

Peter Kozub

Ultraschallmessungen an der Königinenstatue aus Tell Basta – tomographische Aufnahme in Anbindung an das 3D Model

Einführung

Der Granit galt immer als Baumaterial „für die Ewigkeit“ und spielte gerade wegen seiner Dauerhaftigkeit schon im alten Ägypten für Baukunst und Skulptur eine wichtige Rolle. Viele kulturhistorisch bedeutende Baudenkmäler wurden aus dem besonders schönen ägyptischen Granit, dem Rosengranit von Assuan errichtet. Dieses Gestein wird im Allgemeinen für ein sehr witterungsbeständiges, große Zeiträume überdauerndes Material gehalten. Der zunehmende Verfall von Kunstwerken aus Rosengranit zeigt aber die verdeckten Gefahren. Die Überlagerung verschiedener Schadenseinflüsse, die im Zusammenwirken anfangs verhältnismäßig langsam einen schädigenden Prozess in Gang setzen, beschleunigen sich mit zunehmender Zerstörung¹.

Von der Königinenstatue aus Rosengranit (Abb. 1) wurden bis jetzt vier Fragmente gefunden. Ein Teil des Oberkörpers und ein Fragment der Beine bilden die beiden größten Teilstücke. Die Datierung der Statue ist problematisch. Viele Indizien sprechen dafür, dass die erhaltene Rückenpfeilerinschrift bei der Statue sekundär ist. Die bekannte, nahezu in Größe und Gestaltung identische Statue der Meritamun in Achmim deutet auf die Zuweisung in die Zeit Ramses II. Die ursprünglich höchstwahrscheinlich in der ramessidischen Hauptstadt Per-Ramses gestandene Statue aus Tell Basta wurde dann von Osorkon II usurpiert und der Königin Karama B gewidmet².

In Anbetracht der Brisanz dieses Objektes ist die Ermittlung des Zustandes von größter Bedeutung. Die genaue Kenntnis der Gesteinseigenschaften und des Verwitterungszustandes ist Grundvoraussetzung für eine erfolgsversprechende Konservierungs- oder Restaurierungsmaßnahme. Da die Untersuchungen direkt an dem Objekt durchgeführt werden müssen, erfordern sie eine zerstörungsfreie Untersuchungsmethodik. Im Fall von einem so bedeutsamen Kunstwerk kommen

¹ Königinenstatue kurz nach der Entdeckung mit aufgeklebten Messpunkten



einzig solche Untersuchungsmethoden in Frage. Während der 17. Grabungskampagne in Tell Basta zwischen dem 27. Februar und 5. März 2004 wurden an der Königinenstatue Ultraschallmessungen vorgenommen mit dem Ziel den Verwitterungsgrad dieses Objektes zu ermitteln. Die ersten Ergebnisse dieser Untersuchung werden hier vorgestellt³.

Ultraschallmessungen in der Steinkonservierung

Die Ultraschallprüfverfahren werden schon seit längerem zur Untersuchung von Natursteinen eingesetzt. In der Ultraschall-Messtechnik macht man sich die Ausbreitung mikromechanische Schwingungen nutzbar. Die Messfrequenzen der Wellen beginnen oberhalb des hörbaren Schallbereiches bei 20 kHz und sind bei Natursteinen bis etwa 1 MHz für Untersuchungen verwendbar.

Das einfachste Ultraschallprüfverfahren ist die Ultraschallgeschwindigkeitsmessung, die sich aus der Zeit, die der Schall zur Durchquerung einer definierten Messstrecke benötigt, errechnet. Dabei ist die Durchschallungs- oder Transmissionsmessung die am häufigsten angewandte Prüftechnik und dient der Ermittlung von der Longitudinalwellengeschwindigkeit v_l .

$$v_l = s/t_l$$

v_l – Geschwindigkeit der Longitudinalwelle (P-Welle) [m/s]

s – Messstrecke [mm]

t_l – Ultraschalllaufzeit [μ s]

Bei diesem Verfahren werden Geber und Aufnehmer auf zwei gegenüberliegenden Flächen des Untersuchungsobjektes angebracht.

Bei der konventionellen Ultraschallmessung durchquert die P-Welle auf ihrem Weg durch den zu messenden Gesteinskörper sowohl die verwitterten Schichten als auch Bereiche vom unverwitterten Material. Demzufolge ist das Ergebnis eine durchschnittliche Geschwindigkeit aller dieser Bereiche. Somit ist die Detektierung von Strukturinhomogenitäten wie z.B. Risse, Klüfte, Hohlstellen mit dieser Methode nicht möglich.

