

Mikrogravimetrische Untersuchungen in der Marienkirche in Ziegenhain bei Jena

Microgravity investigations at the St. Mary's Church in Ziegenhain near Jena

in press: **avn** Allgemeine Vermessungsnachrichten eingereicht 2014

Thomas Jahr, Franziska Bock, Adelheid Weise, Klaus Heide

Das Fundament der Marienkirche in Ziegenhain bei Jena ist in den letzten Jahren Objekt geophysikalischer Mikrountersuchungen gewesen. Es ist bekannt, dass die Geschichte der Kirche bis ins 11. Jahrhundert zurückreicht und die Kirche eine große geistliche Bedeutung gehabt hat. Weiterhin wurde im Jahr 1526 ein bestehender Kirchschatz aufgelistet, dessen Verbleib völlig unklar ist. Die Aufgabe der Geophysik besteht darin, zu klären, in welchem Umfang mit Gewölben unterhalb der Kirche gerechnet werden kann und ob es geophysikalische Hinweise auf den verschollenen Schatz geben könnte. Mikrogravimetrische Messungen und Modellierungen bestätigen die Existenz von Hohlräumen unter dem Kirchengebäude, konkrete Hinweise auf den Kirchenschatz gibt es allerdings nicht.

Schlüsselwörter: Archäogeophysik, mikrogravimetrische Messungen, gravimetrische 3D Modellierungen

The fundament of St. Mary's Church in Ziegenhain near Jena has been the object during the last years of geophysical micro-investigations. It is known that the history of the church goes back till the 11th century and the church must have had a higher ecclesiastical importance. Furthermore an existing church treasure was listed in 1526, whose whereabouts is absolutely unclear. The task of the geophysical investigations consisted in clearing to which extent can we expect underground vaults below the church and whether there are geophysical hints to the missing treasure. Micro-gravity measurements and modeling confirm the existence of hollow cavities under the church building, however, there are no precise hints to the church treasure.

Keywords: Archeo-geophysics, microgravity measurements, gravimetrical 3D modeling

1 Hintergrund

Der zentrale Bereich der Ortschaft Ziegenhain bei Jena in Thüringen ist durch die Marienkirche geprägt (*Abb. 1*). Sie gliedert sich in den Gotischen Chor, die Winterkirche, das dreischiffige Langhaus und den Glocken- oder Schutzturm (*Abb. 2*).

Die Marienkirche in Ziegenhain mit einem wundertätigen Marienbild wird erstmals im Jahre 976 urkundlich erwähnt /Bock 2011; Storch 1991/ und es ist belegt, dass die Kirche lange Zeit als Wallfahrtsort galt und mit dem Vatikan in Verbindung stand /Heide 2009; Heide 2010 pers. Mitt./. Damit hatte die Kirche zeitweilig eine sehr hohe geistliche Bedeutung und durch die Wallfahrten zählte sie zu den reichsten Kirchen im Umfeld von Jena.



Abb. 1 | Blick von Norden auf die Ortschaft Ziegenhain bei Jena in Thüringen. In zentraler Lage ist die Marienkirche mit dem dreischiffigen Langhaus (Ruine) links vom Turm zu erkennen (Foto: Jahr, 2012).

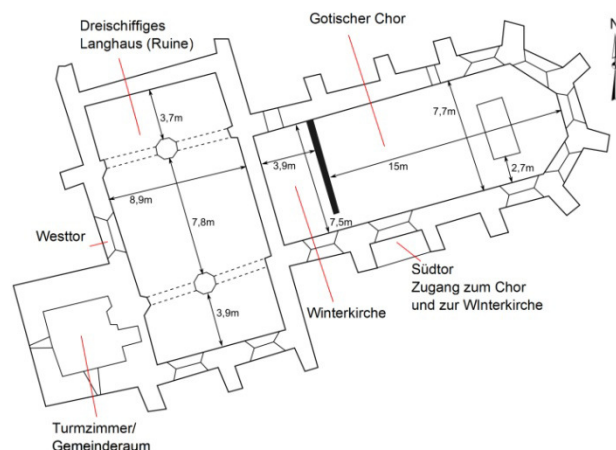


Abb. 2 | Blick von Süden auf die Marienkirche (links). Grundriss der Kirche mit ihren Bestandteilen und den Eingängen (rechts) /Heide 2009, pers. Mitt.; Bock 2011/.

