

Seismische Tomographie des Quedlinburger Schlossberges

JÜRGEN HECKNER, IVO RAPPSILBER, GÜNTER STROBEL, UWE LINDNER & THOMAS SCHICHT

Bedeutung des Schlossberges

Hinweise auf eine Befestigung auf dem Sandsteinfelsen stammen schon aus vorgeschichtlicher Zeit. Im 10. Jahrhundert wuchs die Bedeutung der „Quitlingaburg“ als Pfalz des Königs Heinrich I. Sie wird deshalb mitunter auch als „Wiege des Deutschen Reiches“ bezeichnet. Die Stiftskirche wurde ab 1070 anstelle eines durch einen Brand zerstörten Vorgängerbaus errichtet und 1129 geweiht. Über lange Zeit war die Burg sowohl ein weltliches Herrschaftszentrum als auch ein eigener geistlicher Bezirk. Schlossberg und Stiftskirche St. Servatius wurden 1994 zusammen mit der Altstadt von Quedlinburg von der UNESCO in die Liste des Kultur- und Welterbes der Menschheit aufgenommen (Abb.1).



Abb. 1: Schlossberg Quedlinburg, Aufnahme vom Münzenberg (NW) Quelle: Internetseiten der Region Braunschweig-Ostfalen).

Geologische Situation

Das Harz-Vorland (Subherzyn-Scholle) wird durch langgestreckte, NW-SE-verlaufende Salzstrukturen in Sättel und Mulden gegliedert. Der ca. 25 km lange Quedlinburger Sattel trennt Halberstädter und Blankenburger Mulde. An den Sattelflanken umsäumen Kreidesandsteine als Höhenrücken diese Struktur. Der Quedlinburger Schlossberg befindet sich an der SW-Flanke des Quedlinburger Sattels. Die Schichten fallen mit etwa 30° nach SW ein.

Der Felsen, auf dem der Gebäudekomplex angesiedelt ist, erhebt sich ca. 20 m aus seinem Umland (Abb. 2). Die quarzreichen Sandsteine im Bereich des Schlossberges sind enggestuft fein- bis mittelkörnig und stellenweise mit konglomera-

tischen Bildungen verzahnt. In den tieferen Abschnitten sind vereinzelt dünne Tonlagen eingeschaltet. Die Ablagerungen, die ins Neokom (Unterkreide, ca. 125 Mio. Jahren) eingestuft werden, repräsentieren wechselnd terrestrische und flachmarine Bildungen eines Küstenbereiches. Die Kornbindung ist nur sehr schwach und besteht aus Kieselsäure und Brauneisen. PRESCHER (1955), der das Gestein daher als „wenig verfestigten Sand“ bezeichnete, dokumentierte das Porenvolumen an mehreren Proben mit Werten von 30 - 60 %.

Bauschäden und Untersuchungsgeschichte

Die Stiftskirche St. Servatius und weitere Bauwerke auf dem Schlossberg sind bis in die Gegenwart immer wieder von Bauschäden betroffen. Einen Überblick über die erfolgten Ausbesserungsarbeiten an der Südwand gab PRESCHER (1955). Danach lassen sich größere Reparaturen bis 1405 zurückverfolgen. Für 1571 ist der Einsturz der Mauer dokumentiert. Aufgrund der komplizierten Untergrundverhältnisse war auf den Bau eines Südturms zunächst verzichtet worden. Dieser wurde zwischen 1862 und 1882 nachträglich errichtet. Er wies aber bereits 1913 Schäden auf, die schließlich 1934 zum Umbau von Südturm und Südwand führten. Weitere 20 Jahre später waren schon wieder starke Zerstörungen zu verzeichnen, die Anlass für geowissenschaftliche Untersuchungsarbeiten gaben. Nach Ausbesserungsarbeiten in den 1990er Jahren traten seit Frühjahr 2002 wieder verstärkt Probleme mit Verformungen und abgestürztem Mauerwerk auf.

