Mit Hilfe der Bauwerkskartierung können der Gesteinsbestand und die phänomenologischen Verwitterungsmerkmale an Steinmonumenten sehr genau dokumentiert und bewertet werden. Diese international anerkannte Methode wird weltweit an einer großen Zahl hochrangiger Natursteinbauwerke sehr erfolgreich angewandt. Sie wird den in internationalen Konventionen – wie der Charta von Venedig über die Konservierung und Restaurierung von Denkmälern und Ensembles (1964) – geforderten Vorgaben einer umfassenden, wissenschaftlich fundierten Diagnose und Dokumentation in vollem Umfang gerecht (Fitzner 2004).

2. Grundlagen der Bauwerkskartierung

Die Bauwerkskartierung stellt ein zerstörungsfreies Vor-Ort-Untersuchungsverfahren zur flächendeckenden Erfassung des Gesteinsinventars und des Verwitterungszustands dar (Fitzner & Kownatzki 1997, Kownatzki 1997, Kownatzki & Fitzner 1999, Fitzner & Heinrichs 2002). Die Methode der Bauwerkskartie-



Abb. 4: Moai, Osterinsel / Chile.

Fig. 4: Moai, Easter Island / Chile.

rung wird sowohl an historischen und modernen Bauwerken aus Naturwerksteinen genutzt als auch an Bauwerken und Objekten, die aus anstehendem Gestein herausgearbeitet wurden. Bedeutende Beispiele der Felsmonumente sind der Sphinx von Gizeh, die Felsenstadt Petra in Jordanien, Petroglyphen und Felsritzungen in vielen Ländern und die Buddha-Statuen im Bamyán-Tal Afghanistans. Die Bauwerkskartierung ermöglicht die Aufnahme, Dokumentation und Bewertung der Natursteine und ihrer Verwitterungsschäden von gesamten Bauwerken, einzelnen Bauteilen, Skulpturen und anderen Zierobjekten. Sie ist für alle Gesteinsarten anwendbar und berücksichtigt die gesamte, sehr große Bandbreite der verwitterungsbedingten Schadensformen. Im Zuge der Kartierung werden Gesteinsinventar (lithologische Kartierung) sowie Typ, Intensität und Verteilung der Verwitterungsformen (Kartierung der Verwitterungsformen) aufgenommen. Je nach wissenschaftlicher oder denkmalpflegerischer Zielsetzung der Untersuchungen können zusätzliche Informationen miterfasst werden, wie Typ und Technik der Gesteinsbearbeitung und -

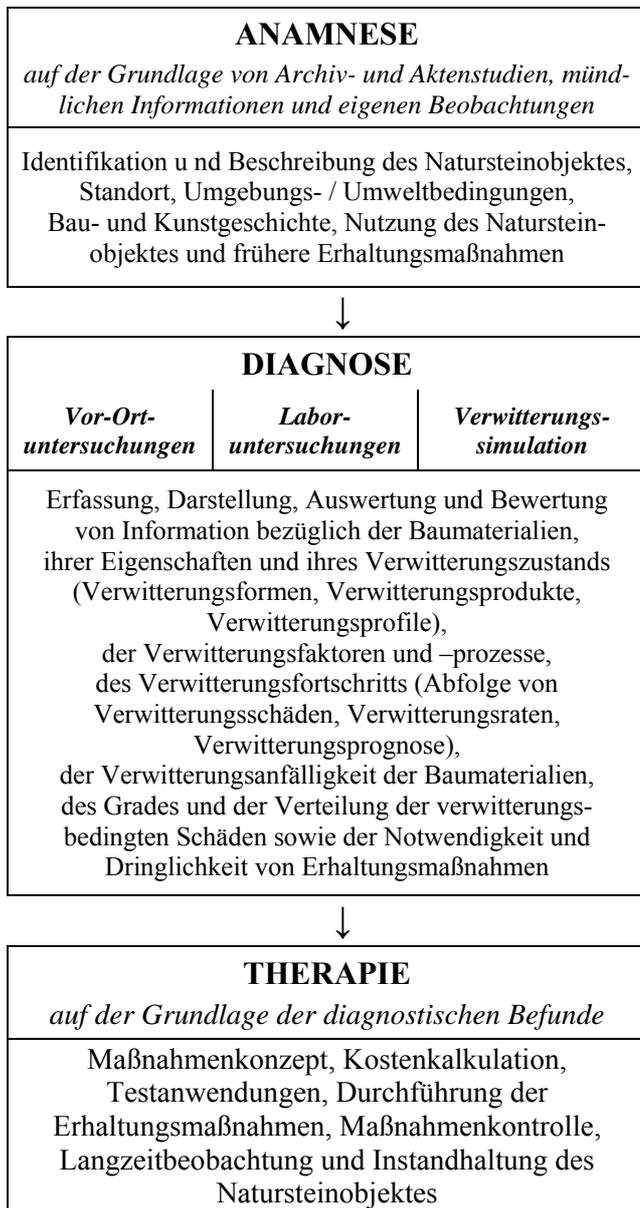


Abb. 5: Anamnese – Diagnose – Therapie.

Fig. 5: Anamnesis – diagnosis – therapy.

verbauung, andere Baumaterialien und ihr Verwitterungszustand, Expositionseigenschaften oder frühere Restaurierungsmaßnahmen.

Geeignete Aufzeichnungsunterlagen sind eine wichtige Voraussetzung für die exakte Registrierung der Gesteine und der Verwitterungsformen. Fotogrammetrisch oder durch Handaufmaß erstellte Pläne sowie verzerrungsfreie Fotos stellen optimale Kartierunterlagen dar. Die Größe und Geometrie des Untersuchungsbereiches steuern maßgeblich den zeitlichen Kartieraufwand, die Zugänglichkeit des Untersuchungsbereiches hingegen die mögliche Genauigkeit der Kartierung. Neben den Aufzeichnungsunterlagen stellen Klassifikationsschemata der Lithotypen und der Verwitterungsformen eine unabdingbare Voraussetzung für eine erfolgreiche Bauwerkskartierung dar. Sie gewährleisten die objektive und reproduzierbare



Abb. 6: Bauwerkskartierung, Darstellung und Auswertung der Kartierinformation.

Fig. 6: Monument mapping, illustration and evaluation of mapping information.

Registrierung der Zustandsinformationen. Im Rahmen der Kartierung werden die Gesteinsoberflächen visuell und möglichst auch manuell untersucht. Die gewonnenen Informationen zu Gesteinsbestand und Verwitterungszustand werden mit Hilfe von Symbolen in die Kartierunterlagen eingetragen. Hierbei werden alle Teilflächen, die sich hinsichtlich Gesteinstyp oder Verwitterungsformenspektrum von benachbarten Teilflächen unterscheiden, in den Aufzeichnungsunterlagen gegeneinander abgegrenzt. Die Bauwerkskartierung wird durch eine umfassende Fotodokumentation

von Untersuchungsbereichen, Gesteinen und Verwitterungsformen begleitet.

Kommerziell erhältliche oder speziell für die Bauwerkskartierung entwickelte Computerprogramme sind für die Speicherung, Weiterbearbeitung, quantitative Auswertung und Darstellung der Kartierinformationen erforderlich. Abbildung 6 gibt einen Überblick über den Kartierablauf und die Bearbeitung, Auswertung und Darstellung der Kartierinformationen. Grundlegende, computergestützte Bearbeitungsschritte sind die Digitalisierung des Bauwerksplans mit Übertragung aller aufgrund unterschiedlicher Zustandsinformationen gegeneinander abgegrenzten Teilflächen, die Kennzeichnung aller Teilflächen anhand von Nummerierung, Koordinaten und planimetrischer Auswertung sowie die Eingabe aller Kartierinformationen mit Zuordnung zu den Teilflächen. Digitaler Bauwerksplan, Informationslisten und planimetrische Angaben stellen die Datenbank für die Darstellung der Zustandsinformationen in thematischen, idealerweise farbigen Karten und für die quantitative Auswertung der Kartierinformationen und ihre Umsetzung zur Schadensbewertung dar. Für die Bewertung der verwitterungsbedingten Schäden wurden Schadensklassen und Schadensindizes eingeführt.

Alle weiterführenden diagnostischen Aktivitäten wie messtechnische Untersuchungen am Bauwerk, Probennahme und Laboruntersuchungen können unter Berücksichtigung der Kartierungsergebnisse zielorientierter, erfolgreicher und wirtschaftlicher geplant und durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Bauwerkskartierung liefern einen sehr wichtigen Beitrag zur Verbesserung des Verständnisses der Natursteinverwitterung und sie stellen eine wichtige wissenschaftliche Grundlage für die praxisgerechte Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen dar.

3. Lithologische Kartierung

Das von der Natur vorgegebene breite Steinangebot verbunden mit architektonischen, künstlerischen, technischen und wirtschaftlichen Auswahlkriterien wie Aussehen, Farbe, Bearbeitbarkeit, Verfügbarkeit, Dauerhaftigkeit und Kosten zeigt sich in der Mannigfaltigkeit des Gesteinsinventars vieler Bauwerke. Im Laufe von Jahrhunderten vorgenommene Umbauten und Restaurierungsmaßnahmen können dem Bauwerk zusätzliche Steinarten zugeführt haben.

Eine Beurteilung des Verwitterungsverhaltens setzt die genaue Kenntnis aller verbauten Gesteinstypen voraus. Diese Vorgabe ist besonders bei den Bauwerken zu beachten, die eine Vielzahl heterogen im Bau-

körper verteilter Gesteinstypen aufweisen.

Die Ansprache und Aufnahme des Gesteinsinventars erfolgt mit Hilfe der lithologischen Kartierung. Von den Geowissenschaften als verbindlich entwickelte petrographische Klassifikationsschemata werden für die Beschreibung der Lithotypen genutzt. Regionale Bezeichnungen oder oftmals irreführende Handelsnamen sollten nur als Zusatzinformationen mitberücksichtigt werden.