Auf Anordnung von Kurfürst Johann Friedrich, dass Wertsachen der Klöster und Kirchen zu verzeichnen und zu schätzen sind, wurden am 5. Februar 1526 folgende Gegenstände als Besitz der Marienkirche vermerkt /Mühlmann 1986/: 32 Messgewänder, 14 Alben, 104 Tücher, 7 Kelche, 25 Leuchter, 18 Messbücher, 10 Chorröcke, 9 Chorhemden, sowie Perlen, Edelsteine, goldene

Monstranzen, Teller und Spangen. Dieser beachtliche Kirchenschatz ist verlorengegangen und es ist unklar, ob er ausgelagert wurde oder sich noch in unmittelbarer Umgebung der Kirche befindet. Gleichzeitig gibt es Vermutungen, dass sich evtl. Hohlräume, Krypten (griech. *kryptós* = versteckt, verborgen) unter dem Kirchengebäude befinden könnten. Somit besteht die geophysikalische Aufgabe u.a. darin, mittels kleinräumiger gravimetrischer und magnetischer Untersuchungen Hinweise auf unterlagernde Krypten zu finden oder sogar Anhaltspunkte für den Verbleib des Kirchenschatzes zu liefern.

2 Methodik und Vorgehensweise

Da die geophysikalische Untersuchung auf die Erkundung von oberflächennahen Hohlräumen zielt, bietet sich eine mikrogravimetrische Vermessung mit mehreren Gravimetern an. Allerdings müssen in diesem Fall die gravitativen Einflüsse des Kirchengebäudes erfasst und eliminiert werden. Dies entspricht der topografischen Reduktion bei der Bestimmung der Bouguer-Anomalie und es erfordert eine dreidimensionale (3D) Modellierung des Kirchengebäudes, so dass der zusätzliche Effekt für jeden Messpunkt bestimmt werden kann. In einem ersten Schritt wurden die Kirchenmauern von außen, aber auch innerhalb der Kirche, bezüglich der Koordinaten (Gauß-Krüger) tachymetrisch eingemessen (Abb. 3).

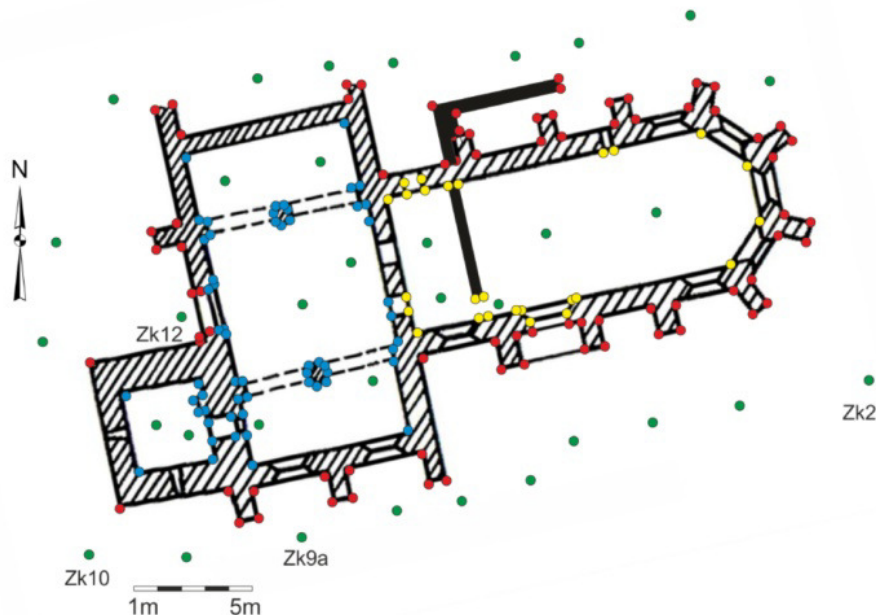


Abb. 3 | Vermessene Punkte innerhalb und außerhalb der Kirche: Innerhalb des Chores (gelb), im Ruinenteil (blau), Außenbereich der Mauern (rot) und Hilfspunkte (grün). Die Vermessung wurde mit einer TopCon GTS-6 vorgenommen /Bock 2011/.