An Versuchen für plausible Erklärungen hierfür hat es nicht gefehlt. Ein Aspekt war dabei vor allem der geologische Untergrund. Entsprechend den in der Vergangenheit immer wieder aufgetretenen Bauschäden ist auch die Reihe der geowissenschaftlichen Untersuchungen am Schlossberg lang. Hier soll nur kurz auf diejenigen eingegangen werden, die das Engagement der staatlichen Geologie belegen.

Die am Südturm der Stiftskirche eingetretenen Schäden waren Anfang des 20. Jahrhunderts Anlass für eine geologische Spezialuntersuchung der

Preußischen Königlichen Geologischen Landesanstalt (BÄRTLING 1913). Dieses Gutachten kann als erste geowissenschaftlich fundierte Arbeit zum Schlossberg bezeichnet werden. Erwähnenswert sind auf einzelne kurze Profile begrenzte geophysikalische Untersuchungen mit Refraktionsseismik in den 50er Jahren zur Bestimmung der Mächtigkeit der Auffülle bzw. zur Gründung der Bauwerke im Sandstein. Diese Messungen wurden durch die Bergakademie Freiberg im Zusammenhang mit Schlauchwaagemessungen ausgeführt (MILITZER 1958).

Die Schlauchwaagemessungen dienten zur Feststellung vertikaler Bewegungen der Stiftskirche und begannen mit einer ersten Etappe 1955/59. Eine Wiederholung fand 1989 auf Anregung der damaligen Bezirksstelle für Geologie statt (LICHTE 1989). In den 1990er Jahren erfolgte durch das Geologische Landesamt Sachsen-Anhalt eine stereophotogrammetrische Aufnahme der südlichen Stützmauer zur Lokalisierung von Deformationsprozessen (RUHS & RAPPILBER 1993).



Abb. 2: Sandsteinfelsen am Fuße des Schlossberges mit seismischem Fallgewicht im Einsatz.

Die seismische Tomographie, die Gegenstand dieser Arbeit ist, wurde 2004 auf Anregung und im Auftrag des Landesamtes für Geologie und Bergwesen gemessen (LINDNER 2004).

Darüber hinaus gab es gerade in den 1990er Jahren eine ganze Reihe von geotechnischen Untersuchungen. Diese lieferten immer wieder punktuelle Befunde zum Baugrund, ein räumliches Modell der Gesteinsbeschaffenheit des Felskomplexes war jedoch bisher nicht verfügbar.

Messverfahren

Es bestand das Ziel, flächenhafte bzw. räumliche Aussagen zum inneren Aufbau des Schlossberges zu gewinnen. Geophysikalische Verfahren bieten sich prinzipiell in solchen Fällen an, da sie flächendeckend und vor allem zerstörungsfrei arbeiten. Die topographische Situation am Schlossberg erforderte jedoch besondere Überlegungen bei der Anlage der Messungen. Aufgrund der Bebauung und der steilen Flanken schieden die klassischen Oberflächenverfahren aus. Die steilen Flanken prädestinieren tomographische Methoden. Insbesondere versprach die für vielfältige Problemstellungen in Geologie, Bergbau und Bauwesen erprobte Methode der seismischen Durchschallung Erfolg. In der konkreten Situation am Schlossberg musste besonderes Augenmerk auf die Anregung der Wellen gelegt werden. Bei der Durchschallung von Pfeilern im Bergbau oder bei Mauerwerksuntersuchungen kommen seismische Wellen im Ultraschallbereich mit nur sehr begrenzter Reichweite zum Einsatz. Größere Distanzen werden z. B. bei tomographischen Messungen zwischen Bohrungen oder zwischen Bergbaustrecken durchstrahlt. Ob die dabei üblicherweise verwendeten seismischen Quellen (Hammer Schlag, Air Gun) eine für die Dimensionen des Schlossberges (ca. 250 m * 100 m) ausreichende Eindringtiefe erzielen würden, war fraglich. Deshalb kam ein Fallgewicht zum Einsatz (Abb. 2).

Die seismische Tomographie basiert auf der Ausbreitung elastischer Wellen. Die Wellen werden durch einen Transmitter angeregt. Die elastischen Wellen durchlaufen das Gebirge und werden an verschiedenen Stellen durch Receiver aufgenommen. Die Messgrößen sind Laufzeit und Amplitude der seismischen Wellen.