Voraussetzung für Gesteinsansprache und Kartierung sind Zugänglichkeit des Bauwerks und Steinsichtbarkeit. Putze, Schlämmen, Anstriche, biologische Besiedlung oder Krusten erschweren oder verhindern oftmals die Identifizierung des Steinmaterials. Die detaillierte Untersuchung großer Bereiche wie Fassaden, Pfeiler oder Türme und unzugänglicher Untersuchungsbereiche erfordern den Einsatz von Hebebühnen oder Gerüsten.

Im Rahmen der lithologischen Kartierung werden alle auftretenden Gesteinstypen angesprochen und ihre Verteilung im Baukörper registriert. Die Darstellung der Kartierungsergebnisse erfolgt in lithologischen Karten. Diese dokumentieren die Verteilung der unterschiedlichen Gesteinstypen im Untersuchungsbereich. Sie können auch Hinweise auf bisher nicht bekannte Gesteins austauschmaßnahmen geben. Die quantitative Auswertung der lithologischen Karten erfolgt entweder bezogen auf die Anzahl oder die Fläche der kartierten Werksteine. Die Ergebnisse der lithologischen Kartierung sind Voraussetzung für eine differenzierte Schadensbewertung.

Abbildung 7 zeigt die lithologische Karte für den Teilbereich der Westfassade der Pfarrkirche St. Lambertus in Monschau-Kalterherberg. Für die im Jahre 1901 fertiggestellte Kirche wurden Gesteine aus der Eifel-Region verwendet. Die im Rahmen von Schadensuntersuchungen erstellte lithologische Karte verdeutlicht die Vielfalt der Gesteinarten und -varietäten und ihre heterogene Verteilung in der Fassade als Folge von lokalem Gesteinsangebot, architektonischen und bautechnischen Aspekten sowie Gesteins austausch im Zuge früherer Restaurierungsmaßnahmen. Abbildung 8 zeigt für die gesamte Westfassade des gleichen Bauwerks die quantitative Auswertung der Lithotypen bezogen auf Anzahl und Fläche der Werksteine. Aufgrund stark variierender Werksteinformate führen die beiden Auswerteschritte zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen. Die genaue Kenntnis von Art, Verteilung und Eigenschaften der Gesteine waren eine wichtige Grundlage für die Planung, Kostenkalkulation und Durchführung notwendiger Gesteins austauschmaßnahmen an dieser denk-

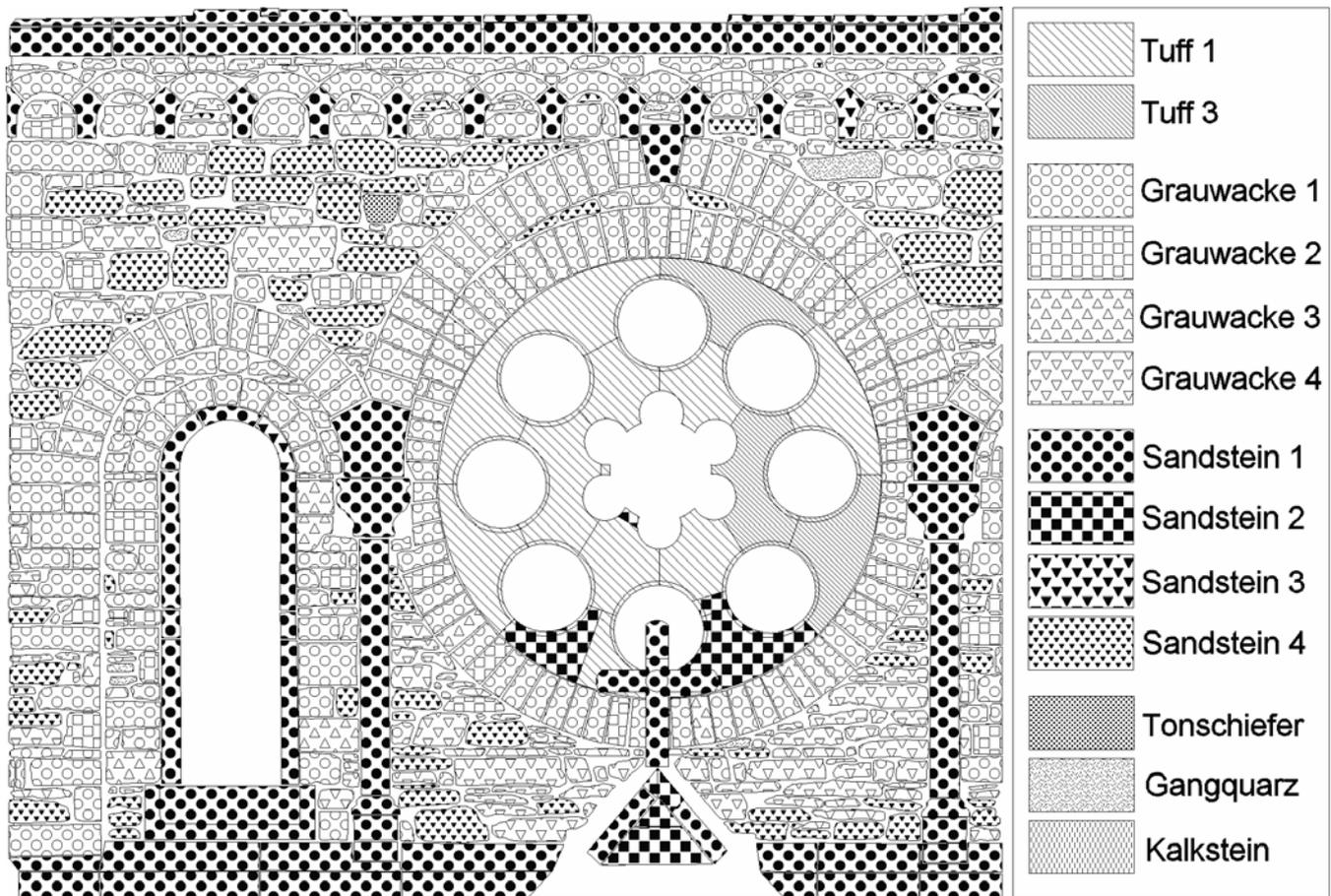


Abb. 7: Lithologische Karte, Pfarrkirche St. Lambertus in Monschau-Kalterherberg - Teilbereich der Westfassade.

Fig. 7: Lithological map, St. Lambertus church in Monschau-Kalterherberg / Germany – part of the west façade.

malgeschützten Kirche und für die Auswahl geeigneter Ersatzgesteine.

4. Klassifizierung der Verwitterungsformen

Verwitterungsformen sind die sichtbaren Ergebnisse der Verwitterungsprozesse, die durch die Wechselwirkungen zwischen den Gesteinen und den natürlichen und anthropogenen Verwitterungsfaktoren ausgelöst und gesteuert werden. Die durch die Verwitterungsprozesse erzeugte Veränderung der Oberfläche von Natursteinen kann mit Hilfe von Verwitterungsformen nach phänomenologisch-geometrischen Kriterien beschrieben werden. Hierbei können alle Veränderungen wie morphologische Veränderungen infolge Gesteinsverlustes, Farbänderungen, Materialumlagerungen, Anlagerungen von Fremdstoffen, Gesteinsablösungen, Risse oder Deformationen berücksichtigt werden. Die Kartierung der Verwitterungsformen ermöglicht eine genaue Verwitterungszustandserfassung an Natursteinbauwerken.

Unabdingbares Hilfsmittel und damit Grundlage einer solchen Kartierung stellt ein Klassifikationsschema der Verwitterungsformen dar. Als Ergebnis langjähriger nationaler und internationaler Forschungsarbeiten

hat die Arbeitsgruppe „Natursteine und Verwitterung“ des Geologischen Instituts der RWTH Aachen ein detailliertes Klassifikationssystem als Grundlage für eine exakte, objektive und reproduzierbare Registrierung und Dokumentation aller Verwitterungsformen erstellt und kontinuierlich weiterentwickelt (Fitzner et al. 1995, Kownatzki 1997, Fitzner & Heinrichs 2002 und 2004, Vergès-Belmin et al. 2004).

Das Klassifikationssystem beinhaltet die Definition und Beschreibung der Verwitterungsformen, Symbole für ihre Registrierung und die computergestützte Weiterbearbeitung der Kartierinformationen, Vorschläge für eine zusätzliche Differenzierung jeder Verwitterungsform nach ihrer Intensität und einen Fotoatlas mit typischen Beispielen der Verwitterungsformen.

Das Klassifikationssystem ist hierarchisch aufgebaut (Abb. 9). Es setzt sich aus vier Informationsebenen zusammen, mit denen der Verwitterungszustand in unterschiedlichen Genauigkeitsstufen beschrieben werden kann. Die erste Ebene des Klassifikationssystems umfasst vier Gruppen von Verwitterungsformen: 1 – Gesteinsverlust, 2 - Verfärbung / Gesteinsanlagerung, 3 – Gesteinsablösung, 4 – Gesteinsrisse / Deformation (Abb. 10). In der zweiten Ebene werden 25

Quantitative Auswertung der Lithotypen

a) nach Anzahl der Werksteine (%)

b) nach Werksteinfläche (%)