Der gravimetrische Schwereeffekt des gesamten Kirchenkomplexes wurde mithilfe des Programms POTENT /Almond und Almond 1997; Pànisovà und Pasteka 2009/ modelliert. Die tatsächliche Dichte der Mauern konnte nicht durch Probenentnahme bestimmt werden, so dass die Modellierung für mehrere angenommene Dichten erfolgen musste. Prinzipiell mögliche Elementarkörper, die mit POTENT modelliert werden können sind in (Abb. 4) zusammengefasst.

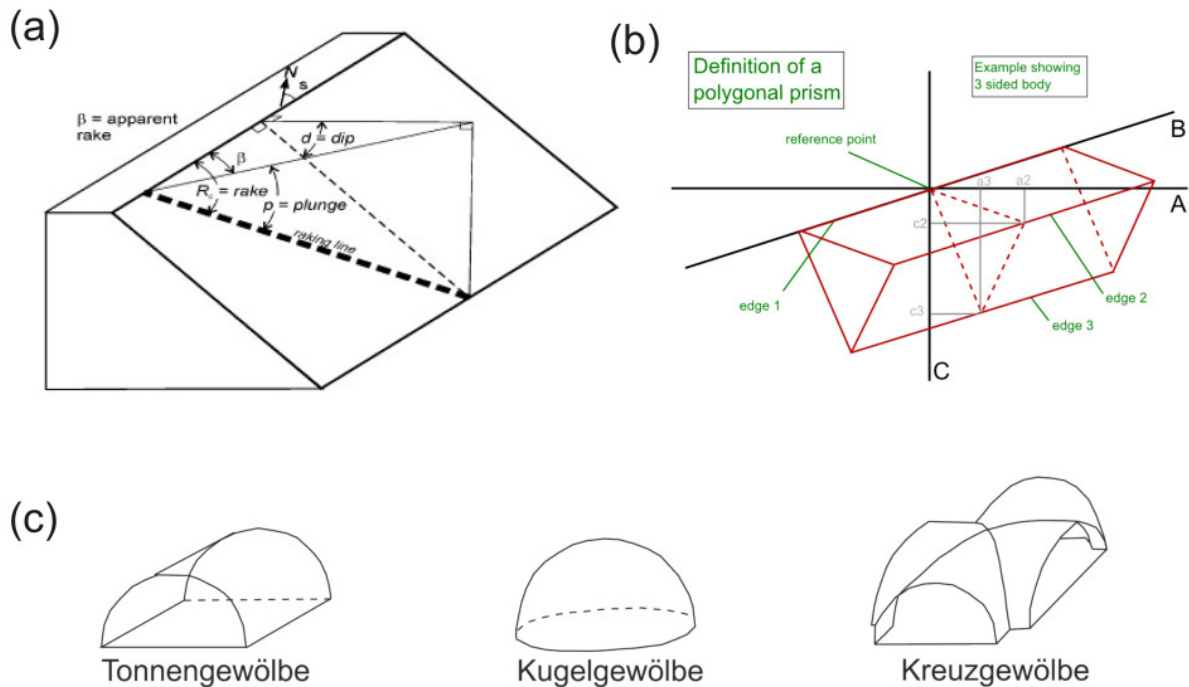


Abb. 4 | Gravimetrische 3D Modellierung mit dem Programm POTENT /Almond und Almond 1997/. (a) zur Beschreibung werden das Streichen (s), das Einfallen (d) und das schräge Abtauchen (p) benutzt; (b) durch Rotation des Elementarkörpers um die jeweiligen Kanten entstehen beliebige Baelemente u.a. für Kirchen und Dome (c).

Für die gravimetrischen Messungen standen die beiden LaCoste & Romberg Gravimeter G85 (TU Berlin) und D187 (Uni Jena) zur Verfügung. Beide Instrumente verfügen über ein Feedback-System und elektrostatische Libellen.

Neben der Gravimetrie konnte zusätzlich die Magnetik mit einer Totalintensitätsmessung (Protonenmagnetometer) eingesetzt werden. Da beide Potentialfeldmethoden bekanntermaßen mehrdeutig sind, bieten sich überlappende Messungen an, um den Interpretationsspielraum möglichst weit einzuschränken.

