

## Zusammenfassung

Die Monumente der Nabatäerstadt Petra im Südwesten Jordaniens zählen weltweit zu den bedeutendsten kulturhistorischen Denkmälern. Petra ist für die kulturelle Identität und die sozio-ökonomische Entwicklung Jordaniens von großer Bedeutung.

Insbesondere die vielen hundert Monumente im anstehenden Gestein zeugen von der einmaligen Architektur und Steinmetztechnik der Nabatäer. An diesen zweitausend Jahre alten Grabbauten und Kultstätten sind Verwitterungsschäden von erheblichem Ausmaß entstanden, so dass diese geschichtlichen und künstlerischen Zeugnisse zunehmend der Zerstörung anheim fallen.

Die Zunahme der Schäden und die daraus erwachsende Gefahr des Verlustes kulturellen Erbes haben in den letzten Jahrzehnten die Erhaltung der peträischen Monumente zu einem internationalen Anliegen werden lassen. Bauwerksgerechte und nachhaltige Schutzmaßnahmen erfordern nach Meinung der Denkmalverantwortlichen und Bausachverständigen eine gesicherte Material- und Schadensdiagnose. Aufgrund des Defizits an Diagnosebefunden war für die Felsbauten Petras die Konzipierung und Durchführung schadensbehebender und schadensvorbeugender Maßnahmen bisher nicht möglich.

Das wissenschaftliche Ziel dieser Arbeit war es, mit der Analyse von Gesteinsinventar / Gesteinseigenschaften und Verwitterungsschäden auf der Grundlage von systematischen Vorort- und Laboruntersuchungen den Kenntnisstand zum Verwitterungsgeschehen an den peträischen Felsmonumenten zu verbessern. Es wurden Untersuchungen zu Ursachen, Prozessen, Merkmalen und Progression der Verwitterung durchgeführt und eine Schadensbewertung vorgenommen. Hierdurch konnte eine von der Denkmalpflege geforderte Entscheidungsgrundlage für Maßnahmenkonzepte zum Schutz der Denkmäler Petras bereitgestellt werden.

Eine Grundlage der detaillierten schadensdiagnostischen Bearbeitungs- und Auswerteschritte war die Kenntnis aller an den Felsmonumenten auftretenden Lithotypen und ihrer petrographischen Eigenschaften. Bisher existierten weder eine differenzierte lithostratigraphische Einteilung der Gesteine noch eine Beschreibung der verwitterungsrelevanten Gesteinseigenschaften. Auf der Grundlage einer umfassenden Begehung der Felsmonumente Petras und der Bestandsaufnahme aller Gesteine wurde unter Berücksichtigung der vorhandenen Einteilung der stratigraphischen Großeinheiten in der Petra-Region eine differenzierte lithostratigraphische Einteilung der klastischen Sedimentgesteine (verschiedene Schluffsteine und Sandsteine) kambrischen und ordovizischen Alters (Umm Ishrin Sandstein Formation, Disi Sandstein Formation) erarbeitet. Diese umfasst fünfundzwanzig Lithotypen, hiervon sechzehn Hauptlithotypen und neun Sublithotypen (Farbvarietäten).

Umfangreiche Laboruntersuchungen ermöglichten die genaue Beschreibung aller Lithotypen hinsichtlich Mineralzusammensetzung, Struktur- und Textureigenschaften, Porositätseigenschaften, hygri-scher Eigenschaften und petrophysikalischer Eigenschaften. Die kombinierte Auswertung von Porositätsdaten aus verschiedenen Untersuchungsverfahren erlaubte erstmals die Ermittlung

realitätsnaher Porengrößenverteilungen für diese Gesteine. Es konnten charakteristische Unterschiede der Lithotypen bezüglich ihrer petrographischen Eigenschaften aufgezeigt werden.