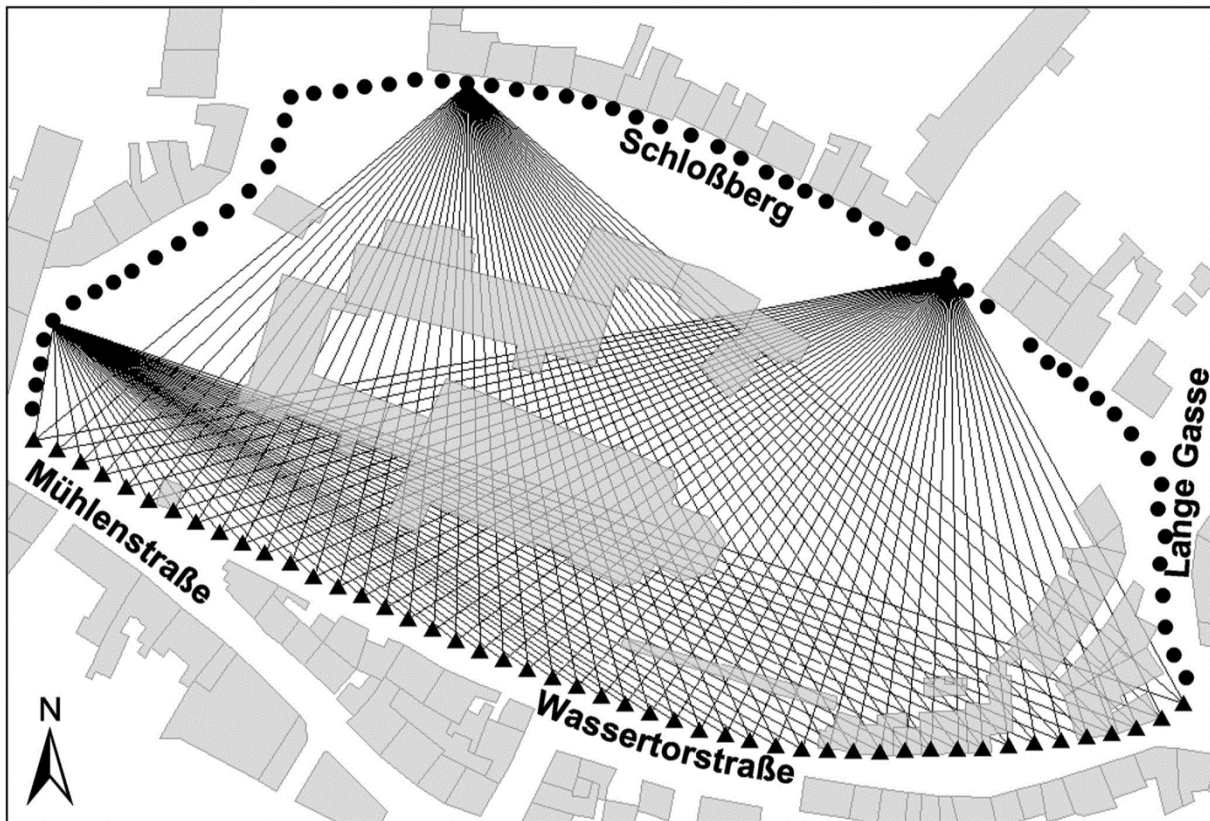


Abb. 3: Messprinzip der Tomographie am Beispiel Schlossberg Quedlinburg - ausgewählte Strahlenwege (Punkt: Anregungspunkt, Dreieck: Geophon).

Die Anordnung von Transmittern und Receivern erfolgt so, dass der zu erkundende Bereich gut durch eine Vielzahl von Strahlenwegen abgedeckt ist. Abb. 3 zeigt beispielhaft die Messanordnung der untersten Tomographieebene am Schlossberg Quedlinburg, die durch die umlaufenden Straßenzüge aufgespannt wird. Die Anregungspunkte umschlossen im N halbkreisförmig den Berg (Lange Gasse, Schlossberg) im 5-m-Abstand. Die Registrierungspunkte lagen ebenfalls im 5-m-Abstand an der Südflanke des Schlossberges (Mühlenstraße, Wassertorstraße). Von jedem einzelnen Anregungspunkt liefen die Wellen zu jeweils allen Empfängern. In Abb. 3 sind exemplarisch 3 Strahlenbündel eingetragen.