3 Geophysikalische Vermessung

Zur genauen geometrischen Erfassung des Kirchengebäudes wurden 32 Hilfspunkte (Abb. 3) und 197 Eckpunkte und Auskragungen über insgesamt 524 Beobachtungen vermessen, wobei die Totalstation

43 mal umgesetzt wurde. Die gravimetrischen Messungen wurden im Jahr 2011 im Rahmen der Diplomarbeit von /Bock 2011/ vorgenommen. Dabei wurde mit den beiden Gravimetern ein 0.6m x 0.6m Raster im äußeren und 0.4m x 0.5m im inneren Kirchenbereich mit stündlichen Basispunktbeobachtungen vermessen. Der mittlere Fehler liegt bei $\pm 7 \mu\text{Gal}$.

Parallel zu den Geländearbeiten konnte mit dem Programm POTENT der gravimetrische Einfluss der Kirchenmauern bestimmt und analog zu einer topographischen Reduktion reduziert werden, beispielhaft seien hier die Ergebnisse für den Gotischen Chor vorgestellt (Abb. 5). Unter einer angenommenen Mauerdicke von 2200 kg/m^3 wird im Altarbereich ein Schwereffekt von $70 \mu\text{Gal}$ und direkt neben den Mauern von $130 \mu\text{Gal}$ modelliert (Abb. 5a). Die so bestimmten Beträge werden zu der ursprünglichen Bouguer-Karte addiert, um den Einfluss des Kirchengebäudes oberhalb der Erdoberfläche zu eliminieren (Abb. 5b). Die resultierende Bouguer-Anomalie wird anschließend bezüglich eventuell vorhandener Krypten im Untergrund interpretiert, wobei sie als dreidimensionale Hohlräume modelliert werden /Bock 2011/.