Tendenziell nehmen von den Schluffsteinen über die sehr feinkörnigen Sandsteine und die feinkörnigen Sandsteine zu den mittelkörnigen Sandstein das Korn-Matrix-Verhältnis, die Gesamtporosität, die mittlere Porengröße, die mittlere Größe der Porenöffnungen, das Wasseraufnahme- und Wassereindringvermögen und die Geschwindigkeit / Vollständigkeit der Wasserabgabe zu, während die Anzahl der Kornkontakte, die Gefügeanisotropie, die Porenoberfläche, der Wasserdampfdiffusionswiderstand, die hygrische Dehnung sowie die Festigkeit / Härte abnehmen. Für die drei dominierenden Lithotypen wurden Kornvergrößerung und abnehmende Gefügefestigkeit vom stratigraphisch älteren zum jüngeren Gestein festgestellt.

Für einen zusammenfassenden Vergleich der Lithotypen wurde ein die petrographische Bandbreite der Lithotypen berücksichtigendes Bewertungsschema für alle verwitterungsrelevanten Gesteinskenngrößen entwickelt. Die fünfundzwanzig Lithotypen konnten nach Unterschieden bzw. Ähnlichkeiten ihrer Eigenschaften neun petrographischen Hauptklassen mit weiteren acht Unterklassen zugeordnet werden.

Der Verwitterungszustand wurde an Fassaden von zweiundzwanzig repräsentativen Felsengräbern (Gesamtuntersuchungsfläche ~ 4.000 m<sup>2</sup>) mit Hilfe der Bauwerkskartierung und ergänzender messtechnischer Untersuchungen erfasst. Die von der Arbeitsgruppe „Natursteine und Verwitterung“ am Geologischen Institut der RWTH Aachen entwickelte Methode der Bauwerkskartierung stellt ein bewährtes und international anerkanntes Verfahren dar, mit dem an Steinmonumenten Zustandsinformationen reproduzierbar, mit hoher Genauigkeit, flächendeckend und zerstörungsfrei aufgenommen werden können. Die ursprünglich für aus Werksteinen errichtete Bauwerke entwickelte Methode konnte in Petra erstmals für Bauwerke im anstehenden Gestein eingesetzt werden. Insgesamt wurden mehr als 50.000 Zustandsinformationen erfasst.

Mit Hilfe der Bauwerkskartierung wurden die an den Felsmonumenten auftretenden Lithotypen und ihre Verteilung sowie Art, Intensität und Verteilung aller Verwitterungsformen als die sichtbaren Ergebnisse der durch die Wechselwirkung zwischen Gestein und Verwitterungsfaktoren ausgelösten und gesteuerten Verwitterungsprozesse registriert und dokumentiert. Die Kartierung und die Bearbeitung, Darstellung und Auswertung der Kartierinformationen erfolgten mit Hilfe eines von der Arbeitsgruppe „Natursteine und Verwitterung“ entwickelten Standardklassifikationssystems der Verwitterungsformen und eines selbsterstellten Computerprogramms. Das Standardklassifikationssystem der Verwitterungsformen wurde für die Anwendung an den Felsmonumenten optimiert. Ein Fotoatlas der Verwitterungsformen begleitet das Klassifikationssystem.

Als Grundlage für eine lithotypspezifische Charakterisierung und Bewertung von Verwitterungszuständen wurde der Gesteinsbestand in den Untersuchungsbereichen kartographisch registriert. Die Verteilung der Lithotypen wird in übersichtlicher Weise in den lithologischen Karten dokumentiert. An den meisten Felsmonumenten Petras treten mehrere, oft sehr heterogen verteilte Lithotypen auf.

Für die Kartierung der Verwitterungsformen wurde die höchste Genauigkeitsebene des Klassifikationssystems genutzt. Es wurden ergänzend zur Art einer Verwitterungsform zusätzlich auch ihr Ausmaß mit Hilfe messbarer oder schätzbarer Intensitätsparameter erfasst. Für die übersichtliche Dokumentation der Verteilung der Verwitterungsformen wurden Karten der vier Gruppen der Verwitterungsformen „Gesteinsverlust“, „Gesteinsanlagerung“, „Gesteinsablösung“ und „Gesteinsrisse“ (einschließlich tektonisch bedingter Gesteinsklüfte) erstellt. Anhand der Karten und der quantitativen Auswertungen aller Verwitterungsformen und ergänzender Informationen zu Expositionseigenschaften konnte der Verwitterungszustand jedes Untersuchungsbereiches sehr genau beschrieben werden. Mit insgesamt 44 verschiedenen Einzelverwitterungsformen in jeweils unterschiedlichen Intensitätsstufen, vielen hundert Kombinationen von Verwitterungsformen und sehr heterogenen Verteilungen oder auffälligen Zonierungen von Verwitterungsformen verdeutlichen die Ergebnisse die große Vielfalt der Verwitterungszustände an den Felsmonumenten Petras.

