

Herausforderungen bei der zerstörungsfreien Untersuchung mittels Ultraschall von Gesteinsblöcken im Bereich des Kulturerbes

Benedikt MAIER¹, Amr G. HAMZA², Alejandro RAMIREZ-PINERO¹,
Jochen KOLLOFRATH¹, Khaled TAIE³, Olga POPOVYCH¹,
Thomas SCHUMACHER⁴, Mohamed ELKARMOTY², Hany HELAL²,
Christian U. GROSSE¹

¹ Technische Universität München, Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, München

² Department of Mining, Petroleum, and Metallurgical Engineering, Faculty of
Engineering, Cairo University, Giza, Egypt

³ Rock Engineering Laboratory, Faculty of Engineering, Cairo University, Giza, Egypt

⁴ Civil and Environmental Engineering, Portland State University, Portland, USA

Kontakt E-Mail: grosse@tum.de

Kurzfassung. Im Hinblick auf die Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen sind die meisten Verfahren und Sensoren optimiert für Untersuchungen von Stahl- oder Spannbetonbauteile. Das ist durchaus gerechtfertigt, da der Großteil der Bauwerke im Ingenieur-, Hoch- und Tiefbau aus diesen Materialien aufgebaut sind.

Bei Untersuchungen an Bestandsbauwerken des Denkmalschutzes bzw. generell an historischer Bausubstanz müssen diese Techniken meist für Mauerwerk und Gesteinsblöcke adaptiert werden. Zwar trifft man dabei auch häufig auf Kompositbauweisen beispielsweise aus Stein mit Holz, jedoch sollen in diesem Beitrag ausschließlich Herausforderungen diskutiert werden, die bei der Untersuchung von Gesteinsbauwerken (Mauerwerk mit Blockfugen) auftreten. Dabei werden Fragestellungen diskutiert wie die Bestimmung der Geometrie und der Gesteinsblockdicke sowie der Beschaffenheit von Fugen. Besonders häufig sollen zerstörungsfreie Prüfverfahren prüfen, ob Risse oder Fehlstellen in den Gesteinsblöcken vorhanden sind und ob Degradationsprozesse aktiv sind. Der Vortrag konzentriert sich dabei auf das Ultraschallverfahren und beschreibt die Herausforderungen am Beispiel von Mauerwerk mittelalterlicher Burgen in Deutschland sowie der Pyramiden von Giseh in Ägypten.

Einführung

Zu den zerstörungsfreien Prüfverfahren auf Basis von elastischen oder elektro-magnetischen Wellen zählen hinsichtlich der Inspektion von Bauwerken und Bauteilen u. a. die Ultraschalltechnik, Radar bzw. Bodenradar sowie Impakt-Echo. Diese Verfahren (und natürlich viele weitere) gelten als etabliert und es existieren beispielsweise aktuelle Merkblätter der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. zu deren Anwendung. Zu den Standardanwendungen im Bereich von Ingenieurbauwerken und



Tragkonstruktionen zählen in der Regel Untersuchungen von Stahlbeton- oder Spannbetonbauteilen während im Hochbau gelegentlich auch Mauerwerk und Holz zu untersuchen ist. Natursteinblöcke sind ein eher seltenes Untersuchungsobjekt und vor allem im Bereich des Denkmalschutzes oder der Erhaltung von steinernen Kunstobjekten ein Gegenstand für die Anwendung von ZfP-Techniken. Anwendungsbeispiele werden zwar zahlreich in der Literatur beschrieben (z. B. [1][2][3]), aber im Vergleich zu den o. g. ZfP-Anwendungen im Ingenieur- und Hochbau an Betonbauteilen zählen sie nicht zu den Standardanwendungen. Dabei ist wie üblich im Bauwesen die Seriengröße der Bauteile und Untersuchungsobjekte eins. Allerdings sind diese Objekte bzw. Bauwerke Unikate mit einer unbekannt und komplexen Degradationsgeschichte. Baupläne liegen meist nicht vor und Konstruktionsdetails sind unbekannt. Abhängig von den Baumaterialien und den Abmessungen sowie den Randbedingungen des Untersuchungsobjektes sind deswegen spezielle Hard- und Software-techniken anzuwenden. Erschwerend kommt hinzu, dass bei denkmalgeschützten Objekten selbst eine minimale Schädigung durch die Untersuchungen vermieden werden muss. Die Ausgestaltung von zerstörungsfreien Messungen ist entsprechend zu konzeptionieren und sorgfältig zu planen. Der vorliegende Artikel beschreibt einige Herausforderungen für Ultraschalluntersuchungen an Bauteilen aus Naturstein (vor allem Kalkstein), die in Form von besonders mächtigen und unregelmäßig geformten Blöcken bestehen, die mehrere Hundert oder Tausend Jahre der Witterung ausgesetzt waren.