Mit einer seismischen Messapparatur werden die an den Empfängern ankommenden Wellen aufgezeichnet. Aus den Seismogrammen lassen sich durch Picken der Ersteinsätze die Laufzeiten ablesen. Dies geschieht für alle Strahlenwege. Im gezeigten Beispiel der untersten Tomographieebene am Quedlinburger Schlossberg betrifft das die Wege von 64 Anregungspunkten zu jeweils 48 Geophonen, also 3073 Einzelmessungen.

Die Art der weiteren Datenbearbeitung war namensgebend für das Verfahren der Tomographie, das aus dem medizinischen Bereich entlehnt ist. Aufgabe ist es, die Verteilung der Geschwindigkeiten zu rekonstruieren. Hierzu wird zunächst ein Ausgangsmodell erzeugt, um dessen berechnete Werte mit den gemessenen Werten zu vergleichen. Iterativ wird das Modell soweit geändert, bis die für das Modell berechnete Geschwindigkeitsverteilung an die gemessene angepasst ist.

Durchführung der Messungen

Über die in Abb. 3 dokumentierte unterste horizontale Tomographieebene hinaus sollte mit weiteren, höher gelegenen Tomographieebenen versucht werden, näher an den Gründungsbereich des Gebäudekomplexes heranzureichen und räumliche Aussagen zu erzielen. Eine Vorstellung von der Verteilung der Anregungs- und Registrierungspunkte im Schlossbergareal vermittelt Abb. 4. Die Punktabstände lagen jeweils bei 5 m. Die zweite Messebene spannte sich schräg zwischen den Anregungspunkten am Fuß der Südflanke des Schlossberges (48 Punkte) und einer in Längsrichtung auf dem Schlosshof verlegten Geophonauslage (24 Punkte) auf. Diese Geophonauslage wur-

de im Anschluss für die Vermessung der dritten Tomographieebene verwendet. Dazu lagen 39 Anregungspunkte am Fuß der Nordflanke. Für zwei weitere Messebenen dienten 15 Punkte auf dem Schlossberg der Anregung. Bei Ebene 4 lagen 19 Geophone unmittelbar am Fuß des nordöstlichen Mauerabschnitts, während für die 5. Tomographieebene 21 Geophone unmittelbar am Fuße der Gebäude an der W- und der SW-Seite positioniert waren. Mit den genannten weiteren Messabschnitten wurde innerhalb des Schlossberges ein ausreichend dichtes Netz von insgesamt 5 Tomographieebenen aufgespannt (Abb. 5). Insgesamt ergaben sich aus der Aufstellungsgeometrie 5760 Strahlenwege. Diese hohe Datendichte ermöglichte sogar im weiteren Verlauf eine dreidimensionale Auswertung.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Auswertung der untersten Tomographieebene (im Bereich der am Fuße des

Schlossbergs zwischen den umlaufenden Straßenzügen aufgespannt) zeigt ein auffällig zonal differenziertes seismisches Geschwindigkeitsbild (Abb. 6). Eine Zone hoher Geschwindigkeiten zieht sich als relativ schmaler Streifen leicht bogenförmig in Längsrichtung durch den Schlossberg. Diese Zone hat eine Breite von weniger als 50 m. An den Flanken wurden dagegen sehr niedrige Geschwindigkeiten aufgenommen. Insbesondere ist im Norden des Schlossberges ein breiter Abschnitt durch niedrige Geschwindigkeitswerte gekennzeichnet.