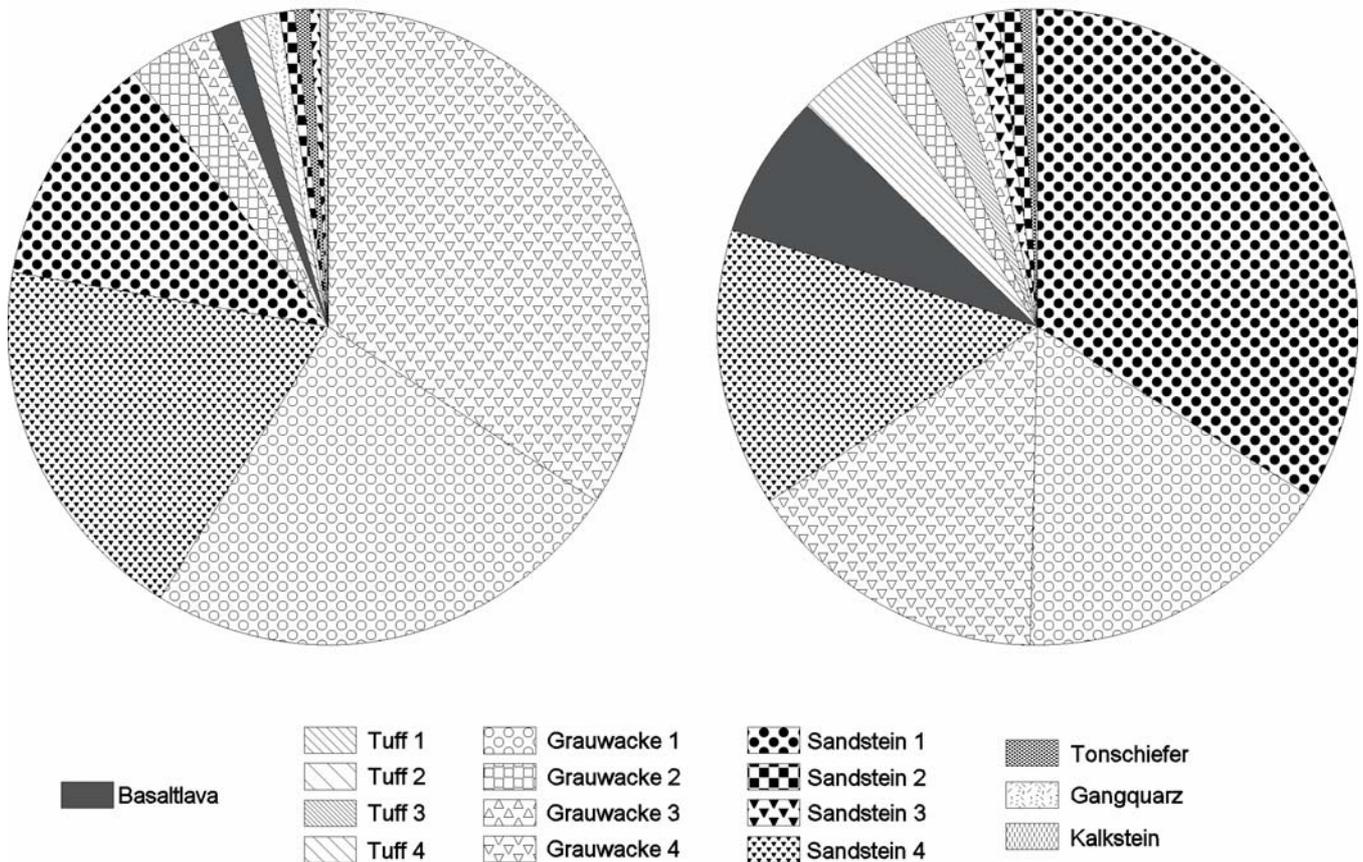


Abb. 8: Quantitative Auswertung der Lithotypen, Westfassade der Pfarrkirche St. Lambertus in Monschau-Kalterherberg.

Fig. 8: Quantitative evaluation of lithotypes, west façade of the St. Lambertus church / Monschau-Kalterherberg, Germany.

Hauptverwitterungsformen und in der dritten Ebene 75 Einzelverwitterungsformen unterschieden. In der vierten Ebene erfolgt eine weitere Differenzierung der Einzelverwitterungsformen auf der Grundlage geeigneter Intensitätskriterien. Unter Intensitätskriterien werden Größen zusammengefasst, die durch Messung oder Schätzung ergänzend zur Art einer Verwitterungsform zusätzlich ihr Ausmaß beschreiben. Messbare Intensitätsparameter sind beispielsweise Tiefe einer Rückverwitterung, Volumen eines Ausbruchs, Dicke von Gesteinschalen oder Öffnungsweite von Rissen. Eine verlässliche Schätzung nicht messbarer intensitätsanzeigender Größen wie Menge des sich in Form von Absanden ablösenden Gesteinsmaterials ist erst nach einer umfassenden Begehung des gesamten Untersuchungsgebietes mit einer Bewertung der Intensitätsbandbreite möglich. Die Intensität einer Verwitterungsform ist ein wichtiges Kriterium bei der Schadensbewertung. Eine standardisierte Intensitätsklassifizierung hat sich als nicht praktikabel erwiesen.

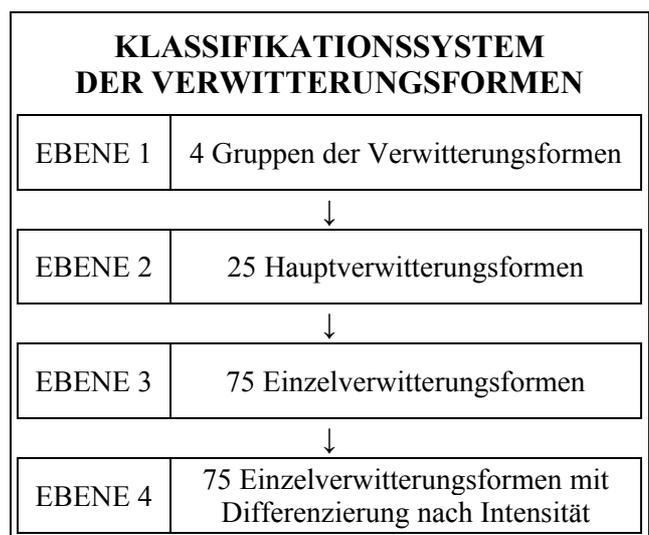


Abb. 9: Struktur des Klassifikationssystems der Verwitterungsformen.

Fig. 9: Structure of the classification scheme of weathering forms.

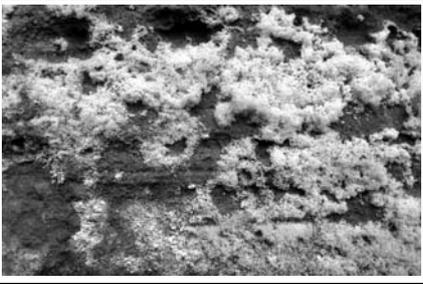
GRUPPEN DER VERWITTERUNGSFORMEN	
<p>GRUPPE 1</p> <p>Gesteinsverlust</p>	
<p>GRUPPE 2</p> <p>Verfärbung / Gesteinsanlagerung</p>	
<p>GRUPPE 3</p> <p>Gesteinsablösung</p>	
<p>GRUPPE 4</p> <p>Gesteinsrisse / Deformation</p>	

Abb. 10: Gruppen der Verwitterungsformen.

Fig. 10: Groups of weathering forms.

Die Intensitätsklassifizierung sollte jeweils der Bandbreite der an einem Bauwerk oder an einem Bauwerksensemble auftretenden Intensitäten angepasst werden.

Abbildung 11 zeigt einen Ausschnitt des Klassifikationssystems der Verwitterungsformen. Aus der Gruppe 1 der Verwitterungsformen „Gesteinsverlust“ wird beispielhaft die Hauptverwitterungsform „Relief“ - die häufigste Form des Gesteinsverlustes an Natursteinbauwerken - mit ihren neun zugehörigen Einzelverwitterungsformen vorgestellt. Die Zweckmäßigkeit individueller Intensitätsklassifikationen zeigt die Ta-

belle 1. Die Intensitätsklassifizierung der Einzelverwitterungsform „Zurundung / Eintiefung“ für zwei sehr unterschiedliche Kalksteinmonumente in Ägypten – eine Moschee in der Altstadt von Kairo und die Cheops-Pyramide in Gizeh – berücksichtigt die extrem unterschiedliche Intensitätsbandbreite dieser Einzelverwitterungsform an den beiden Bauwerken als eine Folge des beträchtlichen Größenunterschieds der verbauten Werksteine (Werksteingröße der Moschee $\sim 0,03 \text{ m}^3$, Werksteingröße der Cheops-Pyramide $\sim 1-2 \text{ m}^3$).

5. Kartierung der Verwitterungsformen

Informationen über die Bauwerksgeschichte und das Gesteinsinventar sowie geeignete Aufzeichnungsunterlagen, das Klassifikationssystem der Verwitterungsformen, die Zugänglichkeit des Untersuchungsbereichs und Erfahrung des Bearbeiters sind wichtige Voraussetzungen für die erfolgreiche Kartierung von Verwitterungsformen und die Bewertung des durch sie erzeugten Schadens. Obwohl das vorgestellte Klassifikationssystem der Verwitterungsformen die Beschreibung des Verwitterungszustands in unterschiedlichen Genauigkeitsstufen ermöglicht, haben langjährige Erfahrungen gezeigt, dass auch an größeren Untersuchungsbereichen die Kartierung der Verwitterungsformen mit höchstmöglicher Genauigkeit durchgeführt werden sollte. Im Rahmen der Kartierung werden alle Verwitterungsformen erfasst und in den Aufzeichnungsunterlagen dokumentiert, wobei alle Teilflächen, die sich in Art, Intensität oder Kombination von Verwitterungsformen unterscheiden, abgegrenzt werden.

Die Darstellung der Kartierinformationen erfolgt in Karten der Verwitterungsformen. Die Darstellungsmöglichkeit reicht von Karten jeder einzelnen Verwitterungsform bis zu einer Gesamtkarte aller Verwitterungsformen. Die Übersichtlichkeit der Ergebnisse sollte bei der Auswahl des Kartentyps als wichtiges Kriterium berücksichtigt werden. Als zweckmäßig und aussagekräftig haben sich Karten nach den vier Gruppen der Verwitterungsformen erwiesen. Hierbei werden jeweils alle Verwitterungsformen einer Gruppe zusammen in einer Karte dargestellt. Als Beispiel wird die Karte der Verwitterungsformen der Gruppe 1 „Gesteinsverlust“ für einen Teilbereich des Karnak Tempels in Luxor / Ägypten vorgestellt (Abb. 12 und 13).