1. Auswahl der Technik

1.1 Kontext der Geräte- und Verfahrensauswahl

Grundsätzlich kommt für die Untersuchung von historischen Bauwerken eine Vielzahl von Verfahren in Frage [4]. Die Auswahl der ZfP-Verfahren muss immer vor dem Hintergrund des Messziels erfolgen. Oft kommen dazu noch Randbedingungen, die die in Frage kommenden Verfahren und Messgeräte weiter einschränken. Wie geschildert liegen bei historischen Bauwerken meist weder Informationen über Konstruktionsdetails noch zu den verwendeten Baumaterialien vor. Die Gewinnung von Informationen dazu stellt meist ein Untersuchungsziel dar. Die hier beschriebenen Anwendungen hatten explizit das Ziel, nähere Informationen über die Konstruktionsweise und die Ausführung der Bauwerke sowie zu den verwendeten Baumaterialien zu sammeln. ZfP-Verfahren können zudem Hinweise auf Schädigungen, Hohlräume und Degradationsprozesse liefern und auch dies waren in den unten beschriebenen Fällen Ziele des messtechnischen Einsatzes. Eine besondere Rolle spielt dabei, dass die Blöcke aus Naturstein eine unterschiedliche Größe besitzen. Bemerkenswert ist, dass Kalkstein- und Granitblöcke in den Pyramiden auf dem Giseh-Plateau meist eine Tiefe von 80 cm besitzen und oft auch deutlich mehr (Abb. 1). Da die seitlichen Abmaße in einer ähnlichen Größenordnung liegen, erschwert dies u. a. den Einsatz kommerzieller Ultraschallgeräte hinsichtlich der Erforschung der wahren Dicke bzw. dahinterliegender Strukturen, da diese Systeme in der Regel für weniger dicke Bauteile optimiert sind und im Vergleich zu seismischen Messgeräten keine große Eindringtiefe besitzen. Die Blockstruktur kann überdies zu Seitenreflexionen führen, die wiederum die Auswertung von Reflexionen aus größerer Tiefe erschweren können.

In Fällen, in denen wenig bis gar keine Informationen über das Untersuchungsobjekt vorliegen, ist eine Kombination von ZfP-Techniken zu empfehlen. Diese Kombination sollte auch die numerische Simulation der Wellenausbreitung beinhalten – siehe unten. Die übergeordnete Fragestellung für die Anwendungen in diesem Kontext war die Mitarbeit im ScanPyramids-Projekt [5] und die Untersuchung des Aufbaus der Pyramiden von Giseh [6].



Abb. 1. Beispiel für die Kalksteinblockstruktur der Pyramiden von Giseh.

