



<https://publications.dainst.org>

iDAI.publications

DIGITALE PUBLIKATIONEN DES
DEUTSCHEN ARCHÄOLOGISCHEN INSTITUTS

Das ist eine digitale Ausgabe von / This is a digital edition of

Schüler, Tim – Opelt, Mark

Felix Romuliana-Gamzigrad: geophysikalische Erkundung des Innenbereichs zu archäologischen Zwecken

in: Bülow, Gerda von – Petković, Sofija (Hrsg.), Gamzigrad-Studien I. Ergebnisse der deutsch-serbischen Forschungen im Umfeld des Palastes Romuliana, 27–42.

DOI: <https://doi.org/10.34780/np46-g8v6>

Herausgebende Institution / Publisher:
Deutsches Archäologisches Institut

Copyright (Digital Edition) © 2023 Deutsches Archäologisches Institut
Deutsches Archäologisches Institut, Zentrale, Podbielskiallee 69–71, 14195 Berlin, Tel: +49 30 187711-0
Email: info@dainst.de | Web: <https://www.dainst.org>

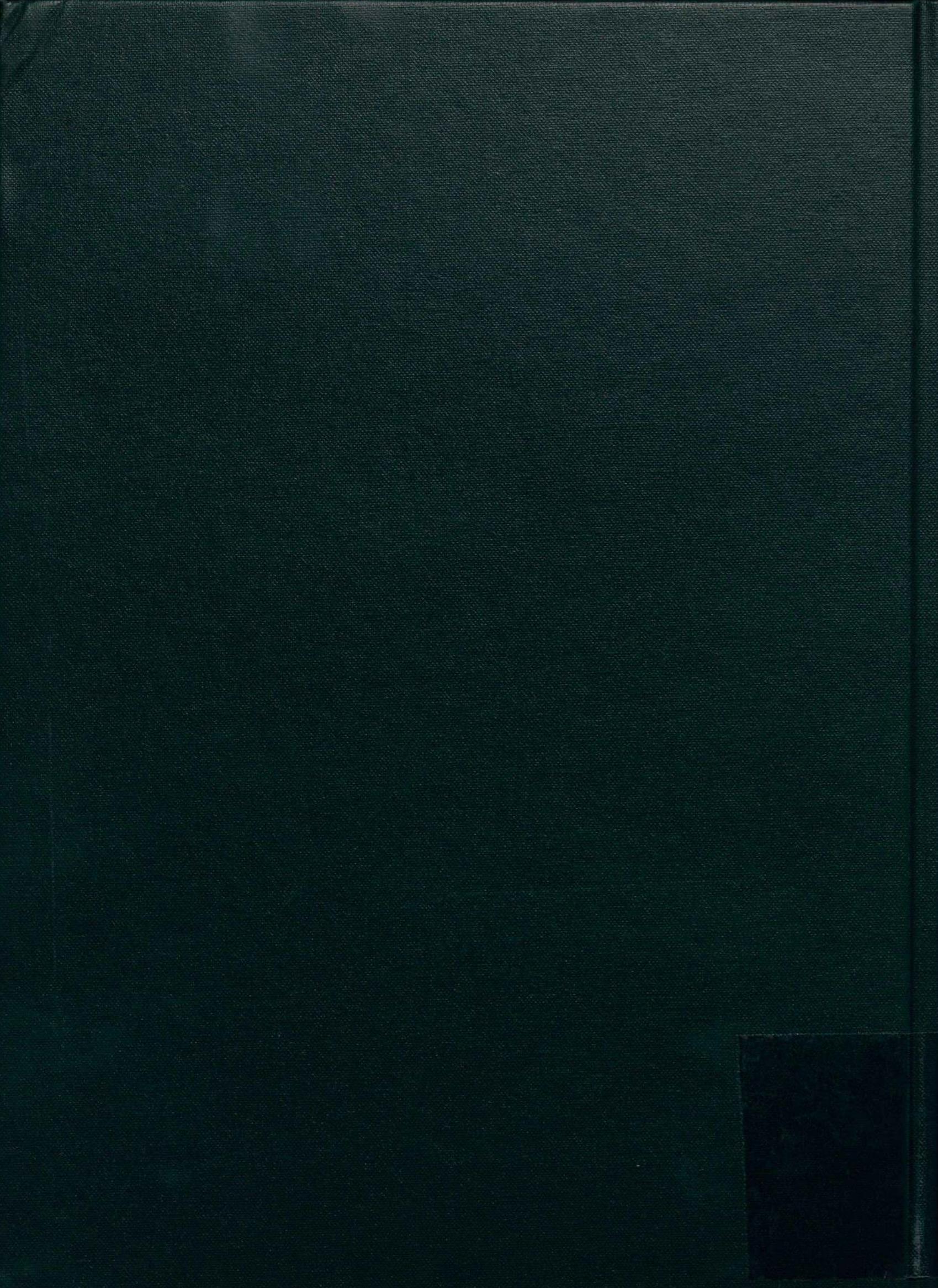
Nutzungsbedingungen: Mit dem Herunterladen erkennen Sie die Nutzungsbedingungen (<https://publications.dainst.org/terms-of-use>) von iDAI.publications an. Sofern in dem Dokument nichts anderes ausdrücklich vermerkt ist, gelten folgende Nutzungsbedingungen: Die Nutzung der Inhalte ist ausschließlich privaten Nutzerinnen / Nutzern für den eigenen wissenschaftlichen und sonstigen privaten Gebrauch gestattet. Sämtliche Texte, Bilder und sonstige Inhalte in diesem Dokument unterliegen dem Schutz des Urheberrechts gemäß dem Urheberrechtsgesetz der Bundesrepublik Deutschland. Die Inhalte können von Ihnen nur dann genutzt und vervielfältigt werden, wenn Ihnen dies im Einzelfall durch den Rechteinhaber oder die Schrankenregelungen des Urheberrechts gestattet ist. Jede Art der Nutzung zu gewerblichen Zwecken ist untersagt. Zu den Möglichkeiten einer Lizenzierung von Nutzungsrechten wenden Sie sich bitte direkt an die verantwortlichen Herausgeberinnen/Herausgeber der entsprechenden Publikationsorgane oder an die Online-Redaktion des Deutschen Archäologischen Instituts (info@dainst.de). Etwaige davon abweichende Lizenzbedingungen sind im Abbildungsnachweis vermerkt.

Terms of use: By downloading you accept the terms of use (<https://publications.dainst.org/terms-of-use>) of iDAI.publications. Unless otherwise stated in the document, the following terms of use are applicable: All materials including texts, articles, images and other content contained in this document are subject to the German copyright. The contents are for personal use only and may only be reproduced or made accessible to third parties if you have gained permission from the copyright owner. Any form of commercial use is expressly prohibited. When seeking the granting of licenses of use or permission to reproduce any kind of material please contact the responsible editors of the publications or contact the Deutsches Archäologisches Institut (info@dainst.de). Any deviating terms of use are indicated in the credits.

GERDA VON BÜLOW / SOFIJA PETKOVIĆ
(HERAUSGEBERINNEN)

GAMZIGRAD-STUDIEN I
ERGEBNISSE DER DEUTSCH-SERBISCHEN
FORSCHUNGEN IM UMFELD DES
PALASTES ROMULIANA





GERDA VON BÜLOW / SOFIJA PETKOVIĆ
(HERAUSGEBERINNEN)

GAMZIGRAD-STUDIEN I

RÖMISCH-GERMANISCHE FORSCHUNGEN

BAND 75

RÖMISCH-GERMANISCHE KOMMISSION
DES DEUTSCHEN ARCHÄOLOGISCHEN INSTITUTS ZU FRANKFURT A. M.

RÖMISCH-GERMANISCHE KOMMISSION
ARCHAEOLOGICAL INSTITUTE BELGRADE

Gamzigrad-Studien I

Ergebnisse der deutsch-serbischen Forschungen im Umfeld des Palastes *Romuliana*

HERAUSGEGBEN VON
GERDA VON BÜLOW UND SOFIJA PETKOVIĆ

MIT BEITRÄGEN VON
MARIANNE BERGMANN, GERDA VON BÜLOW, SVEN CONRAD,
GORDANA JEREMIĆ, ALEKSANDAR KAPURAN,
NATAŠA MILADINOVIC-RADMILOVIC, MARK OPELT, SOFIJA PETKOVIĆ,
STEFAN POP-LAZIĆ, ANA PREMK, CHRISTOPH RUMMEL, TIM SCHÜLER,
BRIGITTA SCHÜTT, JANA ŠKUNDRIĆ-RUMMEL, JÁNOS TÓTH, MILOJE VASIĆ
UND DRAGANA VULOVIĆ

REICHERT VERLAG • WIESBADEN • 2020

VIII,406 Seiten mit 313 Abbildungen, 16 Tabellen und 15 Tafeln

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie;
detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <<http://dnb.d-nb.de>> abrufbar.

© 2020 by Römisch-Germanische Kommission des Deutschen Archäologischen Instituts /
Dr. Ludwig Reichert Verlag Wiesbaden
ISBN: 978-3-95490-477-8

Alle Rechte, vor allem der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten.
Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es auch nicht gestattet, dieses Buch oder
Teile daraus auf fotomechanischem Wege (Fotografie, Mikroskopie) zu vervielfältigen oder
unter Verwendung elektronischer Systeme zu verarbeiten und zu verbreiten.

Redaktion: Hans-Ulrich Voß, Römisch-Germanische Kommission Frankfurt a. M.
Formalredaktion: Julia Hahn, Johannes Gier, Römisch-Germanische Kommission Frankfurt a. M.
Bildredaktion: Oliver Wagner, Kirstine Ruppel, Römisch-Germanische Kommission Frankfurt a. M.
Satz: Julia K. Koch, Preetz
Druck: Bonifatius GmbH Druck – Buch – Verlag, Paderborn
Printed in Germany
Printed on fade resistant and archival quality paper (PH 7 neutral) • tcf



Dem Andenken an Ulrike Wulf-Rheidt (1963–2018) gewidmet.