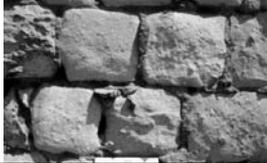
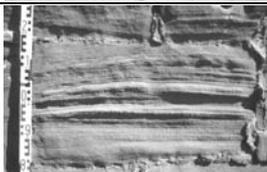
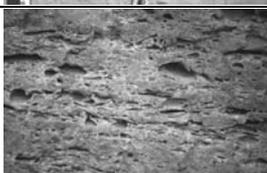
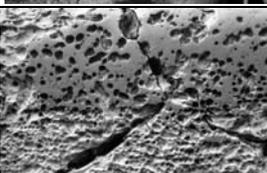
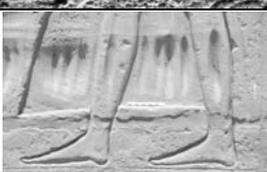
Gruppe der Verwitterungsformen: 1 – Gesteinsverlust						
Hauptverwitterungsform	Einzelverwitterungsform		Einzelverwitterungsform mit Intensitäten	Fotodokumentation		
RELIEF Morphologische Veränderung der Gesteinsoberfläche infolge partiellen oder selektiven Auswitterns.	R	Zurundung / Eintiefung <i>Relief durch Zurundung von Ecken und Kanten oder durch Aushöhlung. Konkave oder konvexe, weiche Formen.</i>	Ro	Ro ₁ ↓ Ro _n		
		Alveolarverwitterung <i>Relief in Form von dicht aneinandert liegenden Aushöhlungen (Alveolen).</i>	Ra	Ra ₁ ↓ Ra _n		
		Texturabhängige Auswitterung <i>Relief in Abhängigkeit von Texturelementen (Schichtung, Schieferung, Bänderung). Häufig Streifenmuster.</i>	tR	tR ₁ ↓ tR _n		
		Auswitterung von Gesteinskomponenten <i>Relief durch Auswitterung verwitterungssensibler Komponenten oder durch Ausbrechen kompakter Gesteinskomponenten.</i>	Rk	Intensitäts-einteilung für alle neun Einzelverwitterungsformen nach der Tiefe des Reliefs (in mm oder cm)	Rk ₁ ↓ Rk _n	
		Herauspräparierung von Komponenten <i>Vorstehen von Gesteinskomponenten infolge Abwitterns des sie umgebenden, verwitterungssensibleren Materials.</i>	Rh		Rh ₁ ↓ Rh _n	
		Aufrauhung <i>Feinstes Relief / Glanzverlust / Mattierung an glatten Gesteinsoberflächen durch Verlust feinsten Gesteinspartikel oder durch Lösungsvorgänge.</i>	Rr		Rr ₁ ↓ Rr _n	
		Mikrokarst <i>Relief infolge Korrosion an löslichen Gesteinen, insbesondere an Karbonatgesteinen.</i>	Rm		Rm ₁ ↓ Rm _n	
		Pitting <i>Relief in Form kleiner Gruben (pits) durch biogen induzierte Korrosion an löslichen Gesteinen, insbesondere an Karbonatgesteinen.</i>	Rt		Rt ₁ ↓ Rt _n	
		Relief durch anthropogenen Einfluss <i>Relief durch Einritzungen, Ausmeißelungen etc.</i>	aR		aR ₁ ↓ aR _n	

Abb. 11: Ausschnitt aus dem Klassifikationssystem der Verwitterungsformen.

Fig. 11: Section of the classification scheme of weathering forms.

Tab. 1: Beispiel für die Klassifizierung der Intensität von Verwitterungsformen.

Table 1: Example for the intensity classification of weathering forms.

BAUWERK	Verwitterungsform „Zurundung / Eintiefung (Ro)“ Intensitätsklassen (Ro1-Ro7) nach der Tiefe des Gesteinsverlustes (cm)						
	Ro ₁	Ro ₂	Ro ₃	Ro ₄	Ro ₅	Ro ₆	Ro ₇
EL-MERDANI MOSCHEE aus <u>kleinen</u> Werksteinen errichtet	≤ 0,2	0,2-0,5	0,5-1	1-3	3-5	5-10	>10
CHEOPS-PYRAMIDE aus <u>sehr großen</u> Werksteinen errichtet	≤5	5-15	15-25	25-50	50-75	75-100	>100



Abb. 12: Karnak-Tempel, Luxor / Ägypten. Teilbereich des Tempels von Ramses III.

Fig. 12: Karnak Temple, Luxor / Egypt. Part of the Temple of Ramesses III.

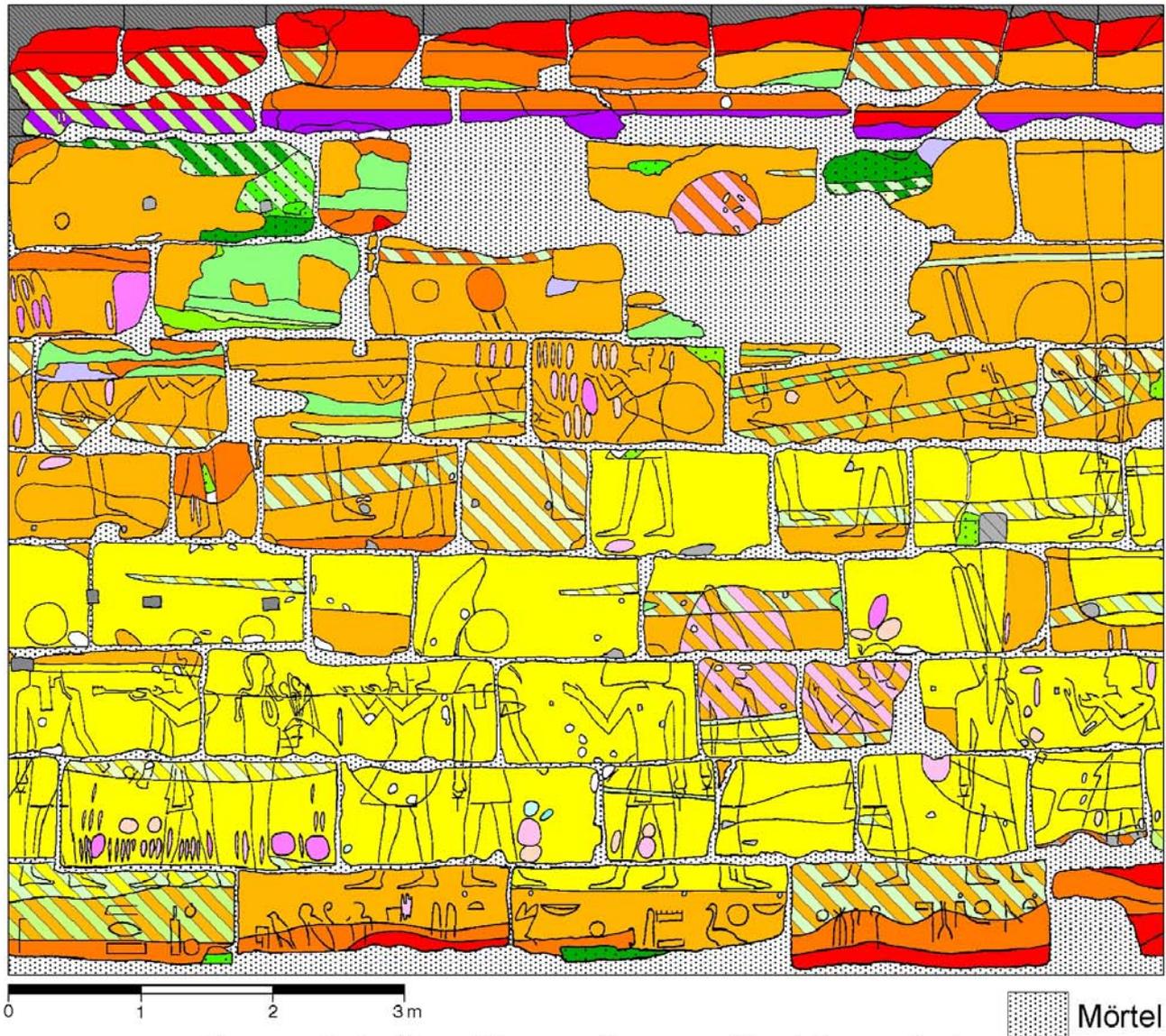
An der Fassade des mehr als dreitausend Jahre alten Tempels von Ramses III - aus kretazischem Gebel el-Silsila Sandstein Südägyptens errichtet - wurden bereits zahlreiche Schadstellen mit Mörtel ausgebessert. Die verbliebene Gesteinsoberfläche weist Gesteinsverluste in unterschiedlichen Formen und Intensitäten von Rückverwitterung, Relief oder Ausbrüchen auf (Fitzner et al. 2003). Auffallend ist die überwiegend geringe Intensität der Gesteinsverluste in der unteren Hälfte der Fassade im Gegensatz zu oft hohen bis sehr hohen Intensitäten von Gesteinsverlusten im oberen Fassadenbereich. In Zusammenschau mit den Karten der Verwitterungsformen der Gruppen 2 – 4 ist ableitbar, dass dieser untere Bereich über einen langen Zeitraum hinweg geschützt unter Verwitterungsschutt gelegen hat.

Die Darstellung der Verwitterungsformen nach den vier übergeordneten Gruppen ist auch in Hinblick auf Erhaltungsmaßnahmen zweckmäßig. Der Kartierplan „Gesteinsverlust“ lokalisiert beispielsweise alle Bereiche, für die entweder eine Stabilitätssicherung oder eine Ausbesserung der Fehlstellen in Form von Stein-

ergänzung oder Steinersatz in Betracht zu ziehen sind. Der Kartierplan „Verfärbung / Gesteinsanlagerung“ ermöglicht Aussagen zu Zweckmäßigkeit und Umfang von Maßnahmen wie Reinigung oder Entsalzung. Der Kartierplan „Gesteinsablösung“ gibt Aufschluss über die Notwendigkeit von gesteinsverlustvorbeugenden Maßnahmen wie Fixierung oder Festigung sich ablösenden Gesteinsmaterials. Der Kartierplan „Risse / Deformation“ ist in Hinblick auf Maßnahmen zur Stabilitätssicherung der durch Trennflächen geschädigten und oftmals ausbruchgefährdeten Gesteinspartien aussagekräftig.

Die quantitative Auswertung der Karten der Verwitterungsformen kann wie bei den lithologischen Karten entweder bezogen auf die Anzahl der Werksteine oder flächenbezogen erfolgen. Die Karten der Verwitterungsformen und ihre quantitativen Auswertungen gewährleisten eine umfassende Charakterisierung der an einem Natursteinbauwerk auftretenden Verwitterungszustände nach Art, Ausmaß und Verteilung. Sie liefern genaue Informationen zum Verwitterungsverhalten der einzelnen Gesteine unter Berücksichtigung von Expositionseigenschaften am Bauwerk und sie ermöglichen die Bewertung der Verwitterungsanfälligkeit der Gesteine. Darüber hinaus können sie wichtige Hinweise auf Schadensursachen und -prozesse erbringen.