1.2 Ultraschallmesstechnik

Die verwendete Ultraschalltechnik bestand ausnahmslos aus Sender-Empfänger-Systemen auf Basis des piezoelektrischen Effekts, wobei aufgrund verschiedener Überlegungen ausschließlich kommerzielle Messsysteme verwendet wurden. Aufgrund mehrerer Experimente an Steinstrukturen wurden zudem Ultraschall-Arraygeräte gewählt. Dies beschränkt den Frequenzbereich und auch die Eindringtiefe leider deutlich. Mit den meisten kommerziellen Messsystemen sind Eindringtiefen von bis zu einem Meter bei einer Frequenz von mehr als 20 kHz realisierbar. Von den Herstellerfirmen wird angegeben, dass Eindringtiefen von bis zu 1,5 oder gar 1,8 m möglich sind, jedoch nur unter besonders günstigen Bedingungen. Seismische Messsysteme wie Geophone sind typischerweise auf Frequenzen unterhalb 1 kHz ausgelegt [7]. Im Frequenzbereich zwischen diesen und piezoelektrischen Sensoren gibt es (vermutlich) keine Messsysteme, die den o.g. Kriterien entsprechen. Dazu kommt, dass seismische Systeme in der Regel eine seismische Quelle (Hammerschlag, Vibroseis-Quelle oder Explosion) benötigen, welche wegen des besonderen Schutzes des kulturellen Erbes in der Regel nicht verwendet werden kann. Im Vergleich zu Ultraschallmessgeräten der früheren Generation können zudem moderne Geräte auch für die Untersuchung großer Flächen eingesetzt werden, ohne dass ein Koppelmittel verwendet werden muss. Federnd-gelagerte Punktkontaktprüfköpfe sowie die Möglichkeit der automatischen Positionsbestimmung entlang eines Messprofils erleichtern dabei die Messung enorm (Abb. 2). Zwar sind Messfortschritt bzw. Messgeschwindigkeit keineswegs mit kontaktfrei messenden Systemen wie Radar vergleichbar, doch können mit vertretbarem Aufwand Untersuchungen von topografisch schwierigen Objekten in der Größenordnung von mehreren Quadratmetern pro Tag durchgeführt werden.

Hinsichtlich der Geräteauswahl ist zudem zu erwähnen, dass vor den Messeinsätzen bereits die Anwendung von Fusionsalgorithmen erwogen wurde, da der Einsatz von Ultraschall zur Unterstützung der Radarmessungen vorgesehen war. Eine solche Fusion kann erfahrungsgemäß einfacher durchgeführt werden, wenn Geräte desselben Herstellers Verwendung finden. Hinweise zur verwendeten Hardware enthält der Artikel von Elkarmoty et al. [8].



Abb. 2. Ultraschallmessungen an einem Kalksteinquader auf dem Giseh-Plateau.

Hinsichtlich der Datenanalyse wurde für die Nachbearbeitung der Daten u.a. die Software *Vision* der Firma Screening Eagle verwendet. Diese Software basiert auf dem an der Universität Kassel entwickelten Programm *interSAFT* [9]. Sie bietet viele Optionen hinsichtlich der Filterung, Stapelung und Nachbereitung der Daten und ist für die in folgenden dargestellten Anwendungen ein essentielles Werkzeug gewesen. Da, wie oben beschrieben, der Anwendungsfall von Messungen an großen und verfugten Gesteinsblöcken viele Randbedingungen aufweist, die für Standardanwendungen im Bauwesen untypisch sind, ist die Verwendung einer flexibel anwendbaren Auswertesoftware von entscheidender Bedeutung. Außerdem wurden neben kommerziell erhältlichen Algorithmen die auf der Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT) basieren auch Extended Total Focusing Methods (XTFM [10]) angewendet und diese spezifisch für simulierte Ultraschalldaten.

1.3 Einschränkungen und Modifikation der Ultraschalltechnik sowie Desiderata

Die Bedingungen für Ultraschallmessungen an Bauwerken des kulturellen Erbes sind herausfordernd. Ein Teil der unten beschriebenen Messungen musste von einem Gerüst aus ausgeführt werden. Einerseits musste der Gerüstabstand groß genug sein, um auch Messungen im Podestbereich am Bauwerk zuzulassen. Andererseits darf der Abstand aus Arbeitsschutzgründen nicht zu groß sein. In der Regel wurden Abstände zwischen 40 und 60 cm eingehalten – abhängig von der Topografie der Bauwerksoberfläche (z.B. Abb. 3).

Um Messungen schneller durchführen zu können (weil z. B. die Arbeitszeit auf kleine Zeitfenster begrenzt ist), eignet sich die Erweiterung eines Ultraschall-Array-Systems in Form der Kombination von zwei Geräten inklusive Synchronisierung. Diese Erweiterung hat auch den entscheidenden Vorteil, dass sich pro Einzelmessung mehr Daten aufzeichnen lassen (120 A-Scans statt nur 28), was im Endeffekt zu deutlich besseren Analyseergebnissen führt. Erkauft wird dies allerdings mit dem deutlich höheren Gerätegewicht (ungefähr doppelt so schwer gegenüber dem Einzelgerät), was insbesondere bei Messungen an Wänden oder der Überkopfarbeit an einer Decke aufgrund des erforderlichen Anpressdruckes Probleme bereitet. Positiv ausgedrückt führt dies zu einem verbesserten Trainingszustand des Messteams. Messgeräte der neueren Generation sind auf Gewichtersparnis optimiert, was ein entscheidender Vorteil sein kann.