Inhaltsverzeichnis

<p>VORWORT– ПРЕДГОВОР. <i>Von Gerda von Bülow und Sofija Petković</i> 1</p> <p>BAUFORSCHUNG UND ARBEITEN DES ARCHITEKTURREFERATS IN <i>FELIX ROMULIANA</i>-GAMZIGRAD VON 2004–2012. <i>Von Christoph Rummel</i> 5</p> <p>DAS DEUTSCH-SERBISCHE GEMEINSCHAFTS- PROJEKT ZUR GEOPHYSIKALISCHEN UND ARCHÄOLOGISCHEN ERKUNDUNG DER UMGEBUNG DES PALASTES <i>FELIX ROMULIANA</i>. CHRONIK DER GELÄNDEARBEITEN VON 2004–2012. <i>Von Gerda von Bülow</i> 9</p> <p>GIS BASED TOPOGRAPHICAL ANALYSIS IN THE SURROUNDINGS OF <i>FELIX ROMULIANA</i>, SERBIA. <i>By János Tóth and Brigitta Schütt</i> 17</p> <p><i>FELIX ROMULIANA</i>-GAMZIGRAD. GEOPHYSIKALISCHE ERKUNDUNG DES INNENBEREICHS ZU ARCHÄOLOGISCHEN ZWECKEN. <i>Von Tim Schüler und Mark Opelt</i> 27</p> <p>LANDSCAPE HISTORY RESEARCH IN THE SURROUNDINGS OF THE ARCHAEOLOGICAL SITE <i>FELIX ROMULIANA</i>. <i>By Jana Škundrić-Rummel</i> 43</p> <p>THE PREHISTORY OF NORTH-EASTERN SERBIA USING THE EXAMPLE OF <i>FELIX ROMULIANA</i> AND ITS SURROUNDINGS. <i>By Aleksandar Kapuran</i> 59</p>	<p>DIE ERGEBNISSE ARCHÄOLOGISCHER SONDAGEGRABUNGEN AUF GEOMAGNETISCH PROSPEKTIERTEN FLÄCHEN NÖRDLICH UND SÜDLICH DES PALASTES <i>FELIX ROMULIANA</i>. <i>Von Gerda von Bülow</i> 83</p> <p>Coins from Gamzigrad 2008 – <i>extra muros</i> <i>By Miloje Vasić</i> 103</p> <p><i>FELIX ROMULIANA</i>. DIE GEFÄSSKERAMIK AUS DEN GRABUNGEN <i>EXTRA MUROS</i> 2006–2008. <i>Von Sven Conrad</i> 117</p> <p>THE RESULTS OF ARCHAEOLOGICAL RESEARCH IN THE SOUTH TOWER OF THE WEST GATE OF LATER FORTIFICATION OF <i>FELIX ROMULIANA</i> (TOWER 19). <i>By Sofija Petković</i> 171</p> <p>COINS FROM TOWER 19 IN <i>FELIX ROMULIANA</i>. <i>By Miloje Vasić</i> 205</p> <p>THE POTTERY FROM TOWER 19. <i>By Sven Conrad and Ana Premk</i> 213</p> <p>DIE VILLA <i>EXTRA MUROS</i> NÖRDLICH VON <i>FELIX ROMULIANA</i>. ERGEBNISSE DER GRABUNGEN 2010–2012. <i>Von Gerda von Bülow</i> 245</p> <p>Coins from the Villa <i>extra muros</i> – 2010/2011. <i>By Miloje Vasić</i> 283</p>
--	--

FIFTH CENTURY BURIAL IN FRONT OF THE NORTHERN GATE OF <i>FELIX ROMULIANA</i> – ANTHROPOLOGICAL ANALYSIS. <i>By Dragana Vulović, Nataša Miladinović-Radmilović and Stefan Pop-Lazić</i>	287	EINE NEU ENTDECKTE MARMORSKULPTUR AUS DER VILLA <i>EXTRA MUROS</i> NÖRDLICH VON <i>FELIX ROMULIANA</i> – TEILSTÜCK EINER MYTHOLOGISCHEN JAGDSZENE. <i>Von Gerda von Bülow</i>	373
DIE PORPHYRSKULPTUREN AUS DEM PALAST VON GAMZIGRAD. <i>Von Marianne Bergmann</i>	305	ZUSAMMENSCHAU. <i>Von Gerda von Bülow</i>	395
MOSAICS FROM GAMZIGRAD, WITH A SPECIAL OVERVIEW OF THE <i>SECTILIA PAVIMENTA</i> . <i>By Gordana Jeremić</i>	353	РЕЗИМЕ.	399
		SUMMARY	403

Felix Romuliana-Gamzigrad. Geophysikalische Erkundung des Innenbereichs zu archäologischen Zwecken

Von Tim Schüler und Mark Opelt

SITUATION UND ZIELSTELLUNG

Im Außenbereich von Felix Romuliana lieferten bereits 2005 Bodenwiderstandsprofile der Geoelektrik detaillierte Informationen über die Lage und Form von Fundamentresten zweier ehemaliger Grabbauten und zeigten damit die Funktionstüchtigkeit der Methode vor Ort. Sowohl Sondagegrabungen als auch die bisherige Bauforschung im Innenbereich von Felix Romuliana und zudem der dort bereits 2007 kartierte Magnetfeldgradient ergaben Informationen über archäologische Strukturen auf der

Verdachtsfläche, die durch eine zusätzliche geophysikalische Untersuchungsmethode ergänzt werden sollten. Insbesondere in der aus Magnetfeldgradientenmessungen nur schwer abschätzbarer Tiefenlage der erwarteten Fundamentreste bestand die erhoffte Mehrinformation der Geoelektrikmessungen. Zudem sollte übersichthaft die Mächtigkeit der Kulturschicht durch lange Elektrikprofile auf drei verschiedenen Achsen im Palastinnenbereich erkundet werden.

GLEICHSTROMELEKTRIK

METHODE

Der spezifische elektrische Widerstand ist der elektrische Widerstand pro Länge und Querschnitt und somit eine Materialeigenschaft; angegeben wird er in Ohm*m. Für den sedimentär geschichteten Untergrund hängt er hauptsächlich von der Sedimentart, den damit verbundenen Eigenschaften des Porenraums und der Konzentration von freien Ladungsträgern im Grundwasser ab. Die höchsten Leitfähigkeiten, also die geringsten Widerstände, hat man bei wassergefüllten, offenen Porenräumen, in denen eine hohe Ionenkonzentration herrscht. In einem geschlossenen Porenraum sind die einzelnen Porenvolumina nicht miteinander verbunden, was die Leitfähigkeit herabsetzt. Wasserungssättigte, trockene Sedimente zeigen eine Größenordnung höhere Widerstände. Da der spezifische elektrische Widerstand materialgebunden ist, kann eine bekannte Verteilung dieser Größe im Untergrund auf Materialwechsel, beispielsweise durch das Vorhandensein archäologischer Strukturen, hinweisen.

Die Bestimmung der Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes im Boden ist indirekt durch Messungen an der Geländeoberfläche möglich. Über zwei Stromelektroden wird dazu kontrolliert Strom in den Bo-

den eingespeist und dabei die sich einstellende Potentialdifferenzen als Spannung zwischen zwei weiteren Potentialelektroden gemessen.

Die geometrische Anordnung der Strom- und Potentialelektroden bezeichnet man als Elektrodenkonfiguration. Die Wahl der Elektrodenkonfiguration richtet sich nach dem Untersuchungsziel; beispielsweise eignet sich die Wenner-Konfiguration, bei der alle Elektroden äquidistant in einer Linie angeordnet sind, für die Erkundung des Schichtenaufbaues des Untergrundes. Die Dipol-Dipol-Konfiguration, bei der zwei Strom- und zwei Potentialelektroden paarweise in einer Linie gegeneinander versetzt werden, wird oft zur Lokalisierung kompakter Widerstandsanhäufungen verwendet. Mittels des Geometriefaktors der gewählten Konfiguration wird aus aufgewandtem Speisestrom und der gemessenen Spannung der scheinbare elektrische Widerstand berechnet, der graphisch in einer sogenannten Pseudosektion die Rohdatenverteilung des Elektrik-Profiles dargestellt.

Um von der Verteilung des scheinbaren elektrischen Widerstandes auf die Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes zu schließen, muss eine physikalisch-mathematische Auswertetechnik, die sogenannte Inversionsrechnung erfolgen.

MESSGERÄT SYSCAL PRO SWITCH 48

Das SYSCAL Pro SWITCH 48 ist eine 10-kanalige Gleichstromelektrik-Apparatur der Firma IRIS Instruments. In der Grundausstattung wird sie in Verbindung mit zwei Kabeltrommeln und 48 Edelstahl-Elektroden betrieben.

10-kanalig bedeutet hier, dass zum Zeitpunkt der Stromeinspeisung in den Boden an 10 Elektrodenpaaren die Spannung zeitgleich gemessen werden kann. Je nach verwendeter Elektrodenkonfiguration kann die Messung mit bis zu zehn Kanälen einen mehr oder weniger großen Zeitgewinn bedeuten. Insbesondere bei der Dipol-Dipol-Konfiguration, bei der zu einem ortsfesten Stromelektronenpaar Spannungsmessungen an Elektrodenpaaren unterschiedlicher Entfernung nötig sind, ist die Apparatur einkanaligen Messsystemen durch eine erhebliche Messzeit einsparung weit überlegen. Bei der Wenner-Konfiguration, bei der jeweils zu einer Position der Stromeinspeisung genau eine Position des Elektrodenpaares zur Spannungsmessung vorgegeben ist, ergeben Mehrkanalanlagen keinen Messzeitgewinn.

Das SYSCAL Pro SWITCH 48 hat eine interne Stromversorgung und Anschlüsse für eine externe 12V-Stromversorgung. Vor der Messung werden die Mess-Sequenzen für dieses Gerät mit der Software Elektre Pro erzeugt und hochgeladen. Nach der Messung werden die Messdaten mit der Software ProsysII heruntergeladen und bearbeitet.