Tomographische Aufnahme

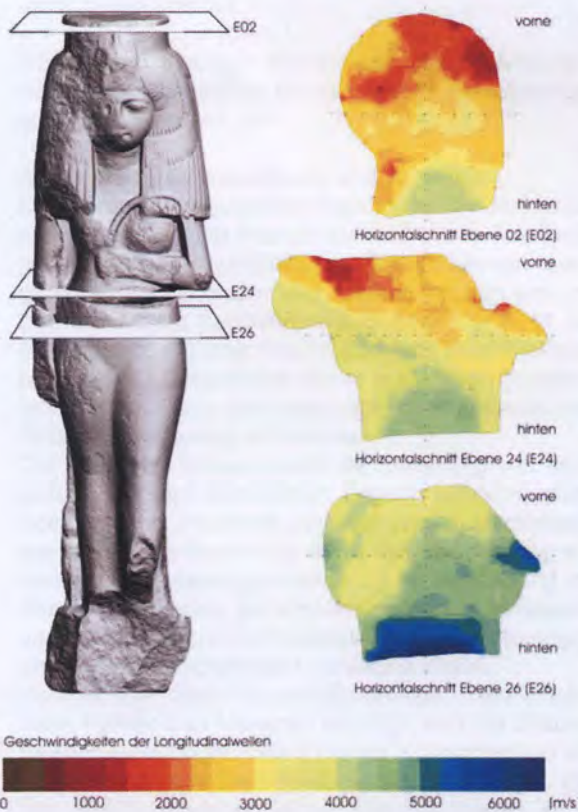
Eine deutlich differenzierte Aussage gelingt durch viele Messungen in einer Ebene und einer tomographische Analyse der Querschnittsebenen.

Grundlage der Ultraschall-Tomographie ist die Abhängigkeit der Longitudinalwellengeschwindigkeit vom

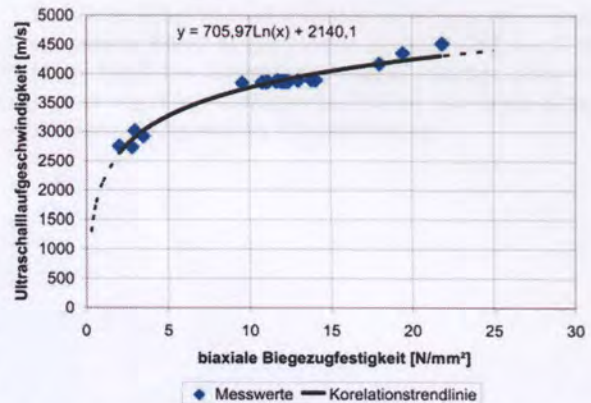
Verwitterungszustand des Granits, d.h. vom Grad der Kohäsion der einzelnen Mineralkomponenten im Kornverband. Durch die Veränderung von Sender- und Empfängerposition in Etappen lässt sich eine dichte Überdeckung des Querschnitts mit Laufzeiten realisieren. Die so gewonnenen Messdaten erlauben dann für ausgewählte Messraster die lokalen Geschwindigkeitsdivergenzen einzeln auszuwerten. Als Ergebnis dieses Verfahrens entstehen flächenhafte Schnitte durch den Stein, welche zunächst eine zweidimensionale Geschwindigkeitsverteilung zeigen. Damit lassen sich bereits gefährdete Bereiche im Stein recht gut erkennen. Aus der Verbindung aller Ebenen erhält man ein dreidimensionales Bild der Ultraschallgeschwindigkeiten in der ganzen Struktur.

Der erhebliche Aufwand an Messzeit, die nötige digitale Messtechnik sowie die beschränkte Verfügbarkeit entsprechender Auswertungssoftware sind die Hauptgründe für den begrenzten Umfang dieses Messkonzeptes.⁴

Zusätzlich wurden diese Versuche in der Vergangenheit lediglich an Objekten mit exakt geometrischen Formen durchgeführt, vor allem an Säulen und kugelförmigen Probestücken.⁵ Die tomographische Ultraschallmessung an Objekten mit komplexeren Formen war bis jetzt nicht möglich.