Weitere Geschwindigkeitssteigerungen hinsichtlich Messfortschritt sind durch eine freie Positionierung des Messgerätes und die Verwendung von sogenannten AI-Maßbändern (die für die Positionsbestimmung Methoden der künstlichen Intelligenz verwenden) zu erzielen sowie durch eine drahtgebundene Messsteuerung (z. B. über ein Tablett-PC). Die dadurch möglichen Arbeitserleichterungen können in der Praxis aber nicht immer voll umgesetzt werden. Jedenfalls ist unter schwierigen Messbedingungen jede Flexibilität willkommen. Diese könnte durch eine freiere Konfigurierbarkeit von Sender-Empfänger-Anordnungen, einem größeren Hub der Punkt-Kontakt-Prüfköpfe, eines breiteren Frequenzbereichs sowie eines (noch) geringeren Gewichts der Messgeräte weiter verbessert werden. Alternativen zur Anbringung von Messrastern am Objekt wären auch sehr willkommen, da dies aktuell ein wesentlicher Flaschenhals hinsichtlich einer zügigen Messung ist.



Abb. 3. Ultraschallmessungen an dem Chevron genannten Außenbauteil der Khufu-Pyramide auf dem Giseh-Plateau mit einem „Single-Array“ (links) und einem Doppelarray (rechts). Quelle: [8].

2. Beispiele für Messungen an Bauwerken des kulturellen Erbes

Die Arbeitsgruppen des Autorenteam arbeiten seit vielen Jahren im Bereich der zerstörungsfreien Untersuchung von Bauwerken und Bauteilen und dabei auch gelegentlich an der Erforschung von historischen Bauwerken. 2019 gab es eine Anfrage des ScanPyramids Teams, bei der Untersuchung der Pyramiden von Giseh mitzuwirken. Diese Untersuchungen werden koordiniert von der Cairo University und Prof. Hany Helal sowie vom HIP-Institut (Heritage – Innovation – Preservation) mit dem Direktor Mehdi Tayoubi. Da die Randbedingungen für solche Messungen komplex sind, ist eine gewisse Trainingsphase notwendig. Da keine finanziellen Ressourcen für Messungen an einem Modell zur Verfügung standen und die Anzahl an Pyramiden in Deutschland und Europa gering ist, wurden für ein erstes Training Messungen von einem Teil der Autoren an historischem Mauerwerk von mittelalterlichen Burgen in Bayern durchgeführt.

2.1 Messungen an mittelalterlichen Burgen in Bayern

Die effiziente Durchführung von Messungen an historischem Mauerwerk bedarf einiger Erfahrung. Selbst bei vorliegender Erfahrung in diesem Bereich ist die Fragestellung

(Messung durch eine meterdicke verwitterte Kalksteinfassade zur Erkundung von Dicke, Beschaffenheit und dahinterliegender Bauteile) nicht trivial lösbar ohne Testmessungen. Ein direktes Training mit Messtechniken an Pyramiden in Ägypten war aus mehreren Gründen schwierig bis unmöglich. Mit freundlicher Mithilfe der Bayerischen Verwaltung der staatlichen Schlösser, Gärten und Seen (BSV) wurden einige Objekte in Bayern identifiziert, die für ein solches Training in Frage kamen. Dazu gehörten die Burg Prunn bei Riedenburg (erstmalig erwähnt 1037 n. Chr.), die Burg zu Burghausen bei Altötting (erbaut vor 1025 n. Chr.) sowie die Gedenkstätte Walhalla und die Befreiungshalle (beide nahe Kelheim). Allen gemein ist die Verwendung von großen Kalksteinquadern für das Mauerwerk und andere konstruktive Bauteile, was eine Randbedingung für die Testmessungen war. Die Messungen (Abb. 4) wurden mit freundlicher Genehmigung und unter Aufsicht der BSV sowie der Konservatoren und Kastellane 2020 vor Ort durchgeführt.