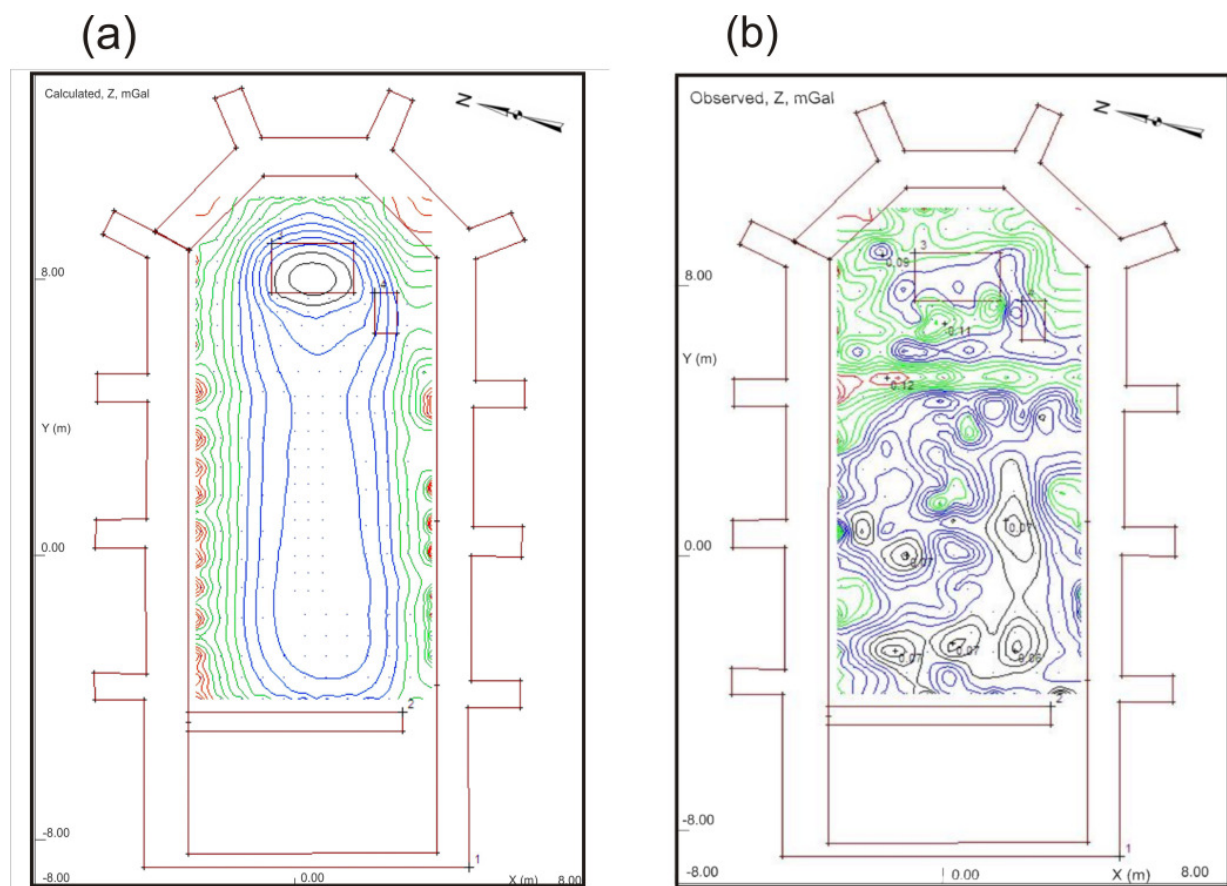


Abb. 5 | Gravimetrische Untersuchung im Gotischen Chor: (a) modellierter Gebäude-Schwereffekt mit $70 \mu\text{Gal}$ im Altarbereich (schwarze Linien) und $130 \mu\text{Gal}$ direkt an den Mauern (rote Linien) und (b) um diesen Effekt reduzierte Bouguer-Anomalie mit einer maximalen Differenz von $40 \mu\text{Gal}$ (von schwarzen bis zu roten Linien); Isolinienabstand: $4 \mu\text{Gal}$ /nach Bock 2011/.

4 Modellierung der unterirdischen Krypten

Für die gravimetrische 3D Modellierung wurde ebenfalls das Programm POTENT eingesetzt, wobei angenommen wurde, dass die Krypten mit Luft gefüllt sind. Die Modellierung wurde auf den westlichen Teil des Gotischen Chors beschränkt, da hier die Bouguer-Anomalie deutlich mehr strukturiert ist als im Altarbereich (östlich).

Die Bouguer-Anomalie konnte mittels sechs modellierter Krypten so gut erklärt werden, dass das residuale Feld im Mittel kleinere Werte als $10 \mu\text{Gal}$ aufweist. Die Lage der Krypten wurde bei der Modellierung parallel und senkrecht zur Achse des Hauptschiffes orientiert (Abb. 6).

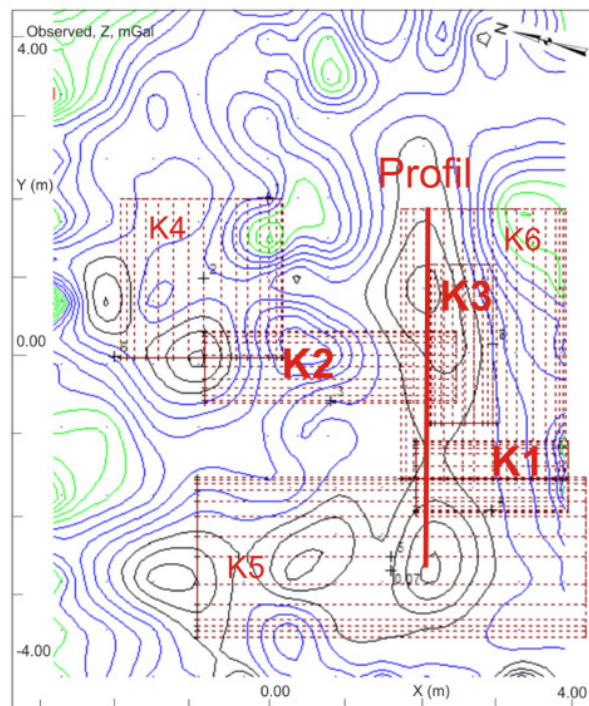


Abb. 6 | Bouguer-Anomalie und sechs modellierte Krypten (rot gestrichelt) des westlichen Teils vom Gotischen Chor (vergl. Abb. 5b). Die Profillinie verläuft somit parallel zur Ausrichtung des Hauptkirchenschiffes und kreuzt die Krypten K1, K2 und K3. K4 liegt abseits des Profils und K5 und K6 sind im Profilschnitt (Abb. 7) nicht markiert /nach Bock 2011/.