SOFTWARE

Elektre Pro zur Gerätesteuerung

In einer Sequenz für das SYSCAL Pro SWITCH 48 sind Parameter und Informationen für den Ablauf der Messung enthalten. Dies sind im Einzelnen: Elektrodenanzahl, Elektrodenabstand und -offset, eine Sequenzbezeichnung als Metainformation und die gewählte Elektrodenkonfiguration, z. B. Wenner oder Dipol-Dipol (s. Abschnitt „Methode“). Neben der Widerstandsmessung kann die induzierte Polarisation registriert werden. Weiterhin kann die Zeitspanne der Stromeinspeisung zwischen 250 ms, 500 ms, 1000 ms, 2000 ms, 4000 ms oder 8000 ms gesetzt werden. Es gibt zudem Einstellungen zur Qualitätskontrolle der Messungen, wobei eine Obergrenze in Prozent für einen Qualitätsfaktor gewählt wird. Bei Wiederholungsmessungen, die für eine sogenannte Stapelung verwendet werden, wird dieser Qualitätsfaktor bestimmt. Ein Minimalwert für die Stapelung gibt die Wiederholungszahl an,

die mindestens für jede Messung verwendet wird. Falls der gesetzte Qualitätswert innerhalb der Wiederholungsmessungen nicht erreicht wird, steigt zu diesem Ziel die Zahl der Wiederholungen, nicht aber über den Maximalwert der Stapelung.

Die Wahl der Spannung vP an den Potentialelektronen von 15 mV, 50 mV, 200 mV, 800 mV oder Maximum bestimmt den Fluss des Einspeisestroms, der bis zum Erreichen der damit gesetzten Potentialdifferenz an den Potentialelektronen ansteigt. Die Obergrenze der Energieeinspeisung in den Boden wird hier über die Maximalspannung zwischen den Stromelektronen festgelegt.

ProsysII zur Verwaltung und Bearbeitung der Messdaten

Nach abgeschlossener Messung können die Messdaten vom SYSCAL Pro SWITCH 48 mit der Software ProsysII heruntergeladen und gespeichert werden. Auch die Darstellung der Pseudosektionen (s. Abschnitt „Methode“) und bestimmte Datenbearbeitungsmöglichkeiten wie z. B. das Einfügen von Topographie, das Verschieben von Elektrodenpositionen in den Raumrichtungen oder die Kombination von mehreren Pseudosektionen sind möglich. Nach der Datenbearbeitung ist der Export in Formate für verschiedene Inversions-Software wie z. B. RES2dinv/RES-3dinv möglich.

RES2dinv für die Dateninversion

Für die Inversionsrechnung (s. Abschnitt „Methode“), diente das Programm RES2dinv der Firma Geotomo. In die Rechnung geht neben den gemessenen, scheinbaren elektrischen Widerständen die Lage der Elektroden an der Oberfläche und damit auch die Topographie (s. ProsysII) des Messprofils ein.

Der Algorithmus zur Lösung des Inversionsproblems entwirft in Iterationsschritten ein Untergrundmodell so, dass sich dessen theoretische Pseudosektion der gemessenen Pseudosektion (s. Abschnitt „Methode“) angleicht. Die Zahl der Iterationsschritte erhöht sich dabei, solange ein prozentualer Mindestfortschritt in der Angleichung von modellierter und gemessener Pseudosektion erzielt wird. Nach Abschluss dieses Vorganges werden das Untergrundmodell des wahren spezifischen Widerstandes, dessen modellierte Pseudosektion und die gemessene Pseudosektion des scheinbaren Widerstandes angezeigt. Die prozentuale Abweichung der Pseudosektionen voneinander dient als Güteangabe des erstellten Modells.

DURCHFÜHRUNG

DATENERHEBUNG

62 Profile à 48 Elektroden wurden im Abstand von einem Meter und einer Erkundungstiefe von 7 m zur flächenhaften geoelektrischen Erkundung angelegt.

Drei Profile mit einer Erkundungstiefe von ca. 14 m wurden im roll-on-Modus von einer geräteseitig bedingten Standardlänge von 65,8 m auf 133 m bzw. 200 m verlängert. Dabei wurde die Apparatur mehrfach um die halbe Profillänge versetzt.

Tabelle 1 zeigt die Sequenzeinstellungen (s. Abschnitt „Elektre Pro zur Gerätesteuerung“) für die durchgeführten Messungen. Jede Elektrode wurde innerhalb der Messkampagne mit jeweils ca. 0,6 l Wasser angegossen. Diese vergleichsweise große Wassermenge zeigte zu Beginn der Messkampagne eine deutliche Verringerung der Q-Werte (s. Abschnitt „Elektre Pro zur Gerätesteuerung“) und ebenso eine deutliche Verringerung des prozentualen Gütwertes für das Modell nach der Dateninversion (s. Abschnitt „RES2dinv für die Dateninversion“).

Die Vermessung der Lage jeder Elektrode erfolgte mit dem Tachymeter Geodimeter 610 in einem lokalen Koordinatensystem und wurde anschließend über bekannte Festpunkte in das, für das Projekt vereinbarte Koordinatensystem ETRS89 UTM zone 34N transformiert.

Das Geodimeter 610 des Typs GDM 610 571 202 002 ist ein zielverfolgendes, elektronisches Robotiktachymeter. Nach dem Messprinzip des Phasenvergleichsverfahrens wird die Laufzeit und Phasenverschiebung eines vom Tachymeter ausgesendeten und vom Prismenspiegel reflektierten Infrarotlichtstrahls gemessen und für die Entfernungsberechnung ausgewertet. Im Robotik-Modus ist es möglich, das Tachymeter vom Ort des Prismenspiegels aus per Bedieneinheit über eine Funkverbindung fernzusteuern, was eine Einmannbedienung des gesamten Vermessungssystems ermöglicht. *Abbildung 1* zeigt die mit dem Geodimeter 610 bestimmte Lage der Elektroden der Geoelektrikprofile.

DATENBEARBEITUNG

Nach der Inversionsrechnung (s. Abschnitt „RES2dinv für die Dateninversion“) lagen für die 62 Einzelprofile der flächenhaften Prospektion zweidimensionale Untergrundmodelle vor. Die Platzierung und Kombination der Einzelprofile in der horizontalen Ebene zu einem irregulären vierdimensionalen Datensatz erfolgte mit dem Programm Surf 8 der Firma Golden Software. Dieser Datensatz enthält die spezifischen elektrischen Widerstände mit den

Sequenzeinstellungen Profile 1 bis 62	Sequenzeinstellungen Profile 63, 64, 66
Elektrodenabstand 0,7 m	Elektrodenabstand 1,4 m
Elektrodenzahl 48	Elektrodenzahl 48
Elektrodenkonfiguration Dipol-Dipol	Elektrodenkonfiguration Dipol-Dipol
Rho	Rho
Zeitspanne der Stromeinspeisung 500 ms	Zeitspanne der Stromeinspeisung 500 ms
Qualitätsfaktor/obere Schranke Q = 1	Qualitätsfaktor/obere Schranke Q = 1
Stapelung Stack min = 3, Stack max = 6	Stapelung Stack min 0= 3, Stack max = 6
Grenzsp. Vp = 15mV, Vab max = 800V	Grenzsp. Vp = 15mV, Vab max = 800V
(power save-Modus)	(power save-Modus)

Tabelle 1. Sequenzeinstellungen.

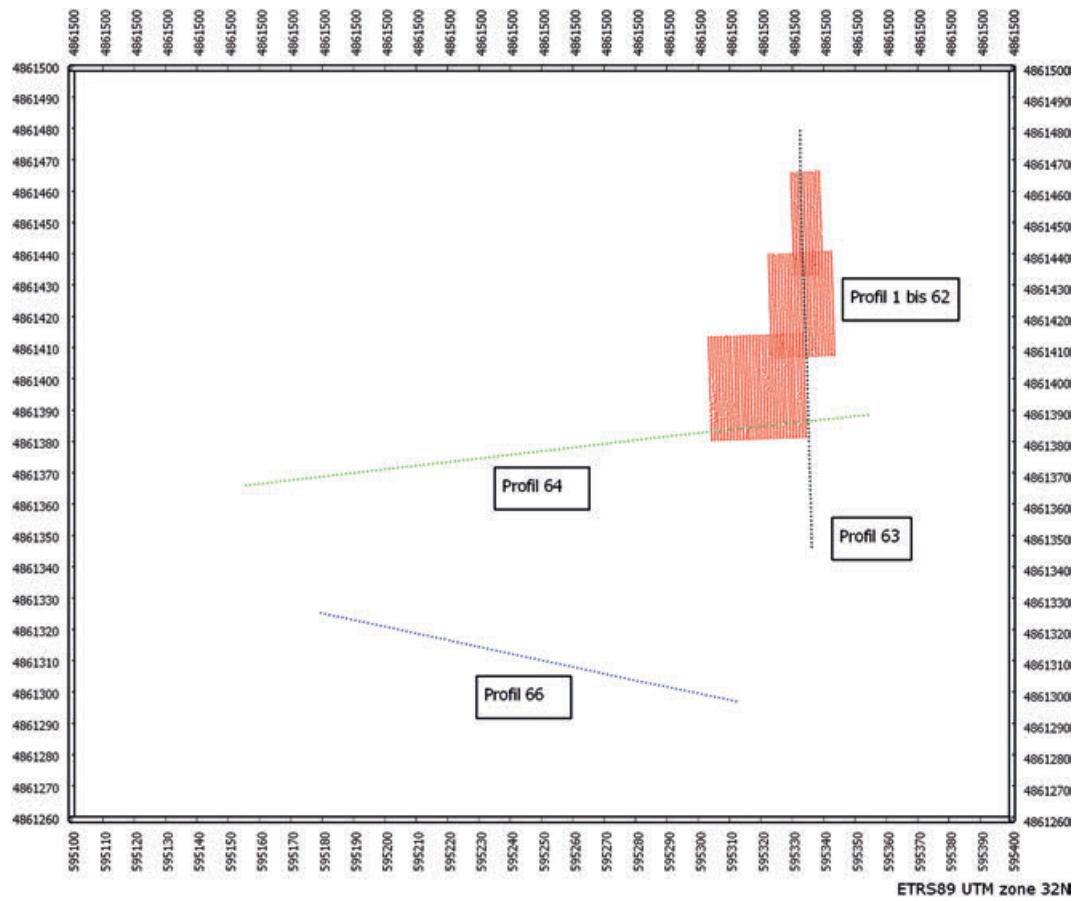


Abb. 1. *Felix Romuliana*. Georeferenzierte Lage der Elektroprofile.

zugehörigen Koordinaten der drei Raumrichtungen. Die durch die Koordinatentripel beschriebenen Raumpunkte liegen nicht auf einem regulären Raumgitter und repräsentieren somit unterschiedlich große Blöcke des Untergrundmodells.