Abb. 4. Testmessungen mit verschiedenen ZfP-Verfahren in der Burg zu Burghausen, der Burg Prunn und der Gedenkstätte Walhalla.

Die Ergebnisse dieser Messungen werden an anderer Stelle veröffentlicht werden.

2.2 Durchführung der Messungen an der Pyramide von Khufu auf dem Giseh-Plateau

Die Pyramiden von Giseh [6] gehören zum Weltkulturerbe der UNESCO. Von den auf dem Giseh-Plateau bei Kairo noch existierenden Pyramiden ist die des Pharaos Khufu (altgriechisch Cheops) die größte und älteste. Sie wurde vermutlich um 2600 v. Chr. zu Zeiten der 4. Dynastie erbaut, ist damit älter als 4500 Jahre und das letzte der sieben antiken Weltwunder, welches noch existiert. Sie war übrigens bereits zu Zeiten des Herodot, der diese Pyramide erwähnt, das älteste der sieben Weltwunder.

Neben Beiträgen zum Verständnis der Konstruktion und Bauausführung sowie der Untersuchung von Degradationsprozessen war ein wichtiges Ziel die Bestätigung und nähere Lokalisierung von Hohlräumen, die das ScanPyramids-Team durch Messungen mit Hilfe der Myonen-Tomografie [10] entdeckt hat. Für die Untersuchung der einzelnen Bereiche der Pyramide wurden zunächst sechs Verfahren ausgewählt: Elektrische Widerstandstomografie (ERT), Impakt-Echo, Radar, Seismik, Ultraschall und Videoendoskopie. Andere Verfahren konnten aus verschiedenen Gründen nicht angewendet werden. In diesem Beitrag kann lediglich auf die Ultraschallmessungen eingegangen werden – und dabei nur auf die Herausforderungen bei deren Konzeption und Durchführung. Neben den Artikeln zu den Myonenmessungen (u. a. zuletzt [11]) sowie dem bereits veröffentlichten Artikel zu den Radar- und Ultraschallmessungen [8] werden in der nächsten Zeit jedoch noch eine Reihe weiterer Publikationen erscheinen, die auch die Anwendung und vor allem die Ergebnisse und Daten detaillierter beschreiben, als es hier möglich ist.