Eine weitere, sehr wichtige Zielsetzung der Schadensdiagnose sind Beschreibung, Quantifizierung und Prognose des Verwitterungsfortschritts. Diese Aufgabe stellt den Bearbeiter vor eine große Herausforderung, wenn nicht durch den Vergleich mit Diagnoseergebnissen oder Bauwerksdokumenten aus früheren Zeiten auf die Verwitterungsprogression rückgeschlossen werden kann, sondern nur auf der Grundlage aktueller Befunde der Verwitterungsfortschritt eingeschätzt werden soll. Die Bauwerkskartierung ermöglicht auch hier Erfolg versprechende Auswerteschritte.



Gruppe 1 der Verwitterungsformen - Gesteinsverlust

Rückverwitterung (W) und Relief (R)		Intensitätseinteilung nach der Tiefe (cm) des Gesteinsverlustes					
		≤0,5	0,5 - 1	1 - 3	3 - 5	5 - 10	10 - 25
Rückverwitterung durch den Verlust von Gesteinsschalen	(sW)						
Rückverwitterung durch den Verlust nicht charakterisierbarer Gesteinselemente	(zW)						
Zurundung / Eintiefung	(Ro)						
Texturabhängige Auswitterung	(tR)						
Auswitterung von Komponenten	(Rk)						
Relief durch anthropogenen Einfluss	(aR)						
Ausbruch (O)		Intensitätseinteilung nach dem Volumen (cm³) der Fehlstellen					
		≤10	10 - 125	125 - 500	500 - 1000	1000 - 2500	> 2500
Ausbruch ohne erkennbare Ursache	(oO)						
			Kombination von Verwitterungsformen z.B. Ro2 und Rk2				

Abb. 13: Karte der Verwitterungsformen der Gruppe 1 – Gesteinsverlust. Karnak-Tempel, Luxor / Ägypten. Teilbereich des Tempels von Ramses III

Fig. 13: Map of the weathering forms of group 1 – loss of stone material. Karnak Temple, Luxor / Egypt. Part of the Temple of Ramesses III.

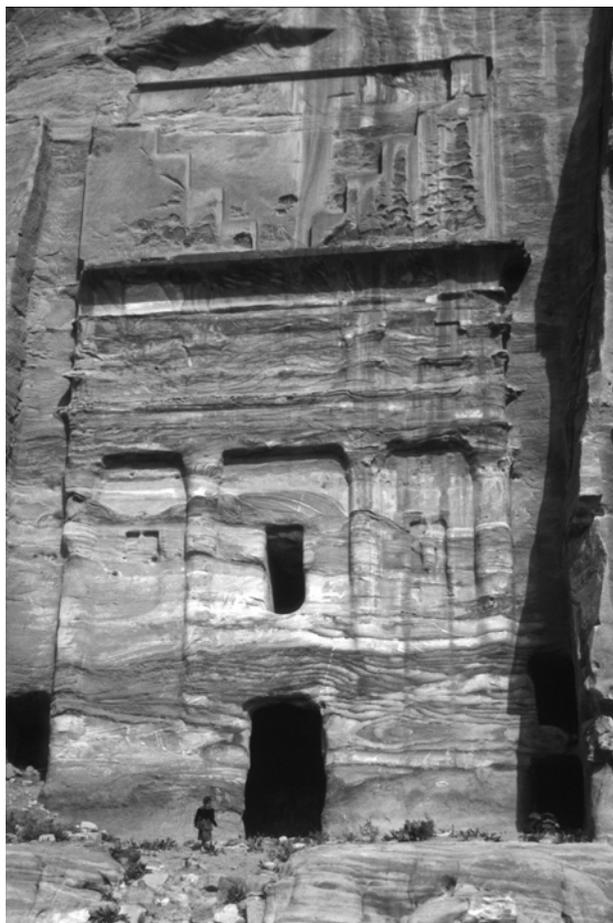


Abb. 14: Buntes Grab (Nr. 770), Petra / Jordanien.

Fig. 14: Silk Tomb (No. 770), Petra / Jordan.

So können bei statistisch ausreichenden Informationen zeitliche Entwicklungsreihen von Verwitterungsformen abgeleitet werden. Die Ermittlung von Verwitterungsraten ist eine erste Möglichkeit zur Quantifizierung des Verwitterungsschritts (Heinrichs & Fitzner 2000, Fitzner 2004). Ihre Berechnung erfolgt unter Berücksichtigung von Ausmaß des eingetretenen Gesteinsverlustes (Tiefe in mm oder cm) und Alter des Bauwerks beziehungsweise Einbaualter der Gesteine. Als Beispiel wird die Karte der durchschnittlichen Verwitterungsraten in mm / 100 Jahre für ein vor etwa zweitausend Jahren aus anstehenden Sedimentgesteinen der kambrischen Umm Ishrin Sandstein Formation herausgearbeitetes Grab in der nabatäischen Stadt Petra / Jordanien vorgestellt (Abb. 14 und 15). Die erhebliche Bandbreite und heterogene Verteilung der Verwitterungsraten infolge verschiedener Gesteinstypen und Expositionseigenschaften ist charakteristisch für viele Natursteinbauwerke. In einem weiteren Bearbeitungsschritt können dann durchschnittliche Verwitterungsraten für Bauteile und Gesamtbauwerke ermittelt werden. Verwitterungsraten sind für eine erste Einschätzung des Verwitterungsfortschritts sehr hilfreich. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass sie

gemäß ihres Berechnungsmodus einen linearer Verwitterungsfortschritt beschreiben. Durch die systematische quantitative Auswertung aller Verwitterungsformen – unter Berücksichtigung ihrer Intensitäten, Kombinationen und zeitlichen Abfolgen – ist es möglich, Verwitterungsprogressionskurven zu berechnen, die die durchschnittliche Gesamttiefe des Gesteinsverlustes in Abhängigkeit von der Zeit quantifizieren und hierbei den zeitlichen Verwitterungsablauf realitätsnäher aufzeigen. Erstmals wurden solche Verwitterungsprogressionskurven für Felsmonumente in Petra / Jordanien erarbeitet (Fitzner 2004). Hier wird die Verwitterungsprogressionskurve für ein freistehendes, aus Sedimentgesteinen der ordovizischen Disi Sandstein Formation herausgearbeitetes Monument vorgestellt (Abb. 16 und 17). Die Kurve beschreibt eine zunehmende Beschleunigung des Verwitterungsfortschritts. Erst in sehr fortgeschrittenem Stadium stellt sich ein annähernd linearer Verwitterungsverlauf ein. Wie in der Darstellung gezeigt, erlaubt die Extrapolation solcher Progressionskurven Verwitterungsprognosen. So kann für das Turmgrab eine Zunahme der durchschnittlichen Gesamttiefe des Gesteinsverlustes von 10,2 cm im Jahre 2000 auf 12,7 cm im Jahre 2100 vorhergesagt werden. Zuverlässige Informationen zum Verwitterungsfortschritt sind eine wichtige Hilfe zur Risikoabschätzung für Natursteinbauwerke und für die Bewertung von Notwendigkeit und Dringlichkeit von Erhaltungsmaßnahmen.

6. Schadensbewertung

Verwitterungsformen erlauben eine sehr genaue, wertungsfreie Beschreibung des Verwitterungszustandes von Natursteinen. Für die Bewertung der Verwitterungsschäden wurden Schadensklassen und Schadensindizes eingeführt (Abb. 18). Sowohl Schadensklassen als auch Schadensindizes ermöglichen eine verlässliche und reproduzierbare Quantifizierung der Steinschäden (Fitzner & Heinrichs 2002, Fitzner et al. 2002a). Schadensklassen dienen der wissenschaftlichen, praxisorientierten Bewertung des durch die Verwitterungsformen erzeugten Schadens. Es wurden sechs Schadensklassen definiert: 0 – kein Schaden, 1 – sehr schwacher Schaden, 2 – schwacher Schaden, 3 – mittlerer Schaden, 4 – starker Schaden, 5 – sehr starker Schaden. Diese Reihenfolge korreliert mit zunehmender Notwendigkeit und Dringlichkeit von Erhaltungsmaßnahmen. Die Ermittlung der Schadensklassen erfolgt auf der Grundlage eines Korrelationschemas „Verwitterungsformen – Schadensklassen“.