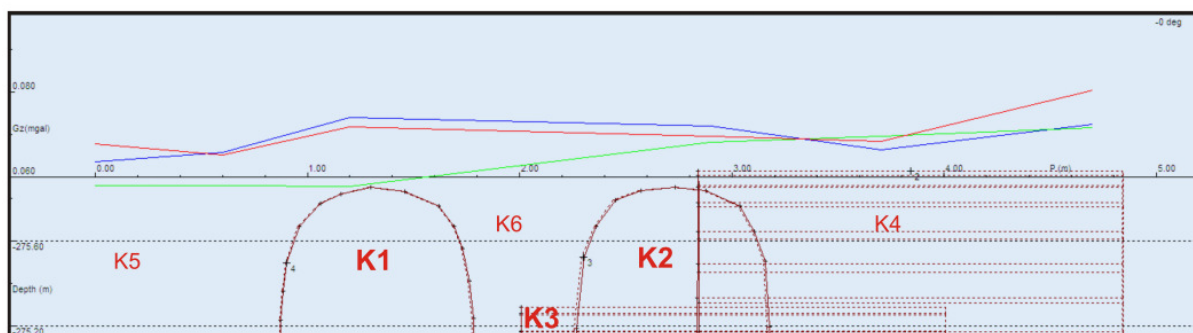


Abb. 7 | Blick von Süden auf den Profilschnitt (von rechts in Abb. 6). Die beobachtete Anomalie (blau) und die modellierte Schwere (Anomalie knapp $20 \mu\text{Gal}$) weichen maximal $7 \mu\text{Gal}$ voneinander ab. Die Geländeoberkante entlang des Profils ist durch die grüne Kurve dargestellt. Die Krypten K1 und K2

reichen 2m tief und laufen senkrecht, K3 ist parallel zum Profil orientiert (*Abb. 6*). K4 ist markiert, wird aber nicht vom Profil gekreuzt und K5 und K6 sind hier nicht gesondert markiert.

Im südlichen Teil des Gotischen Chors verläuft parallel zur Ausrichtung des Kirchenschiffs eine auffälligsten negativen Anomalien mit ca. $-20 \mu\text{Gal}$ (schwarze Isolinien in *Abb. 6*). Über diese Anomalie, die durch vier Krypten so modelliert werden kann, dass die maximalen Residuen nur noch $7 \mu\text{Gal}$ betragen, wurde beispielhaft ein Profilschnitt durch das Modell gelegt (*Abb. 7*).

Die Krypten K1 und K2 verlaufen senkrecht zum Profil, K3 und K4 parallel dazu, wobei außer K3 alle mit ihren Oberflächen bis auf wenige Dezimeter an die Erdoberfläche modelliert werden mussten. Nach dieser Modellierung müsste in nur 20 cm Tiefe direkt im Bereich des Südtores (*Abb. 2*) mit Hohlräumen gerechnet werden. Zur Modellierung des eher langwelligen Anomaliefeldanteils wurde mit K3 eine tiefer gelagerte Krypta parallel zum Profilschnitt angenommen. Für diesen Bereich des Gotischen Chors wird die ursprüngliche Annahme von oberflächennahen Hohlräumen durch die gravimetrischen Untersuchungen bestätigt.

5 Außenbereich der Kirche

Die unmittelbare Umgebung der Kirche wurde sowohl mikrogravimetrisch als auch magnetisch mit kleinen von $0.25\text{m} \times 0.25\text{m}$ Punktabständen vermessen. Exemplarisch sind die gewonnenen Anomalien für den nördlichen Außenbereich in *Abb. 8* dargestellt.

Für den gravimetrisch/magnetisch überlappenden Bereich nordwestlich von der Stützmauer C gibt es in beiden Anomaliefeldern einen Gradienten, der von nordwest nach südost verläuft. Allerdings würde man mit zunehmender Schwere nach nordwest eher auch höhere Totalintensitäten erwarten: hier ist das Gegenteil der Fall. Die Ursache könnte in einer nicht ausreichenden gravimetrischen Reduktion des Kirchengebäudes für die angenommene Dichte von 2200 kg/m^3 liegen oder in einem von dem Gebäude ausgehenden magnetischen Anomalieanteil.