2 Ultraschalltomographiebilder der drei Ebenen der Königininnenstatue.



3 Korrelation zwischen der biaxialen Biegezugfestigkeit und der Ultraschalllaufgeschwindigkeit.

Im Folgenden soll dieses Messverfahren an dem Beispiel der Königininnenstatue aus Tell Basta vorgestellt werden.

Die Messmethode

Die Horizontalschnitte an der Statue wurden in den Abständen von 15 cm angelegt. Der erste Schnitt liegt im Abstand von 7,5 cm von der oberen Kante bei der Körbchenkrone. Der obere Teil, bis zur Bruchkante, wurde in 25 Ebenen unterteilt, der untere Teil in 36 Ebenen.

Pro Ebene wurden im oberen Teil der Statue 9 Messpunkte markiert. Daraus ergeben sich also 36 Messstrecken pro Ebene. Im unteren Teil wurden 8 Messpunkte pro Ebene festgehalten, woraus 28 Messstrecken pro Ebene resultieren. Insgesamt wurden an beiden Teilen 1908 Messungen vorgenommen.

Die Messungen der Ultraschallgeschwindigkeit wurden mit Hilfe der Einrichtung ScopeMeter PM 99/PM 192 mit dem Ultraschallgenerator USG30 und Vorverstärker VV42 durchgeführt. Das Gerät wurde mit dem Geber UNG 46, der in der Messungsfrequenz 46 kHz arbeitet und dem Empfänger SW 20 ausgestattet. Die Ultraschalllaufgeschwindigkeit wurde mittels Computerprogramm Light House 2000-SM ausgewertet⁶.

Die aus den Messungen erhaltenen Zeiten wurden mit den aus dem in Streiflichtscan-Verfahren erfassten 3D-Modell⁷ ausgerechneten Messstrecken in Verbindung gesetzt und die Wellengeschwindigkeiten berechnet. Jede Horizontalfläche, mit dem Umriss aus dem 3D-Modell, wurde dann auf gleichgroße Quadrate mit einem Rand von ca. 8 cm unterteilt. Somit ergaben sich Flächen mit durchschnittlich 300 Quadraten. Diese bilden ein Messraster mit durchschalten Bereichen. Aus den Bereichüberlagerungen wurden dann für die einzelnen Quadrate die lokalen Geschwindigkeiten ausgewertet und in einem Flächendiagramm dargestellt (Abb. 2).

Korrelation der Ultraschalllaufgeschwindigkeit und der biaxialen Biegezugfestigkeit

Da die Laufgeschwindigkeit longitudinaler Wellen durch die Anzahl und Qualität der Kornkontakte von Gesteinen beeinflusst wird, kann man anhand der Laufzeit Rückschlüsse auf die Ausweitung der Korn-Abschnitte und somit der Verwitterung ziehen. Dadurch hat man ein einfaches Maß zur Beurteilung des allgemeinen Gesteinzustandes.

Die oben erwähnte Beziehung bringt in der Konsequenz eine andere mit sich. Die im Labor gemessenen Ultraschalllaufgeschwindigkeits- und biaxiale Biegezugfestigkeitswerte von Rosengranit korrelieren sehr gut miteinander, wie man es aus dem Diagramm ersehen kann (Abb. 3).

Die erkannte Korrelation entwickelt sich eindeutig nicht linear, sondern logarithmisch. Der Anfang der Kurve liegt im Bereich wo die biaxiale Biegezugfestigkeit beim Rosengranit aus technischen Problemen bei der Probenherstellung (starke Belastung beim Bohren und Sägen) nicht mehr messbar ist. Im weiteren Teil steigen die Ultraschalllaufgeschwindigkeiten relativ rasch im Vergleich zu den Festigkeitswerten an. Die meisten gemessenen Proben liegen im Bereich, wo die Kurve abgeschwächt ist. Die Werte der Proben vom „gesunden“ Granit am Ende der Kurve liegen im Bereich, wo die Kurve fast flach verläuft.

Die empirisch ermittelte logarithmische Tendenzlinie verläuft laut Formel:

$$y = 705,97 \ln(x) + 2140,1$$

Somit kann aus den Werten der Ultraschalllaufgeschwindigkeiten auf die biaxiale Biegezugfestigkeit geschlossen werden⁸

Abschließende Bewertung und Ausblick

Die ersten hier vorgestellten Ergebnisse der Ultraschallmessungen an der Königinnenstatue aus Tell Basta lassen eine positive Bilanz zu. Die erhaltenen tomographischen Bilder der drei Ebenen decken sich mit den am Objekt beobachteten Schäden (z.B. in der Ebene 02 detektierter Riss ist auch von außen erkennbar). Auf der Basis dieser Werte in mehreren Horizontalschnitten kann man eine sichere Transport- und Aufstellungsplanung vornehmen.