Die kombinierte Auswertung von Informationen aus lithologischer Kartierung und Kartierung der Verwitterungsformen ermöglichte für jeden Lithotyp die Beschreibung seines charakteristischen Verwitterungsformenspektrums unter Berücksichtigung unterschiedlicher Verwitterungsphasen. Hierbei zeigte sich eine deutliche Korrelation der Verwitterungsformenspektren mit den petrographischen Klassen der Lithotypen.

Für die wissenschaftliche und praxisorientierte Bewertung der durch die Verwitterungsformen der Gruppen „Gesteinsverlust“, „Gesteinsanlagerung“ und „Gesteinsablösung“ an den Felsmonumenten erzeugten Schäden wurden Schadensklassen und Schadensindizes genutzt. Für die Bewertung der Gesteinsrisse und Gesteinsklüfte wurde ein gesondertes Bewertungsschema entwickelt. 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. In dieser Reihenfolge nehmen Notwendigkeit und Dringlichkeit von Schutzmaßnahmen zu.

Die Ermittlung der Schadensklassen erfolgte auf der Grundlage eines Korrelationsschemas „Verwitterungsformen – Schadensklassen“, das speziell für die Felsmonumente Petras unter Berücksichtigung von Art und Intensität der Verwitterungsformen sowie des hohen historischen und künstlerischen Wertes der Monumente entwickelt wurde. Mit diesem Korrelationsschema wurden alle Verwitterungsformen in Schadensklassen überführt.

Die für die Untersuchungsbereiche ermittelten Schadensklassen wurden in Karten dargestellt und quantitativ ausgewertet. Die Berechnung von Schadensindizes erfolgte aus der Flächenverteilung der Schadensklassen. Sie ermöglichen eine quantitative Gesamtbewertung aller Verwitterungsschäden. Mit Hilfe der Schadensklassen und Schadensindizes wurde für jeden Untersuchungsbereich das Ausmaß der Verwitterungsschäden bewertet. Hierbei wurden auffällige Schadenszonierungen als Folge unterschiedlicher Lithotypen oder Expositionsverhältnisse besonders herausgestellt. Anhand

der Karten der Schadensklassen können diejenigen Bereiche der Monumente lokalisiert werden, an denen Erhaltungsmaßnahmen vorrangig durchzuführen sind.

Für eine zusammenfassende Bewertung der Untersuchungsbereiche hinsichtlich des Schadensausmaßes wurden Rangfolgen der Untersuchungsbereiche nach Schadensindizes ermittelt. Sie zeigen eine große Bandbreite des Zustands der Felsengräber von recht gutem Erhaltungszustand bis zu sehr besorgniserregendem Schadenszustand. Die Rangfolgen korrelieren bei steigendem Schadensindex mit zunehmender Notwendigkeit und Dringlichkeit von Erhaltungsmaßnahmen.

Schadensindizes wurden auch getrennt für die einzelnen Lithotypen eines Untersuchungsbereiches ermittelt. Die lithotypbezogenen Schadensindizes wurden für die Bewertung der Verwitterungsanfälligkeit der Lithotypen mitgenutzt. Ferner verdeutlichen sie, dass Erhaltungsmaßnahmen den Lithotypen und ihren Schädigungsgraden individuell angepasst werden müssen.