Die Erzeugung eines regulären vierdimensionalen Datensatzes (einheitliche Blockgröße) und die Sichtbarmachung durch Schneiden in verschiedenen Ebenen wurde mit dem Programm Voxler der Firma Golden Software realisiert.

ERGEBNISSE

Auf der Suche nach aussagekräftigen Teilen des Untergrundmodells wurden die Daten in bestimmten Schnittebenen visualisiert und durchmustert. *Abbildung 2a* zeigt die in dieser Weise erzeugte flächenhafte Darstellungen der Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes in verschiedenen Tiefen. Hier zeigt sich, dass in einem Tiefenbereich um ca. 1,6 m unter GOK (Geländeoberkante) die Widerstandskontraste klare Strukturen abbilden (*Abb. 2b*), die als elektrisch hochohmige Fundamente in einer gut leitenden Umgebung interpretiert werden können.

Der Umstand, dass die Darstellung der Gebäudegrundrisse am besten gelingt, wenn man den Datensatz mittels drei in ihrer Neigung verschiedenen, gegen den Horizont verkippten Ebenen schneidet, deutet darauf hin, dass die Anlage der Fundamente sich nach den damaligen Geländegegebenheiten gerichtet haben muss. Eine Planierung des von der Messfläche erfassten Bereiches vor einer Bebauung ist damit unwahrscheinlich. *Abbildung 3* zeigt die Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes in logarithmischer Darstellung der drei langen Bodenwiderstandsprofile.

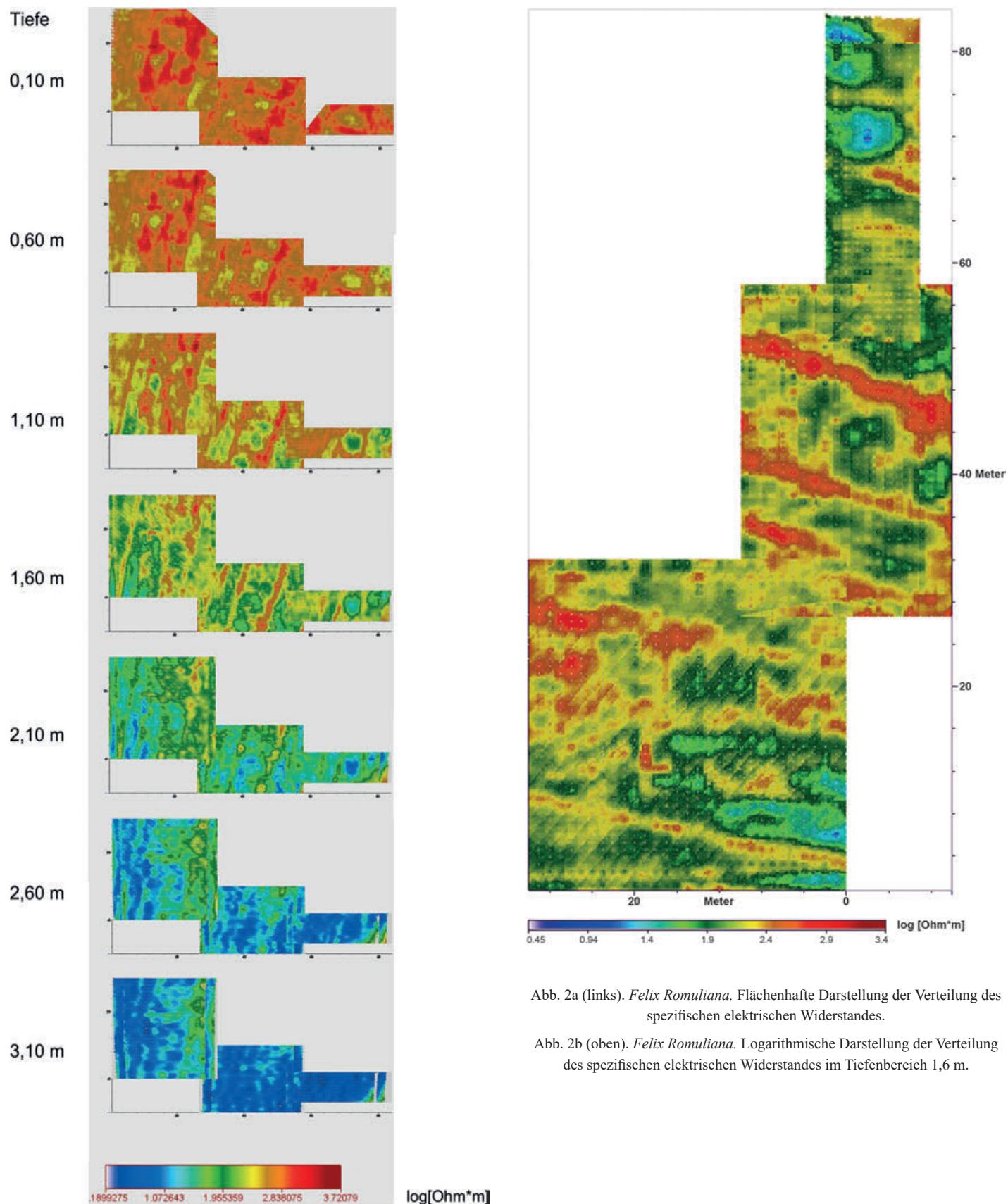


Abb. 2a (links). *Felix Romuliana*. Flächenhafte Darstellung der Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes.

Abb. 2b (oben). *Felix Romuliana*. Logarithmische Darstellung der Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes im Tiefenbereich 1,6 m.

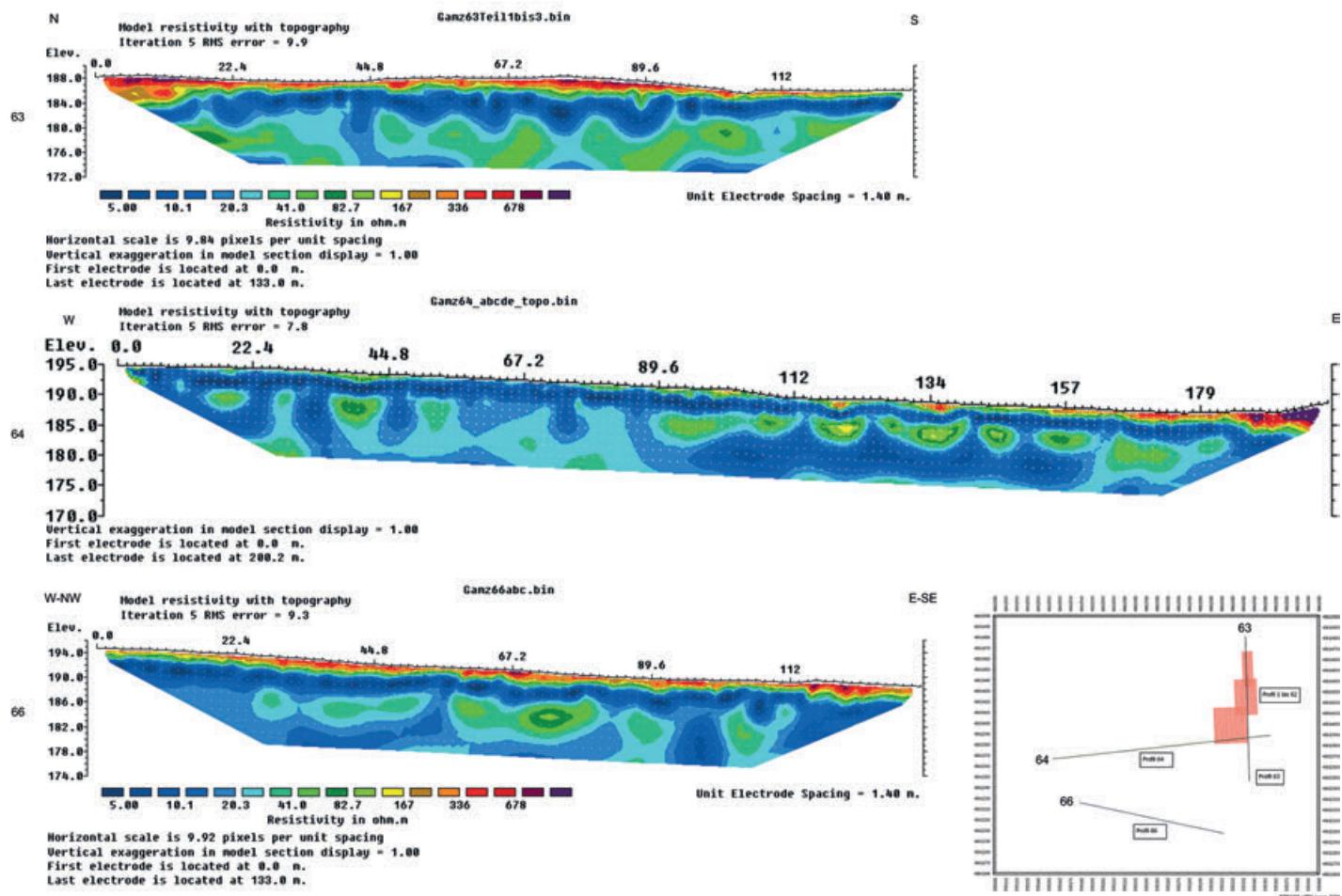


Abb. 3. Felix Romuliana. Verlängerte Geoelektrikprofile.

AUSWERTUNG

Bereits 2007 wurde von T. Schüler im Innenbereich des Palastes der vertikale Magnetfeldgradient mit einem Fluxgate-Gradiometer FM36 der Firma Geoscan Research auf ca. 1,7 ha mit einem Messpunktabstand von 0,25 m × 0,5 m kartiert.