Aus der Erfahrung ist bekannt, dass Geschwindigkeiten oberhalb 2000 m/s relativ kompakte Festgesteine charakterisieren. Das betrifft in Abb. 6 den Bereich gelber und roter Farbtöne. Der durch grüne und hellblaue Farbgebung markierte Geschwindigkeitsbereich von 1000 bis 2000 m/s deutet auf abgestuft verwittertes Felsgestein. Geschwindigkeiten unter 1000 m/s,

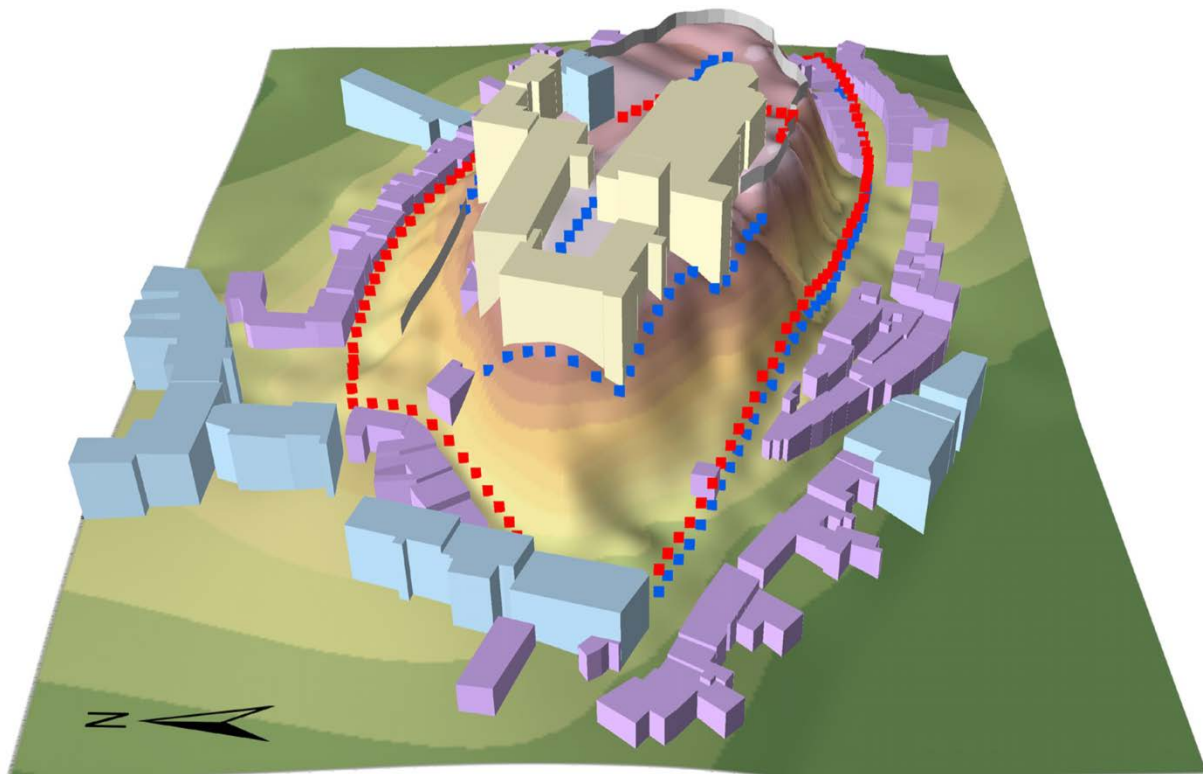


Abb. 4: Räumliche schematische Darstellung des Schlossberges (Blick von W) mit Eintragung von Anregungspunkten (rot) und Geophonpunkten (blau).