Zur Bewertung der verwitterungsbedingten Gesteinsrisse und der tektonisch bedingten Gesteinsklüfte wurde ein riss- und kluffbezogener Schadensindex eingeführt. Anzahl, Länge und Öffnungsweite der Trennelemente und die Größe der Untersuchungsfläche wurden bei seiner Berechnung berücksichtigt. Dieser Schadensindex hat sich als ein aussagekräftiger Kennwert zur Bewertung der durch die Risse und Klüfte erzeugten Schäden erwiesen. Notwendigkeit und Dringlichkeit von Schutzmaßnahmen wie die Stabilitätssicherung und die Vorbeugung von Ausbrüchen können daraus abgeleitet werden.

Der riss und kluffbezogene Schadensindex und die für die Bewertung der Verwitterungsformen der Gruppen „Gesteinsverlust“, „Gesteinsanlagerung“ und „Gesteinsablösung“ genutzten Schadensindizes sind für die Bewertung des Gesamtschadenzustandes und die Ermittlung von Erhaltungsmaßnahmen immer gemeinsam zu berücksichtigen.

Bohrwiderstandsmessungen wurden zur Charakterisierung und Quantifizierung von Verwitterungsprofilen durchgeführt. Es wurden Tiefenprofile der Bohrhärte als Maß für den Festigkeitszustand des verwitterten Gesteins ermittelt. So konnten die häufigsten Formen der Gesteinsablösung mit Festigkeitstiefenprofilen korreliert werden unter Berücksichtigung lithotypabhängiger Unterschiede. Bezogen auf diese Formen der Gesteinsablösung konnte eine von den kompakteren, feinerkörnigen Sedimentgesteinen zu den gröberkörnigen Sedimentgesteinen zunehmende Tiefenreichweite der oberflächennahen Verwitterungszone aufgezeigt werden.

Ein wichtiger Teilaspekt der Schadensdiagnose waren die Beschreibung, Quantifizierung und Prognose der Verwitterungsprogression. Auf der Grundlage der Bauwerkskartierung wurden für die Felsmonumente Petras erstmals quantitative Informationen zum Verwitterungsfortschritt mit der

Möglichkeit von Verwitterungsprognosen erarbeitet. Da keine Informationen zu früheren Verwitterungszuständen der Felsmonumente Petras existieren, wurden hierzu neue Auswerteverfahren entwickelt, die eine Einschätzung des Verwitterungsfortschritts aus aktuellen Befunden zum Verwitterungszustand ermöglichen.

Die Ermittlung von Verwitterungsraten stellt das einfachste Verfahren zur Quantifizierung des Verwitterungsfortschritts dar. Die Berechnung durchschnittlicher Verwitterungsraten erfolgt unter der Berücksichtigung von Gesamtausmaß des eingetretenen Gesteinsverlustes und Alter des Bauwerks. Sie beschreiben die durchschnittliche Tiefe des Gesteinsverlustes als Funktion der Zeit.

Karten der Verwitterungsraten haben die große Bandbreite und heterogene Verteilung der Verwitterungsraten als Folge der verschiedenen Lithotypen und ihrer Expositionsverhältnisse aufgezeigt. Es wurden Verwitterungsraten bis zu 3,5 cm / 100 Jahre festgestellt. Verwitterungsraten wurden auch lithotypbezogen ermittelt. Unter Berücksichtigung vergleichbarer Expositionsverhältnisse der Gesteine am Bauwerk konnten diese Werte auch für eine vergleichende Bewertung der Verwitterungsanfälligkeit der Lithotypen genutzt werden.

Verwitterungsraten erlauben eine quantitative Prognose des Gesteinsverlustes für Einzelflächen eines Untersuchungsbereichs und für den gesamten Untersuchungsbereich. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass Verwitterungsraten einen linearen und damit nicht sehr realistischen Verwitterungsfortschritt beschreiben. Für eine realitätsnähere Beschreibung der Verwitterungsprogression wurden daher zusätzliche Auswerteschritte eingeführt.