Das Hauptergebnis der Kartierung des magnetischen Gradienten ist die Kartendarstellung dieser Größe in einem Magnetogramm. Für eine erste Übersichtsmessung auf archäologischen Stätten ist die Magnetfeldgradientenkartierung auch deshalb so erfolgreich und oft verwendet, weil hier, abgesehen von Fehlerbereinigungen keine weiteren rechentechnischen Schritte für eine Erstauswertung unternommen werden müssen. Das alleinige Darstellen des Magnetogramms in einem geeigneten Dynamikbereich liefert oftmals schon viele Details hinsichtlich der im Boden verborgenen Strukturen in Blickrichtung einer Draufsicht. Abbildung 4 zeigt das gesamte Magnetogramm des Innenbereiches mit gekennzeichneten Anomalien.

Allerdings ist dabei eine Aussage über die Tiefenlagen dieser Strukturen ohne eine weiterführende Auswertung der Messdaten nicht möglich. Die Modellierung von geometrisch ausgedehnten magnetischen Quellen ist eine Möglichkeit, Tiefenlagen von beispielsweise Fundamentstrukturen abzuschätzen.

Im Unterschied dazu erbrachte die 2012 durchgeführte Geoelektrikmessung erst nach hier nötigen Modellrechnungen, dann aber einen räumlichen Datensatz über die Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes im Untergrund der untersuchten Fläche. Aus diesem Ergebnisdatensatz lassen sich in frei wählbaren Schnittebenen Widerstandsverteilungen darstellen. Damit ergaben sich zwei Möglichkeiten für den Vergleich der Datensätze bei der Methoden:

- 1) Eine Durchmusterung der horizontalen Schnittebenen zeigte, dass sich an vielen Stellen die archäologischen Befunde sowohl in den Ergebniskarten der Elektrik als

Abb. 4. *Felix Romuliana*. Magnetogramm der Gradientenkartierung 2007.

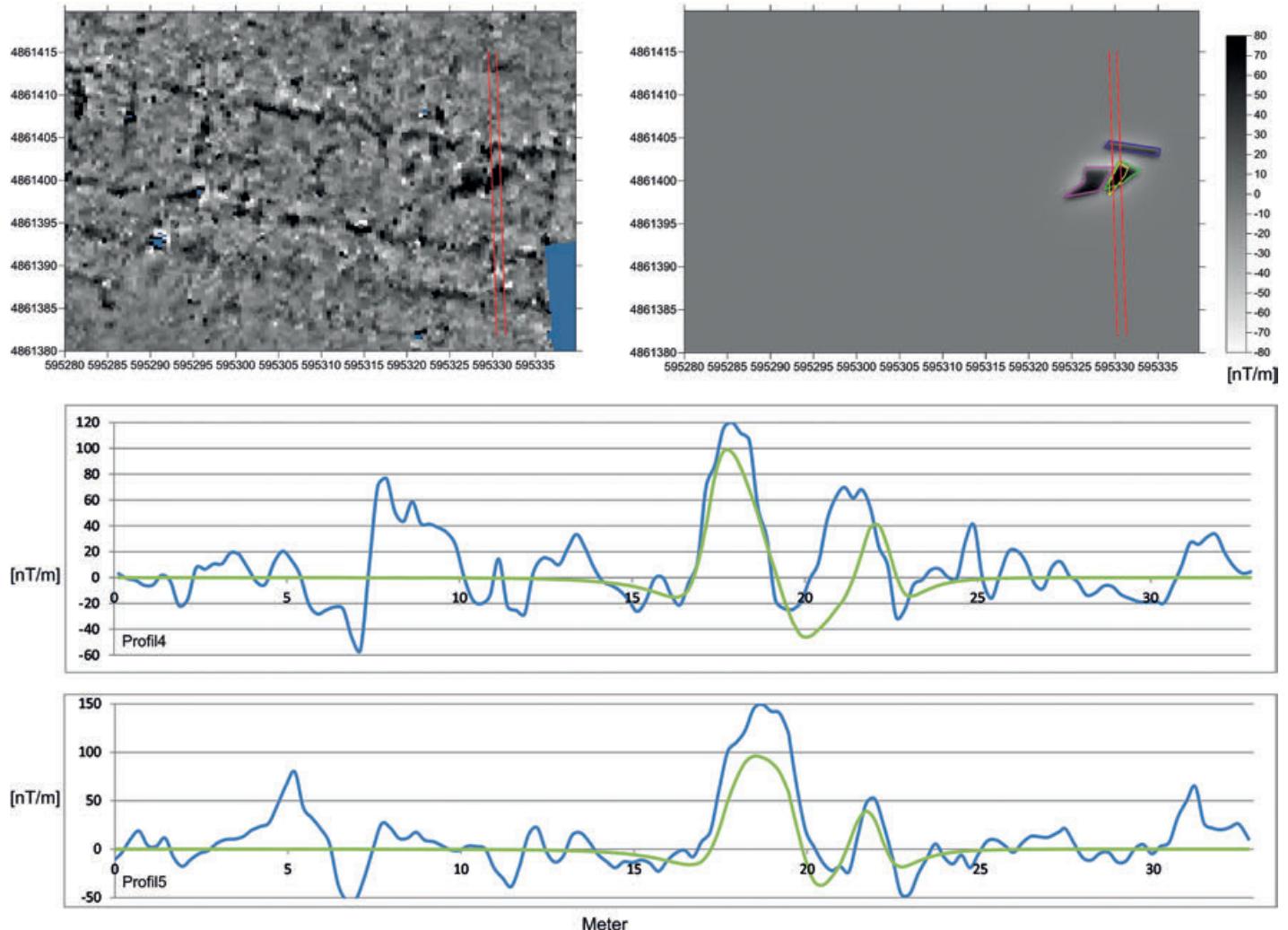
Vorwärtsmodellierung Geomagnetik Felix Romuliana Innenbereich


Abb. 5. *Felix Romuliana*. Ergebnisse der Vorwärtsmodellierung für Gradiometerdaten.

auch in denen der Magnetik abzeichnen. An anderen Stellen zeigt nur eine der beiden verwendeten Methoden Anomalien (siehe Abb. 7).

- 2) Nach einer Modellierung von magnetischen Quellen mit prismatischer Form war es möglich, auch vertikale Schnittebenen beider Methoden zu vergleichen (siehe Abb. 6).

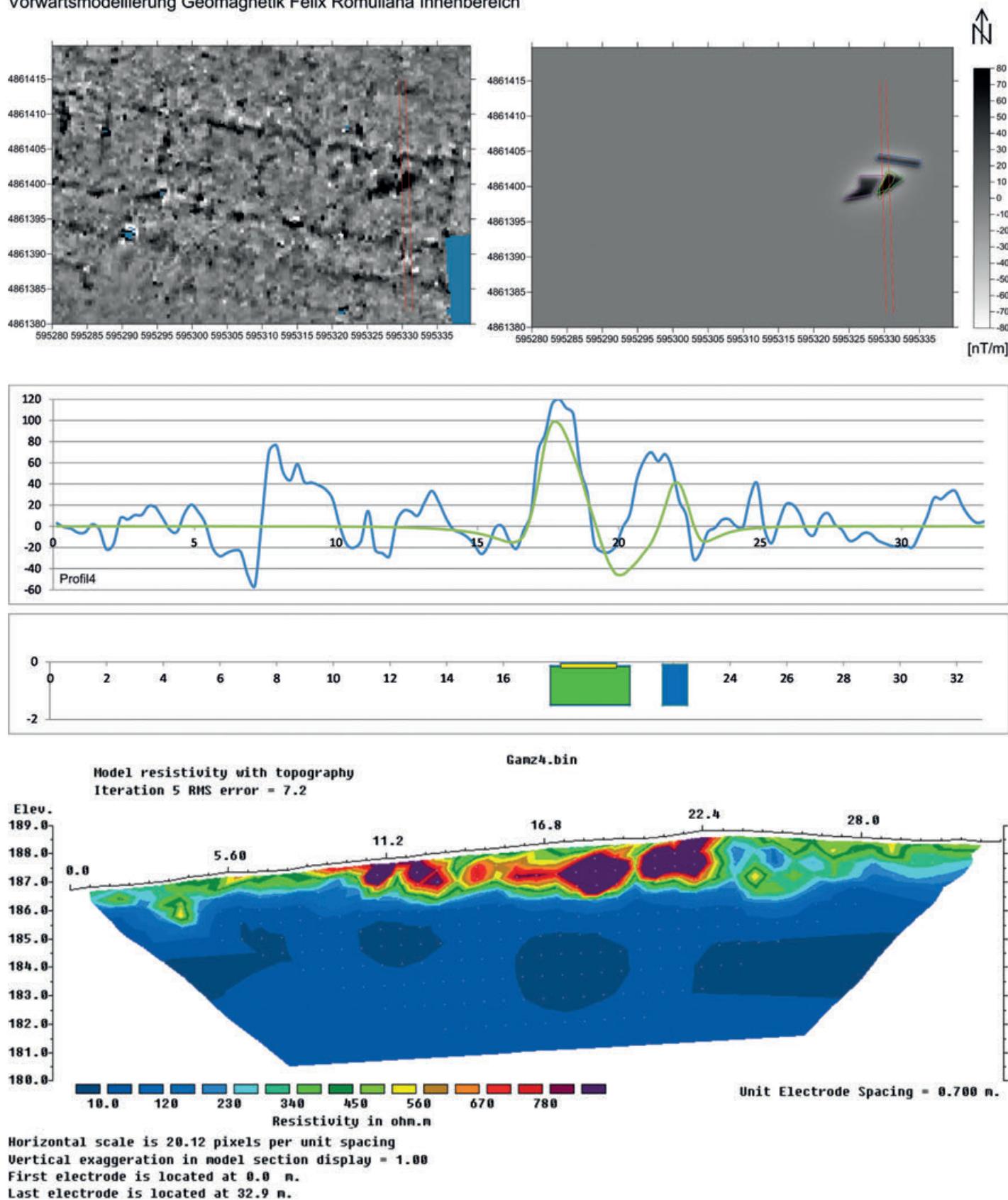
Für die Interpretation der damit sichtbar gewordenen Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Ergebnisse beider Methoden ist das Verständnis der Tiefeninformation und der Ortsauflösung in Abhängigkeit von der Tiefe für die jeweilige Methode wichtig:

In der Archäomagnetik werden für eine magnetische Kartierung häufig Gradiometer eingesetzt, die zwei Sensoren in verschiedenen Höhen besitzen. Gradiometer dieses Typs reagieren stark auf oberflächennahe Strukturen,

da die untere Sonde weitaus kräftiger auf den Störkörper reagiert als die obere, während tiefliegende Objekte beide Sonden gleichermaßen beeinflussen. Deshalb ist der gemessene Differenzwert für oberflächennahe Objekte größer als der für ferne, so dass sich archäologische Strukturen, die sich meist nahe unter der Oberfläche befinden, deutlich abzeichnen, wohingegen tieferliegende geologische Quellen in ihrer Wirkung geschwächt werden¹. Ebenso lässt sich für die Wirkung einer einzelnen Quelle sagen, dass die oberflächennäheren Teile (beispielsweise eine verborgene Mauerkrone) eine größere Auswirkung auf den Messwert ausüben als die oberflächenferneren (beispielsweise der untere Abschluss eines Fundamentes). Da sowohl Messung als auch Modellierung den gleichen

¹ THOMPSON / OLDFIELD 1986.