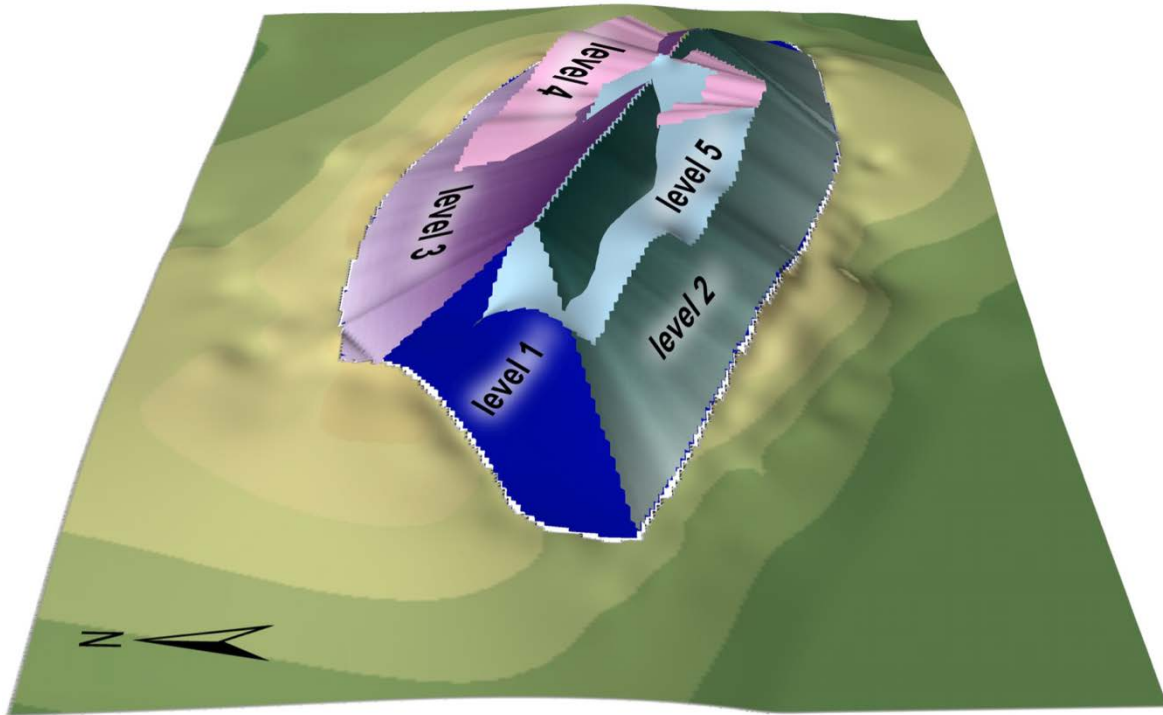


Abb. 5: Räumliche Darstellung der tomographisch untersuchten Ebenen am Schlossberg (gleicher Bildausschnitt wie Abb. 4).

blau gekennzeichnet, sind eigentlich ein Hinweis auf Lockergesteine. Dementsprechend fortgeschritten dürfte hier der Verwitterungszustand der Gesteine sein. Die niedrigsten Werte liegen sogar bei nur 400 m/s. Das sind charakteristische Werte für lockere Auffülle. Die hier genannten Zahlenwerte können aber nur als erste Anhaltspunkte verstanden werden. Man kann davon ausgehen, dass die Geschwindigkeitsgrenzen entsprechend dem Verwitterungszustand fließend ausgeprägt sind. Eine genaue Zuordnung muss nachfolgenden geotechnischen Untersuchungsarbeiten vorbehalten bleiben.

Im Ergebnis der tomographischen 3D-Berechnung aller vermessenen Ebenen liegt ein dreidimensionaler Datensatz vor. Er deckt fast den gesamten Körper des Schlossbergs vom Höhenniveau der umlaufenden Straßen (durchschnittlich 125 m NN) bis auf das Plateau (max. 152 m NN) ab. Abb. 7 vermittelt einen Eindruck davon, wie die Schnittserie das Volumen des Bergkörpers abdeckt.

Insgesamt vermittelt Abb. 7 das Bild einer Zone hoher Geschwindigkeiten im Kern des Berges. Zu den Rändern aber auch nach oben hin nehmen die Geschwindigkeiten ab. Die beiden obersten Höhenniveaus erreichen bereits den Gründungsbereich der Bauwerke. Die dort lokal gemessenen hohen Geschwindigkeiten konzentrieren sich un-

mittelbar auf die Gebäudeareale und dürften demzufolge auf die relativ festen Fundamente zurückzuführen sein.

Ausblick

Im Ergebnis der seismischen Tomographie liegt zunächst ein Datensatz der räumlichen Geschwindigkeitsverteilung vor. Es ist angedacht, zumindest in Teilbereichen, eine geoelektrische Tomographie anzuschließen. In der Geophysik ist eine Methodenkombination prinzipiell vorteilhaft. Nachdem mit der seismischen Methode elastische Parameter gewonnen wurden, soll nun mit dem geoelektrischen Widerstand ein zweiter, unabhängiger Parameter aufgenommen werden.