Die Methode, insbesondere die Erstellung von computertomographieähnlichen Ergebnisbildern, muss noch in ihrer Handhabung maßgeblich vereinfacht werden. Das erfordert vor allem die Ausarbeitung von neuen Computerprogrammen die in Verbindung mit den Möglichkeiten der dreidimensionalen Erfassung von Kunstobjekten die Aussagefähigkeit der tomographischen Ultraschallbilder vervollständigen.

Obwohl aber diese Diagnostikmethode einen erheblichen Aufwand an Messzeit benötigt, sind die dadurch gewonnenen Erkenntnisse bei der Konservierung von Kunstwerken aus Stein von unschätzbarem Wert. Neben der Zustandsbeurteilung von Denkmalen ist es heute möglich auch die Wirksamkeit von Konservierungsmaßnahmen zu messen.

Bei vielen Objekten wäre dieser (wohl gesagt) „zerstörungsfreie Blick“ in die innere Struktur und somit die Möglichkeit der Beurteilung des Zustandes nicht nur in den oberflächennahen Bereichen der erste Schritt zu einer erfolgreichen Konservierung.

Anmerkungen

- 1 P. Kozub: Restauratorische Untersuchungen zur Bestandsaufnahme und Schadensbeschreibung sowie Schadensursachenforschung am antiken Rosengranit von Assuan, in: *Rekonstruktion und Restaurierung in Tell Basta*, Hrsg. Ch. Tietze, ARCUS, Berichte aus Archäologie, Baugeschichte und Nachbargebieten, 6/2003, Potsdam 2003, S. 174-204
- 2 M. Müller: Zur Ikonographie und Typologie einer Königinnenstatue, in: *Rekonstruktion und Restaurierung in Tell Basta*, Hrsg. Ch. Tietze, ARCUS, Berichte aus Archäologie, Baugeschichte und Nachbargebieten, 6/2003, Potsdam 2003, S. 101-112
- 3 Hiermit bedanke ich mich bei Herrn Dr. Chr. Tietze von der Universität Potsdam für die Ermöglichung der Teilnahme an diesem Projekt.
- 4 S. Siegesmund, T. Weiss, J. Ruedlich: Schadensmonitoring mit Ultraschallagnostik, Beispiel Marmorpalais in Potsdam, in: *Restauro*, Heft 2, 2004, S. 98-105; U. Meinhardt: Standardsicherheit – Instandsetzungsorientierte und zerstörungsfreie Prüfung, in: *Bautenschutz und Bausanierung* 2/1996; F. Sheremeti-Kabashi: Untersuchungen der Gefügeanisotropie von Carrara-Marmor und deren Einfluss auf die Verwitterung, Dissertation an der Fakultät für Geowissenschaften der Ludwig-Maximilians-Universität München, München, April 2002; S. Simon: Zur Verwitterung und Konservierung kristallinen Marmors, Dissertation an der Fakultät für Chemie und Pharmazie der Ludwig-Maximilians-Universität München, München 2001
- 5 ebenda
- 6 Vielen Dank an dieser Stelle an Herrn R. Krompholz von der Firma Geotron-Elektronik für die Bereitstellung der Prüfköpfe und der guten Ratschläge. Die technischen Informationen wurden aus den folgenden Literaturquellen entnommen: R. Krompholz: *Ultraschall-Messtechnik für Natursteine*, Informationsmaterialien der Firma Geotron-Elektronik, Pirna OT Neundorf 1999; Geotron, *Ultraschall-Messtechnik, Prüfung von Beton und Naturstein*, Handbuch, Geotron-Elektronik, Pirna OT Neundorf 2002
- 7 Hiermit bedanke ich mich bei den Herrn Dr. R. König und T. Bauer aus dem Ingenieurbüro Dr. König aus Potsdam für die Berechnung der Messstreckenenfernungen und Bereitstellung von Querschnittsbildern.
- 8 Weitere Ergebnisse der Rosengranituntersuchungen in: P. Kozub: Einsatz von wasseremulgierbaren Epoxidharzen für die Restaurierung des Rosengranits von Assuan am Beispiel der Säulenkolonnade von Tell Basta, Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin 2005