Vorwärtsmodellierung Geomagnetik Felix Romuliana Innenbereich

Abb. 6. *Felix Romuliana*. Modellkörperschnitte der Magnetik und Elektrik.

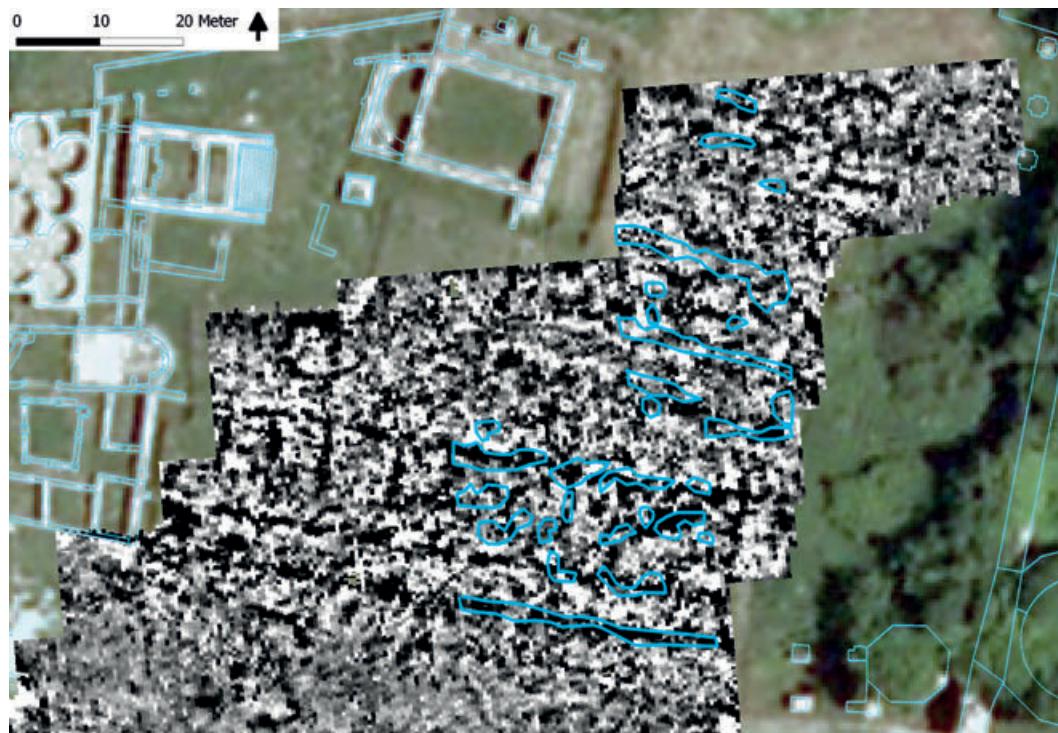


Abb. 7. *Felix Romuliana*. Bereiche mit hohem Bodenwiderstand (blau umrandet) auf Magnetogramm der Gradientenkartierung geplottet.

physikalischen Feldgleichungen unterliegen, gilt das beschriebene Abhängigkeitsverhalten zwischen Ursache und Wirkung bezüglich ihrer Entfernung zueinander auch für die Modellierung. Eine Änderung der Modellkörpergeometrie an der Unterseite des Modellkörpers führt zu kleineren Änderungen der simulierten Messkurve als eine vergleichbare Änderung der Modellkörpergeometrie an der Oberseite des Modellkörpers. Damit erbringt eine Magnetik-Modellierung die Oberkante der Mauerreste bzw. Fundamente in einer höheren Lagegenauigkeit gegenüber anderen tieferliegenden Bereichen. Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse der Vorwärtsmodellierung für das Magnetogramm der Gradiometerkartierung 2007. Das Magnetogramm dieser Abbildung oben links zeigt Teile der Gebäudestruktur als positive Anomalien. Eine Nachbildung der Verhältnisse durch vier prismatische Modellkörper im östlichen Bereich erzeugte das simulierte Magnetogramm rechts oben. Der Werteverlauf beider Magnetogramme entlang zweier Profillinien der Geoelektrik (Profil 4 und 5) sind in den beiden Diagrammen miteinander verglichen. Dabei zeigen die grünen Kurven die simulierten Werte, die blauen Kurven die gemessenen und fehlerbereinigten Werte.

Auch das Auflösungsvermögen der Geoelektrik sinkt mit zunehmender Erkundungstiefe. Im speziellen Fall der hier vorliegenden Messergebnisse herrschen jedoch die

größten Widerstandskontraste zwischen Fundamenten und anstehendem Boden. In diesem Tiefenbereich lieferte die 2D-Modellierung mit der Software RES2Dinv die klargestellten Strukturen. Die so erhaltenen Fundamentunterkanten können als Randbedingung für die Vorwärtsmodellierung der Magnetik herangezogen werden. In Abbildung 6 werden die Modellkörperschnitte der Magnetik und Elektrik gegenübergestellt. Entlang des Profils 4 der Geoelektrik sind die Werte des Magnetogramms (oben links) in nT / m über der Profillänge in m als blaue Linie dargestellt. Im Bereich zwischen 14 und 24 m zeigt die grüne Kurve des synthetischen Magnetogramms (oben rechts) die der blauen Kurve angenäherten, berechneten Anomaliewerte der modellierten magnetischen Störkörper. Die Geometrie und Lage dieser prismatischen Modellkörper ist unterhalb der genannten Kurven im Profilschnitt (Profillänge über Profilltiefe) abgebildet. Die Aufsicht auf die Modellkörper ist ebenfalls im synthetischen Magnetogramm (oben rechts) zu sehen.

Bei dem Vergleich beider Modelle ist zu berücksichtigen, dass die Modellentwicklung der Elektrik frei ist gegenüber der Lage und Form von Grenzflächen, wohingegen der Modellierungsvorgang der Magnetik programmbedingt (das Programm wurde für die Modellierung von Fundamentkörpern entwickelt) die Grundform eines stehenden n-eckigen Prismas für den Modellkörper vor-

schreibt. Ein zweiter Unterschied besteht in der Tatsache, dass die verwendete Modellierungsmethode der Elektrik zweidimensional, die der Magnetik dreidimensional (s. Aufsicht auf die Modellkörper in *Abbildung 6*, rechts oben) arbeitet, was bedeutet, dass Einflüsse von Ursachen, die im Nachbarbereich des Profils liegen und den wahren Messwert mitbestimmen, durch das Modell der Elektrik nicht beschrieben werden. Beide Unterschiede können als systematische Fehler bezüglich des Abgleichs der Modelle verstanden werden und zu Modellunterschieden führen, die nicht die wahren Gegebenheiten abbilden. So sind die Ecken der Modellkörperschnitte der magnetischen Störkörper der prismatischen Grundform geschuldet und in Hinblick auf die tatsächlichen Verhältnisse nicht überzubewerten.

Eine Gemeinsamkeit beider Modelle ist die Übereinstimmung der lateralen Lage der Flächenschwerpunkte, wobei im Elektrikmodell eine Widerstandsanomalie im Profillängsbereich von 20 bis 21 m existiert, die keine Entsprechung im Störkörperensemble der Magnetik findet. Als Ursache dafür kommt eine Lockermaterialfüllung mit fehlendem Timazitanteil, eventuell auch ein Hohlraum oder Sandstein / Kalkstein als Baumaterial in Frage.

Die in 2012 von der Bodenwiderstandsuntersuchung erfasste Fläche lässt sich bezüglich der Untersuchungsergebnisse in zwei Teilflächen gliedern; in der südlichen Hälfte fallen die positiven magnetischen Anomalien fast ausnahmslos mit elektrisch hochohmigen Bereichen zusammen, während in der nördlichen Hälfte fast durchweg Gegenteiliges der Fall ist. *Abbildung 7* verdeutlicht diesen Sachverhalt.

In Bereichen mit Überdeckung der Anomalien beider Methoden (s. *Abb. 7*, unterer Teil) lassen sich mit oben be-

schriebener Methode die Gebäudereste in ihrer vertikalen Erstreckung abschätzen. Die so ermittelte Höhe der Mauerkörper inklusive Fundament beträgt ca. 130–140 cm, die Tiefenlage der oberen Mauerabschlüsse schwankt dabei zwischen 10 und 20 cm. Ein Vergleich mit den Verhältnissen der bereits ergrabeneten Bereiche westlich der Prospektionsfläche zeigen in Dimension und Tiefenlage vergleichbare Mauerkörper. Es ist davon auszugehen, dass sich die freigelegten archäologischen Strukturen in nahezu gleichem Erhaltungszustand in der angrenzenden Prospektionsfläche fortsetzen.

In Bereichen fehlender Überdeckung der Anomalien fällt der Fundamentkörper in seiner Lage, der durch die hochohmigen Bereiche der Geoelektrik nachgewiesen ist, nicht mit den Bereichen der positiven Magnetfeldanomalien zusammen. Aufgrund des oben beschriebenen Sensitivitätsverlaufs über der Tiefe für die Messung des magnetischen Gradienten ergeben sich zur Erklärung zwei Ansätze:

1. Es könnte anderes Baumaterial für den Mauer- / Fundamentkörper vorliegen, z. B. Kalk- oder Sandstein, welches eine geringe magnetische Suszeptibilität aufweist.
2. Es ist möglich, dass die Mauern tiefgründiger geschleift wurden und heute durch eine mächtigere Deckschicht überlagert werden, als das im südlichen Bereich der Fall ist. In diesem Fall würden die oberflächennahen und zum Bauschuttkörper gehörenden Bruchstücke des Mauerwerkes entsprechend ihrer verschleppten Lage die Magnetfeldanomalien verursachen, die nicht zur Lage des am Ursprungsort verbliebenen Fundamentes passen.