Magnetische Totalfeldmessungen wurden auch innerhalb des Gebäudes im Gotischen Chor, im Ruinenbereich des dreischiffigen Langhauses und im Turmzimmer (*Abb. 2*) vorgenommen. Insgesamt zeigt sich eine gute Korrelation der Anomalien der beiden Potentialverfahren. Allerdings konnte im Turmzimmer trotz mehrfacher Vermessung mit beiden Gravimetern keine stabile gravimetrische Bouguer-Anomalie bestimmt werden. Die magnetischen Messungen ergaben dort ein extrem starkes Magnetfeld mit Dipolcharakter und einem Gradienten von ca. 5000 nT . Wenn dieses äußere Magnetfeld zusätzlich auch noch zeitlich variiert, können Einflüsse auf die Metallfeder-Gravimeter nicht ausgeschlossen werden. Als Ursache der starken magnetischen Anomalie wird eine anthropogene Quelle vermutet, die mit der metallischen Verankerung des Turms, der zeitweise abzurutschen drohte, in Verbindung stehen könnte. Detailliertere Information dazu konnten leider nicht ermittelt werden.

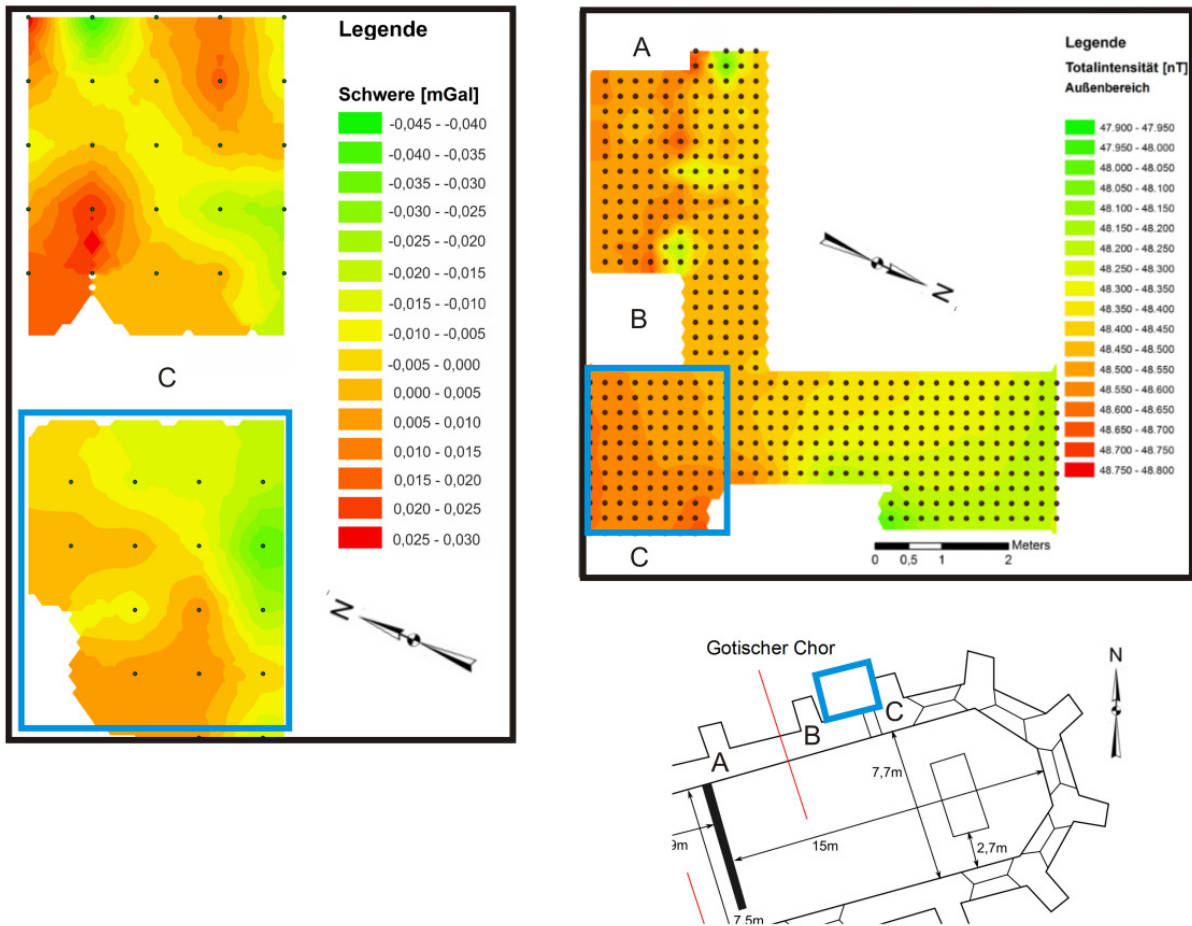


Abb. 8 | Bouguer-Anomalie im nördlichen Außenbereich der Kirche (links) und die gemessene magnetische Totalintensität (rechts). Im Bereich nordwestlich von der Stützmauer C (blauer Rahmen) zeigen beide Anomalien einen deutlichen, übereinstimmenden Gradienten.

6 Interpretation und Ausblick

Die gravimetrische Modellierung für den Außenbereich der Kirche ergibt zwei miteinander verbundene Hohlräume, die spekulativ mit dem symbolischen Grab von Christus, das von Kirchenhistorikern in der Kirchengemeinde vermutet wird, in Verbindung stehen könnten.

Die Modellierungen für den südwestlichen Teil des Gotischen Chores ergeben je nach Modellvariante drei oder sechs Krypten, die bis nahe an die Oberfläche reichen (wenige Dezimeter). Am sinnvollsten wären aus geophysikalischer Sicht natürlich einige Testbohrungen, um die Situation zu klären. Dies ist jedoch im Kirchengebäude nicht möglich, so dass wir für die weitere Erkundung oberflächennah wirksame und hochauflösende Verfahren, wie beispielsweise eine Georadar-Messung vorschlagen. Für das Turmzimmer sollte unbedingt die Quelle für die beobachtete starke magnetische Anomalie lokalisiert und charakterisiert werden. Ob dort eine "Grabung" möglich ist, muss mit der Kirchengemeinde und dem Denkmalschutz abgestimmt werden.