Ultraschallmessungen wurden in drei Messkampagnen in den Jahren 2020 und 2022 mit jeweils etwa zehn bis vierzehn Tagen Dauer durchgeführt. Eine zusätzliche Herausforderung stellte dabei der Ausbruch der COVID-19-Pandemie dar sowie die Randbedingung, dass alle Messungen während der Öffnung der Pyramide für den Tourismus zu erfolgen haben. Abgesehen davon wurden alle Verfahren und deren Anwendung für jede Kampagne verbessert, so dass am Ende nahezu optimale Messungen bei den vorhandenen Randbedingungen möglich waren. Für die Messungen an der Außenseite der Khufu-Pyramide und insbesondere des Bereichs, der Chevron genannt wird (Abb. 3 und Abb. 5, rechts), konnten Gerüste verwendet werden, die ohne Bohrungen und andere Befestigungsmittel auskamen. Der Chevron-Bereich trägt seinen Namen aufgrund der vier schiefwinklig angeordneten großen Kalksteinblöcke, die sich oberhalb des historischen Eingangs zur Pyramide befinden. Einige Meter tiefer als dieser Eingang befindet sich heute die im 9 Jhd. n. Chr. hineingesprengte Öffnung, die als Eingang für die Touristen verwendet wird. Die Myonenmessungen haben die Existenz einer Kammer hinter dem Chevronbereich angezeigt, die als „ScanPyramids North Face Corridor“ (SP-NFC) bezeichnet wurde. Leider konnten die Messungen [11] die Lage der Kammer nur ungenau beschreiben und auch deren Durchmesser und Querschnitt konnten nur ungefähr bestimmt werden (und stimmten mit der tatsächlichen Geometrie nicht überein, wie sich später zeigte). Die ZfP-Messungen sollten deswegen die Geometrie und Lage der Kammer näher eingrenzen helfen, um schließlich die beste Position für eine minimal-invasive endoskopische Erkundungsbohrung zu liefern. Bis Oktober 2022 waren die Messungen vorerst abgeschlossen. In der folgenden Datenauswertung wurde vor allem durch die Radar-Messungen (durchgeführt mit vier unterschiedlichen Frequenzen) deutlich, dass sich die „Anomalie“ ausschließlich hinter den beiden unteren Chevron-Quadern befindet und zwar mittig. Diese Ergebnisse konnten durch die Ultraschalldaten sehr gut verifiziert werden. Ultraschall ist zwar ein Verfahren, welches den großen akustischen Impedanzkontrast zwischen Gestein und Hohlraum sehr gut abbilden kann, da der Reflexionskoeffizient bei nahezu 100 % liegt, ist es jedoch schwierig, einen großen Hohlraum von einem schmalen Spalt zu unterscheiden, wie er als Blockfuge gelegentlich zwischen den Steinreihen anzutreffen ist. Die Kalksteinblöcke bestehen aus nummulitischem Kalkstein und haben meist (aber nicht immer!) eine Dicke/Tiefe von ca. 80 cm. Dies erforderte die Verwendung von Ultraschall mit einer Mittenfrequenz von 25 kHz, was die tiefste einstellbare Frequenz der verwendeten Messgeräte darstellte. Die Verwendung einer tieferen Frequenz wäre vermutlich hilfreich gewesen. Die Auswertung der Daten war nicht einfach und erfolgte einerseits auf Basis von numerischen Simulationen sowie andererseits unter intensiver Berücksichtigung von Diffraktionen, wie sie an Blockkanten auftreten. Insgesamt war die Auswertung anspruchsvoll hinsichtlich der auftretenden starken Seitenreflexionen sowie der Degradation der oberen Gesteinsschichten, in denen sich im Laufe der Jahrtausende einige Degradationsspuren und Ablösungen durch Schalenbildung entwickelten. Die dadurch stark schwankenden (an der Oberfläche gemessenen) Scherwellengeschwindigkeiten zwischen 1200 und 2200 m/s machten zudem die Bestimmung von „globalen“ (d. h. mittleren) Geschwindigkeiten anspruchsvoll und deren Verwendung hinsichtlich einer Tiefeninformation kompliziert.

Die Bestimmung der Lage des Rückwandeohs aus den Ultraschalldaten gelang für die Bereiche mit geringerer Degradation und unter Korrelation mittels „Imagefusion“ mit den Radardaten relativ gut. Abb. 5 zeigt rechts die Position der Ultraschallmessprofile der dritten Messkampagne relativ zur Position der Chevronblöcke. Diese Messkampagne konzentrierte sich bereits auf die beiden unteren Blöcke mit den Nummern III und IV. Im linken Teil der Abbildung sind die (verarbeiteten) Ultraschalldaten des oberen grünen Profils 1 zu sehen. Die vertikale mittige Blockfuge zwischen den Blöcken I/III bzw. II/IV ist dadurch zu erkennen, dass hier keine Ultraschalldaten aufgenommen werden konnten.

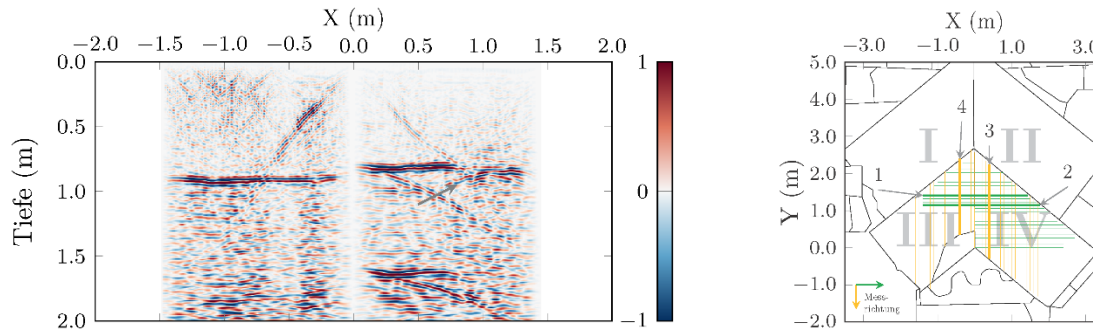


Abb. 5. Beispiel für Ultraschalldaten (links), gemessen entlang des grünen Profils 1 in der Grafik rechts (aus [8]). Die Grafik rechts zeigt den Chevron-Bereich und die vier Chevronblöcke, die mit den römischen Zahlen I bis IV markiert sind, sowie die Lage der gemessenen Ultraschallprofile während Messkampagne 3.