Das räumliche Nebeneinander unterschiedlicher Verwitterungsformenspektren spiegelt auch ihre zeitliche Abfolge wider. Es konnten für die an den Felsengräbern dominierenden Lithotypen chronologische Sequenzen der Verwitterungsformen unter Berücksichtigung von Art, Intensität und Kombination von Verwitterungsformen abgeleitet werden. Diese Entwicklungsreihen der Verwitterungsformen stellten die Grundlage für eine Beschreibung des Verwitterungsfortschritts mittels Verwitterungsprogressionsfaktoren dar. Verwitterungsprogressionsfaktoren wurden für alle häufigen Formen der Gesteinsablösung bestimmt.

Ihre Berechnung erfolgte unter Berücksichtigung der Intensität der Gesteinsablösungsform sowie der die Dauer des Ablösungsprozesses anzeigenden Intensität der allochthonen Gesteinsanlagerungen auf den sich ablösenden Gesteinselementen. Hierbei korreliert eine hohe Intensität dieser Gesteinsanlagerungen mit einer langsamen und seltenen Gesteinsablösung, eine geringe Intensität hingegen mit schneller und häufiger Gesteinsablösung.

Die Verwitterungsprogressionsfaktoren ermöglichten erstmals die Berechnung von Verwitterungsprogressionskurven, die das Ausmaß des Gesteinsverlustes zeitabhängig quantifizieren. In der Frühphase der Verwitterung zeigt sich für die am häufigsten auftretenden Lithotypen eine geringe

Verwitterungsprogression, in späteren Phasen dagegen eine deutliche Beschleunigung des Verwitterungsfortschritts. Erst in fortgeschrittenen Verwitterungsstadien stellt sich ein annähernd gleichbleibender Verwitterungsfortschritt ein, der bei den gröberkörnigen Gesteinen höher ist als bei den feinerkörnigen Gesteinen.

Die Extrapolation der Verwitterungsprogressionskurven erlaubt Prognosen des Gesteinsverlustes. Diese können sowohl die Tiefe des Gesteinsverlustes als auch - unter Berücksichtigung von Dichtekennwerten und Untersuchungsfläche - das Volumen oder Gewicht des abwitternden Gesteinsmaterials beschreiben. Für stärker verwitterungsgeschädigte Monumente konnte eine Zunahme der durchschnittlichen Tiefe des Gesteinsverlustes um weitere 2 – 3 cm innerhalb der nächsten einhundert Jahre prognostiziert werden. Für einzelne Teilbereiche beträgt die Zunahme der Tiefe des Gesteinsverlustes sogar bis zu 8 cm. Diese Prognosen verdeutlichen die Notwendigkeit und Dringlichkeit von Erhaltungsmaßnahmen.

Die Informationen zu Verwitterungszustand, Schadensausmaß und Verwitterungsfortschritt erlaubten in Zusammenschau eine Bewertung der Verwitterungsanfälligkeit aller an den Felsmonumenten auftretenden Lithotypen.

Die kompakten und homogenen, sehr feinkörnigen Sandsteine sind im Vergleich zu den anderen Lithotypen besonders verwitterungsbeständig. In Richtung der gröberkörnigen Sandsteine steigt die Verwitterungsanfälligkeit mit zunehmender Korngröße, Porosität, Wasseraufnahme- und -eindringvermögen und mit abnehmender Festigkeit infolge geringeren Matrixgehaltes und schlechterer Kornbindung. Diese Sandsteine sind anfällig für schaligen, schuppigen oder körnigen Gesteinszerfall. Die durch starke Gefügeanisotropie gekennzeichneten sehr feinkörnigen Sandsteine und Schluffsteine sind ebenfalls verwitterungsanfällig. Schichtparalleles Aufspalten und bröckeliger Zerfall als Folge dieses Aufspaltens in Kombination mit einer engständiger Gesteinsklüftung sind charakteristisch.

Bisher wurde der Einfluss der Verwitterungsfaktoren und die Charakterisierung der Verwitterungsprozesse kontrovers diskutiert. Die Charakterisierung, Dokumentation und Bewertung der Verwitterungsschäden in Zusammenschau mit den Ergebnissen von ergänzenden mikroklimatischen Untersuchungen an den Felsengräbern und mineralogisch-geochemischen Laboruntersuchungen haben eine zuverlässige Einschätzung der Hauptverwitterungsfaktoren und -prozesse ermöglicht.