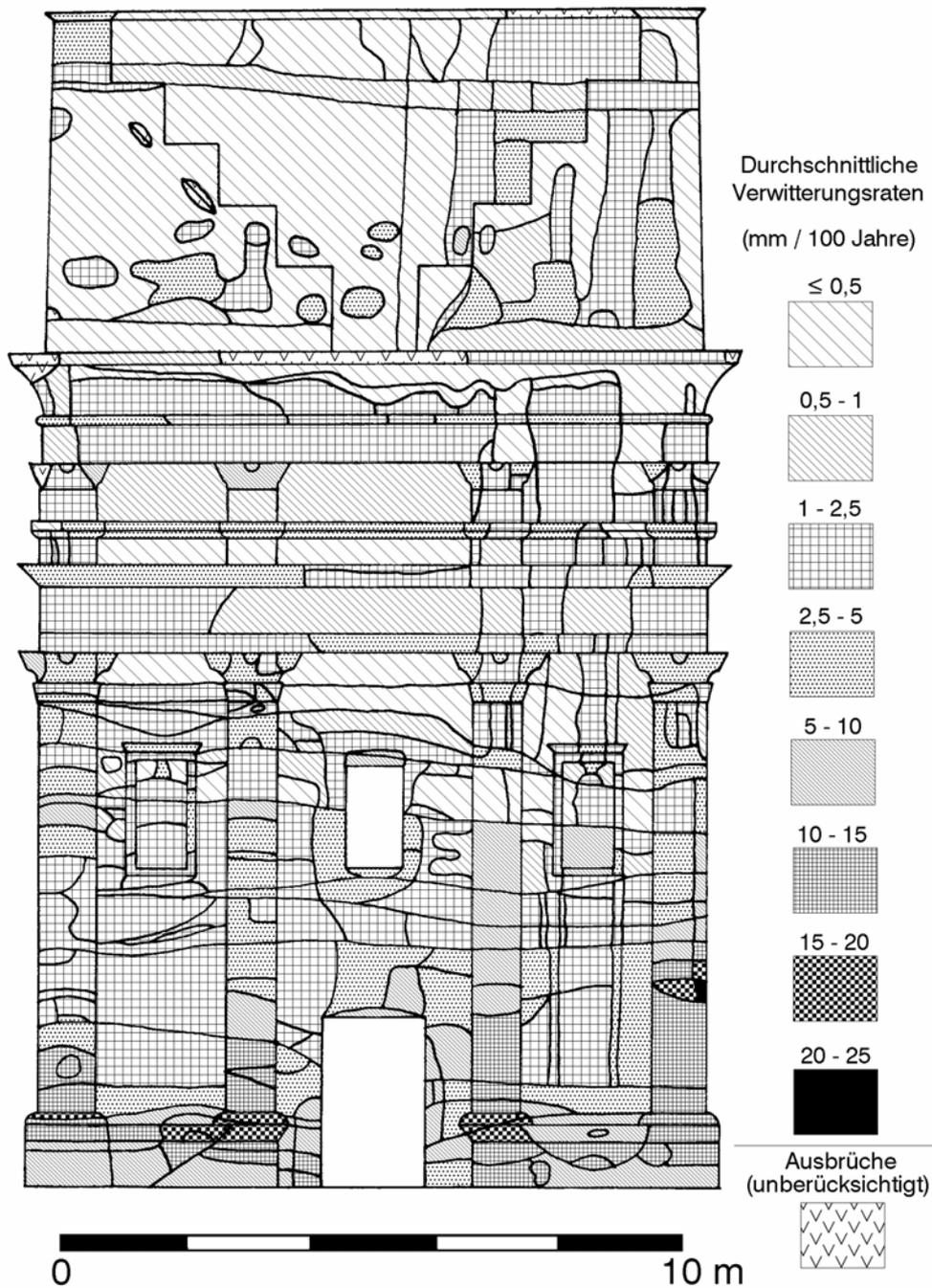


Abb. 15: Plan der durchschnittlichen Verwitterungsraten. Buntes Grab (Nr. 770), Petra / Jordanien.

Fig. 15: Map of average weathering rates. Silk Tomb (No. 770), Petra / Jordan.

Die Zuordnung der Verwitterungsformen zu Schadensklassen berücksichtigt Art und Intensität der Verwitterungsformen sowie Funktion, historischen und künstlerischen Wert der Bauelemente und das Verhältnis „geschädigter Werksteinbereich / Gesamtwerkstein“. Ein solches Korrelationsschema sollte in Kooperation von allen in Schadensdiagnose und Bauwerkserhaltung involvierten Verantwortlichen erstellt werden. Tabelle 2 zeigt einen Ausschnitt des Korrelationsschemas „Verwitterungsformen – Schadensklassen“, das für die im Jahre 1979 von der UNESCO zum Weltkulturerbe erklärten islamischen

Bauwerke im Zentrum Kairos erstellt wurde. Mit Hilfe eines solchen, für jedes Bauwerk oder Bauwerksensemble individuell zu entwickelnden Korrelationsschemas werden alle Verwitterungsformen in Schadensklassen überführt. Weitere Auswerteschritte sind die Darstellung der Schadensklassen in Karten und ihre quantitative Auswertung für den Gesamtuntersuchungsbereich, Teilbereiche oder in Abhängigkeit von den Gesteinstypen oder Expositionseigenschaften. Die Abbildungen 19 und 20 zeigen beispielhaft einen Teilbereich der El-Merdani Moschee in Kairo mit zugehöriger Schadens-

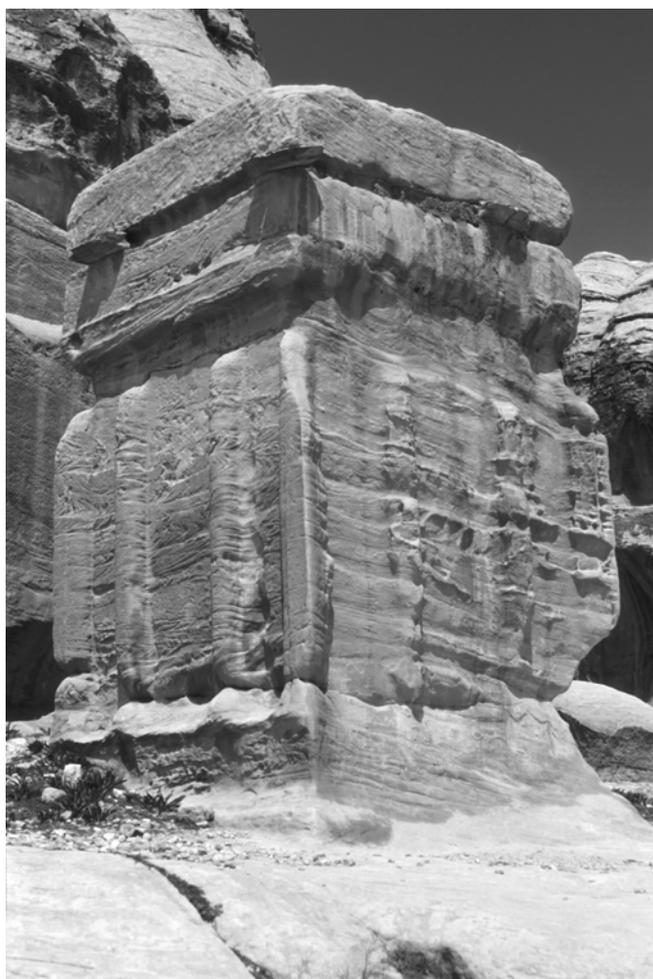


Abb. 16: Turmgrab (Nr. 9), Petra / Jordanien.

Fig. 16: Tower tomb (No. 9), Petra / Jordan.

klassenkarte. Solche Karten verdeutlichen Schadenszonierungen und lokalisieren Bauwerksbereiche, an denen vorrangig Erhaltungsmaßnahmen durchzuführen sind.

Schadensindizes wurden für eine quantitative Gesamtbewertung des Verwitterungsschadens eingeführt. Es wurden ein linear Schadensindex und ein progressiver Schadensindex definiert. Ihre Berechnung erfolgt aus der Flächenverteilung der Schadensklassen im Untersuchungsbereich. Der lineare Schadensindex entspricht rechnerisch der durchschnittlichen Schadensklasse. Der progressive Schadensindex berücksichtigt in stärkerem Maße die höheren Schadensklassen und stellt somit einen Kennwert dar, der Notwendigkeit und Dringlichkeit von Erhaltungsmaßnahmen zusätzlich verdeutlicht. Beide Schadensindizes liegen gemäß ihrer Berechnungsmodi im Bereich zwischen 0 und 5,0.

Für den in den Abbildungen 19 und 20 dargestellten Untersuchungsbereich an der El-Merdani Moschee beträgt der lineare Schadensindex 2,2, der progressive Schadensindex 2,8. Im Rahmen der Untersuchungen in der Altstadt von Kairo wurde festgestellt, dass Salzverwitterung für die oftmals bedrohlichen Schäden an den islamischen Bauwerken maßgeblich verantwortlich ist (Fitzner et al. 2002b).

Ursprünglich in den verwendeten Kalksteinen vorhandene Salze und insbesondere Salzneubildung oder Salzausfällung als Folge der starken Luftverschmutzung (Verkehr, Industrie) und aufsteigender Feuchte

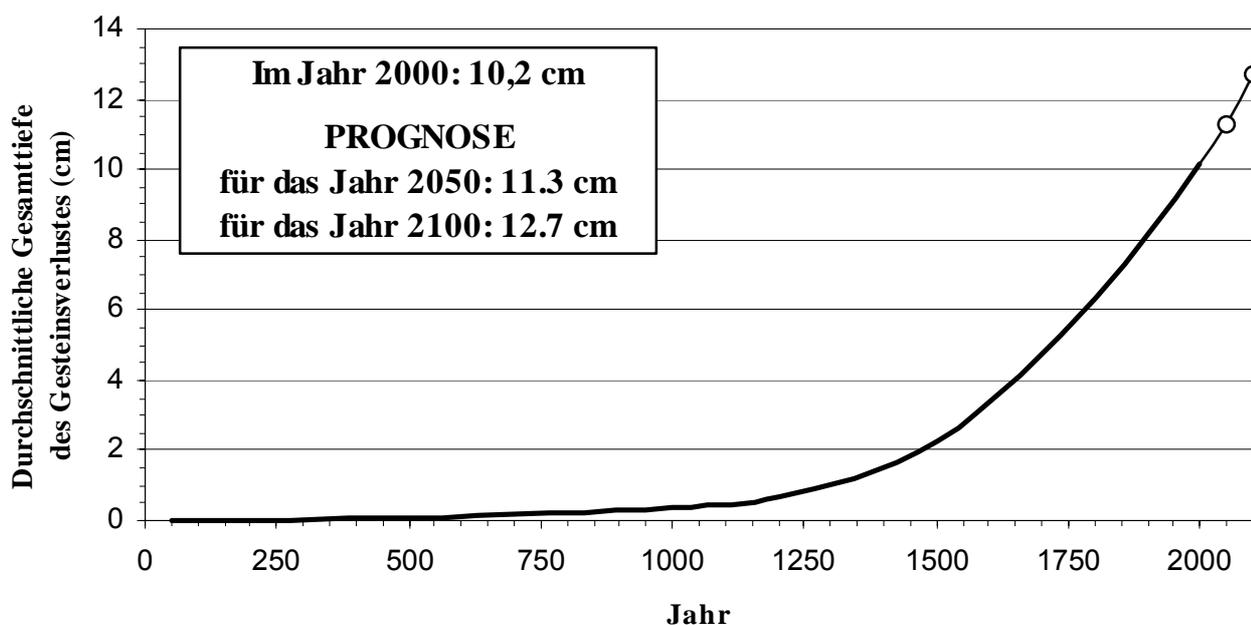


Abb. 17: Verwitterungsprogressionskurve und Verwitterungsprognose. Turmgrab (Nr. 9), Petra / Jordanien.