Das Rückwandecho ist sehr gut zu erkennen und liegt in der linken Chevronhälfte (Block III) bei Tiefenwerten zwischen 84 und 90 cm während es rechts (Block IV) zwischen 79 und 81 cm liegt. Offenbar sind die beiden Kalksteinblöcke also nicht gleich dick, was die erste Interpretation von Tiefenschnitten erschwerte. Die dominant einfallenden Reflexionen, die im Scheitelpunkt der vertikalen Blockfuge kulminieren, rühren von Seitenreflexionen eben dieser Fuge her. Die bei Block IV auftretende hyperbelförmige Diffraktion entsteht durch die Seitenwand des Korridors, der auf der Rückseite an den Block IV angeschlossen ist. Sie ist im Profil von Block III kaum zu erkennen, da eine Anomalie in einer Tiefe von nur 35 cm in diesem Bereich zu einer starken Dämpfung der Signale führt, was auch am Rückwandecho zu erkennen ist (siehe auch Abb. 10 in [8]). Diese Anomalie innerhalb des Kalksteinblocks wird auf eine Schalenbildung (evtl. Frost-Tau-Sprengung) zurückgeführt und verhindert die klare Detektion der Diffraktion. Ob dadurch auch die Tiefeninformation zur Blockdicke von Block III beeinflusst ist, müssen aktuelle endoskopische Untersuchungen zur Vermessung des SP-NFC zeigen, die im März/April 2023 durchgeführt werden.

Nähere Informationen zu den Ultraschallmessungen sowie Details zur genauen Vorgehensweise bei der Datenakquise und -auswertung werden mehrere Fachartikel enthalten, die aktuell in Vorbereitung sind. Es sei an dieser Stelle jedoch bereits darauf hingewiesen, dass die Beschränkung auf geringe Aperturwinkel bei der Rekonstruktion der Ultraschalldaten einer der Schlüssel zum Erfolg war, da sich dadurch effektiv störende Seitenreflexionen ausblenden ließen.

4. Zusammenfassung

Die Messung an großen Gesteinsblöcken in historischen Bauwerken stellt besondere Herausforderungen an die Auswahl von ZfP-Verfahren und deren Anwendung, insbesondere wenn die Objekte unter Denkmalschutz stehen. Bei außenliegenden Bauteilen, die über Jahrhunderte oder Jahrtausende der Witterung ausgesetzt sind, ist zudem mit besonderen Schwierigkeiten zu rechnen, da die unklaren Degradationszustände die Beurteilung der Daten erschweren. Es konnte aber gezeigt werden, dass die Kombination von verschiedenen Messverfahren sowie die Integration von numerischen Simulationen und Methoden der Datenfusion (bzw. Image Fusion) eine fundierte Auswertung der Messdaten ermöglicht und damit eine Beurteilung von Bauwerkszuständen sowie eine Detektion und präzise Lokalisierung von Objekten. Im Fall der Pyramide von Khufu auf dem Giseh-Plateau in Ägypten hat dies dazu geführt, dass die Existenz eines durch myonentomografische Untersuchungen entdeckten Korridors bestätigt und dieser genauer lokalisiert werden konnte. Dies war die Grundlage für endoskopische Untersuchungen, die ein erstes Abbild dieses