An vielen Felsengräbern wurde eine hohe Temperaturbelastung festgestellt. Die Gegenüberstellung von temperaturbelastungsanzeigenden Kennwerten und der das Schadensausmaß charakterisierenden Größen (Schadensklassen, Schadensindizes) hat aber gezeigt, dass die Temperatur als Verwitterungsfaktor und die Temperaturverwitterung als Prozess nicht vorrangig – wie

in Arbeiten anderer Autoren oftmals postuliert – die Verwitterungsschäden an den Felsmonumenten verursachen.

Anhand der vorliegenden Untersuchungsergebnisse muss den Faktoren Wasser / Feuchte und Salz ein entscheidender Einfluss auf das Verwitterungsgeschehen an den Felsengräbern beigemessen werden. Überschwemmungen und der Abfluss von Niederschlägen über die Grabfassaden verdeutlichen in Zusammenschau mit den Schäden die mechanische Verwitterungswirksamkeit des Regenwassers. Unterschiedliche Feuchtebelastungen an den Grabfassaden erzeugen typische Verwitterungsformenmuster und korrelieren mit Schadensausmaßen. Für die Schluffsteine und die sehr feinkörnigen Sandsteine stellt die hygrische Zerstörung – Gefügeveränderungen und Gesteinszerfall durch Spannungen im Gestein infolge zyklischer Feuchteänderungen – einen wichtigen Verwitterungsprozess dar.

Die Salzverwitterung hat sich nachweislich als Hauptschädigungsprozess herausgestellt. Art, Menge, Verteilung und Kristallisationszyklen der Salze steuern die Art und Intensität der Gesteinsablösung. Geochemische Untersuchungen an Niederschlagsproben haben ergeben, dass ein großer Anteil der Salze über die Niederschläge in das Gestein eingebracht wird. Wind ist an der Abtragung gelockerten Gesteinsmaterials beteiligt.

Die Gesetzmäßigkeiten der Schadensentwicklungen an den Felsmonumenten in Petra konnten erstmals in statistisch zuverlässiger Weise unter Berücksichtigung der Wechselbeziehungen von Gesteinstypen / Gesteinseigenschaften, natürlichen und anthropogenen Verwitterungsfaktoren, bauwerksspezifischen Einflussgrößen, Verwitterungsprozessen, Verwitterungszustand / Schadenszustand und Verwitterungsprogression beschrieben und erklärt werden. Auf der Grundlage der Ergebnisse können Erhaltungsmaßnahmen für die Felsmonumente gezielt diskutiert werden.

Dies betrifft Sicherungsmaßnahmen, Maßnahmen zur Minderung der Schadensursachen, Maßnahmen zur Behebung eingetretener Schäden und Präventivmaßnahmen gleichermaßen. Die Ergebnisse liefern Hinweise auf Notwendigkeit und Dringlichkeit sowie auf Art und Einsatzlokalität von Erhaltungsmaßnahmen. Sicherung ausbruchgefährdeter Gesteinspartien, Fixierung sich ablösender Gesteinselemente, konstruktive Maßnahmen, Ausbesserung von Fehlstellen, Verfüllung von Rissen / Klüften, Reaktivierung / Neueinrichtung von Wasserablaufanlagen, Kontrolle aufsteigender Feuchte, Entsalzung, Reinigung und Oberflächenschutz stellen wichtige Maßnahmengruppen dar. Die Durchführbarkeit und die Erfolgsaussichten dieser Maßnahmen sollten vorab im Rahmen von Pilotanwendungen sorgfältig überprüft werden.

In der vorliegenden Arbeit wird ein in Forschung und Denkmalpflege anwendbares konsequentes Konzept zur Schadensdiagnose an Steinmonumenten vorgestellt. Die vielfältigen Auswertungsmöglichkeiten erlauben eine optimale Planung, Durchführung und Kontrolle von Erhaltungs-

maßnahmen an Steinbauten. Ebenso kann mit diesem Diagnosekonzept die allseits geforderte Langzeitbeobachtung von historischen Natursteinbauten sachgerecht durchgeführt werden.