Bisher wurden anhand dieser geophysikalischen Daten keine Aussagen zu den Baugrundverhältnissen bzw. zur Standsicherheit getroffen. Aus der Erfahrung ist bekannt, dass sich die gewonnenen physikalischen Parameter auf geotechnische Parameter beziehen. Aufbauend auf der vorliegenden großen Anzahl von Baugrundgutachten zum Schlossberg sollte es in einer weiteren Phase gemeinsamer Arbeit von Geotechnikern und Geophysikern möglich sein, die punktuell gewonnenen geotechnischen Daten mit dem flächendeckenden geophysikalischen Datensatz zu verschneiden. Damit könnte es erstmals gelingen,

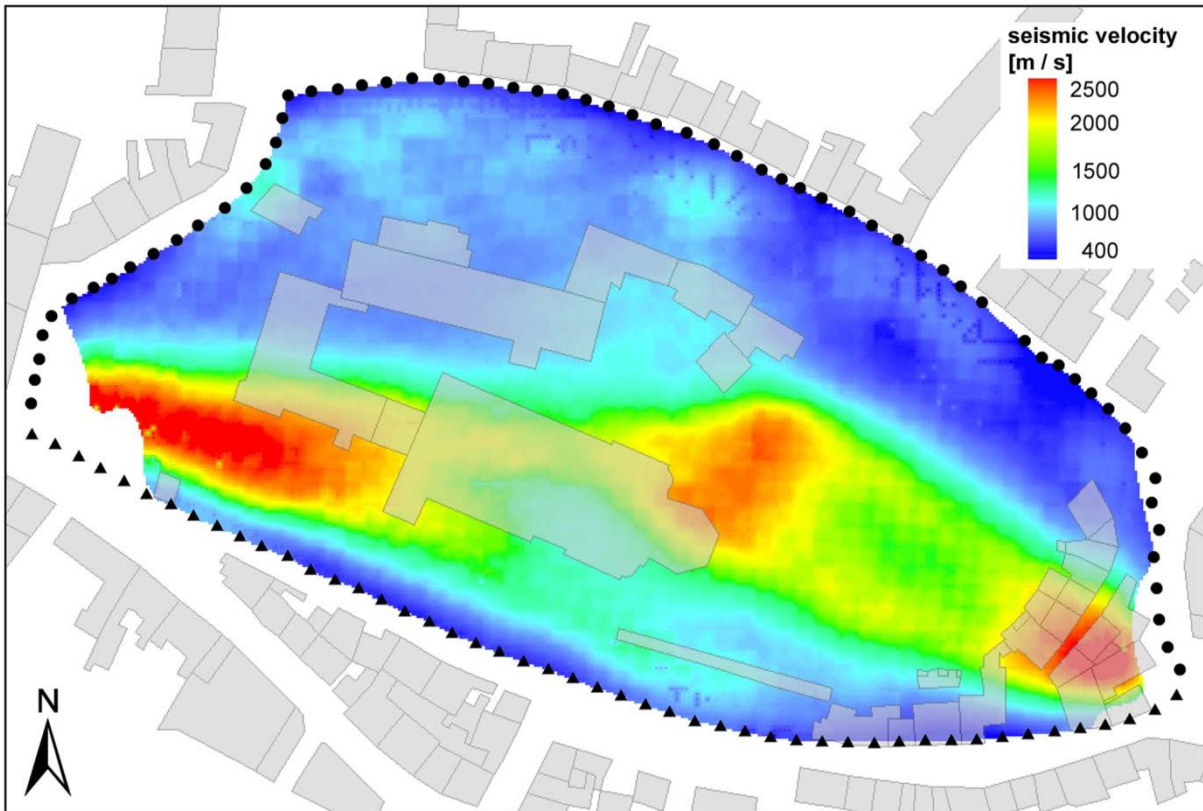


Abb. 6: Verteilung der Wellengeschwindigkeiten, unterste Tomographieebene am Fuße des Schlossberges.