Fig. 17: Weathering progression curve and weathering prognosis. Tower tomb (No. 9), Petra / Jordan.

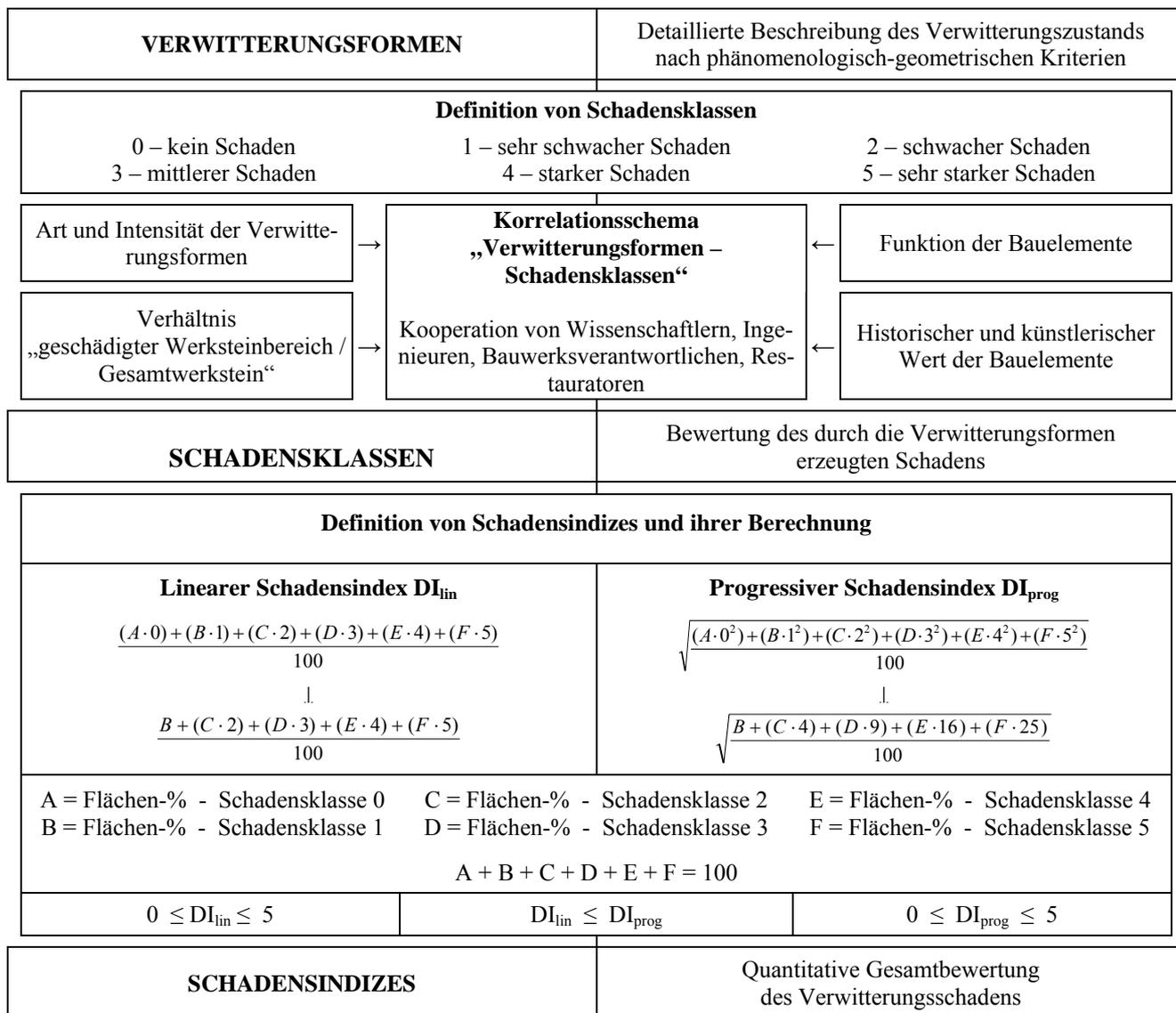


Abb. 18: Verwitterungsformen – Schadensklassen – Schadensindizes.

Fig. 18: Weathering forms – damage categories – damage indices.

Tab. 2: Ausschnitt des Korrelationsschemas „Verwitterungsformen – Schadensklassen“ für die islamischen Natursteinbauwerke in der Altstadt von Kairo / Ägypten.

Table 2: Section of the correlation scheme „weathering forms – damage categories“ for the Islamic stone monuments in the historical centre of Cairo / Egypt.

Verwitterungsform RÜCKVERWITTERUNG (W)	<i>Intensität</i>	<i>Tiefe der Rückverwitterung (mm)</i>						
		≤ 2	2-5	5-10	10-30	30-50	50-100	> 100
	Schadensklasse	1	2	3	4	4	5	5
Verwitterungsform AUSBRUCH (O)	<i>Intensität</i>	<i>Volumen der Fehlstelle (cm³)</i>						
		≤ 10	10-125	125-500	500-1000	> 1000		
	Schadensklasse	2	3	4	5	5		
Verwitterungsform ABSCHALEN (S)	<i>Intensität</i>	<i>Schalendicke (mm)</i>						
		≤ 2	2-5	5-10	10-20	> 20		
	Schadensklasse	1	2	3	4	4		
Schadensklassen								
0 – kein Schaden 3 – mittlerer Schaden	1 – sehr schwacher Schaden 4 – starker Schaden	2 – schwacher Schaden 5 – sehr starker Schaden						



Abb. 19: El-Merdani-Moschee, Kairo / Ägypten. Teilbereich der Südfassade.

Fig. 19: El-Merdani-Mosque, Cairo / Egypt. Part of the south façade

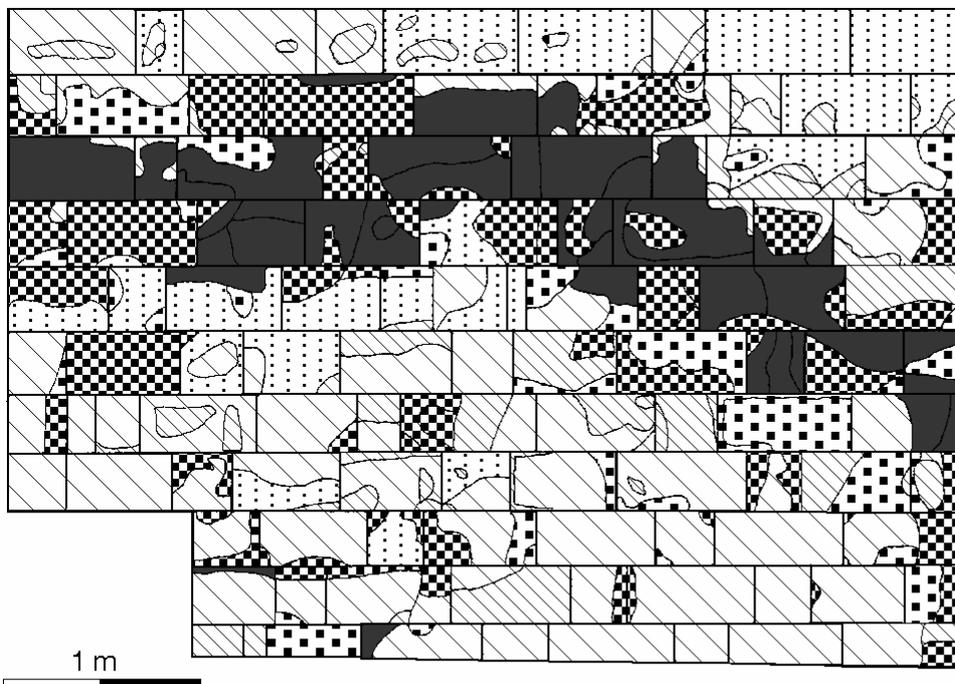
(steigender Grundwasserspiegel, zunehmende Wasserverschmutzung infolge unzureichender oder defekter Kanalisationssysteme) steuern hier entscheidend die Gesteinsverwitterung.

Abbildung 21 verdeutlicht diesen Zusammenhang für den Untersuchungsbereich der El-Merdani Moschee. Proben aus allen Werksteinreihen wurden hinsichtlich Salzgehalt untersucht und die Ergebnisse mittels eines Vertikalprofils der Salzbelastung dargestellt (Abb. 21, linkes Diagramm). Das zugehörige Schadensprofil

resultiert aus der Ermittlung der Schadensindizes für jede Werksteinreihe (Abb. 21, rechtes Diagramm). Der Vergleich der beiden Vertikalprofile zeigt eine eindeutige Korrelation von Salzbelastung und Schadensausmaß. Die Zone stärkster Salzbelastung und höchsten Schadensausmaßes entspricht hierbei der Hauptaufstiegshöhe salzbefrachteter Feuchte. Die dargestellte Salzbelastungs- und Schadenssituation ist charakteristisch für die unteren Bereiche vieler islamischen Bauwerke im Zentrum Kairo.

7. Zusammenfassung

Aufgrund der großen Informationsvielfalt hat sich die von der Arbeitsgruppe „Natursteine und Verwitterung“ des Geologischen Instituts der RWTH Aachen entwickelte Bauwerkskartierung als ein zuverlässiges und aussagekräftiges Verfahren zur Diagnose verwitterungsbedingter Schäden an Natursteinbauwerken bewährt. Die Methode findet international eine breite Akzeptanz.



Schadensklassen

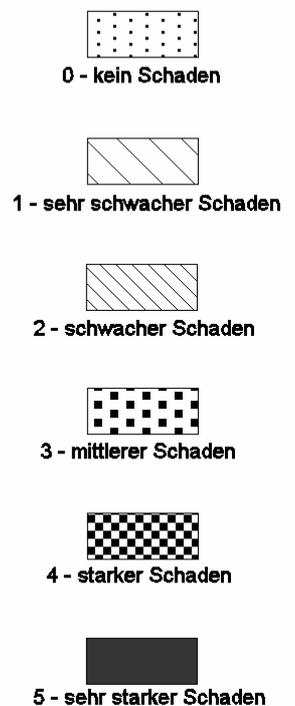


Abb. 20: Schadensklassenplan. El-Merdani Moschee, Kairo / Ägypten. Teilbereich der Südfassade.