VERGLEICH VON GEOPHYSIKALISCHEN ERGEBNISSEN UND GRABUNGSBEFUNDEN

Die Untersuchungstiefe der folgenden geoelektrischen Profile beträgt ca. 14 m unter Geländeoberkante. In den drei langen Bodenwiderstandsprofilen zeigt sich ein grundsätzlich geschichteter Aufbau des geologischen Untergrundes mit gleichbleibenden Schichtmächtigkeiten. Das Einfallen der Schichten entspricht der Neigung der Oberfläche nach Westen. Unebenheiten der mit eingesessenen Geländeoberkante fallen immer mit Zonen von erhöhtem elektrischem Bodenwiderstand zusammen. Diese können als Fundamente mit Bauschuttüberdeckung deutet werden. Die direkt darunter liegende niederohmige (blaue) Schicht hat eine gleichbleibende Mächtigkeit von ca. 4 m und ist in jedem Bereich der drei Profile anzutreffen. Aufgrund der sehr guten Leitfähigkeit kann dieser

Horizont als erdfeuchte bindig-lehmige Schicht mit Tonanteil interpretiert werden. Eventuell könnte es sich dabei um den Zersatzhorizont des in der Region vorkommenden Konglomerates handeln.

Ab einer Tiefe zwischen 4 und 5 m wechseln die bezüglich der Leitfähigkeit homogenen Verhältnisse zu einer lateral wechselhaften Verteilung des Bodenwiderstandes. Fluviatile Strukturen wie Auswaschungen in Form von Rinnen und Rinnen, Materialumlagerung und damit verbundene Sortierung nach Korngröße können solche heterogenen Gefüge erzeugen. In den Magnetogrammen der Umgebung von *Felix Romuliana* finden sich viele positive Anomalien, die aufgrund ihrer Form an mäandrierende Bachläufe erinnern.

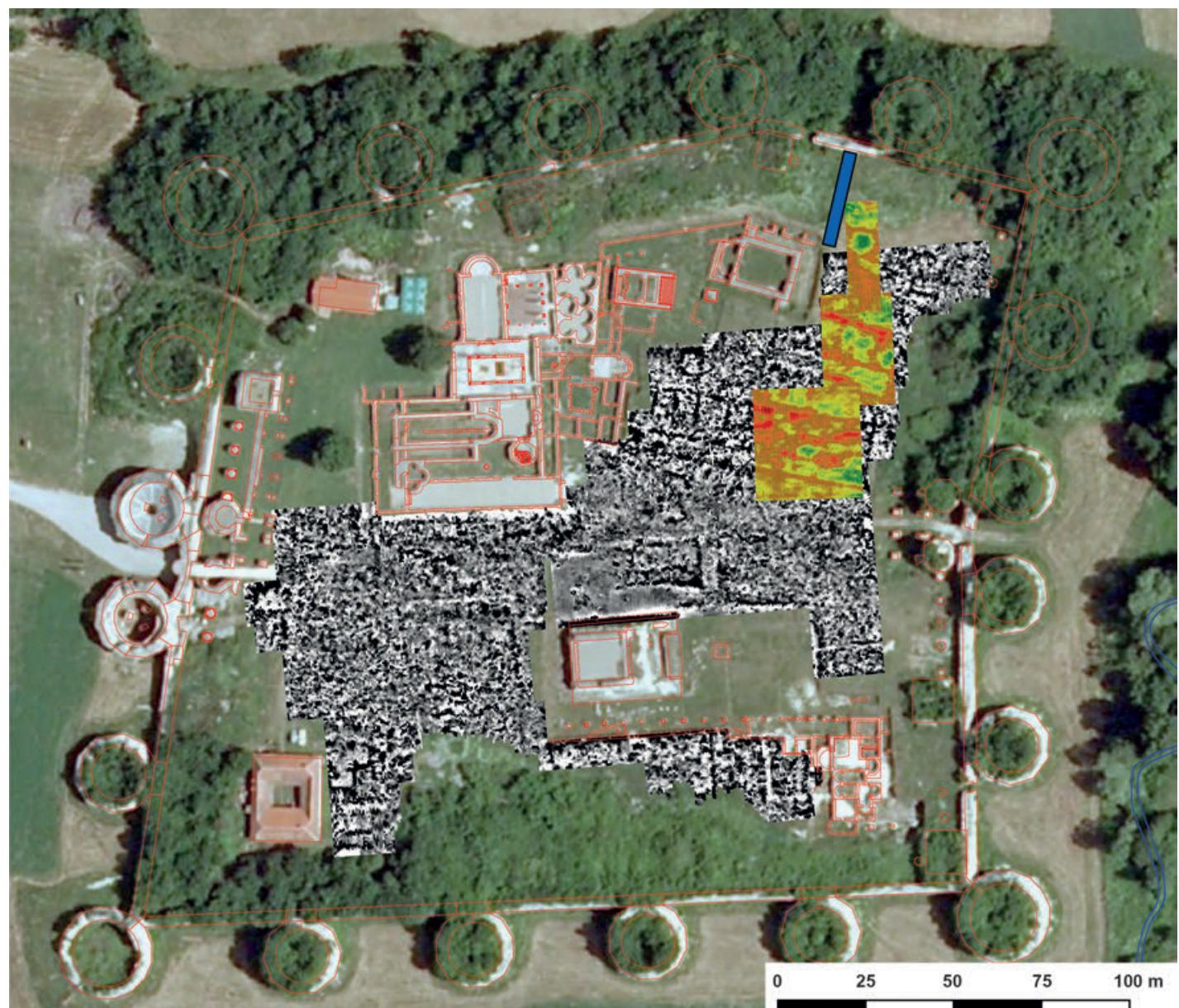


Abb. 8. *Felix Romuliana*. Lagebeziehung Grabungsprofil S10/4 (blau) und Bodenwiderstandsprofile.

Zum Vergleich mit den Grabungsergebnissen in diesem Bereich dient die Sondage S10/4, in der bis in eine Tiefe von ca. 4,5 m die archäologischen Strukturen und Kulturschichten erfasst worden sind². Abbildung 9 zeigt das Ostprofil dieses Schnittes sowie den Planumsbefund in etwa 3 m Tiefe.

Die Grabungsergebnisse und die Ergebnisse der Geoelektrik sollen sowohl in der Vertikalen über die Profile als auch in der Horizontalen über die Plana verglichen werden. Aufgrund der unterschiedlichen Orientierung schneiden sich das Grabungsprofil und die Elektrikprofile unter einem Winkel von ca. 13° (Abb. 8).

Der visuelle Vergleich der Profile in Abbildung 10 ist so vorgenommen worden, dass eine orthogonale Durchsicht durch das Grabungsprofil auf die dahinterliegenden, perspektivisch verkürzten Elektrikprofile dargestellt wird. Der Vergleich zeigt, dass zum Messzeitpunkt der Oberboden durch die Trockenheit einen hohen elektrischen Wi-

² Mit einer geplanten Länge von 30 m und einer Breite von 3 m sollte hiermit eine stratigraphische Verbindung zwischen der Innenfassade der äußeren Festungsmauer des Palastes und der Innenbebauung hergestellt werden. Von der Länge konnten bisher jedoch lediglich 20 m untersucht werden, und bei einer Schnitttiefe von ca. 4,5 m mussten die Arbeiten wegen des eindringenden Wassers abgebrochen werden.

derstand besaß. Weiterhin weist der Bauschutt einen hohen elektrischen Widerstand auf. Gründungsbereiche der Mauerkörper sind von einer Absenkung der Linie gleichen Widerstandes begleitet. Zudem weist die südliche Hälfte beider Profilarten eine horizontale Schichtung auf, wogegen die Schichtgrenze zwischen ungestörtem Bereich und archäologischem Horizont im nördlichen Teil sowohl im geoelektrischen Befund als auch in den Grabungsergebnissen nach Norden hin abfällt. Zum Vergleich mit den Grabungsergebnissen ist keine Skalierung der Geoelektrik bezüglich der Tiefe nötig gewesen.

Das virtuelle Elektrikplanum in *Abbildung 11* mit der Normalenorientierung (0,03 / -0,05 / 1,00) im System

(Norden, Osten, Oben) hat ein mittleres Höhenniveau von 186,75 m. Eine Widerstandsanomalie im virtuellen Elektrikplanum in der Flucht der südlichen ergraben Mauer, für deren Ursache eine Fortsetzung ebendieser Mauer in Betracht kommt, ist in den Widerstandswerten deutlich zu sehen. Eine vergleichbare lineare Anomalie verläuft nördlich der genannten in ähnlicher Orientierung. Eine gedachte Verlängerung dieser Anomalie nach Westen schneidet den Grabungsschnitt in dem stegartigen, nicht ergrabenen Bereich. Auch ein vertikaler Versatz der im Grabungsprofil dokumentierten Schichten beidseitig des Steges lassen Mauerreste im Innenbereich des Steges vermuten.

BIBLIOGRAPHIE

THOMPSON / OLDFIELD 1986

R. THOMPSON / F. OLDFIELD, Environmental Magnetism (London 1986).

ABBILDUNGSNACHWEIS

Abb. 1–6; 10; 11: Schüler/Opelt. – *Abb. 7–8:* Schüler/Opelt auf Basis Orthophoto Geosrbija. – *Abb. 9:* Grafik

H.-J. Köhler, RGK, nach Vorlage G. von Bülow.



Abb. 9. *Felix Romuliiana*. Grabungsschmitt S10/4, Ostprofil I und Planum in ca. 3 m Grabungstiefe.