Korridors lieferten. Dadurch wurde auch die angedachte Bohrung für endoskopische Untersuchungen, welche in [8] vorgeschlagen wurden, obsolet. Derselbe Artikel beschreibt das weitere Verbesserungspotential für Ultraschallmessungen, geht aber nicht auf die Möglichkeiten ein, die numerische Simulationen der elastischen Wellenausbreitung sowie Image- und Daten-Fusion noch bieten. Weitere Artikel zu den durchgeführten Messungen werden dies detaillierter beschreiben, die Ergebnisse auch der anderen Prüfverfahren darstellen und die Untersuchungen an anderen Bereichen der Pyramide (Kammern, Gänge) näher beleuchten.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die freundliche finanzielle Unterstützung durch die International Graduate School of Science and Engineering (IGSSE) der Technischen Universität München, des Deutschen Akademischen Austauschdienstes (DAAD), sowie der Science, Technology & Innovation Funding Authority (STDF) des Egyptian Ministry for Scientific Research. Besonders dankbar sind die Autoren dem Supreme Council für Altertümer sowie dem Ministerium für Tourismus und Altertümer des Staates Ägypten für die freundliche Genehmigung für die Messungen innerhalb des ScanPyramids Projektes sowie die Unterstützung und Leitung unter der Fördernummer 43842 und der Bayerischen Verwaltung der staatlichen Schlösser, Gärten und Seen. Die Messungen fanden unter Koordination der Cairo University, Faculty of Engineering, statt. Ein Dank geht an alle ScanPyramids-Teammitglieder, u. a. (in alphabetischer Reihenfolge) an Randa Deraz, Hussien Essam, Mohamed Fath-Elbab, Khalid Helal, Polina Pugacheva, Johannes Rupfle, Clarimma Sessa, Mohamed Sholqamy. Folgenden Personen ist das Ultraschallteam innerhalb von Scan-Pyramids außerdem zu Dank verpflichtet: Hamada Anwar, Klaus Mayer, Ashraf Mohi, Johannes Scherr.

Referenzen

- [1] Wendrich, A (2009): Zerstörungsfreie Ortung von Anomalien in historischem Mauerwerk mit Radar und Ultraschall - Möglichkeiten und Grenzen. BAM-Dissertationsreihe, Bd. 47, Berlin, 195 S.
- [2] Patitz, G (2012): Altes Mauerwerk zerstörungsfrei mit Radar und Ultraschall erkunden und bewerten. Bauphysikkalender 2012, 12. Jg., S. 203-245.
- [3] Moser, D, Klein, S, Wiggenhauser, H, Behrens, M, Moryson, RM, Pudovikov, S, Herrmann, HG (2019): Zerstörungsfreie Prüfung der Stützmauer einer ehemaligen Kohlegrube im Saarland. DACH-Jahrestagung 2019, DGZfP.
- [4] D'Amico S, Venuti V (Eds.) (2022): Handbook of Cultural Heritage Analysis. Springer Publ., 2256 S., doi.org/10.1007/978-3-030-60016-7.
- [5] Webpage <http://www.scanpyramids.org/> (zuletzt aufgerufen am 6. April 2023).
- [6] Lehner M, Hawass Z (2017): Giza and the pyramids. Univ of Chicago Publ., 560 S.
- [7] Sheriff RE, Geldart LP (1995): Exploration Seismology. 2. Ed., Cambridge University Press, 629 S.
- [8] Elkarmoty M, Rupfle J, Helal K, Sholqamy M, Fath-Elbab M, Kollofrath J, Maier B, Hamza AG, Ramirez-Pinero A, Schumacher T, Deraz R, Sessa C, Popovych O, Anwar H, Taie K, Tayoubi M, Grosse CU, Helal H (2023). Localization and shape determination of a hidden corridor in the Great Pyramid of Giza using non-destructive testing. NDT & E International, 102809, doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.102809.
- [9] Mayer K, Langenberg KJ, Krause M, Milmann B, Mielenz F (2008): Characterization of Reflector Types by Phase-Sensitive Ultrasonic Data Processing and Imaging. J Nondestruct Eval, Bd. 27, Nr. 1–3, S. 35–45, doi.org/10.1007/s10921-008-0035-3.
- [10] Mehdinia S, Schumacher T, Song X, Wan E. (2021): A pipeline for enhanced multimodal 2D imaging of concrete structures. Mater Struct 54 (6), dx.doi.org/ 10.1617/s11527-021-01803-w.
- [11] Procureur S, Morishima K, Kuno M et al. (2023): Precise characterization of a corridor-shaped structure in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons. Nature Communications 14, 1144. doi.org/10.1038/s41467-023-36351-0.