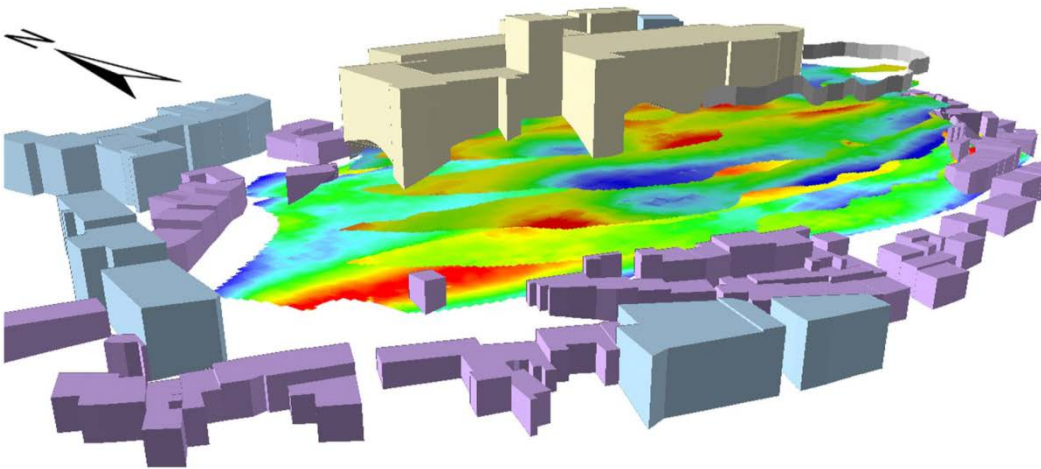


Abb. 7: Die Serie horizontaler Geschwindigkeitsschnitte repräsentiert den 3D-Datensatz.

ein ganzheitliches 3-dimensionales Modell vom Festigkeitszustand des Felskörpers abzuleiten. Dann könnte die Interpretation der Tomografiebefunde erstmals auch den unmittelbaren Baugrundbereich der Bauwerke erfassen und wesentliche Merkmale seiner Beschaffenheit räumlich erschließen. Den Konzepten künftiger Sicherungs- und Erhaltungsmaßnahmen wird dies dienlich sein.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Methode der seismischen Tomographie durchaus auch erfolgreich auf größere Objekte, wie einen ganzen Berg, angewandt werden kann. Die hier getestete Methodik kann damit auch auf andere, vergleichbare Fragestellungen übertragen werden.

Literatur

BÄRTLING (1913): Gutachten über die Ergebnisse der geologischen Untersuchungen am Quedlinburger Schlossberg.- unveröff. Bericht, 9 S., Preuß. Geol. Landesanst.; Berlin.

LICHTE, P. (1989): Technischer Bericht, Quedlinburg Burgberg '89.- unveröff. Bericht, 5 S., VEB Geophysik; Leipzig.

LINDNER, U. (2004): Geophysikalische Erkundung des Burgberges in Quedlinburg, Gesamtbericht „Seismische Tomographie“.- unveröff. Bericht, 24 S., K-UTEC GmbH; Sondershausen.

MILITZER, H. (1958): Ein Beitrag zur Kennwertbestimmung von Erdstoffen in natürlicher Lagerung mit Hilfe geophysikalischer Methoden unter Einsatz von Hammerschlag -Reflexionsseismik und der Schlauchwaage.- Freiburger Forschh., C 42: 57 - 79; Berlin.

PRESCHER (1955): Geologische Untersuchungen an der Stiftskirche zu Quedlinburg.- unveröff. Bericht, 17 S.; Archivunterlage des Landesamtes für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt.

RUHS, W. & RAPPSILBER, I. (1993): Stereophotogrammetrische Bestandsaufnahme Schlossberg Quedlinburg-südliche Stützmauer.- unveröff. Bericht, 6 S., Geologisches Landesamt Sachsen-Anhalt; Halle.

Anschriften der Autoren:

J. Heckner, I. Rappsilber & G. Strobel, Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt, Köthener Straße 34, 06118 Halle

U. Lindner & T. Schicht, Kali -Umwelttechnik GmbH. Am Petersenschacht 7, 99706 Sondershausen