Dank

Die vorliegenden Untersuchungen wären nicht ohne die umfangreichen, grundlegenden Informationen sowie die Unterstützung der vor Ort Messungen von Herrn Prof. Dr. Heide (Ziegenhain) möglich gewesen. Dafür sei ihm an dieser Stelle ganz herzlich gedankt. Das verwendete Programm für die gravimetrischen 3D Modellierungen wurde von Herrn Dr. Pasteka mit einer Einführung dankenswerter Weise zur Verfügung gestellt. Nicht zuletzt möchten wir uns bei allen helfenden Personen, die die geophysikalische Datenerhebung unterstützt haben, sowie bei der Kirchengemeinde von Ziegenhain für die Zugangserlaubnis in das "Untersuchungsgebiet" bedanken.

Literatur

Almond, R.; Almond, J. (1997): Software Potent, Geophysical Software Solutions Pty. Ltd., Gungahlin, ACT 2912, Australien. http://www.geoss.com.au/download_files/-Potent_Reference_4_13.pdf, Zugriff 28.01.2014.

Bock, F. (2011): Gravimetrische Untersuchungen in der Marienkapelle, Ziegenhain zur Detektion von Hohlräumen im Untergrund (Jena). Diplomarbeit am Institut für Geowissenschaften, Chem-Geowiss. Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität Jena, 129 Seiten.

Heide, K. (2009): Die Marienkirche zu Ziegenhain bei Jena - Eine Zusammenstellung aus den verfügbaren Quellen von der ersten urkundlichen Erwähnung von Ziegenhain im Jahre 1295 bis heute anlässlich der 750-Jahrfeier des Ortes Ziegenhain und der 585-jährigen Geschichte der Marienkirche im Jahre 2009, Ziegenhain (unveröffentlicht).

Mühlmann, O. (1986): Die Wallfahrtskirche zu Ziegenhain bei Jena. Kultur und Geschichte Thüringens, Band 7, Mosaiksteine, Berlin, S. 181-194.

Pànisova, J.; Pasteka, R. (2009): The use of microgravity technique in archaeology: A case study from the St. Nicolas Church in Pukanec, Slovakia, Contributions to Geophysics and Geodesy, Vol. 39/3, S. 327-254.

Storch, P. (1991): Dokumentation über die Wallfahrtskirche zu Ziegenhain durchgeführten vorbereitenden Arbeiten, Ziegenhain, 1991 (unveröffentlicht).