Figure 20: Map of damage categories. El-Merdani Mosque, Cairo / Egypt. Part of the south façade.

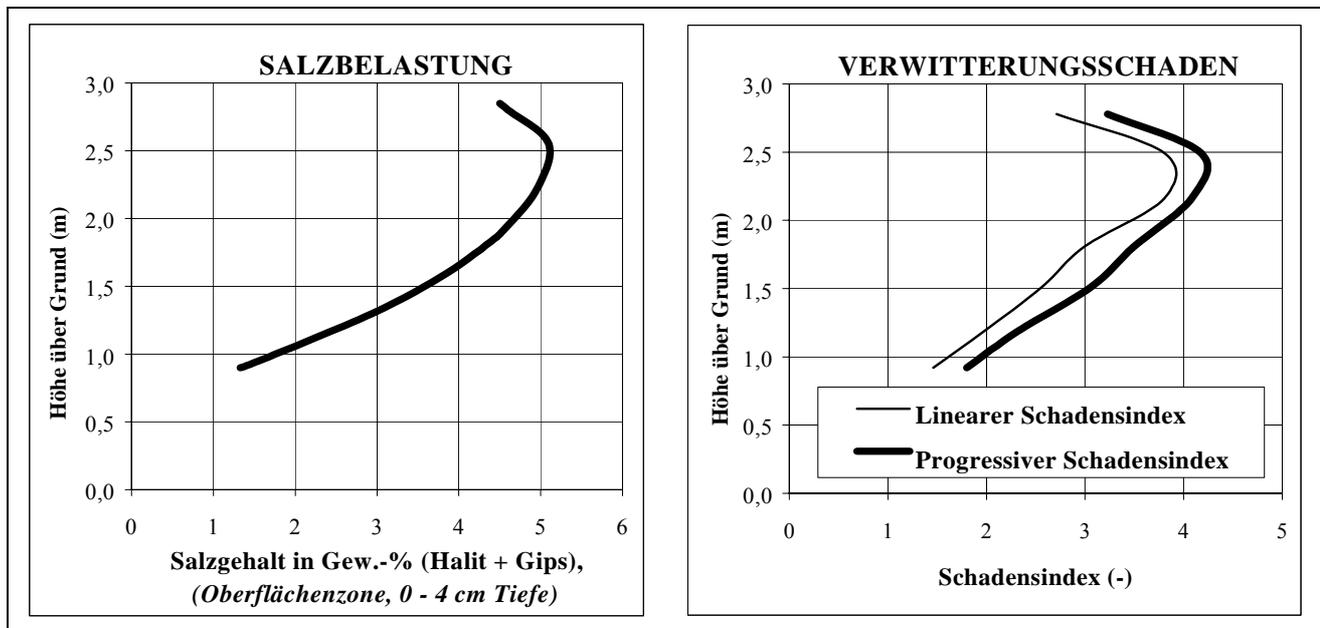


Abb. 21: Vertikalprofile von Salzbelastung und Verwitterungsschaden. El-Merdani Moschee, Kairo / Ägypten. Teilbereich der Südfassade.

Fig. 21: Vertical profiles of salt load and weathering damage. El-Merdani Mosque, Cairo / Egypt. Part of the south façade.

Die Bauwerkskartierung umfasst:

- die Registrierung der verwendeten Natursteine,
- die Plandarstellung und quantitative Auswertung der Natursteine,
- die Klassifizierung und Registrierung der auftretenden Verwitterungsformen,
- die Plandarstellung und quantitative Auswertung der Verwitterungsformen,
- eine begleitende Fotodokumentation von Untersuchungsbereichen, Natursteinen und Verwitterungsformen.

Die Bauwerkskartierung ermöglicht:

- eine umfassende Beschreibung des Verwitterungszustands von Natursteinbauwerken unter Berücksichtigung der verwendeten Gesteine und ihrer Expositionseigenschaften am Bauwerk,
- die Bewertung der Verwitterungsanfälligkeit der einzelnen Gesteine,
- Hinweise zur Zweckmäßigkeit von zusätzlichen messtechnischen Untersuchungen,
- Hinweise zur zielgerichteten und repräsentativen Probennahme für Laboruntersuchungen,
- eine wissenschaftlich fundierte Schadensbewertung,
- Hinweise auf Schadensursachen und Schadensprozesse,
- Informationen zum Verwitterungsfortschritt, Verwitterungsprognosen,
- Informationen zur Notwendigkeit und Dringlichkeit von Erhaltungsmaßnahmen,

- Empfehlungen denkmalgerechter Erhaltungsmaßnahmen,
- die Kostenkalkulation von Erhaltungsmaßnahmen,
- die Erfolgskontrolle von Erhaltungsmaßnahmen,
- die Langzeitbeobachtung eines Natursteinbauwerkes.

Die Ergebnisse der Bauwerkskartierung liefern einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Kenntnisse zur Natursteinverwitterung sowie zur Planung und Durchführung dauerhaft wirksamer und ökonomischer Erhaltungsmaßnahmen an Natursteinbauwerken.

8. Schriftenverzeichnis

Charta von Venedig – Internationale Charta über die Konservierung und Restaurierung von Denkmälern und Ensembles (Denkmalbereiche), Venedig, 1964. In: Denkmalschutz – Texte zum Denkmalschutz und zur Denkmalpflege, Schriftenreihe des Deutschen Nationalkomitees für Denkmalschutz, Band 52: 55-56, 1996.

Fitzner, B. (2002): Damage diagnosis on stone monuments – in situ investigation and laboratory studies. - Proceedings of the International Symposium of the Conservation of the Bangudae Petroglyph, 15.07.2002, Ulsan City / Korea: 29-71, Seoul (Stone Conservation Laboratory, Seoul National University).

- Fitzner, B. (2004): Documentation and evaluation of stone damage on monuments. - In Kwiatkowski, D. & Löfvendahl, R. (ed.): Proceedings of the 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, 27 June – 2 July 2004, Stockholm, Vol. II: 677-690; ICOMOS, Sweden.
- Fitzner, B. & Heinrichs, K. (2002): Damage diagnosis on stone monuments - weathering forms, damage categories and damage indices. - In Prikryl, R. & Viles, H. A. (ed.): Understanding and managing stone decay, Proceeding of the International Conference "Stone weathering and atmospheric pollution network (SWAPNET 2001)": 11-56; Charles University in Prague (The Karolinum Press).
- Fitzner, B. & Heinrichs, K. (2004): Photo atlas of weathering forms on stone monuments. - www.stone.rwth-aachen.de, Internet homepage der Arbeitsgruppe „Natursteine und Verwitterung“ des Geologischen Instituts der RWTH Aachen.
- Fitzner, B., Heinrichs, K. & Kownatzki, R. (1995): Verwitterungsformen - Klassifizierung und Kartierung. - Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung I: 41-88; Berlin (Verlag Ernst & Sohn).
- Fitzner, B., Heinrichs, K. & La Bouchardiere, D. (2002a): Damage index for stone monuments. - In Galan, E. & Zezza, F. (ed.): Protection and Conservation of the Cultural Heritage of the Mediterranean Cities, Proceedings of the 5th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Sevilla, Spain, 5-8 April 2000: 315-326; Lisse (Swets & Zeitlinger).
- Fitzner, B., Heinrichs, K. & La Bouchardiere, D. (2002b): Limestone weathering of historical monuments in Cairo, Egypt. - In Siegesmund, S., Weiss, T. & Vollbrecht, A. (ed.): Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies, Geological Society, London, Special Publication 205: 217-239, The Geological Society of London, United Kingdom.
- Fitzner, B., Heinrichs, K. & La Bouchardiere, D. (2003): Weathering damage on Pharaonic sandstone monuments in Luxor – Egypt. - Building and Environment, Vol. 38, Issues 9-10, Building stone decay: observations, experiments and modeling: 1089-1103; Elsevier Ltd..
- Heinrichs, K. & Fitzner, B. (2000): Deterioration of rock monuments in Petra/Jordan. - Proceedings of the 9th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone, 19-24 June 2000, Venice - Italy, Volume 2: 53-61; Amsterdam (Elsevier).
- Fitzner, B. & Kownatzki, R. (1997): Erfahrungen mit der Kartierung von Verwitterungsformen an Natursteinbauwerken. - In Leschnik, W. & Venzmer, H. (Hrsg.): Bauwerksdiagnostik und Qualitätsbewertung, WTA-Schriftenreihe, Heft 13: 157-172; Stuttgart (Fraunhofer IRB Verlag).
- KOWNATZKI, R. (1997): Verwitterungszustandserfassung von Natursteinbauwerken unter besonderer Berücksichtigung phänomenologischer Verfahren. - Dissertation RWTH Aachen, Aachener Geowissenschaftliche Beiträge, Band 22; Aachen (Verlag der Augustinus Buchhandlung).
- Kownatzki, R. & Fitzner, B. (1999): Verwitterungszustandserfassung an Natursteinbauwerken. - Z. dt. geol. Ges., 150/3: 543-564; Stuttgart (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- Vergès-Belmin, V., Anson Cartwright, T., Cassar, J., Charola, E., De Witte, E., Delgado-Rodriguez, J., Fassina, V., Fitzner, B., Fortier, L., Franzen, C., Garcia de Miguel, J.-M., Klingspor-Rotstein, M., Krumbein, W.E., Lefèvre, R.-A., Maxwell, I., Nishiura, T., Queisser, A., Pallot-Frossard, I., Snethlage, R., Tourneur, F., Vallet, J.-M., Van Hees, R., Varti-Matarangas, M., Warscheid, T. & Winterhalter, K. (2004): An internet-accessible multilingual illustrated glossary on stone deterioration. – Proceedings of the 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, 27 June – 2 July 2004, Stockholm, Vol. II: 699-706, ICOMOS, Sweden.

Manuskript eingegangen: 05.09.2004

Annahme zum Druck: 20.11.2004