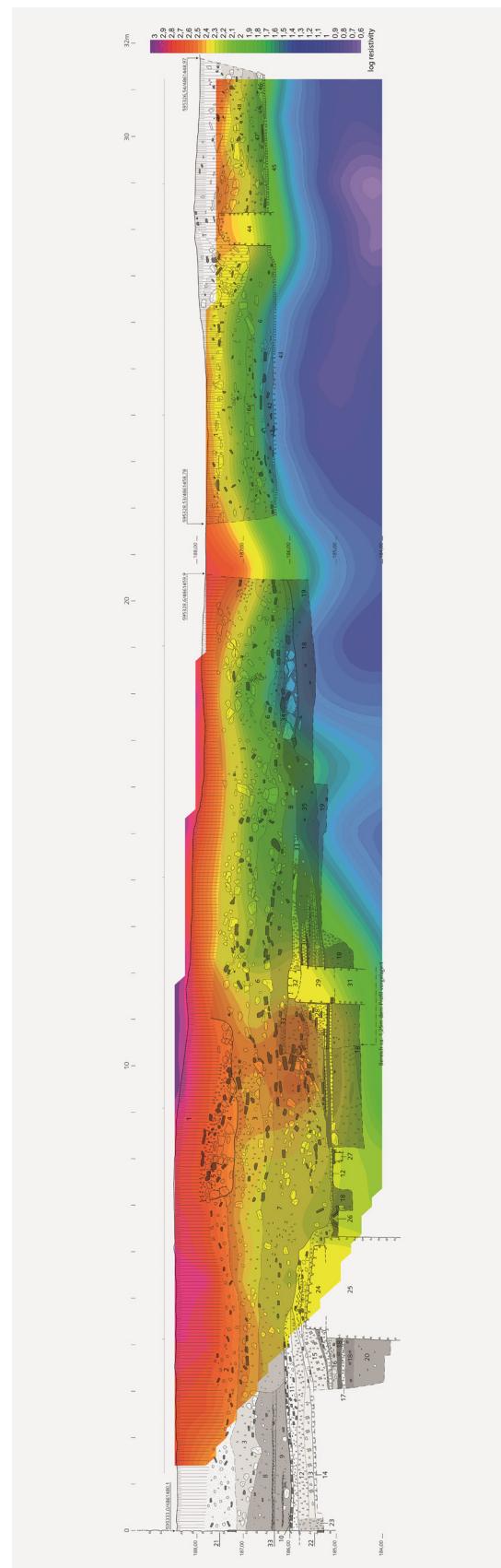


Abb. 10. *Felix Romuliana*, Grabungsprofil (in orthogonaler Draufsicht) vs. Elektrikprofil 62 und 63 (perspektivisch verkürzt durch 13°-Drehung).

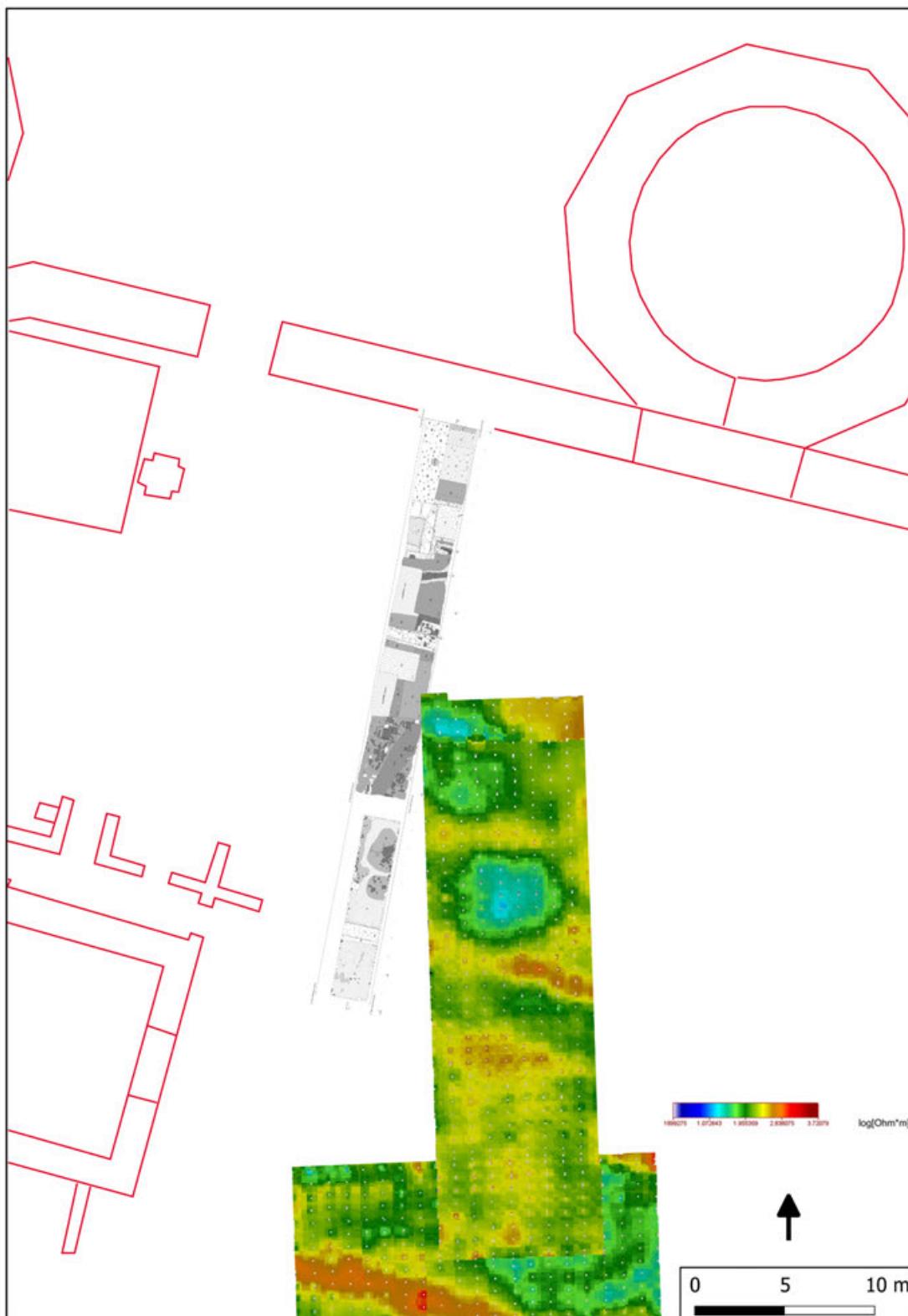


Abb. 11. *Felix Romuliana*. Vergleich Grabungsaufsicht (mittleres Höhenniveau bei 185 m) vs. Horizontalschnitt des Modellkörpers der Widerstandsverteilung der Elektrikprofile 53 bis 62 (virtuelles Elektrikplanum im mittleren Höhenniveau von 186,75 m).

ZUSAMMENFASSUNG

Im Innenbereich von *Felix Romuliana* wurden durch die Autoren im Jahr 2012 Bodenwiderstandsmessungen mittels Gleichstromelektrik durchgeführt. Es wurden flächenhafte Messungen mit einem Elektrodenabstand von 0,7 m und profilierte Messungen mit einem Elektrodenabstand von 1,4 m unternommen. Die Auswertung der Messergebnisse erfolgte einerseits unter Einbeziehung von Sondagegrabungsergebnissen und andererseits durch einen Abgleich mit Ergebnissen einer Magnetfeldgradientenkartierung aus dem Jahr 2007.

Neben den bereits aus dem Magnetogramm ableitbaren Fundamentstrukturen, konnten durch die Geoelektrik weitere bisher unbekannte Fundamentstrukturen detektiert werden. Gemeinsamkeiten und Unterschiede in der Lage der gemessenen Anomalien beider geophysikalischer Methoden eröffnen neue Interpretationsansätze hinsichtlich Materialansprache und Genese der archäologischen Stätte. Neben der Ortung von Fundamentresten konnte die Mächtigkeit der Kulturschicht im Bereich der flächenhaften Erkundung auf ca. 4 m bestimmt werden. In einem neben der Messfläche angelegten archäologischen Grabungsschnitt waren mehrere übereinanderliegende Baustrukturen bis zu einer Tiefe von 4 bis 4,5 m erfasst worden, während eine weitere Abtiefung dieser Sondage wegen des eindringenden Grundwassers nicht möglich war.

In den Einzelprofilen mit einer Messtiefe von 14 m wurde unterhalb der dort oft deutlich schwächer ausgebildeten hochohmigen Deckschicht ein sehr gut leitender ca. 4 m mächtiger Horizont nachgewiesen. Erdfeuchtes bindiges Material mit hohem Tonanteil, welches als Wasserstauer evtl. temporär einen gespannten Grundwasserspiegel erzwingt, ist hier sehr wahrscheinlich. Darunter zeigt ein Bereich mit lateral wechselhafter Verteilung des Bodenwiderstandes eine heterogene Verteilung der Korngrößen im anstehenden Sediment an.

ABSTRACT

In 2012, the authors carried out ground resistance measurements by means of direct current electrics (geoelectrics) in the interior part of *Felix Romuliana*. Planar measurements with an electrode gap of 0.7 m and profile measurements with an electrode gap of 1.4 m were implemented. The evaluation of the measurement results was made with the help of test excavations (sondages) and by comparison with the results of the magnetic field gradient mapping from the year 2007.

In addition to the foundation structures that had already been obtained from the magnetogram, other previously unknown foundation structures were able to be detected by the geoelectrics. Similarities and differences in the position of the measured anomalies of both geophysical methods open up new interpretative approaches with regard to the material interpretation and genesis of the archaeological site. Aside from locating the remains of foundations, it could be determined that the thickness of the occupation layer in the area of the planar survey was about 4 m. In an archaeological excavation section next to the measuring area, several superimposed building structures were recorded down to a depth of 4 to 4.5 m, however, a further deepening of this trial trench was not possible due to the penetrating groundwater.

In the individual profiles, which had a measuring depth of 14 m, a well-conductive, approximately 4 m thick horizon was verified below the often less developed, highly resistive top stratum. An earth-moist, cohesive material with a high proportion of clay is very likely here, which, acting as a water dam, could temporarily cause a pressurised groundwater level. Below that, an area with a laterally variable distribution of ground resistance indicates a heterogeneous distribution of grain sizes in the *in-situ* sediment.

(Translation: M. Tate)